

Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben

Verfahrensunterlage

Titel: Endlager Morsleben
Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem
Programm PROSA

Autor: Niemeyer, M., Resele, G., Wilhelm, St., Holocher, J., Poppei, J., Schwarz, R.

Erscheinungsjahr: 2009

Unterlagen-Nr.: P 277

Revision: 00

Unterlagenteil:



Zusammenfassung

Stichworte: Stilllegung; Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben; Langzeitsicherheitsanalyse; schwach- und mittelaktive Abfälle; Salzstock; deterministisch; probabilistisch; geologisches Endlager

Für die Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) hat der Betreiber, das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), bei der zuständigen Genehmigungsbehörde, dem Ministerium für Raumordnung und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt, ein atomrechtliches Planfeststellungsverfahren beantragt. Für dieses Genehmigungsverfahren wird der Langzeitsicherheitsnachweis für das verfüllte und verschlossene Endlager auf Basis standortspezifischer Sicherheitsanalysen geführt und der Genehmigungsbehörde vorgelegt. Anhand verschiedener Szenarien werden die Auswirkungen möglicher zukünftiger Entwicklungen des Endlagers hinsichtlich des Austrags von Radionukliden in die Biosphäre untersucht.

Mit dem Stilllegungskonzept werden vier Ziele verfolgt: Erstens wirkt die Verfüllung durch ihre Stützwirkung der weiteren Ausbildung von Auflockerungszonen entgegen und erhält die Standsicherheit des Grubengebäudes und damit die Barrierenwirkung der natürlichen Barrieren des Endlagers. Dies verringert die Wahrscheinlichkeit, dass sich nach Verschluss des Endlagers ein weiterer Lösungszutritt bildet (neben dem bestehenden Lösungszutritt in das Lager H der Grube Marie) und erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass die Einlagerungsbereiche trocken bleiben. Im Falle eines Lösungszutritts verringert die Verfüllung zweitens die Bewegung von Salzlösung im Grubengebäude und verzögert damit sowohl deren Zutritt in die Einlagerungsbereiche als auch die anschließende Auspressung von kontaminierter Salzlösung. Speziell werden zwischen den potentiellen Zutrittsstellen von Lösung in das Grubengebäude und den Einlagerungsbereichen Abdichtungen errichtet, d.h. Auffahrungen mit besonderen Anforderungen bezüglich der Dichtheit verfüllt. Drittens begrenzt die Verfüllung das Lösungsvolumen im Grubengebäude und damit das Ausmaß von Lösungs- und Umlöseprozessen. Viertens verringert sie Konvergenzprozesse und damit einen wesentlichen Prozess, der den Radionuklidtransport aus dem Grubengebäude in das Hutgestein antreiben kann.

Die möglichen Transportpfade für potentiell zutretende Wässer und austretende kontaminierte Lösung können nicht durch bauliche Maßnahmen auf wenige, ausgezeichnete Pfade eingeschränkt werden. Daher muss die Sicherheitsanalyse eine große Zahl möglicher künftiger Entwicklungen und Zustände des Gesamtsystems abdecken. Die in diesem Bericht dokumentierte Analyse der Langzeitsicherheit beruht auf einer modellhaften Nachbildung der maßgebenden Prozesse in Verbindung mit einer abstrahierten Darstellung der geometrischen Verhältnisse. Die Vielzahl der möglichen künftigen Entwicklungen und Zustände wird – neben der geometrischen Abstraktion – durch die Berücksichtigung mehrerer Szenarien und eine umfangreiche, breite und simultane Variation der maßgebenden Parameter im Rahmen von probabilistischen Modellrechnungen abdeckend behandelt.

Obwohl das Modell die verschiedenen Prozesse, welche die Langzeitsicherheit des Endlagers Morsleben beeinflussen, in vereinfachter Form beschreibt, enthält es dennoch eine große Zahl an Parametern. Diese Parameter weisen vielfach eine natürliche Variabilität auf, und ihre maßgebenden



den Werte sind mit Ungewissheiten behaftet. Die Auswirkungen dieser Variabilität und der Ungewissheiten werden ebenfalls durch die probabilistischen Modellrechnungen untersucht. Darüber hinaus erlauben diese Rechnungen, diejenigen Parameter zu bestimmen, die den größten Einfluss auf die Strahlenexposition aufweisen, ohne dass eine Einschränkung auf die Variation einzelner Parameter erforderlich ist oder unrealistisch konservative Parameterkombinationen die Schlussfolgerungen verfälschen.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, dass mit den zu erwartenden Eigenschaften der Verfüllung und mit einer relativ großen Toleranzbreite sowohl die abdichtende Wirkung als auch die Transportverzögerung in ausreichendem Maße erzeugt werden können. Variationen dieser Eigenschaften bewirken oft gegenläufige Effekte: Eine hohe Gasbildungsrate, zum Beispiel, verstärkt zwar das Auspressen der kontaminierten Lösung aus dem Einlagerungsbereich, verzögert jedoch zuvor den Lösungszutritt und verringert die zutretende Lösungsmenge. Durch das Stilllegungskonzept wird außerdem der Extremfall ausgeschlossen, dass Einlagerungsgrubenbaue über durchgängige Pfade mit relativ hoher Permeabilität mit dem Salzspiegel verbunden sind, d. h. über Pfade mit hohen Transportraten und -geschwindigkeiten.

Eine etwas andere Bedeutung kommt der Verfüllung innerhalb der Einlagerungsbereiche zu. Hier ist nicht die Behinderung der Bewegung von Salzlösung von Bedeutung, sondern hauptsächlich die Stützwirkung zur Verringerung der Konvergenz der Hohlräume. Dies ist besonders im Südfeld wichtig, wo die Einlagerungsgrubenbaue hydraulisch mit zahlreichen Abbauen verbunden sind und eine hohe Konvergenzrate zu einer hohen Auspressrate für kontaminierte Salzlösung führen würde.

Die durch die Verfüllmaßnahmen eingebrachten Versatzstoffe können mit Salzlösungen unterschiedlicher Zusammensetzungen, die sich in der Grube bilden können, reagieren und dabei ihre hydraulischen Eigenschaften ändern. Dies gilt insbesondere für die Abdichtungen, weil hier – verglichen mit den übrigen verfüllten Grubenbauen – aufgrund von hohen hydraulischen Gradienten und der Geometrie relativ große Lösungsmengen mit wenig Versatzstoff in Kontakt kommen. Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen jedoch, dass die Abdichtungen wegen ihrer anfangs niedrigen hydraulischen Permeabilität ausreichend lange wirken, bis die treibenden Kräfte für die Radionuklidfreisetzung, Gasbildung und Konvergenz, weitgehend zum Erliegen gekommen sind.

Nach den Berechnungsergebnissen hängt die Langzeitsicherheit bei einer Realisierung des vorgesehenen Stilllegungskonzepts nicht in ausgeprägtem Maße von einzelnen Parametern, d.h. von einzelnen Gegebenheiten ab, sondern wird durch eine Vielzahl von Sachverhalten und Prozessen mit teilweise ausgleichenden Wirkungen bestimmt.

Die Modellrechnungen zeigen, dass selbst unter konservativer Vernachlässigung verschiedener Prozesse und für breite Variationsbereiche der Modellparameter die resultierende Strahlenexposition deutlich unter dem Wert des § 47, Abs. 1 StrlSchV für die effektive Dosis von 0,3 mSv/a liegt. Selbst für wenig wahrscheinliche Kombinationen von Parameterwerten beim Zusammentreffen zahlreicher ungünstiger Sachverhalte liegen die berechneten Dosiswerte unterhalb von 0,03 mSv/a, also einen Faktor 10 unterhalb des Wertes von § 47, Abs. 1 StrlSchV.



Im ERAM ist ein bedeutender Anteil der Radiotoxizität des Abfallinventars auf Radiokohlenstoff (^{14}C) in organischer Form zurückzuführen, der bei mikrobieller Umsetzung unter anaeroben Verhältnissen überwiegend in die Gasphase übergeht. Weil zudem bei der chemischen Umsetzung der Abfallbestandteile vergleichsweise große Gasmengen gebildet werden, ist a priori nicht auszuschließen, dass ^{14}C auf dem Gaspfad in die Atmosphäre gelangt und zu einer zusätzlichen Strahlenexposition der Bevölkerung führen kann. Eine detaillierte Betrachtung zeigt, dass ein signifikanter Austritt von ^{14}C auf dem Gaspfad aus der Grube erst nach deren Volllaufen möglich ist. Selbst für ungünstige Modellannahmen und Parameterkombinationen liegt die resultierende Strahlenexposition um beinahe fünf Größenordnungen unterhalb des Wertes von 0,3 mSv/a gemäß § 47, Abs. 1 StrlSchV.

Weil das Wirtsgestein des ERAM – Salz – von künftigen Generationen als Rohstoff oder als Speichermedium genutzt werden könnte, wurden auch die Folgen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens untersucht. Die Analyse ergibt, dass aufgrund eines unbeabsichtigten menschlichen Einwirkens keine nennenswerte Strahlenexposition zu erwarten ist.

ERAM
Morsleben



Inhaltsverzeichnis

Seite

Zusammenfassung.....	3
Tabellenverzeichnis.....	8
Abbildungsverzeichnis.....	9
Verzeichnis der Anhänge	12
Begriffsverzeichnis	13
Abkürzungsverzeichnis	19
1 Einleitung	20
2 Verfüllkonzept	24
3 Nachweisführung und Berechnungsmethoden	27
3.1 Prozesse	27
3.1.1 Zutritt von Lösungen	28
3.1.2 Aufsättigung der zutretenden Flüssigkeiten am Steinsalz und Umlöseprozesse	29
3.1.3 Zutritt von Lösungen in abgedichtete Bereiche	30
3.1.4 Konvergenz.....	30
3.1.5 Gasbildung.....	31
3.1.6 Frac-Bildung	31
3.1.7 Mobilisierung von Radionukliden	32
3.1.8 Sorption	33
3.1.9 Transportvorgänge in der Grube	33
3.1.10 Transport durch Hutgestein und Deckgebirge	34
3.1.11 Verdünnung in den oberflächennahen Grundwässern	35
3.2 Referenzszenario.....	35
3.3 Konzept der quantitativen Analyse	39
3.3.1 Volllaufen der übrigen Grube	45
3.3.2 Hohlraumvergrößerung durch Auf- und Umlösungen	47
3.3.3 Abdichtungen, Druckausgleich und Lösungszutritt	49
3.3.4 Hohlraumkonvergenz.....	51
3.3.5 Gasbildung.....	51
3.3.6 Radionuklidmobilisierung	53
3.3.7 Auspressung von Lösung aus den Einlagerungsbereichen.....	54
3.3.8 Transportverzögerung im Abdichtsystem	57
3.3.9 Mischungsbereich	60
3.3.10 Transportverzögerung in Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär)	61
3.3.11 Verdünnung im oberflächennahen Grundwasser und Berechnung der Strahlenexposition	64
3.4 Geometrische Abgrenzung von Einlagerungsbereichen und Abdichtungen.....	66
3.5 Weitere Szenarien	70
3.5.1 Hauptanhydrit als Wegsamkeit zum Ostfeld	70
3.5.2 Auflockerungszone um Abdichtung im Hauptanhydrit	70
3.5.3 Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube.....	71
3.5.4 Unwirksame Abdichtungen	72
3.5.5 Korrosion des Salzbetons in der übrigen Grube	72
3.5.6 Hohlraumneubildung aufgrund nachfließender Wässer	72
3.5.7 Durchströmung von Einlagerungsbereichen.....	73



3.5.8	Entstehung neuer Wegsamkeiten im Hutgestein.....	73
3.5.9	Mangelhafte Abdichtung Schacht Bartensleben.....	74
3.5.10	Instantan vollgelaufene übrige Grube.....	77
4	Modellparameter.....	78
4.1	Allgemeine nicht radionuklidspezifische Parameter.....	78
4.2	Nicht radionuklidspezifische Parameter der Einlagerungsbereiche.....	82
4.3	Radionuklid- und elementspezifische Daten.....	90
4.4	Parameter zu den weiteren Szenarien.....	91
4.4.1	Parameter des Hauptanhydrit als Wegsamkeit zum Ostfeld.....	91
4.4.2	Auflockerungszone um Abdichtung im Hauptanhydrit.....	93
4.4.3	Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube.....	94
4.4.4	Unwirksame Abdichtungen.....	94
4.4.5	Korrosion des Salzbetons in der übrigen Grube.....	94
4.4.6	Hohlraumneubildung aufgrund nachfließender Wässer.....	95
4.4.7	Durchströmung von Einlagerungsbereichen.....	95
4.4.8	Neue Wegsamkeiten durch das Hutgestein.....	95
4.4.9	Mangelhafte Abdichtung Schacht Bartensleben.....	96
4.5	Gefährdungspotential.....	96
5	Ergebnisse der Modellrechnungen.....	99
5.1	Deterministische Berechnungen.....	99
5.1.1	Deterministische Berechnungen für das Referenzszenario.....	99
5.1.1.1	Fall „ohne Gaspolster“.....	100
5.1.1.2	Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“.....	101
5.1.1.3	Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“.....	103
5.1.2	Alternative Szenarien.....	105
5.1.2.1	Hauptanhydrit als Wegsamkeit zum Ostfeld.....	105
5.1.2.2	Auflockerungszone um Abdichtung im Hauptanhydrit.....	107
5.1.2.3	Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube.....	110
5.1.2.4	Unwirksame Abdichtungen.....	116
5.1.2.4	Korrosion des Salzbetons in der übrigen Grube.....	120
5.1.2.5	Neue Wegsamkeiten durch das Hutgestein.....	120
5.1.2.6	Mangelhafte Abdichtung Schacht Bartensleben.....	124
5.1.2.7	Instantan vollgelaufene übrige Grube.....	127
5.2	Probabilistische Rechnungen.....	131
5.2.1	Ergebnisse.....	131
5.2.1.1	Fall „ohne Gaspolster“.....	132
5.2.1.2	Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“.....	133
5.2.1.3	Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“.....	134
5.2.2	Relevante Parameter.....	135
5.3	Zusammenfassung der Rechnungen zur Radionuklidausbreitung.....	136
5.4	Konsequenzen für die wasserrechtlich relevanten Abfallinhaltsstoffe.....	137
6	Bewertung der Modellrechnungen und Schlussfolgerungen.....	139
	Literaturverzeichnis.....	144
Gesamtblattzahl der Unterlage, einschließlich aller Anhänge:		457



Tabellenverzeichnis

	<u>Seite</u>
Tabelle 3-1	Auflistung der im Modell integrierten Prozesse und Vorgänge..... 41
Tabelle 4-1	Referenzwerte, Bandbreiten und Verteilungsfunktionen einer Auswahl von allgemeinen nicht radionuklidspezifischen Modellparametern 81
Tabelle 4-2	Referenzwerte, Bandbreiten und Verteilungsfunktionen einer Auswahl der nicht radionuklidspezifischen Parameter der Abdichtsysteme 84
Tabelle 4-3	Referenzwerte, Bandbreiten und Verteilungsfunktionen einer Auswahl der nicht radionuklidspezifischen Parameter der Einlagerungsgrubenbaue und restlichen Einlagerungsbereiche 85
Tabelle 4-4	Referenzwerte, Bandbreiten und Verteilungsfunktionen einer Auswahl der nicht radionuklidspezifischen Parameter der Mischungsbereiche 88
Tabelle 4-5	Maßgebende Parameter der Modellkluftzone für das Alternativszenario 93
Tabelle 4-6:	Abschätzung der Strahlenexposition bei einem hypothetischen Ausfall aller Barrieren anhand einer Überschlagsrechnung 97
Tabelle 5-1	Ergebnisse für das „what-if“-Szenario „Mangelhafte Abdichtung Schacht Bartensleben“: maximale Lösungsauspressrate aus der Grube mit Austrag entlang der Schachtröhre in das oberflächennahe Grundwasser ($Q_{0,max}$), Transportzeit entlang der Schachtröhre, potentielle Strahlenexposition 127
Tabelle 5-2:	Verdünnung bei der Freisetzung von wasserrechtlich relevanten Stoffen aus den Abfällen, Medianwerte und 90/90-Werte „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ 138

Abbildungsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Abbildung 3-1	Schematische Darstellung der wesentlichen Prozesse..... 27
Abbildung 3-2	Schematische Gruppierung und Zusammenfassung der Grubenbaue des Grubenteils Bartensleben 43
Abbildung 3-3	Schematische Darstellung der Modellkomponenten und wesentlicher Prozesse..... 44
Abbildung 3-4	Modellierung der Radionuklidmobilisierung..... 54
Abbildung 3-5	Schematische Darstellung der drei Fälle „ohne Gaspolster“, „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ und „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ für die Auspressphase aus dem Einlagerungsbereich 55
Abbildung 3-6	Transport vom Einlagerungsbereich durch das Abdichtsystem 59
Abbildung 3-7	Verdünnung im Mischungsbereich nach der Freisetzung der Radionuklide aus einem Einlagerungsbereich 61
Abbildung 3-8	Freisetzung von Radionukliden aus dem Grubengebäude ins oberflächennahe Grundwasser: Transportverzögerung im Hutgestein und Deckgebirge 63
Abbildung 3-9	Lokationen der Abdichtungen (grün), der Kalilager (rot) und Maximalausdehnung der Modell-Einlagerungsbereiche (blau schraffiert) auf der 4. Sohle 67
Abbildung 3-10	Schematische Darstellung der Schachtverschlüsse von Schacht Bartensleben und Schacht Marie 75
Abbildung 4-1	Konzeptuelles geometrisches Modell der hydraulischen Wegsamkeiten im Hauptanhydrit (aus [BGR 2000c]) 92
Abbildung 5-1	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für den Fall „ohne Gaspolster“ mit den Referenzparametern 100
Abbildung 5-2	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ mit den Referenzparametern..... 102
Abbildung 5-3	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ mit den Referenzparametern..... 104
Abbildung 5-4	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Anhydrit als Wegsamkeit zum Ostfeld“ und den Fall „ohne Gaspolster“ 105
Abbildung 5-5	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Anhydrit als Wegsamkeit zum Ostfeld“ und den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ 106
Abbildung 5-6	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Anhydrit als Wegsamkeit zum Ostfeld“ und den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ 107
Abbildung 5-7	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Auflockerungszone um Abdichtung im Hauptanhydrit“ und den Fall „ohne Gaspolster“ 108
Abbildung 5-8	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Auflockerungszone um Abdichtung im Hauptanhydrit“ und den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ 109
Abbildung 5-9	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Auflockerungszone um Abdichtung im Hauptanhydrit“ und den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ 110



Abbildung 5-10	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube: NaCl-Lösung“ und den Fall „ohne Gaspolster“	111
Abbildung 5-11	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube: NaCl-Lösung“ und den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“	112
Abbildung 5-12	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube: NaCl-Lösung“ und den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“	113
Abbildung 5-13	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube: IP21-Lösung“ und den Fall „ohne Gaspolster“	114
Abbildung 5-14	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube: IP21-Lösung“ und den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“	115
Abbildung 5-15	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube: IP21-Lösung“ und den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“	116
Abbildung 5-16	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Unwirksame Abdichtungen“ und den Fall „ohne Gaspolster“	117
Abbildung 5-17	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Unwirksame Abdichtungen“ und den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“	118
Abbildung 5-18	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Unwirksame Abdichtungen“ und den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“	119
Abbildung 5-19	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Szenario einer neuen Wegsamkeit durch das Hutgestein und den Fall „ohne Gaspolster“	121
Abbildung 5-20	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Szenario einer neuen Wegsamkeit durch das Hutgestein und den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“	122
Abbildung 5-21	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Szenario einer neuen Wegsamkeit durch das Hutgestein und den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“	123
Abbildung 5-22	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Szenario „Instantanes Volllaufen der übrigen Grube“ und den Fall „ohne Gaspolster“	128
Abbildung 5-23	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Szenario „Instantanes Volllaufen der übrigen Grube“ und den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“	129
Abbildung 5-24	Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Szenario „Instantanes Volllaufen der übrigen Grube“ und den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“	130
Abbildung 5-25	Kumulierte Überschreitenswahrscheinlichkeit der Maximaldosis für den Fall „ohne Gaspolster“	133



Abbildung 5-26	Kumulierte Überschreitenswahrscheinlichkeit der Maximaldosis für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“	134
Abbildung 5-27	Kumulierte Überschreitenswahrscheinlichkeit der Maximaldosis für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“	135
Abbildung 5-28	Zusammenfassung der Rechnungen zur Radionuklidausbreitung für das Referenzszenario mit probabilistischer Parametervariation, die alternativen Szenarien und die „what-if“-Szenarien, mit Unterscheidung der Fälle in Bezug auf das Verhalten des Gases: „ohne Gaspolster“ (oo), „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ (mo) und „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ (mm).....	137

ERA
Morsleben

Verzeichnis der Anhänge

Anhang A	Algorithmen des Modellkonzepts
Anhang B	Kurzbeschreibung des Rechenprogramms
Anhang C	Modellparameter
Anhang D	Herleitung der geometrischen Parameter für Einlagerungsbereiche, Mischungsbereiche und Abdichtsysteme
Anhang E	Volumen-Neubildung durch Lösungs- und Umlösungsprozesse
Anhang F	Konvergenz von verfüllten und unverfüllten Hohlräumen
Anhang G	Modellierung der Gasbildung
Anhang H	Chemisches Milieu im Grubengebäude, Löslichkeit und Sorption
Anhang I	Modellierung der Mobilisierung von Radionukliden in den Einlagerungsbereichen
Anhang J	Mobilisierung und Transportverhalten von ^{14}C in Lösung
Anhang K	Effekte bei mehreren abgedichteten Zugangsstrecken (Abdichtungen)
Anhang L	Korrosion von Abdichtbauwerken durch Grubenlösung
Anhang M	Korrelierte Parameter für die probabilistischen Modellrechnungen
Anhang N	Ergebnisse der probabilistischen Modellrechnungen
Anhang O	Identifikation relevanter Parameter
Anhang P	Freisetzung volatiler Radionuklide auf dem Gaspfad
Anhang Q	Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens
Anhang R	Diffusive Mobilisierung von ^{226}Ra aus dem verfüllten Streckenstummel im Einlagerungsbereich Ostfeld
Anhang S	Austrag von Grubenlösung entlang Schacht Bartensleben bei mangelhafter Abdichtung
Anhang T	Verdünnung von Grubenlösung im oberflächennahen Grundwasser

Begriffsverzeichnis

Abbau:	Hohlraum, der nach Durchführung der Gewinnungs- und Ladearbeit entsteht
Abdichtung:	Ausgezeichnete Strecken oder Streckenabschnitte zwischen einem Einlagerungsbereich und der übrigen Grube/Restgrube, die mit erhöhtem Aufwand firstbündig verfüllt werden und deren hydraulischer Widerstand (inkl. Auflockerungszone) bei der Ermittlung von Zutritts- und Austrittsraten von Salzlösung in den Einlagerungsbereich im Rahmen der Sicherheitsanalyse berücksichtigt wird. Die Abdichtungen sind Bestandteil des Abdichtsystems.
Abdichtsystem:	System <u>aller</u> Abdichtungen und ggf. Wegsamkeiten im Salzgebirge, welches einen abgedichteten Bereich von der übrigen Grube/Restgrube trennt. Das Abdichtsystem umfasst somit auch Elemente, die nicht vom Menschen abgedichtet wurden (z.B. Anhydritkluftzone zum ELB OF, sofern vorhanden).
Aktivität:	Mengenangabe für Radionuklide (Einheit: Becquerel, Bq); 1 Bq ist die Menge Radionuklide, in der statistisch 1 radioaktiver Zerfall pro Sekunde stattfindet.
Anfangsflüssigkeitsgehalt der Einlagerungsbereiche:	Summe aller Flüssigkeiten in den Abfällen und Versatzmaterialien nach Beendigung der Stilllegungsmaßnahmen
Carnallit:	Mineral mit der chemischen Zusammensetzung $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Carnallitit:	Kalisalz-Gestein mit einer typischen Gesteinszusammensetzung der Hauptminerale Halit, Carnallit, Kieserit
Dosiskoeffizient:	Radionuklidspezifischer Proportionalitätsfaktor zwischen der Strahlenexposition (Dosis, Einheit: Sievert, Sv) eines Menschen und der mit der Nahrung (Dosisfaktor für Ingestion) bzw. mit der Atemluft (Dosisfaktor für Inhalation) aufgenommenen Aktivität des betreffenden Radionuklids
Dosiskonversionsfaktor:	Radionuklidspezifischer Proportionalitätsfaktor zwischen der jährlichen Strahlenexposition (Einheit: Sievert pro Jahr, Sv/a) eines Menschen und der Aktivitätskonzentration (Einheit: Bq/m^3) im genutzten Trink-, Grund- und Oberflächenwasser unter der Bedingung, dass sich der betroffene Mensch ganzjährig im Bereich dieser Aktivitätskonzentrationen aufhält und sich ausschließlich von lokal erzeugten Lebensmitteln ernährt



Einlagerungsbereich:	räumlich begrenzter Bereich im Grubengebäude, der aus einem oder mehreren Einlagerungshohlräumen sowie ggf. benachbarten, hydraulisch gut verbundenen Grubenbauen besteht. Der Begriff Einlagerungsbereich wird mit ELB abgekürzt. Im ERAM wird zwischen abgedichteten und nicht abgedichteten ELB unterschieden. Ein abgedichteter ELB umfasst alle Grubenbaue, die durch das System der Abdichtungen von der übrigen Grube getrennt werden. Die nicht abgedichteten ELB umfassen definitionsgemäß lediglich die Einlagerungshohlräume im entsprechenden Feldesteil.
Einlagerungsbereich West-Südfeld:	Summe der abgedichteten Grubenbaue des West- und Südfeldes, Abkürzung ELB WSF
Einlagerungsbereich Ostfeld:	Summe der abgedichteten Grubenbaue des Ostfeldes, Abkürzung ELB OF
Einlagerungsbereich Zentralteil:	Summe der Einlagerungsgrubenbaue des Zentralteils, ohne UMF, Abkürzung ELB ZT
Einlagerungsbereich Nordfeld:	Summe der Einlagerungsgrubenbaue des Nordfeldes, Abkürzung ELB NF
Einlagerungsgrubenbau:	(auch Einlagerungshohlraum) Auffahrung in der Grube (Kammer, Strecke, etc.), in der radioaktive Abfälle eingelagert sind
Firste:	obere Grenzfläche eines Grubenbaus
Gaspolster:	eingeschlossenes Gasvolumen in einem Bereich der Grube
Gesamthohlraum:	Gesamtheit von unverfülltem Hohlraum und Porenraum
Gesamtvolumen:	Gesamtheit von unverfülltem und verfülltem Volumen (Konturvolumen)
Gesenk:	senkrechter Grubenbau über mehrere Sohlen, der nicht bis zur Tagesoberfläche reicht (Blindschacht) und der von oben nach unten aufgefahren wurde
Grube:	Kurzform für Grubengebäude
Grube, übrige:	Teil der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie, der <u>nicht</u> einem Einlagerungsbereich angehört
Grubenbau:	planmäßig bergmännisch erstellter Hohlraum unter Tage



Grubengebäude:	Gesamtheit aller bergmännisch hergestellten Hohlräume eines Bergwerks
Halit:	Mineralname für die chemische Verbindung Natriumchlorid (NaCl). Halit ist ein häufig vorkommendes Mineral aus der Mineralklasse der einfachen Halogenide. Es ist Hauptbestandteil vieler Salzgesteine.
Hartsalz:	Kalisalz mit einer typischen Gesteinszusammensetzung der Hauptminerale Halit, Sylvin, Kieserit
Hutgestein:	Gestein, das über Salzgesteinen beim Kontakt mit ungesättigten Wässern entsteht, wenn die löslichen Bestandteile aufgelöst und abtransportiert werden, die schwerlöslichen und unlöslichen Bestandteile verbleiben und eventuell zusätzlich neue Sulfatminerale ausfallen
Kainit:	Mineral mit der chemischen Zusammensetzung $\text{KMgClSO}_4 \cdot 2,75 \text{H}_2\text{O}$
Kaliflöz:	Kaliumhaltige Schicht im Salinar; in der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie bestehen die Kaliflöze vorwiegend aus Carnallit oder Hartsalz
Kalisalz:	Salzgestein, das Kalium-haltige Minerale enthält, z.B. Carnallit, Kainit, Polyhalit, Sylvin
Kieserit:	Mineral mit der chemischen Zusammensetzung $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Konturvolumen:	Das Konturvolumen eines Grubenbaus ist das aktuelle geometrische Volumen, das durch die Sohle, die Stöße und die Firste des Grubenbaus eingeschlossen wird. Es ist das aufgefahrene und das durch Nachschnitt geschaffene Hohlraumvolumen abzüglich des in der Vergangenheit durch Konvergenz „verschwundenen“ Volumens.
Konvergenz:	Konvergenz eines Grubenbaus: Verformung eines Grubenbaus mit Abnahme seines Konturvolumens als Folge von Kriechvorgängen im angrenzenden Gebirge
Lösung:	Flüssigphase mit hohem Salzgehalt, hier Flüssigphase in der Grube und in größeren Teufen in Hutgestein und Deckgebirge
Magnesiabeton:	(auch: Sorelbeton) härtende Mischung aus Magnesiumoxid (Bindemittel), Quarzsand, Anhydritmehl, Mikrosilika und Magnesiumchloridlösung, im



	Ostquerschlag auf der 4. Sohle als Abdichtungsmaterial eingesetzt.
Mischungsbereich:	Teil des Grubengebäudes unterhalb der unterstellten Übertrittsstelle in die Wegsamkeit durch das Salinar in das Hutgestein, durch den sowohl die aus den ELB ausgepresste Lösung als auch die aus der übrigen Grube ausgepresste Lösung fließt und in dem sich die Lösungen mischen
Perzentilwert:	Der 95-Perzentilwert einer Größe, deren Wert gemäß einer Wahrscheinlichkeitsverteilung streut, ist der Wert, den die betrachtete Größe mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % unterschreitet, d.h. mit einer Wahrscheinlichkeit von 5 % überschreitet.
Pfeiler:	zwischen Grubenbauen der gleichen Sohle stehengebliebener Teil des Gebirges zu dessen Stützung
Polyhalit:	Mineral mit der chemischen Zusammensetzung $K_2MgCa_2(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$
Querschlag:	etwa rechtwinklig zum Streichen der Lagerstätte aufgefahrene Strecke
Rasenhängebank:	Niveau der Erdoberfläche im Bereich des Schachtes, Nullpunkt der Teufenmessung
Restgrube:	Teil der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie, der <u>nicht</u> durch Abdichtungen von jenen Grubenbereichen abgetrennt ist, in die ein Lösungszutritt aus dem Hutgestein erfolgen kann
Restgrube, sonstige:	Restgrube ohne Mischungsbereiche
Rollloch:	stark geneigter Grubenbau von geringem Querschnitt zur Abwärtsförderung von Lockergestein oder zur Wetterführung (Wetterrollloch)
Salinar:	→ Salzgestein
Salzbeton:	härtende Mischung aus Salzgrus, Zement, Steinkohlenfilterasche und Wasser, in der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie als Versatz eingesetzt
Salzgestein:	Sammelbegriff für Gestein, das durch fortschreitende Eindunstung von Wasser unter wüstenartigen klimatischen Bedingungen entstanden ist. Salzgesteine entstehen durch Ablagerung an einem Meeres- oder Seeboden, wobei zuerst die weniger löslichen Minerale und am Ende die leicht löslichen Minerale (z.B. Kalisal-



ze) auskristallisieren. Eine Abfolge von Salzgesteinen wird auch als Salinar bezeichnet.

Salzgrus:	gebrochenes Steinsalz mit nicht näher bezeichneter Korngröße
Salzspiegel:	obere Grenzfläche zwischen dem (noch) nicht durch Subrosion verändertem Salinargestein und den darüber liegenden Rückstandsbildungen (Hutgestein)
Schachtverschluss:	Abdichtung des Grubengebäudes gegenüber Zutritten von Fluiden aus dem Deckgebirge bzw. Austritten von Fluiden ins Deckgebirge entlang des Schachtes
Schwebe:	Teil des Gebirges, der zwei übereinander liegende Grubenbaue voneinander trennt
Sohle:	Gesamtheit der annähernd in einem Niveau aufgefahrenen Grubenbaue; auch untere Grenzfläche eines Grubenbaus
Steinsalz:	Salzgestein, das bis auf geringe Beimengungen anderer Minerale aus Halit, d.h. NaCl besteht
Strecke:	tunnelartiger und nahezu sählig aufgefahrener Grubenbau
Subrosion:	(genauer: Salinar-Subrosion) Lösungsprozess, der auftritt, wenn die Gesteine einer Salzstruktur in Kontakt mit ungesättigten Grund- und Formationswässern des angrenzenden Gebirges kommen und dadurch leichtlösliche Bestandteile (Salzminerale) aufgelöst und mit den Wässern weggeführt werden. Aus den zurückbleibenden schwer- und unlöslichen Mineralen der Salzgesteine (Anhydrit, Tonminerale), den schwer- und unlöslichen Gesteinen im Salinar (z.B. Hauptanhydrit, Leinekarbonat) sowie eventuellen Sulfatneubildungen entsteht das Rückstandsgebirge. Dieses wird – sofern es oberhalb einer Salzstruktur liegt – als Hutgestein bezeichnet.
Sylvin:	Mineral mit der chemischen Zusammensetzung KCl [K_2Cl_2]
unverfüllter Hohlraum:	unverfüllter Bereich eines Grubenbaus
Wässer:	Flüssigkeiten unbekannter Salinität bei Zutritt aus dem Hutgestein in die Grube
Versatz:	hier: Material für die Verfüllung von Grubenbauen zur Verringerung des fluidzugänglichen Hohlraums und/oder zur gebirgsmechanischen Stützung



Versatz, kompaktierbar:	Sammelbegriff für Versatz aus Salzgrus, Abfall, Braunkohlenfilterasche
Versatz, nicht oder gering kompaktierbar:	Sammelbegriff für Salzbeton u.ä. Versatz in den Grubenbauen, jedoch ohne Zementkomponenten im Abfall
Verfüllkategorien:	Zuordnung von Hohlräumen zu Versatzmaßnahmen, mit denen geomechanische und hydraulische Anforderungen an die Stilllegungsmaßnahmen realisiert werden
Verfüllen:	Tätigkeit des Einbringens von Versatz
Versetzen:	Synonym für Verfüllen
Volllaufen:	Zutreten von Wässern (in die Grube), das nicht durch den Menschen willentlich herbeigeführt wird
Wetter:	Grubenluft
Zechstein:	Deutsche Bezeichnung für eine geologische Zeitepoche. Sie dauerte von rund 258 Mio bis 251 Mio Jahren vor heute. Sie bildet zusammen mit dem älteren Rotliegenden das Perm. In Teilen West- und Mitteleuropas wurden im Zechstein mehrere aufeinander folgende Serien verschiedener Salzgesteine mit Mächtigkeiten bis zu mehreren 100 Metern abgelagert.
Zutritt:	Eindringen von Flüssigkeit in die Grube oder einen Bereich der Grube
Zutrittsrate / Zuflussrate:	Rate, mit der Flüssigkeit zutritt



Abkürzungsverzeichnis

AVV	Allgemeine Verwaltungsvorschrift
BFA	Braunkohlefilterasche
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
bGZ	Maßnahme zur bergbaulichen Gefahrenabwehr im Zentralteil
DGL	Schichtenfolge „Deckanhydrit – Grauer Salzton – Leinekarbonat“ im Hutgestein
ELB	Einlagerungsbereich
ELB ...	Einlagerungsbereich-...
ERAM	Endlager für Radioaktive Abfälle Morsleben
FEP	Zustände, Ereignisse und Prozesse (englisch: „Features, Events and Processes“)
M	molar, mol/l
NF	Nordfeld
NN	Normal Null
OF	Ostfeld
RN	Radionuklid(e)
SF	Südfeld
STP	Standard- Temperatur und -Druck (273,15 K und 0,1 MPa)
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
UMF	Untertage-Messfeld
VBA	verlorene Betonabschirmung
WF	Westfeld
WSF	West-Südfeld
ZT	Zentralteil

1 Einleitung

In dem ehemaligen Salzbergwerk Bartensleben in Sachsen–Anhalt wurden von 1971 bis 1998 schwach– bis mittelradioaktive Abfälle eingelagert. Mit der deutschen Wiedervereinigung übernahm im Oktober 1990 das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) die Zuständigkeit für das Endlager für Radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM).

Die Doppel–Schachtanlage Bartensleben–Marie liegt in der Salzstruktur der Allertalzone. Die Salzstruktur erstreckt sich von Wolfsburg im Nordwesten bis Seehausen im Südosten über etwa 50 km. Ihre Breite am Salzspiegel beträgt in der Umgebung des ERAM etwa 1'700 m. Die Allertalzone wird im Südwesten von der Lappwaldscholle und im Nordosten von der Weferlinger Triasplatte begrenzt. Eine ausführliche Standortbeschreibung enthält [Plan ERAM 2009].

Am Standort der Doppel-Schachtanlage befindet sich der Salzspiegel etwa bei –140 m NN, und die Gesamtmächtigkeit der Salzstruktur vom Salzspiegel bis zum Subsalinar beträgt ca. 380 m bis 580 m [BGR 2000a]. Die Doppel-Schachtanlage besteht aus zwei Schächten mit den zwei Grubenfeldern Marie und Bartensleben und erstreckt sich in nordwest–südöstlicher Richtung über eine Länge von ca. 5,6 km und quer dazu über eine Breite bis maximal etwa 1,7 km. Der Schacht Bartensleben liegt 600 m nordwestlich der Ortschaft Morsleben am Osthang des Lappwaldes und wurde von 1910 bis 1912 abgeteuft. Der Schacht Marie befindet sich etwa 1,6 km nordwestlich vom Schacht Bartensleben am südlichen Ende des Ortes Beendorf, ebenfalls am Osthang des Lappwaldes. Er wurde von 1897 bis 1898 abgeteuft.

Auf der Schachtanlage Marie wurden bis 1951 Kalisalze und Steinsalz gefördert. Zwischen 1937 und 1945 wurde das Grubengebäude für die Rüstungsproduktion, von 1959 bis 1984 für Geflügelmast genutzt. Von 1987 bis 1996 waren dort Härtereialsalze zwischengelagert. Während der gesamten Betriebsdauer wurden 2,6 Mio. m³ Hohlraum aufgefahren.

Der Gewinnungsbetrieb der Schachtanlage Bartensleben dauerte bis 1969 und betraf ebenfalls sowohl Kalisalze als auch Steinsalz. Insgesamt wurden etwas mehr als 6,1 Mio. m³ Hohlraum aufgefahren. Die Einlagerung von radioaktiven Abfällen erfolgte von 1971 bis 1991 und von 1994 bis 1998.

Im Jahr 2003 wurde mit der Verfüllung ausgewählter Grubenbaue zur bergbaulichen Gefahrenabwehr im Zentralteil (bGZ) begonnen. Zum Zeitpunkt des Planfeststellungsbeschlusses werden ca. 5,4 Mio. m³ Hohlraum unversetzt offen stehen. Hiervon befinden sich ca. 4,3 Mio. m³ im Grubengebäude Bartensleben und ca. 1,1 Mio. m³ im Grubengebäude Marie [DBE 2005].

In den verschiedenen Feldesteilen der Schachtanlage Bartensleben wurden rund 37'000 m³ schwach– und mittelradioaktive Abfälle eingelagert. Ein Teil dieser Abfälle (8'258 m³) wurde flüssig eingebracht und am Einlagerungsort mit Braunkohlefilterasche (BFA) verfestigt. Dazu wurden entweder Abfall und BFA vor der Ablagerung mit einer Mischschnecke vermengt, oder der Abfall wurde über eine zuvor eingebrachte Schicht BFA versprüht. Der übrige Teil der Abfälle wurde überwiegend in standardisierten Behältern, z. B. 200-l- bis 570-l-Fässer verpackt, eingelagert und ebenfalls mit BFA oder Salzgrus überdeckt. Die Einlagerungsgrubenbaue der radioaktiven Abfälle befinden sich in Bereichen der 4. Sohle, der 4a-Sohle und der 5a-Sohle.



Eine detailliertere Beschreibung der Grubengebäude, der eingelagerten Abfälle, der Einlagerungsgrubenbaue und der zugehörigen, bereits durchgeführten Versatzmaßnahmen enthält [Plan ERAM 2009].

Für die Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben hat der Betreiber, das Bundesamt für Strahlenschutz, bei der zuständigen Genehmigungsbehörde, dem Ministerium für Raumordnung und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt, ein atomrechtliches Planfeststellungsverfahren beantragt. Für dieses Genehmigungsverfahren wird der Langzeitsicherheitsnachweis für das verfüllte und verschlossene Endlager auf Basis standortspezifischer Sicherheitsanalysen geführt und der Genehmigungsbehörde vorgelegt. Anhand verschiedener Szenarien werden die Auswirkungen möglicher zukünftiger Entwicklungen des Endlagers hinsichtlich des Austrags von Radionukliden in die Biosphäre untersucht. Der vorliegende Bericht beschreibt die Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verwahrte Endlager Morsleben mit dem Rechenprogramm PROSA [Colenco 2006]. Die Verfüllmaßnahmen beruhen auf dem Konzept der weitgehenden Verfüllung der untertägigen Hohlräume der beiden Grubenteile Bartensleben und Marie. Sie ergänzen insbesondere die Barrierenwirkung der natürlichen geologischen Barrieren des Endlagers.

Neben der Gewährleistung der Standsicherheit der Grubengebäude und Verringerung der Hohlraumkonvergenz durch die Versatzmaßnahmen werden für einen nicht auszuschließenden Zutritt von Lösung aus dem Hutgestein das verfügbare Hohlraumvolumen und somit potentielle Um- und Auflösungen reduziert. Darüber hinaus wird durch die Verzögerung bei Zu- und Austritt von Lösung durch das Versatzmaterial in die Einlagerungsbereiche der im Falle eines Lösungszutritts zu den Abfällen langfristig zu erwartende Schadstoffaustrag verringert. Unabhängig von dem potentiellen Zutrittsort bildet neben dem Wirtsgestein das eingebrachte Versatzmaterial einen hydraulischen Widerstand gegen die Migration von Lösung im Grubengebäude.

In dem zu Grunde gelegten Konzept für das Verfüllen und Verschließen der untertägigen Hohlräume sind die künftigen Pfade, über die Lösung in die Einlagerungsgrubenbaue gelangen kann, nicht bestimmbar, sie werden auch nicht durch bauliche Maßnahmen vorbestimmt.

Durch das Konzept der weitgehenden Verfüllung des Hohlraumvolumens hängt die Langzeitsicherheit des verfüllten und verschlossenen Endlagers Morsleben vom Zusammenwirken verschiedener Sachverhalte und Prozesse und nicht von der Funktionsfähigkeit einzelner ausgezeichneter Sicherheitselemente ab. Für den modellmäßigen Nachweis wird für jeden Einlagerungsbereich der hydraulische Widerstand, der den Zutritt von Lösung zu den Einlagerungsgrubenbauen und den Austritt von kontaminierter Lösung und Gasen aus den Einlagerungsgrubenbauen steuert, einem Modellelement, dem Abdichtsystem zugewiesen. Für die Festlegung seiner Parameter wird angenommen, dass es ausschließlich durch diejenigen Grubenbaue gebildet wird, welche zur Verfüllkategorie I (Definition siehe Kapitel 2) gehören, sowie eventuelle Wegsamkeiten im Salzgebirge, welche diese umgehen. Im Modell bleibt der hydraulische Widerstand des Versatzes in den übrigen Grubenbauen unberücksichtigt. Die durchzuführenden Versatzmaßnahmen sind in einem separaten Bericht ausführlicher beschrieben [DBE 2005].

Der Sicherheitsnachweis muss eine große Zahl möglicher künftiger Entwicklungen und Zustände des Gesamtsystems abdecken. Die Langzeitsicherheitsanalyse mit dem Programm PROSA beruht deshalb auf einer modellhaften Nachbildung der maßgebenden Prozesse in Verbindung mit einer



abstrahierten Darstellung der geometrischen Verhältnisse. So werden z.B. verschiedene mögliche Transportpfade in geeigneter Weise durch eine repräsentative Transportstrecke derart dargestellt, dass diese zu ungünstigeren Freisetzungsraten von Radionukliden führt, als dies eine detaillierte Modellierung der verschiedenen Pfade ergeben würde (konservative Vereinfachung).

Mit einem numerischen Modell werden die vielfältigen physikalischen und chemischen Prozesse, die eine eventuelle Radionuklidfreisetzung aus dem Endlager beeinflussen können, simuliert, um die potentielle Strahlenexposition eines zukünftigen Individuums zu errechnen. Zur Bewertung der Modellergebnisse für die einzelnen Szenarien werden die ermittelten Strahlenexpositionen in der Biosphäre mit dem Wert des § 47 Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) für die effektive Dosis verglichen.

Die Vielzahl der möglichen künftigen Entwicklungen und Zustände wird – neben der geometrischen Abstraktion – durch die Berücksichtigung mehrerer Szenarien und eine umfangreiche und breite Variation der maßgebenden Parameter im Rahmen von probabilistischen Modellrechnungen abdeckend behandelt. Um dies sicherstellen zu können, erfolgt die numerische Nachbildung der Prozesse – bei konservativen Näherungen – durch einfache und schnelle Algorithmen.

Im vorliegenden Bericht werden das Konzept der Sicherheitsanalyse mit dem Programm PROSA und die Berechnungsmethode erläutert sowie die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt, diskutiert und bewertet. Einleitend wird in Kapitel 2 das der Sicherheitsanalyse zu Grunde liegende Verfüllkonzept, das umfangreiche Versatzmaßnahmen vorsieht, beschrieben. In Kapitel 3 werden die Methoden der Analyse und der Berechnungen dargelegt. Dazu werden in Kapitel 3.1 die potentiell maßgebenden Prozesse diskutiert, in Kapitel 3.2 das Referenzszenario und in Kapitel 3.3 das Konzept der quantitativen Analyse beschrieben. Eine vollständige Zusammenstellung der Algorithmen enthält Anhang A, eine Kurzbeschreibung des Rechenprogramms Anhang B.

Das Kapitel 3.4 beschreibt das Vorgehen zur Umsetzung der komplexen geometrischen Verhältnisse im Endlager in die abstrakten Modelldaten. Die Details dieser Umsetzung enthält Anhang D. Ausführungen zur Volumen Neubildung durch Lösungs- und Umlösungsprozesse sind in Anhang E enthalten. Die Modellierung der Konvergenz von unverfüllten und verfüllten Hohlräumen ist in Anhang F, jene der Gasbildung in Anhang G und jene der Radionuklidmobilisierung in Anhang I im Detail dargelegt. Die Beschreibung des chemischen Milieus und die daraus resultierenden Löslichkeiten der Radionuklide sind in Anhang H, die Mobilisierung und das Transportverhalten des Radionuklids ^{14}C auf dem Wasserpfad in Anhang J enthalten. Die speziellen Effekte, die auftreten können, wenn mehrere parallel geschaltete Abdichtungen eines Einlagerungsbereichs hydraulisch wirksam sind, werden in Anhang K beschrieben und ihr möglicher Einfluss analysiert. Gegenstand von Anhang L ist die Korrosion der Abdichtungsbauwerke durch zutretende saline Lösungen.

Das Kapitel 3.5 behandelt mögliche Vorgänge und damit Szenarien, die Abweichungen von den in den vorangehenden Kapiteln beschriebenen Vorgängen im Referenzszenario darstellen, d.h. alternative Szenarien. Das Kapitel 4 enthält zur Illustration des Vorgehens eine Übersicht über den Parametersatz, durch den das Endlager im Hinblick auf die Langzeitsicherheit charakterisiert wird. Der vollständige Parametersatz ist in Anhang C differenziert nach programm-unspezifischen und nach abgeleiteten programmspezifischen Parametern wiedergegeben.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der Berechnungen vorgestellt und diskutiert, sowohl diejenigen der deterministischen Berechnungen für den Referenzfall und der weiteren Szenarien als auch



diejenigen der probabilistischen Berechnungen zur Variation der Parameter. In Anhang M sind die korrelierten Parameter für die Modellrechnungen aufgeführt. Vertiefende Auswertungen der probabilistischen Modellrechnungen enthält Anhang N. In Anhang O wird gezielt die Frage behandelt, welchen Einfluss die einzelnen Parameter auf die berechneten Maximaldosiswerte besitzen, d.h. welche der zahlreichen Parameter „von besonderer Bedeutung“ sind.

Die Freisetzung volatiler Radionuklide auf dem Gaspfad wird in Anhang P bewertet, die Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in Anhang Q. In Anhang R wird dargelegt, dass die diffusive Mobilisierung von ^{226}Ra aus dem verfüllten Streckenstummel im Einlagebereich Ostfeld so geringfügig ist, dass das Radionuklidinventar des dort in einem Sohlenbohrloch eingelagerten Fasses mit einem hohen Inventar an ^{226}Ra , die sogenannte Radium-VBA, in der Sicherheitsanalyse nicht explizit berücksichtigt werden muss. Die Ausbreitung von Lösung im Deckgebirge, welche bei einem mangelhaften Schachtverschluss in Schacht Bartensleben entlang des Schachtes ausgepresst werden könnte, wird in Anhang S diskutiert. Der letzte Anhang, Anhang T, enthält die Berechnung des oberflächennahen Grundwasserflusses, der in allen Szenarien als verdünnungswirksam angenommen wird.

Kapitel 6 enthält die Bewertung der Modellrechnungen und die Schlussfolgerungen.

ERWARTET
Morsleben



2 Verfüllkonzept

Das wesentliche Merkmal des Verfüllkonzepts ist, dass eine Vielzahl von Hohlräumen der Grubengebäude sowie ausgewählte Streckenabschnitte und vertikale Grubenbaue weitgehend mit einem fließfähigen Salzbeton derart verfüllt werden, dass

- die gebirgsmechanische Stabilität des Gesamtsystems langfristig gesichert ist,
- die Konvergenz des Grubengebäudes behindert wird,
- die Bewegung von Lösung in den Grubengebäuden generell eingeschränkt wird,
- gewisse Strecken und Gesenke mit erhöhtem technischen Aufwand verfüllt sind und eine spezielle hydraulische Barriere (Abdichtung) gegen den Zutritt von Salzlösung in die Einlagerungsgrubenbaue sowie den Austritt von Fluiden aus denselben bilden,
- das Volumen zutretender Lösungen und damit auch das Ausmaß von Auf- und Umlösungsprozessen begrenzt werden.

Aufbauend auf der markscheiderischen Zuordnung der untertägigen Hohlräume zu Feldesteilen und der Einlagerung von radioaktiven Abfällen in ausgesuchte Grubenbaue (Einlagerungsgrubenbaue) erfolgt eine Zusammenfassung der Hohlräume in Einlagerungsbereiche nach Kriterien der Langzeitsicherheit. Hierbei umfassen die Einlagerungsbereiche sowohl die Einlagerungsgrubenbaue, in denen die Abfälle eingelagert sind, als auch Grubenbaue, die sich in unmittelbarer Nähe befinden bzw. mit den Einlagerungsgrubenbauen in hydraulischer Verbindung stehen.

Von den Grubenteilen mit eingelagerten Abfällen – Westfeld, Südfeld, Ostfeld, Zentralteil, Nordfeld und dem Einlagerungsgrubenbau UMF des Grubenfeldes Bartensleben – werden die Grubenbaue des Westfeldes und des Südfeldes als gemeinsamer Einlagerungsbereich West-Südfeld sowie das Ostfeld durch technische Maßnahmen, d.h. durch Strecken- und Rollochverfüllungen (Abdichtungen), an die besondere Anforderungen bezüglich der Dichtheit definiert sind, von der übrigen Grube und den anderen Einlagerungsbereichen getrennt. Die Gesamtheit aller Grubenbaue ohne die Einlagerungsbereiche wird als „übrige Grube“, die Gesamtheit aller Grubenbaue ohne die abgedichteten Einlagerungsbereiche als „Restgrube“ bezeichnet. Das gesamte Grubenfeld Marie gehört nach dieser Einteilung sowohl zur übrigen Grube als auch zur Restgrube (Restgrube Marie).

Die Art und der Umfang der Verfüllung einzelner Hohlräume werden durch die Funktion, die der versetzte Grubenbau zu übernehmen hat, bestimmt (Abdichtung, Stabilisierung und Hohlraumreduzierung). Die Hohlräume werden hinsichtlich ihrer Verfüllung einer von vier Verfüllkategorien zugewiesen und damit die Anforderung an den Verfüllgrad für jeden Hohlraum einzeln festgelegt [DBE 2005].

Grubenbaue, die eine abdichtende Funktion zur Verzögerung des Zu- und Austrittes von Lösungen erfüllen müssen, sind in der Verfüllkategorie I „firstbündige Verfüllung“ zusammengefasst. Für diese Verfüllkategorie ist ein hydraulischer Widerstand mit einer integralen Permeabilität von 10^{-18} m^2 des eingebrachten Versatzmaterials und des umgebenden Salinars als Anforderung formuliert. Hieraus leiten sich Anforderungen an die Materialeigenschaften des Versatzmaterials, an den Verfüllgrad (firstbündiges Einbringen) und die Dichtheit des umgebenden Streckensaumes ab. Je



nach dem standortspezifischen Zustand der Streckenkonturen sind um die Strecken die Auflockerungszonen gebirgsschonend zu entfernen.

Zur Gewährleistung der Standsicherheit werden ausgesuchte Grubenbaue des Zentralteils der Grube Bartensleben im Rahmen der „Bergbaulichen Gefahrenabwehrmaßnahme im Zentralteil“ (bGZ) versetzt. Mit dieser Maßnahme, die nicht Gegenstand des Planfeststellungsverfahrens ist, wurde bereits im Jahr 2003 begonnen und wird voraussichtlich Anfang 2010 beendet werden. Darüber hinaus sollen die in der Szenarienanalyse [BGR 1999] ausgewiesenen zutrittsgefährdeten Grubenbaue so verfüllt werden, dass eine Firstflächenanbindung von 70% (entspricht einem Verfüllgrad von ca. 95%) erreicht wird. Dadurch reduziert sich die Anzahl der zutrittsgefährdeten Hohlräume erheblich. Diese Grubenbaue sind der Verfüllkategorie II zugeordnet.

Zur Begrenzung des offenen Hohlraumvolumens bei Lösungszutritt ist ein mittlerer Verfüllgrad von 65% je Feldesteil geplant. Der Verfüllgrad der einzelnen Abbaue kann dabei zwischen 0-100% variieren (Kategorie III). Zur Kategorie IV zählen alle Kaliabbaue, die möglichst vollständig verfüllt werden. Gleichwohl und als konservative Annahme wird für die Sicherheitsanalyse ein Verfüllgrad von lediglich 50% der derzeit offenen Kalilager zu Grunde gelegt.

Die Ergebnisse der Planungsarbeiten zur technischen Realisierung der Verfüllung der untertägigen Hohlräume unter Berücksichtigung der vier verschiedenen Verfüllkategorien, der erforderlichen Vorbereitungsmaßnahmen und der Infrastruktur sowie des benötigten Zeitbedarfes werden in [DBE 2005] ausführlich dargestellt.

Als Versatzmaterialien für bisher unverfüllte Hohlräume und für die Abdichtungen ist im Allgemeinen ein aus Zement, Steinkohlenflugasche, Salzzuschlag und Wasser bestehender Salzbeton vorgesehen, mit folgenden Ausnahmen: die Maßnahme zur bergbaulichen Gefahrenabwehr Zentralteil (bGZ), die Abdichtung des Einlagerungsbereichs Ostfeld auf der 4. Sohle innerhalb des Hauptanhydrit, das Wetterrollloch zwischen dem Südfeld und dem Zentralteil, vereinzelte Bohrungen und die beiden Tagesschächte. Für die bGZ wird ein Salzbeton verwendet, welcher Kalkmehl und Sand anstelle von Steinkohlenflugasche enthält. Die durch den Hauptanhydrit verlaufende Abdichtung des Ostfelds auf der 4. Sohle soll aus einem Magnesiabeton erstellt werden [K-UTEC 2008]. Die aus den Standsicherheitsuntersuchungen abgeleiteten Anforderungen an die Materialparameter (E-Modul, Druck- und Zugfestigkeit) sowie die Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Labor- und In-Situ-Versuche sind in [DBE 2006] und [K-UTEC 2008] dargestellt, während die Nachweise des chemischen Langzeitverhaltens der Versatzmaterialien in [GRS 2009] im Detail aufgeführt sind. Das genannte Wetterrollloch, die Bohrungen und die Tagesschächte werden mit speziellen Maßnahmen abgedichtet, diese sind im [Plan ERAM 2009] beschrieben.

Die weitgehend verfüllten Hohlräume der Grube bilden somit ein System von hydraulischen Wegsamkeiten mit hydraulischen Widerständen, das im Salzgestein eingebettet ist und lokal unterschiedliche Leitfähigkeits- bzw. Widerstandswerte aufweist. Das Salzgestein ist i.a. weniger permeabel als die verfüllten Hohlräume. Ausnahmen bilden Zonen erhöhter Durchlässigkeit wie z.B. die Auflockerungszonen zwischen benachbarten Abbauen sowie eventuelle Kluftzonen im Hauptanhydrit. Am Salzspiegel zutretende Lösung muss dieses System von Wegsamkeiten mit hydraulischen Widerständen überwinden, bevor sie entlang der verfüllten Hohlräume und ggf. durch Wegsamkeiten im Salzgebirge bis zu den Abfällen auf den tiefen Sohlen gelangt.



Ergänzt wird die Verfüllung der untertägigen Hohlräume durch die Verwahrung der Schächte Bartensleben und Marie dergestalt, dass für einen Zeitraum von mehreren 1'000 Jahren durch die Verschlussbauwerke und das anstehende umgebende Gebirge allenfalls geringe Mengen an Wässern zutreten [Plan ERAM 2009]. Die Strecken zwischen den Grubenteilen Bartensleben und Marie werden ebenfalls mit erhöhtem technischen Aufwand verfüllt. In den Modellrechnungen wird davon jedoch nicht explizit Kredit genommen, die möglichen Auswirkungen werden allerdings in die Überlegungen einbezogen.

Für den Langzeitsicherheitsnachweis werden die in [DBE 2005] dargestellten Verfüllmaßnahmen zugrunde gelegt. Ausgenommen hiervon sind die:

- Unterwerksbaue im West- und im Südfeld und insbesondere die querschlägigen Verbindungen auf der -420 mNN (5.), -454 mNN, -461 mNN und der -475mNN (6.) Sohle, die für den Nachweis als nicht verfüllt unterstellt werden, sowie
- die Verbindung des Untertage-Messfeldes (UMF) zum Ostquerschlag -372mNN Sohle (Zufahrt), die als firstbündig verfüllt betrachtet wird.



3 Nachweisführung und Berechnungsmethoden

3.1 Prozesse

Nach dem Verfüllen der Gruben und dem Verschließen der Schächte sind die Abfälle durch eine mehrere hundert Meter mächtige Barriere aus Versatz, Salzgestein, Hutgestein und Deckgebirgsschichten von der Erdoberfläche abgeschirmt. Solange das System in dieser Form besteht, beeinflusst die Radioaktivität aus den Abfällen in keiner Weise das Leben in der Biosphäre. Obwohl diese Entwicklung des Endlagersystems mit „vollständigem Einschluss der Abfälle“ durchaus möglich ist, ist es nicht Gegenstand der nachfolgend dargelegten Sicherheitsanalyse. In allen nachfolgend behandelten Szenarien werden Prozesse angenommen, welche die Radionuklide in den Abfallgebänden mobilisieren, sie aus diesen freisetzen und treibende Kräfte erzeugen, die einen Transport aus den abgedichteten und nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen durch die Grube und das Hutgestein und Deckgebirge bis in das oberflächennahe Grundwasser und damit in die Biosphäre bewirken können. Damit beschreiben alle nachfolgend behandelten Szenarien Systementwicklungen, bei denen die Aufnahme von freigesetzten Radionukliden über verschiedene Nahrungspfade sowie externe Bestrahlung durch freigesetzte Radionuklide zu einer Strahlenexposition von Personen führen. Die Prozesse, welche zu einem Transport von Radionukliden bis in das oberflächennahe Grundwasser führen, werden in diesem Kapitel 3.1 beschrieben.

Einen Überblick über wichtige Prozesse, welche mit der Mobilisierung und dem Transport der Radionuklide unmittelbar zusammenhängen, vermittelt in schematischer Weise Abbildung 3-1.

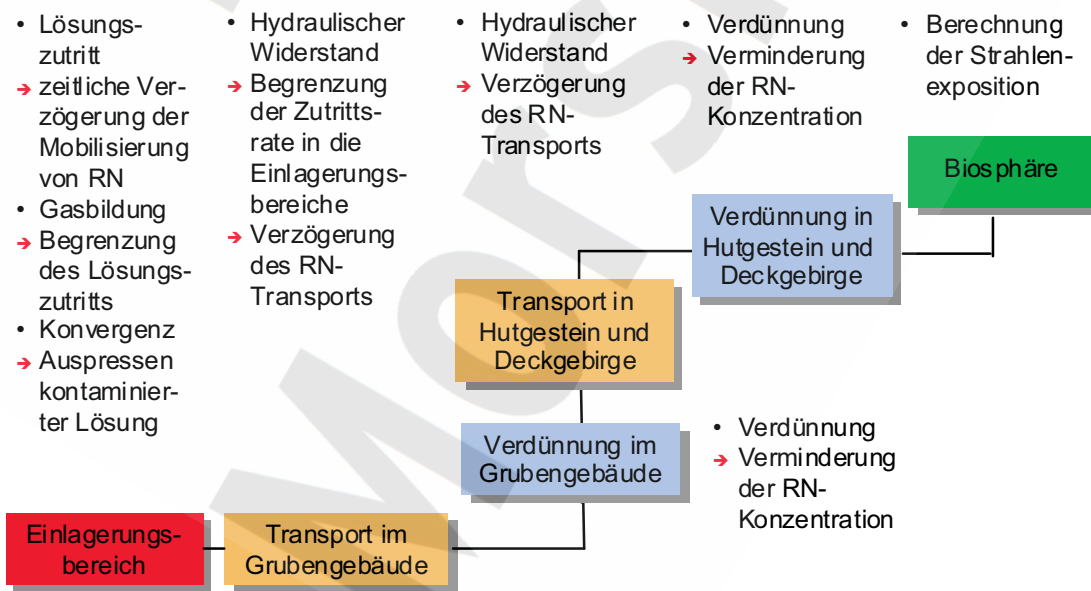


Abbildung 3-1 Schematische Darstellung der wesentlichen Prozesse. RN = Radionuklid(e)

3.1.1 Zutritt von Lösungen

Mit wenigen Ausnahmen, die separat behandelt werden (vgl. die Anhänge J und P), bilden die Radionuklide keine gasförmigen Verbindungen. Sie können daher nur in Lösung transportiert werden. Eine Freisetzung aus der Grube erfolgt deshalb frühestens, nachdem sie vollgelaufen ist. Daher ist der Zutritt von Lösungen in das Grubengebäude der Doppel-Schachanlage ein notwendiger Prozess für die Radionuklidfreisetzung.

Im Liegenden und zu den Seiten ist die Grube Bartensleben vom Salzgebirge umgeben und abgedichtet. Daher können Flüssigkeiten nur von oben, d.h. durch verbundene Wegsamkeiten im Hutgestein und Salinar oder durch die Schächte zutreten. Potentielle, im Hinblick auf die Langzeitsicherheit relevante Zutrittsorte von Lösungen aus dem Hutgestein in die Salzstruktur sind die Abbaue auf der 1. und der 2a-Sohle des Zentralteils, das Kalilager C, die oberen Hohlräume des Nordfelds und des Südostfeldes im Grubenteil Bartensleben sowie die Schächte Bartensleben und Marie. Bei den Abbauen des Zentralteils handelt es sich um mehrere Abbaue, über die aufgrund ihrer Lage und der geologischen Bedingungen ein Zutritt von Deckgebirgslösungen nach fortschreitender Auflockerung langfristig nicht ausgeschlossen werden kann. Dies gilt ähnlich auch für das Nordfeld. Bereits heute erfolgt ein Lösungszutritt in den Zentralteil, allerdings aus einem abgeschlossenen Restlösungsreservoir (Abbau 1a). Die Rate des Zutritts im Lager H (Grubenteil Marie), welcher als einziger der heutigen Lösungszutritte in das Grubengebäude als solcher aus dem Hutgestein interpretiert wird, beträgt rund $15 \text{ m}^3/\text{a}$ (Durchschnittswert der letzten 25 Jahre). Ein Verfüllen der Abbaue kann einen Lösungszutritt höchstens mindern. Eine Prognose, über welchen der Abbaue weitere Zutritte – wenn überhaupt – erfolgen werden, ist nicht möglich. Die heutige Zutrittsrate zum Abbau 1a hängt von den lokalen hydraulischen Verhältnissen in dem angeschlossenen Lösungsreservoir im Hauptanhydrit ab. Potentielle künftige Zutritte werden neben den sich dann einstellenden Wegsamkeiten im Salinar auch durch die hydraulischen Verhältnisse im Hutgestein und an der Grenze zwischen Hutgestein und Salzstruktur bestimmt und zudem von den erfolgten Verfüllmaßnahmen abhängen.

Unter den pessimistischen Annahmen, dass

- die hydraulischen Wegsamkeiten in der Salzstruktur vom Salzspiegel bis zum Austrittsort im Grubengebäude keinen nennenswerten hydraulischen Widerstand aufweisen,
- im Grubeninnern und nach der vorgenannten Annahme damit auch am Ort des Lösungsübertritts aus dem Hutgestein in die Salzstruktur der Lösungsdruck nicht signifikant über Atmosphärendruck ansteigt,
- der Fließquerschnitt der Wegsamkeit durch die Salzstruktur am Salzspiegel eine relativ große Fläche von 150 m^2 aufweist,
- durch den Lösungszutritt Lösungsprozesse am Salzspiegel ausgelöst werden, durch die mit der Zeit hochdurchlässige Wegsamkeiten entlang des Salzspiegels entstehen, welche einerseits mit der Wegsamkeit in der Salzstruktur und andererseits mit der Schichtenfolge Deckanhydrit – Grauer Salzton – Leinekarbonat (DGL) im Hutgestein (vgl. Kapitel 3.3.10) in hydraulischem Kontakt stehen und
- das Hutgestein insgesamt eine relativ hohe hydraulische Durchlässigkeit aufweisen kann



ergeben Modellrechnungen zum Lösungszutritt in das Grubengebäude potentielle Zutrittsraten unter den heutigen Verhältnissen von lediglich etwa $55 \text{ m}^3/\text{a}$ bis $85 \text{ m}^3/\text{a}$ [Colenco 2001a]. Mit fortschreitendem Lösungszutritt können zunehmend ungesättigte Wässer an die Basis des Hutgesteins gelangen und dort in der Umgebung der Zutrittsstelle die Permeabilität erhöhen. Dadurch steigt die Zutrittsrate an. Modellberechnungen ergeben für späte Zeiten Werte von etwa $180 \text{ m}^3/\text{a}$, unter ungünstigen Bedingungen bis rund $600 \text{ m}^3/\text{a}$ [Colenco 2001a]. Durch neotektonische Prozesse kann es zu neuen Wegsamkeiten im Hutgestein und dadurch zu veränderten Zutrittsraten kommen; damit ist allerdings nicht vor 30'000 Jahren zu rechnen [BGR 2002]. Unter den ersten beiden der genannten Annahmen wird der Lösungszutritt in das Grubengebäude bei Bestehen einer Wegsamkeit durch die Salzstruktur ausschließlich durch die hydraulischen Verhältnisse im Hutgestein und – untergeordnet – den Fließquerschnitt der Wegsamkeit durch die Salzstruktur am Salzspiegel bestimmt.

Die Verhältnisse in den Schächten unterscheiden sich deutlich von jenen im Zentralteil. Die Umgebung der Schächte bilden die Schachtsicherheitspfeiler, die nur begrenzt und streng kontrolliert durchbaut wurden. Die Schachtröhren können als vertikale Strukturen relativ gut verfüllt und abdichtet werden, die Schächte tragen dann vernachlässigbar zum Lösungszutritt bei. Eine Abweichung von einem solchen Zustand bildet die Annahme für ein zu untersuchendes „what-if“-Szenario (Kapitel 3.5.9).

Bei relevantem Lösungszutritt in die Restgrube stellen sich dort langfristig hydrostatische Druckverhältnisse bezogen auf den oberflächennahen Grundwasserspiegel ein.

3.1.2 Aufsättigung der zutretenden Flüssigkeiten am Steinsalz und Umlöseprozesse

Die gegenwärtig aus dem Hutgestein in die Grube zutretende Lösung ist an NaCl gesättigt. Mit der Zeit und speziell bei höheren Zutrittsraten als heute (vgl. Kapitel 3.1.1) ist auch mit dem Zutritt von untersättigten Lösungen aus dem Hutgestein in die Wegsamkeit durch die Salzstruktur und eventuell auch in die Grube zu rechnen. Untersättigte Lösungen werden sich am Steinsalz entlang der Wegsamkeiten in der Salzstruktur und im Grubengebäude sowie am Salzversatz aufsättigen. Dies wird überwiegend bereits am Salzspiegel geschehen, zumal die mit Salzbeton verfüllten oberen Abbaue einen wirksamen hydraulischen Fließwiderstand bilden. Das Eindringen untersättigter Lösungen bis in tiefere Sohlen ist deshalb sehr unwahrscheinlich und braucht in der Sicherheitsanalyse nicht unterstellt zu werden. Durch die Auflösung von Steinsalz vergrößert sich das unverfüllte Hohlraumvolumen im Grubengebäude.

Beim Kontakt von NaCl-Lösung mit Kalilagern (Carnallit oder Hartsalz) finden weitere Löseprozesse statt. Dabei lösen sich die Kalisalze auf, zugleich werden andere Mineralien ausgefällt („Umlösung“). Dieser Prozess läuft so lange ab, bis die Lösung mit den verfügbaren Mineralien der Kalisalze im Gleichgewicht steht oder keine Kalisalze mehr zugänglich sind. Die Entwicklung der Lösung ist komplex und hängt stark von der Zusammensetzung des Salzgesteins und seiner räumlichen Verteilung ab. Im Hinblick auf die Neubildung von Hohlraumvolumen wird die Umsetzung einer NaCl-gesättigten Lösung bis zum invarianten Punkt IP21 betrachtet (Anhang E). Netto ist die Umlösung am Carnallit bis zum Punkt IP21 mit einer erheblichen Hohlraumvergrößerung verbun-



den. Im Hinblick auf mögliche Wechselwirkungen zwischen Versatzmaterial und Lösung wird die gesamte Bandbreite an Lösungszusammensetzungen zwischen reiner, an NaCl gesättigter Lösung und IP21-Lösung betrachtet.

Durch die hier beschriebenen Lösungsprozesse ändert sich das Volumen der kondensierten Phase (Summe aus Fest- und Lösungsphase) fast nicht. Die unter Berücksichtigung der Umlöseprozesse zur Füllung eines Hohlraums benötigte Süßwassermenge entspricht daher in guter Näherung dem luftgefüllten Gesamthohlraumvolumen vor Umlösung.

3.1.3 Zutritt von Lösungen in abgedichtete Bereiche

An die Verfüllung der Strecken und Rolllöcher zwischen den Einlagerungsbereichen West-Südfeld bzw. Ostfeld und der Restgrube werden hohe Anforderungen gestellt (Entfernen der Auflockerungszone, Gewährleistung der Firstbündigkeit). Dadurch sind diese Bereiche gegen die Restgrube wirksam abgedichtet. Die Gesamtheit der Abdichtungen eines Einlagerungsbereiches (Abdichtungssystem) stellt dem Zutritt von Lösung in die abgedichteten Bereiche einen hohen hydraulischen Widerstand entgegen. Der Lösungszutritt in die abgedichteten Einlagerungsbereiche West-Südfeld und Ostfeld erfolgt daher – verglichen mit dem Volllaufen der übrigen Grubenbaue (einschließlich der nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche Zentralteil und Nordfeld) – langsam.

Wegen der „korrosiven“ Wirkung der zu erwartenden Lösungen ($MgCl_2$ -haltige Lösung gegenüber Salzbeton) ist allerdings damit zu rechnen, dass die Abdichtungen während des Lösungszutritts in die abgedichteten Einlagerungsbereiche chemisch verändert werden; dabei kann sich ihre Permeabilität erhöhen. Da die Zutrittsraten aufgrund der niedrigen anfänglichen Permeabilität der Abdichtungen sehr klein sind, wird sich dieser Prozess über lange Zeiträume erstrecken, bevor die Dichtwirkung verlorenght. Das gilt grundsätzlich auch für die Abdichtung des Einlagerungsbereichs Ostfeld auf dem Niveau der 4. Sohle, welche durch den Hauptanhydrit führt und aus Magnesiabeton erstellt wird. Dieses Material wird von Lösungen mit niedrigem Magnesiumgehalt angegriffen, wobei sich Porosität und Permeabilität erhöhen. Gegenüber Lösungen mit einem Magnesiumgehalt von mehr als etwa 12% des Werts von IP21-Lösung ist der Magnesiabeton stabil.

3.1.4 Konvergenz

Aufgrund der Plastizität des Salzgesteins kriechen die Hohlräume im Salz unter dem herrschenden Gebirgsdruck im Laufe der Zeit zu („Hohlraumkonvergenz“, manchmal kurz „Konvergenz“). Dieser Prozess hängt hauptsächlich von den Druckverhältnissen (Gebirgsdruck in der Umgebung des Hohlraums¹ und Fluiddruck im Hohlraum) sowie von den Materialeigenschaften des Salzes ab. Ein hoher Fluiddruck in den Hohlräumen (hydraulischer Druck, Gasdruck) verringert die Konvergenz. In ähnlicher Weise wirken sich Versatzmaßnahmen aus; dabei ist zwischen kompaktierbarem (z.B. Salzgrus) und nicht oder gering kompaktierbarem Versatz (Salzbeton) zu unterscheiden. Bei kom-

¹ Der Gebirgsdruck hängt u.a. auch wesentlich vom Durchbaugrad in der Umgebung des betrachteten Grubenbaus ab.



paktierbarem Versatz setzt eine nennenswerte Stützwirkung erst ein, wenn die Porosität des Versatzes einen charakteristischen Wert unterschreitet.

Vor dem Lösungszutritt zu den Abfällen bewirkt die Konvergenz, dass das fluidzugängliche Volumen im Nahbereich der Abfälle abnimmt. Unter bestimmten Umständen werden Teile der eingelagerten Abfälle vollständig vom Salz eingeschlossen und sind dann für zutretende Lösung nicht mehr zugänglich. In jedem Fall nimmt durch Konvergenz die Lösungsmenge ab, die nach einem Lösungszutritt mit den Abfällen in Kontakt gelangen kann. Dies vermindert insgesamt die Radionuklidmobilisierung. Die Prozesskette wirkt umso stärker, je länger das Volllaufen der Restgrube dauert und je später Lösung mit den Abfällen in Kontakt gelangt.

Nach dem Lösungszutritt zu den Abfällen bewirkt die Konvergenz aufgrund der Verkleinerung des Hohlraumvolumens, dass Flüssigkeit aus den Einlagerungsbereichen in die übrige Grube und aus dieser entlang der Wegsamkeit durch das Salinar in das Hutgestein ausgepresst wird. Sie ist damit eine wesentliche treibende Kraft für die Schadstofffreisetzung aus dem Endlager.

3.1.5 Gasbildung

Die eingelagerten radioaktive Abfälle und die verbleibenden Reststoffe aus dem früheren Betrieb der Grube enthalten Stoffe, die unter den betrachteten Bedingungen des Endlagers (Zutritt von Flüssigkeit, Abwesenheit von Luftsauerstoff) Gase bilden können. Die wesentlichen Prozesse sind die anaerobe Metallkorrosion unter Bildung von Wasserstoff und die anaerobe mikrobielle Zersetzung von Cellulose und anderen Organika unter Bildung von (hauptsächlich) Methan, Wasserstoff und Kohlendioxid; letzteres wird weitestgehend durch die basischen Bestandteile der Versatzmaterialien als Carbonat gebunden und geht nicht in die Gasphase über. Radiolyse spielt im ERAM wegen der geringen Gesamtaktivität der eingebrachten Abfälle keine Rolle.

Aufgrund der Gasbildung kommt es in den abgedichteten Einlagerungsbereichen und in der Restgrube zu einem Druckaufbau. Während des Lösungszutritts aus dem Hutgestein in die Restgrube einerseits und von der Restgrube in die abgedichteten Einlagerungsbereiche andererseits verringert der Druckaufbau die Zutrittsraten und vermindert die insgesamt zutretenden Lösungsmengen. In weniger ausgeprägtem Maß trifft das auch auf den Lösungszutritt in die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche zu. Falls die Gasbildung in einem Einlagerungsbereich zu dem Zeitpunkt, an dem dort der gleiche Druck wie in der übrigen Grube erreicht wird, noch nicht abgeklungen ist, kann sie von da an als treibende Kraft für die Auspressung schadstoffhaltiger Lösung aus dem Einlagerungsbereich in die übrige Grube und weiter durch das Deckgebirge wirken. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass das Gas keine Wegsamkeit für ein Entweichen findet und sich lokal ansammelt.

3.1.6 Frac-Bildung

Wenn der Gasdruck in der Restgrube oder in den abgedichteten Einlagerungsbereichen über den örtlichen Gebirgsdruck im obersten Bereich des jeweiligen Grubenteils ansteigt, wird es dort zur



Bildung von Gaswegsamkeiten kommen. Diese können als ausgedehntes System von Mikrorissen mit relativ geringer, gegenüber dem intakten Steinsalz jedoch erhöhter Permeabilität oder als einzelne makroskopische Risse mit hoher Transmissibilität (Frac) ausgebildet sein. Über diese Wegsamkeiten fließt dann Gas aus dem Grubenteil ab, womit der Druckanstieg endet. Der allgemeine Wissensstand über die Bildung von Gaswegsamkeiten im Steinsalz wird als noch nicht ausreichend eingestuft, um die Frac-Bildung mit Sicherheit auszuschließen, stattdessen die Mikroriss-Bildung nachzuweisen und in einer Sicherheitsanalyse zu unterstellen. Es kann heute lediglich plausibel begründet werden, dass bei einem langsamen Druckanstieg die Mikroriss-Bildung, bei einem im ERAM auszuschließenden schnellen Druckanstieg die Frac-Bildung wahrscheinlicher ist [Popp 2007]. Da die Frac-Bildung im Hinblick auf die Langzeitsicherheit ungünstigere Auswirkungen hat, wird diese in den Modellrechnungen trotz der geringeren Plausibilität in den Fällen unterstellt, bei denen ein Druckanstieg über den örtlichen Gebirgsdruck eintritt.

Die Voraussetzungen für eine Frac-Bildung im Modell sind erfüllt, wenn die Gasbildungsraten und die insgesamt gebildete Gasmenge groß sind im Verhältnis zum Gesamthohlraum und zugleich die Abdichtungen eine sehr niedrige Permeabilität aufweisen.

Hypothetisch kann es auch rein aufgrund der Konvergenz, d.h. ohne Gasbildung oder nach deren Abklingen, zur Bildung von Gaswegsamkeiten (im Modell: Fracs) kommen: Wegen der großen vertikalen Ausdehnung der abgedichteten Bereiche ist der Gebirgsdruck auf der untersten Sohle deutlich höher als in der Firste des obersten Abbaus. Bei der Konvergenz der Grubenbaue auf der untersten Sohle kann der Fluiddruck dort bis gegen den herrschenden Gebirgsdruck ansteigen. Über das Fluid im abgedichteten Bereich überträgt sich der Druck bis in die Abbaue der obersten Sohle und kann dort den lokalen Gebirgsdruck überschreiten. Wegen der Auslegung der Verfüllung ist jedoch höchstens zu sehr späten Zeiten mit dem Entstehen solcher, durch Konvergenz alleine gebildeter Wegsamkeiten (im Modell: Fracs) zu rechnen.

Wenn die druckbedingte Bildung von neuen Wegsamkeiten von der Firste des obersten Abbaus ausgeht (wegen der Druckverhältnisse ist das am wahrscheinlichsten), werden dadurch praktisch nur Gase freigesetzt, und die radionuklidhaltige Lösung verbleibt im Einlagerungsbereich. Bei einer neuen Wegsamkeit, die von einer tieferen Sohle ausgeht, kann auch Lösung pulsartig aus dem abgedichteten Bereich ausgepresst werden. Unter ungünstigen Umständen würde dies zu einer erhöhten Radionuklidfreisetzung führen.

3.1.7 Mobilisierung von Radionukliden

Die radioaktiven Abfälle sind in der Regel in Abfallbehältern verpackt. In einem großen Teil der Abfallgebinde sind die Radionuklide fixiert (als Salz oder in Zement, sehr selten in Bitumen). Mit Ausnahme von ^3H , ^{14}C , ^{129}I und ^{222}Rn , welche gasförmige Verbindungen bilden können, ist eine Freisetzung von Radionukliden nur in Lösung möglich. Der Übergang von der fixierten in die gelöste Form oder in die Gasphase wird im Folgenden als Mobilisierung bezeichnet. Für den Übergang von Radionukliden in die gelöste Form ist es erforderlich, dass die Abfälle mit zugetretener oder durch den Versatz eingebrachter Flüssigkeit in Kontakt stehen. Der mobilisierte Anteil der Radio-



nuklide kann durch ihre begrenzte Löslichkeit sowie durch Sorption an Versatzstoffen niedriger sein als der Inventaranteil in den Abfallgebänden, welche mit Lösung in Kontakt stehen.

Aufgrund der Halbwertszeiten der Radionuklide, welche volatile Verbindungen bilden können, und der Reaktivität dieser volatilen Verbindungen mit Lösungen ist ein Transport über größere Distanzen in der Gasphase nur für ^{14}C möglich. Die Mobilisierung von Radionukliden in die Gasphase ist deshalb nur für ^{14}C von Interesse.

Im Falle des ^{14}C müssen für die Mobilisierung mehrere chemische Spezies unterschieden werden: Carbonat, organische Kohlenstoffverbindungen sowie Carbide. Beim Zutritt von Feuchtigkeit wird der organisch gebundene Kohlenstoff mikrobiell (unter anaeroben Bedingungen) in Methan und Kohlendioxid umgewandelt. Letzteres wird im alkalischen pH-Bereich als Carbonat gebunden. Dessen Löslichkeit ist als Calciumcarbonat begrenzt; dabei ist auch das nicht radioaktive Calciumcarbonat zu berücksichtigen. Carbide zersetzen sich unter Bildung von Methan, von dem sich ein Teil in der Flüssigkeit löst, während der größte Teil in die Gasphase übergeht.

3.1.8 Sorption

Die Versatzstoffe (Salzbeton, Braunkohlefilterasche), aber auch die Abfälle selbst sowie die Eisenkorrosionsprodukte enthalten große Mengen an sorbierenden Festphasen. Sorption innerhalb der Einlagerungsbereiche führt zu einer Reduktion des mobilen Anteils des Radionuklidinventars. Sorption in den Abdichtungen führt zu einer Transportverzögerung; bei stark sorbierenden Radionukliden kann dieser Effekt so groß werden, dass keine Freisetzung aus den Abdichtungen in die übrige Grube erfolgt. Die Sorption unter den Verhältnissen im ERAM ist allerdings schwer zu quantifizieren, da sich verschiedene Einflussgrößen (Lösungszusammensetzung, pH-Wert, Eh-Wert) darauf auswirken, welche wiederum selber vom genauen Ablauf des Lösungszutritts in den betrachteten Grubenbau abhängen und daher nur schwer zu prognostizieren sind. Daher und aufgrund der wenigen vorhandenen experimentellen Daten wird die Sorption in der gesamten Grube konservativ vernachlässigt. Die einzige Ausnahme bildet das ^{226}Ra -Inventar der Radium-VBA, die in einem speziell aufgefahrenen und firstbündig mit Salzbeton verfüllten Streckenstummel im ELB OF endgelagert ist: Der Austritt dieses ^{226}Ra -Inventars aus dem Streckenstummel in den übrigen Einlagerungsbereich wird unter Annahme von Sorption am Salzbeton im Streckenstummel abgeschätzt (vgl. Anhang R).

3.1.9 Transportvorgänge in der Grube

Aufgrund der Prozesse Hohlraumkonvergenz und Gasbildung wird nach dem Erreichen des hydrostatischen Drucks in den Einlagerungsbereichen radionuklidhaltige Lösung aus den Einlagerungsbereichen in die übrige Grube – bei den abgedichteten Einlagerungsbereichen durch das Abdichtungssystem – ausgepresst. Bei den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen trägt auch die Diffusion zum Radionuklidtransport aus dem Einlagerungsbereich in die übrige Grube bei. In der übrigen Grube bewegt sich die radionuklidhaltige Lösung aufgrund von Lösungsverdrängungsprozessen durch Hohlraumkonvergenz und Gasbildung/-speicherung auf mehr oder weniger direkten Wegen



in Richtung Salzspiegel zur Austrittsstelle in das Deckgebirge. Dabei vermischt und verdünnt sie sich mit der Flüssigkeit in den (teilweise verfüllten) Abbauen entlang dieser Wege sowie mit der Flüssigkeit, die aus den anderen Grubenteilen ausgepresst wird. Sorption am Verfüllmaterial wird zu einer Verringerung der Radionuklid-Konzentration in Lösung sowie zu einer Transportverzögerung führen, die aber mangels belastbarer Daten nicht im Modell berücksichtigt ist. Der wesentliche Prozess für den Radionuklidtransport in der übrigen Grube ist die Hohlraumkonvergenz. Der Einfluss der Gasbildung in der übrigen Grube kann vernachlässigt werden, da die Gasbildung hier nach etwa 1'000 Jahren, d.h. lange bevor die Grube vollständig mit Flüssigkeit gefüllt sein kann (vgl. Kapitel 3.2 und 4.1), bereits weitestgehend abgeschlossen ist.

3.1.10 Transport durch Hutgestein und Deckgebirge

Der Transport der aus dem Grubengebäude in das Hutgestein ausgepressten Lösung bis in die Biosphäre wird durch verschiedene Umstände und Prozesse beeinflusst. Je nachdem, wo die Auspressung stattfindet, stellt das Hutgestein einen mehr oder weniger starken hydraulischen Widerstand dar. Den relativ geringsten Widerstand bildet die im Hutgestein rund 4 m mächtige Schichtenfolge „Deckanhydrit – Grauer Salztou – Leinekarbonat“ (Schichtenfolge DGL), die im Bereich der potentiellen Auspressstellen über dem Zentralteil und dem Nordfeld verläuft und schräg gegen NE ansteigt.

Die Schichtenfolge DGL bildet einen möglichen Transportpfad für ausgepresste Radionuklide durch das Hutgestein. Alternative Transportpfade führen durch das geringer durchlässige „intakte“ Hutgestein. Der Transport von der Obergrenze des Hutgesteins weiter bis in die Biosphäre führt dann entweder über den Keuper der Allertalzone oder den Buntsandstein der Weferlinger Triasplatte in das oberflächennahe Grundwasser oder durch Jura² geringer Mächtigkeit in die Oberkreide und entlang dieser an die Geländeoberfläche. Eine weitergehende Diskussion der möglichen Freisetzungspfade enthält Kapitel 3.3.10.

Hydraulische Effekte und auch Dichteeffekte haben einen starken Einfluss auf den Radionuklidtransport durch das Hutgestein und das Deckgebirge, indem sie dort eine erhebliche horizontale Ausbreitung der ausgepressten Salzlösung verursachen und gegen den Aufstieg der schweren, potentiell radionuklidhaltigen Salzlösung aus dem Grubengebäude in die geringer salzhaltigen oberflächennäheren Grundwässer wirken. Dabei mischt sich die potentiell radionuklidhaltige Grubenlösung mit nicht radionuklidhaltigen³ Porenwässern aus Hutgestein und Deckgebirge.

Die Schichtenfolge DGL im Hutgestein und die Schichten des Deckgebirges weisen für die meisten Radionuklide nennenswerte Sorptionskapazitäten auf und vermögen dadurch den Radionuklidtransport zusätzlich zu verzögern.

Insgesamt bewirkt der Transport durch das Hutgestein und das Deckgebirge eine Verzögerung und dadurch eine Verminderung der Radionuklidfreisetzung durch radioaktiven Zerfall, eine Ver-

² An wenigen Orten ist ein direkter Übertritt aus dem Hutgestein in die Oberkreide möglich.

³ Die radiologischen Auswirkungen der natürlich vorhandenen Radionuklide in den Hutgesteins- und Deckgebirgswässern sind nicht Gegenstand der Langzeitsicherheitsanalyse für das ERAM.



minderung der Radionuklidkonzentrationen durch Verdünnung mit radionuklidfreien Hutgesteins- und Deckgebirgswässern sowie eine räumliche Verteilung der Freisetzung von nicht zurückgehaltenen Radionukliden in oberflächennahes genutztes Grundwasser.

3.1.11 Verdünnung in den oberflächennahen Grundwässern

Nach dem Übertritt der radionuklidhaltigen Lösungen in das oberflächennahe Grundwasser erfolgt eine weitere, starke Verdünnung. An der Festphase des Grundwasserträgers findet zudem auch Sorption statt. Diese wirkt sich auf die Konzentrationsverhältnisse von Radionukliden, insbesondere von relativ kurzlebigen Radionukliden innerhalb von Zerfallsreihen, aus. Eine Vernachlässigung dieses Sorptionsprozesses ist unter bestimmten Umständen nicht konservativ, da er zu einem Anstieg der Konzentration von relativ kurzlebigen Folgenukliden in Lösung gegenüber den Verhältnissen entlang des Transportpfads durch Hutgestein und Deckgebirge führen kann. Daher wird die Verschiebung der Konzentrationsverhältnisse in Lösung von Radionukliden, welche Zerfallsreihen angehören, durch Sorptionsprozesse im oberflächennahen Grundwasser im Modell berücksichtigt. An das oberflächennahe genutzte Grundwasser schließen sich die verschiedenen Expositionspfade in der Biosphäre an; damit ist die Kette der Transportprozesse abgeschlossen.

3.2 Referenzszenario

Das Referenzszenario ist auf den Radionuklid-Transportpfad in Lösung ausgerichtet und fasst die Gruppe der wahrscheinlichen künftigen Entwicklungen des Endlagersystems zusammen, die sich bei einem erheblichen Lösungszutritt in die Restgrube während der Nachbetriebsphase ergeben können. Bei diesen Entwicklungen füllen zutretende Wässer aus dem Hutgestein mit der Zeit die Restgrube; die Grubenluft und das sich während des Volllaufes außerhalb der Einlagerungsbereiche bildende Gas entweichen in das Hutgestein. Der sich bis in den Bereich des hydrostatischen Drucks aufbauende Fluiddruck in der Restgrube presst Lösung über die Abdichtsysteme auch in die abgedichteten Einlagerungsbereiche. Dort kommen sie mit den Abfällen in Kontakt und mobilisieren die Radionuklide. Sobald die abgedichteten Einlagerungsbereiche mit Flüssigkeit gefüllt sind bzw. wenn der Fluiddruck in diesen den hydraulischen Druck in der übrigen Grube erreicht hat, wird die Lösung durch die Abdichtungen wieder in die übrige Grube ausgepresst; treibende Kraft ist dabei die Hohlraumkonvergenz der Grubenbaue sowie gegebenenfalls die Gasbildung und Gasspeicherung im abgedichteten Einlagerungsbereich. Bei den Einlagerungsbereichen ohne Abdichtsystem, dem Einlagerungsbereich Nordfeld („ELB NF“) und dem Einlagerungsbereich Zentralteil („ELB ZT“), laufen dieselben Prozesse in der gleichen Reihenfolge ab, allerdings setzt die Auspressphase sogleich nach Volllaufen der entsprechenden Sohle der übrigen Grube ein. Zudem können bei den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen Diffusionsprozesse eine relativ höhere Bedeutung für die Rate des Radionuklidübertritts in die übrige Grube besitzen.

Nachdem die Radionuklide in die übrige Grube übergetreten sind, bei abgedichteten Einlagerungsbereichen nachdem die radionuklidhaltige Lösung das Porenwasser im jeweiligen Abdichtsystem verdrängt hat, vermischt sich die radionuklidhaltige Lösung mit der Flüssigkeit in den Hohlräumen zwischen der Austrittsstelle aus dem Einlagerungsbereich in die übrige Grube und der



Austrittsstelle aus der Grube in die Wegsamkeit durch das Salzgestein in das Hutgestein sowie mit der aus der übrigen Grube durch Konvergenz ausgepressten Flüssigkeit. Treibende Kräfte für die Auspressung radionuklidhaltiger Lösung aus der Grube in und durch das Hutgestein sind die weitere Auspressung von Lösung aus den Einlagerungsbereichen sowie die Konvergenz der Grubenbaue in der übrigen Grube.

Während des Transports durch Hutgestein und Deckgebirge nehmen sowohl die radionuklidspezifischen Aktivitätsflüsse als auch die Radionuklidkonzentrationen in Lösung ab. Die maßgebenden Prozesse sind die Verzögerung des Transports durch geringe Fließgeschwindigkeiten und (für zahlreiche Radionuklide) durch Sorption, der radioaktive Zerfall während des Transports sowie die Mischung der radionuklidhaltigen Lösung mit radionuklidfreiem Hutgesteins- und Deckgebirgswasser. Der Übertritt in das oberflächennahe Grundwasser erfolgt räumlich ausgedehnt.

Nach der Freisetzung in das oberflächennahe Grundwasser erfolgt dort eine weitere Verdünnung durch Mischung der aus der Tiefe stammenden radionuklidhaltigen Lösung mit dem oberflächennahen Grundwasser. Die Nutzung des oberflächennahen Grundwassers als Trinkwasser und für die Erzeugung von Lebensmitteln führt über mehrere Expositionspfade zu Strahlenexpositionen.

Die möglichen radiologischen Auswirkungen des Radionuklidtransports in der Gasphase sind Gegenstand von speziellen Untersuchungen. Diese und ihre Ergebnisse werden in Anhang P dargestellt. Die Ergebnisse fließen in die Schlussfolgerungen in Kapitel 6 ein.

Das Referenzszenario ist folgendermaßen charakterisiert:

- Die Schachtverschlüsse werden über die gesamte Zeitperiode als funktionsfähig entsprechend der Planung, d.h. als dicht betrachtet. Die möglichen Zutrittsraten von bis zu $0,1 \text{ m}^3/\text{a}$ sind derart gering, dass sie beim Nachweis der Langzeitsicherheit für das Referenzszenario vernachlässigt werden können. Eine Abweichung von dieser Annahme für das Referenzszenario ist Gegenstand des „what-if“-Szenarios „Mangelhafte Abdichtung Schacht Bartensleben“ (vgl. Kapitel 3.5.9).
- Die Abdichtungen zwischen den Einlagerungsbereichen WSF bzw. OF und Zentralteil erfüllen die technischen Anforderungen, d.h. die Strecken sind firstbündig verfüllt und es gibt keine hochdurchlässigen Wegsamkeiten in den Auflockerungszonen. Abweichungen von dieser Annahme für das Referenzszenario sind Gegenstand der Alternativszenarien „Auflockerungszone um Abdichtung im Hauptanhydrit“ und „Unwirksame Abdichtungen“ (vgl. Kapitel 3.5.2 und 3.5.4).
- Es gibt keine durchgehende hydraulische Wegsamkeit im Hauptanhydrit zwischen ELB OF und dem Zentralteil, so dass Lösungszutritt und –auspressung dort ausschließlich über die Abdichtungen erfolgen können. Eine Abweichung von dieser Annahme für das Referenzszenario ist Gegenstand des Alternativszenarios „Hauptanhydrit als Wegsamkeit zum Ostfeld“ (vgl. Kapitel 3.5.1).
- Aus dem Hutgestein tritt Lösung in die Restgrube zu, wobei der Zutrittsort nicht näher spezifiziert wird. Der Lösungszutritt in die Restgrube wird durch die Zeitperiode ab Verschluss des Endlagers bis zum Volllaufen der Restgrube parametrisiert. Der Salzgehalt der zutretenden Lösung kann mit der Zeit abnehmen; für die Modellrechnungen wird vereinfachend angenom-



men, dass von Anfang an reines Süßwasser zutritt. Bei einem typischen Verlauf des Volllaufens steigt die Zutrittsrate durch Lösungsprozesse mit der Zeit an. In der Folge wächst der Lösungsdruck in der Grube zunächst langsam an und steigt erst gegen Ende der Volllaufphase rasch auf den hydrostatischen Wert (bezogen auf den Grundwasserspiegel des oberflächennahen Grundwassers). Das Volllaufen der Restgrube dauert mindestens 1'500 Jahre (vgl. Kapitel 4.1). Im Rahmen eines „what-if“-Szenarios werden die potentiellen radiologischen Auswirkungen analysiert, die ein hypothetisches instantanes Volllaufen der Restgrube unmittelbar nach Verschluss der Grube hervorrufen könnte (vgl. Kapitel 3.5.10).

- Während des Volllaufens der Restgrube laufen in den abgedichteten Einlagerungsbereichen, in den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen und in der übrigen Grube bereits verschiedene Prozesse ab. Es sind dies insbesondere (i) der radioaktive Zerfall, (ii) die Gasbildung, (iii) die Hohlraumkonvergenz und (iv) Aufsättigungsprozesse der zutretenden Wässer an Halit bis zur Sättigung sowie Umlöseprozesse an Kalisalzen in nicht näher spezifiziertem Ausmaß. Es wird angenommen, dass nach dem Volllaufen der Restgrube dort in guter Näherung hydrostatische Druckverhältnisse herrschen.
- Mit dem Ansteigen des Lösungspegels in der Restgrube gelangen die Abdichtungen der Einlagerungsbereiche WSF und OF (von unten nach oben) in den gesättigten Bereich, und der Lösungsdruck vor den Abdichtungen wächst an. Dieses Anwachsen des Fluiddrucks ist in der Regel stärker als das Ansteigen des Gasdrucks im Innern des Einlagerungsbereichs. Damit beginnt gegen Ende des Volllaufens Lösung aus der Restgrube in die Abdichtungen einzudringen und durch die Abdichtungen in die abgedichteten Einlagerungsbereiche vorzudringen. Aufgrund der nachfolgend angesprochenen Korrosion des Abdichtmaterials verringert sich mit der Zeit der hydraulische Widerstand der Abdichtungen, und die Rate des Lösungszutritts in die abgedichteten Einlagerungsbereiche steigt an.

Je nach dem zeitlichen Fortschritt der verschiedenen Prozesse erreicht der Fluiddruck im abgedichteten Einlagerungsbereich den Wert des Lösungsdrucks in der Restgrube, bevor eine der Abdichtungen vollständig korrodiert ist. In diesem Fall weist das Abdichtungssystem auch während der anschließenden Auspressphase noch einen gewissen hydraulischen Widerstand auf. Es ist aber auch möglich, dass eine Abdichtung im Verlauf des Lösungszutritts in den Einlagerungsbereich vollständig durchkorrodiert und dadurch ihren hydraulischen Widerstand weitgehend verliert. In der Folge steigt die Rate des Lösungszutritts aus der Restgrube in den betroffenen Einlagerungsbereich deutlich an, und der Druckausgleich zwischen Restgrube und Einlagerungsbereich stellt sich innerhalb von kurzer Zeit ein.

Das Referenzszenario schließt beide möglichen Entwicklungen ein, und sie müssen beim ELB WSF und beim ELB OF nicht gleich sein.

- Aufgrund der Umlöseprozesse an den Kalilagern können vor den Abdichtungen magnesiumhaltige Lösungen anstehen. Diese korrodieren den Salzbeton in den Abdichtungen, was zu einer Erhöhung ihrer Permeabilität führt. Der Versatz aus Salzbeton in der übrigen Grube reagiert dagegen im Referenzszenario nicht in nennenswertem Ausmaß mit der magnesiumhaltigen Lösung, weil keine ausreichenden hydraulischen Kräfte vorhanden sind, um das Porenwasser im Innern der großen Versatzkörper zu verdrängen. Eine Abweichung von dieser Annahme ist Gegenstand des Alternativszenarios „Korrosion des Salzbetons in der übrigen Grube“ (vgl. Kapitel 3.5.5)



- Sofern die Lösung, welche auf der 4. Sohle vor der Abdichtung des ELB OF aus Magnesiabenton ansteht, keinen (oder keinen signifikanten) Kontakt zu Kalilagern hatte, ist sie arm an Mg-Ionen. Sofern die Mg-Konzentration weniger als 12,2% des Werts in IP21-Lösung beträgt, bewirkt sie Umlöseprozesse am Magnesiabenton (Korrosion des Magnesiabentons durch Mg-arme Lösung). Das Referenzszenario schließt Systemzustände mit allen möglichen Mg-Konzentrationen zwischen reiner NaCl-Lösung und IP21-Lösung und damit Systementwicklungen mit und solche ohne Korrosion der Magnesiabenton-Abdichtung auf der 4. Sohle zum ELB OF ein. Für die Modellrechnungen wird überall in der Grube die gleiche Lösungszusammensetzung angenommen. Die Definition von zwei „what-if“-Fällen mit extremen Lösungszusammensetzungen enthält Kapitel 3.5.3.
- In die übrige Grube wurde mit dem Abfall und dem kompaktierbaren Versatz ausreichend Wasser eingebracht, so dass die Gasbildung außerhalb der Einlagerungsbereiche ohne Beschränkung durch eine mangelhafte Verfügbarkeit von Wasser abläuft, auch wenn keine Lösung aus dem Hutgestein Zutritt. In den abgedichteten Einlagerungsbereichen sind die Mengenverhältnisse anders. Bei den abgedichteten Einlagerungsbereichen wird berücksichtigt, dass die Gasbildung zum Erliegen kommt, wenn das mit dem Abfall und dem kompaktierbaren Versatz eingebrachte Wasser aufgebraucht ist. Dabei wird ausreichende Mobilität des eingebrachten Wassers unterstellt. Es wird jedoch ausgeschlossen, dass ein erheblicher Anteil der Porenlösung aus dem Salzbetonversatz austritt und für die Gasbildung zur Verfügung steht. Die Gasbildung in einem abgedichteten Einlagerungsbereich setzt erst wieder ein, wenn eine gewisse Menge Lösung durch das Abdichtsystem zugetreten ist. Für die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche wird angenommen, dass die Gasbildung erst einsetzt, wenn die übrige Grube vollgelaufen ist.
- Der Lösungsübertritt vom Südfeld in das Westfeld erfolgt in der Darstellung mit dem Rechenprogramm PROSA ohne zeitliche Verzögerung. Dies ist eine vereinfachende Annahme. Das Verschlusskonzept sieht vor, alle bestehenden Verbindungen zum Westfeld mit der Qualität von Abdichtungen zu verfüllen und eine neue Verbindung zwischen dem Westfeld und dem Südfeld zu erstellen, welche auf dem Niveau der 1. Sohle (-253 mNN) an das Südfeld anschließt (vgl. Kap. 3.4). Dadurch kann Lösung erst bei einem hohen Füllstand im Südfeld (sofern ein solcher erreicht wird) oder nur langsam durch Abdichtungen ins Westfeld übertreten. Das im Westfeld gebildete Gas kann aber ohne hydraulischen Widerstand ins ausgedehnte Gesamthohlraumvolumen des Südfelds gelangen.
- Im Hinblick auf die Bedeutung des Gases beim Lösungszutritt in die abgedichteten Einlagerungsbereiche und bei der Lösungsauspressung aus allen Einlagerungsbereichen werden drei Fälle unterschieden:
 - „ohne Gaspolster“: Die Gasbildung hat keinen Einfluss (z.B. weil die Gasbildung vor dem Volllaufen der Restgrube zum Abschluss kommt und die Abdichtungen für ein Entweichen des gebildeten Gases ausreichend permeabel sind); der Lösungszutritt in die Einlagerungsbereiche erfolgt ohne Gegendruck, bis sie vollständig mit Flüssigkeit gefüllt sind. Auch die Hohlraumkonvergenz der Einlagerungsbereiche wirkt bis zu diesem Zeitpunkt ohne Fluidstützdruck. Anschließend wird die radionuklidhaltige Lösung aus den Einlagerungsbereichen ausgepresst; treibende Kraft ist allein die Hohlraumkonvergenz.



- „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“: Gas wird gebildet und sammelt sich im betreffenden Einlagerungsbereich an. Es kann aber zu keiner Zeit aus dem Einlagerungsbereich entweichen. Während der Phase des Lösungszutritts in den Einlagerungsbereich steigt der Gasdruck im Einlagerungsbereich stetig an. Ursachen sind die Gasbildung, die Hohlraumkonvergenz und die Verdrängung von Gas durch zutretende Flüssigkeit. Aufgrund des zunehmenden Gasdrucks verlangsamen sich der Lösungszutritt und die Konvergenz. Die Zutrittsphase ist beendet, wenn der Fluiddruck im Einlagerungsbereich den Lösungsdruck in der übrigen Grube erreicht. Dann beginnt die Auspressung von Lösung – angetrieben durch die Hohlraumkonvergenz und, sofern noch nicht abgeschlossen, durch die Gasbildung.
- „mit Gaspolster, mit Gasfluss“: Der Unterschied zum vorherigen Fall besteht darin, dass während der Auspressphase sowohl Flüssigkeit als auch Gas aus dem Einlagerungsbereich ausgepresst werden. Der Druck in den abgedichteten Bereichen und damit die Rate der Lösungsauspressung sind dadurch geringer.

Der Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ ist für den Einlagerungsbereich WSF als wahrscheinlichster, jedoch nicht als einzig möglicher Fall anzusetzen (vgl. Begründung in Kapitel 3.3.7). Für den Einlagerungsbereich OF trifft dies auf den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ zu. Der Fall „ohne Gaspolster“ ist für die abgedichteten Einlagerungsbereiche als wenig wahrscheinlicher Extremfall einzustufen, der aber als Näherung nicht völlig ausgeschlossen werden kann. Für die beiden nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche NF und ZT sind allen drei Fällen vergleichbare Gewichte beizumessen.

- Die Transportpfade durch die übrige Grube und der Ort des Übertritts der ausgepressten kontaminierten Lösung aus dem Grubengebäude durch das Salzgebirge in das Hutgestein werden nicht festgelegt. Für die Berechnung der Verdünnung im Grubengebäude außerhalb der Einlagerungsbereiche werden kurze Transportpfade im Grubengebäude unterstellt: Für die Einlagerungsbereiche WSF, OF und ZT ein Übertritt im Zentralteil, für den ELB NF ein Übertritt über die oberen Abbaue des Nordfelds. Dennoch wird vereinfachend angenommen, dass der Fließweg im Hutgestein/Deckgebirge für alle Einlagerungsbereiche derselbe ist und die Radionuklide aus allen Einlagerungsbereichen mit der gesamten Auspressrate aus dem Grubengebäude durch Hutgestein und Deckgebirge getrieben werden. Dies ist eine ungünstige Annahme.

3.3 Konzept der quantitativen Analyse

Für den quantitativen Teil der Sicherheitsanalyse werden die relevanten Prozesse in einem Modell zusammengefasst. Dazu werden sie mit vereinfachten Algorithmen und Modellparametern mathematisch beschrieben. Die Algorithmen müssen konservativ abdeckend sein; die Parameter sollten messbar sein oder auf messbare Größen zurückgeführt werden können. Das hier verwendete Modell, das auf dem Rechenprogramm PROSA [Colenco 2006] beruht, ist so konzipiert, dass möglichst wenig Hypothesen gemacht werden müssen (z.B. über den Zutrittsort der Wässer aus dem Hutgestein, die Reihenfolge des Volllaufens der verschiedenen Grubenteile, den Weg der kontaminierten Lösung von den Einlagerungsbereichen zum Austrittsort aus der Grube durch das Salzgestein in das Hutgestein usw.). Dies bedingt einen hohen Grad an Abstraktion. Der Vorteil besteht darin, dass trotz der Komplexität des ERAM die Zahl der Rechenfälle, die explizit behandelt wer-



den müssen, begrenzt werden kann. Zudem können viele Varianten des Referenzszenarios und alternative Szenarien mit Parametervariationen abgedeckt werden.

Potentiell wichtige Szenarien werden mit deterministischen Rechnungen, d.h. unter Verwendung von festen, vorgegebenen Parametern, quantitativ beschrieben. Da der Rechenaufwand für einen Parametersatz hinreichend gering ist, können die Vielzahl der möglichen Bedingungen im Grubengebäude und die verbleibenden Ungewissheiten bezüglich der verwendeten Parameter zusätzlich durch probabilistische Rechnungen erfasst werden, wobei für die Parameter Bandbreiten und Wahrscheinlichkeitsverteilungen definiert werden. Die Ergebnisse der probabilistischen Rechnungen sind Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die mögliche Strahlenexposition und für den Zeitpunkt des Eintretens der höchsten Strahlendosis. Da diese Modellrechnungen auf einer festen, grundlegenden Gruppe von Szenarien beruhen, deren Eintreten unterstellt und zu deren Eintrittswahrscheinlichkeit keine Aussage gemacht wird, und da diese Szenarien zudem verschiedene ungünstige Vereinfachungen und Näherungen enthalten, ist das Vorgehen nicht eine probabilistische Sicherheitsanalyse im strengen Sinne. Die Ergebnisse sind vielmehr bedingte Wahrscheinlichkeiten für die Strahlenexposition (d.h. Wahrscheinlichkeiten unter gewissen gegebenen Voraussetzungen), die jedoch eine sehr wertvolle Ergänzung der deterministischen Modellrechnungen für die Bewertung der Langzeitsicherheit darstellen. Die Resultate von deterministischen Rechnungen werden in Kapitel 5.1, solche von probabilistischen Rechnungen in Kapitel 5.2 dargestellt und diskutiert.

Für die Analyse der Langzeitsicherheit werden die Hohlräume des Endlagers Morsleben unterteilt in

- die Einlagerungsgrubenbaue und die mit diesen hydraulisch gut verbundenen Hohlräume, die zu den Einlagerungsbereichen West-Südfeld (WSF), Ostfeld (OF), Nordfeld (NF) und Zentralteil (ZT) zusammengefasst werden,
- die Strecken, die firstbündig verfüllt werden und dadurch⁴ den Lösungszutritt in die Einlagerungsbereiche wirksam – und für die Sicherheitsanalyse belastbar – beschränken und verzögern („Abdichtungen“, vgl. unten) und
- die übrigen Hohlräume, in denen die Radionuklid-Konzentration durch Verdünnung weiter abnimmt.

Die schematische Darstellung des Grubenteils Bartensleben aufgrund dieser Gruppierung und Zusammenfassung von Hohlräumen zeigt Abbildung 3-2.

Die Algorithmen für die quantitative Sicherheitsanalyse mit dem Programm PROSA sind in Anhang A dokumentiert. Eine Kurzbeschreibung des Rechenprogramms ist in Anhang B gegeben. Die für das Referenzszenario berücksichtigten Prozesse und ihre Umsetzung im Modell sind in der Tabelle 3–1 zusammengestellt und werden in den anschließenden Unterkapiteln von Kapitel 3.3 dargelegt. Detaillierte Angaben zur geometrischen Abbildung des Grubengebäudes im Modell enthält Kapitel 3.4. Weitere Szenarien können vielfach analog zum Referenzszenario, jedoch mit anderen Parametern, nachgebildet werden (siehe Kapitel 3.5).

⁴ beim ELB WSF in Verbindung mit dem speziell verfüllten Wetterrollloch



Tabelle 3-1 Auflistung der im Modell integrierten Prozesse und Vorgänge (vgl. auch örtliche Zuordnung dieser Prozesse und Vorgänge in Abbildung 3-2)

Nr.	Prozess	Behandlung im Modell
1	Volllaufen der übrigen Grube	Volllaufen wird nicht explizit modelliert, Parametrisierung durch Dauer des Volllaufens. Modellierung der folgenden Prozesse während des Volllaufens: Radioaktiver Zerfall, Gasbildung und Hohlraumkonvergenz. Der Lösungszutritt in Einlagerungsbereiche setzt erst bei Ende des Volllaufens ein, bei vollem hydrostatischem Druck in der übrigen Grube.
2	Auf- und Umlöseprozesse	instantane Hohlraumvergrößerung in der übrigen Grube bei Ende des Volllaufens
3	Advectiver Zutritt von Lösung in die Einlagerungsbereiche	eindimensionale Bewegung entlang einer Stromröhre, fortschreitende Korrosionsfront, erhöhte Permeabilität des korrodierten Abschnitts ⁵
4	Korrosion der Abdichtungen	
5	Gasbildung im Einlagerungsbereich	Zeitlich veränderliche Gasbildung als Funktion vorgegeben
6	Hohlraumkonvergenz im Einlagerungsbereich	Hohlraum- und Porenvolumen als Funktion der Zeit, berechnet unter Berücksichtigung der Stützwirkung von Fluiddruck und Versatz
7	Mobilisierung von Radionukliden	Anteilig berechnet, abhängig von dem nach der Zutrittsphase vorhandenen Flüssigkeitsvolumen, Vernachlässigung der Sorption, Aufteilung der volatilen Radionuklide auf Gas- und Flüssigphase in Abhängigkeit von ihrer Löslichkeit
8	Sorption der Nuklide im Einlagerungsbereich	
9	Löslichkeitslimitierung im Einlagerungsbereich	Löslichkeit nur für $^{14}\text{CO}_3^{2-}$ angewandt (elementspezifisch)
10	Unterschiedliches Verhalten des Gases im Einlagerungsbereich	Fälle (mit/ohne Gaspolster, mit/ohne Gasfluss während der Auspressphase)
11	Advectiver Transport der Radionuklide im Grubengebäude	eindimensionale Bewegung, beschränkt auf ausgewählte Transportstrecken
12	Sorption der Radionuklide während des Transportes im Grubengebäude	Vernachlässigung der Sorption
13	Gleichzeitiger Gastransport während der Auspressphase	Fall „mit Gaspolster/mit Gasfluss“
14	Frac-Bildung des Salzgesteins bei Überdruck im Einlagerungsbereich	Veränderung der hydraulischen Eigenschaften des Modell-Abdichtsystems bei Überschreiten eines kritischen Gasdrucks
15	Mischung mit Lösung außerhalb der Einlagerungsbereiche	Fließrate der unkontaminierten Lösung als Funktion der Zeit, berechnet aus der Hohlraumkonvergenz in der übrigen Grube; Mischung zeitabhängig berechnet

⁵ Nicht abgedichtete Einlagerungsbereiche werden als abgedichtete Einlagerungsbereiche mit sehr kurzem Abdichtsystem modelliert.



Tabelle 3-1 Auflistung der im Modell integrierten Prozesse und Vorgänge (vgl. auch örtliche Zuordnung dieser Prozesse und Vorgänge in Abbildung 3-2) (Fortsetzung)

Nr.	Prozess	Behandlung im Modell
16	Hohlraumkonvergenz der übrigen Grube	Hohlraum- und Porenvolumen als Funktion der Zeit, berechnet unter Berücksichtigung der Stützwirkung von Fluiddruck und Versatz
17	Überlagerung der Flüsse aus den verschiedenen Einlagerungsbereichen	getrennte Summation der Radionuklid- und Flüssigkeitsflüsse
18	Advectiver Transport durch das Hutgestein und das Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär)	eindimensionale Bewegung entlang einer Stromröhre, angetrieben durch die Lösungsauspressung aus der Grube
19	Sorption während des Transports durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär)	Verringerung der Transportgeschwindigkeit durch reversible Sorption mit linearen Sorptions-Isothermen
20	Sorption im oberflächennahen Aquifer	keine Transportverzögerung von Einzelnucliden und langlebigen Radionucliden aus Zerfallsketten; Veränderung der Konzentrationen kurzlebiger Tochternuclide (Zerfallsgleichgewichte)
21	Verdünnung im Grundwasser	Verdünnung durch Mischung mit vorgegebenem oberflächennahem Grundwasserfluss, mindestens jedoch um den Faktor 500 bezogen auf die Lösungsauspressrate aus der Grube (vgl. Punkt 22)
22	Einhaltung der Trinkbarkeit hinsichtlich Salinität	Mindest-Verdünnungsfaktor (vgl. Punkt 21)
23	Strahlenexposition des Menschen	Dosiskonversionsfaktoren

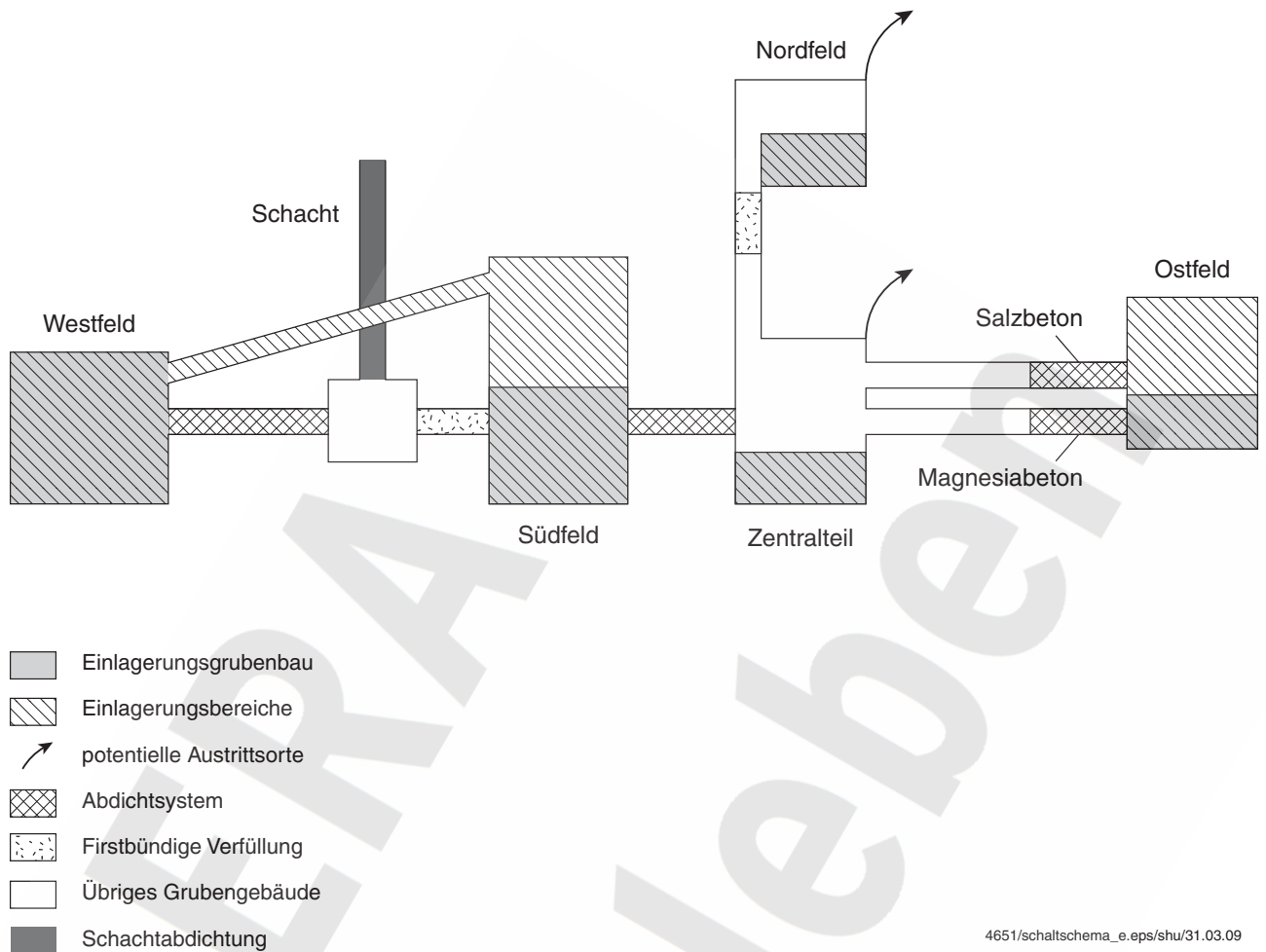
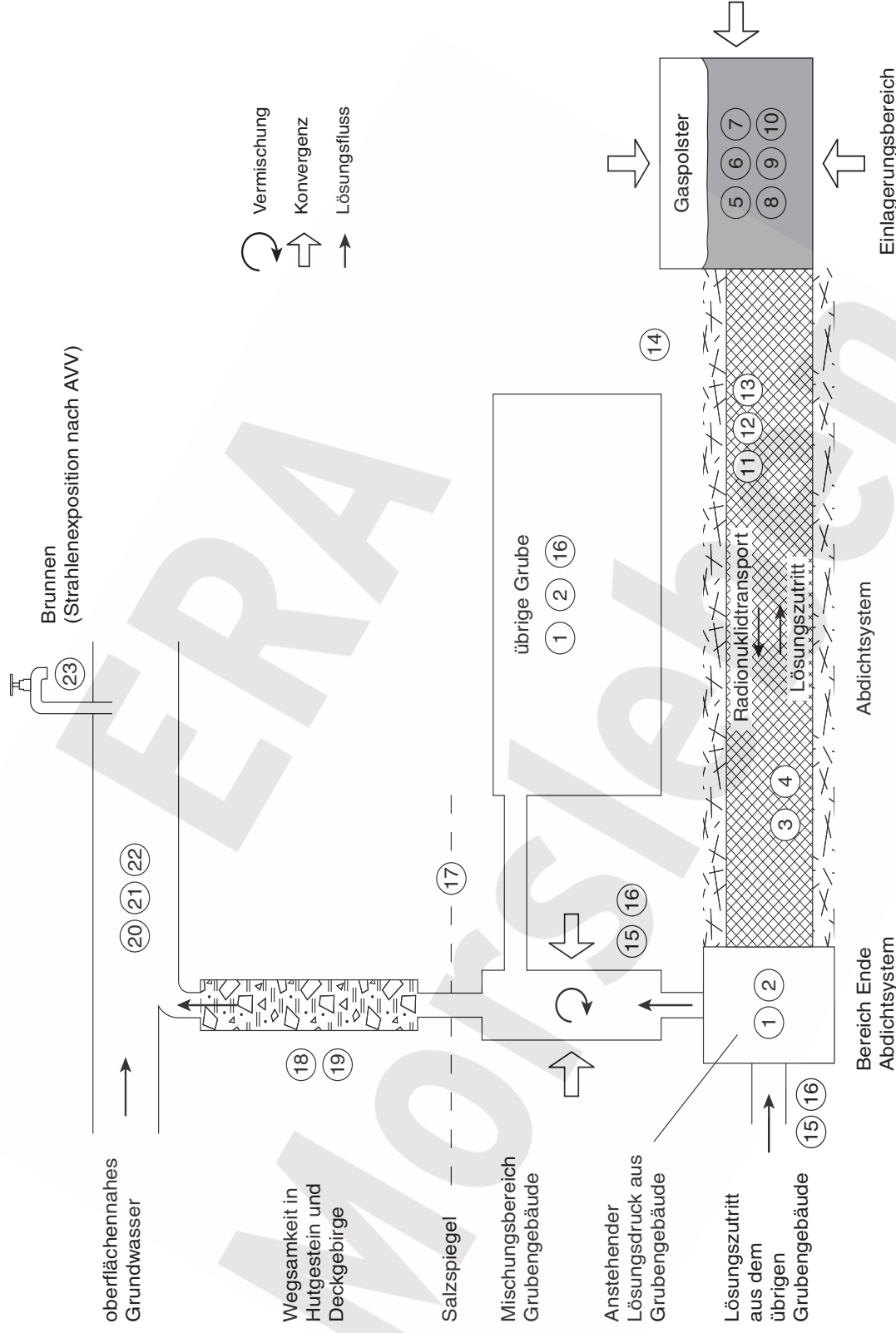


Abbildung 3-2 Schematische Gruppierung und Zusammenfassung der Grubenbaue des Grubenteils Bartensleben

Das Konzept des Rechenmodells für den quantitativen Nachweis der Langzeitsicherheit und die wichtigen dabei berücksichtigten Prozesse sind in Abbildung 3-3 dargestellt. Die Modellierung der einzelnen Prozesse wird in den Abschnitten 3.3.1 bis 3.3.11 beschrieben.

Das Modell simuliert die Prozesse bis zum „Mischungsbereich Grubengebäude“ (vgl. Abbildung 3-3) getrennt für jeden Einlagerungsbereich. Für die anschließenden Prozesse – die Simulation des Transportes durch Hutgestein und Deckgebirge, die Verdünnung im oberflächennahen Grundwasser und die Umrechnung in die Strahlenexposition – werden die Beiträge der verschiedenen Einlagerungsbereiche zusammengefasst.

Im Folgenden werden das Konzept und die getroffenen Vereinfachungen erläutert. Dabei wird insbesondere auch auf die zahlreichen konservativen Näherungen und Vereinfachungen, d.h. auf solche, die zu einer Überschätzung der Auswirkungen führen, hingewiesen.



4651/avv_ablauf2_Teps/shu/27.03.09

Abbildung 3-3 Schematische Darstellung der Modellkomponenten und wesentlicher Prozesse. Die Ziffern entsprechen den in Tabelle 3-1 aufgeführten Prozessen. (Nicht abgedichtete Einlagerungsbereiche werden als abgedichtete Einlagerungsbereiche mit sehr kurzem Abdichtsystem modelliert)



3.3.1 Volllaufen der übrigen Grube

Das Volllaufen der übrigen Grube ist im Einzelnen ein sehr komplexer Prozess. Ursachen sind u.a., dass weder der Ort des Lösungszutritts, der Zeitpunkt des Beginns des Lösungszutritts, die Rate des Lösungszutritts und deren zeitliche Entwicklung noch die Zusammensetzung der zutretenden Lösung und deren zeitliche Entwicklung als charakteristische FEPs des betrachteten Szenarios festgelegt werden. Ebenso wenig werden auch die hydraulischen Verhältnisse in der übrigen Grube zu Beginn des Lösungszutritts und die Änderungen dieser hydraulischen Verhältnisse während und als Folge des Volllaufens spezifiziert. Damit können auch keine Aussagen zu den Fließpfaden im Grubengebäude und zur Reihenfolge, mit dem die verschiedenen Teile der übrigen Grube⁶ volllaufen, abgeleitet werden. Der Verzicht auf diese Angaben ist Teil des Analysekonzepts (vgl. auch die Anmerkung zur Abstraktion in der Einleitung zu Kapitel 3.3).

In der Realität werden die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche bei einem relevanten Lösungszutritt in die Grube gleichzeitig mit der übrigen Grube volllaufen. Im Modell wird vereinfachend angenommen, dass die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche erst am Ende des Volllaufens der übrigen Grube rasch volllaufen. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel systematisch vom „Volllaufen der übrigen Grube“ und nicht vom „Volllaufen der Restgrube“ gesprochen.

Die Parametrisierung des Volllaufens der übrigen Grube erfolgt im Modell durch Parametrisierung des Zeitpunkts nach Verschluss des Endlagers, zu dem die übrige Grube vollgelaufen ist. Dabei wird angenommen, dass das in der übrigen Grube gebildete Gas während des Volllaufens aus der Grube entweicht und dass der Gasbildungsprozess in der übrigen Grube nach deren Volllaufen abgeschlossen ist. Die erste Annahme ist konservativ, denn ein Gaspolster in der Restgrube würde durch den sich aufbauenden Druck das Volllaufen zunehmend verzögern und könnte – als Gasblase direkt unterhalb der Zutrittsstelle am Salzspiegel – anschließend sogar die Auspressung von Lösung aus der Grube in das Hutgestein verhindern. Die zweite Annahme ist dadurch begründet, dass einerseits das Verhältnis aus gasbildenden Reststoffen und Feuchtigkeit enthaltenden Versatzstoffen in der übrigen Grube klein ist und dass andererseits während des allmählichen Volllaufens der Grube weitere Flüssigkeit zu den Abfällen gelangen kann. Da die gasbildenden Reststoffe dort überwiegend Eisen und Cellulose, aber nahezu keine schwer abbaubaren Organika enthalten, klingt die Gasbildung in der übrigen Grube innerhalb von etwa tausend Jahren fast vollständig ab [Colenco 2002c]. Während des Volllaufens steigt der Lösungspegel in der übrigen Grube langsam an. Es ist zu erwarten, dass bei einer Systementwicklung mit relevantem Lösungszutritt die Lösungszutrittsrate zunächst über lange Zeit relativ niedrig bleibt und erst mit der Zeit – z.B. durch Lösungsprozesse am Salzspiegel und entlang der Wegsamkeit durch das Salzgestein bis in die Grube – ansteigt. In der Folge bleibt der Fluiddruck in der übrigen Grube während eines Großteils der Dauer bis zum Ende des Volllaufens relativ niedrig und steigt dann am Ende der Volllaufphase rasch auf den hydrostatischen Wert an. Für die Modellierung der Hohlraumkonvergenz während des Volllaufens wird angenommen, dass der Fluiddruck in der übrigen Grube während der Volllaufphase zeitlich konstant ist und einen vorgegebenen Wert zwischen dem Atmosphärendruck und dem hydrostatischen Druck aufweist, der einer Flüssigkeitssäule bis zum Salzspiegel

⁶ genauer: der Restgrube, d.h. der übrigen Grube und der nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche



entspricht. Dieser Druck wird mit $p_{\text{ProI,RG}}$ bezeichnet. Am Ende der Volllaufphase wird dann ein instantaner Anstieg des Lösungsdrucks in der Restgrube auf den hydrostatischen Wert unterstellt, der sich auf den oberflächennahen Grundwasserspiegel bezieht.

Für die Modellrechnungen wird angenommen, dass sich das Endlagersystem während des Volllaufens der übrigen Grube ausschließlich aufgrund der folgenden Prozesse verändert:

- radioaktiver Zerfall, teilweise mit Bildung von radioaktiven Zerfallsprodukten
- Gasbildung in den abgedichteten Einlagerungsbereichen (als konservative Vereinfachung wird angenommen, dass die Gasbildung in den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen NF und ZT erst am Ende der Volllaufphase einsetzt und dann zur Auspressung von kontaminierter Lösung aus dem Einlagerungsbereich beiträgt; dies ist für die Fälle „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ und „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ relevant, vgl. Kapitel 3.2)),
- Hohlraumkonvergenz mit Stützwirkung des Versatzes und des Fluiddrucks

Vereinfachend wird angenommen, dass die Auf- und Umlöseprozesse der aus dem Hutgestein zutretenden Lösung⁷ am Steinsalz und an den Kalisalzen erst am Ende der Volllaufphase, dann aber instantan, wirken. Im Modell entspricht das Volumen der insgesamt zutretenden Wässer damit dem Gesamthohlraumvolumen vor den Auf- und Umlöseprozessen. Dies ist eine gute Näherung, weil sich bei den hier potentiell relevanten Auf- und Umlöseprozessen das Volumen der kondensierten Phase nur geringfügig ändert: Die Zunahme des Flüssigkeitsvolumens durch die Löseprozesse und die Abnahme des Feststoffvolumens an Stein- und Kalisalzen heben sich in der Summe nahezu auf. Die Modellierung der Auf- und Umlöseprozesse ist im anschließenden Kapitel 3.3.2 dargelegt.

Weiterhin wird vereinfachend angenommen, dass das Eindringen von Lösung in die Abdichtsysteme der abgedichteten Einlagerungsbereiche und ggf. die Korrosion dieser Abdichtsysteme erst einsetzt, wenn die übrige Grube vollgelaufen ist. In der Realität ist bei einem Lösungszutritt in die Grube zu erwarten, dass der Lösungspegel in der übrigen Grube während eines großen Teils der Volllaufphase tief liegt und der Lösungsdruck im gesättigten Bereich entsprechend niedrig ist. Da zudem sowohl die Dauer des Volllaufens der übrigen Grube als auch die Korrosionsraten der Abdichtungen in einem breiten Band variiert werden, ist die Vereinfachung zulässig. In entsprechender Weise wird ebenfalls angenommen, dass die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche erst nach dem Volllaufen der übrigen Grube, dann aber instantan, volllaufen.

Die Prozesse Gasbildung und Hohlraumkonvergenz während der Phase des Volllaufens werden grundsätzlich gleich modelliert wie während der anschließenden Auspressphase. Die Modellkonzepte sind in Kapitel 3.3.5 und 3.3.4 beschrieben. Nachfolgend aufgeführt sind Abweichungen der Modellierung für die Volllaufphase.

Für die chemische Umsetzung der Abfallbestandteile (Korrosion der Metalle, mikrobieller Abbau der Organika) wird Flüssigkeit benötigt. Ist kein Wasser mehr verfügbar, weil die anfänglich vorhandene Flüssigkeitsmenge aufgebraucht ist, kommt die Gasbildung zum Erliegen. Ein Zutritt von

⁷ im Modell Süßwasser (vgl. Kapitel 3.2)



Flüssigkeit in die abgedichteten Einlagerungsbereiche während der Phase des Volllaufens wird ausgeschlossen. Als Anfangsflüssigkeitsgehalt im Einlagerungsbereich wird die mit den Abfällen und dem Salzgrus eingebrachte Wassermenge sowie ein geringer, als verfügbar angenommener Anteil des Porenwassers im Salzbeton angesetzt.

Aus dem Anfangsflüssigkeitsgehalt und dem Inventar an gasbildenden Stoffen im Einlagerungsbereich wird die während der Phase des Volllaufens entstehende Gasmenge mit dem Programm GASGEN berechnet (Beschreibung des Modells in [Colenco 2002c] sowie in Anhang G). Basierend auf dem gleichen Inventar an gasbildenden Stoffen wird auch die Gasmenge ermittelt, die ohne zeitliche Begrenzung und bei ausreichender Verfügbarkeit von Wasser gebildet wird. Das Verhältnis der beiden Gasmengen wird mit η_{Lim} bezeichnet und entspricht – spezifisch für das betrachtete Szenario – dem Anteil des während der Phase des Volllaufens gebildeten Gases bezogen auf die Gesamtgasmenge im Szenario. Die Größe η_{Lim} stellt eine Eingangsgröße für das Programm PROSA dar und wird extern mit dem Programm GASGEN unter Verwendung von Bandbreiten für dessen Eingangsgrößen, einschließlich einer Bandbreite für den Anfangsflüssigkeitsgehalt, probabilistisch ermittelt.

Für die Berechnung der Hohlraumkonvergenz während der Phase des Volllaufens der übrigen Grube werden folgende Annahmen für den wirksamen Fluiddruck gemacht:

- Für die Hohlräume in der übrigen Grube und in den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen NF und ZT wird als wirksamer Fluiddruck der oben erwähnte Druck $p_{ProI,RG}$ angesetzt.
- Für die abgedichteten Einlagerungsbereiche wird in den Fällen „mit Gaspolster“ als wirksamer Fluiddruck der Gasdruck angesetzt, der sich aus dem anfänglichen Luftvolumen im Einlagerungsbereich, der Gasbildung im Einlagerungsbereich (ggf. bis zu deren Unterbrechung aufgrund von Wassermangel) und der bisher abgelaufenen Hohlraumkonvergenz ergibt. Sofern dieser Gasdruck den Wert $p_{ProI,RG}$ übersteigt, wird zusätzlich angenommen, dass Gas über das Abdichtsystem aus dem Einlagerungsbereich entweicht, wodurch sich die Gasmenge – und damit auch der Gasdruck – im Einlagerungsbereich verringern. Die entweichende Gasmenge wird gleich berechnet wie im Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ während der Auspressphase (vgl. Kapitel 3.3.7, abgesehen vom Wert des Bezugsdrucks in der übrigen Grube).
- Im Fall „ohne Gaspolster“ wird für die Einlagerungsbereiche der Gasdruck nicht berücksichtigt.

3.3.2 Hohlraumvergrößerung durch Auf- und Umlösungen

Die Lösungen, welche gegenwärtig in die Grube zutreten, weisen einen hohen Mineralisationsgrad auf. Falls es jedoch im Laufe der Zeit aufgrund von Lösungsprozessen, gebirgsmechanischen oder neotektonischen Prozessen zu einer Erhöhung der Zutrittsrate entlang des bestehenden Pfades oder zu neuen starken Lösungszutritten kommt, ist davon auszugehen, dass auch schwach mineralisierte Wässer zutreten. Im Modell wird angenommen, dass bei einer Systementwicklung mit relevantem Lösungszutritt in die Grube von Beginn an Süßwasser aus dem Hutgestein in das Salinar übertritt.



Beim Kontakt von Süßwasser mit Steinsalz wird dieses bis zur Sättigung der Lösung an NaCl aufgelöst; dabei entsteht neuer, unverfüllter Hohlraum. Der Ort der Aufsättigung und damit der entstehenden Hohlräume hängt vom Verlauf der Wegsamkeit in der Salzstruktur und dann in der übrigen Grube sowie den dabei wirksamen Strömungswiderständen ab. Aufgrund der weitgehenden Verfüllung im Grubengebäude, insbesondere der Grubenbaue im Bereich der potentiellen Zutrittsstellen und der vertikalen Verbindungen zwischen den Sohlen [DBE 2005], ist davon auszugehen, dass die Fließwiderstände im Grubengebäude zum Zeitpunkt des Übertritts von ungesättigter Lösung in die Salzstruktur größer sind als im Zuflussbereich. Dies bewirkt einen „Rückstau“ der eindringenden Lösung im Bereich des Lösungszutritts in das Grubengebäude. Durch die sich ausbildende dichtebedingte Schichtung der Lösung im „Rückstau“ und den sich am Boden des Lösungsraumes bildenden Bodenkörper aus angesammelten Lösungsrückständen erfolgt die Hohlräumneubildung in erster Linie nur im Bereich oberhalb und seitlich der Zutrittsstelle in das Grubengebäude. Die Hohlräumneubildung durch Aufsättigung am Steinsalz wird im Modell deshalb dem Grubenteil „übrige Grube“ zugewiesen. Vereinfachend wird dabei nur Hohlräumneubildung durch Auflösung von Steinsalz im Grubengebäude betrachtet und eine Aufsatzung an der Salzgrusverfüllung vernachlässigt.

Treten NaCl-gesättigte Lösungen mit Kalilagern (Carnallit oder Hartsalz) in Verbindung, werden diese aufgelöst, und es fallen andere Mineralphasen aus („Umlösung“). Im Hinblick auf die Veränderung des konvergenzwirksamen Hohlräume und der Lösungsmenge in der Grube wird im Modell angenommen, dass die Umlösung so lange abläuft, bis die Lösung die Zusammensetzung von IP21-Lösung erreicht hat⁸. Das Volumen der ausgefällten Festphase ist dann gerade so groß, dass es den neu gebildeten Hohlraum mit einer Porosität von gut 40% ausfüllt. Das entspricht in etwa der Porosität von Salzgrusversatz (Anhang E). Im Modell werden daher die bei der Umlösung entstehenden neuen Hohlräume wie die mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Hohlräume behandelt. Sie werden ebenfalls dem Grubenteil „übrige Grube“ zugewiesen. Da die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche (ELB NF, ELB ZT) keine Kalilager anschneiden, sind dort keine Umlösungsprozesse zu unterstellen.

In [DBE 2008] wurde gezeigt, dass die Standsicherheit der Grube durch diese Hohlräumneubildungen nicht gefährdet ist.

Da die Lösungs- und Umlösungsprozesse relativ rasch erfolgen, wird der zeitliche Verlauf im Modell nicht simuliert: Die Volumina an unverfülltem und mit kompaktierbarem Versatz verfülltem Hohlraum, die beim Volllaufen der übrigen Grube durch Auf- und Umlöseprozesse entstehen, werden auf den Zeitpunkt „Ende des Volllaufens der übrigen Grube“ (vgl. Kapitel 3.3.1) zu den Volumina der übrigen Grube addiert. Dadurch wird die bereits während der Volllaufphase wirkende Konvergenz dieser zusätzlichen Volumina vernachlässigt. Wie die Modellrechnungen für den Referenzfall zeigen, wird nach dem Volllaufen der übrigen Grube mehr Flüssigkeit durch Hohlraumkonvergenz aus der übrigen Grube pro Zeiteinheit ausgepresst, als in die abgedichteten Bereiche zutritt. Deshalb fließen dann keine Wässer mehr aus dem Deckgebirge nach, so dass der Flüssigkeitszutritt in die abgedichteten Bereiche nicht zu weiteren Lösungsprozessen in der übrigen Grube

⁸ Im Hinblick auf die Korrosion der Versatzstoffe in den Abdichtungen wird unabhängig davon eine Mg-Konzentration in der Lösung in der übrigen Grube zwischen 0 und der Mg-Konzentration von IP21-Lösung angesetzt (vgl. Kapitel 3.3.3).



be führt (Eine Situation, in der dies kurzfristig nicht zutrifft, wird in den Kapiteln 3.5.6 und 4.4.6. diskutiert).

3.3.3 Abdichtungen, Druckausgleich und Lösungszutritt

Im Modell werden alle Verbindungen zwischen einem Einlagerungsbereich und der übrigen Grube in einem einlagerungsbereichsspezifischen hydraulischen Widerstand zusammengefasst⁹. Andere Elemente, die gleichfalls den Lösungszutritt in den Einlagerungsbereich hemmen und den Austritt der kontaminierten Lösung behindern (z.B. die Verfüllung von Abbauen in der übrigen Grube), werden nicht berücksichtigt. Dieser hydraulische Widerstand, im Folgenden als Abdichtsystem bezeichnet, setzt sich aus besonders bezeichneten, firstbündig verfüllten Strecken (Abdichtungen) zusammen, welche die Einlagerungsgrubenbaue und die hydraulisch gut mit diesen verbundenen Abbaue (d.h. den Einlagerungsbereich) von der übrigen Grube trennen. Soweit weitere verfüllte Hohlräume (Gesenke, Rolllöcher) und hydraulische Wegsamkeiten im Salzgebirge (z.B. eine durchgehende Kluft im Hauptanhydrit zwischen Ostfeld und Zentralteil) die Abdichtungen kurzschließen können, sind diese ebenfalls dem Abdichtsystem zuzurechnen. Das Abdichtsystem wird charakterisiert durch

- die effektive Länge,
- die hydraulisch wirksame effektive Querschnittsfläche (ggf. einschließlich der Auflockerungszone um Abdichtbauwerke),
- die Permeabilität (Mittelwert über die effektive Querschnittsfläche),
- einen Faktor für die Erhöhung der Permeabilität durch die Korrosion des Versatzstoffes (Salzbeton oder Magnesiabeton),
- die für den Schadstofftransport relevante, fluidzugängliche Porosität,
- die volumetrischen Umlösekapazitäten von IP21-Lösung an Salzbeton bzw. von gesättigter NaCl-Lösung an Magnesiabeton sowie
- die sorptionswirksame Zementmasse pro Volumen.

Das Konzept für die Festlegung der Lokationen und der geometrischen Parameter der Abdichtsysteme wird in Kapitel 3.4, mit Details in Anhang D, dargestellt.

Sofern während des Volllaufens der übrigen Grube der Gasdruck in einem abgedichteten Einlagerungsbereich als Folge der Gasbildung und Hohlraumkonvergenz über den Wert des Fluiddrucks in der übrigen Grube, $p_{\text{Prol, RG}}$, ansteigt (vgl. Kapitel 3.3.1), wird Gasabfluss aus dem Einlagerungsbereich entlang des Abdichtsystems unterstellt. Die Rate des Gasabflusses wird dabei mit dem gleichen Algorithmus und – mit einer Ausnahme – den gleichen Parametern berechnet wie die Rate des Gasabflusses während der Auspressphase im Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ (vgl. Kapitel 3.3.7). Die Ausnahme betrifft den Fluiddruck im Grubenbereich „Ende Abdichtsystem“ (vgl.

⁹ Eine Ausnahme stellt der ELB OF dar, bei dem die Abdichtung auf der 4. Sohle aus Magnesiabeton, diejenige auf der 2. Sohle aus Salzbeton erstellt wird. Wegen der unterschiedlichen Korrosionsbeständigkeit dieser Materialien gegenüber der Grubenlösung werden während der Zutrittsphase der Lösungszutritt und der Korrosionsfortschritt für beide Abdichtungen separat modelliert. Beim ELB OF erfolgt die Zusammenfassung der beiden Abdichtungen zu einem Modell-Widerstand somit erst für die Auspressphase.



Abbildung 3-3): Während der Phase des Volllaufens der übrigen Grube beträgt er $p_{\text{ProI, RG}}$, (vgl. Kapitel 3.3.1), in der Auspressphase entspricht er dem hydrostatischen Druck mit Bezug auf den oberflächennahen Grundwasserspiegel (s.u.).

Mit dem Ende des Volllaufens der übrigen Grube setzt im Modell das Eindringen von Lösung aus der übrigen Grube in die Abdichtungen und als Folge davon auch das Auspressen von Lösung aus den Abdichtungen in den zugehörigen Einlagerungsbereich ein. Die Korrosion des Versatzstoffs, aus dem die betrachtete Abdichtung besteht, hängt von der Mg-Konzentration in der Lösung ab, die in die Abdichtung eindringt (vgl. Anhang L). Diese Mg-Konzentration wird – einheitlich für alle Abdichtungen – als Eingangsgröße für die Modellrechnungen vorgegeben und in den probabilistischen Modellrechnungen zwischen 0 (dem Wert für ausschließlich an Halit gesättigter Lösung) und der Mg-Konzentration von IP21-Lösung variiert. Die Korrosion der Abdichtung durch die zutretende Lösung wird durch eine fortschreitende Transportfront modelliert. Vor der Transportfront ist die Permeabilität der Abdichtung unverändert, hinter der Transportfront ist sie um einen vorgegebenen Faktor erhöht (vgl. Anhänge L und A).

Wegen der unterschiedlichen Korrosionskapazität der Grubenlösung an den unterschiedlichen Versatzstoffen wird für den Einlagerungsbereich Ostfeld der Lösungszutritt durch sowie der Korrosionsfortschritt in den beiden Abdichtungen aus Salzbeton und Magnesiabeton getrennt modelliert. Nach dem Ende des Lösungszutritts werden diese unter Berücksichtigung der dann vorliegenden Verhältnisse wieder zu einem hydraulischen Modellwiderstand zusammengefasst.

Die zu Beginn der Nachbetriebsphase im Einlagerungsbereich vorhandene Menge an Flüssigkeit wird als Parameter festgelegt. Sie entspricht der mit den Abfällen und dem Salzversatz eingebrachten Flüssigkeitsmenge sowie einem vorgegebenen kleinen Anteil der Porenlösung im Salzbeton (inkl. Überschusslösung). Die mit dem Salzbeton eingebrachte mobile Flüssigkeitsmenge ist im Vergleich mit der Gesamtmenge an Porenlösung im Salzbetonversatz klein, weil die Permeabilität des Salzbetons zu gering und die Abmessungen der einzelnen Versatzkörper zu groß sind, als dass das Porenwasser in nennenswertem Ausmaß an den chemischen Prozessen im Einlagerungsbereich teilnehmen könnte. Der Zutritt von Salzlösung in den Einlagerungsbereich nach dem Volllaufen der übrigen Grube wird im Modell unter den konservativen Annahmen berechnet, dass er ausschließlich durch das Abdichtsystem begrenzt wird. Im Weiteren wird vereinfachend angenommen, dass nach dem Volllaufen der übrigen Grube im Grubenbereich „Ende Abdichtsystem“ (vgl. Abbildung 3-3) sowohl während des Lösungszutritts durch das Abdichtsystem in den Einlagerungsbereich als auch später, beim Auspressen von Lösung aus dem Einlagerungsbereich in die übrige Grube, zeitlich konstant hydrostatischer Druck herrscht.

Sofern die Gasbildung im (abgedichteten) Einlagerungsbereich während der Phase des Volllaufens der Restgrube aus Wassermangel unterbrochen wurde, setzt sie im Modell wieder ein, sobald nach Ende der Volllaufphase eine gewisse Lösungsmenge in den Einlagerungsbereich zugetreten ist. Diese Schwelle für das Wiedereinsetzen der Gasbildung wird als Vielfaches der anfänglich im Einlagerungsbereich vorhandenen Flüssigkeitsmenge als Eingangsgröße für die Modellrechnung vorgegeben. In den probabilistischen Modellrechnungen wird dieser Schwellenwert über ein sehr breites Intervall, von 0,1 bis 10, variiert. Bei einem hohen Schwellenwert setzt die Gasbildung erst spät wieder ein, behindert dadurch den Lösungszutritt in den Einlagerungsbereich weniger und verstärkt das spätere Auspressen von potentiell kontaminierter Lösung umso mehr (s.u.).



Als Folge von Lösungszutritt, Gasbildung und Konvergenz des Hohlraum- und Porenvolumens steigt der Fluiddruck im Einlagerungsbereich an. Durch diesen Druckanstieg wird der Lösungszutritt in den Einlagerungsbereich gebremst und kommt letztendlich zum Stillstand. Der Druckanstieg im Einlagerungsbereich und die zeitliche Entwicklung des davon abhängenden Lösungszutritts wird durch das Modell simuliert (vgl. Anhang A). Sofern das Gas durch irgendwelche Wegsamkeiten entweichen kann, die unabhängig von der Lösungsbewegung im Grubengebäude sind, wird kein Druckanstieg im Einlagerungsbereich unterstellt, so dass der Druckgradient entlang des Abdichtsystems während der Zutrittsphase zeitlich konstant angenommen wird und sich der Einlagerungsbereich vollständig mit der zutretenden Lösung füllt (Fall „ohne Gaspolster“).

3.3.4 Hohlraumkonvergenz

Die Abnahme des verfügbaren Speichervolumens für Lösung und Gas (Gesamthohlraumvolumen) als Folge der Konvergenz von Hohlräumen hängt von der Art der Hohlraumverfüllung ab. Für die quantitative Beschreibung werden drei Arten von Hohlraum- und Porenvolumen unterschieden:

- unverfülltes Hohlraumvolumen
- mit kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen (im Wesentlichen mit Salzgrus, Abfall und Braunkohlefilterasche verfüllte Hohlräume)
- mit nicht oder nur gering kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen (im Wesentlichen mit Salzbeton oder Magnesiabeton verfüllte Hohlräume)

Die separate Modellierung der Konvergenz für die unverfüllten und die mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Teilvolumina entspricht dem Ansatz, dass bei der Konvergenz der kompaktierbare Versatz nicht in den unverfüllten Hohlraum ausweicht, z.B. wegen dazwischenliegender mechanischer Barrieren (Salzbeton, Salzgestein).

Die zeitliche Abnahme des unverfüllten Hohlraumvolumens und des Porenvolumens des kompaktierbaren Versatzes wird unter der Berücksichtigung der Stützwirkung des Fluidinnendruckes und ggf. des Versatzstoffes als Funktion der Zeit beschrieben (vgl. Anhang F).

3.3.5 Gasbildung

Die Gasbildung unter den Verhältnissen des ERAM wird durch mikrobielle Prozesse und durch anaerobe Metallkorrosion bestimmt. Da der Wasserstoff, welcher bei der Korrosion entsteht, verschiedene mikrobielle Umsetzungen beeinflussen kann, ist es erforderlich, dass sämtliche beteiligten Prozesse in einem einzigen Modell gemeinsam betrachtet werden. Ein solches Modell liegt dem Rechenprogramm GASGEN (vgl. [Colenco 2002c] und Anhang G) zugrunde. In ihm wird die Metallkorrosion sowie gleichzeitig der mikrobielle Abbau der organischen Abfallbestandteile durch die Teilprozesse Denitrifikation, Sulfatreduktion, Fermentation und Methanogenese behandelt. Dabei wird zwischen der leicht abbaubaren Zellulose und schwer abbaubaren Materialien, wie z.B. Kunststoffen, unterschieden. Die Gasentwicklung durch anaerobe Metallkorrosion wird vor allem durch das Eisen im Abfall bedingt.



Die Stoffinventare im ERAM, welche die gesamte Gasmenge bestimmen, sind mit Unsicherheiten behaftet. Auch die Geschwindigkeitskonstanten der verschiedenen Reaktionen hängen von vielen Faktoren (z.B. pH-Wert, mineralische Zusammensetzung der Lösung, Oberflächen-/Volumenverhältnis, vorhandene Mikrobenstämme) ab und sind darum variabel. Um diese Variabilität abzudecken, wurden für die Parameter Referenzwerte, Bandbreiten und Verteilungsfunktionen festgelegt und die Ergebnisse für die Gasbildung aus einer Serie probabilistischer Rechnungen ermittelt. Dabei wurde eine ausreichende Verfügbarkeit von Wasser unterstellt.

Die Ergebnisse für die Gasbildung zeigen für die verschiedenen Einlagerungsbereiche eine ähnliche Charakteristik. Die Gasbildungsraten sind zu Beginn am höchsten und nehmen dann immer mehr ab, indem die gasbildenden Stoffe verbraucht werden. Nach etwa 1 Mio. Jahren ist die Gasbildung weitgehend abgeschlossen. Das gesamte Gasvolumen wird durch Wasserstoff dominiert, gefolgt von Methan und Stickstoff. Kohlendioxid bleibt nur wenig in der Gasphase, da es durch Portlandit gebunden und durch die Methanogenese mikrobiell verarbeitet wird. Die Ergebnisse der probabilistischen Berechnungen gestatten eine statistische Interpretation. Die Bandbreite der Gasbildungsraten (und damit auch der zu frühen Zeiten gebildeten Gasvolumina) ist groß und entspricht im Wesentlichen der Bandbreite der Reaktionsraten; dagegen spiegelt die Bandbreite der total gebildeten Gasmenge weitgehend die Unsicherheiten der Inventare der gasbildenden Stoffe wider und ist dementsprechend kleiner.

Die Ergebnisse für den zeitlichen Verlauf der Gasbildung unter verschiedenen Bedingungen zeigen, dass diese in sinnvoller Näherung durch eine einfache Funktion der Zeit beschrieben werden kann. Zur Beschreibung dieser Funktion werden die folgenden vier voneinander unabhängigen Parameter verwendet (Anhang A, Kap. A.2.2). Die ersten drei dieser Parameter werden aus den probabilistischen Modellrechnungen mit GASGEN bestimmt.

Als Kennwerte der Gasbildung dienen

- die Gasbildungsraten zu einer repräsentativ frühen Zeit¹⁰, inkl. Bandbreiten,
- die Gasbildungsraten zu einer repräsentativ späten Zeit, inkl. Bandbreiten,
- die Gesamtgasmenge nach Abschluss der Gasbildung, inkl. Bandbreiten, und
- der Anteil des Inventars, das an den Gasbildungsprozessen teilnimmt, inkl. Bandbreiten.

Die auf diese Weise parametrisierten Gasbildungsprozesse beschreiben den gesamten Variablenraum der Gasbildung, der auf der Basis probabilistischer Ansätze mit feldspezifischen Inventarverteilungen berechnet wird. Daher kann in den Modellrechnungen zur Sicherheitsanalyse die Gasbildung mit diesen Parametern nachgebildet werden.

Mit speziellen Modellrechnungen wird mit dem Programm GASGEN die Gasbildung in den abgedichteten Einlagerungsbereichen während des Volllaufens der übrigen Grube berechnet (vgl. auch Kapitel 3.3.1). Dabei wird berücksichtigt, dass in den Einlagerungsbereichen ein beschränktes Anfangsinventar an Wasser besteht und dass während dieser Phase der Endlagerentwicklung keine Lösung in den Einlagerungsbereich Zutritt. Bei den Modellrechnungen mit dem Programm PROSA

¹⁰ Diese Werte gelten für vollständigen Umsatz des Inventars an gasbildenden Stoffen.



wird eine Unterbrechung der Gasbildung angenommen, sobald im Einlagerungsbereich die Gasmenge gebildet ist, die der anfänglichen Flüssigkeitsmenge im Einlagerungsbereich entspricht. Die Parametrisierung erfolgt über das mit GASGEN ermittelte Verhältnis der Gasmenge, die aufgrund der anfänglichen Flüssigkeitsmenge gebildet werden kann, und der Gasmenge, die ohne Beschränkung durch die Verfügbarkeit von Wasser entstehen kann. Nach dem Volllaufen der übrigen Grube und dem Einsetzen des Lösungszutritts in die Einlagerungsbereiche setzt die Gasbildung wieder ein, sobald die kumuliert zugetretene Lösungsmenge eine vorgegebene Schwelle überschreitet. Diese Schwelle wird als Bruchteil bzw. Vielfaches der anfänglichen Flüssigkeitsmenge als Eingangsgröße für die Modellrechnung mit PROSA vorgegeben (vgl. auch Kapitel 3.3.3). Die Parametrisierung der Gasbildung bei Unterbrechung aufgrund von Wassermangel erfolgt wie bei ausreichender Verfügbarkeit von Wasser, außer dass der unabhängige Parameter „Zeit betreffend Gasbildung“ während der Dauer der Unterbrechung angehalten wird.

Da im Modell die Gasbildung in den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen erst nach Volllaufen der übrigen Grube einsetzt und dann diese Einlagerungsbereiche rasch volllaufen, sieht das Modell keine Unterbrechung der Gasbildung in den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen vor.

3.3.6 Radionuklidmobilisierung

Die Mobilisierung der Radionuklide nach erfolgtem Lösungszutritt wird als instantaner Prozess simuliert, bei dem die Radionuklide derjenigen Abfälle, die im lösungsgefüllten Teil des Einlagerungsbereichs liegen, in Lösung gehen (Abbildung 3-4). Dieser Prozess hängt somit von der zugegetretenen Lösungsmenge, im speziellen vom Verhältnis zwischen aktueller Lösungsfüllhöhe des Einlagerungsbereichs und Stapelhöhe der Abfälle, ab (Anhang I). Die maßgebenden Parameter sind die anfänglich vorhandene und die zugetretene Lösungsmenge, die relative Stapelhöhe der Abfälle bezogen auf die Höhe der kompaktierbaren Verfüllung in den Einlagerungsgrubenbauten sowie deren Volumen.

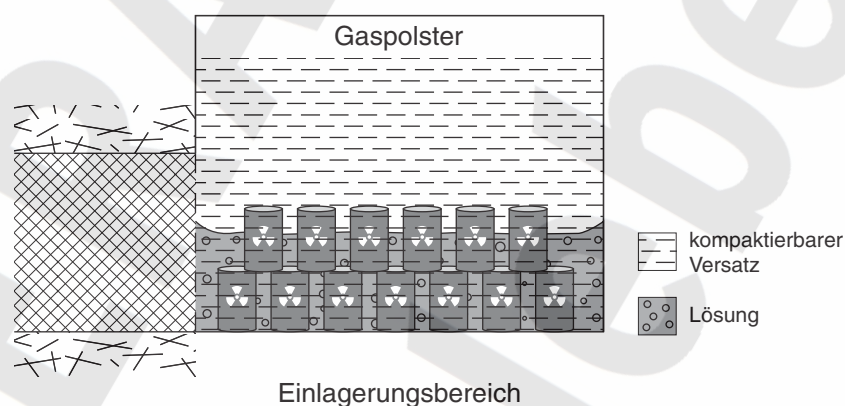
Das Modell unterstellt, dass jene Anteile des Radionuklidinventars und der sorptionswirksamen Komponenten der Verfüllung am Mobilisierungsprozess teilnehmen, die dem Verhältnis zwischen der Höhe des lösungsgefüllten Bereichs am Ende der Zutrittsphase und der Abfallstapelhöhe entsprechen. Die Berechnung beruht auf der konservativen Annahme, dass der Abfall und der kompaktierbare Versatz zuunterst im Einlagerungsbereich angeordnet sind und somit zuerst mit der Lösung in Kontakt gelangen.

In einem ersten Schritt wird eine instantane Auflösung des gesamten beteiligten Radionuklidinventars unterstellt. Eine eventuelle Rückhaltung durch Löslichkeitsbegrenzung und Sorption wird nachträglich berücksichtigt. Hierbei werden die nach der "Auflösung" des Radionuklidinventars resultierenden Konzentrationen der jeweiligen Elemente mit ihren Löslichkeitsgrenzen verglichen. Nur derjenige Anteil des gelösten Radionuklidinventars wird als mobil angenommen, der nicht zur Überschreitung der Löslichkeitsgrenze führt. Bei der Anwendung der Löslichkeitsgrenzen bleiben – außer für ^{14}C – konkurrierende radioaktive und nichtradioaktive Isotope desselben Elementes unberücksichtigt. Bei der Ermittlung der Löslichkeitsgrenzen muss das generelle chemische Milieu,



aber auch die Anwesenheit von Komplexbildnern berücksichtigt werden. Überschlagsrechnungen zeigen, dass nur bei wenigen Radionukliden/Elementen und in sehr wenigen Fällen die Löslichkeitsgrenzen überschritten würden. Da zudem die Löslichkeitsgrenzen wegen des schwer vorherzusagenden chemischen Milieus ungewiss sind, wird – außer für ein einziges Radionuklid – konservativ auf die Anwendung der Löslichkeitsgrenzen verzichtet. Nur für den anorganischen Kohlenstoff wird sie verwendet, da für diesen die Löslichkeitsgrenze über weite Bereiche des chemischen Milieus annähernd gleich bleibt (vgl. Anhang H).

Das Rechenprogramm PROSA kann auch die Sorption der gelösten Radionuklide an den Zement- und Braunkohlefilteraschen-Komponenten der Verfüllung, soweit diese durch K_d -Werte beschrieben ist, berücksichtigen. Die Sorption wird in den Modellrechnungen wegen des nicht eindeutig beschreibbaren chemischen Milieus und der daraus resultierenden Unsicherheit bezüglich der K_d -Werte allerdings nicht berücksichtigt.



4651/rsk_02_b.eps/shu/07.06.02

Abbildung 3-4 Modellierung der Radionuklidmobilisierung

3.3.7 Auspressung von Lösung aus den Einlagerungsbereichen

Da das frühzeitige Entweichen von Gas aus dem Einlagerungsbereich bzw. dessen Verbleiben im Einlagerungsbereich einen wesentlichen Einfluss auf die Dauer und das Ausmaß des Lösungszutritts in den Einlagerungsbereich hat, werden im Modell beide Möglichkeiten unterstellt, als Fall ohne Gaspolster und als solcher mit Gaspolster (siehe Abbildung 3-5). Im erstgenannten Fall stoppt der Lösungszutritt erst, wenn die zugetretene Lösung das Gesamthohlraumvolumen des Einlagerungsbereichs unter Berücksichtigung der Konvergenz vollständig aufgefüllt hat, im zweiten Fall bereits, wenn der Fluiddruck im Einlagerungsbereich dem Lösungsdruck im „Bereich Ende Abdichtsystem“ (siehe Abbildung 3-3) entspricht. Der erste Fall kann sich zum Beispiel dadurch ergeben, dass das Gas bereits während der Zutrittsphase abfließt (vgl. Anhang K), dass sich keine relevante Gasmenge bildet oder dass der überwiegende Teil des Gases in Lösung geht.

Einfluss der Gasbildung

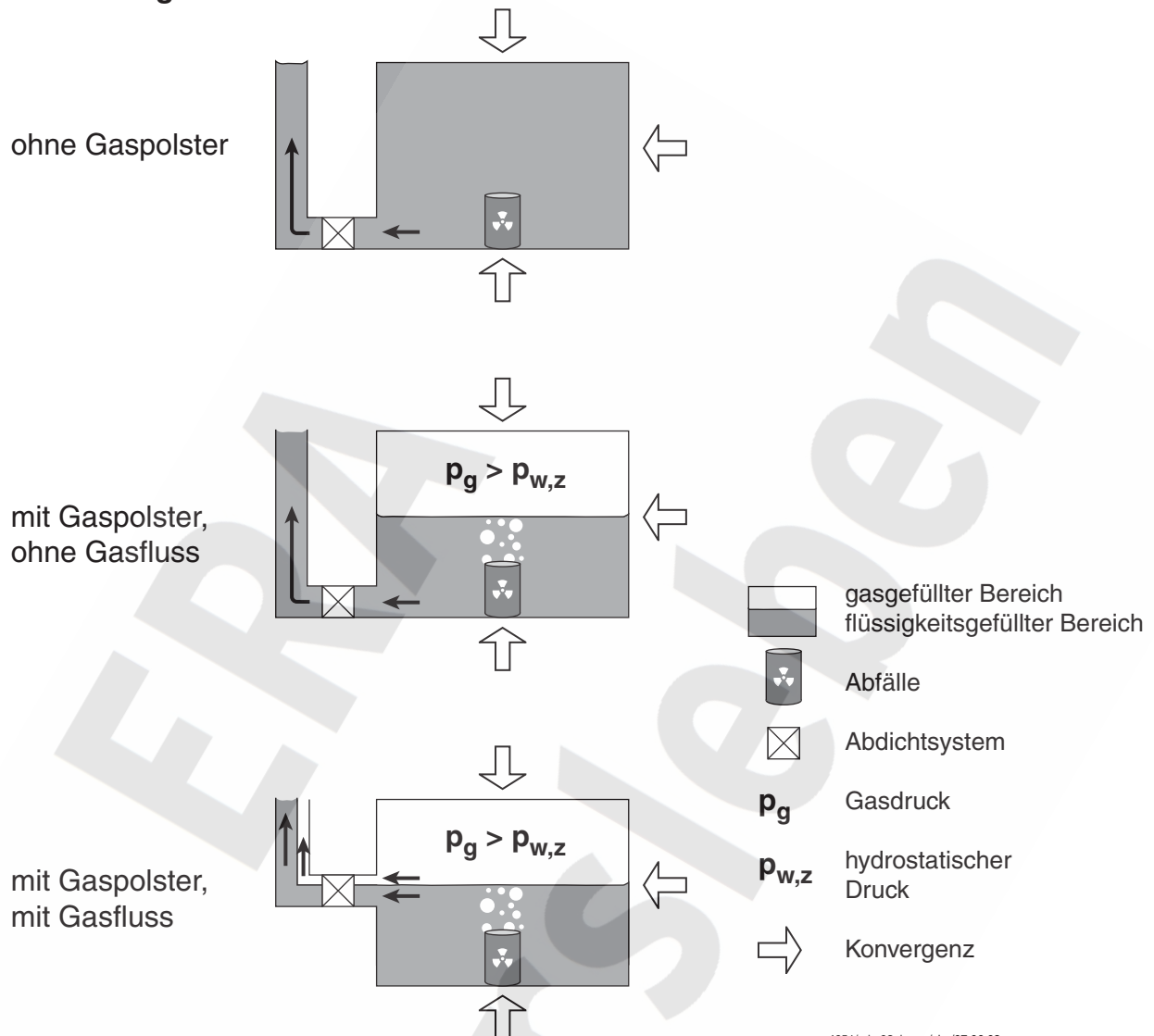


Abbildung 3-5 Schematische Darstellung der drei Fälle „ohne Gaspolster“, „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ und „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ für die Auspressphase aus dem Einlagerungsbereich

Nach dem Ende des Lösungszutritts dreht sich die Lösungsbewegung im Abdichtsystem um, getrieben von der fortschreitenden Konvergenz und – in den Fällen mit Gaspolster – der Gasbildung, sofern diese nicht vorher zu Ende gegangen ist. In den Fällen mit Gaspolster werden während der Auspressphase zwei Fälle unterschieden (vgl. Abbildung 3-5):

- (i) Das Gas bleibt auch während der Auspressphase im Einlagerungsbereich gefangen und nur kontaminierte Salzlösung wird ausgepresst (Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“) oder
- (ii) Gas entweicht sofort und gleichzeitig mit der Salzlösung (Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“).

Der Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ tritt ein, wenn (1) eine oder mehrere Abdichtungen auf den unteren Sohlen durchgehend korrodiert ist bzw. sind, (2) das gebildete Gas aus dem Einlagerungsbereich oberhalb der durchgehend korrodierten Abdichtungen nicht entweichen kann und (3) vor den korrodierten Abdichtungen Lösung ansteht. Das Anstehen von Lösung vor den korrodierten Abdichtungen ist in der Regel gegeben, wenn die Bedingung (1) erfüllt ist.

Der Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ kann eintreten, wenn (1) keine Abdichtung durchgehend korrodiert und die Abdichtungen auf den oberen und den unteren Sohlen am Ende der Zutrittsphase vergleichbare hydraulische Widerstände aufweisen oder wenn (2) eine Abdichtung auf einer oberen Sohle durchgehend korrodiert.

Der Fall „ohne Gaspolster“ repräsentiert die Fälle, in denen eine Abdichtung auf der obersten Sohle bereits während der Zutrittsphase eine relativ hohe Gasdurchlässigkeit mit niedrigem Gaseindringdruck aufweist oder wenn die Gasbildungsrate im Einlagerungsbereich sehr niedrig ist.

Der Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ ist in der Regel im Hinblick auf die radiologischen Auswirkungen der ungünstigste Fall, dies zeigen die Ergebnisse der Modellrechnungen. Er ist auch für den Einlagerungsbereich WSF als wahrscheinlichster Fall einzustufen, da sich die kürzesten Abdichtungen auf der 3. und 4. Sohle befinden (vgl. Anhang D). Die Modellrechnungen zeigen im weiteren, dass das Abdichtsystem des Einlagerungsbereichs OF meistens nicht durchgehend korrodiert wird und dass dabei die Abdichtung aus Magnesiabeton auf der unteren, der 4. Sohle ihre anfängliche geringe Durchlässigkeit weitgehend behält. Damit erfolgt im ELB OF in der Regel der Übergang von der Zutrittsphase in die Auspressphase bei einem relativ niedrigen Stand des Lösungspegels im Einlagerungsbereich. In dieser Situation ist der Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ am plausibelsten. Der Fall „ohne Gaspolster“ ist für die abgedichteten Einlagerungsbereiche als Extremfall einzustufen, der vor allem zur Abrundung der Ergebnisse bei der Sicherheitsanalyse betrachtet wird.

Bei den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen ist es wenig wahrscheinlich, dass das gebildete Gas zunächst gefangen bleibt und vor dem Entweichen sämtliche kontaminierte Lösung aus den Einlagerungsgrubenbauen auspresst. Aufgrund der bestehenden Ungewissheiten zu den geometrischen und hydraulischen Bedingungen wird für diese Einlagerungsbereiche gleichwohl allen drei Fällen vergleichbares Gewicht zugewiesen.

In den Fällen „mit Gaspolster“ ist die Phase der Lösungsauspressung zeitlich begrenzt. Sie dauert, bis sämtliche zugetretene Lösung den „Bereich Ende Abdichtsystem“ und damit den sog. „Mischungsbereich Grubengebäude“ (vgl. Abbildung 3–3) erreicht hat. Im Fall „ohne Gaspolster“ nimmt die Rate der Lösungsauspressung wie die fortschreitende Konvergenz ab, d.h. ungefähr exponentiell mit der Zeit.

Zwei-Phasen-Strömung und deren Vereinfachung

Die im Endlager auftretenden Bewegungen von Salzlösung und Gas sind aufgrund der Gegebenheiten i.a. Zwei-Phasen-Strömungen. Diese können bei hohen Sättigungen jedoch näherungsweise mit den Konzepten der gesättigten Strömung beschrieben werden. Die mit den Gleichungen der gesättigten Strömung ermittelten Fließraten sind größer als jene nach den Zwei-Pha-



sen-Modellen, da sie die Verringerung der Fließquerschnitte durch die konkurrierende Phase und die Permeabilitätsverringerng durch Teilsättigung vernachlässigen. Das Ziel einer Sicherheitsanalyse ist eine möglichst einfache Beschreibung der wesentlichen Prozesse in konservativer Weise, um die maximale Radionuklidfreisetzung bzw. Strahlenexposition in der Biosphäre zu ermitteln. Die Bewegung von Salzlösung und Gas wird im Modell deshalb teilweise entkoppelt und nicht als voll gekoppelter Zwei-Phasen-Prozess berechnet. Durch diese teilweise Entkopplung berücksichtigt das vereinfachende Modell einige Prozesse nicht explizit, sondern deckt deren Einfluss nur konservativ ab, in einzelnen Fällen geschieht dies im Rahmen der Parametervariationen.

Eine real möglicherweise auftretende, entgegengesetzte Bewegung von Salzlösung und Gas während der Zutrittsphase (Lösungszutritt, Gasauspressung) führt zu einer längeren Zutrittsphase und zu einem größeren Lösungsvolumen im Einlagerungsbereich zu Beginn der Auspressphase im Vergleich zu den Modellergebnissen für die Fälle „mit Gaspolster“. Bezüglich der Dauer der Zutrittsphase und damit des Beginns der Radionuklidfreisetzung ist das Modell somit konservativ.

Bei vollständigem Entweichen des Gases während der Zutrittsphase entsprechen die Verhältnisse dem Fall „ohne Gaspolster“, bei dem es zu einer vollständigen Füllung des Einlagerungsbereichs mit Lösung kommt. Der wirkliche Füllgrad des Einlagerungsbereichs mit Lösung zu Beginn der Auspressphase wird zwischen dem Fall „ohne Gaspolster“ und den Fällen „mit Gaspolster“ liegen.

Die hinsichtlich der Bewegung von Lösung und Gas vielfach zutreffende Betrachtungsweise, der Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“, ergibt denselben Füllgrad wie der Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“, jedoch ist – solange das Gaspolster nicht vollständig ausgepresst ist – die Auspressrate für Lösung geringer (und die Auspressphase somit länger andauernd), da in diesem Fall der Druckabbau zusätzlich durch den schneller stattfindenden Gasaustritt erfolgt.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die real auftretenden Zwei-Phasen-Strömungen in einem Einlagerungsbereich und den Zugangsstrecken zu kleineren Zutrittsraten und somit zu längeren Zutrittsphasen als im hier verwendeten vereinfachenden Modell führen. Ebenso ergeben sich kleinere Auspressraten kontaminierter Lösung und länger andauernde Auspressphasen. Beides führt zu einer geringeren und späteren Maximalfreisetzung aus dem Einlagerungsbereich.

Der gleichzeitige Zutritt von Salzlösung und Austritt von Gas in bzw. aus einem Einlagerungsbereich wird für den Fall mehrerer parallel geschalteter Zugangsstrecken auch im Anhang K diskutiert.

3.3.8 Transportverzögerung im Abdichtsystem

Der Radionuklidtransport aus dem Einlagerungsbereich erfolgt mit der ausgepressten Lösung entlang des Abdichtsystems (siehe Abbildung 3-6). Außer unter speziellen Umständen oder in lokal begrenztem Ausmaß ist die Permeabilität der Auflockerungszone um die verfüllten Hohlräume geringer als jene des Versatzmaterials (siehe auch [BGR 1998a]). Sofern also das Abdichtsystem durch verfüllte Hohlräume und nicht durch Wegsamkeiten im Salzgebirge oder, wie in einem alternativen Szenario für das Ostfeld, durch eine Kluft im Hauptanhydrit gebildet wird, findet der Radio-



nuklidtransport weitestgehend im Versatz statt und wird durch Sorption an dessen Zementkomponente verzögert. Die sorbierende Wirkung der Zementkomponente wird jedoch bei den Transportrechnungen im Modell konservativ vernachlässigt, da das chemische Milieu und damit belastbare Sorptionsparameter mit zu großen Ungewissheiten verbunden sind.

Der Radionuklidtransport entlang des Abdichtsystems wird als rein advektiver Transport durch ein äquivalent poröses Medium modelliert. Die Vernachlässigung von Dispersionseffekten ist unerheblich, es sei denn, die advektive Transportzeit übersteigt die Halbwertszeit des Radionuklids deutlich und die Dispersion ist stark. Bei den im Endlager herrschenden Bedingungen und für relevante Radionuklide reicht eine Verkürzung der advektiven Transportzeit um den Faktor 2 oder weniger aus, um die Vernachlässigung des Dispersionseffekts bei Annahme eines rein advektiven Transportes auch für diesen Fall zu kompensieren. Die probabilistischen Rechnungen decken die Verkürzung der Transportzeit zur Kompensation des vernachlässigten Dispersionseffekts ab.

Die Möglichkeit von hydraulisch wirksamen Rissen in der Verfüllung wird im Modell durch die Parameterwahl berücksichtigt. Beim Transport durch ein „geklüftetes“ Medium dringen – selbst bei einer relativ kurzen Dauer der erhöhten Radionuklid-Konzentration an einem Ort – die Radionuklide durch Diffusion aus den durchströmten Klüften bis in eine signifikante Tiefe in die umgebende Matrix ein und werden dort zurückgehalten (Matrixdiffusion). Je nach der Dauer der erhöhten Radionuklid-Konzentration (Dauer der Freisetzung aus dem Einlagerungsbereich) und dem Kluftabstand in der Verfüllung ist der daran beteiligte Transportquerschnitt mehr oder weniger groß. Der Einfluss einer hypothetischen Klüftung der Verfüllung auf den Radionuklidtransport wird im Modell direkt durch Variation der wirksamen Querschnittsfläche des Abdichtsystems berücksichtigt.

Falls der Gasdruck im Einlagerungsbereich rechnerisch den Wert von 8 MPa für das West-Südfeld bzw. 8,9 MPa für das Ostfeld erreicht, wird unterstellt, dass sich durch den hohen Gasdruck hydraulische Wegsamkeiten mit hoher Permeabilität im Salzgestein öffnen (Frac-Bildung), die den hydraulischen Widerstand des Abdichtsystems kurzschließen. Die beiden Werte für den Grenzdruck entsprechen den jeweiligen lithostatischen Drücken in der Höhe der obersten Firste der Einlagerungsbereiche.

Hypothetisch kann es auch rein aufgrund der Konvergenz, d.h. ohne Gasbildung oder nach deren Abklingen, zur Frac-Bildung kommen: Wegen der großen vertikalen Ausdehnung der abgedichteten Bereiche ist der lithostatische Druck auf der untersten Sohle höher als in Höhe der Firste des obersten Abbaus; dieser hohe Druck wird durch das Fluid von der untersten Sohle bis zur Firste übertragen. Wegen der großen Gesamthohlraumvolumina ist jedoch höchstens zu sehr späten Zeiten mit einer solchen „konvergenzbedingten Frac-Bildung“ zu rechnen.

Durch die neu gebildeten Wegsamkeiten wird nach deren Bildung die Lösung ausgepresst. Eine Modellierung der möglichen Lokationen für die Rissbildung erfolgt nicht, einzig die Folge der Rissbildung, nämlich das Entfallen der Wirkung des Abdichtsystems als hydraulische Barriere, wird berücksichtigt.



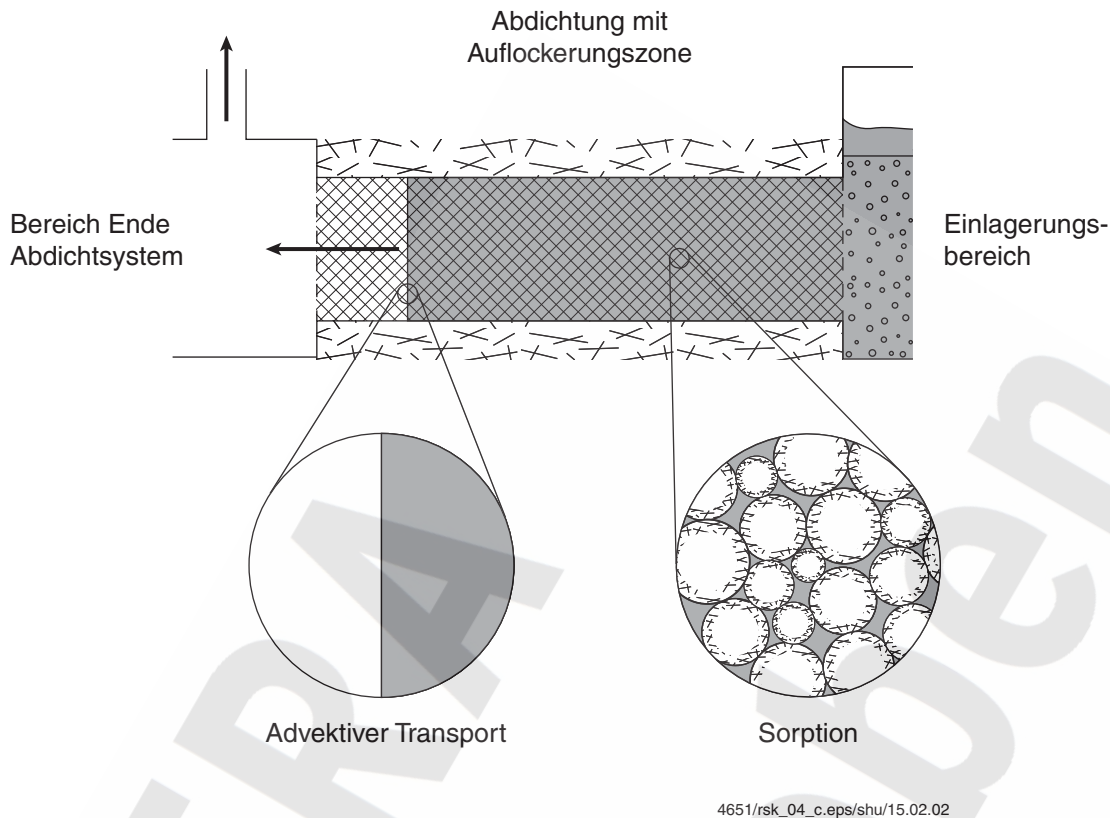


Abbildung 3-6 Transport vom Einlagerungsbereich durch das Abdichtungs-system

Die Modellannahme, dass sich bei hohem Gasdruck Wegsamkeiten durch das Salzgebirge öffnen, die für den Radionuklidtransport mit kontaminierter Lösung voll wirksam werden, stellt den ungünstigsten Fall dar: In einem fluidgefüllten, vertikal ausgedehnten Hohlraum unterscheiden sich die vertikalen Profile des Fluiddrucks und des lithostatischen Drucks aufgrund der unterschiedlichen Dichten von Fluid und Gestein. Bei zunehmendem Fluiddruck übersteigt dieser den lithostatischen Druck deshalb zuerst oben im Hohlraum. Es kann jedoch nicht belastbar abgeleitet werden, dass im Falle von Frac-Bildung die neuen Wegsamkeiten oben im Einlagerungsbereich entstehen, wo sich das Gas ansammelt. Grund dafür ist, dass räumliche Unterschiede der Gebirgsspannungen und der Zugfestigkeit des Salzgesteins (speziell geologische Schwäche-zonen) sowie geometrische Faktoren und die Lage benachbarter Abbaue den Ort des Fracs mitbestimmen. Im Modell wird deshalb für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ angenommen, dass nur Lösung durch die neugebildeten Wegsamkeiten ausgepresst wird, so, als ob diese unten, im lösungsgefüllten Teil des Einlagerungsbereichs entstanden wären. Für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ wird ein gleichzeitiges Auspressen von Lösung und Gas mit einem unveränderten Verhältnis gegenüber den Fließraten vor der Frac-Bildung unterstellt. Die beiden Fälle des Modells decken somit konservativ das Auspressen von kontaminierter Lösung nach der Rissbildung ab.

Obwohl in Wirklichkeit die hydraulische Verbindung eines Einlagerungsbereichs mit dem übrigen Grubengebäude durch mehrere parallele Abdichtungen gebildet wird, werden diese im Modell unter Berücksichtigung des hydraulischen Widerstands und der transportverzögernden Wirkung in

einer Modell-Zugangsstrecke (Abdichtsystem) zusammengefasst¹¹. Dadurch werden die Lösungszutrittsphase und die konvergenz- und gegebenenfalls gasgetriebene Auspressphase, d.h. die Phase, während der Konvergenz und/oder Gasentwicklung kontaminierte Salzlösung aus dem Einlagerungsbereich auspresst, korrekt oder aber in konservativer Näherung beschrieben (vgl. Anhänge D und K). Insbesondere findet in dieser Phase keine Durchströmung des Einlagerungsbereichs statt. Nach Abklingen der konvergenz- und gegebenenfalls gasgetriebenen Auspressphase ist jedoch eine Durchströmung des Einlagerungsbereichs möglich, bleibt aber ohne Konsequenzen für die resultierende Maximaldosis. Dies wird im Detail in Anhang K diskutiert.

3.3.9 Mischungsbereich

Für den weiteren Transport der Radionuklide durch das Grubengebäude und die Wegsamkeit im Salzgestein bis zum Salzspiegel wird in konservativer Weise keine weitere zeitliche Verzögerung unterstellt, sondern lediglich eine Verdünnung in einem Teil des Gesamthohlraumvolumens außerhalb des Einlagerungsbereiches angenommen (siehe Abbildung 3-7). Modellmäßig wird diese Verdünnung durch einen „Mischungsbereich im Grubengebäude“ (vgl. Abbildung 3-7) mit vorgegebenen Werten für das anfängliche Gesamthohlraumvolumen sowie die Konvergenzrate berücksichtigt. Bei einer Freisetzung wirken zumindest die Hohlräume, welche Teil des direkten Transportpfads im Grubengebäude sind, als Mischungsbereich.

Die Berechnung im Modell beruht auf einem „Mischtank-Ansatz“ mit zeitlich durch Gebirgskonvergenz abnehmendem Gesamthohlraumvolumen. Die Abnahme des Gesamthohlraumvolumens wird unter Berücksichtigung der Stützwirkung von Fluiddruck und Versatz durch den PSE-Ansatz beschrieben, in gleicher Weise wie für die Einlagerungsbereiche und die übrige Grube (vgl. Anhang F).

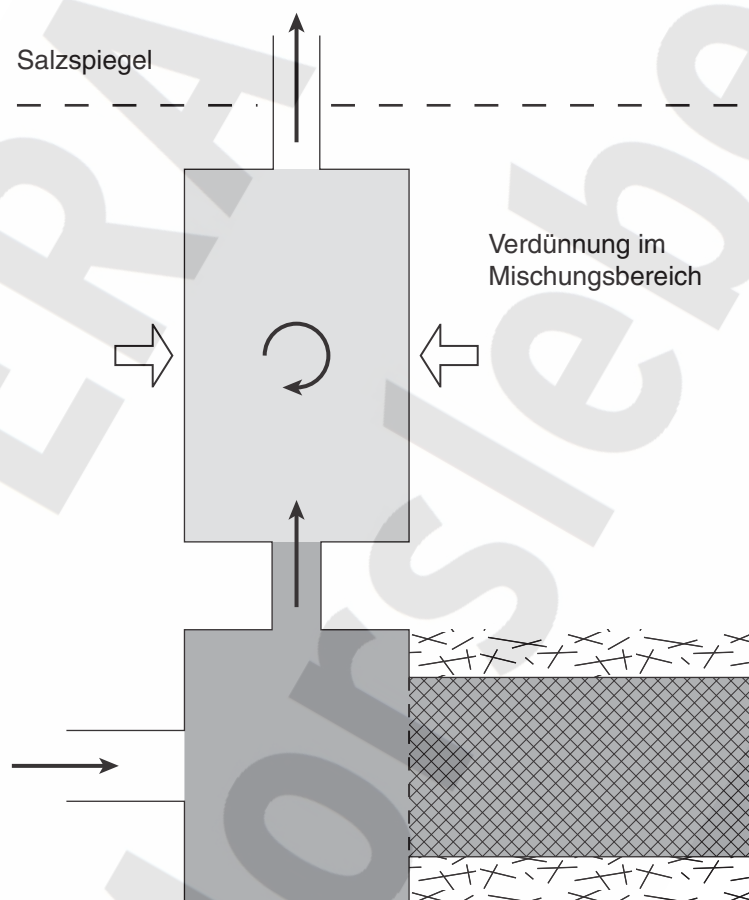
Der Mischungsbereich kann sehr groß sein; je nach Ort der Auspressung durchströmt die radionuklidhaltige Lösung zunächst einen Großteil der übrigen Grube, bevor sie durch das Salzgestein in das Hutgestein austreten kann. Ungünstig kleine Mischungsbereiche sind für die Einlagerungsbereiche West-Südfeld, Ostfeld und Zentralteil die Abbaue einer einzigen Abbaureihe oberhalb der 3. Sohle des Zentralteils (Modellannahme: Zutritts- und Auspressort oberhalb des Zentralteils), für das Nordfeld die Abbaue oberhalb seiner Einlagerungsgrubenbaue (Annahme: Zutritts- und Auspressort oberhalb des Nordfelds). Die separate Behandlung des Nordfelds spiegelt die räumliche und hydraulische Trennung vom Zentralteil wider. Für den Fall, dass z.B. nur ein einziger Auspressort im Zentralteil existiert, müsste die Lösung aus dem Nordfeld zunächst entlang der langen, firstbündig verfüllten Nordstrecken zwischen Nordfeld und Zentralteil transportiert werden, bevor sie von dort in das Hutgestein austritt. Dieses für die Radionuklidrückhaltung günstigere Alternativszenario wird in den Modellrechnungen nicht betrachtet.

Die Annahme eines kleinen Mischungsbereichs und der Verzicht auf die Berücksichtigung der Transportverzögerung in der übrigen Grube bei den Modellrechnungen entspricht einem Zustand

¹¹ mit Ausnahme der Abdichtungen des ELB OF während der Phase des Lösungszutritts aus der übrigen Grube in den Einlagerungsbereich; vgl. Fußnote 9 auf Seite 49



des Endlagersystems, in dem die kontaminierte Lösung aus dem Einlagerungsbereich NF direkt nach oben durch das Salzgestein in das Hutgestein gelangt, während jene aus den übrigen Einlagerungsbereichen über die hochgelegenen Abbaue des Zentralteils ins Hutgestein austritt. Dies bedeutet, dass eine gewisse räumliche Trennung und – aufgrund der relativ niedrigen hydraulischen Leitfähigkeit des Hutgesteins – auch eine hydraulische Abtrennung der Austrittsorte und damit auch der Transportpfade im Hutgestein vorliegt. Gleichwohl wird im Modell in konservativer Weise angenommen, dass der Transport der Lösung aus allen Einlagerungsbereichen im Hutgestein und Deckgebirge entlang einem gemeinsamen Pfad mit verhältnismäßig geringem Transportquerschnitt erfolgt, was im Modell zu kürzeren Transportzeiten durch das Hutgestein und das Deckgebirge und – in der Tendenz – zu einer Unterschätzung des gesamten verdünnenden Grundwasserflusses führt (vgl. Kap. 3.3.10).



4651/rsk_05_b.eps/shu/15.02.02

Abbildung 3-7 Verdünnung im Mischbereich nach der Freisetzung der Radionuklide aus einem Einlagerungsbereich

3.3.10 Transportverzögerung in Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär)

Der Radionuklidtransport vom Salzspiegel durch das Hutgestein und das Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) in das oberflächennahe Grundwasser bewirkt eine zeitliche Verzögerung, während der die Aktivität des aus den Einlagerungsbereichen ausgetretenen Inventars durch radioakti-

ven Zerfall weiter abnimmt. Zudem breiten sich die Schadstoffe durch hydraulische und Dichteeffekte auch lateral aus, so dass die Freisetzung in die Biosphäre an verschiedenen Orten, d.h. räumlich verteilt stattfindet.

Die ungestörte Bewegung von Grundwasser im Hutgestein, d.h. jene ohne Zutritt von Wässern ins Grubengebäude oder Auspressung von Lösungen aus diesem, ist äußerst gering. Modellrechnungen ergeben unter Berücksichtigung von Dichteeffekten einen kleinen abwärtsgerichteten Fluss oberhalb der potentiellen Austrittsstellen aus dem Grubengebäude durch das Salinar in das Hutgestein [Colenco 2002b]. Eine nach oben gerichtete Grundwasserbewegung in diesem Bereich, welche Voraussetzung für einen Radionuklidtransport in Lösung bis in oberflächennahes Grundwasser ist, entsteht erst durch das Auspressen von Lösung aus dem Grubengebäude.

Nahe der potentiellen Austrittsorte am Salzspiegel oberhalb des Zentralteiles und des Nordfeldes verläuft die Struktur mit der höchsten hydraulischen Durchlässigkeit im Hutgestein, die Schichtenfolge „Deckanhydrit – Grauer Salzton – Leinekarbonat“ (Schichtenfolge DGL), welche etwa 500 m NW des Nordfeldes und etwa ebenso weit entfernt SE des Zentralteils mit der tief ausgebildeten Oberkreiderinne in Kontakt steht. Es kann angenommen werden, dass die DGL in Streichrichtung zerblockt ist und über diese Distanzen nicht hydraulisch durchgehend verläuft.

Modellrechnungen zur Ausbreitung von Grubenlösung, die an den potentiellen Austrittsstellen in das Hutgestein ausgepresst wird, zeigen, dass die Ausbreitung von Radionukliden in Lösung entlang drei Typen von Austragswegen durch das Hutgestein und das Deckgebirge ins oberflächennahe Grundwasser erfolgen kann [Colenco 2002a], [Colenco 2002b]:

- (i) durch das Hutgestein im Südwesten der Schichtenfolge DGL direkt (oder durch eine geringmächtige Schicht Jura) in den Oberkreidetrog und entlang dessen Basis nach Nordosten ansteigend bis ins Exfiltrationsgebiet nahe der Aller,
- (ii) entlang der Schichtenfolge DGL oder nordöstlich davon durch das Hutgestein und dann durch das Deckgebirge der Allertalzone (Schilfsandstein, Oberer Gipskeuper, Steinmergelkeuper) ins oberflächennahe Grundwasser,
- (iii) entlang der Schichtenfolge DGL oder nordöstlich davon durch das Hutgestein, dann entlang des Schilfsandstein nach Nordosten in die Weferlinger Triasplatte und durch die Schichten des Buntsandstein ins oberflächennahe Grundwasser.

Transportpfade, die über größere Distanzen in Streichrichtung der Schichtenfolge DGL nach NW oder SE führen, können ausgeschlossen werden.

Bei Ausschluss von wenig plausiblen Randbedingungen betragen die berechneten Transportzeiten (ohne Sorption) für den Pfad Typ (i) rund 1000 Jahre bis mehrere 10 000 Jahre, für den Typ (ii) mehrere 10 000 Jahre bis einige 100 000 Jahre und für den Typ (iii) einige 10 000 Jahre. Die Pfade des Typs (ii) und (iii) führen immer durch sorbierende Schichten des Keuper oder des Buntsandstein, jene des Typs (i) durch die Unteren und Oberen Alleringerslebener Schichten an der Basis der Oberkreide und eventuell zusätzlich durch die Schicht Jura zwischen Hutgestein und Oberkreide. Außerhalb der Schichtenfolge DGL kann im Hutgestein keine nennenswerte Sorption angenommen werden.



Für die quantitative Langzeitsicherheitsanalyse wird für den Transport durch das Hutgestein und das Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) ein modellhafter Transportpfad unterstellt, dessen Merkmale in Anlehnung an Struktur und Eigenschaften der Schichtenfolge DGL festgelegt werden (vgl. Kapitel 4.1). Des Weiteren wird angenommen, dass der Radionuklidtransport entlang des modellhaften Transportpfades lateral begrenzt als eindimensionaler Prozess erfolgt, der durch die Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude angetrieben wird. Mit den in Kapitel 4.1 angeführten Parameterwerten des modellhaften Transportpfades ergibt dies für die während einer langen Zeitperiode zu erwartende Lösungsauspressrate von 10 m^3 pro Jahr eine Transportzeit für nichtsorbierte Radionuklide von knapp 1000 Jahren.

Eine Verzögerung des Radionuklidtransports anschließend an diesen modellhaften Transportpfad wird vernachlässigt. Sorption in der Oberkreide wird nur zur Berechnung der Aktivitätsverhältnisse von Radionukliden einer Zerfallsreihe im oberflächennahen Grundwasser berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.3.11).

In Bezug auf den kleinräumigen Transportprozess wird angenommen, dass dieser entlang des modellhaften Transportpfades gleich erfolgt wie entlang der Schichtenfolge DGL: Die Lösungsbeziehung und damit der advective Transport finden im Grauen Salztön statt [BfS 2001]. Die kompetenteren Gesteine Deckanhydrit und Leinekarbonat sind kleinräumig zerbrochen, in die tonig-schluffige Matrix des Salztön eingebettet und sehr gering durchlässig. Risse und Klüfte in diesen Bruchstücken sind durch Mineralausfällungen verfüllt. Die zeitliche Verzögerung als Folge von kleinräumigen Transportprozessen vom Salzspiegel bis ins oberflächennahe Grundwasser wird im Modell unter Verwendung von Parametern ermittelt, die für den Grauen Salztön charakteristisch sind.

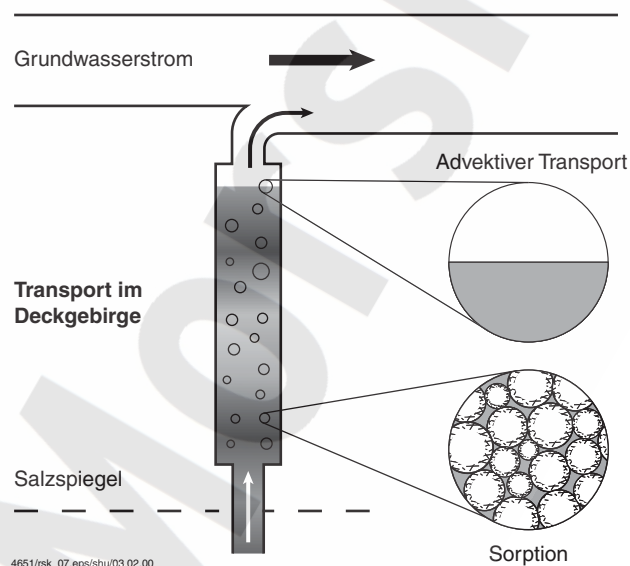


Abbildung 3-8 Freisetzung von Radionukliden aus dem Grubengebäude ins oberflächennahe Grundwasser: Transportverzögerung im Hutgestein und Deckgebirge

Der Transport entlang des modellhaften Transportpfades durch Hutgestein und Deckgebirge wird als rein advectiver Transport mit reversibler, linearer Sorption und zeitlich veränderlicher Lösungsflussrate berechnet (siehe Abbildung 3-8). In Bezug auf die Vernachlässigung der Dispersion gilt

das Gleiche wie für die Modellierung des Transports entlang des Abdichtsystems (vgl. Abschnitt 3.3.8).

Die Parameter sind die Transportdistanz, der Fließquerschnitt, die Porosität und die K_d -Werte. Die Fließporosität und die diffusionszugängliche Porosität des Grauen Salzton sind sehr ähnlich, deshalb werden diese Parameter auch für den modellhaften Transportpfad gleichgesetzt.

Die Ausbreitung der in das Hutgestein ausgepressten Salzlösung erfolgt einerseits in Streichrichtung der Schichtenfolge DGL. Dies ist u.a. eine Auswirkung der Subrosionsrinne, die nahe der Schichtenfolge DGL entlang des Ausbisses des Kaliflözes am Salzspiegel verläuft. Es ist anzunehmen, dass deren Durchlässigkeit als Folge von Lösungsprozessen durch die zuvor ins Grubengebäude zugetretenen Wasser in der Umgebung der Zutrittsstelle angestiegen ist. Zum anderen breitet sich die ausgepresste Lösung auch hydraulisch in horizontaler Richtung aus, sowohl in Streichrichtung der Schichtenfolge DGL als auch quer dazu. Für die Festlegung des Fließquerschnitts wird angenommen, dass dieser gleich ist wie bei einem Transport entlang der Schichtenfolge DGL, wobei aufgrund von Permeabilitätsunterschieden im Grauen Salzton aber nur ein Teil des geometrischen Querschnittes tatsächlich durchströmt wird (Channeling) (vgl. Kapitel 4.1).

Die zeitlich veränderliche Lösungsfließrate ergibt sich als Summe der berechneten Lösungsauspressraten aller Einlagerungsbereiche und jener aus dem übrigen Grubengebäude.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass durch geologische Vorgänge nach mehreren zehntausend Jahren im Hutgestein neue Wegsamkeiten entstehen, die als Fließpfade für die ausgepresste Lösung dienen und in denen keine Sorption stattfindet [BGR 2002]. Für die Langzeitsicherheitsanalyse wird deshalb in einem Alternativszenario (vgl. Kapitel 3.5.8) unterstellt, dass nach 30 000 Jahren der Radionuklidtransport durch Hutgestein und Deckgebirge entlang einem neuen modellhaften Transportpfad erfolgt, der dieselben charakteristischen Werte für die Transportdistanz, den Fließquerschnitt und die Porosität aufweist wie der oben beschriebene modellhafte Transportpfad, jedoch keine Radionuklidrückhaltung durch Sorption bewirkt. Nach 30 000 Jahren wird somit in diesem Alternativszenario ein Radionuklidtransport vom Salzspiegel durch Hutgestein und Deckgebirge bis ins oberflächennahe Grundwasser ohne Sorption unterstellt.

3.3.11 Verdünnung im oberflächennahen Grundwasser und Berechnung der Strahlenexposition

In das oberflächennahe Grundwasser freigesetzte Radionuklide erfahren dort in Abhängigkeit von Freisetzungsrate, räumlicher Verteilung der Freisetzung und Grundwasserfluss eine signifikante Verdünnung. Aufgrund von dispersiven und diffusiven Prozessen erfährt die aus der Grube in das Hutgestein ausgepresste, potentiell radionuklidhaltige Lösung während des gesamten Transports durch Hutgestein und Deckgebirge eine laufend zunehmende Verdünnung. Da die Radionuklidkonzentrationen durchwegs gering sind und deshalb lineare Sorptionsisotherme zulässige Näherungen darstellen, ist die Verdünnung ein linearer Prozess. Aufgrund dieser Linearität lässt sich die kumulierte Auswirkung der Verdünnung im Hutgestein und Deckgebirge (einschließlich Kreide und Quartär) durch das Verhältnis des oberflächennahen Grundwasserumsatzes im Gebiet, in das die Radionuklide freigesetzt werden, zur Rate der Lösungsauspressung aus der Grube quantifizieren.



Zudem ist es zulässig, den Radionuklidtransport durch Hutgestein und Deckgebirge unter Vernachlässigung der Verdünnung durch laterale Dispersion und Diffusion zu simulieren (vgl. Kapitel 3.3.10) und diesen Verdünnungsprozess zusammen mit der Verdünnung beim Übertritt der potentiell radionuklidhaltigen Lösung in das oberflächennahe Grundwasser zu berücksichtigen. Die Verdünnung durch longitudinale Dispersion (und Diffusion) beeinflusst demgegenüber den zeitlichen Ablauf des Radionuklidübertritts in das oberflächennahe Grundwasser und kann deshalb im Modell nicht in gleicher Weise einbezogen werden. Bei den Modellrechnungen mit PROSA wird die Verdünnung durch longitudinale Dispersion vernachlässigt, die transportbeschleunigende Nebenwirkung der longitudinalen Dispersion wird durch Variation der advektiven Transportgeschwindigkeit in die Sicherheitsbewertung einbezogen (vgl. auch Kapitel 3.3.10).

Die kumulierte Wirkung der Verdünnung bis in das oberflächennahe Grundwasser wird somit alleine durch den verdünnungswirksamen oberflächennahen Grundwasserfluss bestimmt, in den die aus der Grube ausgepresste Lösung übertritt. Dieser Grundwasserfluss stellt einen Systemparameter dar, der aus den Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung im Hutgestein und Deckgebirge oder aus allgemeinen Überlegungen abgeleitet wird (vgl. Kapitel 4.1).

Der kumulierte Verdünnungsfaktor durch den Transport durch Hutgestein und Deckgebirge (einschließlich Kreide und Quartär) ist – wie oben bereits erwähnt – das Verhältnis von diesem Grundwasserfluss und der Rate, mit der Salzlösung aus dem Grubengebäude ausgepresst wird. Konzentrierte Salzlösung muss mindestens um den Faktor 500 verdünnt werden, damit sie trinkbar ist oder landwirtschaftlich genutzt werden kann. Das Modell unterstellt deshalb als minimalen Verdünnungsfaktor einen Wert von 500.

Die Berechnung der Übertrittsraten von Radionukliden einer Zerfallskette in das oberflächennahe Grundwasser erfolgt im Modell in konservativer Vereinfachung, indem

- (i) im Falle eines Tochternuklids, das entlang der Transportstrecke durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) schwächer sorbiert als seine Mutternuklide, auch für die letztgenannten die geringere Sorption des Tochternuklids unterstellt wird (nur im Zusammenhang mit der Berechnung der Freisetzung des Tochternuklids), und
- (ii) zusätzlich im Falle eines langlebigen Mutternuklids mit einem kürzerlebigen Tochternuklid der folgende Beitrag zur Übertrittsrate des Tochternuklids aus der Transportstrecke durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) berücksichtigt wird: Der Austritt von Mutter- und Tochternuklid aus der Transportstrecke erfolgt im Zerfallsgleichgewicht unter Berücksichtigung der Sorptionsverhältnisse entlang der Transportstrecke. Die Erweiterung auf Zerfallsreihen mit mehreren Generationen erfolgt sinngemäß (vgl. Anhang A).

Diese Vereinfachung führt bei der ^{238}U -Zerfallsreihe mit dem Referenzparametersatz zu einer erheblichen Überschätzung der Freisetzung von ^{226}Ra . Die Elemente Uran und Thorium legen innerhalb des Nachweiszeitraums aufgrund ihrer guten Sorption am Grauen Salzion nur einen Bruchteil der Transportdistanz durch Hutgestein und Deckgebirge zurück. Das ^{226}Ra , welches aus diesen Vorläufernukliden gebildet wird, zerfällt weitestgehend während des Transports entlang der verbleibenden Strecke, da seine Halbwertszeit von 1'600 a um etwa eine Größenordnung kürzer ist als die verbleibende Transportzeit durch das Hutgestein. Darum wird für das ^{226}Ra ein spezieller Algorithmus angewandt: Die Transportdauer für Radium von der Transportfront des Urans bis zum



Ende des Transportwegs durch das Hutgestein wird zeitabhängig berechnet und die gemäß (i) berechnete Freisetzung des ^{226}Ra um dessen radioaktiven Zerfall während dieser Transportdauer reduziert. Damit im Modell der radioaktive Zerfall auf das anfänglich mit den Abfällen eingebrachte ^{226}Ra nicht zweimal angewandt wird, setzt dieser Algorithmus erst ab 25'000 Jahre nach Endlager-verschluss ein, wenn das Inventar an ^{226}Ra sein zeitliches Minimum erreicht, weil das Anfangsinventar bereits zerfallen und sein unmittelbarer Vorläufer, das ^{230}Th , noch im Aufbau begriffen ist.

Nach dem Übertritt in das oberflächennahe Grundwasser verändern sich die Konzentrationsverhältnisse von Radionukliden einer Zerfallsreihe aufgrund der im Grundwasserträger herrschenden Sorptionsverhältnisse gegenüber den Konzentrationsverhältnissen in Lösung beim Übertritt aus der Transportstrecke durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär). Dies wird im Modell durch einen vereinfachten Algorithmus auf der Basis von Sorptionsparametern, die repräsentativ für die Oberen Alleringerslebener Schichten der Oberkreide sind, berücksichtigt (siehe Anhang A).

Für einzelne Radionuklide von Zerfallsreihen ergibt das hier beschriebene und im Programm PROSA umgesetzte Vorgehen eine mehrfache Berücksichtigung ihres Beitrags zur Strahlenexposition, was eine konservative Näherung darstellt.

Die Berechnung der Strahlenexposition als Folge der Radionuklid Ausbreitung und teilweise auch Radionuklidakkumulation in der Biosphäre und aufgrund der verschiedenen Expositionspfade erfolgt, ausgehend von den berechneten Radionuklidkonzentrationen im genutzten oberflächennahen Grundwasser, in Anlehnung an die Allgemeine Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 StrlSchV.

3.4 Geometrische Abgrenzung von Einlagerungsbereichen und Abdichtungen

Die Zuordnung bzw. Unterteilung der Hohlräume des ERAM in Einlagerungsbereiche und Abdichtungen ist für eine Sohle in Abbildung 3-9 dargestellt. Analoge Abbildungen für die übrigen Hauptsohlen finden sich in Anhang D.

Die folgenden horizontalen Grubenbaue sind entsprechend dem Stilllegungskonzept als Abdichtungen auszuführen:

- Ostquerschlag auf der –291 mNN und der –372 mNN Sohle zwischen Zentralteil und Ostfeld
- nördliche Richtstrecken auf der –291mNN und –332mNN Sohle (Verbindungsstrecken vom WSF nach Marie)
- Westquerschläge auf der –332 mNN und –372 mNN Sohle (Teile des Westquerschlags auf der -372 mNN Sohle sind zugleich Einlagerungsgrubenbau)
- Richtstrecke nach Süden auf der –372 mNN Sohle und das Störreservelager
- Grubenbaue zwischen den Kalilagerteilen B und C (auf den Hauptsohlen):
 - Ostquerschläge
 - Südliche Wetterstrecke
 - Nördliche Verbindung zwischen den abgebauten Lagerteilen



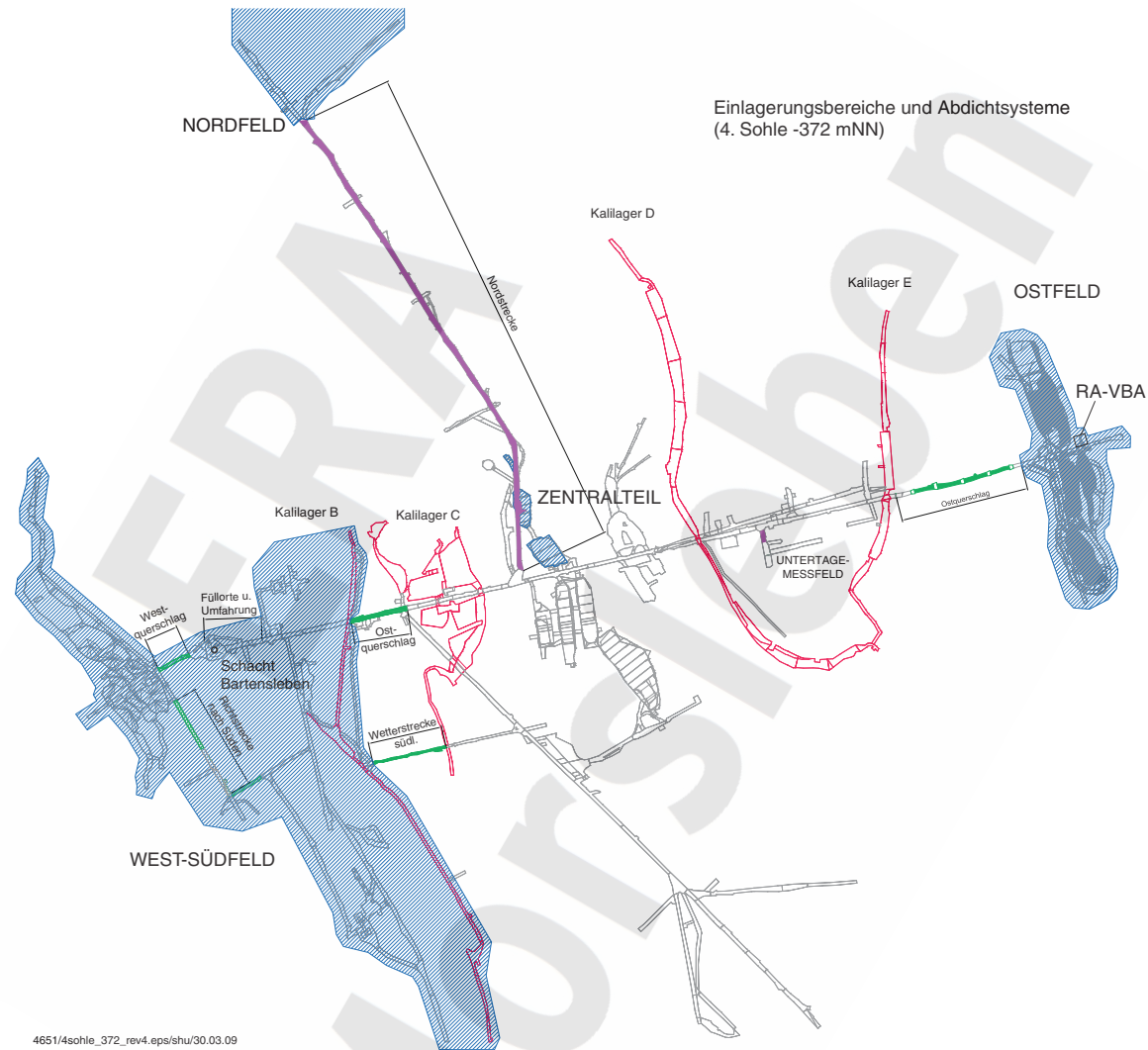


Abbildung 3-9 Lokationen der Abdichtungen (grün), der Kallager (rot) und Maximalausdehnung der Modell-Einlagerungsbereiche (blau schraffiert) auf der 4. Sohle

- 1. südliche Richtstrecke (2. Sohle)

Im Südfeld sind die Abfälle in den Abbauen 1, 2 und 3 der 5a-Sohle eingelagert. Das Südfeld ist derart stark durchbaut, dass Abbaue über Auflockerungszonen miteinander verbunden sind und in der Nähe der Einlagerungsgrubenbaue kein Abdichtsystem ausgewiesen werden kann. Die Einlagerungsgrubenbaue des Westfeldes sind die Abbaue 1 bis 5, die nördliche Richtstrecke und das Westgesenk, alle auf der 4. Sohle. Da die im Westfeld erzeugte Gasmenge bei vollständiger Abdichtung zu einem Frac führen könnte, ist eine dauerhaft offene Verbindung zwischen dem Westfeld und Südfeld – von Abbau 1s auf der –253 mNN Sohle (SF) zum Westgesenk (WF, Bereich –332 mNN Sohle) – vorgesehen, so dass das Westfeld und das Südfeld im Sinne des Langzeitsicherheitsnachweises einen Einlagerungsbereich, das West-Südfeld, bilden. Die Wahl der obersten Sohle des Südfeldes als Ansatzpunkt für die neue Verbindung zwischen West- und Südfeld ist im Hinblick auf die Langzeitsicherheit besonders günstig, weil eine lösungsgestützte Radionuklidfreisetzung aus dem Westfeld erst erfolgen kann, nachdem das Westfeld über das Südfeld und diese neue Verbindung vollgelaufen ist. Mit großer Wahrscheinlichkeit wird der Flüssigkeitsspiegel im Südfeld die 1. Sohle nicht erreichen, weil aufgrund von Gasbildung und Konvergenz der Gasdruck bereits vorher den hydrostatischen Druck in der übrigen Grube überschreitet und der Lösungszutritt in das Südfeld endet. Dennoch werden das Westfeld und das Südfeld für den Langzeitsicherheitsnachweis vereinfachend zu einem Einlagerungsbereich West-Südfeld zusammengefasst.

Als Abdichtsystem des West-Südfelds gegen die potentiellen Zutrittsorte im Zentralteil, im Nordfeld und im Südostfeld sowie im Grubenteil Marie wirken 12 Strecken zwischen den Kalilagern B und C als parallelgeschaltete Widerstände: Der hydraulische Widerstand dieses Abdichtsystems wird im Modell durch eine Barriere mit der effektiven Länge $L_{\text{eff}} = 26 \text{ m}$ und der effektiven Querschnittsfläche $A_{\text{eff}} = 113,8 \text{ m}^2$ beschrieben (vgl. Anhang D). Zur zusätzlichen Verzögerung eines Lösungsübertrittes vom Südfeld ins Westfeld (innerhalb des gemeinsamen Einlagerungsbereiches West-Südfeld) werden zusätzlich die Westquerschläge auf der 3. und 4. Sohle sowie die Richtstrecke vom Westfeld gegen Süden auf der 4. Sohle und das Störreservelager als Abdichtungen ausgeführt. Der Fluss über die ebenfalls als Abdichtungen ausgeführten Verbindungsstrecken vom West-Südfeld nach Marie ist wegen ihrer Länge nicht relevant. Diese Strecken werden daher im Modell nicht berücksichtigt.

Von den Unterwerksbauen des Südfelds (-420 mNN, -454 mNN, -461 mNN und -475 mNN) führt ein nur begrenzt abgebautes Hartsalzflöz (Bestandteil des Kalilagers C) nach oben zum Zentralteil. Dieses ist undurchlässig und daher hydraulisch dem intakten Wirtsgestein gleichzusetzen.

Ein Durchlösen dieses Flözes und damit ein Kurzschließen des Abdichtsystems zum ELB WSF kann sowohl vom Zentralteil gegen den Einlagerungsbereich als auch in umgekehrter Richtung ausgeschlossen werden, zumindest für lange Zeiträume. Ein Durchlösen vom Zentralteil nach unten zum Südfeld ist aufgrund von Dichteeffekten und der Selbstabdichtung durch ausfallende Mineralphasen ausgeschlossen. Ein Durchlösen in umgekehrter Richtung (vom Südfeld nach oben zum Zentralteil) erfordert ein Ansteigen von MgCl_2 -untersättigter Lösung in den Unterwerksbauen des Südfelds (Abbaue in Lagerteil C) bis zur 4. Sohle. Aufgrund der geringen mobilen Lösungsmenge im Einlagerungsbereich zu Beginn der Zutrittsphase und des geringen Lösungszutritts durch die unkorrodierten Abdichtungen ist dies erst zu späten Zeiten möglich. Selbst dann ist ein



Durchlösen des Hartsalzflözes kaum zu erwarten, da bei der Umlösung von Hartsalz mit NaCl-Lösung das Volumen der Festphase zunimmt, was zu einer Selbstabdichtung des Hartsalzes führt.

Der Einlagerungsort im Ostfeld ist der Abbau 2 auf der 4. Sohle. Als Abdichtung wirken die beiden Ostquerschläge. Der Ostquerschlag auf der 2. Sohle hat einen Querschnitt von 21 m^2 und wird mit Salzbeton auf einer Länge von 150 m abgedichtet. Das Dichtelement im Ostquerschlag auf der 4. Sohle, im Hauptanhydrit, wird über eine Länge von 110 m aus Magnesiabeton erstellt¹², bei einem Querschnitt von $22,5 \text{ m}^2$. Sämtliche Abbaue des Ostfeldes befinden sich damit östlich des Abdichtsystems und können deshalb nur über das Abdichtsystem des Ostfeldes volllaufen. Welche der Abbaue letztendlich für die Gasspeicherung zur Verfügung stehen und am Prozess der Radionuklidmobilisierung und -freisetzung teilnehmen, somit im Sinne des Modells tatsächlich zu dem Einlagerungsbereich zugehören, ist abhängig von der real stattfindenden hydraulischen Ankopplung an den Einlagerungsgrubenbau. Das Hohlraum- und Porenvolumen des Ostfeldes wird deshalb über einen weiten Bereich, von den Werten des Einlagerungsgrubenbaus allein bis zu jenen des gesamten Ostfeldes, variiert.

Zusätzlich befindet sich innerhalb eines Streckenstummels des Ostfeldes in einem Sohlenbohrloch ein Fass in einer verlorenen Betonabschirmung (VBA) mit einem hohen Inventar an ^{226}Ra , die sogenannte Radium-VBA. Wie in Anhang R dargelegt, zerfällt das mit der Radium-VBA eingebrachte ^{226}Ra selbst unter ungünstigen Annahmen weitestgehend innerhalb des mit Salzbeton verfüllten Streckenstummels. Daher wird der Beitrag der Radium-VBA zum Radionuklidinventar des Ostfeldes in den Modellrechnungen vereinfachend vernachlässigt, d.h. maßgeblich für das Radiuminventar des Ostfeldes ist nur das mit den Abfällen in Abbau 2 eingebrachte Inventar.

Im Nordfeld umfasst der Einlagerungsbereich des Modells das Ende der Nordstrecke und den nordöstlichen Querschlag, beide auf der 4. Sohle. Die Nordstrecken nach Marie gehören konzeptuell zur übrigen Grube. Der Einlagerungsbereich Nordfeld kann nicht nachweislich gegen die potentiellen Zutrittsorte abgedichtet werden. Der Einlagerungsbereich Nordfeld weist deshalb kein wirksames Abdichtsystem auf. Im Modell wird diesem der Parametersatz $L_{\text{eff}} = 1 \text{ m}$, $A_{\text{eff}} = 20 \text{ m}^2$ und $k = 10^{-14} \text{ m}^2$ zugewiesen, was einem vernachlässigbar kleinen hydraulischen Widerstand entspricht.

Im Zentralteil wurden die Abfälle im nördlichen und südlichen Abbau 1a der 4a-Sohle und in der sogenannten Durchsumpfungsrube (4. Sohle) eingelagert. Aufgrund des hohen Durchbaugrades im Zentralteil zwischen den Einlagerungsgrubenbauten auf den Sohlen 4a und 4 einerseits und den potentiellen Lösungszutritts- und -austrittsorten auf der 1. Sohle kann kein hydraulisch wirksames Abdichtsystem ausgewiesen werden (modelltechnisch: $L_{\text{eff}} = 1 \text{ m}$, $A_{\text{eff}} = 20 \text{ m}^2$, $k = 10^{-14} \text{ m}^2$). Das Modell wird deshalb die Dauer des Lösungszutritts (konservativ) unterschätzen, da es den bestehenden, jedoch nicht quantifizierbaren Widerstand der verfüllten Hohlräume im Zentralteil vernachlässigt.

¹² Es wird unterstellt, dass der Hauptanhydrit aufgrund seiner Steifigkeit im Unterschied zum Steinsalz nicht durch Konvergenz auf das Abdichtungsbauwerk aufkriechen wird. Deshalb ist für die Abdichtung an dieser Lokation mit Magnesiabeton ein Baustoff vorgesehen, welcher beim Abbinden quillt. Dadurch wird die Firstbündigkeit des Bauwerks gewährleistet.



Im UMF kann aufgrund der metallischen Komponenten zwar eine signifikante Gasbildung stattfinden, aber die dort vorhandenen Abfälle beinhalten ausschließlich kurzlebige Radionuklide (^{60}Co - und ^{137}Cs -Quellen). Das Radionuklidinventar wird modelltechnisch dem Nordfeld zugeschlagen, das wie das UMF keine nennenswerte Barriere aufweist und wo die große Gasbildungsrate ein rasches Austreten der mobilisierten Radionuklide verursacht. Eine Freisetzung dieser Nuklide durch Hutgestein und Deckgebirge bis in den oberflächennahen Aquifer ist aufgrund ihrer kurzen Halbwertszeit jedoch ausgeschlossen.

3.5 Weitere Szenarien

3.5.1 Hauptanhydrit als Wegsamkeit zum Ostfeld

Das Gebiet zwischen dem Ostfeld und dem Zentralteil wird von der Westflanke der Ostmulde mit mächtigem Hauptanhydrit eingenommen. Es handelt sich um eine wenig verfaltete Struktur relativ großer Ausdehnung. Im Gegensatz dazu ist die Ostflanke der Ostmulde tektonisch stärker beansprucht, die Faltenstrukturen sind dort enger und unregelmäßiger.

Hydraulische Wegsamkeiten im Anhydrit beschränken sich auf Klüfte, die Gesteinsmatrix ist äußerst gering durchlässig. Wegsamkeiten über größere Distanzen liegen also nur vor, falls Klüfte weiträumig und hydraulisch wirksam vernetzt sind. Die Klüftung der Ostmulde wurde in den Grubenbauen untersucht [BGR 2000b]. Eine großräumige Wegsamkeit wurde in der Ostflanke der Ostmulde in einem Interferenztest zwischen mehreren Bohrungen über eine Distanz von 68 m beobachtet [BGR 2000c]. Die Möglichkeit einer hydraulischen Vernetzung in der Westflanke der Ostmulde in W-E-Richtung, d.h. zwischen dem Ostfeld und dem Zentralteil, ist wegen der dort vorherrschenden relativ geringen Klufthäufigkeit und der großen Distanz zwar stark eingeschränkt, kann jedoch nicht mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden.

Als Alternativszenario wird deshalb eine hydraulische Wegsamkeit im Hauptanhydrit zwischen dem Zentralteil und dem ELB OF unterstellt, welche eine höhere Durchlässigkeit als das System der Abdichtungen in den Ostquerschlägen auf der 2. und der 4. Sohle, das Abdichtsystem des ELB OF im Referenzfall, aufweist. In diesem Alternativszenario wird das Abdichtsystem des ELB OF streng genommen durch die Parallelschaltung der unterstellten Wegsamkeit im Hauptanhydrit und der Abdichtungen in den Ostquerschlägen gebildet. Aufgrund der Transmissivitätsunterschiede sind im Alternativszenario die Zutritts- und Austrittsraten entlang der Abdichtungen jedoch vernachlässigbar, so dass das Abdichtsystem mit der Wegsamkeit durch den Hauptanhydrit gleichgesetzt werden kann. Beim Radionuklidtransport durch den Hauptanhydrit wird keine Sorption angenommen.

3.5.2 Auflockerungszone um Abdichtung im Hauptanhydrit

Vor dem Erstellen der Abdichtungen werden an den entsprechenden Lokationen die Auflockerungszonen entfernt. Dennoch muss davon ausgegangen werden, dass sich unmittelbar danach, d.h. bevor die Abdichtungen fertig erstellt werden können, in geringerem Maße erneut aufgelocker-



te Bereiche bilden. Bei den Abdichtungen im Steinsalz werden sich diese aufgrund des Gebirgsdrucks und der dadurch bewirkten Hohlraumkonvergenz wieder schließen, bevor die Restgrube mit Lösung gefüllt sein wird. Anders ist die Situation bei der Abdichtung des Ostquerschlags auf der 4. Sohle, welcher im Hauptanhydrit verläuft. Wegen der Steifigkeit des Anhydrits ist anzunehmen, dass eine Auflockerungszone, einmal entstanden, über lange Zeiten existieren wird.

Im Referenzszenario wird vorausgesetzt, dass die Permeabilität der Auflockerungszone im Hauptanhydrit nur geringfügig erhöht ist, so dass ihr Einfluss auf das Abdichtungsbauwerk vernachlässigt werden kann. Im Alternativszenario wird dagegen eine deutlich erhöhte Permeabilität angenommen. Dadurch vergrößert sich – nach dem Volllaufen der Restgrube – gegenüber dem Referenzszenario nicht nur der Lösungszutritt in das Ostfeld, sondern die Abdichtung wird mit Grubenlösung umströmt. Bei niedrigem Mg-Gehalt derselben diffundiert deshalb Magnesium aus dem Abdichtungsbauwerk in die Auflockerungszone, was zusätzlich die Korrosion der Abdichtung beschleunigt. Wie in Anhang L, Kapitel 4.4 gezeigt, bildet sich trotzdem eine nahezu ebene Korrosionsfront aus, weshalb der Einfluss der Auflockerungszone in guter Näherung durch eine erhöhte Anfangspermeabilität des Abdichtungsbauwerks parametrisiert werden kann.

3.5.3 Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube

Es ist davon auszugehen, dass die Magnesiumkonzentration in der Grubenlösung zeitlich und örtlich variabel sein wird. Durch Umlöseprozesse an Kaliflözen nimmt der Magnesiumgehalt der Lösung zu, bei der Reaktion mit Salzbeton wird ihr Magnesium entzogen. Für die Korrosionsdauer der Abdichtungen ist der Magnesiumgehalt der Lösung, welche unmittelbar vor den Abdichtungen ansteht, ausschlaggebend. Dort befinden sich die Kalilager, welche allerdings weitestgehend mit Salzbeton verfüllt werden. Aus diesem Grund wird im Referenzszenario davon ausgegangen, dass die Magnesiumkonzentration zwar gering, aber nicht null ist. Der gewählte Referenzwert – 10% der Mg-Konzentration von IP21-Lösung – hat die Konsequenz, dass die Lösung sowohl Salzbeton als auch Magnesiabeton angreifen kann, wenngleich mit geringer Korrosionskapazität.

In zwei „what-if“-Fällen wird nun untersucht, welchen Einfluss eine diesbezüglich extreme Lösungszusammensetzung auf die Entwicklung des Endlagersystems und die Langzeitsicherheit hätte:

- (i) gesättigte NaCl-Lösung, d.h. die Mg-Konzentration ist 0
- (ii) IP21-Lösung, d.h. die Mg-Konzentration ist maximal

Im Fall (i) greift die Lösung Magnesiabeton mit maximaler Geschwindigkeit an, Salzbeton ist stabil. Im Fall (ii) wird die Lösung gegenüber Salzbeton am aggressivsten, während Magnesiabeton stabil ist. Diese beiden Fälle sind besonders für den ELB OF interessant, weil dieser auf der 2. Sohle mit Salzbeton, auf der 4. Sohle mit Magnesiabeton abgedichtet ist.

Die Bezeichnung als „what-if“-Fall ist dadurch begründet, dass derartige Lösungen im ERAM nicht in reiner Form vor den Abdichtungen anstehen werden. In den probabilistischen Modellrechnungen wurde für die Mg-Konzentration eine Dreiecksverteilung gewählt, was ausdrückt, dass die Wahr-



scheinlichkeit der Extremwerte null ist, dass aber sehr kleine Konzentrationswerte und solche nahe IP21-Lösung vorkommen können.

3.5.4 Unwirksame Abdichtungen

Dieses „what-if“-Szenario, in welchem die Transportpfade zwischen allen Einlagerungsbereichen und der unterstellten Lösungszutritts- und -austrittsstelle im Zentralteil bzw. im Nordfeld eine hohe Permeabilität aufweisen, deckt die folgenden sehr unwahrscheinlichen Fälle ab:

- mindestens eine Abdichtung ist bereits zu Beginn der Nachbetriebsphase mangelhaft oder fällt früh aus,
- es existiert eine unbekannte Bohrung oder eine andere Wegsamkeit hoher Permeabilität zwischen einem abgedichteten Bereich und der übrigen Grube,
- das Hartsalzflöz zwischen dem Südfeld und dem Zentralteil löst sich frühzeitig durch.

3.5.5 Korrosion des Salzbetons in der übrigen Grube

Im Referenzszenario wird davon ausgegangen, dass der Salzbeton, der in der übrigen Grube als Stützversatz dient, nicht oder nur in vernachlässigbarem Umfang durch magnesiumhaltige Lösungen angegriffen wird. Diese Annahme ist dadurch begründet, dass

- der Großteil des Salzbetons wegen seiner niedrigen Permeabilität und mangels treibender Kräfte in den verfüllten Hohlräumen („Sackgassen“) nicht durchströmt wird,
- diffusive Prozesse aufgrund des geringen Oberfläche-/Volumenverhältnisses keine nennenswerten Stoffumsätze bewirken können und
- der Versatz aufgrund der Konvergenz teilweise vom umgebenden Salzgestein eingeschlossen und damit gegen den Angriff von Lösungen geschützt wird.

Im Sinne einer Sensitivitätsanalyse wird dennoch angenommen, dass der Salzbeton in der übrigen Grube durch magnesiumhaltige Lösungen korrodiert wird und damit seine Stützwirkung einbüßt. Für die Modellrechnungen wird ihm dann nur noch die Stützwirkung von kompaktierbarem Versatz zugewiesen (allerdings bei einer Anfangs-Porosität von 20%).

Die Konvergenz der Hohlräume in der übrigen Grube ist als Folge dieser Annahme stärker als im Referenzszenario und presst Lösung mit einer höheren Rate durch den Mischungsbereich und das Hutgestein und Deckgebirge. Dadurch verringern sich die Pufferwirkung des Mischungsbereichs und die Transportverzögerung im Hutgestein und Deckgebirge.

3.5.6 Hohlraumneubildung aufgrund nachfließender Wässer

Im Referenzszenario ist die Rate der Lösungsauspressung aufgrund der Hohlraumkonvergenz in der Restgrube deutlich größer als die Rate des Lösungszutritts in die abgedichteten Bereiche. Da-



her führt der Lösungszutritt in die abgedichteten Bereiche nicht zu einem Nachfließen von Wässern aus dem Hutgestein und somit auch nicht zu einer entsprechenden Hohlraumneubildung in der übrigen Grube (vgl. Kapitel 3.3.2 zur Hohlraumneubildung als Folge des Volllaufens der Restgrube). Ein „Durchschlagen“ von Abdichtungen zum Zeitpunkt ihrer vollständigen Korrosion kann aber zu einem sprunghaft ansteigenden Lösungszufluss in die Einlagerungsbereiche führen, der rechnerisch durch die Hohlraumkonvergenz in der Restgrube nicht kompensiert wird. Die Folge wäre ein kurzzeitiger erneuter Zutritt von Lösung aus dem Hutgestein und eine mögliche erneute Hohlraumneubildung durch Auf- und Umlöseprozesse. Die Betrachtung der relevanten Volumina zeigt jedoch, dass dieser Effekt durch die Parametervariationen abgedeckt wird und nicht mit einem gesonderten Alternativszenario untersucht werden muss.

3.5.7 Durchströmung von Einlagerungsbereichen

Das Durchströmen von Einlagerungsbereichen, d.h. ein gleichzeitiger Lösungszutritt und Lösungsaustritt, wird durch das Modell nicht explizit simuliert. Unter Umständen können solche Vorgänge jedoch auftreten. In Anhang K werden die Bedingungen, die zu einem Durchströmen führen, diskutiert und gezeigt, dass die dem Modell zugrunde liegenden Näherungen angemessen und konservativ sind. Es wird insbesondere dargelegt, dass auch bei mehreren Zugangsstrecken das bestehende Modell mit einer einzigen Modell-Abdichtung angewendet werden kann, wobei dies je nach Situation einer mehr oder weniger konservativen Näherung entspricht.

3.5.8 Entstehung neuer Wegsamkeiten im Hutgestein

Der Transport der aus dem Grubengebäude in das Hutgestein ausgepressten Salzlösung bis in die Biosphäre wird durch verschiedene Prozesse beeinflusst (vgl. Kapitel 3.1.10). Je nachdem, wo die Auspressung stattfindet, bildet das Hutgestein einen mehr oder weniger starken hydraulischen Widerstand. Für die heutigen Verhältnisse wird anhand von Untersuchungsergebnissen für das "intakte" Hutgestein eine Modelldurchlässigkeit von $1 \cdot 10^{-11}$ m/s und eine diffusionszugängliche Matrixporosität von 0,1% unterstellt [BGR 2002], [BfS 2001]. Steil ansteigend wird das „intakte“ Hutgestein von der Basis (Salzspiegel) bis zur Obergrenze des Hutgesteins von der rund 4 m mächtigen Schichtenfolge „Deckanhydrit – Grauer Salztön – Leinekarbonat“ (Schichtenfolge DGL) durchschlagen, die im Bereich der potentiellen Auspressstellen über dem Zentralteil und dem Nordfeld verläuft. Die gemittelte Transmissivität dieser Schichtenfolge beträgt etwa $7,5 \cdot 10^{-9}$ m²/s [BfS 2001]. Der Transportpfad durch das Hutgestein und das Deckgebirge wurde für das Referenzszenario auf der Basis dieser hydrogeologischen Verhältnisse und unter Verwendung von Modellrechnungen für die Grundwasserbewegung im Hutgestein und Deckgebirge abgeleitet (vgl. Kapitel 3.3.10 und 4.1). Sorption beim Transport entlang dieses modellhaften Pfads bewirkt für die meisten Radionuklide eine erhebliche zeitliche Verzögerung, während der die Aktivität des in das oberflächennahe Grundwasser freigesetzten Inventars durch radioaktiven Zerfall abnimmt.

Unter Berücksichtigung der rezenten geologischen Verhältnisse und Prozesse ist davon auszugehen, dass die heutigen hydraulischen Durchlässigkeiten im Hutgestein über einige zehntausend Jahre weitgehend unverändert bleiben [BGR 2002]. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden,



dass sich zu einem späten, nicht weiter eingrenzbaeren Zeitpunkt durch Einzelrissbildung ein System hydraulisch vernetzter Klüfte in Teilen des derzeit intakten Hutgesteins entwickelt, wobei die hydraulische Effizienz solcher Systeme allerdings vermutlich gering bleiben wird [BGR 2002]. Modellhaft wird als Alternativszenario angenommen, dass sich nach 30 000 Jahren neue Wegsamkeiten im Hutgestein bilden. Die hydraulischen Eigenschaften des sich daraus ergebenden neuen Transportpfads durch Hutgestein und Deckgebirge werden wie diejenigen im Referenzszenario angenommen. Im Gegensatz zum Transportpfad im Referenzszenario ist in diesem alternativen Szenario jedoch die Sorption entlang des gesamten Wegs durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) vernachlässigbar gering.

Für den Transportpfad durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) werden im Alternativszenario „Entstehung neuer Wegsamkeiten im Hutgestein“ somit folgende Annahmen getroffen:

- Die Transportdistanz vom Salzspiegel in das oberflächennahe Grundwasser sei die gleiche wie im Referenzszenario, die Verdünnung dort sei ebenfalls unverändert.
Diese Annahmen sind angemessen. Die Transportdistanz im Referenzszenario ist sogar geringer als der vertikale Abstand zwischen dem Salzspiegel und der Geländeoberfläche.
- Das Produkt aus wirksamem Transportquerschnitt und transportrelevanter Porosität sei gleich wie im Referenzszenario.
Die Bildung von neuen Wegsamkeiten im „intakten Hutgestein“, welche für den Radionuklidtransport von Bedeutung sind, führt mit größter Wahrscheinlichkeit auf einen größeren Transportquerschnitt als jener im Referenzszenario, welcher in Anlehnung an Struktur und Eigenschaften der Schichtenfolge DGL angesetzt wurde (vgl. Kapitel 4.1), jedoch auf eine geringere transportrelevante Porosität.
- Die Sorption entlang der neuen Modellwegsamkeit durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) sei vernachlässigbar gering.
Dies ist eine konservative Annahme, welche in Verbindung mit der nächsten Annahme das Alternativszenario charakterisiert.
- Die hydraulische Wirksamkeit der neuen Wegsamkeiten setzt nach 30 000 Jahren ein. Bis zu diesem Zeitpunkt erfolgt der Radionuklidtransport durch das Hutgestein und Deckgebirge wie im Referenzszenario.

Die Barrierenwirkung von Hutgestein und Deckgebirge durch Transportverzögerung ist damit in diesem Alternativszenario zu späten Zeiten, wenn in den meisten Fällen der Austritt von Radionukliden aus den abgedichteten Einlagerungsbereichen WSF und OF erst einsetzt, für einen Großteil der Radionuklide deutlich geringer als im Referenzszenario.

3.5.9 Mangelhafte Abdichtung Schacht Bartensleben

Das Verschlussystem des Schachtes Bartensleben, welcher Teil des Barrierensystems des ELB WSF ist, besteht aus drei Dichtelementen, von denen eines im Salinar, eines im Übergang



Salinar – Hutgestein und eines im Übergang Hutgestein – Schilfsandstein errichtet wird (Abbildung 3-10). Die Auslegungsanforderung lautet, dass der Lösungsfluss durch das Verschlusssystem und die angrenzende verbleibende Auflockerungszone nach Verschluss des Endlagers langfristig maximal $0,1 \text{ m}^3/\text{a}$ beträgt. Hydraulische Berechnungen, die im Rahmen der Konzeptplanung für die Schachtverschlüsse durchgeführt wurden, haben Lösungsflüsse in der Größenordnung von mehreren 10 l pro Jahr ergeben [ERCOSPLAN 2003]. Angesichts der mehrstufigen Auslegung des Verschlusssystems ist die Wahrscheinlichkeit, dass keines der drei Dichtelemente gebrauchstauglich ist und deshalb entlang des Schachtes ein erheblicher Lösungszutritt stattfindet, sehr gering. Als „what-if“-Szenario werden gleichwohl die möglichen Auswirkungen einer mangelhaften Abdichtung des Schachtes Bartensleben betrachtet¹³.

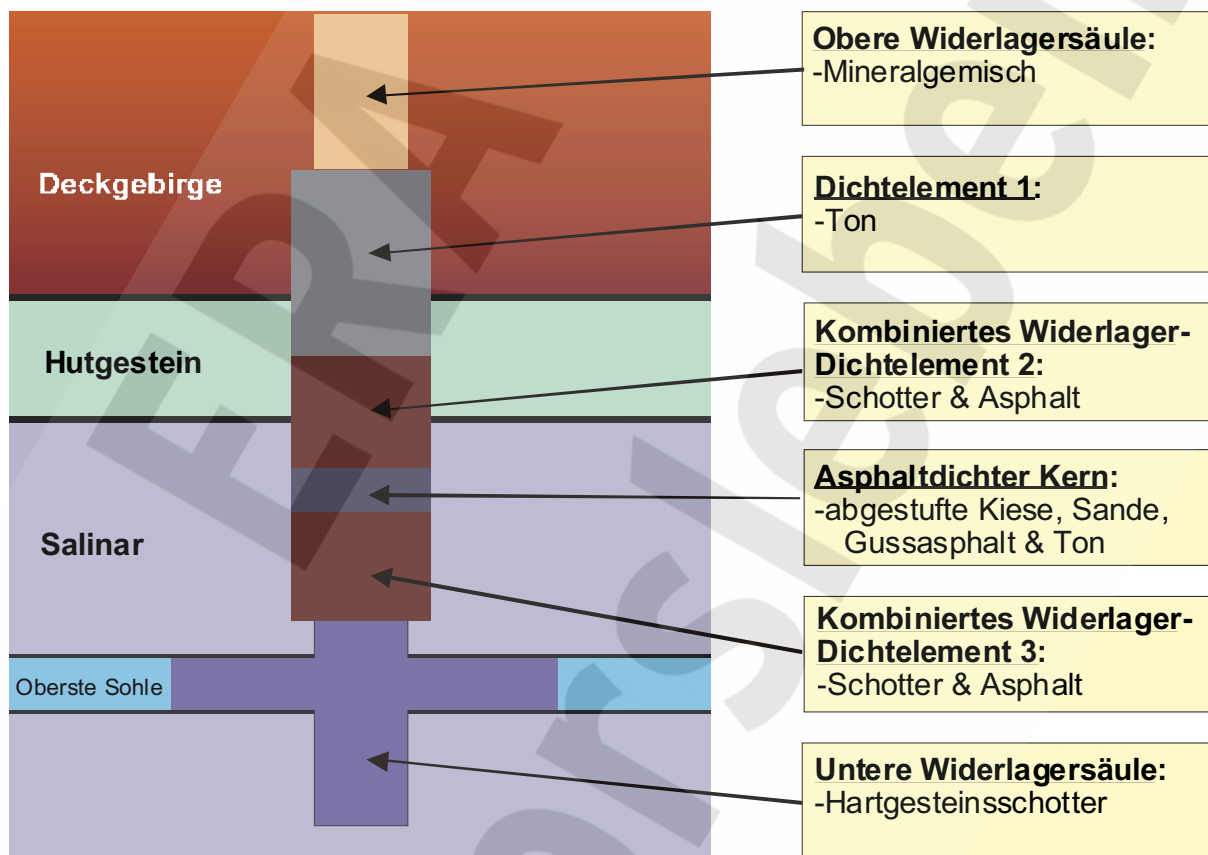


Abbildung 3-10 Schematische Darstellung der Schachtverschlüsse von Schacht Bartensleben und Schacht Marie

Das „what-if“-Szenario ist dadurch charakterisiert, dass das Verschlusssystem des Schachtes Bartensleben ab Verschluss des Endlagers einen hydraulischen Widerstand aufweist, der gegenüber der Planung deutlich vermindert ist. Für die Analyse des Systemverhaltens wird dabei eine Reduk-

¹³ Eine analoge Analyse für den Schacht Marie ist nicht erforderlich, da der hypothetische Fall einer mangelhaften Abdichtung von Schacht Marie durch das Referenzszenario mit relevantem Lösungszutritt in die Restgrube (mit Variation der Dauer des Volllaufens) abgedeckt wird.

tion bis zu einem Faktor 1000 (entsprechend einer maximalen Lösungszutrittsrate bis $100 \text{ m}^3/\text{a}$) betrachtet.

Ein relevanter Lösungszutritt entlang des Schachtes Bartensleben führt zu einem Volllaufen des ELB WSF, unabhängig von einem eventuellen weiteren Lösungszutritt aus dem Hutgestein in die Restgrube. Je nachdem, ob ein weiterer Lösungszutritt in die Restgrube erfolgt, wann ein solcher gegebenenfalls einsetzt und mit welcher Rate er auftritt, können sich unterschiedliche Verhältnisse einstellen.

Sofern kein weiterer Lösungszutritt in die Restgrube stattfindet, wird nach dem Volllaufen des ELB WSF Lösung entlang des Schachtes ausgepresst. Der treibende Prozess ist dabei die Konvergenz der Grubenbaue des ELB WSF, ein gasgetriebenes Auspressen von Lösung ist aus geometrischen Gründen nicht möglich. Gleichzeitig dringt Lösung in die Abdichtungen gegen den Zentralteil ein und bewirkt – in Abhängigkeit vom Mg-Gehalt – Korrosionsprozesse. Nach einiger Zeit kann eine der Abdichtungen durchkorrodieren, so dass nun auch die Restgrube über den Schacht Bartensleben und den ELB WSF vollläuft. Während dieser Zeit erfolgt kein Lösungsaustrag entlang des Schachtes. Ist die Restgrube vollgelaufen, kann wiederum Lösung entlang des Schachtes ausgetragen werden. Diese zweite Auspressphase kann – wenn überhaupt – erst sehr spät eintreten. Treibender Prozess während der zweiten Auspressphase ist die Konvergenz der Grubenbaue im ELB WSF und in der Restgrube.

Tritt gleichzeitig entlang einem weiteren, unabhängigen Pfad Lösung der Restgrube zu, dann läuft die Restgrube zunächst unabhängig vom Lösungszutritt entlang des Schachtes voll. Wie in Kapitel 5 dargelegt werden wird, dauert dies im Allgemeinen weniger lang als die Korrosion des Abdichtsystems zwischen dem ELB WSF und dem Zentralteil. Da nach dem Volllaufen der Restgrube die Potentialdifferenzen an den Abdichtungen ausgeglichen sind, ist die Wahrscheinlichkeit, dass in diesem Fall eine Abdichtung durchkorrodiert, relativ gering. Sobald der ELB WSF aufgrund des Lösungszutritts entlang des Schachtes vollgelaufen ist, beginnt die Auspressphase entlang des Schachtes mit der Konvergenz der Grubenbaue des ELB WSF als treibender Prozess. Die Prozesse in der Restgrube beeinflussen in diesem Fall das Auspressen entlang des Schachtes nicht. Falls der unabhängige Lösungszutritt in die Restgrube jedoch derart gering ist, dass das Abdichtsystem korrodiert, bevor die Restgrube vollgelaufen ist, dann wird die oben beschriebene Auspressphase zum Zeitpunkt unterbrochen, zu dem das Abdichtsystem ausfällt. Sobald auch die Restgrube vollgelaufen ist, setzt sie wieder ein, nun angetrieben durch die Konvergenz der Grubenbaue im ELB WSF und in der Restgrube. Dieses Wiedereinsetzen der Lösungsauspressung erfolgt relativ spät, und die Lösungsauspressung verteilt sich auf zwei Austrittspfade, den Schacht Bartensleben und die unabhängige Wegsamkeit zwischen Restgrube und Hutgestein.

Die entlang des Schachtes ausgepresste Lösung kann Radionuklide enthalten. Für die Analyse des „what-if“-Szenarios wird die Annahme getroffen, dass die Radionuklidkonzentration in der ausgepressten Lösung dem Quotienten aus dem Radionuklidinventar und der Lösungsmenge im ELB WSF zum Zeitpunkt des Volllaufens entspricht.

Volumenveränderungen durch Auf- und Umlöseprozesse der zutretenden Wässer an Steinsalz und an Kalilagern brauchen bei der Analyse der Lösungsbewegung nicht einbezogen zu werden.



Ihr Einfluss ist im Vergleich mit der Variabilität von Zutrittsrate und Konvergenzraten der Abbaue gering.

Die entlang des Schachtes in das Deckgebirge ausgepresste Lösung ist an NaCl gesättigt und kann zusätzlich durch Wechselwirkung mit Kalisalzen beeinflusst sein. Ihre Dichte ist damit deutlich höher als die Lösungsdichte im Deckgebirge. Es ist ein Aspekt der Analyse dieses „what-if“-Szenarios, abzuklären, ob die relativ schwere Grubenlösung entlang der Schachtröhre durch das Deckgebirge bis in das oberflächennahe Grundwasser hochgepresst werden kann, oder ob sie dichtebedingt aus der Schachtröhre in das umgebende Deckgebirge, insbesondere in den relativ gut durchlässigen Schilfsandstein an dessen Basis, abfließt. Von potentieller radiologischer Relevanz sind eventuelle Radionuklidfreisetzungen, die kanalisiert entlang der Schachtröhre erfolgen. Es kann davon ausgegangen werden, dass radionuklidhaltige Grubenlösung, welche aus der Schachtröhre in das umgebende Deckgebirge übertritt, nicht zu ungünstigeren radiologischen Auswirkungen führt als die Radionuklidfreisetzungen im Referenzszenario bei Einbezug der Parametervariationen. Eine spezielle Analyse des Ausbreitungspfads, der aus der Schachtröhre in das umgebende Deckgebirge führt, ist deshalb nicht erforderlich.

3.5.10 Instantan vollgelaufene übrige Grube

In einem „what-if“-Szenario werden die Auswirkungen untersucht, die ein extrem rasches, modelltechnisch ein instantanes Volllaufen der Restgrube zur Folge hätte. Dieses Szenario unterscheidet sich vom Referenzszenario lediglich dadurch, dass von einer vollgelaufenen Restgrube unmittelbar nach Verschluss des Endlagers ausgegangen wird. Dadurch wirken alle in Kapitel 3.3.1 erwähnten Prozesse vor dem Volllaufen der übrigen Grube¹⁴ nicht.

¹⁴ Beachte die Bemerkung zur Differenzierung zwischen Restgrube und übriger Grube im Zusammenhang mit dem Volllaufen in Kapitel 3.3.1



4 Modellparameter

Den Modellparametern werden für die Berechnungen zur Langzeitsicherheit jeweils sowohl Referenzwerte als auch Bandbreiten zugewiesen. Die Referenzwerte sind in einem realistischen Bereich verhalten konservativ gewählte Werte, welche für die verschiedenen Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems und speziell der Barrieren derart bestimmt sind, dass die resultierende Strahlenexposition wahrscheinlich überschätzt wird, jedoch ohne Extremfälle mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit abzudecken. Die Referenzwerte werden durch die Angabe von Bandbreiten für die Parameter so ergänzt, dass die Modellrechnungen auch Extremfälle berücksichtigen. Je nach Art der Parameter und der Art der Ungewissheit bezüglich ihrer Werte werden den Parametern innerhalb ihrer Bandbreiten unterschiedliche Verteilungsfunktionen¹⁵ zugeordnet.

Die nicht radionuklidspezifischen Parameter lassen sich in zwei Gruppen einteilen, nämlich in einen Satz aus allgemeinen Parametern, der bei der Radionuklidfreisetzung für jeden der Einlagerungsbereiche zum Tragen kommt (Kapitel 4.1), und in einen Satz von Parametern, der zwar gleichartig für jeden der Einlagerungsbereiche ist, aber dessen Werte für jeden Einlagerungsbereich anders sein können (Kapitel 4.2). Ebenso gibt es radionuklidspezifische Parameter, die allgemein, und solche, die spezifisch für jeden Einlagerungsbereich sind (Kapitel 4.3). Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird im Folgenden lediglich eine Auswahl von charakteristischen Parametern angegeben. Eine vollständige Auflistung der Modellparameter enthält Anhang C.

4.1 Allgemeine nicht radionuklidspezifische Parameter

Die allgemeinen, nicht radionuklidspezifischen Parameter umfassen die Parameter des Grubengebäudes außerhalb der Einlagerungsbereiche, die Parameter für den Radionuklidtransport durch das Hutgestein und Deckgebirge (ohne K_d -Werte), die Parameter für die Biosphäre und allgemeine physikalische/chemische Parameter. Eine Zusammenstellung einiger wichtiger allgemeiner Parameter enthält Tabelle 4-1.

Die Festlegung der Referenzwerte für das totale Volumen und die Volumenanteile der übrigen Grube vor dem Einsetzen von eventuellen Auf- oder Umlösungsprozessen (V_{GG} und ζ_i , vgl. Anhang D) geht von den wahrscheinlichsten Werten für die folgenden Volumina im übrigen Grubengebäude Bartensleben und in der Grube Marie aus: (i) Teilvolumina des unverfüllten Hohlraums, (ii) Teilvolumina des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Hohlraums und (iii) Teilvolumina des mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfüllten Hohlraums. Für die Festlegung der Minimalwerte wird nur das übrige Grubengebäude Bartensleben berücksichtigt. Dies entspricht dem Fall, dass die Gruben Marie und Bartensleben hydraulisch voneinander getrennt sind. In die Band-

¹⁵ Verteilungsfunktionen:
u Gleichverteilung („uniform“);
e Log-Gleichverteilung;
n (abgeschnittene) Normalverteilung;
l (abgeschnittene) Log-Normalverteilung;
t Dreiecks-Verteilung („triangular“);



breiten der Modellparameter gehen zusätzlich die Bandbreiten aus den Originaldaten des ERAMHIS [DBE 2003] ein.

Sofern die in Kapitel 3.1.1 genannte Rate des Lösungszutritts aus dem Hutgestein in die Grube von $180 \text{ m}^3/\text{a}$ zum Zeitpunkt des Endlagerverschlusses einsetzt und dann zeitlich konstant anhält, sofern weiter das Gesamthohlraumvolumen in der Restgrube dem Referenzwert entspricht, Lösungsaustausch zwischen den beiden Grubenteilen Bartensleben und Marie stattfindet und diese Grubenteile entsprechend dem Referenzwert der Konvergenzrate der übrigen Grube konvergieren, dann ist die Restgrube nach 7'500 Jahren vollgelaufen. Bei der höchsten in Kapitel 3.1.1 genannten Zutrittsrate von $600 \text{ m}^3/\text{a}$, einem Lösungszutritt in den Grubenteil Bartensleben, einer vollständigen hydraulischen Abkopplung des Grubenteils Marie vom Grubenteil Bartensleben und einer Konvergenz der Restgrube entsprechend der oberen Grenze der Bandbreite ist die Restgrube (Bartensleben) nach 1'500 Jahren vollgelaufen. Bei der niedrigsten in Kapitel 3.1.1 genannten Zutrittsrate von $55 \text{ m}^3/\text{a}$, keiner Trennung der beiden Grubenteile und einer Konvergenzrate entsprechend dem unteren Rand der Bandbreite dauert das Volllaufen rund 25'000 Jahre. Die Referenzwerte und Bandbreiten der genannten Größen sind ebenfalls in Tabelle 4-1 aufgeführt¹⁶.

Für das Grubengebäude sind neben den Parametern zur Beschreibung der Volumina, der Konvergenz und der Dauer des Volllaufens vor allem die Parameter zur Beschreibung der maßgebenden Druckverhältnisse von Bedeutung. Der hydrostatische und der lithostatische Druck sind teufenabhängige Parameter und miteinander korreliert. Die Modellrechnungen beruhen auf diesen Drücken und beziehen sich dabei auf ein Referenzniveau (Bezugsniveau). Die Berechnung dieser Drücke aus dem (variablen) Bezugsniveau und den Dichten ist in Anhang M dargelegt. Die vertikale Ausdehnung der Grube über mehrere Sohlen wird durch eine Variation des Bezugsniveaus berücksichtigt. Die Bandbreite erstreckt sich von der 4. bis zur 2. Sohle, als Referenzwert wurde ein mittlerer Wert gewählt, das Niveau der 3. Sohle.

Während des Volllaufens steigt der Fluiddruck in der übrigen Grube vor den Abdichtungen allmählich an – zunächst durch die Gasbildung in der Restgrube und die Kompression der eingeschlossenen Luft, dann durch den steigenden Lösungspegel, bis der volle hydrostatische Druck erreicht ist. Im Modell wird für diese Phase vereinfachend ein durchschnittlicher, konstanter Druck angenommen. Der Parameter κ_p gibt das Verhältnis aus diesem Druck zum hydrostatischen Druck auf dem Referenzniveau nach Ende des Volllaufens an und hat als Referenzwert den Wert 0,1.

Für den Transportpfad durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) werden in Anlehnung an die Ergebnisse der Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung (vgl. Kap. 3.3.10) und in Anlehnung an Struktur und Eigenschaften der Schichtenfolge DGL im Hutgestein die Parameter folgendermaßen angesetzt:

- Die Transportdistanz betrage 220 m. Dies ist weniger als der Vertikalabstand des Salzspiegels von der Geländeoberfläche und entspricht etwa der kürzesten Transportdistanz entlang der Schichtenfolge DGL, ausgehend vom Salzspiegel im Bereich von Zentralteil oder Nordfeld bis zur Obergrenze des Hutgesteins.

¹⁶ abgesehen von der Unterscheidung zwischen der Restgrube und der übrigen Grube, was hinsichtlich des Gesamthohlraumvolumens und der Konvergenzrate nicht von Bedeutung ist



- Der Transportquerschnitt betrage 150 m^2 und die fluidzugängliche (und gleichzeitig durchflossene) Porosität 30%. Diese Parameterwerte entsprechen jenen eines Transportpfads entlang der Schichtenfolge DGL mit folgenden Annahmen: (i) Die Schichtenfolge DGL ist in Streichrichtung zerblockt. Die horizontale Blockausdehnung beträgt 200 m. Der Transport ist auf einen Block beschränkt. (ii) Der Radionuklidtransport findet nur im Grauen Salztun statt; die im Grauen Salztun eingebetteten Bruchstücke des Deckanhydrit und des Leinekarbonat sind für Radionuklide unzugänglich (konservative Vereinfachung). Die transportwirksame Mächtigkeit entspricht somit der Mächtigkeit des Grauen Salztun und beträgt 2,5 m. Die transportwirksame Porosität ist gleich der fluidzugänglichen Porosität des Grauen Salztun. (iii) Aufgrund von makroskopischen Kanalisierungseffekten werden nur 30% des gesamten möglichen Querschnitts von $200 \text{ m} \cdot 2,5 \text{ m}$ durchströmt („Channeling“).
- Die Rückhaltung des Radionuklidtransports durch Sorption entlang des modellhaften Transportpfads erfolge quantitativ gleich wie am Grauen Salztun. Die K_d -Werte der wichtigsten Elemente (Am, $^{14}\text{CO}_3^{2-}$, Cs, Pu, Ra und U) werden Sorptionsexperimenten an Proben des Grauen Salztun entnommen. Jene der übrigen Elemente werden durch Übertragung der Messwerte für die Unterkreide im Deckgebirge des Endlagers Konrad abgeleitet, wobei der geringere Tonanteil im Grauen Salztun durch einen Reduktionsfaktor von 0,7 berücksichtigt wird.

Für die Charakterisierung der Schichtenfolge DGL, welche zur Definition der Eigenschaften des modellhaften Transportpfads durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) herangezogen wird, wurden in-situ-Messungen in Bohrungen durchgeführt und die Bohrkernproben petrophysikalisch untersucht [BfS 2001]. Die Sorptionseigenschaften der Schichtenfolge DGL wurden zunächst für alle Radioelemente aus den Sorptionsdaten abgeleitet, die im Sicherheitsnachweis für das Endlager Konrad für die dort wirksame geologische Barriere der Unterkreideschichten angesetzt wurden. Zur Überprüfung des Vorgehens und zur Verbesserung der Datenlage wurden für die potentiell sicherheitsrelevanten Radionuklide Sorptionsexperimente am Grauen Salztun der Schichtenfolge DGL durchgeführt [INE&IRC 2004]. Die gemessenen und die aus den Daten für die Unterkreide Konrad abgeleiteten K_d -Werte stimmen etwa innerhalb einer Größenordnung überein.

Während des Transports durch das Hutgestein und das Deckgebirge erfährt die aus dem Grubengebäude ausgepresste Lösung eine Verdünnung durch diffusive und dispersive Mischvorgänge mit unkontaminiertem Grundwasser. Die kumulierte Auswirkung lässt sich durch das Verhältnis des oberflächennahen Grundwasserumsatzes im Gebiet, in das die Radionuklide freigesetzt werden, zur Rate der Lösungsauspressung aus der Doppel-Schachtanlage quantifizieren. Für die Modellrechnungen wird angenommen, dass die mit der Grubenlösung transportierten Radionuklide in ein Gebiet im Allertal freigesetzt werden, das südwestlich der Aller liegt und entlang des Allertals eine Ausdehnung von 200 m aufweist. Im räumlichen Mittel entlang des Allertals beträgt der oberflächennahe Grundwasserfluss durch ein solches Gebiet nach Auswertung eines repräsentativen Rechenfalls zur Grundwasserbewegung aus [Colenco 2001b] rund $15'000 \text{ m}^3/\text{a}$ (vgl. Anhang T).



Tabelle 4-1 Referenzwerte, Bandbreiten und Verteilungsfunktionen einer Auswahl von allgemeinen nicht radionuklidspezifischen Modellparametern

Parameter	Einheit	Referenzwert	Bandbreite (Minimal- und Maximalwerte)	Verteilungsfunktion
Q_{GW} Oberflächennaher Grundwasserfluss	m ³ /a	$1,5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5$	log-normal (l)
\min_{verd} Mindestverdünnung in der Biosphäre	–	500	–	–
A_2 Effektiver Transportquerschnitt im Deckgebirge	m ²	150	50 – 250	gleich (u)
L_2 Transportdistanz im Deckgebirge	m	220	–	–
ε_2 Fließporosität der Transportstrecke im Deckgebirge	–	0,3	0,2 – 0,3	triangular (t)
V_{GG} Volumen des übrigen Grubengebäudes	m ³	$7,08 \cdot 10^6$	$4,40 \cdot 10^6 - 7,26 \cdot 10^6$	triangular (t)
ζ_{GGt} Totaler Verfüllgrad des übrigen Grubengebäudes	–	0,800	0,793 – 0,808	normal (n)
ζ_{GGk} Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz im übrigen Grubengebäude	–	0,337	0,101 – 0,351	normal (n)
$\varepsilon_{GG,v1,0}$ ($\varepsilon_{GG,0,1}$) ¹⁷ Anfangs-Porosität des kompaktierbaren Versatzes	–	0,4	–	–
$\varepsilon_{GG,v2,0}$ ($\varepsilon_{GG,0,2}$) Wirksame Porosität des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes ¹⁸	–	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4} - 2,5 \cdot 10^{-4}$	triangular (t)
c_{GG} Konvergenzrate in der übrigen Grube	a ⁻¹	$4 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$	log-gleich (e)
t_{voll} Zeitpunkt der vollständigen Füllung der Restgrube mit Lösung	a	7 500	1 500 – 25 000	log-normal (l)

¹⁷ Die Datenbank [ZERNA 2009] verwendet eine frühere Bezeichnung für diesen Parameter. Im vorliegenden Bericht wird diese frühere Bezeichnung, wo sinnvoll, in Klammern zusätzlich aufgeführt.

¹⁸ Der weitaus größte Teil der Porosität des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes und der Porenlösung nimmt an den Prozessen, welche zur Freisetzung von Radionukliden führen, nicht teil (vgl. Kapitel 4.2).

Die obere Bandbreite des verdünnungswirksamen oberflächennahen Grundwasserflusses wird unabhängig von Modellrechnungen und ausgehend von der Grundwasserneubildung geschätzt [Colenco 2002a]. Bei der mittleren Niederschlagsmenge im Projektgebiet von rund 600 mm/a, einem Anteil des Grundwasserabflusses einschließlich Zwischenabfluss von typischerweise etwa $\frac{1}{3}$ und einem maßgebenden Einzugsgebiet von 200 m (Ausdehnung entlang des Allertals) mal 2,5 km (Ausdehnung quer zum Allertal, einschließlich die Flanken der Lappwaldscholle oder der Weferlinger Triasplatte) ergibt sich ein verdünnungswirksamer oberflächennaher Wasserfluss von 100 000 m³/a.

Die untere Bandbreite des verdünnenden Grundwasserflusses wird unabhängig von den heutigen hydrologischen Verhältnissen im Modellgebiet entsprechend dem Wasserbedarf von kleinen, sich selbst versorgenden Dorfgemeinschaften unter eher ungünstigen klimatischen Verhältnissen [GRS 2003b] angesetzt. Dabei werden extreme klimatische Verhältnisse, welche mit den in der AVV zu § 47 StrlSchV unterstellten Berechnungs- und Verzehrgeohnheiten unvereinbar wären, außer Acht gelassen. Dies ergibt eine untere Bandbreite des verdünnenden Grundwasserflusses von 10 000 m³/a.

4.2 Nicht radionuklidspezifische Parameter der Einlagerungsbereiche

Der Parametersatz eines Einlagerungsbereichs umfasst die geometrischen, hydraulischen und sorptionsrelevanten Parameter der Abdichtungssysteme, der Einlagerungsgrubenbaue und der restlichen Grubenbaue im Einlagerungsbereich, die Art der Verfüllung und die relative Abfallstapelhöhe, die Kenngrößen der Konvergenz, den anfänglichen Füllgrad mit Flüssigkeit im jeweiligen Versatz, die Kenngrößen der Gasbildung sowie das Gesamthohlraumvolumen und die Konvergenzrate des maßgebenden Mischungsbereichs (siehe Tabellen 4–2 bis 4–4).

Die Definition der Einlagerungsbereiche und ihrer Abdichtungssysteme sowie die geometrischen Daten der letzteren sind in den Kapiteln 3.3.3, 3.4 und im Anhang D beschrieben. Da das zu Grunde gelegte Verfüll- und Verschleißkonzept einen besonderen technischen Aufwand für die Erstellung der Abdichtungen vorsieht, kann Firstbündigkeit unterstellt und ein Referenzwert für die querschnittsgemittelte Permeabilität der Abdichtungssysteme von 10^{-18} m² angenommen werden. Dieser Wert ist höher als die Permeabilität des Salzgesteins, mit Ausnahme von eventuellen lokal begrenzten, ausbruchnahen Zonen (Auflockerungszone). Nach einem eventuellen Lösungszutritt in die Grube wird die Bewegung der Salzlösung deshalb in aller Regel im Versatz (und eventuell in ausbruchnahen Auflockerungszonen) und nicht im Salzgestein stattfinden.

Folgende sechs Größen legen die Anfangsvolumina der unverfüllten und verfüllten Hohlräume eines Einlagerungsbereichs fest (vgl. auch Anhang D):

- V_{EH} Gesamtvolumen der Einlagerungsgrubenbaue im Einlagerungsbereich; [m³]
 V_{REB} Gesamtvolumen der restlichen Grubenbaue im Einlagerungsbereich; [m³]
 ζ_{EHT} totaler Verfüllgrad (kompaktierbarer und nicht kompaktierbarer Versatz) der Einlagerungsgrubenbaue; [-]



- ζ_{REBt} totaler Verfüllgrad (kompaktierbarer und nicht kompaktierbarer Versatz) des restlichen Einlagerungsbereichs; [-]
- ζ_{EHk} Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz in den Einlagerungsgrubenbauen; [-]
- ζ_{REBk} Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz des restlichen Einlagerungsbereichs; [-]

Diese Wahl der Kenngrößen erlaubt es, bei probabilistischen Parametervariationen ohne zusätzliche Randbedingungen realistische Kombinationen zu erhalten und dabei zum Beispiel die Auswirkung zu untersuchen, dass ein Teil der Grubenbaue des Ostfeldes nicht am Prozess der Radionuklidfreisetzung teilnimmt. Die mittleren Porositäten von kompaktierbarem Versatz (Salzgrus, BFA und Abfälle) und von nicht oder gering kompaktierbarem Versatz (Salzbeton) werden durch zwei unabhängige Parameter angegeben. Für den Salzbeton beträgt sie 20 %. Im Modell wird das Porenwasser des Salzbetons in den Einlagerungsbereichen nicht als frei bewegliche Lösung angesehen, das daher an den Prozessen (Lösung des Radionuklidinventars, Auspressung aus den Einlagerungsbereichen) nicht teilnimmt. Es wird angenommen, dass lediglich 1 ‰ des Porenwassers zur Radionuklidmobilisierung und –auspressung beiträgt. Dieser Anteil nimmt den als „wirksame Porosität des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes“ bezeichneten Teil der Gesamtporosität ein. Für den kompaktierbaren Versatz ist er für die einzelnen Einlagerungsbereiche unterschiedlich und ergibt sich aus den unterschiedlichen Anteilen der Abfälle und des Salzgruses. Für letzteren wird generell eine Porosität von 40% angenommen. Für die mit dem Eintrag von flüssigen Abfällen verfestigte BFA wird eine Porosität von 37 % angesetzt.

Die Modellierung der Konvergenz von unverfüllten und mit verschiedenen Versatzmaterialien verfüllten Hohlräumen erfolgt gemäß den in Anhang F aufgeführten Gleichungen (PSE-Ansatz). Die Konvergenz des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens wird unter der Annahme modelliert, dass sie gleich wie jene von Salzgrus erfolgt. Für den charakteristischen Exponenten m für das sekundäre Kriechen wird der Wert $m = 5,0$ verwendet. Aufgrund der geringen Kompaktionsfähigkeit des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes wird die Änderung seines Porenvolumens vereinfacht über einen Exponentialansatz berechnet, wobei die Konvergenzrate, bezogen auf die wirksame Porosität, gegenüber jener eines unverfüllten Hohlraums um einen Faktor γ reduziert und die zusätzliche Stützwirkung durch das Fluid im Inneren des Grubenbaues vernachlässigt wird (Anhang A, Gleichung A-2). Der Reduktionsfaktor γ für die Konvergenz des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im Einlagerungsbereich gegenüber der Konvergenzrate der unverfüllten Hohlräume besitzt theoretisch den Referenzwert "unendlich", da im betrachteten Zeitraum für den Salzbeton keine Konvergenz unterstellt wird.

In den Einlagerungsgrubenbauen gibt es bereits heute eine Restfeuchtemenge, welche das am Anfang bereits vorhandene Gesamtvolumen an Flüssigkeit im Einlagerungsbereich beschreibt. Dieses Flüssigkeitsvolumen wird aus den bekannten, bei der Abfalleinlagerung eingebrachten Flüssigkeitsmengen und der Restfeuchte im Salzgrus (0,1 bis 0,5 Gew.-% mit 0,3 Gew.-% im Mittel) sowie einem geringen Anteil (1 ‰) der Porenlösung im Salzbeton bestimmt.



Tabelle 4-2 Referenzwerte, Bandbreiten und Verteilungsfunktionen einer Auswahl der nicht radionuklidspezifischen Parameter der Abdichtsysteme

Parameter	Einheit	Referenzwert	Bandbreite (Minimal- und Maximalwerte)	Verteilungsfunktion
L₁ Länge des Abdichtsystems – West-Südfeld – Ostfeld – Nordfeld ¹⁹ – Zentralteil	m	26 110 1 1	21 – 39 88 – 165 – –	normal (n)
A₁ Querschnitt des Abdichtsystems – West-Südfeld – Ostfeld – Nordfeld – Zentralteil	m ²	113,8 43,5 20 20	12 – 232,5 21 – 43,5 – –	normal (n)
ε₁ Fließporosität des Abdichtsystems – West-Südfeld – Ostfeld – Nordfeld – Zentralteil	–	0,02 0,02 0,02 0,02	0,001 – 0,2 0,001 – 0,2 0,001 – 0,2 0,001 – 0,2	log-normal (I)
K₁ Permeabilität des unkorrodierten Abdichtsystems ²⁰ – West-Südfeld – Ostfeld – Nordfeld – Zentralteil	m ²	1·10 ⁻¹⁸ 1·10 ⁻¹⁸ 1·10 ⁻¹⁴ 1·10 ⁻¹⁴	1·10 ⁻¹⁹ – 1·10 ⁻¹⁶ 1·10 ⁻¹⁹ – 1·10 ⁻¹⁵ – –	log-normal (I)
K₃/K₁ Erhöhung der Permeabilität des Abdichtsystems bei vollständiger Korrosion – West-Südfeld – Ostfeld – Nordfeld – Zentralteil	–	1·10 ⁴ 1·10 ⁴ 1 1	1·10 ⁰ – 1·10 ⁴ 1·10 ⁰ – 1·10 ⁴ – –	log-normal (I)

¹⁹ Für das Nordfeld und den Zentralteil können keine wirksamen Abdichtungen ausgewiesen werden; daher ist hier $L_1 = 1$ m und $K_1 = 10^{-14}$ m².

²⁰ Der obere Wert der Bandbreite für K_1 ist sehr hoch gewählt; er liegt um 1 – 2 Größenordnungen höher, als aufgrund der Materialeigenschaften des Salzbetons zu erwarten wäre. Bei den probabilistischen Rechnungen zeichnen sich die Realisierungen mit hohem K_1 durch frühzeitige Korrosion (und damit Ausfall) des Abdichtsystems aus.

Tabelle 4-3 Referenzwerte, Bandbreiten und Verteilungsfunktionen einer Auswahl der nicht radionuklid-spezifischen Parameter der Einlagerungsgrubenbaue und restlichen Einlagerungsbereiche

Parameter	Einheit	Referenzwert	Bandbreite (Minimal- und Maximalwerte)	Verteilungsfunktion
V_{EH} Gesamtvolumen der Einlagerungsgrubenbaue – West-Südfeld – Ostfeld – Nordfeld – Zentralteil	m ³	1,89·10 ⁵ 5,34·10 ⁴ 2,14·10 ³ 6,62·10 ⁴	1,67·10 ⁵ – 2,18·10 ⁵ 4,94·10 ⁴ – 5,80·10 ⁴ 2,13·10 ³ – 2,14·10 ³ 5,48·10 ⁴ – 8,13·10 ⁴	normal (n) triangular (t) triangular (t) triangular (t)
V_{REB} Gesamtvolumen des restlichen Einlagerungsbereichs – West-Südfeld – Ostfeld ²¹ – Nordfeld – Zentralteil	m ³	1,14·10 ⁶ 1,79·10 ⁵ 0 0	3,05·10 ⁵ – 1,21·10 ⁶ 0 – 2,65·10 ⁵ – –	triangular (t)
ζ_{EHt} Totaler Verfüllgrad in den Einlagerungsgrubenbauen – West-Südfeld – Ostfeld – Nordfeld – Zentralteil	–	0,902 1 0,799 0,950	0,878 – 0,923 – 0,798 – 0,800 0,929 – 0,965	normal (n)
ζ_{REBt} Totaler Verfüllgrad des restlichen Einlagerungsbereichs – West-Südfeld – Ostfeld – Nordfeld – Zentralteil	–	0,715 0,815 – –	0,695 – 0,734 0,732 – 0,815 – –	normal (n)

²¹ Der Minimalwert für den restlichen Einlagerungsbereich des Ostfelds entspricht dem möglichen Zustand, dass der Einlagerungsgrubenbau hydraulisch von den übrigen Grubenbauen des Einlagerungsbereichs getrennt ist, z.B. weil sich die Verbindungsstrecken durch Konvergenz geschlossen haben. Dieser Zustand ist in Hinblick auf die Radionuklidmobilisierung und -auspressung als Möglichkeit einzubeziehen. Falls jedoch während der Auspressphase hohe Fluidrücke im Einlagerungsbereich auftreten, ist zu erwarten, dass es zunächst zu einer Druckentlastung innerhalb des Einlagerungsbereichs kommt, bevor das Ostfeld nach außen „fract“. Eine Frac-Bildung des Ostfelds, bei der das Volumen des Einlagerungsbereichs kleiner ist als $2,22 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ (Minimum der Bandbreite der zunächst miteinander verbundenen Hohlräume), wird daher als unphysikalisch betrachtet und aus den probabilistischen Resultaten eliminiert.

Tabelle 4-3 Referenzwerte, Bandbreiten und Verteilungsfunktionen einer Auswahl der nicht radionuklid-spezifischen Parameter der Einlagerungsgrubenbaue und restlichen Einlagerungsbereiche (Fortsetzung)

Parameter	Einheit	Referenzwert	Bandbreite (Minimal- und Maximalwerte)	Verteilungsfunktion
ζ_{EHK} Anteil kompaktierbarer Versatz in den Einlagerungsgrubenbauen – West-Südfeld – Ostfeld – Nordfeld – Zentralteil	–	0,949 0,372 0,997 0,517	0,939 – 0,959 0,332 – 0,417 – 0,419 – 0,610	normal (n)
ζ_{REBK} Anteil kompaktierbarer Versatz im restlichen Einlagerungsbereich – West-Südfeld – Ostfeld – Nordfeld – Zentralteil	–	0,420 0,246 – –	0,390 – 0,449 0,176 – 0,246 – –	normal (n)
$\varepsilon_{\text{EB},v1,0}$ ($\varepsilon_{\text{EB},0,1}$) Porosität des kompaktierbaren Versatzes – West-Südfeld – Ostfeld – Nordfeld – Zentralteil	–	0,410 0,413 0,651 0,402	– – – –	–
φ_{A} Relativer Anfangsflüssigkeitsgehalt des kompaktierbaren Versatzes, bezogen auf das Porenvolumen – West-Südfeld – Ostfeld – Nordfeld – Zentralteil	–	0,0291 0,0183 0,0948 0,0107	0 – 0,0586 0 – 0,0423 0 – 0,0950 0 – 0,0176	normal (n)
c_{L} Konvergenzrate für unversetzte Hohlräume – West-Südfeld – Ostfeld – Nordfeld – Zentralteil	a^{-1}	$4 \cdot 10^{-5}$ $1,01 \cdot 10^{-5}$ $4 \cdot 10^{-5}$ $8 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$ $3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5}$ $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$ $3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5}$	log-gleich (e)

Tabelle 4-3 Referenzwerte, Bandbreiten und Verteilungsfunktionen einer Auswahl der nicht radionuklidspezifischen Parameter der Einlagerungsgrubenbaue und restlichen Einlagerungsbereiche (Fortsetzung)

Parameter	Einheit	Referenzwert	Bandbreite (Minimal- und Maximalwerte)	Verteilungsfunktion
$Q_{g,1e2,tot}$ Gasbildungsrate bei 100 a – West-Südfeld – Ostfeld – Nordfeld – Zentralteil	$m^3_{STP} \cdot a^{-1}$	$7,36 \cdot 10^3$ $2,50 \cdot 10^3$ $3,63 \cdot 10^2$ $1,01 \cdot 10^1$	$5,09 \cdot 10^2 - 1,70 \cdot 10^4$ $1,19 \cdot 10^2 - 6,49 \cdot 10^3$ $2,31 \cdot 10^1 - 7,21 \cdot 10^2$ $1,49 \cdot 10^0 - 2,79 \cdot 10^2$	log-normal (I)
$Q_{g,1e4,tot}$ Gasbildungsrate bei 10'000 a – West-Südfeld – Ostfeld – Nordfeld – Zentralteil	$m^3_{STP} \cdot a^{-1}$	$1,09 \cdot 10^2$ $2,04 \cdot 10^1$ $2,75 \cdot 10^0$ $6,73 \cdot 10^{-2}$	$3,63 \cdot 10^0 - 3,57 \cdot 10^2$ $8,18 \cdot 10^{-1} - 7,03 \cdot 10^1$ $1,26 \cdot 10^{-1} - 1,01 \cdot 10^1$ $6,93 \cdot 10^{-4} - 1,19 \cdot 10^0$	log-normal (I)
$V_{g,STP,tot}$ Gesamte gebildete Gasmenge – West-Südfeld – Ostfeld – Nordfeld – Zentralteil	m^3_{STP}	$1,37 \cdot 10^7$ $2,96 \cdot 10^6$ $3,00 \cdot 10^5$ $6,10 \cdot 10^4$	$5,24 \cdot 10^6 - 2,28 \cdot 10^7$ $1,67 \cdot 10^6 - 4,72 \cdot 10^6$ $2,33 \cdot 10^5 - 1,07 \cdot 10^6$ $4,35 \cdot 10^4 - 8,26 \cdot 10^4$	log-normal (I)
η Anteil des an der Gasbildung beteiligten Inventars – West-Südfeld – Ostfeld – Nordfeld – Zentralteil	–	0,8 0,8 0,8 0,8	0,1 – 1 0,1 – 1 0,1 – 1 0,1 – 1	log-normal (I)

Tabelle 4-4 Referenzwerte, Bandbreiten und Verteilungsfunktionen einer Auswahl der nicht radionuklidspezifischen Parameter der Mischungsbereiche

Parameter	Einheit	Referenzwert	Bandbreite (Minimal- und Maximalwerte)	Verteilungsfunktion
V_{VG} Volumen des Mischungsbereiches – Nordfeld – andere Einlagerungsbereiche	m ³	1,00·10 ⁵ 3,95·10 ⁵	7,66·10 ⁴ – 1,40·10 ⁵ 1,53·10 ⁵ – 4,85·10 ⁵	triangular (t)
ζ_{VGt} Totaler Verfüllgrad des Mischungsbereiches – Nordfeld – andere Einlagerungsbereiche	–	0,727 0,934	0,727 – 0,856 0,923 – 0,987	normal (n)
ζ_{VGk} Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz im Mischungsbereich – Nordfeld – andere Einlagerungsbereiche	–	0,000 0,019	0,000 – 0,080 0,019 – 0,105	normal (n)
ε_{VG,0,1} Porosität des kompaktierbaren Versatzes – Nordfeld – andere Einlagerungsbereiche	–	0,40 0,40	– –	–
C_{VG} Konvergenzrate für unversetzte Hohlräume im Mischungsbereich – Nordfeld – andere Einlagerungsbereiche	a ⁻¹	2·10 ⁻⁵ 8·10 ⁻⁶	6·10 ⁻⁶ – 6·10 ⁻⁵ 3·10 ⁻⁶ – 3·10 ⁻⁵	log-gleich (e)

Die für die Sorption in den Einlagerungsgrubenbauen maßgebenden Mengen an BFA und Zementstein wurden aufgrund der tatsächlich eingebrachten Abfall- und Versatzmengen festgelegt. Die Bandbreiten werden in weiten Grenzen variiert. Die Sorption wird in den Modellrechnungen jedoch nicht berücksichtigt.

Die Gasbildung in den Einlagerungsbereichen ergibt sich aus der anaeroben Korrosion des Inventars an Stahl, Eisen und anderen Metallen sowie dem mikrobiellen Abbau der organischen Abfallbestandteile. Die Gasbildungsraten und –volumina wurden mit dem Programm GASGEN [Colenco 2002c] berechnet (siehe auch Anhang G). Die Gasbildungsrate nimmt mit der Zeit ab. Der zeitliche Verlauf wird, wie in Anhang G beschrieben, im Modell durch vier Parameter nachgebildet. Diese sind

- die Gasbildungsraten zu einer repräsentativ frühen Zeit²², inkl. Bandbreiten,
- die Gasbildungsraten zu einer repräsentativ späten Zeit, inkl. Bandbreiten,
- die Gesamtgasmenge nach Abschluss der Gasbildung, inkl. Bandbreiten, und
- der Anteil des gasbildenden Inventars, das an den Gasbildungsprozessen teilnimmt, inkl. Bandbreiten.

Aufgrund der mit Abfällen und Versatz eingebrachten Flüssigkeitsmenge setzt die Gasbildung auch ohne Lösungszutritt in Grube und Einlagerungsbereiche sofort ein. Da die Anfangsflüssigkeit in den abgedichteten Einlagerungsbereichen aber nicht ausreicht, um sämtliche gasbildenden Stoffe im Abfallinventar vollständig umzusetzen, kommt die Gasbildung zum Erliegen, wenn sich ein Bruchteil der Gesamtgasmenge gebildet hat, beschrieben durch den Parameter η_{Lim} . Dieser beträgt für den ELB WSF 0,2 und für den ELB OF 0,25. Für die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche Nordfeld und Zentralteil wird η_{Lim} auf einen sehr kleinen Wert gesetzt (0,001), so dass hier die Gasbildung im Modell erst nach dem Volllaufen einsetzt und in vollem Umfang zum Auspressen der radionuklidhaltigen Lösung zur Verfügung steht. In den abgedichteten Einlagerungsbereichen setzt die Gasbildung wieder ein, wenn $\theta_{\text{Rest}} = 100\%$ der anfänglich vorhandenen Flüssigkeitsmenge durch das Abdichtsystem zugetreten sind. Die Unterbrechung der Gasbildung bewirkt in der Regel höhere Radionuklidfreisetzungen, weil der Einlagerungsbereich wegen des kleineren Innendrucks schneller mit Flüssigkeit gefüllt wird (insbesondere, weil die Abdichtungen früher korrodieren) und weil die höhere Gasbildungsrate während der Auspressphase die Radionuklidfreisetzung beschleunigt.

Die Parameter des Mischungsbereichs der Einlagerungsbereiche ELB WSF, ELB OF und ELB ZT, Hohlraum- und Porenvolumen, Konvergenzrate und sorbierende Masse (Zementstein) charakterisieren, unter eher konservativer Wahl der Werte, die Verhältnisse entlang des Freisetzungspfades durch die oberen Grubenbaue eines potentiellen Austrittsorts im Zentralteil. Der Referenzwert für das Volumen des Mischungsbereichs wird durch den potentiellen Austrittspfad über die Grubenbaue des Zentralteils, die sich unmittelbar östlich des Kalilagers C und oberhalb der Referenzteufe von -332 mNN befinden, bestimmt. Für den Minimalwert werden nur die Grubenbaue der Abbaureihe 2n gewählt, welche oberhalb der Referenzteufe von -332 mNN liegen. Für die Obergrenze werden alle Abbaue des Zentralteils östlich des Kalilagers C gewählt.

Für den möglichen Austrittspfad des Radionuklidstroms aus dem Nordfeld existieren mehrere Varianten (mit weiteren möglichen Unterscheidungen der genauen Pfade). Die sogenannte Variante "Direktfreisetzung im Nordfeld" (Pfad über die Steinsalzabbau des Nordfeldes nach oben bis zu den zutrittsgefährdeten Abbauen des Nordfelds auf der 1. und 2. Sohle) deckt eine Freisetzung über den Zentralteil oder das Grubenfeld Marie konservativ ab. Eine Freisetzung über die Bohrungen 17YER21 RB008 oder 17YER21 RB009 zum Hauptanhydrit A3 westlich des Nordfeldes und von dort über mehrere A3-Schollen bis zum Salzspiegel kann nach den Aussagen des Szenarienberichts der BGR [BGR 1999] ausgeschlossen werden.

²² Bei Umsetzung des gesamten Inventars an gasbildenden Stoffen



4.3 Radionuklid- und elementspezifische Daten

Neben den bisher beschriebenen Parametern gibt es radionuklid- und elementspezifische Daten (siehe auch Anhang C), die in vielen Fällen auch spezifisch für einen Einlagerungsbereich sind. Die wichtigsten radionuklidspezifischen Parameter sind die Radionuklidinventare in den Einlagerungsbereichen. Diese sind in Anhang C, Tabelle C-15 zusammengestellt. Ferner zu erwähnen sind hier die Löslichkeitsgrenzen, welche u.a. von Löslichkeitsbeeinflussenden Stoffbeimengungen (Komplexbildner) in den Abfällen abhängen, die Konzentrationen von stabilen Isotopen, welche bei der Löslichkeit berücksichtigt werden (siehe unten) sowie die Sorptionsparameter an Braunkohlefilterasche und an Zementstein, welche ebenfalls von Stoffbeimengungen beeinflusst sein können. Die radionuklid- bzw. elementspezifischen Daten umfassen außerdem allgemeine Parameter, nämlich die Sorptionsparameter im Deckgebirge, die Sorptionsparameter im oberflächennahen Aquifer und die Umrechnungsfaktoren, mit denen die Strahlenexposition aus der Radionuklidkonzentration im Grundwasser in Anlehnung an die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV berechnet wird. Die letztgenannten Umrechnungsfaktoren wurden [Pröhl & Gering 2002] entnommen.

In Anbetracht des schlecht vorhersagbaren chemischen Milieus wird konservativ für alle Einlagerungsbereiche und alle Radionuklide keine Löslichkeitsbegrenzung angenommen. Eine Ausnahme bildet dabei der Kohlenstoff (vgl. Anhang H). Die gelöste Menge von ^{14}C in der chemischen Form $^{14}\text{CO}_2$ wird dabei durch das konkurrierende stabile Isotop ^{12}C beeinflusst, das im Endlager in großer Menge vorliegt.

Während die Menge des Isotops ^{14}C gering ist und zu Konzentrationen deutlich unterhalb der Löslichkeitsgrenze führt, ist die gemeinsame Menge von ^{12}C und ^{14}C so hoch, dass die Löslichkeit begrenzt sein kann. Eine Berücksichtigung des ^{12}C aus den durch mikrobielle Denitrifikation schnell und leicht zu Carbonat abbaubaren organischen Verbindungen und dem in dem Einlagerungsbereich zur Verfügung stehenden Volumen erlaubt, hierfür eine theoretische ^{12}C -Konzentration von

- 28,4 mMol/l für das West-Südfeld,
- 39,5 mMol/l für das Ostfeld,
- 250 mMol/l für das Nordfeld und
- 1,26 mMol/l für den Zentralteil

vorauszusetzen und diese bei der Berechnung der Löslichkeit von ^{14}C zu berücksichtigen (vgl. Anhang J).

Als wichtige Einflussgröße auf die Sorption sind u.a. die Gegenwart von Komplexbildnern im Porenwasser, der pH-Wert und auch der Einfluss hoher Salzkonzentrationen in den Lösungen zu berücksichtigen. Zur Bestimmung der elementspezifischen Sorptionsdaten kann auf Sorptionsexperimente zurückgegriffen werden, oder die Sorptionsparameter können aufgrund von Analogieschlüssen festgelegt werden. Wegen des nicht eindeutig beschreibbaren chemischen Milieus im Grubengebäude und in den Einlagerungsbereichen ist es nicht möglich, einen belastbaren Satz



von K_d -Werten aufzustellen. Daher wird auf die Berücksichtigung der Sorption in der Grube verzichtet.

Wie bei den geometrischen Parametern wurden auch für die Sorptionsparameter des Radionuklidtransports durch Hutgestein und Deckgebirge die Verhältnisse in der Schichtenfolge „Deckanhydrit – Grauer Salztön – Leinekarbonat“ zu Grunde gelegt. Die Sorptionsdaten innerhalb der DGL wurden für die dosisdominierenden Radionuklide durch Sorptionsversuche am Grauen Salztön des Standorts Morsleben bestimmt und für die anderen Radionuklide in Anlehnung an das Deckgebirge des Endlagers Konrad ermittelt. Die gemessenen und die in Anlehnung an Konrad abgeleiteten K_d -Werte stimmen etwa innerhalb einer Größenordnung überein. Für die Oberkreide²³ wurden Sorptionsdaten in Anlehnung an die Oberkreide des Standorts Gorleben verwendet [Colenco 1998].

Die nicht enger eingrenzenden Einflüsse von Mineralisation, pH-Wert und weiteren Faktoren wurden durch eine verhalten konservative Wahl der Parameter einbezogen. Zudem werden bei den probabilistischen Berechnungen die Sorptionsparameter mittels Skalierungsfaktoren um mehr als eine Größenordnung variiert, wobei ein einheitlicher Faktor für alle Radionuklide zur Anwendung gelangt. Dadurch wird berücksichtigt, dass sich verschiedene Einflussgrößen (z.B. der Tonanteil in der DGL) gleichermaßen auf alle Radionuklide auswirken. Ebenso werden die vorgegebene Konzentration von stabilen Isotopen eines Elements (hier für ^{12}C) und der Wert der Löslichkeitsgrenze mit je einem Skalierungsfaktor um etwa eine Größenordnung variiert. Die übrigen radionuklid- und elementspezifischen Parameter werden nicht variiert.

4.4 Parameter zu den weiteren Szenarien

In diesem Kapitel werden die spezifischen Modellparameter zu den in Kapitel 3.5 dargelegten weiteren Szenarien dargestellt, soweit sie nicht durch die Parameter des Referenzszenarios und deren Bandbreiten abgedeckt werden.

4.4.1 Parameter des Hauptanhydrit als Wegsamkeit zum Ostfeld

Wie in Kapitel 3.5.1 erläutert wurde, ist eine ausgedehnte und durchgehende Vernetzung von Wegsamkeiten im Hauptanhydrit zwischen dem Ostfeld und dem Zentralteil zwar wenig wahrscheinlich, kann aber nicht mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden. Als weiteres Szenario wird deshalb die Existenz einer solchen Wegsamkeit postuliert.

Im Anhang C.1.5 werden die zu unterstellenden hydraulischen Eigenschaften und die Eigenschaften für den Transport von Radionukliden im Hauptanhydrit dargelegt und begründet. Die Grundlagen dazu und weitergehende Angaben sind in [BGR 2000c] enthalten. Die Übertragung hydraulischer

²³ Die Sorption im oberflächennahen Grundwasser wird im Modell nur für die Berechnung des Aufbaus kurzlebiger Tochternuklide innerhalb von Zerfallsreihen verwendet. Hier wäre die Annahme eines K_d -Werts von Null nicht konservativ. Dies rechtfertigt die Verwendung der bestmöglichen Schätzwerte durch Übertragung der Messungen für den Standort Gorleben.



scher Daten (Gesamthohlraumvolumen, Durchlässigkeit) von Wegsamkeiten, die im wesentlichen in Längsrichtung der Mulde ausgebildet sind, auf einen postulierten Fließweg quer zur Muldenachse in der – gegenüber der Ostflanke – einfacheren Struktur der Westflanke der Ostmulde ist konservativ. Bei der Zuweisung von Parametern für das Alternativszenario werden deshalb nicht zusätzlich konservative Annahmen kumuliert.

Das konzeptuelle Modell für ausgedehnte hydraulische Wegsamkeiten im Hauptanhydrit beruht auf folgenden Definitionen [BGR 2000c]:

Kluftschar: Mit dem Begriff Kluftschar (Schar von Klüften) sind die in einem wenige Zentimeter mächtigen und einige Quadratmeter ausgedehnten Bereich vorhandenen parallelen und einander unmittelbar benachbarten Klüfte gemeint. Das Gestein zwischen den Klüften ist ebenfalls Bestandteil der Kluftschar.

Kluftzone: Als Kluftzone wird eine Anordnung aus mehreren Kluftscharen oder auch einzelnen Klüften bezeichnet, die zu großräumig deutlich erhöhten Permeabilitäten im Hauptanhydrit führen. Die derart innerhalb einer Kluftzone hydraulisch miteinander verbundenen Kluftscharen und/oder Einzelklüfte stellen ein Wegsamkeitsnetz dar. Der Gebirgsbereich zwischen den Kluftscharen ist Teil der Kluftzone.

Die unterstellte hydraulische Wegsamkeit werde durch eine W-E-verlaufende Kluftzone gebildet, die im Bericht mit „Modellkluftzone“ bezeichnet wird.

Die geometrischen Verhältnisse und die relevanten Größen der Modellkluftzone sind in Abbildung 4-1 dargestellt.

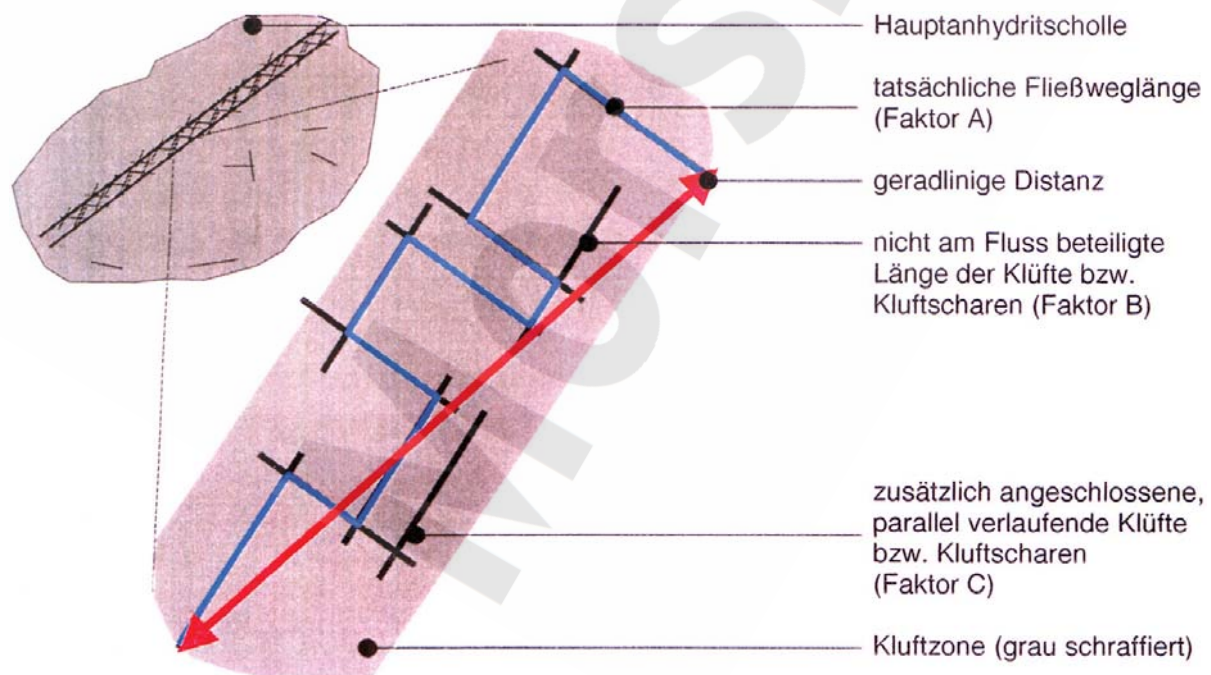


Abbildung 4-1 Konzeptuelles geometrisches Modell der hydraulischen Wegsamkeiten im Hauptanhydrit (aus [BGR 2000c])

Tabelle 4-5 Maßgebende Parameter der Modellkluftzone für das Alternativszenario. Der geometrische Querschnitt der Modellkluftzone kann im Prinzip frei gewählt werden, die übrigen Parameter sind entsprechend festzulegen.

Parameter	Parameter des Abdichtungssystems	Referenzwert	Bandbreite	Verteilungsfunktion
Querschnittsintegrierte Transmissibilität	$A_1 \cdot K_1$	$5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^4$	$5 \cdot 10^{-16} - 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^4$	log-gleich (e)
Transportlänge	L_1	200 m	–	–
Effektiver Fließquerschnitt	$\varepsilon_1 \cdot A_1$	0,1 m ²	0,03 – 0,3 m ²	log-gleich (e)
Totaler Fließquerschnitt	-	1 m ²	0,3 – 3 m ²	–

Die für dieses Szenario maßgebenden Parameter der Modellkluftzone sind deren querschnittsintegrierte Transmissibilität, der effektive und der totale Fließquerschnitt; sie sind in Tabelle 4-5 zusammengestellt. Aus diesen Parametern lassen sich sowohl die Flüsse von Flüssigkeit und Gas in den bzw. aus dem Einlagerungsbereich Ostfeld als auch die Parameter für den Radionuklidtransport ermitteln. Die Herleitung der Parameter ist in Anhang C 1.5 beschrieben.

Als Wahrscheinlichkeitsverteilungen werden sowohl für die querschnittsintegrierte Transmissibilität als auch für die beiden Fließquerschnitte Log-Gleichverteilungen angenommen.

Da für den Anhydrit keine Umbildung durch magnesiumhaltige Lösung zu erwarten ist, wird der Parameter für die Permeabilitätserhöhung durch Korrosion, K_3/K_1 , auf 1 gesetzt.

4.4.2 Auflockerungszone um Abdichtung im Hauptanhydrit

Es wird unterstellt, dass um die Abdichtung des ELB OF auf der 4. Sohle im Hauptanhydrit eine 10 cm mächtige Auflockerungszone existiert, welche während des gesamten Nachweiszeitraums eine gegenüber dem ungestörten Gestein erhöhte Permeabilität aufweist. Im Referenzszenario beträgt diese Permeabilität 10^{-17} m^2 ; zusammen mit den Laborwerten der Permeabilität des ungestörten Baustoffs Magnesiabeton von $< 10^{-20} \text{ m}^2$ resultiert daraus der durchschnittliche Wert für die Anfangspermeabilität des gesamten Bauwerks von 10^{-18} m^2 .

Im hier betrachteten Alternativszenario wird angenommen, dass die Permeabilität der Auflockerungszone gegenüber dem Referenzszenario um den Faktor 10 erhöht ist, also einen Wert von 10^{-16} m^2 aufweist. Wie die detaillierte Berechnung mit einem Korrosionsmodell zeigt (Anhang L, Kapitel L.4), kann auch in diesem Fall der Einfluss der Auflockerungszone in guter Näherung durch eine entsprechende Erhöhung der querschnittsgemittelten Permeabilität auf einen Anfangswert von 10^{-17} m^2 berücksichtigt werden.



4.4.3 Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube

Das Korrosionsvermögen von Grubenlösungen gegenüber dem Salzbeton ist proportional zu deren Magnesiumgehalt. Demgegenüber ist Magnesiabeton stabil, wenn die Magnesiumkonzentration der anstehenden Lösung mehr als 12,2% des Werts von IP21-Lösung beträgt. Ist die Magnesiumkonzentration geringer, dann nimmt das Korrosionsvermögen gegenüber Magnesiabeton entsprechend zu. Im Referenzszenario wird vorausgesetzt, dass die Lösung, welche in die Abdichtungen eindringt, nur etwa 10% der Mg-Konzentration von IP21-Lösung aufweist.

Demgegenüber wird in zwei extremen „what-if“-Fällen untersucht, welchen Einfluss eine reine NaCl-Lösung bzw. eine reine IP21-Lösung auf die Korrosionsdauer der Abdichtungen hätte.

4.4.4 Unwirksame Abdichtungen

In diesem „what-if“-Szenario wird unterstellt, dass die Einlagerungsbereiche West-Südfeld und Ostfeld nicht gegen den Zentralteil abgedichtet sind, weil einzelne Abdichtungen nicht den technischen Anforderungen genügen oder weil sie durch weitere Wegsamkeiten (z.B. unbekannte alte Bohrungen) kurzgeschlossen sind. Dieses Szenario wird dadurch parametrisiert, dass die Anfangspermeabilität der Abdichtsysteme K_1 sowohl für ELB WSF als auch für ELB OF auf 10^{-14} m^2 gesetzt wird²⁴, wobei die Fließquerschnitte gegenüber dem Referenzszenario unverändert belassen werden. Da die Korrosion ausgefallener Abdichtungen nicht zu betrachten ist, wird der Parameter für die Permeabilitätserhöhung durch Korrosion, K_3/K_1 , auf 1 gesetzt.

4.4.5 Korrosion des Salzbetons in der übrigen Grube

Salzbeton, der von magnesiumhaltiger Lösung angegriffen wird, kann seine Stützwirkung als nicht kompaktierbarer Versatz verlieren. Für die großen Mengen des Stützversatzes in der übrigen Grube ist mangels treibender Kräfte nicht mit einer durchgreifenden Umsetzung mit magnesiumhaltiger Lösung zu rechnen. Im Sinne einer Sensitivitätsanalyse wird dennoch untersucht, welche Auswirkungen es hätte, wenn der Salzbeton nur noch die Stützwirkung von Salzgrus (mit der ursprünglichen Porosität des Salzbetons) hätte. Die Konvergenz von nicht oder gering kompaktierbarem Versatz wird im Modell durch einen einfachen Exponentialansatz beschrieben (Kapitel A.2.1). Der Reduktionsfaktor für die Konvergenz des Porenvolumens, γ , ist nun so zu wählen, dass sich damit das Konvergenzverhalten von Salzgrus mit einer Porosität von 20% (= Gesamtporosität von Salzbeton) und einem Fluidstützdruck von 4,9 MPa (= mittlerer hydrostatischer Druck in der übrigen Grube) ergibt. Dies ist für $\gamma = 20$ in guter Näherung erfüllt. Dieser Wert wird für die übrige Grube (γ_{GG}) und den Mischungsbereich (γ_{VG}) eingesetzt. Zudem wird der Wert für die wirksame Porosität des Salzbetons, $\varepsilon_{v2,0}$, auf den vollen Wert von 20 % gesetzt (vgl. Kapitel 4.2).

²⁴ Damit ergäbe sich bei einer Druckdifferenz von 4,9 MPa für das Abdichtsystem des ELB WSF ($L_1 = 26 \text{ m}$, $A_1 = 113,8 \text{ m}^2$) eine Zutrittsrate von mehr als $1'000 \text{ m}^3/\text{a}$; das ist weitaus mehr, als selbst unter ungünstigen Annahmen und zu späteren Zeiten durch das Deckgebirge in die Grube zufließen kann ($260 \text{ m}^3/\text{a}$, vgl. Kap. 3.1.1)



4.4.6 Hohlraumneubildung aufgrund nachfließender Wässer

Solange die Abdichtsysteme ihre Funktion erfüllen, wird bereits während der Zutrittsphase in die abgedichteten Bereiche Lösung aus der Grube in das Deckgebirge ausgepresst, weil die Volumenabnahme durch Konvergenz der Restgrube den Abfluss in die abgedichteten Bereiche überwiegt. Wenn jedoch eine Abdichtung vollständig korrodiert ist, kann vorübergehend Lösung aus der Restgrube mit hoher Zutrittsrate in den Einlagerungsbereich fließen. Dann ist es theoretisch nicht ausgeschlossen, dass Wässer aus dem Deckgebirge nachfließen und durch ihre Aufsättigung am Steinsalz sowie Umlösung an Kalilagern neue Hohlräume in der übrigen Grube gebildet werden. Im Extremfall (d.h. keine Hohlraumkonvergenz in den abgedichteten Bereichen und kein Gegendruck aufgrund von Gasbildung) wäre für diese Hohlraumneubildung ein Lösungszutritt entsprechend der Summe der ungesättigten Gesamthohlraumvolumina der ELB WSF und ELB OF zu unterstellen. Damit würde sich für die übrige Grube das Gesamtvolumen V_{GG} um weniger als 10% auf den Wert von $7,68 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ erhöhen, mit einem totalen Verfüllgrad ζ_{GGI} von 0,808 und einem Anteil an kompaktierbarem Versatz ζ_{GGk} von 0,395. Der Vergleich mit den Referenzwerten und den Bandbreiten für diese Parameter (Tabelle 4-1) zeigt, dass diese Unterschiede durch die Parametervariationen des Referenzszenarios nahezu abgedeckt sind (lediglich das resultierende mit kompaktierbarem Versatz verfüllte Volumen liegt um 19% oberhalb der Bandbreite). Daher braucht die Hohlraumneubildung aufgrund nachfließender Wässer nicht als gesonderter Rechenfall betrachtet zu werden.

4.4.7 Durchströmung von Einlagerungsbereichen

Wie in Anhang K dargelegt, braucht dieses Szenario nicht als gesonderter Rechenfall behandelt zu werden.

4.4.8 Neue Wegsamkeiten durch das Hutgestein

Die Parameter für das Alternativszenario „Neue Wegsamkeiten durch das Hutgestein“ wurden bereits in Kapitel 3.5.6 angegeben und begründet. Die neuen Wegsamkeiten zeichnen sich dadurch aus, dass sie nach einigen zehntausend Jahren (Modellannahme 30'000 Jahre) entstehen und der Radionuklidtransport ohne Sorption erfolgt. Die übrigen Transportparameter seien die gleichen wie im Referenzfall. Die Berechnung der radiologischen Auswirkungen für dieses Alternativszenario erfolgt dadurch, dass das Rechenprogramm zweimal eingesetzt wird, einmal mit Sorption im Deckgebirge und ein zweites Mal – bei sonst identischen Parameterwerten – ohne Sorption²⁵. Zur Auswertung werden die Ergebnisse des Rechenfalls mit Sorption für die Zeitperiode bis 30'000 Jahre, jene des Rechenfalls ohne Sorption für den Zeitabschnitt ab 30'000 Jahre verwendet.

²⁵ Für den Rechenfall ohne Sorption wird der Skalierungsfaktor für die Sorption im Deckgebirge $KS_{DGL} = 0$ gesetzt.



4.4.9 Mangelhafte Abdichtung Schacht Bartensleben

Die spezifischen Parameter des „what-if“-Szenarios „Mangelhafte Abdichtung Schacht Bartensleben“ sind (i) die maximal zu betrachtende Lösungszutrittsrate in die Grube entlang des Schachtes zu Beginn der Nachbetriebsphase, (ii) die ungestörten hydraulischen Verhältnisse im Schilfsandstein und (iii) die Permeabilität der Schachtverfüllung und der Auflockerungszone um den Schacht oberhalb des Schilfsandstein.

Das Verschlusssystem im Schacht Bartensleben ist auf eine maximale Lösungszutrittsrate nach Verschluss des Endlagers von $0,1 \text{ m}^3/\text{a}$ ausgelegt (vgl. Kapitel 3.5.9). Im „what-if“-Szenario werden – ohne Bezug auf eine Plausibilitätsbetrachtung – Lösungszutrittsraten betrachtet, die die Auslegungsanforderung um bis zu einem Faktor 1000 übersteigen, d.h. bis $100 \text{ m}^3/\text{a}$ betragen. Die Analyse des Szenarios ergibt, dass der Parameter „Lösungszutrittsrate entlang Schacht“ nur insofern für die potentiellen Auswirkungen des „what-if“-Szenarios von Bedeutung ist, als er die Dauer des Volllaufens des ELB WSF und damit den Beginn der Auspressphase bestimmt.

Die ungestörten hydraulischen Verhältnisse umfassen im vorliegenden Zusammenhang zum einen den vom Schacht Bartensleben unbeeinflussten Lösungsdruck im Schilfsandstein im Vergleich mit dem hydrostatischen Wert. Die Ergebnisse der hydrogeologischen Untersuchungen führen zum Schluss, dass der ungestörte Lösungsdruck im Schilfsandstein innerhalb von wenigen 10 kPa hydrostatisch ist und dass artesische Verhältnisse bis zu einem Überdruck von etwa 100 kPa möglich sind (vgl. Anhang S). Zum anderen beeinflusst die Transmissibilität des Schilfsandstein, d.h. das Produkt von Permeabilität und Mächtigkeit, die potentiellen Auswirkungen eines hypothetischen Lösungsaustritts entlang des Schachtes. Aus der Analyse der schachtnahen Bohrungen und der bisherigen Lösungszutritte in den Schacht ergibt sich nach [Präger 1999] eine Transmissibilität des Schilfsandstein von $6 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3$.

Der Schacht wird oberhalb des obersten Dichtelements mit einem Mineralgemisch verfüllt. Als hydraulische Leitfähigkeit für dieses Versatzmaterial kann $k_f = 10^{-8} \text{ m/s}$ angesetzt werden [ERCOSPLAN 2003]. Für die Analyse des „what-if“-Szenarios wird dieser Wert auch für den querschnittgemittelten k_f -Wert des Schachtes einschließlich der umgebenden Auflockerungszone angesetzt.

4.5 Gefährdungspotential

Zur Abschätzung des Gefährdungspotentials wird nachfolgend die maximale Strahlendosis, die sich bei einem hypothetischen Ausfall sämtlicher technischer und geologischer Barrieren ergeben würde, mit einer robusten Überschlagsrechnung abgeschätzt.

Das Gesamthohlraumvolumen, d.h. das gesamte fluidzugängliche Volumen in den Grubengebäuden, wird nach Verschluss des Endlagers ca. 2,0 Mio. m^3 betragen. Für die Überschlagsrechnung



wird unterstellt, dass das gesamte Radionuklidinventar nach 1'500 Jahren²⁶ in nur 250'000 m³ Lösung gelöst wird (das ist die Summe der unverfüllten Volumina im West-Südfeld, Ostfeld und einem „Mischungsbereich“ im Zentralteil, unter Berücksichtigung der Konvergenz während 10'000 Jahren) und dass die kontaminierte Lösung unverzögert aus den Grubengebäuden in das nutzbare Grundwasser gelangt. Durch die Konvergenz der Grubengebäude wird eine Lösungsmenge von etwa 8 m³/a in das Grundwasser freigesetzt. Der verdünnungswirksame oberflächennahe Grundwasserfluss hat eine Größe von 10'000 m³/a bis 100'000 m³/a mit einem Referenzwert von 15'000 m³/a (Tabelle 4-1). Für die Überschlagsrechnung wird eine Verdünnung der freigesetzten gesättigten Salzlösung im Grundwasser um den Faktor 2'000 unterstellt. Aus der Radionuklidkonzentration im Grundwasser wird die mögliche Strahlenexposition eines Grundwassernutzers berechnet. Dies geschieht mit denselben Umrechnungsfaktoren wie bei den ausführlichen computergestützten Modellrechnungen [Pröhl & Gering 2002]. Mit demselben Vorgehen wird zusätzlich eine Überschlagsrechnung für den Zeitpunkt 10'000 Jahre durchgeführt.

Tabelle 4-6: Abschätzung der Strahlenexposition bei einem hypothetischen Ausfall aller Barrieren anhand einer Überschlagsrechnung

Nuklid	Halbwertszeit [a]	Aktivität (30.06.2005) [Bq]	Aktivität nach 1'500 a [Bq]	Aktivität nach 10'000 a [Bq]	Strahlenexposition	
					1'500a [mSv/a]	10'000 a [mSv/a]
¹⁴ C	5'730	3,30·10 ¹²	2,75·10 ¹²	9,84·10 ¹¹	0,26	0,092
⁶³ Ni	100	1,81·10 ¹³	5,53·10 ⁸	-	< 10 ⁻⁵	-
⁹⁰ Sr	28,6	5,85·10 ¹²	-	-	-	-
¹²⁶ Sn	235'000	2,42·10 ⁸	2,41·10 ⁸	2,35·10 ⁸	0,008	0,008
¹³⁷ Cs	30,2	1,38·10 ¹⁴	-	-	-	-
²²⁶ Ra (ohne Ra-VBA)	1'600	2,33·10 ¹⁰	1,22·10 ¹⁰	3,85·10 ⁸	0,74	0,023
²²⁶ Ra (Ra-VBA)	1'600	3,70·10 ¹¹	*)	*)	*)	*)
²³⁹ Pu	24'100	6,83·10 ¹⁰	6,54·10 ¹⁰	5,13·10 ¹⁰	0,13	0,10
²⁴⁰ Pu	6'560	6,56·10 ¹⁰	5,60·10 ¹⁰	2,28·10 ¹⁰	0,11	0,044
²⁴¹ Am	432,2	2,19·10 ¹¹	2,39·10 ¹⁰	1,08·10 ⁶	0,039	< 10 ⁻⁵
Summe		1,66·10 ¹⁴	2,91·10 ¹²	1,06·10 ¹²	1,3	0,27

*) Radium-VBA; diese ist in einem Sohlenbohrloch in einem eigens aufgefahreten und verfüllten Streckenstummel im Ostfeld eingelagert, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Aktivität des ²²⁶Ra eingeschlossen bleibt (vgl. Anhang R).

²⁶ Dies ist die kürzeste Dauer für das Volllaufen der Restgrube, die in der Sicherheitsanalyse unterstellt wird (Kapitel 4.1).



In Tabelle 4-6 sind die Ergebnisse der Überschlagsrechnung dargestellt: Die relevanten Radionuklide, deren Aktivität zum 30.06.2005, nach 1'500 und 10'000 Jahren sowie die resultierenden maximalen Strahlenexpositionen. In der Tabelle ist die im Einlagerungsbereich Ostfeld gelagerte Radium-VBA mit einer ^{226}Ra -Aktivität von $3,7 \cdot 10^{11}$ Bq gesondert aufgeführt. Diese ist in einem Sohlenbohrloch in einem eigens aufgefahrenen und verfüllten Streckenstummel im Ostfeld eingelagert, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Aktivität für lange Zeiträume eingeschlossen bleibt. Der Beitrag der Aktivität in der Radium-VBA zur potentiellen Strahlenexposition wird deshalb nicht berücksichtigt (vgl. Anhang R).

Die berechneten Strahlenexpositionen überschätzen die tatsächlichen Folgen eines Ausfalls aller Barrieren aus folgenden Gründen erheblich:

Ein vollständiger Ausfall aller Barrieren ist unrealistisch. Das Material der Barrieren kann nicht verschwinden, so dass gewisse Strömungswiderstände gegen den Zutritt von Lösungen in die abgedichteten Einlagerungsbereiche erhalten bleiben. Ebenso ist das Ausbleiben einer Verdünnung mit nicht kontaminierter Lösung aus der übrigen Grube sehr unwahrscheinlich. Ein Teil der Radionuklide wird durch die Mineralbildung in den lösungs- und versatzgefüllten Grubengebäuden zurückgehalten. Die Auflösung von Hartsalzlagern führt zur Bildung großer Mengen an Kainit, und an zementgebundenen Versatzstoffen kommt es zur Magnesitbildung. Dabei können in der Lösung befindliche Radionuklide in die Minerale eingeschlossen werden. Diese Effekte werden besonders bei einem langsamen Ausfall der Barrieren wirksam. Der Radionuklidtransport durch das mit Versatz und neugebildeten Mineralien gefüllte Grubengebäude und der anschließende Radionuklidtransport durch Hutgestein und Deckgebirge erfolgt in jedem Fall verzögert.

Die berechnete Strahlenexposition für den hypothetischen Ausfall aller Barrieren nach 10'000 Jahren beträgt 0,27 mSv/a. Sie liegt damit knapp unterhalb des Werts des § 47 StrISchV für die effektive Dosis, ist aber deutlich kleiner als die mittlere natürliche Strahlenexposition in Deutschland, die etwa 2,4 mSv/a beträgt. Selbst bei einem hypothetischen Ausfall aller Barrieren nach 1'500 Jahren liegen die berechneten maximalen Strahlenexpositionen noch im Bereich der natürlichen Strahlenexpositionen. Auf Grund der o.a. Effekte sind die berechneten Werte für den hypothetischen Ausfall aller Barrieren sehr konservativ abgeschätzt. Es ist somit praktisch ausgeschlossen, dass von den radioaktiven Abfällen nach 10'000 Jahren noch ein Risiko für Mensch und Umwelt ausgeht. Von den im Endlager eingeschlossenen Abfällen geht auch nach 1'500 Jahren nur noch ein geringes Risiko aus. Anforderungen an die Isolierung der radioaktiven Abfälle und damit an die Eigenschaften der Verfüllmaßnahmen brauchen somit nur für einen Zeitraum im Bereich von 10'000 Jahren gestellt zu werden.



5 Ergebnisse der Modellrechnungen

Die Modellrechnungen unterteilen sich in die sogenannten deterministischen Rechnungen und die probabilistischen Rechnungen. Die deterministischen Rechnungen setzen das Modellkonzept rechnerisch für einen bestimmten Satz von Parameterwerten um und ergeben, als Hauptresultate, den zeitlichen Verlauf der Strahlenexposition sowie die maßgebenden Radionuklide und Einlagerungsbereiche. Gegenstand der deterministischen Rechnungen ist in erster Linie das Referenzszenario mit den drei Fällen „ohne Gaspolster“, „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ und „mit Gaspolster, mit Gasfluss“. Darüber hinaus werden die Auswirkungen der in Kapitel 3.5 definierten alternativen Szenarien und „what-if“-Szenarien mit deterministischen Rechnungen untersucht. Die Ergebnisse dieser Rechnungen werden in Kapitel 5.1 dargestellt.

Die probabilistischen Rechnungen dienen dazu, umfangreiche Parametervariationen durchzuführen, bei denen alle Parameter gleichzeitig eine Variation erfahren. Diese Rechnungen erlauben, die Vielzahl der möglichen Parameterkombinationen, die sich aus der sehr großen Zahl von Parametern ergibt, in realitätsbezogener Art zu untersuchen. Sie fördern jedoch nur untergeordnet das Systemverständnis. Für den letztgenannten Zweck sind „konventionelle“ Parametervariationen, bei denen ein Parameter variiert und die übrigen festgehalten werden, besser geeignet, führen jedoch zwangsläufig auf spezielle, nicht generell übertragbare Aussagen.

Bei den probabilistischen Rechnungen wird eine große Anzahl verschiedener Parametersätze (d.h. Kombinationen von Parameterwerten) generiert, jeweils eine deterministische Berechnung für jeden der Parametersätze durchgeführt und verschiedene Ergebnisse gespeichert, in erster Linie der Maximalwert der Strahlenexposition, der Zeitpunkt seines Auftretens sowie die maßgebenden Radionuklide und Einlagerungsbereiche. Am Ende resultieren Häufigkeitsverteilungen für die gespeicherten Ergebnisse. Die zentralen Ergebnisse der probabilistischen Rechnungen werden in Kapitel 5.2 besprochen, weitergehende Aussagen finden sich in Anhang N.

5.1 Deterministische Berechnungen

In den folgenden Kapiteln werden die Resultate der deterministischen Rechnungen vorgestellt. Für das Referenzszenario mit den drei Fällen („ohne Gaspolster“, „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“, „mit Gaspolster, mit Gasfluss“) wird das Systemverhalten eingehend erläutert; für die Alternativszenarien und „what-if“-Szenarien werden die Konsequenzen diskutiert, die sich aus den Änderungen gegenüber dem Referenzszenario ergeben.

5.1.1 Deterministische Berechnungen für das Referenzszenario

Die Parameterwerte des Referenzszenarios sind die Referenzwerte (vgl. Angaben für ausgewählte Parameter in Kapitel 4 und vollständige Liste in Anhang C).



5.1.1.1 Fall „ohne Gaspolster“

Der Fall „ohne Gaspolster“ unterstellt in Bezug auf die Wirkung der Gasbildung ein extremes Systemverhalten: Die Salzlösung tritt ohne Beeinflussung durch die Gasbildung in die Einlagerungsbereiche ein, bis diese vollständig mit Lösung gefüllt sind. In den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen NF und ZT ist das gleichzeitig mit dem Volllaufen der übrigen Grube nach 7'500 Jahren der Fall. Für die abgedichteten Einlagerungsbereiche ergeben sich im Referenzszenario folgende Zeiten bis zum vollständigen Volllaufen: Nach 27'000 Jahren ist das Abdichtsystem des West-Südfelds durchgehend korrodiert, und der Einlagerungsbereich läuft anschließend innerhalb kurzer Zeit voll. Der ELB OF ist rechnerisch nach 215'000 Jahren vollgelaufen. Das Resthohlraumvolumen hat in dieser Zeit durch Konvergenz deutlich abgenommen. Die bis dahin zugetretene Lösungsmenge ist insgesamt recht gering, so dass der Korrosionsfortschritt in den Abdichtungen auf beiden Sohlen im Verhältnis zu ihren Längen von 150 m (2. Sohle) bzw. 110 m (4. Sohle) gering ist: Die Länge des korrodierten Abschnitts der Abdichtung aus Salzbeton auf der 2. Sohle beträgt 23 m, die Länge des korrodierten Abschnitts der Abdichtung aus Magnesiabeton auf der 4. Sohle 14 m.

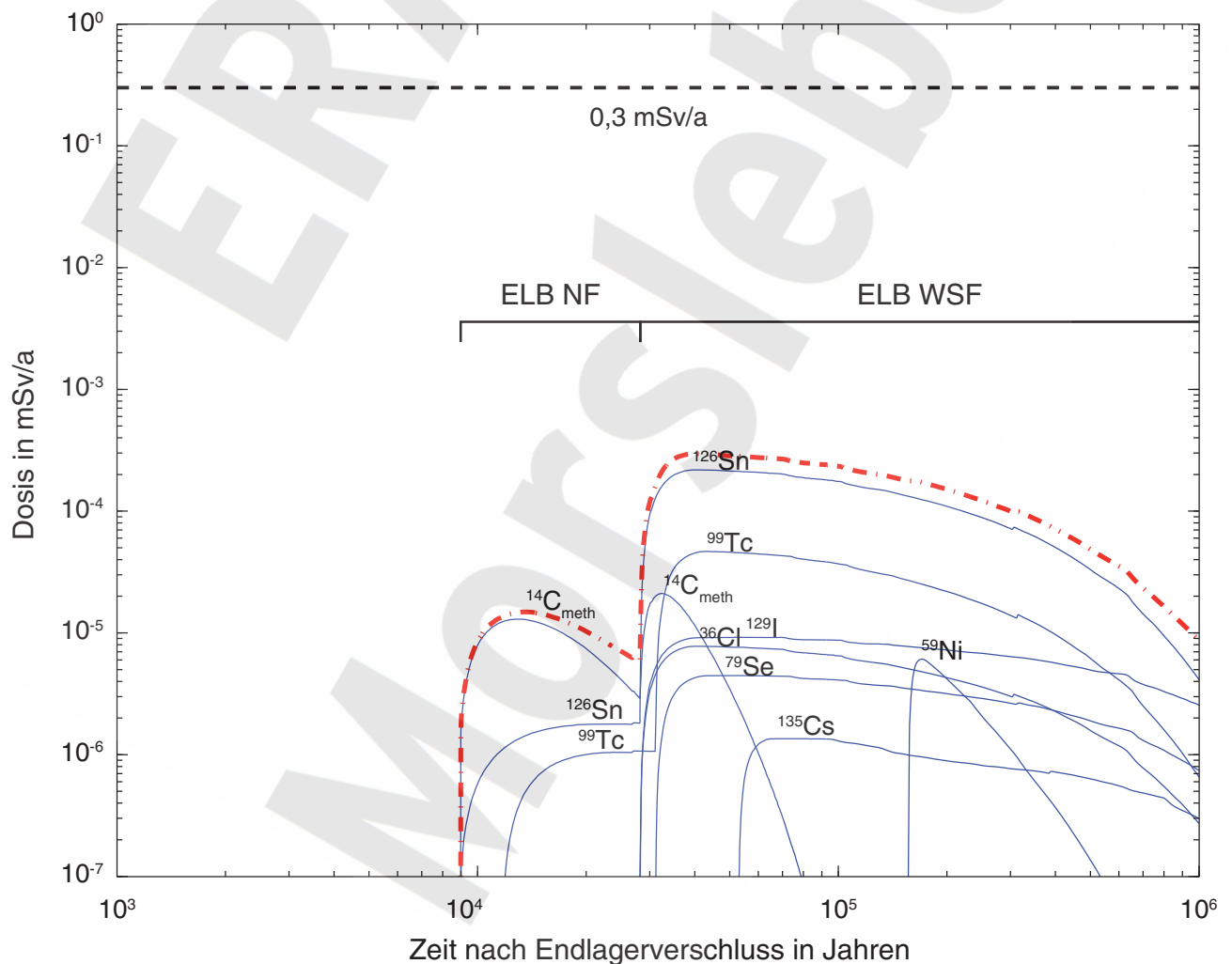


Abbildung 5-1 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für den Fall „ohne Gaspolster“ mit den Referenzparametern

Das danach folgende Auspressen von Salzlösung mit den mobilisierten Radionukliden beruht ausschließlich auf der Konvergenz der Einlagerungsbereiche. Die Auspressung aus den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen NF und ZT setzt praktisch instantan ein; da hier zudem keine Strömungswiderstände vorhanden sind und die Konvergenzrate des ELB NF vergleichsweise hoch ist, ist zudem die relative Auspressrate – bezogen auf das Volumen des jeweiligen Einlagerungsbereichs – am größten. Aus dem ELB WSF wird bereits kurze Zeit, nachdem der Einlagerungsbereich mit Lösung gefüllt ist, radionuklidhaltige Lösung aus dem Abdichtsystem ausgepresst. Für das Ostfeld schließlich ist die Konvergenz zu Beginn der Auspressphase bereits weitgehend abgeschlossen. Entsprechend ist erst nach rund 300'000 Jahren das Porenwasser im Abdichtsystem vollständig durch radionuklidhaltige Lösung verdrängt. Die Radionuklidfreisetzung aus dem ELB OF in den Mischungsbereich setzt deshalb erst zu diesem Zeitpunkt ein.

Die Freisetzung aus dem Deckgebirge in die Biosphäre setzt für nicht sorbierende Nuklide nach dem Volllaufen der Restgrube während 7'500 Jahren mit einer Verzögerung von etwa 1'000 Jahren ein (Abbildung 5-1). Diese Zeit ist erforderlich, um das Wasser im Porenraum des dem Modell zugrunde liegenden Transportpfads durch Hutgestein und Deckgebirge zu verdrängen und durch Grubenlösung zu ersetzen. Die treibende Kraft dafür ist die Konvergenz der übrigen Grube mit einer Rate von ca. $8 \text{ m}^3/\text{a}$. Diese Freisetzung führt zu einem ersten Maximum der Dosis in der Biosphäre von $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ mSv/a}$ nach 14'000 Jahren, dominiert durch $^{14}\text{CH}_4$ aus dem Nordfeld. Die Dosisbeiträge von ^{126}Sn und ^{99}Tc , ebenfalls aus dem Nordfeld, liegen um 1 bis 2 Größenordnungen darunter. Der Einlagerungsbereich Zentralteil weist eine ähnliche Charakteristik auf, das Maximum der Summendosis liegt jedoch unterhalb von 10^{-6} mSv/a und ist somit unbedeutend.

Der Rückgang der Summendosis im weiteren Verlauf wird durch den Zerfall des ^{14}C verursacht. Nach etwa 28'000 Jahren kommt es zur Freisetzung der Radionuklide aus dem West-Südfeld, und die Summendosis steigt wieder an, bis sie bei 40'000 Jahren das Gesamtdosismaximum von $0,0003 \text{ mSv/a}$ erreicht. Dieses wird durch ^{126}Sn dominiert. Der Beitrag des Ostfelds ab 300'000 Jahren bringt keine weitere Erhöhung der Summendosis. Vielmehr führt das Abklingen der Konvergenz in der Grube zu einem leichten Rückgang der Summendosis bis zum Ende des Betrachtungszeitraums.

5.1.1.2 Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“

Der Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ unterstellt in Bezug auf die Wirkung der Gasbildung ein zweites extremes Systemverhalten: Es wird angenommen, dass sich in den Einlagerungsbereichen ein Gasvolumen aufbaut, das nicht entweichen kann und so zum Druckaufbau beiträgt. Es entsteht dadurch während der Phase des Lösungszutritts ein Gegendruck, der die Zutrittsrate zunehmend verringert und eine vollständige Füllung der Einlagerungsbereiche verhindert. Im West-Südfeld ist die Folge des verlangsamten Lösungszutritts, dass das Abdichtsystem (verglichen mit dem Fall „ohne Gaspolster“) langsamer korrodiert. Daher dauert es länger als im Fall „ohne Gaspolster“, nämlich bis zum Zeitpunkt 35'000 Jahre, bis der Fluidruck zwischen ELB WSF und Restgrube ausgeglichen ist und damit der Lösungszutritt endet. Im Ostfeld dagegen erreicht der Gasdruck nach 88'000 Jahren aufgrund von Gasbildung und Konvergenz den Wert des hydrostatischen Drucks in der übrigen Grube, so dass die Zutrittsphase deutlich früher abgeschlossen ist als



im Fall „ohne Gaspolster“ (bei sehr geringem Korrosionsgrad des Abdichtsystems). Der daraus resultierende Füllgrad der Einlagerungsbereiche am Ende der Zutrittsphase beträgt 47% im West-Südfeld, während in das Ostfeld nur wenig Flüssigkeit Zutritt; hier errechnet sich ein Füllgrad von 12,5%. Für das Nordfeld und den Zentralteil erfolgt wegen der fehlenden Abdichtung ein vollständiges und instantanes Volllaufen; hier ergibt sich in der Zutrittsphase kein Unterschied zum Fall „ohne Gaspolster“.

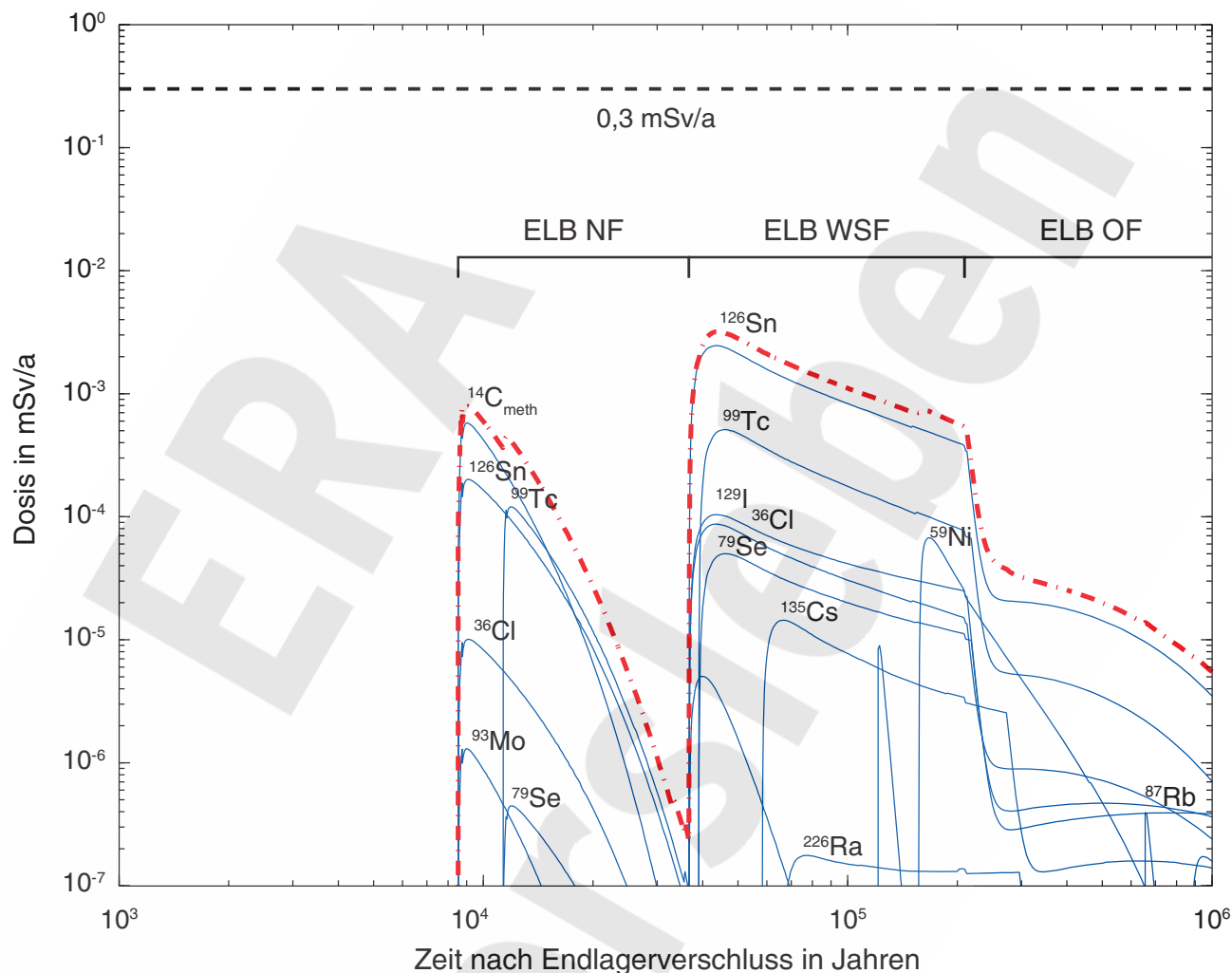


Abbildung 5-2 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ mit den Referenzparametern

Durch die fortschreitende Konvergenz und – je nach Einlagerungsbereich – Gasbildung steigt der Druck weiter an, wodurch die Salzlösung und die in ihr mobilisierten Radionuklide aus dem Einlagerungsbereich in immer stärkerem Maße ausgepresst werden, bis sämtliche Lösung durch das Abdichtsystem ausgetreten ist. Der Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ unterstellt insofern ein extremes Systemverhalten, als auch in dieser Phase ein Entweichen von Gas aus dem Einlagerungsbereich ausgeschlossen wird.

Wegen des Gasdruckes als zusätzlicher treibender Kraft sind die Freisetzungsraten deutlich höher als im Fall „ohne Gaspolster“. Das Auspressen radionuklidhaltiger Lösung aus dem ELB NF ist bereits etwa 40 Jahre nach Volllaufen der Restgrube abgeschlossen; im ELB ZT reicht die gebilde-

te Gasmenge nicht aus, um alle Flüssigkeit zu verdrängen, so dass hier die Freisetzung zu späteren Zeiten wieder durch die Konvergenz bestimmt wird. Ein erstes Maximum der Summendosis von 0,0008 mSv/a tritt nach 9'000 Jahren ein und wird vom $^{14}\text{CH}_4$ aus dem Nordfeld dominiert (Abbildung 5-2); die Dosisbeiträge von ^{126}Sn und ^{99}Tc liegen zunächst etwa einen Faktor 5 darunter. In der Folge nimmt durch den radioaktiven Zerfall der Beitrag von $^{14}\text{CH}_4$ schneller ab als jener von ^{126}Sn und ^{99}Tc . Die verzögerte Freisetzung des ^{99}Tc ist auf seine Sorption während des Transports durch Hutgestein und Deckgebirge zurückzuführen. Der Beitrag des Zentralteils zur Summendosis ist etwa drei Größenordnungen niedriger als der des Nordfelds; daher wird er im Weiteren nicht mehr erwähnt.

Nach etwa 36'000 Jahren beginnt die Freisetzung aus dem West-Südfeld. Das Gesamtmaximum der Summendosis von rund 0,003 mSv/a bei 37'000 Jahren wird vom ^{126}Sn bestimmt. Nach knapp 210'000 Jahren ist die gesamte radionuklidhaltige Lösung aus dem West-Südfeld ausgepresst. Im weiteren Verlauf wird die Gesamtdosis alleine durch den ab 150'000 Jahren einsetzenden Beitrag der Radionuklide aus dem Ostfeld – allerdings auf deutlich niedrigerem Niveau – bestimmt.

5.1.1.3 Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“

Beim Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ sind die Abläufe während der Zutrittsphase identisch mit jenen im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“. Die Auspressraten sind jedoch um etwa eine Größenordnung niedriger. Der Grund dafür ist, dass Gas aus den Einlagerungsbereichen entweichen kann, ohne dabei Lösung aus dem Einlagerungsbereich zu verdrängen. Daher ist der Fluiddruck und somit die treibende Kraft geringer als im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“. Wenn alles Gas entwichen ist und sich noch Flüssigkeit im Einlagerungsbereich befindet, erfolgt das weitere Auspressen nur noch mit der Konvergenz als treibender Kraft, also analog zum Fall „ohne Gaspolster“.

Die Freisetzung in die Biosphäre erreicht ein erstes Maximum von 0,0003 mSv/a nach knapp 10'000 Jahren, dominiert durch das $^{14}\text{CH}_4$ aus dem Nordfeld (siehe Abbildung 5-3). Nach 37'000 Jahren kommt es wiederum zu einem Anstieg der Radionuklidfreisetzung durch den Beitrag aus dem West-Südfeld mit einem Dosismaximum von rund 0,0004 mSv/a nach 38'000 Jahren, das dominierende Radionuklid ist ^{126}Sn . Ab rund 150'000 Jahren trägt auch der ELB OF zur Dosis bei.

Im West-Südfeld ist nach 60'000 Jahren die Gasbildungsrate (bezogen auf den hydrostatischen Druck) bereits kleiner als die Volumenabnahme durch Konvergenz. Durch die Konvergenz wird aus dem Abdichtsystem überwiegend Gas ausgepresst²⁷, bis das Gaspolster nach knapp 10^6 Jahren ganz verschwunden ist. Danach steigt die Auspressrate für Flüssigkeit aus dem Einlagerungsbereich sprunghaft an. In der Folge steigt auch die Summendosis nochmals auf etwa $1,5 \cdot 10^{-5}$ mSv/a an. Im weiteren Verlauf nimmt die Summendosis kontinuierlich ab.

²⁷ Das Produkt aus dem Anteils der gasdurchströmten Querschnittsfläche in der Abdichtung, der relativen Permeabilität für Gas und dem Kehrwert der dynamischen Viskosität des Gases, f_g/μ_g , beträgt $3'000 \text{ Pa}^{-1}\text{s}^{-1}$, der Kehrwert der dynamischen Viskosität der Salzlösung, $1/\mu_w$, nur $490 \text{ Pa}^{-1}\text{s}^{-1}$. Die Auspressrate für Gas ist deshalb gut 6mal höher als jene für Salzlösung.



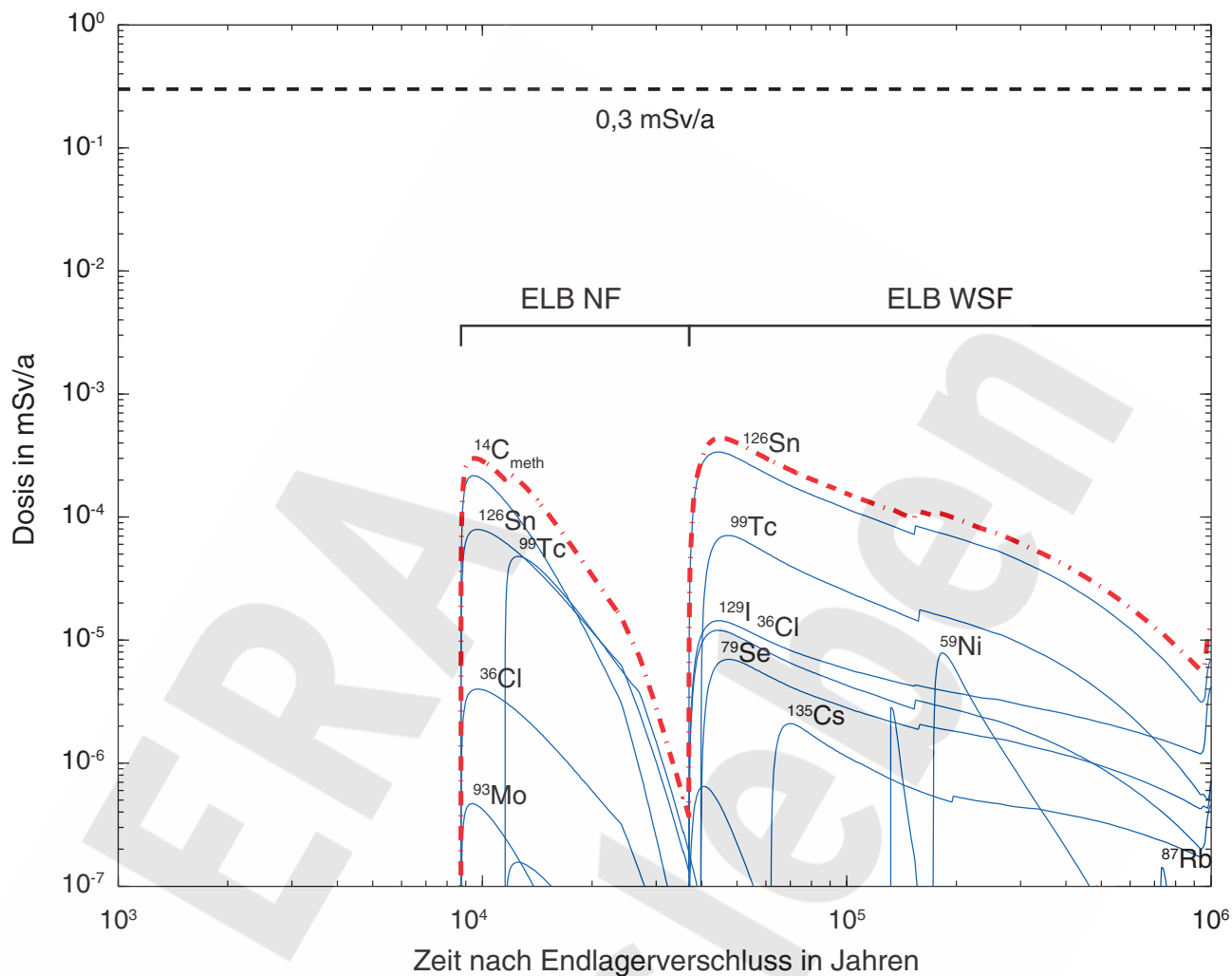


Abbildung 5-3 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ mit den Referenzparametern.

Die Dosisraten für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ liegen aufgrund der geringeren Auspressraten aus den Einlagerungsbereichen um etwa eine Größenordnung unter denen für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“²⁸.

Der Wert von 0,3 mSv/a nach § 47, Abs. 1 StrlSchV wird deutlich eingehalten. Dies trifft für alle Fälle in Bezug auf das Verhalten von Gas und für alle in Anlage VII, Teil B StrlSchV genannten Altersgruppen zu.

²⁸ Das Modell berücksichtigt keine gasförmigen Nuklide, die auf dem Gaspfad aus den Einlagerungsbereichen in den Mischungsbereich ausgepresst werden. Wegen Lösungs- und Ausgasungsprozessen darf der Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ für die Berechnung des Dosisbeitrags von gelöstem $^{14}\text{CH}_4$ streng genommen nicht angewendet werden. In Anhang P wird für die Freisetzung des $^{14}\text{CH}_4$ auf dem Gaspfad gezeigt, dass die resultierende Dosis unkritisch ist, so dass dieses Szenario hier nicht detailliert modelliert zu werden braucht.

5.1.2 Alternative Szenarien

Zusätzlich zum Referenzszenario und den probabilistischen Parametervariationen (Kap. 5.2) gibt es einige alternative Szenarien und „what-if“-Szenarien, die gesondert betrachtet werden. Es sind einerseits mögliche spezielle Entwicklungsmöglichkeiten für das ERAM, die nicht durch die Parametervariation innerhalb der Bandbreiten abgedeckt sind, und andererseits hypothetische Szenarien, deren Eintreten zwar ausgeschlossen werden kann, mit denen aber die Robustheit des Endlagersystems untersucht wird.

5.1.2.1 Hauptanhydrit als Wegsamkeit zum Ostfeld

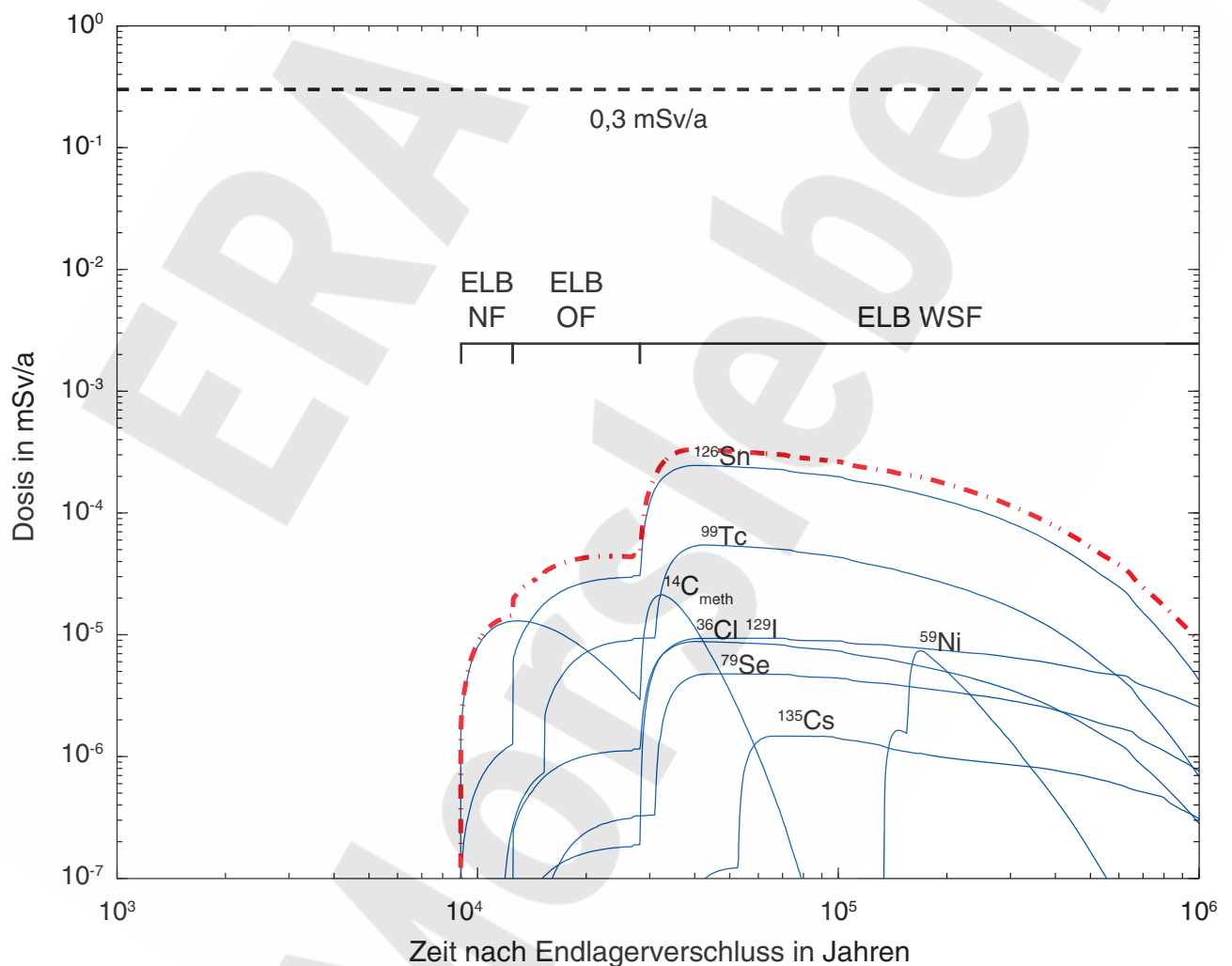


Abbildung 5-4 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Anhydrit als Wegsamkeit zum Ostfeld“ und den Fall „ohne Gaspolster“

In diesem Szenario wird eine ausgedehnte und durchgehende Wegsamkeit im Hauptanhydrit zwischen dem Zentralteil und dem ELB OF unterstellt, welche eine höhere Durchlässigkeit als das System der Abdichtungen in den Ostquerschlägen auf der 2. und der 4. Sohle, dem Abdichtsystem des ELB OF im Referenzfall, aufweist. So können der Zutritt und die Auspressung von Salzlösung

maßgebend über diesen Pfad stattfinden. Die Modellrechnungen für dieses Szenario erfolgen mit entsprechend angepassten geometrischen und hydraulischen Parametern für die Modell-Abdichtung des Ostfeldes (Kapitel 4.4.1).

Nach den Modellrechnungen setzt im Szenario „Hauptanhydrit“ die Radionuklidfreisetzung aus dem Ostfeld im Vergleich zum Referenzfall deutlich früher ein (ohne Gaspolster und mit Gaspolster jeweils nach ca. 12'000 Jahren, siehe Abbildung 5-4 bis Abbildung 5-6), da der Lösungszutritt in den Einlagerungsbereich über die Wegsamkeit im Hauptanhydrit deutlich rascher als im Referenzfall über die beiden Abdichtungen auf der 2. und 4. Sohle erfolgt. Die resultierende Strahlenexposition erreicht allerdings nur geringfügig höhere Werte, da das Gesamtdosismaximum weiterhin durch den Beitrag des ELB WSF bestimmt wird (Abbildung 5-4 bis Abbildung 5-6). So trägt das ^{126}Sn aus dem Ostfeld nur zu einer leichten Erhöhung des Gesamtdosismaximums bei, im Fall „ohne Gaspolster“ um etwa 10%, im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ um 9% und im Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ ebenfalls um 9%.

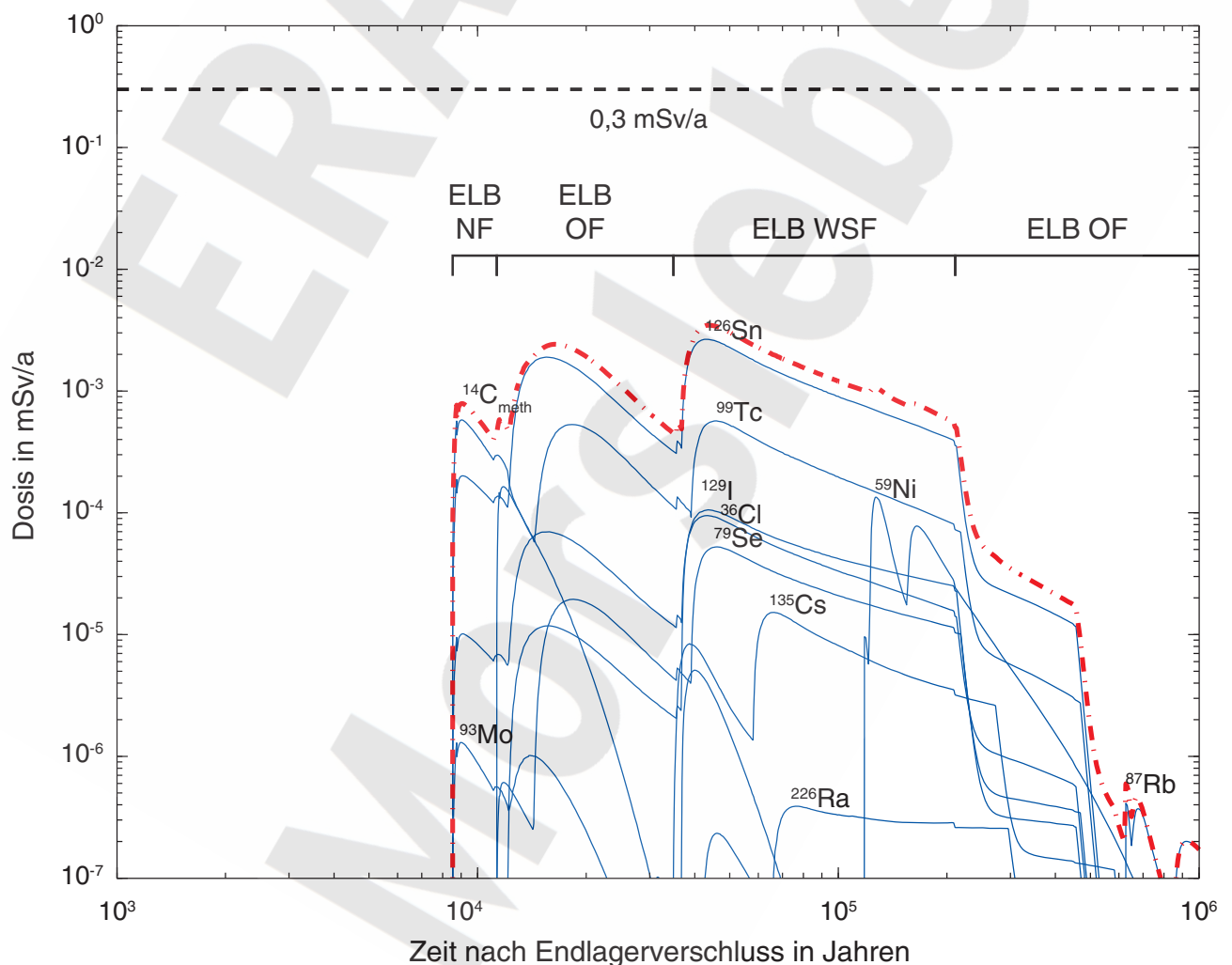


Abbildung 5-5 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Anhydrit als Wegsamkeit zum Ostfeld“ und den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“

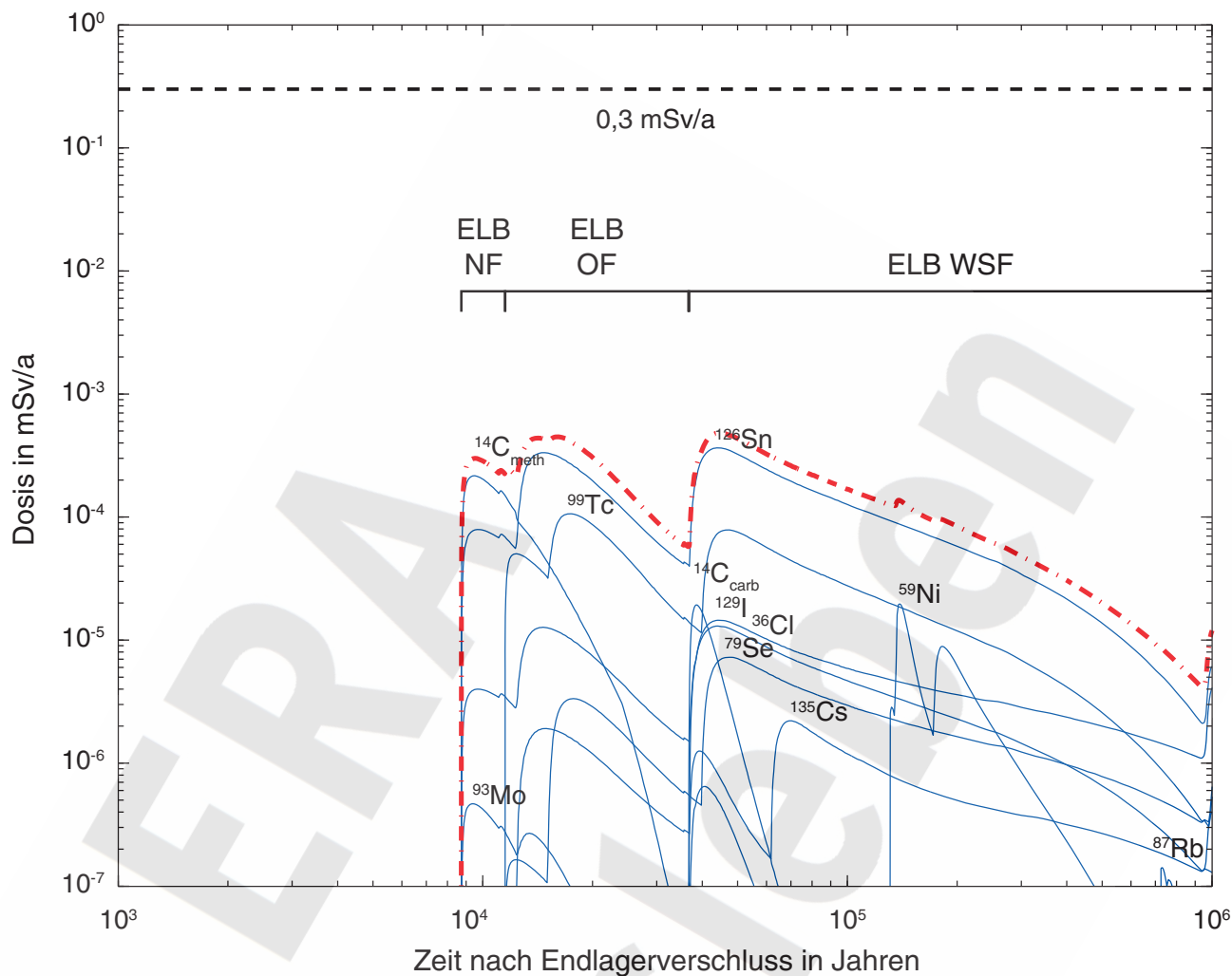


Abbildung 5-6 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Anhydrit als Wegsamkeit zum Ostfeld“ und den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“

5.1.2.2 Auflockerungszone um Abdichtung im Hauptanhydrit

Vor dem Erstellen der Abdichtungen werden an den entsprechenden Lokationen die Auflockerungszonen entfernt. Dennoch muss davon ausgegangen werden, dass sich unmittelbar danach, d.h. bevor die Abdichtungen fertig erstellt werden können, in geringerem Maße erneut aufgelockerte Bereiche bilden. Bei den Abdichtungen im Steinsalz werden sich diese aufgrund des Gebirgsdrucks und der dadurch bewirkten Hohlraumkonvergenz wieder schließen, bevor die Restgrube mit Lösung gefüllt sein wird. Anders ist die Situation bei der Abdichtung des Ostquerschlags auf der 4. Sohle, welcher im Hauptanhydrit verläuft. Wegen der Steifigkeit des Anhydrits wird hier unterstellt, dass eine Auflockerungszone, einmal entstanden, über lange Zeiten existieren wird.

In diesem Szenario wird eine zehnmal höhere Permeabilität der Auflockerungszone im Hauptanhydrit als im Referenzszenario angenommen, wobei das Referenzszenario eine 0,1 m mächtige Auflockerungszone im Hauptanhydrit mit einer Permeabilität von 10^{-17} m^2 einschließt. Diese abwei-

chende Annahme zur Auflockerungszone wird durch eine um eine Größenordnung erhöhte Anfangspermeabilität des Abdichtungsbauwerks parametrisiert (vgl. Kap. 3.5.2 und Kapitel L.4 in Anhang L).

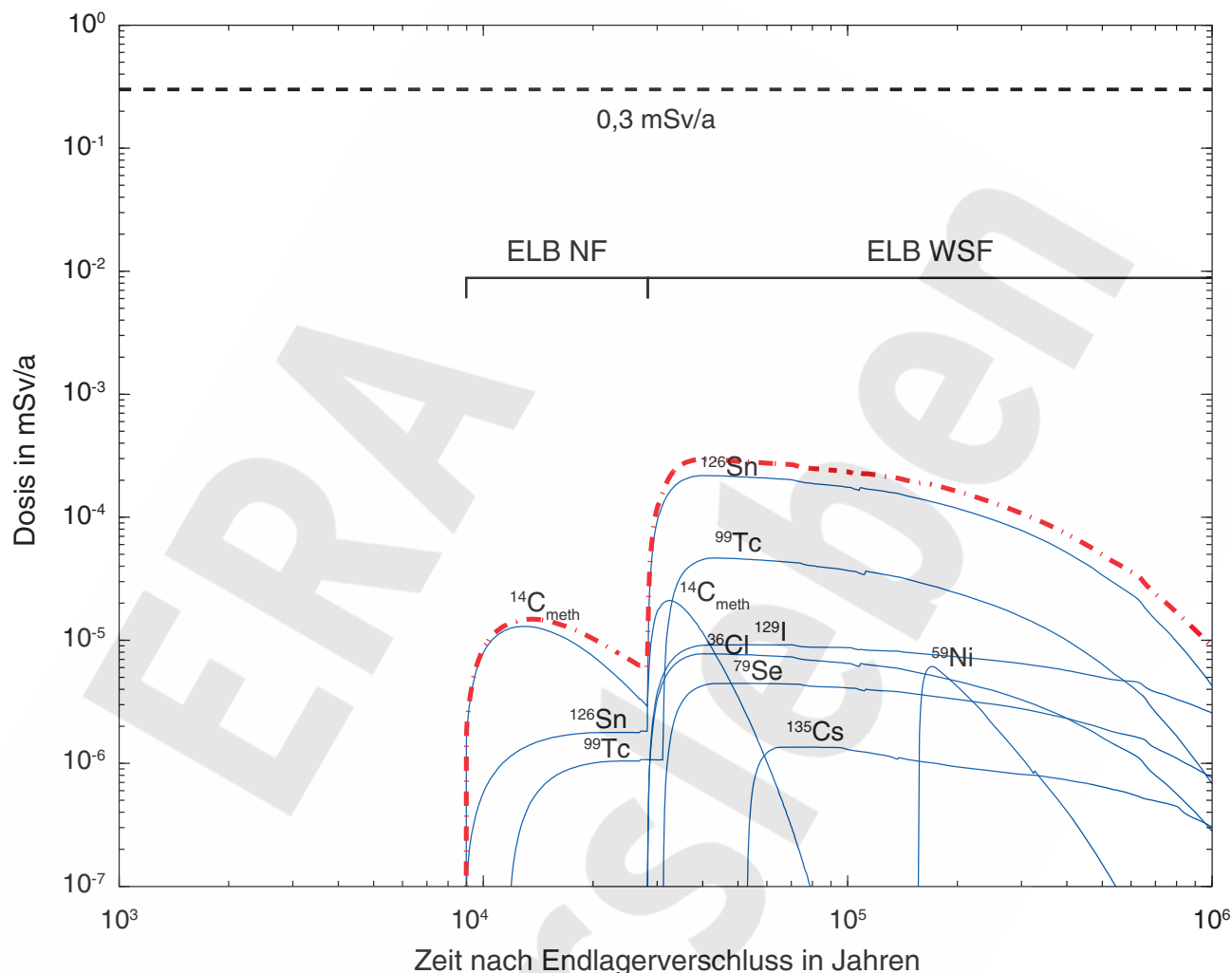


Abbildung 5-7 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Auflockerungszone um Abdichtung im Hauptanhydrit“ und den Fall „ohne Gaspolster“

Die erhöhte hydraulische Leitfähigkeit der Auflockerungszone im Hauptanhydrit führt zu einer größeren Zutrittsrate und zu einer stärkeren Korrosion der Abdichtung aus Magnesiabeton. Im Fall „ohne Gaspolster“ führt dies zu einer Korrosion über rund 60% der Länge, in den Fällen „mit Gaspolster“ zu einer solchen über knapp 20% ihrer Länge. Damit wird die Abdichtung auch in diesem Alternativszenario nicht durchgehend korrodiert. Die Auswirkungen auf die Freisetzung der Radionuklide aus dem ELB OF in die Biosphäre sind dennoch deutlich: So beginnt diese Freisetzung rund 200'000 Jahre (Fall „ohne Gaspolster“) bzw. 75'000 Jahre (Fall „mit Gaspolster“) früher, und die erreichten maximalen Dosiswerte sind einen Faktor 2 („mit Gaspolster, mit Gasfluss“) bis einen Faktor 4 („mit Gaspolster, ohne Gasfluss“) größer als im Referenzfall. Die Bedeutung des Beitrags des ELB OF zur Gesamtstrahlendosis ist allerdings auch im vorliegenden Szenario gering (Abbildung 5-7 bis Abbildung 5-9). So wird das Dosismaximum in allen drei Fällen („ohne Gaspolster“, „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ und „mit Gaspolster, mit Gasfluss“) nach wie vor durch den

Beitrag des ELB WSF bestimmt. Dessen Maximalwerte ändern sich im Vergleich zum Referenzszenario nicht, so dass die Bedeutung der hydraulisch wirksamen Auflockerungszone im Hauptanhydrit auf die Gesamtstrahlenexposition in der Biosphäre als vernachlässigbar gering eingestuft werden kann.

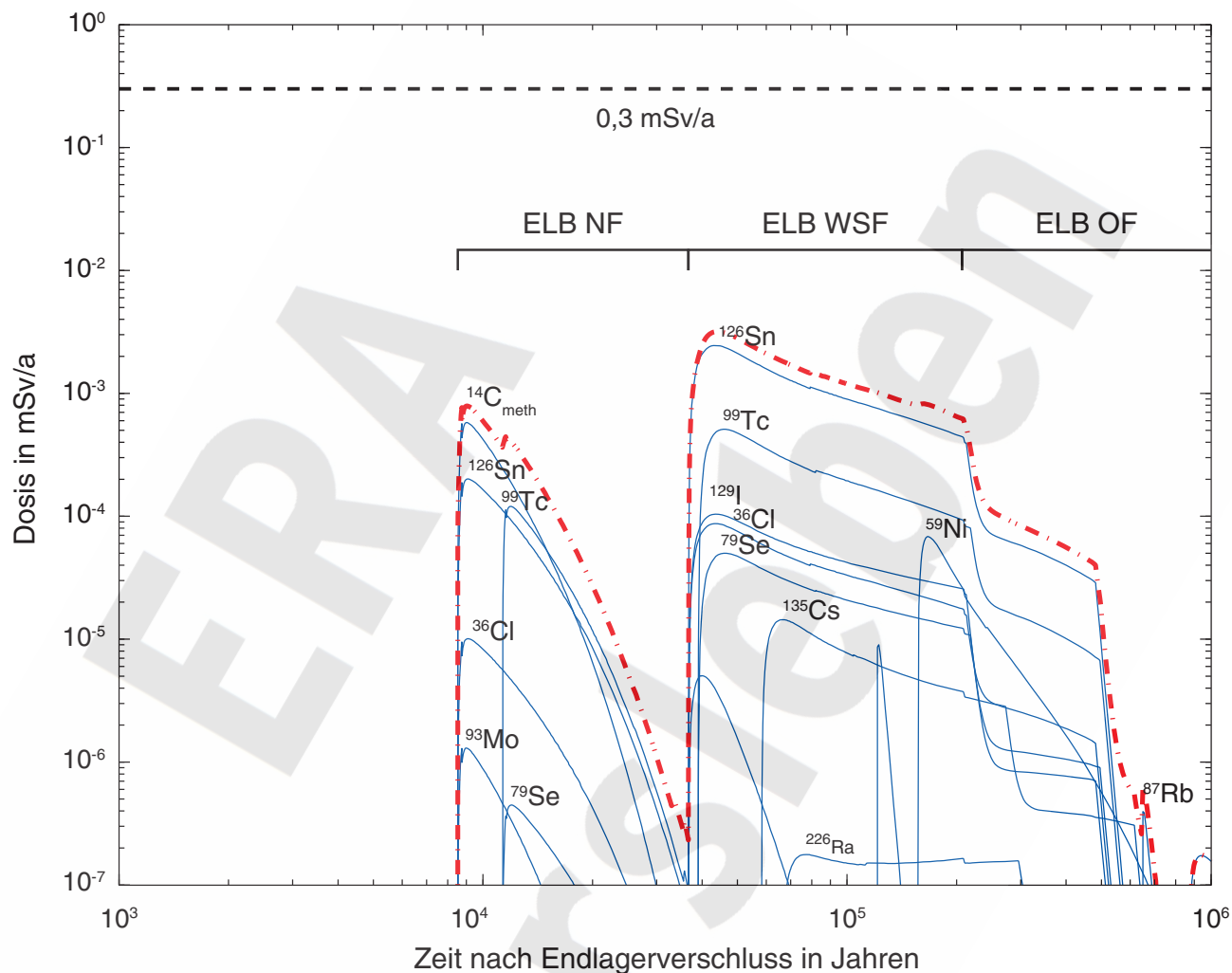


Abbildung 5-8 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Auflockerungszone um Abdichtung im Hauptanhydrit“ und den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“

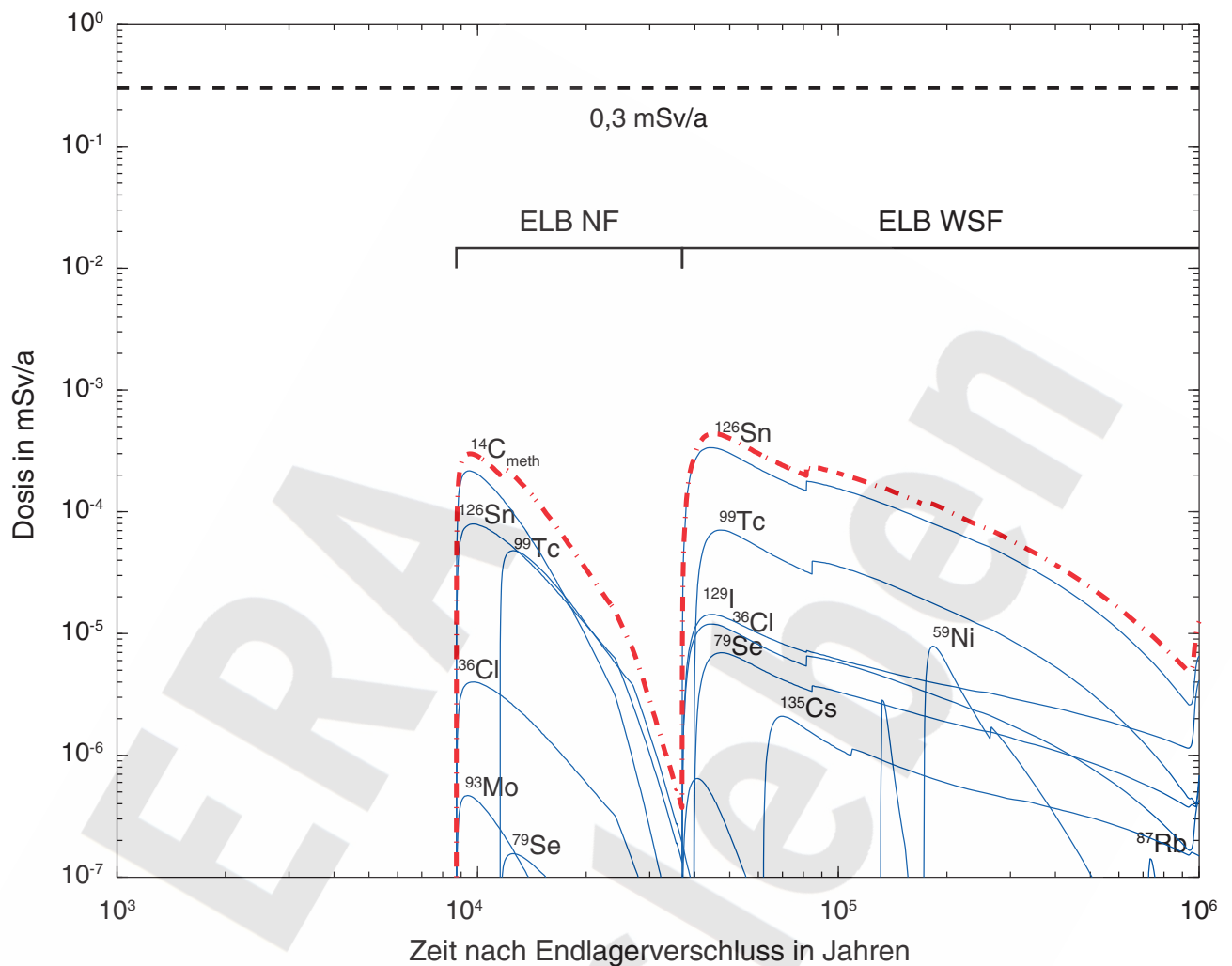


Abbildung 5-9 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Auflockerungszone um Abdichtung im Hauptanhydrit“ und den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“

5.1.2.3 Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube

In diesem Alternativszenario werden die Auswirkungen extremer Lösungszusammensetzungen in der Grube auf die Entwicklung des Endlagersystems und die Langzeitsicherheit untersucht. Betrachtet werden dabei zum einen gesättigte NaCl-Lösung, zum anderen IP21-Lösung. Im ersten Fall findet am Salzbeton keine Korrosion statt, während der Magnesiabeton mit maximaler Geschwindigkeit korrodiert. Im zweiten Fall ist die Lösung gegenüber Salzbeton am aggressivsten, während Magnesiabeton stabil ist. Beide Fälle sind besonders für den ELB OF interessant, da dieser auf der 2. Sohle mit Salzbeton und auf der 4. Sohle mit Magnesiabeton abgedichtet ist.

(a) Gesättigte NaCl-Lösung

Die Abdichtungen aus Salzbeton korrodieren in diesem Fall nicht. Für den abgedichteten Einlagerungsbereich ELB WSF resultiert daraus eine deutlich längere Phase des Lösungszutritts, die „oh-

ne Gaspolster“ erst nach etwa 80'000 Jahren abgeschlossen ist. Im ELB OF korrodiert zwar die Abdichtung aus Salzbeton auf der 2. Sohle nicht, dafür ist die Korrosion im Bereich der Magnesia-beton-Abdichtung auf der 4. Sohle deutlich stärker als im Referenzfall. So kann letztgenannte in der Phase des Lösungszutritts nahezu vollständig korrodieren. Im Fall „ohne Gaspolster“ ist als Ergebnis der ELB OF im betrachteten Alternativszenario bereits nach 180'000 Jahren und damit gut 30'000 Jahre früher als im Referenzfall mit Lösung gefüllt.

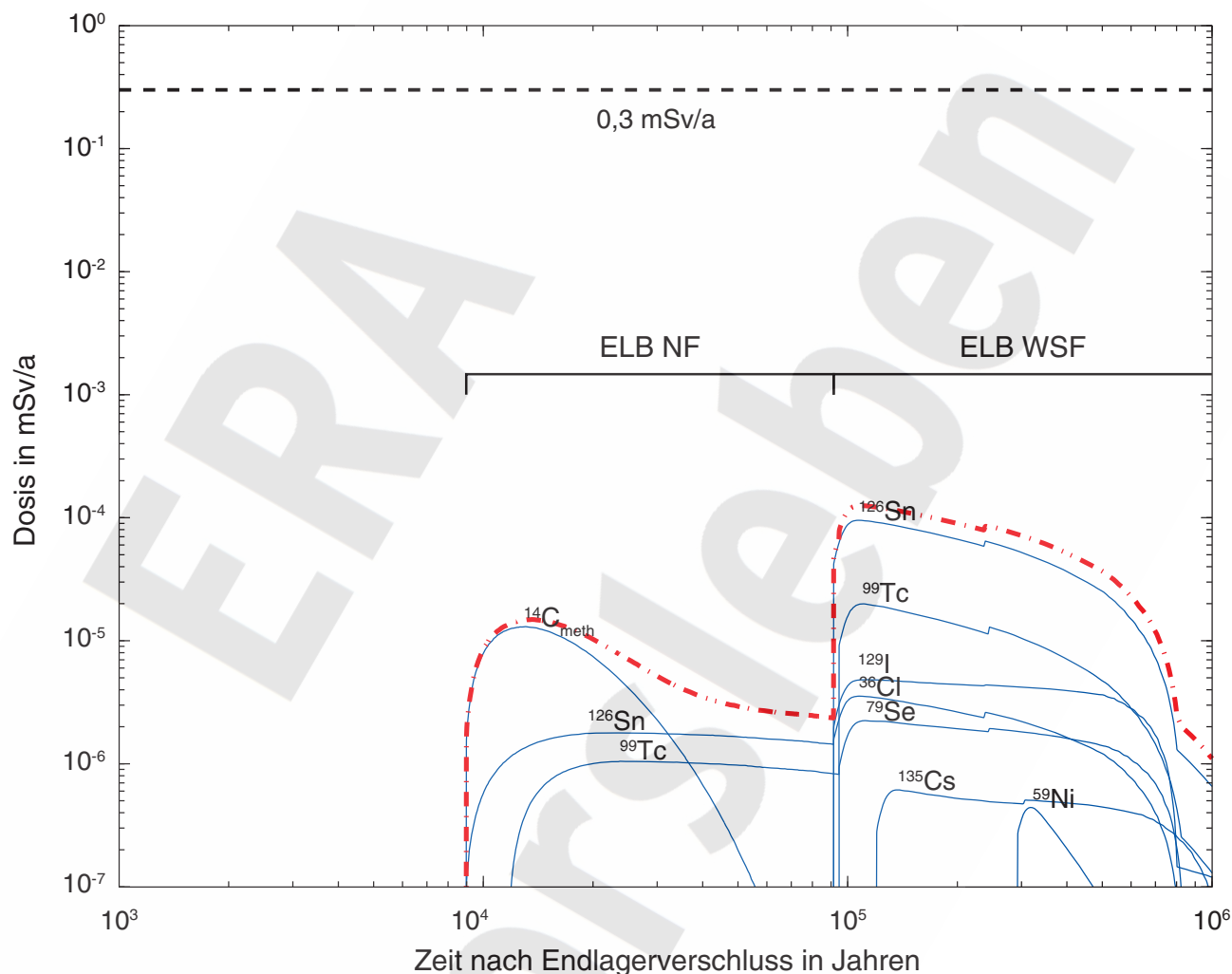


Abbildung 5-10 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube: NaCl-Lösung“ und den Fall „ohne Gaspolster“

Ähnliches gilt für die Fälle „mit Gaspolster“. Auch hier dauert aufgrund der fehlenden Korrosion der Abdichtungen die Phase des Lösungszutritts in den ELB WSF nach Volllaufen der Restgrube deutlich länger (92'000 Jahre gegenüber 28'000 Jahren im Referenzfall). Im ELB OF wirkt der mit der Gasbildung verbundene Druckanstieg dem Lösungszufluss über die Abdichtung auf der 4. Sohle und damit deren Korrosion entgegen. Da zudem die Abdichtung auf der 2. Sohle nicht korrodiert, ist im Fall „mit Gaspolster“ die Phase des Lösungszutritts zum ELB OF nur unwesentlich kürzer als im Referenzfall.

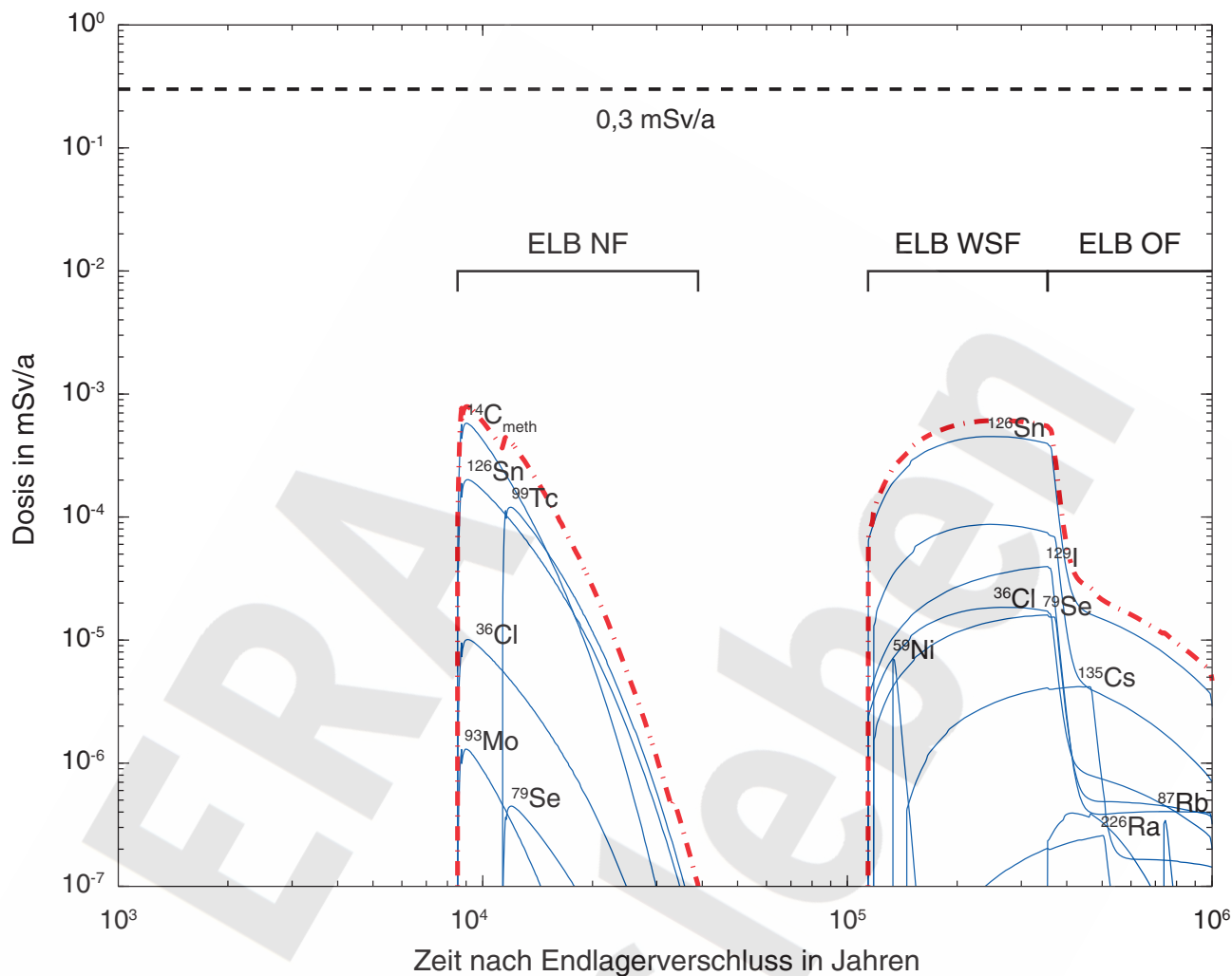


Abbildung 5-11 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube: NaCl-Lösung“ und den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“

Nach den Modellrechnungen setzt im Szenario mit NaCl-Lösung in der Grube die Freisetzung der Radionuklide aus dem ELB WSF in die Biosphäre im Vergleich zum Referenzfall deutlich später ein (ohne Gaspolster nach 92'000 Jahren und mit Gaspolster nach 120'000 Jahren, vgl. Abbildung 5-10 bis Abbildung 5-12). Zum einen dauert die Phase des Lösungszutritts aufgrund der fehlenden Korrosion der Abdichtung wesentlich länger, zum anderen zeigen die Modellrechnungen, dass der Radionuklidtransport entlang des Abdichtungssystems länger dauert als im Referenzfall. Dagegen unterscheidet sich die zeitliche Entwicklung der Radionuklidfreisetzung aus dem Ostfeld – ebenso wie die erreichten Maximalwerte – kaum von jener im Referenzfall (sowohl mit als auch ohne Gaspolster). Im Fall „ohne Gaspolster“ wird das Gesamtdosismaximum nach wie vor durch den Beitrag des ELB WSF bestimmt; es wird allerdings erst nach knapp 110'000 Jahren erreicht und ist unter dem Einfluss des radioaktiven Zerfalls etwa einen Faktor 3 niedriger als im Referenzfall (0,00013 mSv/a). Im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ wird im aktuellen Szenario das Gesamtdosismaximum neu durch den Beitrag des ELB NF mit $^{14}\text{CH}_4$ als dominierendem Radionuklid bestimmt. Der Wert von 0,0008 mSv/a wird nach 9'000 Jahren erreicht und ist etwa einen Faktor 4 geringer als im Referenzfall, wo das Dosismaximum nach 37'000 Jahren durch die Frei-

setzung aus dem ELB WSF erreicht wird. Dieses zweite Maximum tritt jetzt erst nach 260'000 Jahren mit einem Wert von 0,0006 mSv/a auf. Im Fall „mit Gasfluss“ ergibt sich ein Gesamtdosismaximum von 0,0003 mSv/a nach 190'000 Jahren. Dieser Wert wird durch das ^{126}Sn aus dem ELB WSF bestimmt und liegt rechnerisch nur geringfügig unter jenem im Referenzfall – auch wenn er erst 140'000 Jahre später erreicht wird.

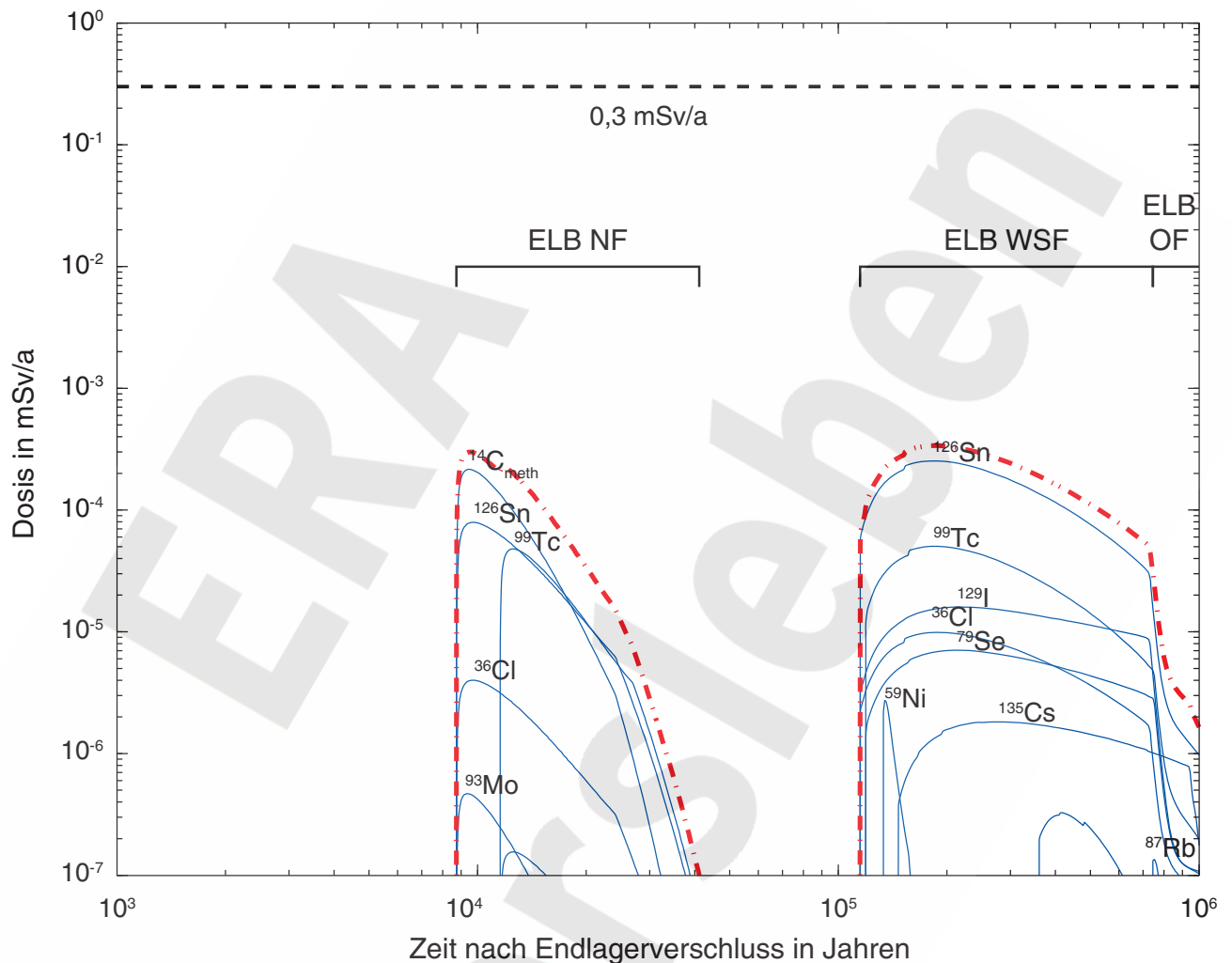


Abbildung 5-12 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube: NaCl-Lösung“ und den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“

(b) IP21-Lösung

Hier korrodiert die Abdichtung aus Magnesiabeton nicht, die übrigen Abdichtungen aus Salzbeton korrodieren dagegen stärker als im Referenzfall. Für den mit Bauwerken aus Salzbeton abgedichteten Einlagerungsbereich ELB WSF resultiert eine deutlich kürzere Phase des Lösungszutritts, die „ohne Gaspolster“ bereits nach etwa 10'000 Jahren abgeschlossen ist. Im ELB OF korrodiert nun die Abdichtung aus Salzbeton auf der 2. Sohle schneller als im Referenzfall, der Lösungszutritt durch die Abdichtung aus Magnesiabeton auf der 4. Sohle bleibt dagegen konstant gering. So kann die erstgenannte Abdichtung in der Phase des Lösungszutritts nahezu vollständig korrodieren.

ren. Im Fall „ohne Gaspolster“ ist als Ergebnis der ELB OF bereits nach 110'000 Jahren und damit gut 100'000 Jahre früher als im Referenzfall mit Lösung gefüllt.

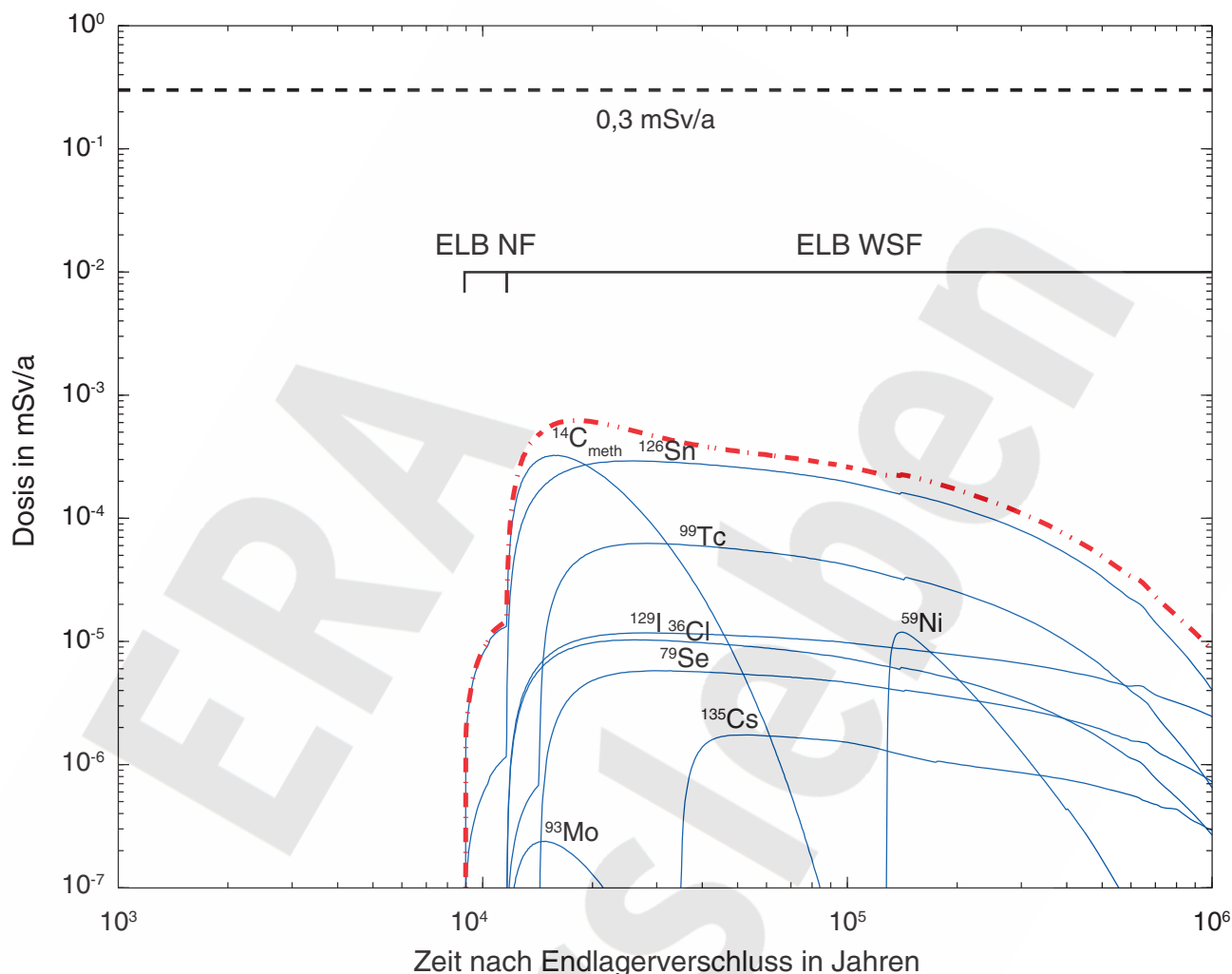


Abbildung 5-13 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube: IP21-Lösung“ und den Fall „ohne Gaspolster“

Ähnliches gilt für die Fälle „mit Gaspolster“. Auch hier ist aufgrund der verstärkten Korrosion der Abdichtungen des ELB WSF die Phase des Lösungszutritts in diesen Einlagerungsbereich deutlich früher abgeschlossen (nach 11'000 Jahre gegenüber 35'000 Jahren im Referenzfall). Im ELB OF wirkt der mit der Gasbildung verbundene Druckanstieg dem Lösungszufluss über die Abdichtung auf der 2. Sohle und damit deren Korrosion entgegen. Gesamthaft ist in den Fällen „mit Gaspolster“ die Phase des Lösungszutritts zum ELB OF nur unwesentlich kürzer als im Referenzfall.

Nach den Modellrechnungen setzt im Szenario mit IP21-Lösung in der Grube die Freisetzung der Radionuklide aus dem ELB WSF in die Biosphäre im Vergleich zum Referenzfall deutlich früher ein (ohne Gaspolster und mit Gaspolster jeweils nach ca. 12'000 Jahren). Die zeitliche Entwicklung und die erreichten Maximalwerte der Dosis aus dem Ostfeld unterscheiden sich in den Fällen „mit Gaspolster“ kaum von jenen im Referenzfall; ohne Gaspolster ist der Maximalwert des Dosisbeitrags aus dem ELB OF etwa doppelt so groß und wird deutlich früher erreicht (nach 170'000 Jah-

ren statt 320'000 a). Das Gesamtdosismaximum wird in allen Fällen durch das ^{126}Sn aus dem ELB WSF bestimmt, im Fall ohne Gaspolster gemeinsam mit ^{14}C -Methan (Abbildung 5-13 bis Abbildung 5-15). Ohne Gaspolster liegt das Maximum mit 0,0006 mSv/a gut einen Faktor 2 höher als im Referenzfall und wird bereits nach 18'000 Jahren erreicht. Im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ beträgt das Gesamtdosismaximum 0,006 mSv/a und tritt bereits nach 14'000 Jahren auf. Im Fall „mit Gasfluss“ ergibt sich ein Dosismaximum von 0,0007 mSv/a nach 92'000 Jahren. Die Maximalwerte „mit Gaspolster“ liegen rund 75% (ohne Gasfluss) bzw. 60% (mit Gasfluss) über den entsprechenden Werten im Referenzfall (Abbildung 5-13 bis Abbildung 5-15). Das Gaspolster im West-Südfeld ist im Fall „mit Gasfluss“ nach 220'000 Jahren verschwunden. Danach steigt die Auspressrate für Flüssigkeit aus dem ELB WSF sprunghaft an. In der Folge steigt auch die Summendosis nochmals auf etwa 0,00017 mSv/a an (Abbildung 5-15). Danach nimmt die Summendosis bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes kontinuierlich ab.

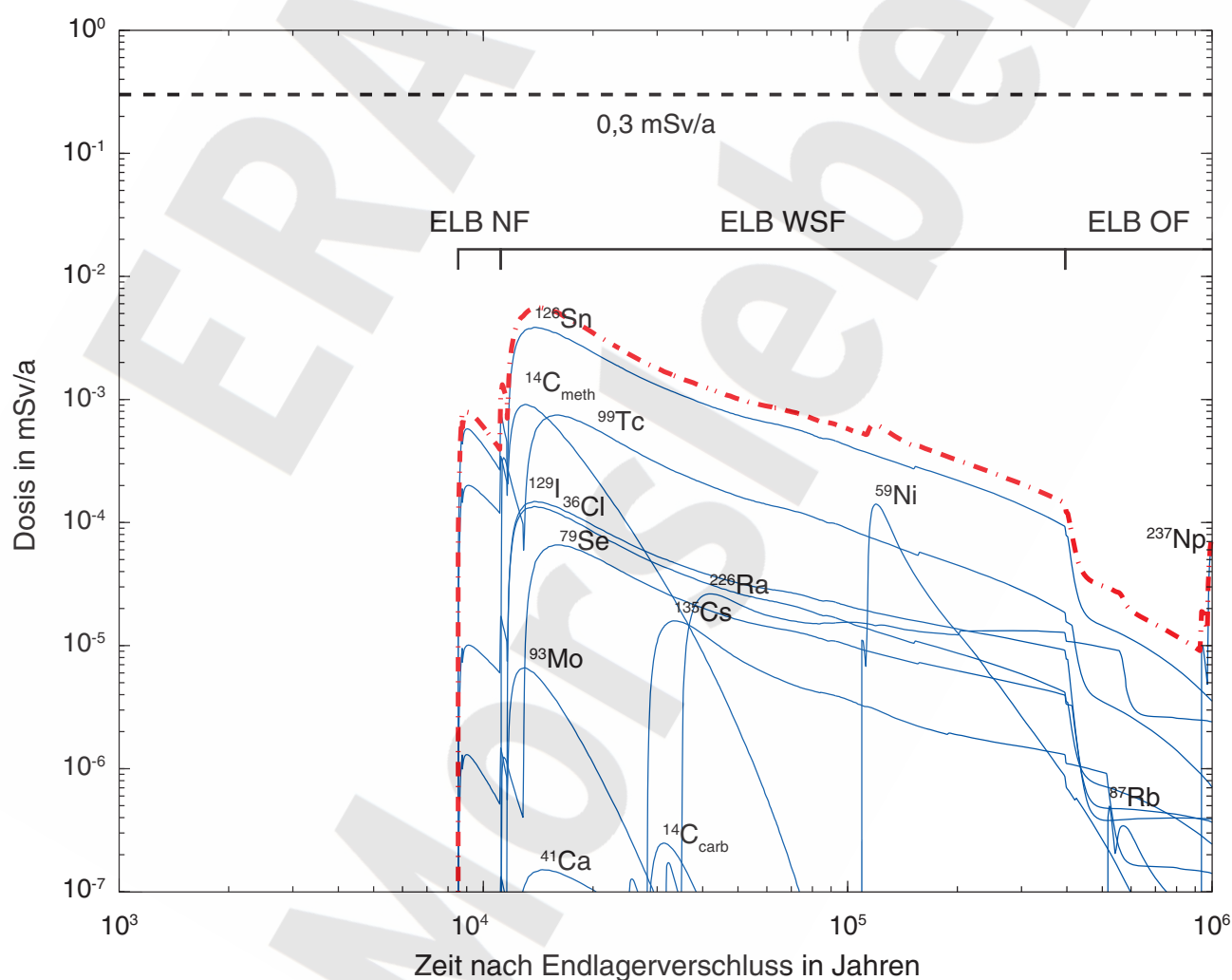


Abbildung 5-14 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube: IP21-Lösung“ und den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“

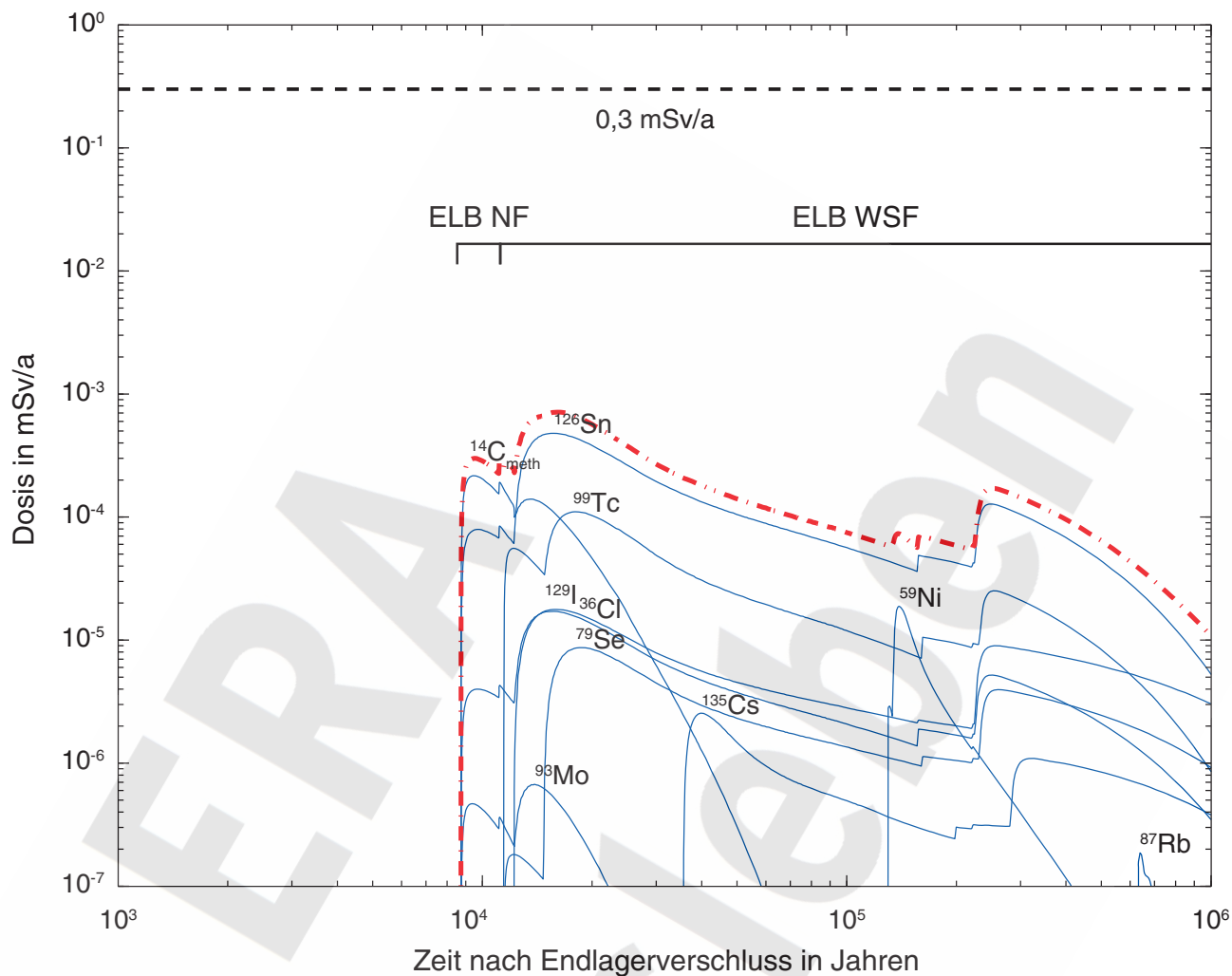


Abbildung 5-15 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Extreme Lösungszusammensetzung in der Grube: IP21-Lösung“ und den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass eine angenommene Zusammensetzung der Lösung in der Grube entsprechend NaCl-Lösung aufgrund der fehlenden Korrosion des Abdichtsystems des ELB WSF insgesamt zu niedrigeren maximalen Dosiswerten als im Referenzfall führt. Eine Lösungszusammensetzung entsprechend IP21-Lösung führt zur verstärkten Korrosion der Salzbeton-Abdichtungen, damit zu einer früheren Freisetzung der Radionuklide aus dem West-Südfeld und letztlich zu moderat (\sim Faktor 2) höheren maximalen Dosiswerten als im Referenzfall.

5.1.2.4 Unwirksame Abdichtungen

Dieses „what-if“-Szenario setzt voraus, dass die Einlagerungsbereiche West-Südfeld und Ostfeld nicht gegen den Zentralteil abgedichtet sind. Die Permeabilität der Abdichtsysteme beträgt $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$, was einem sehr hohen Wert (außerhalb der Bandbreite des Parameters K_1) entspricht. Aus der expliziten Betrachtung dieses Falls ergeben sich Hinweise über mögliche Auswirkungen nicht wirksamer Abdichtungen.

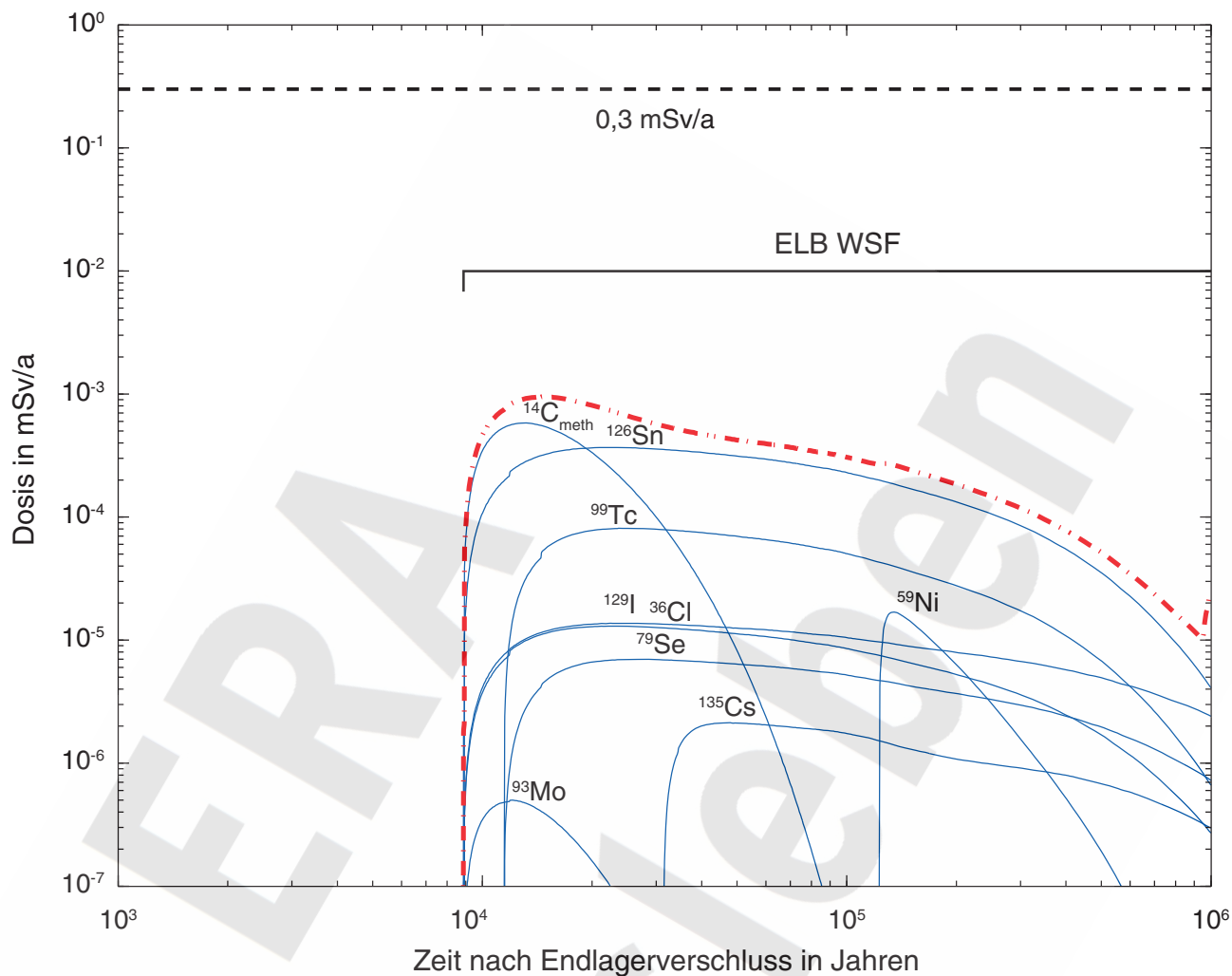


Abbildung 5-16 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Unwirksame Abdichtungen“ und den Fall „ohne Gaspolster“

Für den Fall „ohne Gaspolster“ beginnt im West-Südfeld schon nach 7'600 Jahren die Auspressphase, und nach 15'000 Jahren ist bereits das durch $^{14}\text{CH}_4$ bestimmte Gesamtmaximum der Dosis erreicht (Abbildung 5-16). Zusammen mit dem Beitrag aus dem Nordfeld resultiert ein Wert von 0,0009 mSv/a. Der Beitrag aus dem Ostfeld, der nach 11'000 Jahren beginnt und nach 26'000 Jahren mit $4 \cdot 10^{-5}$ mSv/a sein Maximum erreicht, trägt nur untergeordnet zur Gesamtdosis bei.

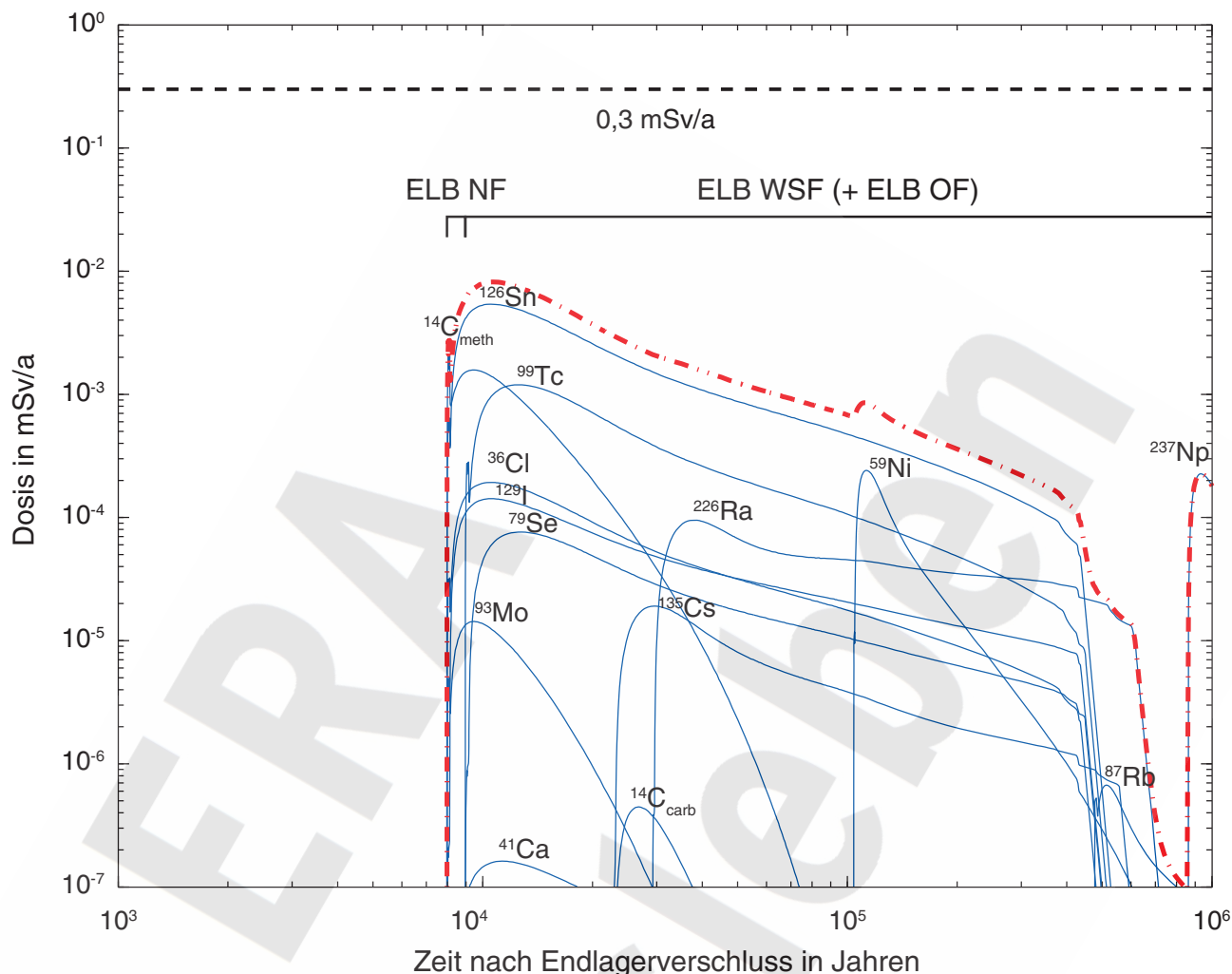


Abbildung 5-17 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Unwirksame Abdichtungen“ und den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“

Im Fall "mit Gaspolster, ohne Gasfluss" setzt die Auspressphase aus dem West-Südfeld wiederum sehr früh, nach 7'700 Jahren, ein. Die große Auspressrate aus dem ELB WSF aufgrund der hohen Gasbildung bewirkt dann, dass das Radionuklidinventar aus dem Nordfeld, das sich gemäß Modell zu dieser Zeit bereits vollständig im Mischungsbereich befindet, sehr schnell und mit hoher Rate durch Hutgestein und Deckgebirge in die Biosphäre ausgepresst wird. So kommt ein erstes frühes Maximum (rund 0,002 mSv/a bei ca. 8'100 Jahren) zustande. Der sich unmittelbar anschließende erneute Anstieg wird durch die Radionuklide aus dem West-Südfeld (durch ^{126}Sn bestimmt) verursacht; auch das Ostfeld trägt ab etwa 8'800 Jahren, ebenfalls durch ^{126}Sn bestimmt, zur Gesamtdosis bei. Das Maximum der Gesamtdosis von 0,008 mSv/a wird nach 11'000 Jahren erreicht (Abbildung 5-17).

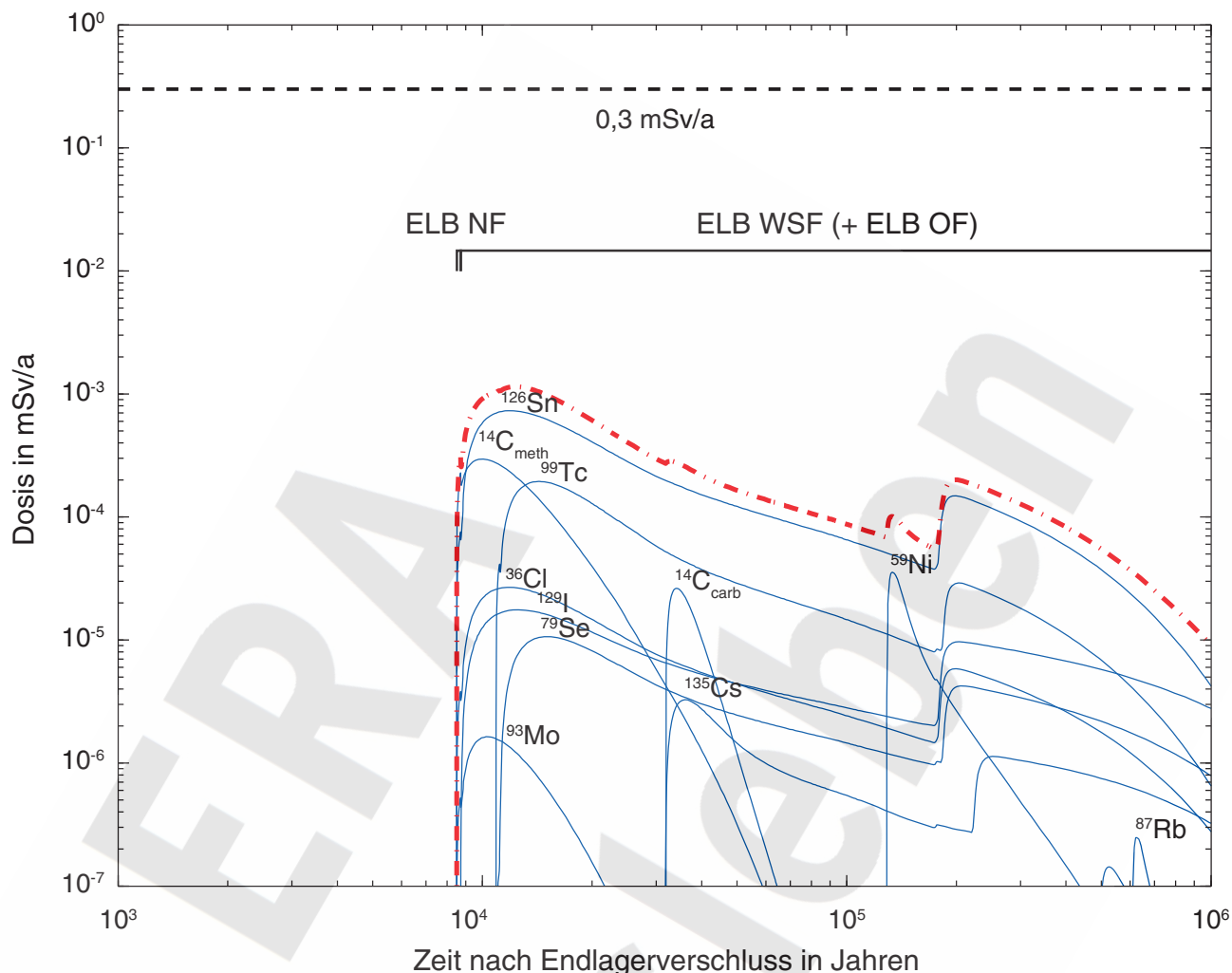


Abbildung 5-18 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Alternativszenario „Unwirksame Abdichtungen“ und den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“

Für den Fall "mit Gaspolster, mit Gasfluss" ist der zeitliche Verlauf der Dosis grundsätzlich ähnlich, jedoch mit um etwa eine Größenordnung niedrigeren Dosisbeiträgen (Abbildung 5-18). Die Summendosis erreicht hier ihr Maximum von 0,0011 mSv/a bei 12'000 Jahren. Der erneute Anstieg der Summendosis nach 170'000 a und das nach 190'000 Jahren folgende Maximum von 0,0002 mSv/a resultieren aus dem Verschwinden der Gasblase im West-Südfeld und dem damit verbundenen Anstieg in der Lösungsauspressung aus dem Einlagerungsbereich.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Szenario unwirksamer Abdichtungen zu Freisetzungen aus dem Endlager führt, die gegenüber dem Referenzszenario im ungünstigsten Fall („mit Gaspolster, ohne Gasfluss“) um etwa einen Faktor 2,5 höher sind. Damit liegen sie allerdings immer noch um mehr als anderthalb Größenordnungen (Faktor 36) unterhalb des Wertes von 0,3 mSv/a nach § 47, Abs. 1 StrlSchV. Damit zeigt sich, dass das System auch bei einem Totalausfall der Abdichtungen immer noch genügend Sicherheitsreserven aufweist – zumindest solange die anderen Parameter nicht ebenfalls und in extremer Weise vom Referenzdatensatz abweichen. Die hohen technischen Anforderungen an die Abdichtungen gemäß Verfüllplan ergeben sich aus

der erforderlichen Redundanz des Barrierensystems (vgl. die Ergebnisse der probabilistischen Rechnungen, insbesondere die Anhänge N und O).

5.1.2.4 Korrosion des Salzbetons in der übrigen Grube

Durch die Reaktion des Salzbetons mit magnesiumhaltiger Lösung kann dieser seine Stützwirkung als nicht kompaktierbarer Versatz verlieren. Wenn überhaupt, dann wird dies vor allem in den Abdichtungen und den durchströmten Bereichen in der übrigen Grube erfolgen, während die großen Mengen an Versatz in den Grubenbauen der übrigen Grube wegen der geringen Permeabilität des Materials und der kleinen oder fehlenden hydraulischen Gradienten unverändert bleiben. Im hier betrachteten alternativen Szenario wird untersucht, welche Auswirkungen zu erwarten wären, wenn der gesamte Salzbeton in der übrigen Grube nur die Stützwirkung von Salzgrus hätte.

Die Modellrechnungen ergeben, dass sich durch die zusätzliche Auspressung aufgrund der Konvergenz des umgewandelten Salzbetons der Volumenstrom aus der übrigen Grube um ca. 20% erhöht, von 7,6 m³/a auf 9,1 m³/a. Dies führt zu entsprechend früheren und höheren Radionuklidfreisetzungen in die Biosphäre. Dieser Effekt ist insgesamt gering, verglichen mit den Unterschieden, die allein aufgrund der Bandbreite für die Konvergenz der übrigen Grube (log-gleichverteilt, $1 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1} - 1 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ mit Referenzwert bei $4 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$) verursacht werden. Daher ist dieses Szenario auch durch die probabilistischen Rechnungen abgedeckt und braucht hier in Bezug auf die radiologischen Auswirkungen nicht weiter betrachtet zu werden.

5.1.2.5 Neue Wegsamkeiten durch das Hutgestein

Im Alternativszenario „Neue Wegsamkeiten durch das Hutgestein“ wird unterstellt, dass sich nach 30'000 Jahren im Hutgestein neue Wegsamkeiten bilden, welche zur Folge haben können, dass der Radionuklidtransport durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) ohne Sorption erfolgt. Bis zu diesem Zeitpunkt erfolge der Radionuklidtransport durch Hutgestein und Deckgebirge wie im Referenzfall entlang des modellhaften Transportpfads (mit Sorption).

Die Modellierung dieses Szenarios, bei dem sich zu einem gewissen Zeitpunkt der Transportpfad im Hutgestein/Deckgebirge ändert, wird zweistufig durchgeführt. Für die ersten 30'000 Jahre ist die Sorption entlang des modellhaften Transportpfads zu berücksichtigen. Hierzu werden daher Rechnungen mit den Referenzparametern gemäß Anhang C durchgeführt. Für Zeiten über 30'000 Jahren werden Rechnungen durchgeführt, bei denen die Sorption entlang des modellhaften Transportpfads durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) auf Null gesetzt wird. Das Ergebnis der Gesamtentwicklung für das ERAM lässt sich aus der entsprechenden Kombination der beiden Simulationen ableiten. Es werden daher in diesem Abschnitt nur die Unterschiede zu den Ergebnissen der zuvor geschilderten Referenzfälle zu Zeiten größer als 30'000 Jahre beschrieben. Als Folge der fehlenden Transportverzögerung durch Sorption im Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) kommt es zu einer früheren und - im Vergleich zum Fließweg entlang des modellhaften Transportpfads mit Sorption - verstärkten Freisetzung in die Biosphäre. Dies betrifft vor allem die am Grauen Salzton der Schichtenfolge DGL (repräsentativ für



die modellhafte Transportstrecke) gut sorbierenden Elemente Uran und Thorium mit ihren Radionukliden ^{238}U , ^{234}U und ^{230}Th , welche Vorläufer des ^{226}Ra sind. Zu den hier betrachteten Zeiten nach 100'000 Jahren und ohne Sorption im Grubengebäude und im Hutgestein/Deckgebirge sind diese Radionuklide bei der Freisetzung in das oberflächennahe Grundwasser praktisch im säkularen Gleichgewicht. Mit dem in Anhang A (Kapitel A.10) beschriebenen Algorithmus wird implizit und konservativ der Aufbau von Folgenukliden im oberflächennahen Grundwasser durch Anpassung der Dosisumwandlungsfaktoren berücksichtigt. Da jedes dieser Radionuklide Vorläufer von ^{226}Ra ist und dieses im säkularen Gleichgewicht die radiologischen Auswirkungen der 4N+2-Kette dominiert, wird im vorliegenden Fall der Dosisbeitrag des Tochternuklids ^{226}Ra dreimal gezählt, d.h. die Summendosis wird durch die im Modell getroffenen Vereinfachungen um den Faktor 2 – 3 überschätzt.

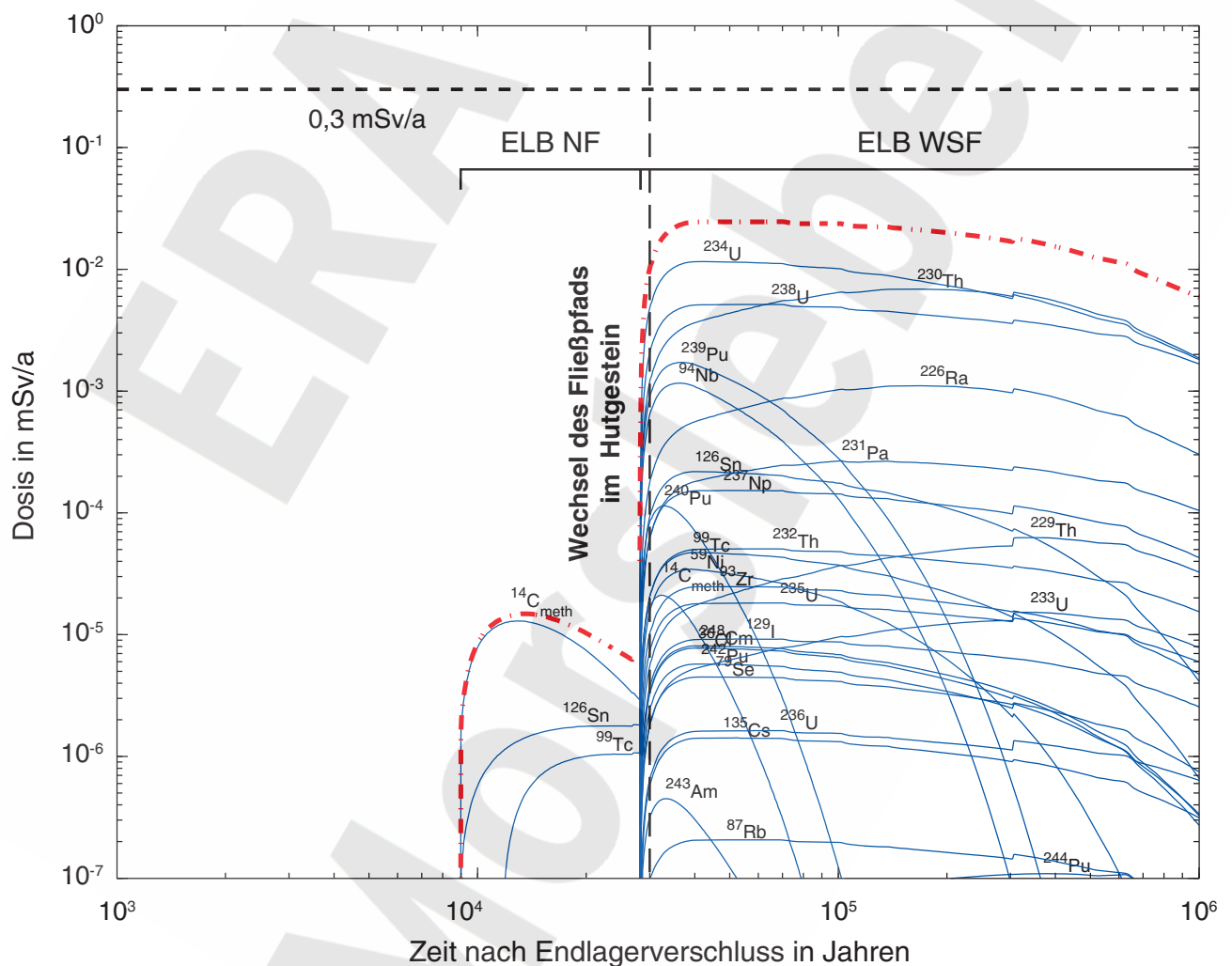


Abbildung 5-19 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Szenario einer neuen Wegsamkeit durch das Hutgestein und den Fall „ohne Gaspolster“

Im Fall „ohne Gaspolster“ kommt es nach etwa 27'000 Jahren²⁹, dem Beginn der Auspressphase des ELB WSF, sehr bald zur Freisetzung der Radionuklide aus diesem Einlagerungsbereich in die Biosphäre, und die Summendosis nimmt sehr schnell zu (Abbildung 5-19). Dies führt zur maximal auftretenden Strahlenexposition von 0,025 mSv/a nach 70'000 Jahren, die hauptsächlich aus den Beiträgen von ²³⁸U, ²³⁴U und ²³⁰Th resultiert. Die Strahlenexposition nimmt bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes nur noch wenig ab.

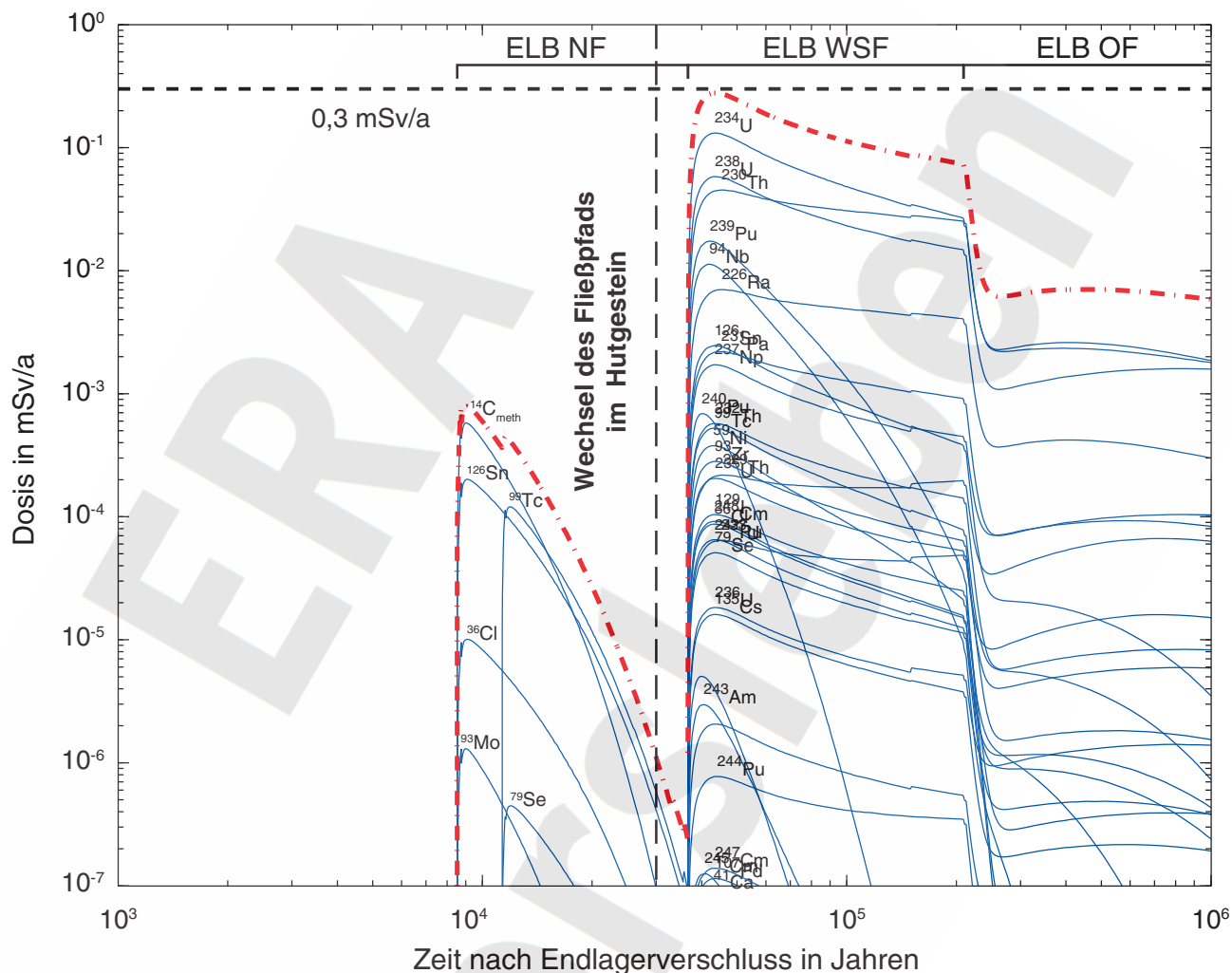


Abbildung 5-20 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Szenario einer neuen Wegsamkeit durch das Hutgestein und den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“

Im zweiten Fall, demjenigen „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“, kommt es nach etwa 37'000 Jahren³⁰ zur Freisetzung der Radionuklide aus dem West-Südfeld (Beginn der Auspressphase, verzögert um die Transportzeit durch das Hutgestein und Deckgebirge), und die Summendosis nimmt

²⁹ Für die Abbildung 5-19 wird der Wechsel zwischen den Fließwegen bereits ab dem Beginn der Auspressphase aus dem ELB WSF vollzogen, was es ermöglicht, den Anstieg der Radionuklidfreisetzung aus dem ELB WSF stetig darzustellen.

³⁰ Für Abbildung 5-20 und Abbildung 5-21 wird der Wechsel zwischen den Fließwegen erst ab dem Beginn der Auspressphase aus dem ELB WSF vollzogen, was es ermöglicht, das Abklingen der Radionuklidfreisetzung aus dem ELB NF stetig darzustellen.

wiederum rasch zu (Abbildung 5-20). Dies führt zur maximal auftretenden Strahlenexposition von 0,29 mSv/a nach 43'000 Jahren, die ebenfalls hauptsächlich aus dem Beitrag von ^{238}U , ^{234}U und ^{230}Th resultiert. Die Freisetzung aus dem Ostfeld folgt auf deutlich tieferem Niveau ab ca. 150'000 Jahren; nach der vollständigen Auspressung der radionuklidhaltigen Lösung aus dem West-Südfeld nach etwa 210'000 Jahren entspricht die resultierende Summendosis im weiteren Verlauf bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes dem Dosisbeitrag des Ostfelds.

Beim Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ beginnt die Freisetzung aus dem West-Südfeld ebenfalls bei ca. 37'000 Jahren (Abbildung 5-21). Das Maximum der Dosis von 0,038 mSv/a wird nach knapp 45'000 Jahren erreicht. Der Beitrag des Ostfeldes ist im Verlauf der Summendosis ab 150'000 Jahren zu erkennen. Nachdem das Gaspolster aus dem West-Südfeld durch die Konvergenz vollständig ausgepresst ist, steigt nach 950'000 Jahren die Summendosis nochmals erkennbar an, erreicht aber nicht mehr das Niveau des Gesamtdosismaximums.

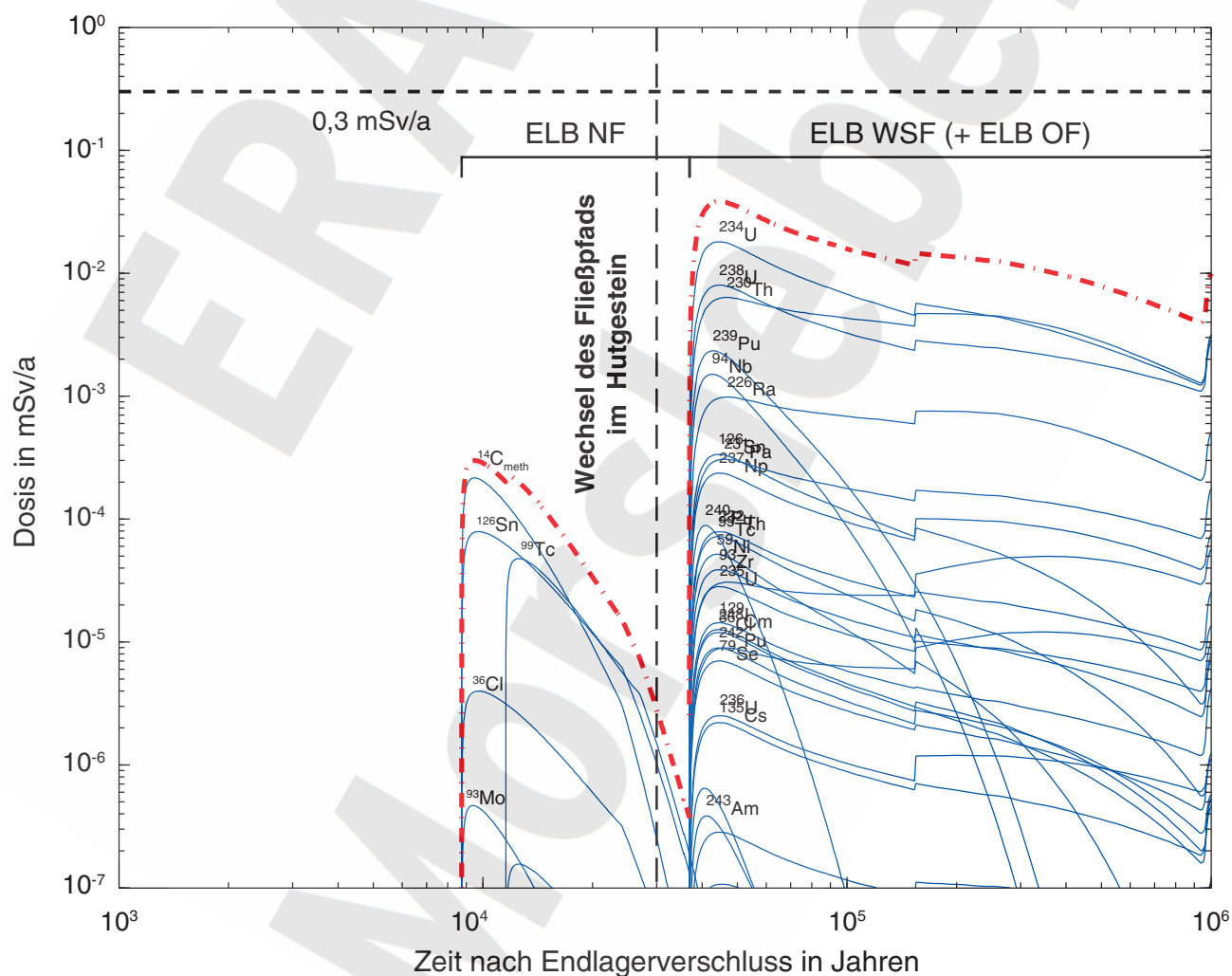


Abbildung 5-21 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Szenario einer neuen Wegsamkeit durch das Hutgestein und den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“

5.1.2.6 Mangelhafte Abdichtung Schacht Bartensleben

Das „what-if“-Szenario „Mangelhafte Abdichtung Schacht Bartensleben“ wurde in Kapitel 3.5.9 charakterisiert und begründet. Im hypothetischen Fall, dass das Verschlusssystem des Schachtes Bartensleben mangelhaft ist und deshalb gegenüber der Planung einen signifikant reduzierten hydraulischen Widerstand aufweist, läuft der ELB WSF durch Lösungszutritt entlang des Schachtes voll. Für die Analyse des Systemverhaltens wird in diesem Szenario unterstellt, dass die Zutrittsrate bis $100 \text{ m}^3/\text{a}$ betragen kann. Je nach Rate des Lösungszutritts und Konvergenzrate der Grubenbaue im ELB WSF dauert es mehrere 1'000 Jahre oder länger, bis der ELB WSF vollgelaufen ist. Beispielsweise ergeben eine Zutrittsrate von $100 \text{ m}^3/\text{a}$ und die Referenzkonvergenzrate gemäß Tabelle 4-3 für die Grubenbaue im ELB WSF eine Dauer des Volllaufens von rund 4'000 Jahren.

Im Referenzszenario dauert die Korrosion des Abdichtsystems des ELB WSF bei hydrostatischem Lösungsdruck auf der Seite der Restgrube und anhaltend niederem Druck auf der anderen Seite (Fall „oo“) rund 19'000 Jahre (vgl. Kapitel 5.1.1.1). Bei Variation der maßgebenden Parameter liegt die Korrosionsdauer im Bereich von einigen 1'000 Jahren bis einigen 10'000 Jahren. Unter den im vorliegenden „what-if“-Szenario zu unterstellenden Verhältnissen ist die Korrosionsdauer des Abdichtsystems zwischen dem ELB WSF und dem Zentralteil vergleichbar oder länger.

Sofern nach der Korrosion des Abdichtsystems die Restgrube ebenfalls durch den Lösungszutritt entlang des Schachtes vollläuft oder dieser – trotz Auftreten eines unabhängigen Lösungszutritts aus dem Hutgestein in die Restgrube – den zeitlichen Verlauf des Volllaufens der Restgrube bestimmt³¹, dauert es nochmals einige 1'000 Jahre bis einige 10'000 Jahre, bis auch die Restgrube vollgelaufen ist.

In Kapitel 3.5.9 wurde dargelegt, dass zwei verschiedene Systemzustände mit Auspressen von Lösung entlang des Schachtes zu analysieren sind, (a) ein Systemzustand, bei dem das Abdichtsystem des ELB WSF nicht durchkorrodiert ist und „nur“ die Konvergenz der Grubenbaue im ELB WSF die Auspressrate bestimmt, und (b) ein Systemzustand, bei dem das Abdichtsystem des ELB WSF durchkorrodiert ist und zusätzlich auch die Konvergenz der Grubenbaue in der Restgrube zur Lösungsauspressung entlang des Schachtes beiträgt. Der Systemzustand (b) kann erst deutlich später als der Zustand (a) auftreten. Die beiden zu analysierenden Systemzustände können nun mit Hilfe von Modellergebnissen von PROSA für die möglichen Auspressraten konkretisiert werden:

- (a) Lösungsauspressung ab ca. 4'000 Jahren mit einer Auspressrate bis etwa $1 \text{ m}^3/\text{a}$
- (b) Lösungsauspressung ab etwa 20'000 Jahren mit einer Auspressrate bis etwa $8 \text{ m}^3/\text{a}$

Wie im Anhang S gezeigt wird, führt eine Lösungsauspressung entlang des Schachtes mit Raten von etwa $1 \text{ m}^3/\text{a}$ bis etwa $8 \text{ m}^3/\text{a}$ nicht zu einem Austrag von Grubenlösung entlang des Schachtes bis in das oberflächennahe Grundwasser. Die entlang der Schachtröhre hochgepresste Grubenlösung führt aufgrund ihrer höheren Dichte zu einem derart hohen Druckanstieg in der Schachtröhre



an der Basis des Deckgebirges, dass die ausgepresste Grubenlösung in den Schilfsandstein³² abfließt.

Die hydraulischen Druckverhältnisse im Schilfsandstein sind hydrostatisch bis schwach artesisch (hydraulischer Referenzfall), artesische Verhältnisse bis zu einem hydraulischen Überdruck von etwa 100 kPa sind nicht ausgeschlossen (vgl. Anhang S). Es werden deshalb folgende Fälle betrachtet:

- hydraulischer Referenzfall: hydrostatische bis schwach artesische Verhältnisse, hydraulischer Überdruck gegenüber hydrostatischen Verhältnisse $\Delta p_{\text{nat}} \leq 20 \text{ kPa}$
- weniger wahrscheinlich: mäßig artesische Verhältnisse $\Delta p_{\text{nat}} = 50 \text{ kPa}$
- wenig wahrscheinlich: relativ stark artesische Verhältnisse $\Delta p_{\text{nat}} = 100 \text{ kPa}$

Bei einer Auspressrate von $1 \text{ m}^3/\text{a}$ steigt die Grubenlösung³³ im hydraulischen Referenzfall höchstens bis in eine Teufe von 150 m, bei mäßig artesischen Verhältnissen bis in eine Teufe von 140 m bis 120 m und bei relativ stark artesischen Verhältnissen bis in eine Teufe von 110 m bis 90 m. Das Hochpressen der Grubenlösung hängt dabei nur mäßig von der hydraulischen Leitfähigkeit des Schilfsandstein ab. Bei einer Auspressrate von $8 \text{ m}^3/\text{a}$ ist diese Abhängigkeit stärker. Beim Referenzwert der Transmissibilität (d.h. dem Produkt aus Permeabilität und Mächtigkeit) des Schilfsandstein erreicht Grubenlösung in den drei betrachteten Fällen des artesischen Drucks im Schilfsandstein die Teufen von 140 m, 120 m und 90 m. Selbst bei einer um den Faktor 3 reduzierten Schilfsandstein-Transmissibilität und gleichzeitig relativ stark artesischen Verhältnissen bleibt die Grubenlösung noch unterhalb der Süß-/Salzwassergrenze in rund 40 m Teufe. Diese Ergebnisse erlauben die bereits oben formulierte Schlussfolgerung, dass ein Austrag von Grubenlösung entlang des Schachtes bis in das oberflächennahe Grundwasser bei Auspressraten von etwa $1 \text{ m}^3/\text{a}$ oder mehr ausgeschlossen werden kann.

Bei artesischen Verhältnissen im Schilfsandstein und kleinen Auspressraten entlang des Schachtes kann der Anstieg der Lösungsdichte in der Schachtröhre jedoch derart gering sein, dass der Lösungsfluss entlang des Schachtes nach oben nicht zum Stillstand kommt und die ausgepresste Grubenlösung bis in das oberflächennahe Grundwasser hochgeschleppt wird. Es gibt einen Maximalwert der Lösungsauspressrate, welcher noch zu einem Austrag entlang des Schachtes in das oberflächennahe Grundwasser führt; dieser wird mit $Q_{0,\text{max}}$ bezeichnet. Ein Austrag von Grubenlösung (und damit auch von gelösten Radionukliden) entlang der Schachtröhre ist nur möglich, falls (i) artesische Verhältnisse vorliegen und (ii) die Lösungsauspressrate entlang des Schachtes aus der Grube den Maximalwert $Q_{0,\text{max}}$ nicht übersteigt. Der Maximalwert $Q_{0,\text{max}}$ hängt neben dem artesischen Überdruck im Schilfsandstein und dessen Transmissibilität auch von der querschnittsgemittelten Permeabilität der Schachtröhre (einschließlich der angrenzenden Auflockerungszone) oberhalb des Schilfsandstein (und damit oberhalb des Verschlusssystem) ab. Der Referenzwert dieser

³¹ In Kapitel 3.5.9 wurde begründet, dass im „what-if“-Szenario „Mangelhafte Abdichtung Schacht Bartensleben“ bei einem gleichzeitigen relevanten Lösungszutritt aus dem Hutgestein in die Restgrube nicht von einer Korrosion des Abdichtsystems des ELB WSF auszugehen ist.

³² hydraulisch relativ durchlässige Einheit des Deckgebirges, die am Ort des Schachtes Bartensleben unmittelbar auf dem Hutgestein aufliegt

³³ einschließlich der in Anhang S definierten Übergangszone zwischen der Grubenlösung und der darüber liegenden, unbeeinflussten Deckgebirgslösung in der Schachtröhre



Permeabilität beträgt 10^{-15} m^2 (entsprechend einem k_f -Wert von rund 10^{-8} m/s), als Maximalwert für die Analyse wird 10^{-14} m^2 angenommen.

Die Berechnung der maximalen Auspressrate $Q_{0,\text{max}}$, welche unter den verschiedenen möglichen Bedingungen noch zu einem Austrag von Grubenlösung entlang der Schachtröhre bis in das oberflächennahe Grundwasser führt, ist in Anhang S, Kapitel S.4, beschrieben. Für die radiologische Bewertung des „what-if“-Szenarios wird angenommen, dass

- wahrscheinlich schwach artesische, weniger wahrscheinlich mäßig artesische und wenig wahrscheinlich relativ stark artesische Verhältnisse im Schilfsandstein vorliegen,
- die Transmissibilität des Schilfsandstein dem Referenzwert entspricht (die Abhängigkeit der Ergebnisse von dieser Größe ist gering),
- die querschnittgemittelte Permeabilität der Schachtröhre oberhalb des Verschlussystems wahrscheinlich dem Referenzwert entspricht und mit geringer Wahrscheinlichkeit um den Faktor 10 höher ist,
- Grubenlösung mit der fallspezifischen Rate $Q_{0,\text{max}}$ entlang des Schachtes aus der Grube ausgepresst wird,
- die Radionuklidkonzentration in der ausgepressten Lösung unmittelbar oberhalb des Verschlussystems dem Verhältnis des Radionuklidinventars und des Lösungsvolumens im ELB WSF zum Zeitpunkt 4'000 Jahre nach Endlagerverschluss entspricht,
- die Radionuklide ab dem Zeitpunkt 4'000 Jahre nach Endlagerverschluss ohne Rückhaltung durch Sorption³⁴ entlang der Schachtröhre in das oberflächennahe Grundwasser transportiert werden (Transportdistanz 160 m, transportwirksamer Radius 4 m, transportwirksame Porosität 10%, fallspezifischer Lösungsfluss),
- die in das oberflächennahe Grundwasser freigesetzte radionuklidhaltige Lösung dort in einem verdünnungswirksamen Grundwasserfluss von $10'000 \text{ m}^3/\text{a}$ (untere Grenze der Bandbreite des Parameters Q_{GW} , vgl. Tabelle 4-1) verdünnt wird und
- die Strahlenexposition aufgrund der berechneten Radionuklidkonzentration im oberflächennahen Grundwasser unter Einbezug aller Expositionspfade mit Hilfe der Dosiskonversionsfaktoren gemäß [Pröhl & Gehring 2002] ermittelt wird.

Die Ergebnisse für $Q_{0,\text{max}}$, für die Transportzeit³⁵ entlang der Schachtröhre und für die resultierende Strahlenexposition sind in Tabelle 5-1 für die drei betrachteten Fälle der artesischen Verhältnisse und die beiden betrachteten Fälle der Schachtröhrenpermeabilität zusammengestellt.

Eine mangelhafte Abdichtung des Schachtes Bartensleben kann nicht zu einer radiologisch relevanten Freisetzung von Radionukliden entlang der Schachtröhre führen. Unter plausiblen Verhältnissen in Bezug auf den ungestörten hydraulischen Druck im Schilfsandstein und die hydraulische Leitfähigkeit der Schachtröhre oberhalb des Verschlussystems ergeben sich rechnerisch Strahlenexpositionen, die um den Faktor 100 oder mehr unter dem Wert von § 47 StrlSchV liegen.

³⁴ Diese Annahme ist konservativ. Für die Verfüllung der Schachtröhre ist über einen weiten Bereich ein Mineralgemisch vorgesehen, welches Bentonit enthält und somit sorbierend wirkt [ERCOSPLAN 2004].

³⁵ Die Transportzeit entlang der Schachtröhre lässt sich nicht aus $Q_{0,\text{max}}$ ableiten; sie hängt im Wesentlichen vom Lösungszutritt aus dem Schilfsandstein in die Schachtröhre (in Anhang S mit Q'_{kms} bezeichnet) ab.



Selbst bei Kumulierung von mehreren unwahrscheinlichen Bedingungen zusätzlich zur hypothetischen Annahme eines mangelhaften Schachtverschlusses (relativ stark artesische Verhältnisse im Schilfsandstein und relativ hoch durchlässige Schachtröhre oberhalb des Verschlussystems) ergibt sich noch ein Wert unterhalb von 0,3 mSv/a.

Tabelle 5-1 Ergebnisse für das „what-if“-Szenario „Mangelhafte Abdichtung Schacht Bartensleben“: maximale Lösungsauspressrate aus der Grube mit Austrag entlang der Schachtröhre in das oberflächennahe Grundwasser ($Q_{0,max}$), Transportzeit entlang der Schachtröhre, potentielle Strahlenexposition

	Querschnittgemittelte Permeabilität der Schachtröhre oberhalb des Verschlussystems	
	Referenzfall $k_S = 10^{-15} \text{ m}^2$	Variation $k_S = 10^{-14} \text{ m}^2$
Hydraulischer Referenzfall ($\Delta p_{nat} = 20 \text{ kPa}$)	3 l/a 9000 a 0,00013 mSv/a	20 l/a 1000 a 0,002 mSv/a
Mäßig artesische Verhältnisse ($\Delta p_{nat} = 50 \text{ kPa}$)	20 l/a 3500 a 0,0014 mSv/a	200 l/a 500 a 0,023 mSv/a
Relativ stark artesische Verhältnisse ($\Delta p_{nat} = 100 \text{ kPa}$)	100 l/a 1800 a 0,009 mSv/a	800 l/a 200 a 0,10 mSv/a

5.1.2.7 Instantan vollgelaufene übrige Grube

In einem weiteren „what-if“-Szenario werden die Auswirkungen untersucht, die ein hypothetisches, extrem rasches Volllaufen der übrigen Grube zur Folge hätte. Dieses Szenario unterscheidet sich vom Referenzszenario lediglich dadurch, dass von einer vollgelaufenen übrigen Grube unmittelbar nach Verschluss des Endlagers ausgegangen wird. Dadurch wirken alle in Kapitel 3.3.1 erwähnten Prozesse vor dem Volllaufen der übrigen Grube nicht. Modelltechnisch wird das Szenario durch eine sehr kurze ($\leq 0,1$ Jahr) Dauer der Phase des Volllaufens der übrigen Grube realisiert.

Im Fall „ohne Gaspolster“ setzt die Freisetzung der Radionuklide in die Biosphäre nach 1'100 Jahren ein. Diese Freisetzung führt zu einem ersten Dosismaximum von $3 \cdot 10^{-5} \text{ mSv/a}$ nach 5'000 Jahren, dominiert durch $^{14}\text{CH}_4$ aus dem Nordfeld (Abbildung 5-22). Nach etwa 21'000 Jahren kommt es zur Freisetzung der Radionuklide aus dem West-Südfeld. Diese führt nach 30'000 Jahren zum Gesamtdosismaximum von $0,0003 \text{ mSv/a}$, welches durch ^{126}Sn bestimmt wird, und rechnerisch leicht über dem Dosismaximum im Referenzszenario liegt. Der Einlagerungsbereich Ostfeld liefert ab 300'000 Jahren mit einem Maximalwert von $6 \cdot 10^{-6} \text{ mSv/a}$ einen nur unbedeutenden Beitrag zur Strahlenexposition.

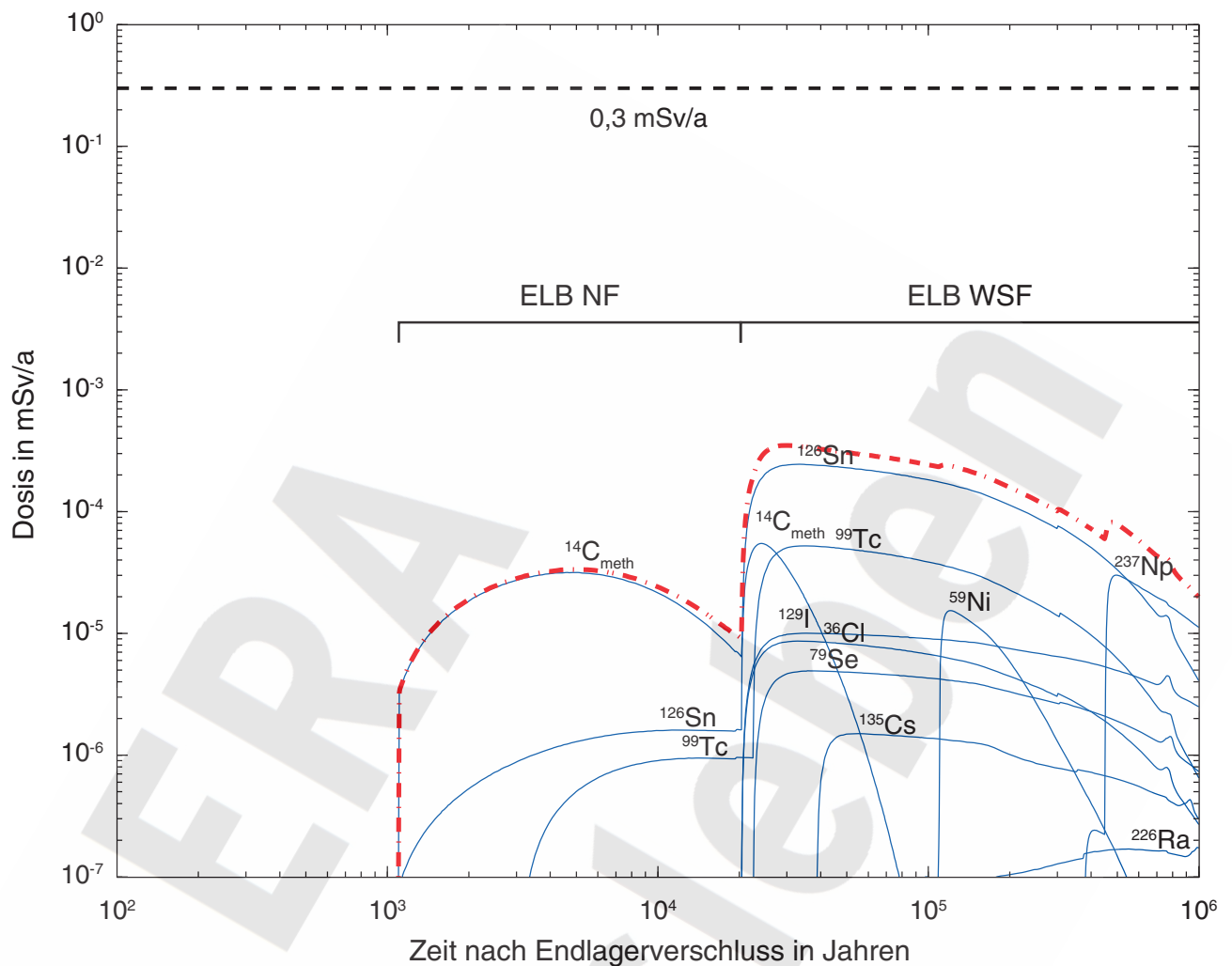


Abbildung 5-22 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Szenario „Instantanes Volllaufen der übrigen Grube“ und den Fall „ohne Gaspolster“

Im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ beginnt die Freisetzung der Radionuklide in die Biosphäre bereits nach 700 Jahren. Anders als im Referenzfall ist das erste, durch $^{14}\text{CH}_4$ aus dem Nordfeld bestimmte Dosismaximum von 0,002 mSv/a nach knapp 1'000 Jahren bereits das Gesamtdosismaximum (Abbildung 5-23). Das West-Südfeld trägt ab etwa 30'000 Jahren zur Gesamtdosis bei, was zu einem relativen Maximum nach 40'000 Jahren in Höhe von 0,0016 mSv/a, also nur halb so groß wie im Referenzszenario, führt. Der Grund dafür liegt zum einen in der größeren Lösungsmenge, die in den ELB WSF eindringt, und der daraus resultierenden geringeren Radionuklidkonzentration. Zum anderen wird gemäß konzeptuellem Modell die Gasbildung im Einlagerungsbereich bei instantanem Volllaufen der Restgrube nicht durch Wassermangel unterbrochen, weil sofort Lösung durch die Abdichtungen eindringen kann. Dadurch ist zu Beginn der Auspressphase das gasbildende Inventar weitgehend verbraucht und die gasinduzierte Lösungsauspressung dementsprechend geringer. Der Beitrag des ELB OF zur Gesamtdosis ist wiederum unbedeutend.

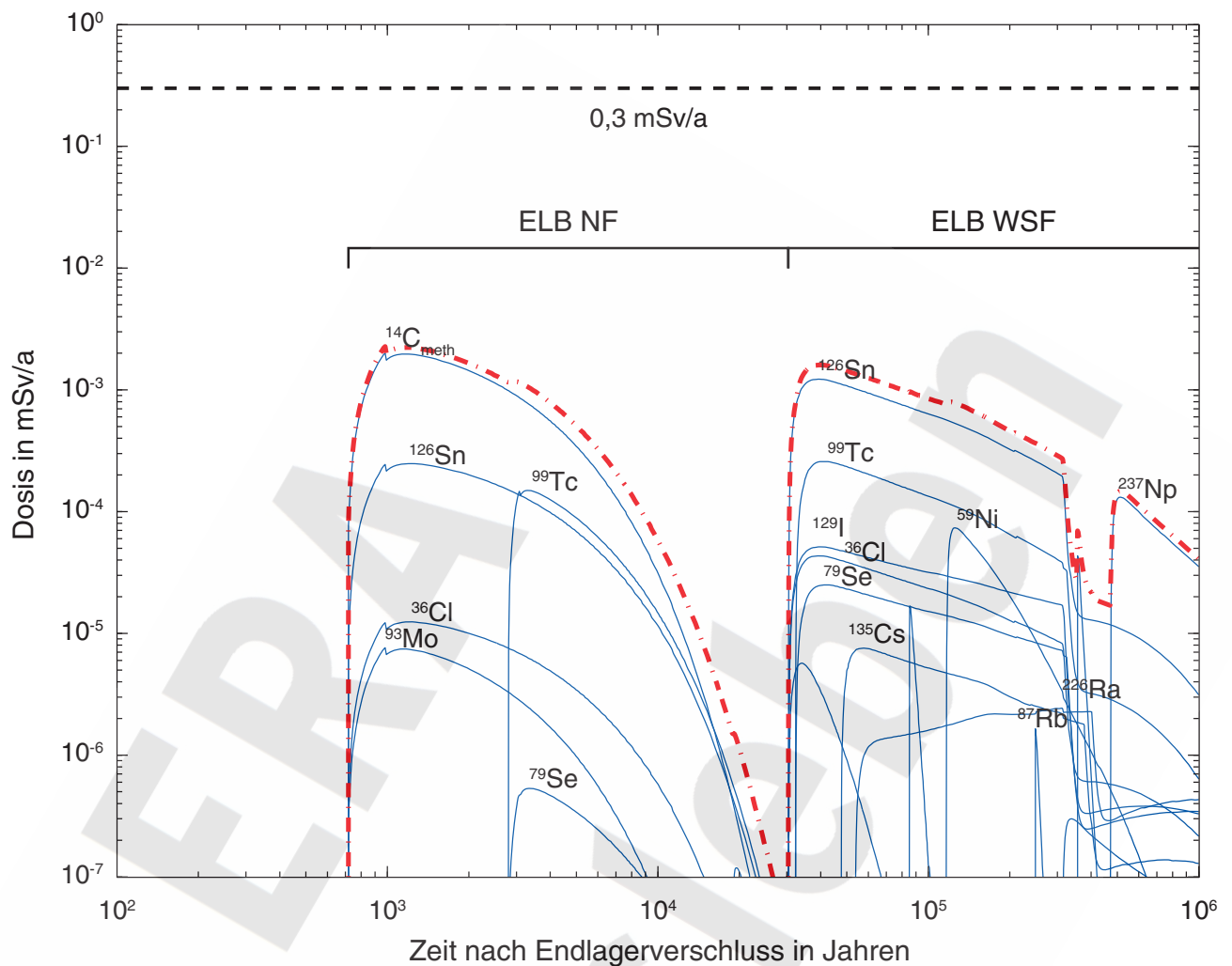


Abbildung 5-23 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Szenario „Instantanes Volllaufen der übrigen Grube“ und den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“

Die zeitliche Entwicklung der Summendosis im Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ ist grundsätzlich mit jener im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ vergleichbar, wenn auch auf einem niedrigeren Niveau (Abbildung 5-24). Die Radionuklide aus dem Deckgebirge werden ab etwa 900 Jahren in die Biosphäre freigesetzt. Das Gesamtdosismaximum von 0,0005 mSv/a wird nach 1'600 Jahren erreicht und durch das $^{14}\text{CH}_4$ aus dem Nordfeld bestimmt. Der Beitrag aus dem West-Südfeld folgt nach 30'000 Jahren mit einem durch ^{126}Sn bestimmten Maximum von 0,0002 mSv/a, das nach 40'000 Jahren auftritt. Dieses ist aus denselben Gründen wie im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ geringer als im Referenzszenario (0,0004 mSv/a). Der Beitrag der Radionuklide aus dem ELB OF zur Strahlenexposition ist wiederum gering.

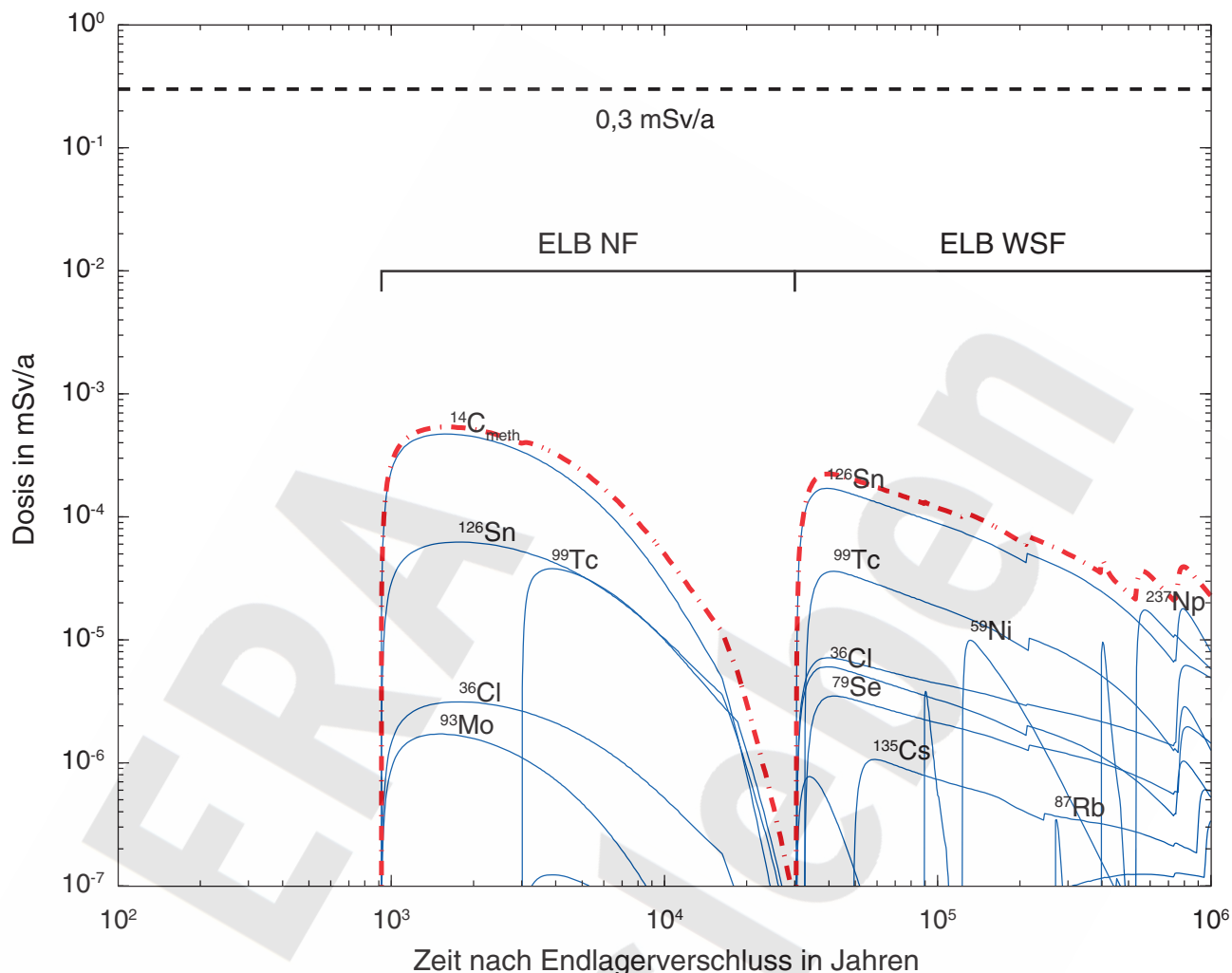


Abbildung 5-24 Zeitlicher Verlauf der Summendosis und der Dosiswerte für ausgewählte Radionuklide für das Szenario „Instantanes Volllaufen der übrigen Grube“ und den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“

Zusammenfassend lassen sich für das „what-if“-Szenario der instantan vollgelaufenen übrigen Grube die Unterschiede im Vergleich zum Referenzszenario wie folgt charakterisieren: Die Summendosis wird wie im Referenzfall durch die Beiträge der beiden Einlagerungsbereiche Nordfeld und West-Südfeld bestimmt. Für das Nordfeld folgt aus dem früheren Volllaufen für das Dosis bestimmende Radionuklid $^{14}\text{CH}_4$ mit einer Halbwertszeit von 5'730 Jahren eine frühere Freisetzung mit höheren Konzentrationen in die Biosphäre (geringerer Einfluss des radioaktiven Zerfalls) und somit ein geringfügig höherer Maximalwert der Dosis. Für das abgedichtete West-Südfeld resultieren dagegen tendenziell eher geringere Dosisbeiträge als im Referenzfall³⁶. Hier ergeben sich durch die frühere Freisetzung für das die Dosis bestimmende ^{126}Sn mit einer Halbwertszeit von 235'000 Jahren aufgrund des radioaktiven Zerfalls kaum Unterschiede zum Referenzfall. Dagegen schlagen sich die geringeren Radionuklidkonzentrationen im Einlagerungsbereich (geringere Ab-

³⁶ Eine Ausnahme bildet der Fall „ohne Gaspolster“, bei dem zu Beginn der Freisetzung der Radionuklide aus dem ELB WSF in die Biosphäre das Maximum durch das Zusammenwirken von $^{14}\text{CH}_4$ und ^{126}Sn bestimmt wird und daher größer als im Referenzfall ist.

nahme des Porenvolumens im Einlagerungsbereich, größeres Lösungsvolumen, in dem die Radionuklide initial gelöst werden können, geringere Gasbildung als treibender Prozess für die Lösungsauspressung) letztlich in etwas geringeren maximalen Dosiswerten der Radionuklide aus dem West-Südfeld nieder. Das Dosismaximum wird daher in den Fällen „mit Gaspolster“ neu durch das $^{14}\text{CH}_4$ aus dem Nordfeld bestimmt („ohne Gasfluss“: Gesamtmaximum 40% niedriger als im Referenzfall, „mit Gasfluss“: Gesamtmaximum rund 20% höher als im Referenzfall).

5.2 Probabilistische Rechnungen

Die probabilistischen Rechnungen dienen dazu, die Auswirkungen der Parameterungewissheiten zu quantifizieren und solche Verhältnisse im Grubengebäude zu berücksichtigen, die in mehrfacher Hinsicht vom Referenzfall abweichen. Der Wert eines jeden Parameters wird dabei innerhalb seiner jeweiligen Bandbreite gemäß seiner Verteilungsfunktion statistisch zufällig (probabilistisch) ermittelt. Die Festlegung der Parameterwerte erfolgt dabei i.a. gegenseitig unkorreliert, d.h. die Parameter werden unabhängig voneinander bestimmt. Allerdings sind die Parameter so definiert, dass keine systeminhärenten Korrelationen bestehen oder diese möglichst gering sind. Beispiele dafür sind die relativen Anfangsfüllgrade der Versatzkomponenten (anstatt absoluter Volumina), der Volumenanteil des mit Salzbeton verfüllten Volumens (anstatt eines absoluten Volumens) oder die Berechnung von hydrostatischem und lithostatischem Druck aus den Bezugsniveaus.

Die Ergebnisse der probabilistischen Rechnungen sind Wahrscheinlichkeitsverteilungen, z.B. für die Maxima der möglichen Strahlenexposition und für den Zeitpunkt des Eintretens der höchsten Strahlendosis. Da diese Modellrechnungen auf einem festen, grundlegenden Szenario beruhen, dessen Eintreten unterstellt und zu dessen Eintrittswahrscheinlichkeit keine Aussage gemacht wird, und da dieses Szenario zudem verschiedene ungünstige Vereinfachungen und Näherungen enthält, ist das Vorgehen nicht eine probabilistische Sicherheitsanalyse im strengen Sinne. Die Ergebnisse sind vielmehr bedingte Wahrscheinlichkeiten für die Strahlenexposition (d.h. Wahrscheinlichkeiten unter gewissen gegebenen Voraussetzungen), die jedoch eine sehr wertvolle Ergänzung der deterministischen Modellrechnungen für die Bewertung der Langzeitsicherheit darstellen.

Darüber hinaus erlauben die probabilistischen Berechnungen, jene Parameter zu ermitteln, die einen relevanten Einfluss auf die Strahlenexposition aufweisen, ohne dass eine Einschränkung auf die Variation einzelner Parameter erforderlich ist oder unrealistisch konservative Parameterkombinationen die Schlussfolgerungen verfälschen.

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse der probabilistischen Berechnungen dargelegt. Weitergehende Analysen, z.B. zu den Einflüssen der einzelnen Einlagerungsbereiche und Radionuklide, finden sich in Anhang N, Aussagen zu den relevanten Parametern in Anhang O.

5.2.1 Ergebnisse

Die folgenden Ergebnisse wurden mit der Monte-Carlo-Methode und gestützt auf jeweils 2'000 Realisierungen für die drei Fälle (ohne Gaspolster, mit Gaspolster ohne Gasfluss, mit Gas-



polster mit Gasfluss) ermittelt. Die kumulierten Wahrscheinlichkeiten sind somit – als orientierende Angabe - innerhalb von rund $\pm 1\%$ belastbar (im Rahmen der Modellannahmen).

Bei den meisten Realisierungen ist das West-Südfeld der Einlagerungsbereich mit dem größten Beitrag zum Dosismaximum, und dort ist wiederum das ^{126}Sn am häufigsten das dosisdominierende Radionuklid, gefolgt vom ^{226}Ra . In den Fällen ohne Gaspolster hat auch das $^{14}\text{CH}_4$ aus dem West-Südfeld eine gewisse Bedeutung, weil hier ein Großteil der gasförmigen Verbindung gelöst wird und der fehlende Innendruck häufig dazu führt, dass die Abdichtungen relativ rasch korrodieren, bevor das ^{14}C größtenteils zerfallen ist. ^{234}U aus dem West-Südfeld und ^{126}Sn aus dem Ostfeld sind erheblich seltener für den Hauptbeitrag zum Dosismaximum verantwortlich. In den Fällen „mit Gaspolster“ ist das ^{14}C aus dem Nordfeld – als gelöstes $^{14}\text{CH}_4$ – nach dem ^{126}Sn aus dem West-Südfeld das zweitwichtigste Radionuklid. Die Absolutwerte der Dosismaxima aus dem Nordfeld liegen aber sämtlich unterhalb 0,01 mSv/a, so dass seine Bedeutung insgesamt eher gering ist.

5.2.1.1 Fall „ohne Gaspolster“

Die komplementäre kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Fall „ohne Gaspolster“ ist in Abbildung 5-25 dargestellt. In keinem der Rechenfälle kommt es zu einer Überschreitung des Wertes von 0,3 mSv/a nach § 47, Abs. 1 StrlSchV. Die Maximaldosis des entsprechenden Rechenfalls mit den Referenzparameterwerten von rund 0,0003 mSv/a wird mit einer Wahrscheinlichkeit von rund 60 % überschritten. Die maximale Dosis, die in einem Rechenfall erreicht wurde, beträgt 0,25 mSv/a.

Der Dosiswert von 0,03 mSv/a, der 1/10 des Wertes für die effektive Dosis von 0,3 mSv/a nach § 47, Abs. 1 StrlSchV entspricht, wird in 10 von 2'000 Rechenfällen überschritten. Dies bedeutet, dass der Dosiswert von 0,03 mSv/a im Fall „ohne Gaspolster“ mit einer Wahrscheinlichkeit von 99% bei einem Konfidenzgrad von 99% unterschritten wird.

In den meisten Fällen ist ^{126}Sn aus dem West-Südfeld das Radionuklid mit dem jeweils größten Beitrag zur Maximaldosis, gefolgt von ^{226}Ra , $^{14}\text{CH}_4$, ^{234}U und ^{237}Np aus dem West-Südfeld. Nur sehr selten wird die Dosis durch das Ostfeld dominiert (^{126}Sn und ^{234}U). Die Fälle mit den höchsten Dosiswerten werden überwiegend durch ^{234}U , seltener durch ^{226}Ra , $^{14}\text{CH}_4$ und ^{126}Sn aus dem West-Südfeld bestimmt. Wegen der Sorption der Radionuklide in Hutgestein und Deckgebirge treten die höchsten Dosismaxima erst zu späten Zeiten auf ($> 100'000$ Jahre).



Fall „ohne Gaspolster“, 2'000 Realisierungen

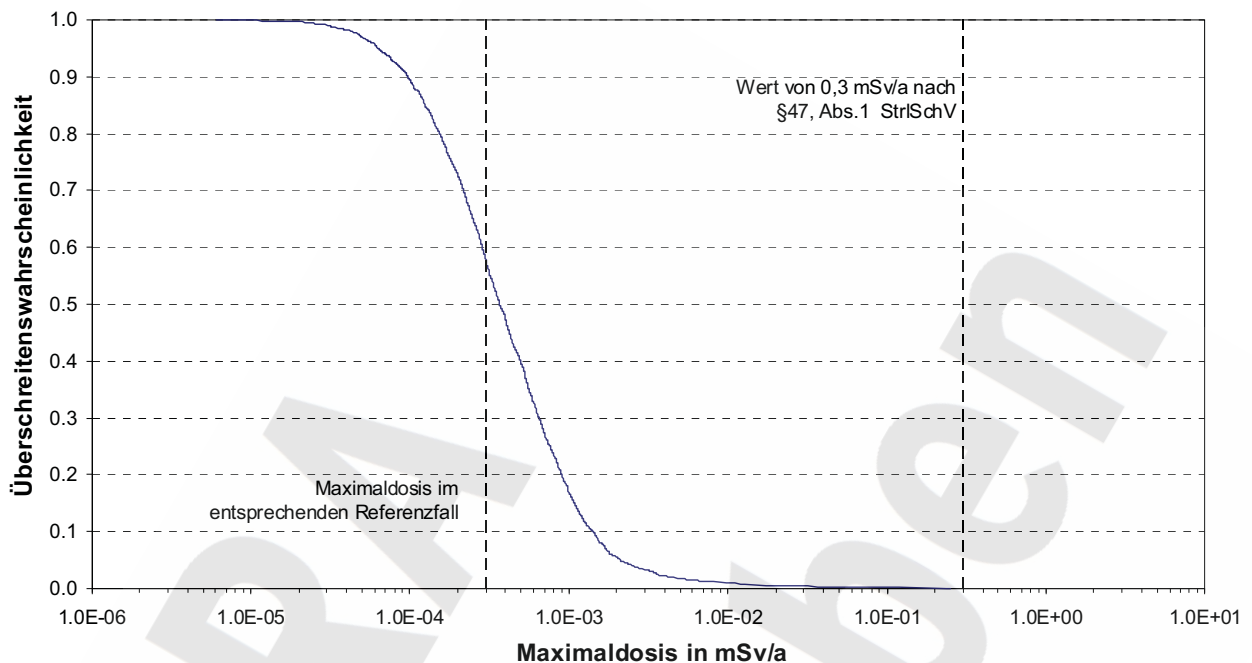


Abbildung 5-25 Kumulierte Überschreitenswahrscheinlichkeit der Maximaldosis für den Fall „ohne Gaspolster“

5.2.1.2 Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“

Die komplementäre kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ ist in Abbildung 5-26 dargestellt. Das Dosismaximum für das Referenzszenario mit dem Wert von 0,003 mSv/a (vgl. Kap. 5.1.1.2) wird mit einer Wahrscheinlichkeit von rund 25 % überschritten³⁷.

In 4 Rechenfällen wird der Dosiswert von 0,3 mSv/a überschritten, der höchste berechnete Wert beträgt 0,7 mSv/a und liegt damit unterhalb des Bereichs der natürlichen Strahlenexposition in Deutschland. Der Wert von 0,03 mSv, der 1/10 des Wertes für die effektive Dosis von 0,3 mSv/a nach § 47, Abs. 1 StrlSchV entspricht, wird nur in 53 Realisierungen überschritten. Dies bedeutet, dass der Dosiswert von 0,03 mSv/a im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ mit einer Wahrscheinlichkeit von 97% bei einem Konfidenzgrad von 80% unterschritten wird.

³⁷ Dafür, dass der Medianwert der Strahlenexposition (ca. 0,0013 mSv/a) und der deterministisch ermittelte Wert im Referenzfall (0,0032 mSv/a) derart weit auseinanderliegen, sind unter anderem die nichtlineare Abhängigkeit der Dosis von den Parametern sowie asymmetrische Verteilungsfunktionen verantwortlich.

Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“, 2'000 Realisierungen

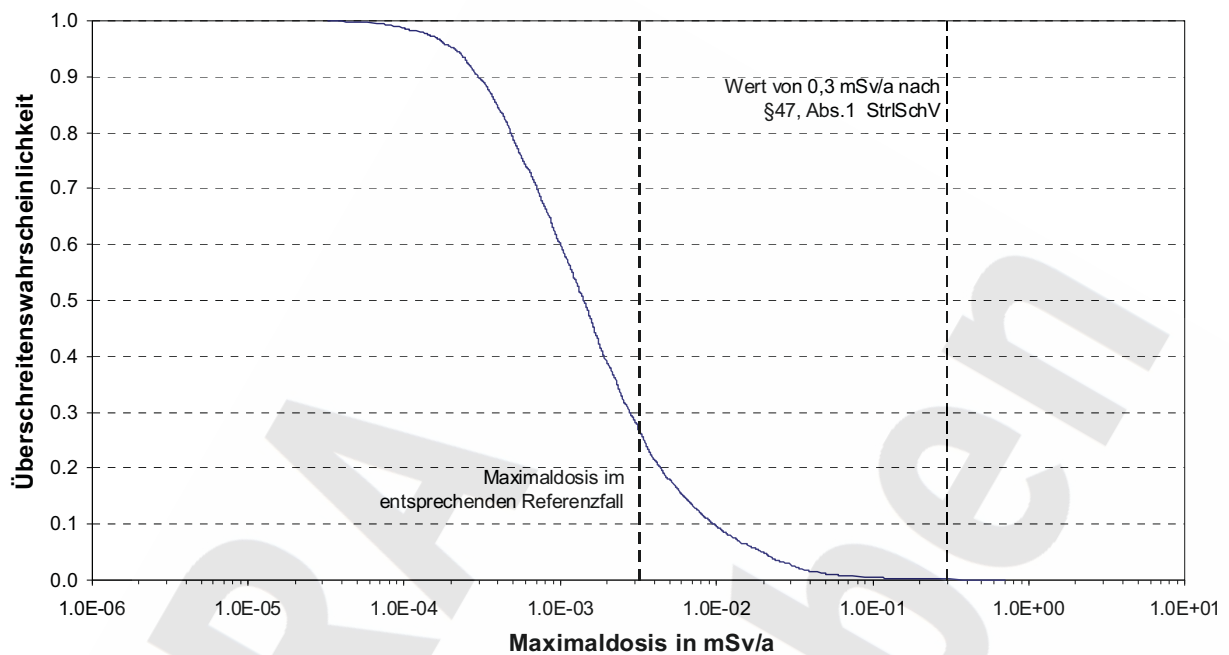


Abbildung 5-26 Kumulierte Überschreitenswahrscheinlichkeit der Maximaldosis für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“

Am häufigsten bestimmt ^{126}Sn aus dem West-Südfeld das Dosismaximum, seltener $^{14}\text{CH}_4$ aus dem Nordfeld oder ^{226}Ra aus dem West-Südfeld. Gelegentlich sind ^{126}Sn aus dem Ostfeld oder ^{234}U aus dem West-Südfeld dosisdominierend, in einigen Fällen auch $^{14}\text{CH}_4$ oder ^{237}Np aus dem West-Südfeld, ^{237}Np , ^{226}Ra oder ^{234}U aus dem Ostfeld sowie ^{126}Sn aus dem Nordfeld.

In den ungünstigsten Rechenfällen werden die Dosismaxima meistens durch die Freisetzung von ^{126}Sn sowie ^{234}U aus dem West-Südfeld hervorgerufen, seltener durch ^{226}Ra aus dem West-Südfeld und gelegentlich durch ^{234}U aus dem Ostfeld.

In 1,5 % der Fälle kommt es im ELB WSF zur Überschreitung des Frac-Drucks, im ELB OF in 0,8% der Fälle; die Dosismaxima liegen dabei stets unter 0,1 mSv/a.

5.2.1.3 Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“

Wie schon bei den deterministischen Modellrechnungen ergeben auch die probabilistischen Rechnungen für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ (statistisch) niedrigere Dosiswerte als für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“. Die komplementäre kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilung ist in Abbildung 5-27 dargestellt. Der maximale Dosiswert des Referenzfalls (0,0004 mSv/a) wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 40 % überschritten.

Dosiswerte über 0,03 mSv/a treten in 14 Rechenfällen auf. Von den 2'000 Rechenfällen liegt kein einziger über dem Wert von 0,3 mSv/a nach § 47, Abs. 1 der StrlSchV. Die maximale Dosis, die in einem Rechenfall erreicht wurde, beträgt 0,29 mSv/a. Der Wert von 0,03 mSv, der 1/10 des Wertes für die effektive Dosis von 0,3 mSv/a nach § 47, Abs. 1 StrlSchV entspricht, wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 99% bei einem Konfidenzgrad von 90% unterschritten.

Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“, 2'000 Realisierungen

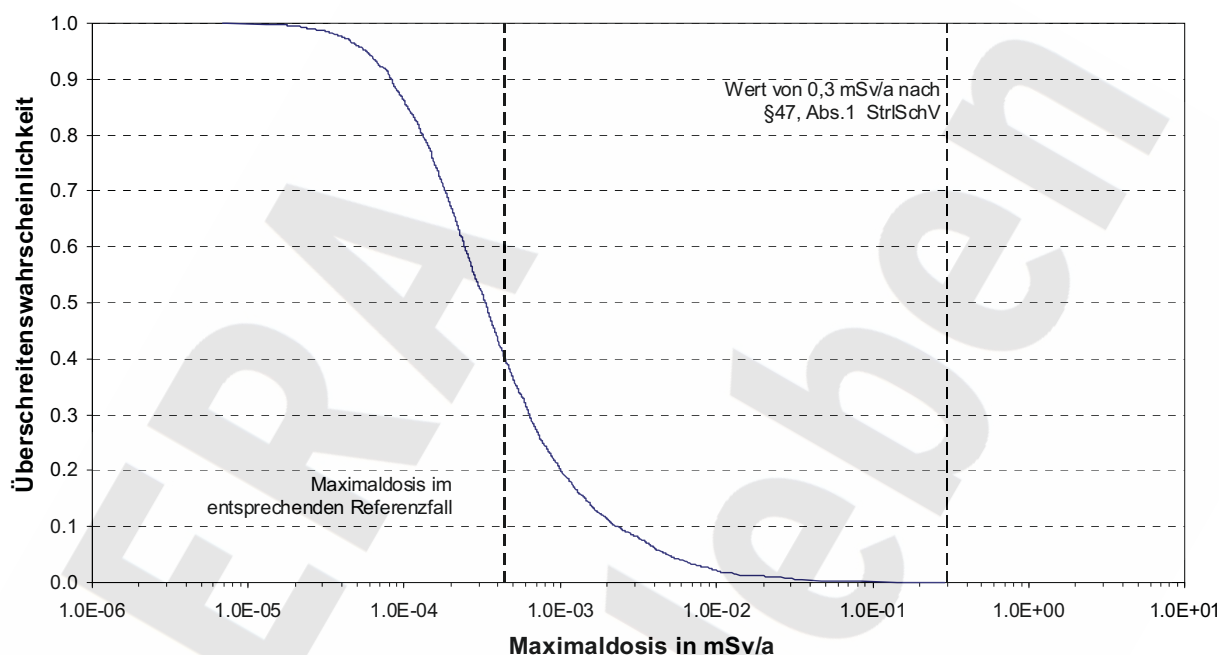


Abbildung 5-27 Kumulierte Überschreitenswahrscheinlichkeit der Maximaldosis für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“

Am häufigsten wird das Dosismaximum durch ^{126}Sn aus dem West-Südfeld verursacht. $^{14}\text{CH}_4$ aus dem Nordfeld und ^{226}Ra aus dem West-Südfeld sind deutlich seltener dosisbestimmend, gefolgt von ^{126}Sn aus dem Ostfeld und ^{234}U aus dem West-Südfeld.

Die Dosismaxima der ungünstigsten Rechenfälle sind meistens durch die Freisetzung von ^{126}Sn oder ^{234}U aus dem West-Südfeld, seltener durch ^{126}Sn , ^{234}U oder ^{226}Ra aus dem Ostfeld bestimmt. In rund 3,1% der Realisierungen kommt es im ELB WSF zur Überschreitung des Frac-Drucks; im ELB OF wird der Frac-Druck in 1% der Fälle überschritten³⁸.

5.2.2 Relevante Parameter

Die Freisetzung von Lösungsinhaltsstoffen aus dem Endlager in die Biosphäre wird von zahlreichen, teilweise parallel, teilweise sequentiell ablaufenden Prozessen beeinflusst und durch eine

³⁸ Die höhere Häufigkeit der Frac-Bildung im Vergleich mit dem Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ ist rein statistisch bedingt und hat weder eine physikalische noch eine modelltechnische Ursache.

große Zahl von Parametern bestimmt. Je nach Lebensdauer der Lösungsinhaltsstoffe, bei Radionukliden die Halbwertszeit, sind unterschiedliche Prozesse für die Größe ihrer Freisetzung bestimmend. Zudem können ungünstige Auswirkungen des einen Prozesses durch einen anderen Prozess abgeschwächt oder sogar ausgeglichen werden. Es gibt deshalb keinen einzelnen Parameter, der die Langzeitsicherheit des Endlagers dominant bestimmt, d.h. der eine starke Korrelation z.B. mit dem Dosismaximum zeigt. Speziell die Rechenfälle mit den höchsten maximalen Strahlenexpositionen zeichnen sich stets durch ungünstige Kombinationen mehrerer Parameter aus.

Im Allgemeinen sind hohe Dosiswerte korreliert mit einer großen Anfangspermeabilität des Abdichtsystems des West-Südfelds (vor allem für die Fälle "mit Gaspolster, ohne Gasfluss"), wodurch es zu einem frühen Austrag der Radionuklide mit hoher Rate kommt. Begleitend ist meist eine erhöhte Konvergenzrate für diesen Einlagerungsbereich, ein frühes Volllaufen der Restgrube sowie häufig ein hoher Magnesiumgehalt der Grubenlösung. Der Fließquerschnitt und die Sorption in Hutgestein und Deckgebirge sowie die Größe des verdünnungswirksamen oberflächennahen Grundwasserflusses wirken sich gleichfalls relativ stark auf die Resultate aus.

Weitere Ergebnisse und eine ausführlichere Diskussion der probabilistischen Modellrechnungen enthält Anhang N. Eine detaillierte Analyse zur systematischen Identifikation der relevanten Parameter und eine Diskussion der zugehörigen Ergebnisse erfolgt in Anhang O.

5.3 Zusammenfassung der Rechnungen zur Radionuklidausbreitung

Die Resultate der Rechnungen zur Radionuklidausbreitung sind in Abbildung 5-28 zusammengefasst und dem Wert von 0,3 mSv/a gemäß §47, Abs. 1 StrlSchV sowie der typischen natürlichen Hintergrundstrahlung gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass sämtliche Rechenfälle mit den Referenzparametern (sowohl für das Referenzszenario mit den Referenzparametern als auch für die alternativen Szenarien und für die „what-if“-Szenarien) zu Expositionen führen, die deutlich (mehr als einen Faktor 3) unterhalb von 0,3 mSv/a liegen (mit Ausnahme des Falls „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ im unten erwähnten Alternativszenario „Neue Wegsamkeiten durch das Hutgestein“). Die Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien sind dabei zumeist gering. Nur das alternative Szenario „Neue Wegsamkeiten durch das Hutgestein“ sowie das „what-if“-Szenario „Mangelhafte Abdichtung Schacht Bartensleben“ führen zu signifikant höheren maximalen Dosiswerten als das Referenzszenario (oder können für bestimmte Parameterkombinationen zu solchen führen). Dagegen führen die Parametervariationen innerhalb des Referenzszenarios zu erheblich größeren Unterschieden in der Maximaldosis. Der Grund dafür ist, dass bei 2'000 Realisierungen auch extreme Parameterkombinationen auftreten, die sich sehr ungünstig bzw. günstig auf die Resultate der Modellrechnungen auswirken. Bei der Bewertung der wenigen Rechenfälle mit den höchsten Dosen ist zu beachten, dass wichtige günstige Eigenschaften des Systems, z.B. das Sorptionspotential der Versatzmaterialien in der Grube, in den Modellrechnungen nicht berücksichtigt wurden. Ihre Berücksichtigung würde voraussichtlich für die hier dominierenden Radionuklide zu einer Reduktion der berechneten Freisetzung (und damit der berechneten Dosiswerte) um deutlich mehr als eine Größenordnung führen.



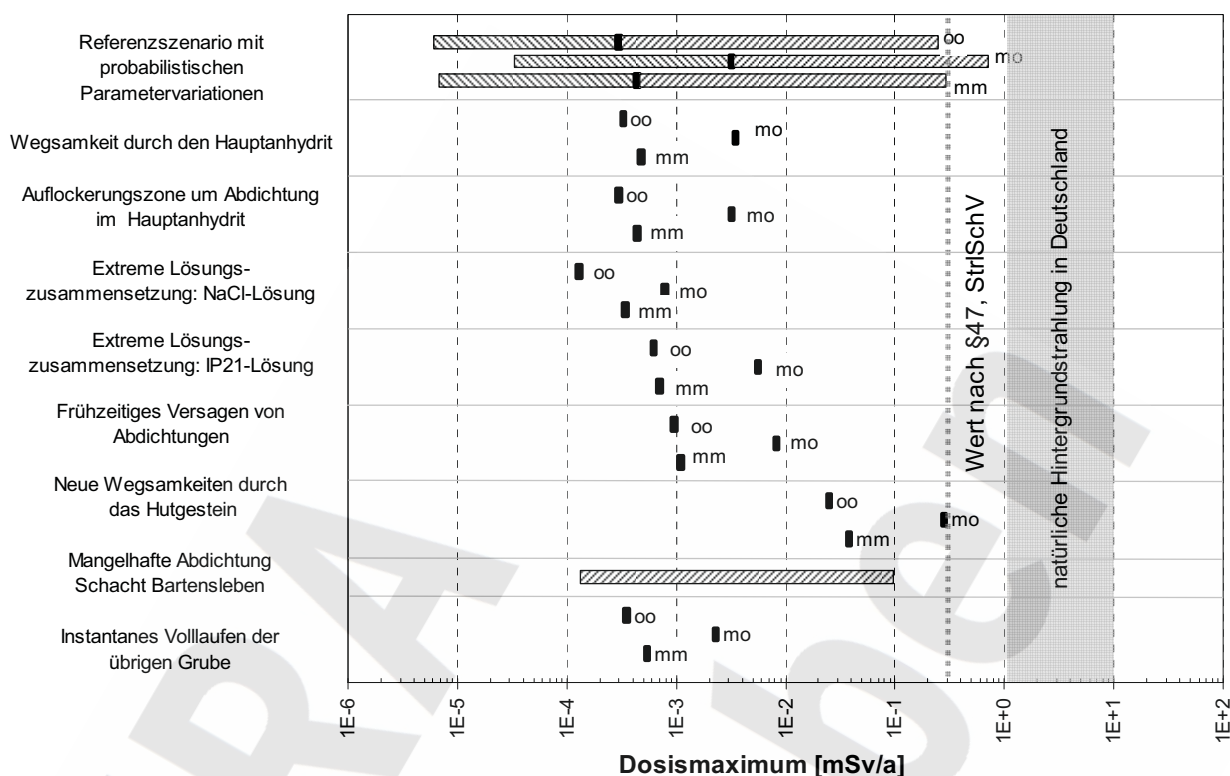


Abbildung 5-28 Zusammenfassung der Rechnungen zur Radionuklidenausbreitung für das Referenzszenario mit probabilistischer Parametervariation, die alternativen Szenarien und die „what-if“-Szenarien, mit Unterscheidung der Fälle in Bezug auf das Verhalten des Gases: „ohne Gaspolster“ (oo), „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ (mo) und „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ (mm). Die Bandbreiten für das Referenzszenario entsprechen den extremen Dosismaxima aus Stichproben von jeweils 2'000 Rechenfällen

Der Vergleich der Fälle in Bezug auf das Verhalten des Gases zeigt erwartungsgemäß, dass der Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“, welcher für den ELB WSF als wahrscheinlichster Fall einzustufen ist (vgl. Kapitel 3.3.7), zu den höchsten Dosiswerten führt. Die anderen Fälle „ohne Gaspolster“ und „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ liegen meistens um mindestens eine Größenordnung darunter. Im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ des Referenzszenarios wird der Dosiswert von 0,03 mSv/a mit einer Wahrscheinlichkeit von 97% (bei einem Konfidenzgrad von 80%) eingehalten.

5.4 Konsequenzen für die wasserrechtlich relevanten Abfallinhaltsstoffe

Die Mobilisierung, der Transport in Lösung und die Freisetzung in das oberflächennahe, genutzte Grundwasser von wasserrechtlich relevanten Abfallinhaltsstoffen unterliegt den gleichen Gesetzmäßigkeiten wie jene von Radionukliden, abgesehen vom radioaktiven Zerfall der letzteren und von Abbauprozessen bei organischen wasserrechtlich relevanten Stoffen.

Für die Abschätzung der möglichen Konsequenzen einer potentiellen Freisetzung von wasserrechtlich relevanten Stoffen, welche mit den Abfällen in das Endlager eingebracht wurden, in das oberflächennahe genutzte Grundwasser werden folgende Annahmen getroffen:

- (i) Die Mobilisierung erfolge bei Lösungskontakt der Abfälle sofort und vollständig. Es sind keine Löslichkeitsgrenzen wirksam.
- (ii) Die Ausbreitung der wasserrechtlich relevanten Stoffe wird weder im Grubengebäude, noch entlang der Wegsamkeiten durch das Salinar, das Hutgestein und das Deckgebirge durch Sorptionsprozesse verzögert.

Damit entsprechen die Annahmen jenen, die für die Berechnung der Freisetzung von nicht sorbierenden Radionukliden getroffen wurden. Für die wasserrechtlich relevanten Stoffe aus den Einlagerungsgrubenbauen lassen sich daher die Konzentrationen im oberflächennahen Grundwasser durch Multiplikation des Stoffinventars in jedem Einlagerungsbereich mit einem einlagerungsbereichsspezifischen sogenannten Verdünnungsfaktor und Summation über die Einlagerungsbereiche ermitteln.

Der Verdünnungsfaktor eines Einlagerungsbereichs ist das Verhältnis des zeitlichen Maximums der Konzentration eines stabilen, nicht sorbierenden Wasserinhaltsstoffs im oberflächennahen Grundwasser und dessen initialem Inventar im Einlagerungsbereich. Die Verdünnungsfaktoren lassen sich ermitteln, indem die Freisetzung des sehr langlebigen Radionuklids ^{87}Rb mit PROSA simuliert wird.

Die Verdünnungsfaktoren wurden für die verschiedenen Einlagerungsbereiche getrennt mit jeweils 1 000 Realisierungen für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ berechnet, die Ergebnisse sind in Tabelle 5-2 dargestellt. Die Tabelle enthält für jeden Einlagerungsbereich in der zweiten Spalte den Zeitpunkt des Konzentrationsmaximums im oberflächennahen Aquifer und in der dritten Spalte das Verhältnis der zeitlich maximalen Konzentration im oberflächennahen Grundwasser und des Inventars im Einlagerungsbereich, berechnet aus dem Medianwert des Konzentrationsmaximums. Für den kombinierten Einlagerungsbereich WSF beispielsweise beträgt dieses Verhältnis $2,8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^{-3}$. Ein Inventar von 100 kg eines wasserrechtlich relevanten Stoffs in den Einlagerungsgrubenbauen des ELB WSF würde unter den getroffenen konservativen Annahmen betreffend Mobilisierung und ausbleibender Sorption also zu einer maximalen Konzentration von $2,8 \cdot 10^{-8} \text{ kg/m}^3$, d.h. $0,028 \mu\text{g/l}$ führen. In der dritten und vierten Spalte sind die gleichen Größen, berechnet aus den 90/90-Werten der Maximalkonzentrationen (90 %-Perzentil bei 90 % Konfidenzgrad) aufgeführt. Diese sind für die Berechnung der oberen Bandbreite der Schadstoffkonzentration im Grundwasser heranzuziehen.

Tabelle 5-2: Verdünnung bei der Freisetzung von wasserrechtlich relevanten Stoffen aus den Abfällen, Medianwerte und 90/90-Werte „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“.

	Medianfall der Maximalkonzentration		90/90-Wert der Maximalkonzentration	
	T_{\max}	$C_{\max}(\text{Bio})/I_0$	T_{\max}	$C_{\max}(\text{Bio})/I_0$
	[a]	[$1/\text{m}^3$]	[a]	[$1/\text{m}^3$]
WSF	$7,5 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^{-10}$	$5,6 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^{-9}$
OF	$9,0 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^{-11}$	$2,8 \cdot 10^4$	$4,8 \cdot 10^{-10}$
NF	$6,5 \cdot 10^3$	$6,5 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^{-8}$
ZT	$1,1 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$8,4 \cdot 10^3$	$7,5 \cdot 10^{-10}$



6 Bewertung der Modellrechnungen und Schlussfolgerungen

Die beantragten Maßnahmen für das Verfüllen und Verschließen der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie sehen vor, (i) die unverfüllten Hohlräume und Resthohlräume in Kammern, Strecken und vertikalen Auffahrungen weitgehend und nach differenzierten Zielvorgaben mit einem Salzbeton (an einer Stelle mit Magnesiabeton) zu verfüllen, (ii) die Einlagerungsbereiche Westfeld, Südfeld und Ostfeld von der Restgrube hydraulisch zu trennen und (iii) die beiden Tagesschächte Bartensleben und Marie mit Verschlussbauwerken zu verschließen.

Diese Maßnahmen haben zum Ziel,

- die gebirgsmechanische Stabilität des Gesamtsystems sicherzustellen und dadurch (a) die Integrität der noch bestehenden Steinsalzbarrieren im System zu erhalten und (b) die Entstehung von weiteren Lösungszutritten aus dem Hutgestein in das Grubengebäude zu behindern,
- die Lösungsbewegung im Grubengebäude und insbesondere den Lösungszutritt zu den Abfällen zu behindern und zu verzögern,
- das Potential für Umlösungen an Halit und an Kalilagern zu begrenzen und
- das Auspressen von Lösung aus der Grube in das Hutgestein zu begrenzen.

Selbst nach Umsetzen der beantragten Maßnahmen ist die künftige mögliche Entwicklung des Endlagersystems sehr vielfältig. So kann z.B. der einzige bestehende Lösungszutritt aus dem Hutgestein (Lager H in der Grube Marie) in naher Zukunft versiegen und die Entstehung eines weiteren Lösungszutritts während des Betrachtungszeitraums ausbleiben. In diesem Fall bleibt die Grube trocken, die verbleibenden Resthohlräume konvergieren zu und die Abfälle und die in ihnen enthaltenen Radionuklide sind während des gesamten Betrachtungszeitraums vollständig eingeschlossen. Es findet kein Radionuklidaustritt aus der Salzstruktur in das Hutgestein oder Deckgebirge statt.

Ein Radionuklidaustritt aus der Salzstruktur in das Hutgestein oder Deckgebirge kann nur in Lösung oder in der Gasphase erfolgen. Ein Radionuklidaustrag in Lösung setzt einen vorgängigen relevanten Lösungszutritt in die Grube voraus. Es wird gezeigt, dass im Hinblick auf eine radiologisch relevante Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre aufgrund eines Transports in der Gasphase nur das Radionuklid ^{14}C zu betrachten ist und das – aufgrund seiner beschränkten Halbwertszeit – ebenfalls nur in Verbindung mit einem relevanten Lösungszutritt aus dem Hutgestein in die Grube (s.u. und Anhang P).

Aus diesem Grund beschränken sich die im vorliegenden Bericht dargelegten Modellrechnungen auf Entwicklungen des Endlagersystems, bei denen der bestehende Lösungszutritt in das Lager H anhält oder relativ früh während der Nachbetriebsphase ein anderer relevanter Lösungszutritt einsetzt.

Das Sicherheitskonzept, das den geplanten Maßnahmen zum Verfüllen und Verschließen des ERAM zu Grunde liegt, beruht auf dem Zusammenwirken verschiedener Sachverhalte und Prozesse und hängt nicht von der Funktionsfähigkeit einzelner ausgezeichnete Sicherheitselemente



ab. Die möglichen Transportpfade für eine Freisetzung von Radionukliden können nicht durch bauliche Maßnahmen auf wenige ausgezeichnete Pfade eingeschränkt werden. Daher muss die Sicherheitsanalyse eine große Zahl möglicher künftiger Entwicklungen und Zustände des Gesamtsystems abdecken. Die in diesem Bericht dokumentierte Analyse der Langzeitsicherheit beruht deshalb auf einer modellhaften Nachbildung der maßgebenden Prozesse in Verbindung mit einer abstrahierten Darstellung der geometrischen Verhältnisse.

Die Vielzahl der möglichen künftigen Entwicklungen und Zustände wird – neben der geometrischen Abstraktion – durch die Berücksichtigung mehrerer Szenarien und eine umfangreiche und breite Variation der maßgebenden Parameter im Rahmen eines probabilistischen Verfahrens abdeckend behandelt. Um dies sicherstellen zu können, erfolgt die numerische Nachbildung der Prozesse – bei i.a. konservativen Näherungen – durch einfache und schnelle Algorithmen.

Das Modell wird zum einen deterministisch, d.h. zur quantitativen Beschreibung festgelegter Szenarien mit vorgegebenen Parametern, angewendet. Dies ergibt, als Hauptresultate, den zeitlichen Verlauf der Strahlenexposition und zeigt die maßgebenden Radionuklide und Einlagerungsbereiche auf. Die Vielzahl der möglichen Bedingungen im Grubengebäude und die verbleibenden Ungewissheiten in Bezug auf die maßgeblichen Parameter werden zum anderen ergänzend durch probabilistische Rechnungen erfasst. Diese erlauben, umfangreiche Parametervariationen durchzuführen, bei denen alle Parameter gleichzeitig Änderungen erfahren, wodurch die Auswirkungen der vielfachen Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems auf die Langzeitsicherheit in realitätsbezogener Art untersucht werden kann, ohne die Schlussfolgerungen durch unrealistisch konservative Parameterkombinationen zu verfälschen.

Den Modellparametern sind für die Berechnungen zur Langzeitsicherheit jeweils sowohl Referenzwerte als auch Bandbreiten zugewiesen. Die Referenzwerte entsprechen in einem realistischen Bereich verhalten konservativ gewählten Werten, welche für die verschiedenen Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems und speziell der Barrieren derart bestimmt sind, dass die resultierende Strahlenexposition wahrscheinlich überschätzt wird, jedoch ohne Extremfälle mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit abzudecken. Die Referenzwerte werden durch die Angabe von Bandbreiten für die Parameter so ergänzt, dass die Modellrechnungen im Rahmen des Plausiblen auch extreme Verhältnisse berücksichtigen.

Die Modellrechnungen zeigen, dass selbst unter konservativer Vernachlässigung verschiedener Prozesse (vor allem der Sorption der Radionuklide an den Versatzmaterialien im Grubengebäude) und für breite Variationsbereiche der Modellparameter die resultierende Strahlenexposition deutlich (um mehrere Größenordnungen) unter dem Wert von 0,3 mSv/a liegt. Auch für wenig wahrscheinliche Kombinationen von Parameterwerten beim Zusammentreffen mehrerer ungünstiger Sachverhalte liegen die berechneten Dosiswerte i.a. noch um den Faktor 5 oder mehr unterhalb des Werts von § 47, Abs. 1 StrlSchV. Gemäß der probabilistischen Modellrechnungen wird der Wert von 0,03 mSv/a – also ein Faktor 10 unterhalb des Wertes von § 47, Abs. 1 StrlSchV – mit einer Wahrscheinlichkeit von 96% (bei einem Konfidenzgrad von mehr als 99%) eingehalten. Dies gilt auch bei der ungünstigsten konzeptuellen Modellannahme in Bezug auf den Einfluss der Gasbildung und -speicherung, dem Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“.



Von bedeutendem Einfluss auf die nach dem Verfüllen und Verschließen im Endlager ablaufenden Prozesse ist die Bildung von Gas durch Korrosion und mikrobielle Degradation sowie das Ausmaß, in dem dieses Gas in den Einlagerungsgrubenbauen oder in deren hydraulischer Umgebung verbleibt. Die von der Gasbildung und -bewegung abhängenden Prozesse kompensieren sich allerdings teilweise in ihrer Auswirkung.

Die berechneten Maxima der Strahlenexposition werden in erster Linie durch ^{126}Sn , ^{226}Ra und seinen Vorläufer ^{234}U aus dem Einlagerungsbereich West-Südfeld, gelegentlich durch ^{14}C aus dem ELB NF bestimmt. Zu den berechneten Maximalwerten der potentiellen Strahlenexposition sind folgende Anmerkungen anzubringen:

- Zinn wurde im Hutgestein und Deckgebirge als nicht sorbierend angesetzt, weil belastbare standortspezifische Daten fehlen. Unter Süßwasserverhältnissen zeigt Zinn eine starke Sorption an tonigen Materialien. Mit einem realistischen Sorptionswert für Zinn würde das Dosismaximum in den vielen Fällen, in denen ^{126}Sn dominiert, deutlich niedriger ausfallen.
- Das gelegentlich dominierende ^{14}C aus dem Nordfeld wird in Form von $^{14}\text{CH}_4$ transportiert, welches in der ausgepressten Grubenlösung physikalisch gelöst ist. In diesen Fällen ist aber das berechnete Dosismaximum stets kleiner als 0,01 mSv/a.
- Die Beiträge aus dem Einlagerungsbereich Ostfeld sind aufgrund der langen, abgedichteten Verbindungsstrecken zur übrigen Grube in den meisten Fällen sehr gering.
- In den wenig wahrscheinlichen Parameterkombinationen, bei denen die resultierende maximale Strahlenexposition relativ hoch ist und im Bereich des Wertes von 0,3 mSv/a liegt, bestimmen in der Regel die Radionuklide ^{234}U und ^{226}Ra das Dosismaximum. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Radionuklide am Versatzmaterial in den Einlagerungsbereichen und der übrigen Grube gut sorbieren. Wegen der Schwierigkeiten, die Lösungszusammensetzung und damit die Sorption zu quantifizieren, wurde von diesem rückhaltenden Prozess bei den Modellrechnungen jedoch kein Kredit genommen. Bereits mit Berücksichtigung einer schwachen Sorption dieser beiden Radionuklide würde die berechnete potentielle Strahlenexposition in sämtlichen betrachteten Fällen deutlich unterhalb des Werts von 0,3 mSv/a liegen.

Die Modellrechnungen zeigen, dass die Zielsetzungen der Maßnahmen zum Verfüllen und Verschließen der Grube hinsichtlich Lösungsbewegung und Radionuklidtransport mit den zu erwartenden Eigenschaften der Verfüllung und mit einer relativ großen Toleranzbreite erreicht werden. Dies gilt insbesondere in ausreichendem Maße für die abdichtende Wirkung. Wegen der geringen Anfangspermeabilität der Materialien Salzbeton und Magnesiabeton ist selbst für den Fall, dass sich in der Grube Lösungen mit korrodierenden Eigenschaften bilden, mit einer hinreichend langen Standzeit der Abdichtungen zu rechnen.

Abweichungen von den Referenz-Systemeigenschaften und der erwarteten Referenz-Systementwicklung bewirken teilweise gegenläufige Effekte: Eine hohe Gasbildungsrate, zum Beispiel, kann zwar das Auspressen von kontaminierter Lösung aus dem Einlagerungsbereich verstärken, verzögert jedoch zuvor den Lösungszutritt und verringert die zutretende Lösungsmenge. Ein weiteres Beispiel ist die Konvergenzrate: Eine hohe Konvergenzrate verkürzt zwar die Zutrittsphase, führt aber auf geringere Resthohlraumvolumina in den Einlagerungsbereichen zu Beginn



der Auspressphase, eine verminderte Zugänglichkeit der Abfälle für Lösung bei Lösungszutritt, eine frühere Stützwirkung des Versatzes und letztendlich eine geringere Auspressrate während der Auspressphase.

Durch die Verfüllmaßnahmen wird insbesondere der Extremfall ausgeschlossen, dass die Einlagerungsgrubenbaue über Pfade mit relativ hoher Permeabilität durch Salzgestein, Auflockerungszonen um Grubenbaue oder über längere, zusammenhängende Abschnitte in Firstspalten mit dem Salzspiegel verbunden sind.

Eine etwas andere Bedeutung kommt der Verfüllung innerhalb der Einlagerungsbereiche zu. Hier ist nicht die Behinderung der Bewegung von Salzlösung von primärer Bedeutung, sondern die Stützwirkung zur Verringerung der Konvergenz der Grubenbaue und zusätzlich – jedoch nicht belastbar – die Sorptionswirkung. Dies ist besonders im West-Südfeld wichtig, wo die Einlagerungsgrubenbaue hydraulisch mit zahlreichen Abbauen kommunizieren (großer Einlagerungsbereich) und eine starke Konvergenz zu einer hohen Auspressrate von potentiell kontaminierter Salzlösung führen würde.

Das entwickelte und hier eingesetzte Modellkonzept für den Nachweis der Langzeitsicherheit und dessen Umsetzung in ein computergestütztes Rechenmodell konzentriert sich in konservativ vereinfachender Weise auf die wichtigen sicherheitsrelevanten Sachverhalte, Prozesse und möglichen künftigen Entwicklungen des Endlagersystems. Dabei vernachlässigt es teilweise Prozesse mit positivem Einfluss. Das Modellkonzept berücksichtigt jedoch die Vielfalt der möglichen sicherheitsrelevanten Abläufe und damit den Umstand, dass die Langzeitsicherheit des verfüllten Endlagers durch eine Vielzahl von Sachverhalten und Prozessen mit teilweise ausgleichenden Wirkungen bestimmt wird und nicht in ausgeprägtem Maße von einzelnen Parametern, d.h. von einzelnen Gegebenheiten abhängt.

Die Freisetzung von Radionukliden auf dem Gaspfad ist nur für das ^{14}C zu betrachten, weil dieses das einzige Nuklid mit ausreichend langer Halbwertszeit ist, welches unter den Bedingungen des ERAM volatile Verbindungen bildet. Die ^{14}C -Freisetzung auf dem Gaspfad ist – wie die Radionuklidfreisetzung auf dem Lösungspfad – ebenfalls an die Bedingung eines zuvor stattfindenden signifikanten Lösungszutritts in die Grube gebunden. Erfolgt kein solcher Lösungszutritt in die Grube, zerfällt das ^{14}C bereits weitestgehend, bevor der Gasdruck in der Restgrube ausreichend angestiegen ist, damit das Gas in das Hutgestein austreten kann. Modellrechnungen zeigen, dass der Gasfluss durch das Hutgestein auf wenige $100 \text{ m}^3_{\text{STP}}$ Gas pro Jahr begrenzt ist, während sich das aus den Abfällen gebildete gasförmige ^{14}C in der Grube auf eine Gasmenge von mehreren Mio m^3_{STP} verteilt. Die resultierenden Strahlenexpositionen variieren stark mit den Annahmen zum Expositionspfad in der Biosphäre, sie sind in allen Fällen kleiner oder höchstens im gleichen Bereich wie bei der Radionuklidausbreitung auf dem Lösungspfad. Die Analyse der Radionuklidfreisetzung auf dem Gaspfad ist in Anhang P dargestellt.

Betrachtet wurde auch ein menschliches Einwirken. Dabei wurde angenommen, dass bereits 500 Jahre nach Endlagerverschluss eine Bohrung in einen abgedichteten Einlagerungsbereich abgeteuft und nach Feststellen der „Anomalie“ wieder verfüllt wird. Die resultierende Radionuklidfreisetzung über das verfüllte Bohrloch ist unerheblich. Andere Szenarien können für den Standort



als nicht relevant von der Sicherheitsbewertung ausgeschlossen werden. Die Einzelheiten sind in Anhang Q dargelegt.

Die durchgeführten Untersuchungen, Analysen und Modellrechnungen belegen, dass das verfüllte und verschlossene Endlager Morsleben das eingelagerte Schadstoffinventar in robuster Weise und wirksam zurückhält und die radiologischen Schutzziele zur Langzeitsicherheit zuverlässig einhält.

ERA
Morsleben

Literaturverzeichnis

- [Alla et al. 1993] Alla, N., Berest, P. Blum, P.A., Durup, G. (1993): In situ tests in brine-filled caverns, The Mechanical Behavior of Salt, Proceedings of the Third Conference, Trans Tech Publications, pp. 459-468
- [ARGE 2001] Vergleichende Untersuchungen zu Gefährdungspotential, Deponiesicherheit und regulatorischen Anforderungen bei der Endlagerung radioaktiver und chemotoxischer Abfälle, Abschlussbericht zum BfS-Forschungsvorhaben SR 2345, ARGE Zerna, Köpper & Partner, Colenco Power Engineering AG, Prof. Dr.-Ing. F.L. Wilke, 2001
- [ASN 1991] ASN (Autorité de sûreté nucléaire). Règle Fondamentale de Sûreté (RFS) Stockage définitif de déchets radioactifs en formation géologique profonde. Règle No.III.2.f, Paris 1991.
- [BfS 2000a] Kugel, K. (2000): Entsorgung radioaktiver Abfälle im Endlager Morsleben (ERAM): Zwischengelagerte radioaktive Abfälle. – Interne ET-Berichte ET-IB-112, Bundesamt für Strahlenschutz, Fachbereich Nukleare Entsorgung und Transport, Salzgitter [P-076]
- [BfS 2000b] Kugel, K., Noack, W. (2000): Stoffliche Bestandteile der radioaktiven Abfälle im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM).- Interne ET-Berichte ET-IB-115-REV-1, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter [P-87]
- [BfS 2001] Ranft, M. (2001): Zusammenstellung von modellierungsrelevanten Parametern der Schichtenfolge Deckanhydrit – Grauer Salzton – Leinekarbonat (DGL) im Hutgestein des ERA Morsleben.- Interne ET-Berichte ET-IB-129, Bundesamt für Strahlenschutz, Fachbereich Nukleare Entsorgung und Transport, Salzgitter [P-119]
- [BfS 2003] Gasbildung im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben. Bundesamt für Strahlenschutz (Salzgitter), Noack, W., BfS-Bericht ET-IB-113-Rev1, Stand 06.01.2003 [I-75 Rev1]
- [BfS 2006] Kugel, K. (2006): Entsorgung radioaktiver Abfälle im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) – Einlagerungszeitraum 1971 bis 1991. – Interner Bericht ET -IB-109- Rev-2, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter
- [BfS 2007] Entsorgung radioaktiver Abfälle im Endlager für radiaktive Abfälle Morsleben (ERAM), Überblick über die Einlagerung radioaktiver Abfälle im gesamten Zeitraum von 1971 bis 1998. Bundesamt für Strahlenschutz (Salzgitter), Kugel, K., BfS-Bericht, Stand 31.01.2007 [G-250]
- [BGR 1998a] Weber, J. R., Wallner, M. (1998): Hydraulische Untersuchungen im Grubengebäude Morsleben, Abschlussbericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover [P-71]
- [BGR 1998b] Langkutsch, U., Käbel, H., Margane, A. & Schwamm, G. (1998): Projekt ERA Morsleben, Hydrogeologische Standortbeschreibung und Modell-



- grundlagen. – Archiv-Nr. 116906, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin/Hannover [P-70]
- [BGR 1999] Käbel, H. und Gerardi, J. (1999): Projekt ERA Morsleben; Szenarienanalyse - Geologische Langzeitbewertung und Ermittlung der Zuflussszenarien ohne technische Maßnahmen; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover [P-67]
- [BGR 2000a] ERA Morsleben – Erarbeitung eines geologischen Lagerstättenmodells Morsleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Behlau, H., Mingerzahn, G., Bornemann, O., Stand 20.12.2000 [P-44]
- [BGR 2000b] Sönke, J., Behlau, J. Mingerzahn, G. (2000): ERA Morsleben – Erarbeitung eines geologischen Lagerstättenmodells – 6. Anhang zum Abschlussbericht – Gefügestatistische Charakterisierung der Klüfte im Salinar.- Archiv-Nr. 0120069, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover [P-89].
- [BGR 2000c] Novak, T. and Shao, H. (2000): Wegsamkeiten im Hauptanhydrit des ERAM. Anhang zum Abschlußbericht Hydraulische Untersuchungen im Grubengebäude Morsleben. - Archiv-Nr. 0120283, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover [P-98].
- [BGR 2002] Käbel, H. (2002): ERA Morsleben – Geowissenschaftliche Bewertung der Langzeitentwicklung sowie Zufluss- und Austrittsszenarien nach Verfüllung des Endlagers, Abschlussbericht.- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover [P-132]
- [BMU 2001] BMU (Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit): Bekanntmachung der Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition, Bundesanzeiger 160 a und b (Beilage), S. 18786, 2001.
- [Brew 2005] Brew, D.R.M & Glasser, F.P. (2005): Synthesis and characterisation of magnesium silicate hydrate gels.- Cement and Concrete Research 35, 85 - 98
- [Carslaw & Jaeger 1959] Conduction of Heat in Solids. Carslaw, H.S. & Jaeger, J.C. Second Edition 1959. Oxford University Press, Oxford, 1967.
- [Colenco 2001a] Klemenz, W., Siegel, P. (2001): 3D Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasserverhältnissen. Abschätzung der möglichen Lösungszutritte aus dem Deckgebirge in das Grubengebäude. Colenco Bericht 4305/38. Colenco Power Engineering AG, Baden/Schweiz [P-121].
- [Colenco 2001b] Klemenz, W., Klubertanz, G., Oswald, S. & Siegel, P. (2001): Endlager Morsleben – 3D Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasserverhältnissen. Modellaufbau, Modellkalibrierung R42, Rechenfall R43 und Referenzfall R44. Colenco-Bericht 4305/33, Colenco Power Engineering AG, Baden/Schweiz [P-144]



- [Colenco 2002a] Siegel, P., Klemenz, W., Resele, G. (2002): 3D Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasserverhältnissen. Rechnungen zur Ausbreitung der aus dem Grubengebäude ausgepressten Lösungen im Deckgebirge. Colenco Bericht 4305/39. Colenco Power Engineering AG, Baden/Schweiz [P-203].
- [Colenco 2002b] Klemenz, W., Klubertanz, G., Siegel, P., Resele, G. (2002): 2D Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Salzwasserverhältnissen. Modellrechnungen zur Auspressung von Salzlösung aus dem Grubengebäude. Colenco Bericht 4305/40. Colenco Power Engineering AG, Baden/Schweiz [P-170].
- [Colenco 2002c] Niemeyer, M., Poppei, J., Suter, D. (2002): Modellierung der Gasentwicklung im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM). Colenco Power Engineering AG, Bericht 4651/76, Baden/Schweiz [P-151].
- [Colenco 2006] Modellrechnungen zur Verifikation des Programms PROSA (PROSA 8.0). Colenco Power Engineering AG, Niemeyer, M., Holocher, J., Colenco-Bericht 4651/146, 04.12.2006
- [Corey 1994] Corey, A.T. (1994): Mechanics of Immiscible Fluids in Porous Media. ISBN 0-918334-83-7, Water Resources Publications, Colorado/USA
- [Davies 1991] Davies, P.B.: Evaluation of the role of threshold pressure in controlling flow of waste generated gas into bedded salt at the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP). Sandia Report Sand 90-3246
- [DBE 2003] ERAM-Hohlrauminformationssystem (ERAM HIS) 7.7.2.3 (Revisionsstand 02 vom 09.09.2003). Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine, 2003
- [DBE 2005] Verfüllplan zur Stilllegung des ERAM nach vorgezogener Verfüllung von Grubenbauen des Zentralteils, Konzeptplanung. DBE, Peine, [REDACTED] DBE-Bericht, 15.12.2005 [P-220]
- [DBE 2006] Systembeschreibung – Material für die Stilllegung. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine, [REDACTED] DBE-Bericht, Stand 10.08.2006 [G-228]
- [DBE 2008] Standsicherheits- und Integritätsnachweis des zugelaufenen Endlagers. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine, [REDACTED] DBE-Bericht Dok.-Nr. 9M/22341021/GC/LD/0009/01. Rev. 1, Stand 11.04.2008 [P-267]
- [DBE 2009] Anforderungen an Salzbeton als Baustoff für Abdichtungsbauwerke im Steinsalz. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), [REDACTED] DBE-Bericht, Peine, 26.01.2009



- [Deng et al. 1997] Deng, B., Campbell, T. J. , Burris, D. R. (1997): "Hydrocarbon Formation in Metallic Iron/Water Systems". *Environ. Sci. Technol.*, 31, 1185-1190
- [ERCOSPLAN 2003] Nachweisführungen zur Langzeitsicherheit, zur Tragfähigkeit und zur Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlüsse ERA Morsleben. Rauche, H., Sitz, P., Lukas, V., Rumphorst, K., Lippmann, G., Wagner, K., Teichert, T., ERCOSPLAN, Erfurt, 11.11.2003 [P-177]
- [ERCOSPLAN 2004] Konzeptplanung der Schachtverschlüsse ERA Morsleben. Rauche, H., Sitz, P., Lukas, V., Rumphorst, K., Lippmann, G., Wagner, K., Teichert, T., ERCOSPLAN, Erfurt, 10.03.2004 [P-182]
- [Erdogdu et al. 2004] Determination of chloride diffusion coefficient of concrete using open-circuit potential measurements. Erdogdu, S.; Kondratova, I.L. & Bremner, T.W. – *Cem. concr. res.* 2004, vol. 34, n°4, S. 603 – 609. Elsevier, New York
- [FZK-INE 2000] Quellterme für HAW-Glas, abgebrannten Kernbrennstoff und zementierte Abfälle. Kienzler, B., Schüssler, W. & Metz, V. FZK-INE 005/00, Karlsruhe 2000.
- [GRS 2003a] Herbert, H.-J., Meyer, Th., Schmidt-Döhl. (2003): Endlager Morsleben – Korrosion von Salzbeton durch saline Lösungen. Bericht GRS - A - 3170, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig [P-180]
- [GRS 2003b] Beitrag zur Erstellung einer Referenzbiosphäre zur Berechnung der in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für radioaktive Stoffe hervorgerufenen potentiellen Strahlenexposition unter Berücksichtigung des Klimas. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln, A. Becker, GRS-A-3036, Bericht erstellt im Auftrag des BMU, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU 2003-623
- [GRS 2009] Hagemann, S., Xie, M. & Herbert, H.-J.: Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse zur Korrosion von Salzbeton durch saline Lösungen. Bericht GRS-A-3458, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, März 2009
- [Gunnarson 2005] Gunnarson, I., Arnórsson, S. & Jakobson, S. (2005): Precipitation of poorly crystalline antigorite under hydrothermal conditions.- *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69/11, 2813-2828
- [FlexPDE 2008] PDE Solutions Inc. P.O. Box 4217, Antioch, CA 94531-4217, <http://www.pdesolutions.com>
- [Fokker 1995] Fokker, P.A. (1995). The behaviour of salt and salt caverns, Proefschrift Delft, ISBN 90-900753
- [Harvie et al. 1984] Harvie, C.E. , Møller, N. und Weare, J.H. (1984): The prediction of mineral solubilities in natural waters: The Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO₄-OH-HCO₃-CO₃-CO₂-H₂O system to high ionic strengths at 25°C.- *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 48, pp. 723 - 751



- [Ibrahim 1970] Ibrahim, M.A., Tek, M.R. und Katz, D.L.: Threshold Pressure in Gas Storage, American Gas Association, Arlington, VA, 1970.
- [Ito 1997] Ito, S., (1997): Alkaline cellulases from alkaliphilic Bacillus: enzymatic properties, genetics, and application to detergents, *Extremophiles*, 1, 61-66.
- [K-UTEC 2008] Konzeptplanung und Nachweisführung für ein Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit ERA Morsleben aus Magnesiabeton. Abschlussbericht. K-UTEC AG Salt Technologies, Sondershausen, 17. September 2008.
- [Krumgalz 1995] Krumgalz, B.S., Pogorelsky, R. & Pitzer, K.S. (1995): Ion interaction approach to calculations of volumetric properties of aqueous multiple-solute electrolyte solutions. – *Journal of Solution Chemistry*, Vol. 24, No. 10, p. 1025-1038
- [Nagra 2002] Project Opalinus Clay. Models, Codes and Data for Safety Assessment. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technischer Bericht NTB 02-06. Nagra, Wettingen, 2002.
- [Nagra 2003] Projekt Opalinuston, Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Nagra Technischer Bericht, NTB 02-03, Wettingen, Schweiz
- [Plan ERAM 2009] Plan zur Stilllegung des Endlagers für Radioaktive Abfälle Morsleben, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter, 13.01.2009
- [Pedersen 1999] Pedersen, K., (1999) Subterranean micro-organisms and radioactive waste disposal in Sweden, *Engineering Geology*, 52(1999), 163-176.
- [Pfennig 1998] Pfennig, G., Klewe-Nebenius, H., & Seelmann-Eggebert, W. (1998): Karlsruher Nuklidkarte, 6. Auflage 1995, korrigierter Nachdruck 1998. - Forschungszentrum Karlsruhe GmbH – Technik und Umwelt, Karlsruhe/Deutschland
- [Popp 2007] Integrity of a salt barrier during gas pressure build up in a radioactive waste repository – implications from laboratory investigations and field studies. Popp, T., Minkley, W., Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig. Paper presented at the International Conference on Radioactive Waste Disposal in Geological Formations (REPOSAFE), Braunschweig, 6.-9.11.2007
- [Präger 1999] Präger, R., Burchardt, I., Voborny, O. & Ehrminger, B: Geologische und hydrogeologische Situation des schachtnahen Bereiches Schacht Bartensleben. Geologische Forschung und Erkundung – GFE – GmbH Halle/Saale und Colenco Power Engineering AG, Baden/Schweiz, 1999.
- [Pröhl & Gering 2002] Pröhl, G. & Gering, F. (2002): Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern nach dem Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung in Anlehnung an die Vorgehensweise im Rahmen des Plan-



- feststellungsverfahrens des geplanten Endlagers Konrad.- GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Neuherberg [P-162]
- [Pruess 1999] Pruess, K., Oldenburg, C. und Moridis, G. (1999): TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California, USA
- [PSE 1985] Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE): Abschlußbericht, Fachband 15: Einzeluntersuchungen zur Radionuklidfreisetzung aus einem Modellsalzstock, Berlin
- [PTB 1986] Tittel, G., Hollmann, A., Stier-Friedland, G. & Warnecke, E. (1986): Ableitung von Sorptionsdaten aus experimentellen Untersuchungen - Schichtanlage Konrad. - Bericht PTB-SE-IB-7, Physikalisch Technische Bundesanstalt, Braunschweig
- [Rodwell 1999] Rodwell, W.R. et al. (1999): Gas migration and two-phase flow through engineered and geological barriers for a deep repository for radioactive waste. - A Joint EC/NEA Status Report published by the EC, European Commission Report EUR 19122 EN
- [Sander 1988] Sander, W. (1988): Quantitative Beschreibung der Lösungsmetamorphose beim Einbringen von Wasser in ein Bergwerk im Zechsteinsalinar.- Kali und Steinsalz, Band 10, Heft 2, S. 54 – 61
- [SSK 1995] Bewertung der Strahlenexposition durch Radon im Trinkwasser. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 39, 1995.
- [Stoessel 1988] Stoessel, R.K. (1988): 25°C and 1 atm dissolution experiments of sepiolite and kerolite.- *Geochimica and Cosmochimica Acta* 25, 365-374
- [The MathWorks 2003] The MathWorks, Inc. 3 Apple Hill Drive Natick, MA 01760-2098 USA, <http://www.matlab.com>
- [van de Vossenberg et al. 1999] van de Vossenberg, J.L.C.M., Driessen, A.J.M., Grant, W.D., Konings, W.N. (1999): Lipid membranes from halophilic and alkali-halophilic archae have a low H⁺ an Na⁺ permeability at high salt concentrations, *Extremophiles*, 3, 253-257
- [Vejmelka 1998] Vejmélka, P. (1998): Nuklidmigration im Deckgebirge des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM), Teil 2: Sorption im Deckgebirge - Abschlussbericht.- Institut für Nukleare Entsorgungstechnik, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe ((Referenzierung prüfen))
- [Vejmelka 2003] Vejmélka, P. et al. (2003): Nuklidmigration im Deckgebirge des ERAM (DGL), Abschlussbericht .- 9M 212 230-62, Institut für Nukleare Entsorgung Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe [P 173]



- [Voigt 2008] Voigt, W: Nachweisführung der chemischen und geochemischen Langzeitbeständigkeit für ein Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit aus Magnesia-beton. Bericht, BfS - PSP-Element: 9M 223 101-61. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie. Freiberg, 30.03.2008.
- [Wie 2006] Wie, J-X., Chen, Y-M. & Li, Y-X. (2006): The Reaction Mechanism between MgO and Microsilica at Room Temperature. - Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition 21 (2006) 2, S. 88-91
- [Wiegel 1998] Wiegel, J. (1998): Anaerobic alkali-thermophiles, a novel group of extremophiles, *Extremophiles*, 2, 257-267.
- [Wedepohl 1995] K.H. Wedepohl, The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59(1995), 1217-1232
- [ZERNA 2009] Endlager Morsleben. Dokumentation der Datenbasis in den Berichten: GRS-A-3454 Endlager Morsleben – Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programmpaket EMOS und Colenco-Bericht 4651/200 Endlager Morsleben – Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programm PROSA. PSP-Nr.: 9M 213 400-21. ZERNA Ingenieure, Bochum, 26.02.2009.

Anhang A Algorithmen des Modellkonzepts

Inhalt

Anhang A Algorithmen des Modellkonzepts.....	A-1
A.1 Konzeptionelles Modell.....	A-1
A.2 Parametrisierung von Hohlraumvolumina, Anfangsflüssigkeitsgehalt und Gasbildung.....	A-6
A.2.1 Hohlraumvolumina und Anfangsflüssigkeitsgehalt.....	A-6
A.2.2 Gasbildung.....	A-8
A.3 Prozesse während des Volllaufens der Restgrube ($t < T_{\text{Voll}}$).....	A-13
A.3.1 Prozesse in der übrigen Grube.....	A-13
A.3.2 Prozesse in den Einlagerungsbereichen.....	A-17
A.3.2.1 Nicht abgedichtete Einlagerungsbereiche.....	A-17
A.3.2.2 Abgedichtete Einlagerungsbereiche.....	A-18
A.3.2.2.1 Fall ohne Gaspolster.....	A-20
A.3.2.2.2 Fälle mit Gaspolster.....	A-20
A.3.3 Radioaktiver Zerfall.....	A-22
A.3.4 Schnittstelle zwischen Prologphase und Phase 1.....	A-22
A.4 Lösungszutritt in den Einlagerungsbereich ($0 \leq t \leq T_1$).....	A-22
A.4.1 Korrosion der Abdichtungen durch zutretende Salzlösung.....	A-23
A.4.2 Fall ohne Gaspolster.....	A-26
A.4.3 Fälle mit Gaspolster.....	A-29
A.5 Mobilisierung des Inventars ($t = T_1$).....	A-34
A.6 Lösungsauspressung aus dem Einlagerungsbereich ($T_1 \leq t \leq T_1 + T_3$).....	A-40
A.6.1 Fall ohne Gaspolster.....	A-41
A.6.2 Fälle mit Gaspolster.....	A-42
A.6.2.1 Fall ohne Gasfluss aus dem Einlagerungsbereich.....	A-43
A.6.2.2 Fall mit Gasfluss aus dem Einlagerungsbereich.....	A-44
A.6.3 Auspressen von Flüssigkeit nach Frac-Bildung.....	A-46
A.7 Verzögerung während Transport entlang des Abdichtsystems ($T_1 \leq t \leq T_1 + T_{\text{TG}}$).....	A-48
A.8 Mischung in der übrigen Grube ($T_1 + T_{\text{TG}} \leq t \leq T_1 + T_3$).....	A-50
A.9 Transportverzögerung im Hutgestein und Deckgebirge ($t_A \leq t \leq t_E$).....	A-53
A.10 Verdünnung in der Biosphäre ($t_A + T_{\text{TD}}(t_A) \leq t \leq t_E + T_{\text{TD}}(t_E)$).....	A-55
A.11 Resultierende Dosiswerte.....	A-56
A.12 Parameter.....	A-64

A.1 Konzeptionelles Modell

Das Modellkonzept behandelt die Prozesse, die den Transport der Radionuklide aus den Abfällen im Einlagerungsgrubenbau in die Biosphäre bewirken oder beeinflussen. Die verschiedenen Komponenten des Modells sind in Abbildung A-1 schematisch dargestellt. Die Prozesse, die zur Mobilisierung, zum Transport und zur Freisetzung der Radionuklide führen, laufen teilweise aufeinander folgend, teilweise gleichzeitig ab. Entsprechend lassen sich Entwicklungsphasen des Systems definieren, die sich allerdings teilweise überlappen. Abbildung A-2 zeigt die zeitliche Abfolge der Phasen mit Bezug zu einer Zeitskala, deren Nullpunkt das Ende der Phase 0 (Volllaufen der Restgrube) ist.

- Phase 0: Die Restgrube (d.h. die Grube ohne abgedichtete Bereiche) läuft durch Wasser aus Hutgestein und Deckgebirge voll. Vereinfachend wird angenommen, dass während dieser Phase noch kein Flüssigkeitszutritt in die Einlagerungsbereiche erfolgt. In den Einlagerungsbe-



reichen bildet sich Gas, solange Flüssigkeit vorhanden ist, und die Hohlraumvolumina verkleinern sich durch Konvergenz.

- Phase 1: Salzlösung tritt durch das Abdichtsystem in die abgedichteten Einlagerungsbereiche; die treibende Kraft ist der hydrostatische Druck am Ende des Abdichtsystems. Der Lösungszutritt in die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche erfolgt am Ende der Phase 0 instantan, d.h. die Phase 1 dauert bei den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen unendlich kurz.
- Phase 2: Die zugetretene Lösung dringt in die Abfallgebinde ein und mobilisiert die Radionuklide (im Modell wird angenommen, dass dieser Prozess instantan erfolgt).
- Phase 3: Die zugetretene Lösung wird aus den Einlagerungsbereichen wieder ausgepresst und nimmt die Radionuklide in gelöster Form mit; die Konvergenz des Salzgebirges ist die treibende Kraft, in zwei Modellvarianten unterstützt durch den Druck der bei der chemischen und mikrobiellen Umsetzung der Abfälle entstehenden Gase.
- Phase 4: Die radionuklidhaltige Lösung wird durch das Abdichtsystem transportiert; die Transportfront hat den Mischungsbereich des Grubengebäudes noch nicht erreicht; treibende Kraft für das Auspressen der Lösung sind die Konvergenz und die Gasbildung im Einlagerungsbereich.
- Phase 5: Die radionuklidhaltige Lösung hat den Mischungsbereich erreicht, wird hier verdünnt und tritt danach ins Deckgebirge aus; die treibende Kraft ist hierbei die Auspressung von Lösung aus sämtlichen Einlagerungsbereichen sowie die Konvergenz der übrigen Grube und des Mischungsbereichs selbst.
- Phase 6: Die radionuklidhaltige Lösung wird durch Hutgestein und Deckgebirge transportiert; die Transportfront hat die Biosphäre noch nicht erreicht; die treibende Kraft ist die Auspressung von Lösung aus dem Grubengebäude.
- Phase 7/8: Die radionuklidhaltige Lösung hat die Biosphäre erreicht und wird hier im Grundwasserfluss verdünnt; die weitere Ausbreitung in der Biosphäre führt zu Strahlenexpositionen.

Die entsprechenden Zeitintervalle sind:

T_{Voll}	Dauer von Phase 0 (Lösungszutritt in die Restgrube); [s]
T_1	Dauer von Phase 1 (Zutrittsphase); spezifisch für einen Einlagerungsbereich; [s]
T_2	Dauer von Phase 2 (Mobilisierung); instantan ($T_2 = 0$); [s]
T_3	Dauer von Phase 3 (Lösungsauspressung aus dem Einlagerungsbereich), Übertritt von Radionukliden in das Abdichtungssystem; spezifisch für einen Einlagerungsbereich; [s]
T_{TG}	Transportverzögerung im Abdichtsystem; spezifisch für den betrachteten Einlagerungsbereich und – bei Sorption – das Radionuklid; entspricht der (radionuklidspezifischen) Dauer der Phase 4 ($T_4 \equiv T_{\text{TG}}$); [s]
T_5	Dauer der Auspressung aus dem Mischungsbereich nach dem Ende von Phase 3, d.h. ausschließlich durch Konvergenz und Zutritt von Lösung aus der übrigen Grube; spezifisch für einen Einlagerungsbereich; [s]



$T_{TD}(t)$	Transportverzögerung in Hutgestein und Deckgebirge, spezifisch für ein Radionuklid i ; abhängig vom Zeitpunkt des Eindringens ins Deckgebirge; entspricht der (radionuklid-spezifischen, zeitabhängigen) Dauer der Phase 6 ($T_6 \equiv T_{TD}(t)$); [s]
T_7	Dauer von Phase 7 (Verdünnung im oberflächennahen Grundwasser); instantan ($T_7 = 0$); [s]
T_8	Dauer von Phase 8 (Freisetzung in Biosphäre); instantan ($T_8 = 0$); [s]

Als programminterne Zeitskala wird die Zeit ab abgeschlossenem Volllaufen der Restgrube gewählt. Der Nullpunkt der Zeitskala ($t = 0$) bezeichnet damit den Beginn der Phase 1. Diese Zeitskala ist gegenüber der Zeit nach Endlagerverschluss um die Zeitdauer T_{Voll} verschoben. Abbildung A-2 zeigt den Zeitablauf, die Definitionen der Zeiten t_i und der Zeitdauern T_i sowie die Beziehung zwischen der Modellzeit (programminterne Zeit) und der Zeit nach Endlagerverschluss.

Die Phase 0 wird auch als Prologphase bezeichnet: Ausgehend vom Zustand des Systems zu Beginn der Nachbetriebsphase (= Beginn der Phase 0) wird in einem vorgeschalteten Algorithmus die Systementwicklung während des Volllaufens der Restgrube betrachtet und der Systemzustand am Ende der Phase 0 (= Beginn der Phase 1) ermittelt. Dieser Zustand wird dann als Anfangsbedingung für die anschließenden Phasen verwendet, welche mit dem Rechenprogramm simuliert werden. Die berücksichtigten Prozesse während der Prologphase (Phase 0) sind

- radioaktiver Zerfall
- Hohlraumkonvergenz
- Gasbildung
- Gasfreisetzung über die Abdichtungen

Die Algorithmen für die einzelnen Phasen sind in den folgenden Kapiteln beschrieben. Die Zeitangaben bei der Beschreibung der Phasen 1 bis 8 beziehen sich dabei auf die programminterne Zeitskala mit $t = 0$ als Beginn der Phase 1. In den Kapiteln zur Prologphase und zur Gasbildung entsprechen die Anfangsbedingungen dem Systemzustand zu Beginn der Nachbetriebsphase. Der Zustand am Ende der Prologphase, dem Beginn der Phase 1, wird dort mit einem Index p (z.B. $V_{EH,p}$ für das Gesamthohlraumvolumen der Einlagerungsgrubenbaue zu Beginn der Phase 1) bezeichnet. In den Kapiteln zu den nachfolgenden Phasen wird dieser Index p der Einfachheit halber weggelassen.

Die Zeitskala in den Kapiteln zur Prologphase und im vorgezogenen Kapitel zur Gasbildung (Kapitel A.2.2) ist definiert durch den Nullpunkt zu Beginn der Nachbetriebsphase; die Prologphase auf dieser Zeitskala endet zum Zeitpunkt t_{Voll} (Abbildung A-2).

In porösen Medien unterscheidet sich der Druck in der Gasphase von jenem in der Flüssigphase durch den Kapillardruck. Dieser hängt einerseits von der Porengrößenverteilung und andererseits lokal von der aktuellen Sättigung ab. Typische Kapillardrücke erreichen nur bei sehr geringen Permeabilitäten ($< 10^{-16} \text{ m}^2$) oder geringen Flüssigkeitssättigungen Werte um 1 MPa oder darüber. Kapillardruckeffekte werden deshalb im Grubengebäude räumlich und zeitlich sehr variabel sein und – in Bezug auf räumlich gemittelte Prozesse – i.a. gering. Im vorliegenden Rechenmodell zum Nachweis der Langzeitsicherheit, das alle relevanten Prozesse in einer vereinfachten Weise abbildet, werden die Kapillardruckeffekte daher vernachlässigt.



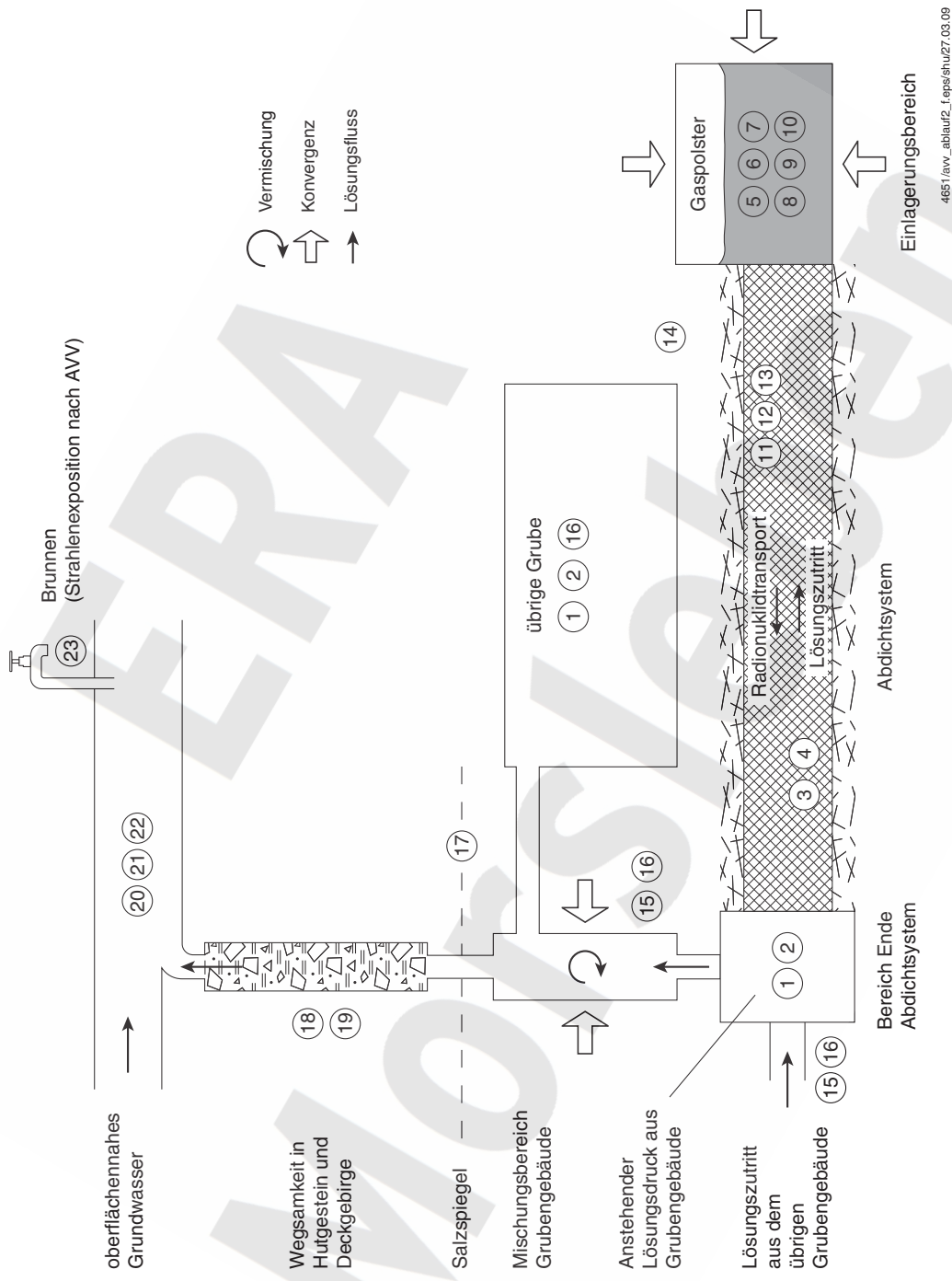
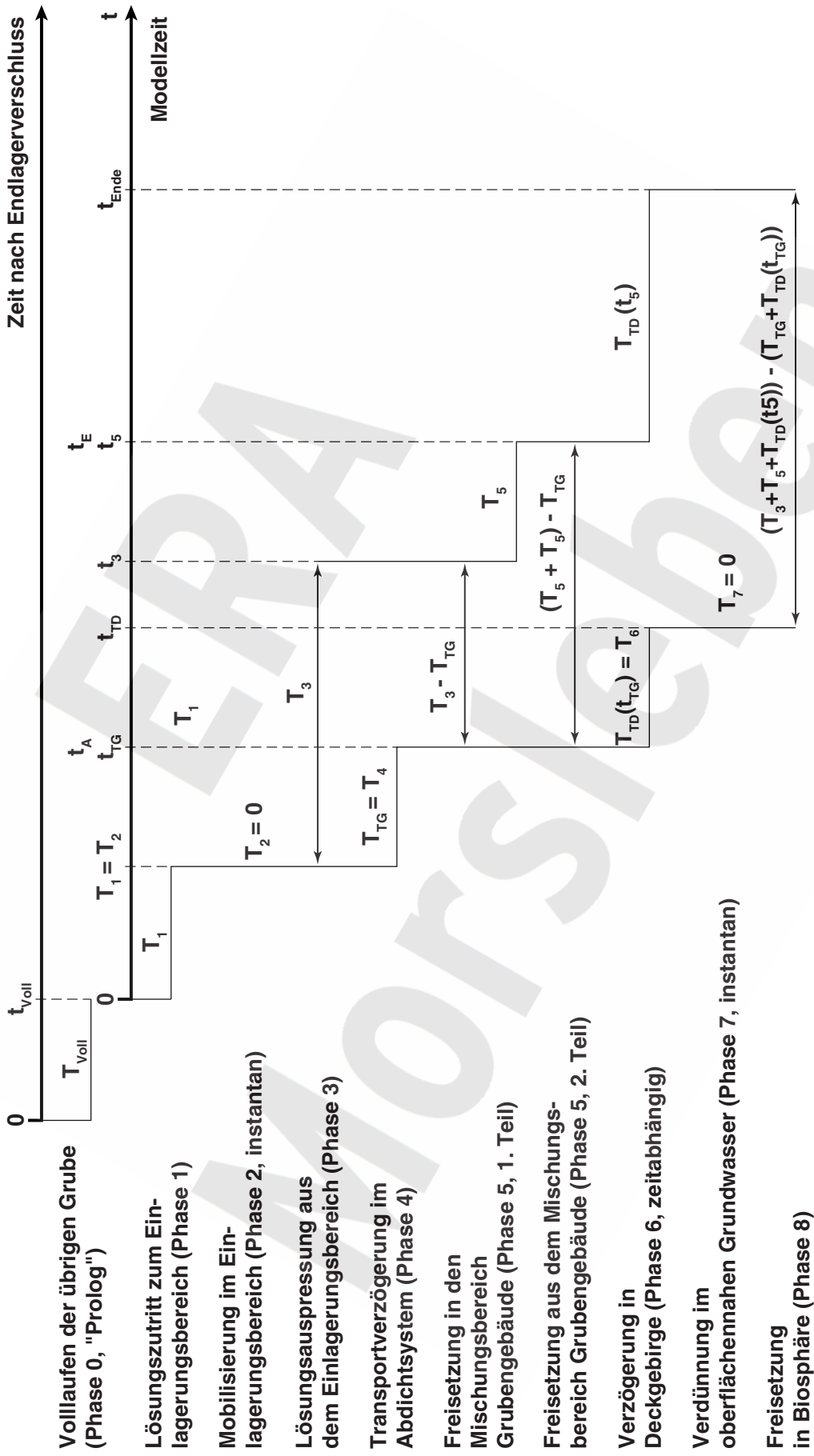


Abbildung A-1: Schematische Darstellung der Modellkomponenten und wesentlicher Prozesse. Die Ziffern entsprechen den in Tabelle 3-1 des Haupttextes aufgeführten Prozessen.





4651/berichte/200/Abb_A-2.eps/shu/30.03.09

Abbildung A-2 Zeitablauf und Definition der Zeiten t_i bzw. Zeitdauern T_i , vereinfachend für ein Radionuklid und einen Einlagerungsbereich. Die Dauern von Freisetzungen sind durch Pfeile dargestellt.

A.2 Parametrisierung von Hohlraumvolumina, Anfangsflüssigkeitsgehalt und Gasbildung

A.2.1 Hohlraumvolumina und Anfangsflüssigkeitsgehalt

Das Gesamthohlraumvolumen des Einlagerungsbereichs nimmt infolge Konvergenz mit der Zeit ab. Es wird angenommen, dass die Abhängigkeit der Volumenkonvergenz vom Fluidruck in den Grubenbauen und der Stützwirkung des Versatzes durch die Näherung [PSE 1985] beschrieben werden kann. Die zeitliche Abnahme des Gesamthohlraumvolumens wird dabei durch das in den Kapiteln A.4.2 und A.4.3 bzw. Anhang F aufgeführte Differentialgleichungssystem beschrieben. Wegen des unterschiedlichen Konvergenzverhaltens wird das Konturvolumen eines Grubenbaus in drei Anteile unterteilt: das unverfüllte Volumen, das mit kompaktierbarem Versatz verfüllte Volumen und das mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfüllte Volumen. Um Korrelationen bei der Dateneingabe zu vermeiden, werden diese drei Anteile getrennt für die Einlagerungsgrubenbaue und für den restlichen Einlagerungsbereich angegeben (vgl. Abbildung A-3). Weitere Angaben zur Modellierung der Konvergenz enthält Anhang F.

Das der Lösung zur Verfügung stehende Volumen des Einlagerungsbereichs ist mit der folgenden Gleichung als Funktion der Zeit beschrieben:

$$V_{EB}(t) = V_{EB,u}(t) + \varepsilon_{EB,v1}(t) \cdot V_{EB,v1}(t) + (\varepsilon \cdot V)_{EB,v2}(t) \quad (A-1)$$

Aufgrund der geringen Kompaktionsfähigkeit des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes wird für dessen wirksames Porenvolumen, $(\varepsilon \cdot V)_{EB,v2}$, ein vereinfachter Exponentialansatz verwendet und die zusätzliche Stützwirkung durch das Fluid im Inneren des Grubenbaues vernachlässigt.

$$V_{EB}(t) = V_{EB,u}(t) + \varepsilon_{EB,v1}(t) \cdot V_{EB,v1}(t) + \varepsilon_{EB,v2,0} \cdot V_{EB,v2,0} \cdot e^{-c_{EB} t/\gamma} \quad (A-2)$$

- $V_{EB,v1}(t)$ mit kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen des Einlagerungsbereichs als Funktion der Zeit; [m³]
- $V_{EB,v1,0}$ mit kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen des Einlagerungsbereichs zum Zeitpunkt t=0; [m³]
- $V_{EB,v2,0}$ mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen des Einlagerungsbereichs zum Zeitpunkt t=0; [m³]
- $V_{EB,u}(t)$ im Einlagerungsbereich vorhandenes unversetztes Hohlraumvolumen als Funktion der Zeit; [m³]
- $V_{EB,u,0}$ im Einlagerungsbereich vorhandenes unversetztes Hohlraumvolumen zum Zeitpunkt t=0; [m³]



$\varepsilon_{EB,v1}(t)$	Porosität des kompaktierbaren Versatzes als Funktion der Zeit; vor Einsetzen der Wirkung der Konvergenz (Zeitpunkt $t=0$): $\varepsilon_{EB,v1,0}$; [-]
$\varepsilon_{EB,v2,0}$	wirksame Porosität des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes ³⁹ vor Einsetzen der Wirkung der Konvergenz (Zeitpunkt $t=0$); [-]
c_{EB}	Konvergenzrate des unverfüllten Volumens im Einlagerungsbereich ohne Stützwirkung durch den Fluiddruck; [a^{-1}]
γ	Reduktionsfaktor für die Konvergenzrate des wirksamen Porenvolumens des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes; [-]

Die Größen $V_{EB,v1,0}$, $V_{EB,v2,0}$ und $V_{EB,u,0}$ ergeben sich aus den Eingabeparametern V_{EH} (Gesamtvolumen der Einlagerungsgrubenbaue vor Konvergenz), V_{REB} (Gesamtvolumen des restlichen Einlagerungsbereichs vor Konvergenz), ζ_{EHT} und ζ_{REBt} (totaler Verfüllgrad innerhalb bzw. außerhalb der Einlagerungsgrubenbaue) sowie ζ_{EHK} und ζ_{REBK} (Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz innerhalb bzw. außerhalb der Einlagerungsgrubenbaue). Die Eingabeparameter sind derart definiert, dass sie bei beliebiger, unabhängiger Variation nicht zu einer unsinnigen Anfangssituation führen.

$$V_{EB,u,0} = (1 - \zeta_{EHT}) \cdot V_{EH} + (1 - \zeta_{REBt}) \cdot V_{REB} \quad (A-3)$$

$$V_{EB,v1,0} = \zeta_{EHT} \cdot \zeta_{EHK} \cdot V_{EH} + \zeta_{REBt} \cdot \zeta_{REBK} \cdot V_{REB} \quad (A-4)$$

$$V_{EB,v2,0} = \zeta_{EHT} \cdot (1 - \zeta_{EHK}) \cdot V_{EH} + \zeta_{REBt} \cdot (1 - \zeta_{REBK}) \cdot V_{REB} \quad (A-5)$$

V_{EH}	Volumen der Einlagerungsgrubenbaue vor Konvergenz; [m^3]
V_{REB}	Volumen des Einlagerungsbereichs vor Konvergenz, abzüglich des Volumens der Einlagerungsgrubenbaue; [m^3]
ζ_{EHT}	Anteil des verfüllten Volumens der Einlagerungsgrubenbaue bezogen auf das gesamte Volumen der Einlagerungsgrubenbaue; [-]
ζ_{REBt}	Anteil des verfüllten Volumens des restlichen Einlagerungsbereichs bezogen auf das gesamte Volumen des restlichen Einlagerungsbereichs; [-]
ζ_{EHK}	Anteil des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens bezogen auf das gesamte verfüllte Volumen der Einlagerungsgrubenbaue; [-]
ζ_{REBK}	Anteil des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens bezogen auf das gesamte verfüllte Volumen des restlichen Einlagerungsbereichs; [-]

³⁹ Im Modell wird das Porenwasser des Salzbetons in den Einlagerungsbereichen nicht als frei bewegliche Lösung angesehen, das daher an den Prozessen (Lösung des Radionuklidinventars, Auspressung aus den Einlagerungsbereichen) nicht teilnimmt. Es wird angenommen, dass lediglich 1 ‰ des Porenwassers (Bandbreite 0,75 ‰ – 1,25 ‰) zur Radionuklidmobilisierung und –auspressung beiträgt. Dieser Anteil nimmt den als „wirksame Porosität des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes“ bezeichneten Teil der Gesamtporosität ein.



Die Abbildung A-3 skizziert die Zusammenhänge zwischen den Volumina.

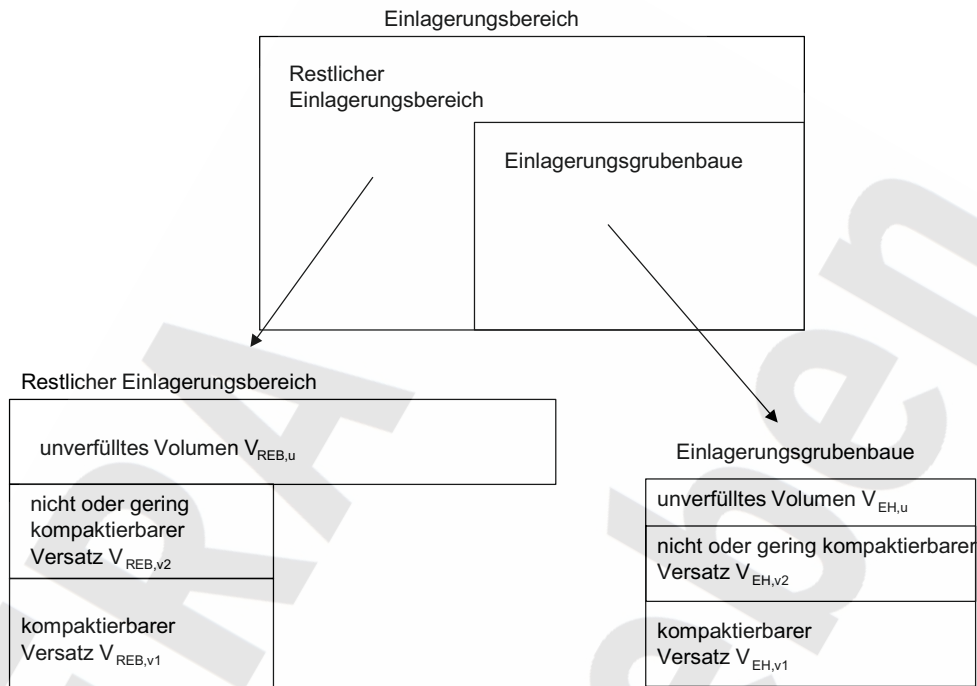


Abbildung A-3: Volumenanteile des Einlagerungsbereichs und Bestandteile der Verfüllung in den einzelnen Teilvolumen.

Der Einlagerungsbereich enthält bei $t=0$ bereits ein Volumen $V_{EB,L,0}$ an Flüssigkeit, welche als verfügbar für die zu modellierenden Prozesse angenommen wird.

$$V_{EB,L,0} = \varphi_A \cdot \varepsilon_{EB,v1,0} \cdot V_{EB,v1,0} + \varphi_N \cdot \varepsilon_{EB,v2,0} \cdot V_{EB,v2,0} \quad (\text{A-6})$$

φ_A Verhältnis von Flüssigkeitsvolumen im kompaktierbaren Versatz des Einlagerungsbereichs zum Porenvolumen des kompaktierbaren Versatzes zum Zeitpunkt $t=0$ im betrachteten Einlagerungsbereich; [-]

φ_N Skalierungsfaktor für die Variation des Porenwassers des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes, das an den langzeitsicherheitsrelevanten Prozessen teilnimmt; [-]

A.2.2 Gasbildung

Die Gasbildung wird mit einem unabhängigen Programm, GASGEN, modelliert (vgl. Anhang G). Dieses berechnet, gestützt auf Angaben für die Inventare der gasbildenden Stoffe und sonstigen

für die Gasbildung wesentlichen Edukte in den betrachteten Grubenbauen sowie unter Verwendung von verschiedenen Reaktionsparametern die Gasbildung als Funktion der Zeit. Entsprechend den Unsicherheiten, mit denen diese Eingangsgrößen angegeben werden können, liefert GASGEN eine Schar von unterschiedlichen Zeitverläufen. Allen GASGEN-Modellrechnungen gemeinsam ist die Annahme, dass das Inventar an gasbildenden Stoffen (Metalle, organische Verbindungen) in den betrachteten Grubenbauen zu 100 % an der Gasbildung teilnimmt und im Laufe der Zeit umgesetzt wird.

Für die Langzeitsicherheit relevant sind einerseits die bis zu einem bestimmten Zeitpunkt gebildete kumulierte Gasmenge und andererseits die zu einem bestimmten Zeitpunkt neu gebildete Gasmenge pro Zeiteinheit (Rate der Gasbildung). Von Bedeutung sind somit die Referenzwerte und Bandbreiten für diese beiden Größen zu jedem beliebigen Zeitpunkt. Nicht von Bedeutung für die Langzeitsicherheit ist demgegenüber die Nachbildung der einzelnen Zeitverläufe für verschiedene Werte der Gasbildungsparameter, d.h. von einzelnen Gasbildungs-Szenarien.

Im Gegensatz zu den GASGEN-Modellrechnungen kann und braucht für den Nachweis der Langzeitsicherheit jedoch nicht unterstellt zu werden, dass das gesamte Inventar der gasbildenden Stoffe mit Sicherheit am Gasbildungsprozess teilnimmt. Es ist möglich, dass Teile des Stoffinventars vor einem lokalen Zutritt von Flüssigkeit oder Feuchte sowie vor der lokalen Entstehung von Populationen gasbildender Mikroorganismen vollständig vom aufkriechenden Salz eingeschlossen werden. Zudem werden gasbildende Stoffe auch schon vor Verschluss des Endlagers stattfinden (siehe Fußnote 40 auf Seite A-12).

Die Parametrisierung der Gasbildung hat im Weiteren derart zu erfolgen, dass die einzelnen Parameter statistisch (möglichst) unabhängig und dennoch anschaulich sind. Dies wird durch die Wahl der folgenden 6 Parameter erreicht:

$V_{g,STP,tot}$	kumulierte Gasmenge nach langer Zeit (1 Mio. Jahre) bei Teilnahme des gesamten Stoffinventars am Gasbildungsprozess, angegeben als Volumen STP; [m^3_{STP}]
$Q_{g,1e2,tot}$	Gasbildungsrate zur repräsentativ frühen Zeit $t = 100$ Jahre bei Teilnahme des gesamten Stoffinventars am Gasbildungsprozess; [m^3_{STP}/a]
$Q_{g,1e4,tot}$	Gasbildungsrate zur repräsentativ späten Zeit $t = 10'000$ Jahre bei Teilnahme des gesamten Stoffinventars am Gasbildungsprozess; [m^3_{STP}/a]
η_{Lim}	Quotient der kumulierten Gasmenge, die sich bis zum Verbrauch der Anfangsflüssigkeit im Einlagerungsbereich bilden kann, und der kumulierten Gasmenge nach langer Zeit ohne Begrenzung durch verfügbare Flüssigkeit; [-]
η	Anteil des Inventars der gasbildenden Stoffe, der am Gasbildungsprozess teilnimmt; [-]
θ_{Rest}	Schwellenwert für das Verhältnis aus neu zugetretener Lösungsmenge und Anfangsflüssigkeit im Einlagerungsbereich, bei dem eine evtl. unterbrochene Gasbildung nach Ende der Prologphase wieder einsetzt; [-]

Die Referenzwerte und die Bandbreiten der vier zuerst genannten Parameter können aus den Ergebnissen der GASGEN-Modellrechnungen abgeleitet werden. Referenzwerte und Bandbreiten für



die beiden letztgenannten Parameter, den Anteil der am Gasbildungsprozess teilnehmenden Stoffinventare und den Schwellenwert für das Wiedereinsetzen der Gasbildung, werden durch Expertenschätzung festgelegt.

Sofern die im Einlagerungsbereich verfügbare Flüssigkeitsmenge für die Gasbildung nicht limitierend ist, erfolgt die Parametrisierung der Gasbildung für den Nachweis der Langzeitsicherheit gestützt auf diese Parameter nach folgendem Algorithmus:

$$V_{g,STP,e} = \eta \cdot V_{g,STP,tot} \quad (A-7)$$

$$Q_{g,1e2,e} = \eta \cdot Q_{g,1e2,tot} \quad (A-8)$$

$$Q_{g,1e4,e} = \eta \cdot Q_{g,1e4,tot} \quad (A-9)$$

Die Parameter $V_{g,STP,e}$, $Q_{g,1e2,e}$ und $Q_{g,1e4,e}$ beschreiben die kumulierte gebildete Gasmenge nach langen Zeiten sowie die Gasbildungsraten zu frühen und zu späten Zeiten unter Berücksichtigung des Effektes, dass ein Teil des Inventars an gasbildenden Stoffen durch aufkriechendes Salz eingeschlossen und dadurch dem Prozess entzogen wird. Mit der gewählten Parametrisierung wird angenommen, dass dieser Einschluss vor dem Beginn der Gasbildung abgeschlossen ist und während der Gasbildung keine weiteren Anteile des Stoffinventars mehr durch Einschluss dem Prozess entzogen werden. Diese implizite Annahme ist stark vereinfachend und könnte mit der Vorgabe einer zeitlich abnehmenden Funktion $\eta(t)$ anstelle der hier verwendeten Konstanten umgangen werden. Eine solche Vorgabe würde allerdings den im Folgenden dargestellten Algorithmus wesentlich verändern.

Betrachtet man für verschiedene Zeitpunkte die Bandbreite der von GASGEN ermittelten Gasbildungsraten und speziell die zeitliche Änderung ihrer Perzentilwerte, z.B. der 5%-Perzentile, der 50%-Perzentile und der 95%-Perzentile, dann erweist sich die folgende phänomenologische Gleichung für die Gasbildungsrate, $Q_{g,in}(t)$, zur Zeit t in $[m^3_{STP}/a]$ als zweckmäßig:

$$Q_{g,in}(t) = \begin{cases} a \cdot (t_0 + t)^n & \text{für } 0 \leq t \leq T_g \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (A-10)$$

mit $t_0 = 30$ Jahre, T_g Dauer der Gasbildung, a und n weitere interne Parameter.

Die Berechnung der internen Parameter a , n und T_g aus den anschaulichen Parametern $V_{g,STP,e}$, $Q_{g,1e2,e}$ und $Q_{g,1e4,e}$ wird im folgenden dargestellt.

Die ab dem Zeitpunkt $t=0$ bis zum Zeitpunkt t gemäß Gleichung (A-10) und ohne Berücksichtigung der Begrenzung durch $V_{g,STP,e}$ gebildete kumulierte Gasmenge in $[m^3_{STP}]$, $V'_{g,STP}(t)$, ergibt sich durch Integration von Gleichung (A-10) für $T_g = \infty$:



$$V'_{g,STP}(t) = \begin{cases} \frac{a}{n+1} [(t_0 + t)^{n+1} - t_0^{n+1}] & n \neq -1 \\ a \cdot \ln \left(1 + \frac{t}{t_0} \right) & n = -1 \end{cases} \quad (A-11)$$

Sei nun n' und a' definiert durch

$$n' = \frac{\ln(Q_{g,1e2,e}/Q_{g,1e4,e})}{\ln((t_0 + 100a)/(t_0 + 10'000a))} \quad (A-12)$$

$$a' = Q_{g,1e2,e}/(t_0 + 100a)^{n'}$$

Falls $n' \geq -1$ oder $-\frac{a'}{n'+1} \cdot t_0^{n'+1} \geq V_{g,STP,e}$ dann

$$n = n'$$

$$a = a' \quad (A-13)$$

$$T_g \text{ Lösung von } V_{g,STP,e} = \begin{cases} \frac{a'}{n'+1} \cdot [(t_0 + T_g)^{n'+1} - t_0^{n'+1}] & n' \neq -1 \\ a' \cdot \ln \left(1 + \frac{T_g}{t_0} \right) & n' = -1 \end{cases}$$

sonst (d.h. für $n' < -1$ und $-\frac{a'}{n'+1} \cdot t_0^{n'+1} < V_{g,STP,e}$)

$$n \text{ Lösung von } V_{g,STP,e} = -\frac{Q_{g,1e2,e}}{n+1} \cdot t_0 \cdot \left(\frac{t_0}{t_0 + 100a} \right)^n \quad (A-14)$$

$$a = Q_{g,1e2,e}/(t_0 + 100a)^n$$

$$T_g = \infty$$

Damit sind die rechtechnischen Parameter n , a und T_g aus den Eingangsparametern $V_{g,STP,tot}$, $Q_{g,1e2,tot}$, $Q_{g,1e4,tot}$ und η bestimmt, allerdings noch ohne Berücksichtigung einer eventuellen Unterbrechung der Gasbildung in der Prologphase durch eine begrenzende Menge Anfangsflüssigkeit.

Im Falle, wo n , a und T_g durch die Gleichungen (A-14) zu ermitteln sind, legen die Eingangsgrößen $Q_{g,1e2,e}$ und $Q_{g,1e4,e}$ einen derart raschen zeitlichen Abfall der Gasbildungsrate fest, dass die geforderte kumulierte Gasmenge $V_{g,STP,e}$ mit der gewählten allgemeinen Parametrisierung gemäß Gleichung (A-10) nie erreicht wird. Die Eingangsgrößen sind damit nicht kompatibel mit der Beschreibung der Zeitabhängigkeit der Gasbildung durch Gl. (A-10). Dennoch wird auch in diesem Fall Gl. (A-10) beibehalten, jedoch nur die beiden Eingangsgrößen $V_{g,STP,e}$ und $Q_{g,1e2,e}$ berücksichtigt, die Eingangsgröße $Q_{g,1e4,e}$ ignoriert und durch die Randbedingung ersetzt, dass die vorgegebene ku-



mulierte Gasmenge nach unendlich langer Zeit erreicht wird. Dies entspricht einer möglichst raschen Abnahme der Gasbildungsrate im Rahmen der Parametrisierung mittels Gl. (A-10) bei vorgegebenen Werten für die kumulierte Gasmenge und die Gasbildungsrate zu frühen Zeiten.

Die chemischen Prozesse, bei denen Abfallinhaltsstoffe umgesetzt und Gase gebildet werden (Metallkorrosion, mikrobieller Abbau von Organika), benötigen und verbrauchen Wasser. Mit den Abfällen und den Versatzstoffen wird eine gewisse Flüssigkeitsmenge in die Einlagerungsbereiche eingebracht. Daher setzt die Gasbildung sofort mit Beginn der Nachbetriebsphase⁴⁰ ein, auch ohne dass Wasser in die Einlagerungsbereiche eindringen muss, und kann nach Gleichung (A-10) unter Verwendung der ermittelten rechen-technischen Parameter n , a und T_g berechnet werden. Dadurch wird auf chemischem Wege Wasser im Einlagerungsbereich verbraucht. Da aber während der Prologphase, d.h. der Zeit, in der die Restgrube vollläuft, keine Flüssigkeit in die Einlagerungsbereiche Zutritt, kann der Fall eintreten, dass alle verfügbare Anfangsflüssigkeit im Einlagerungsbereich durch die Gasbildung aufgebraucht wird⁴¹. Die Anfangsflüssigkeit reicht nur aus, um einen Bruchteil η_{Lim} der Gasmenge $V_{g,\text{STP,tot}}$ zu bilden, welche nach langer Zeit bei ausreichendem Wasserangebot entsteht. Der Zeitpunkt $t'_{g,1}$, zu welchem das eintritt, ist gegeben durch

$$\int_0^{t'_{g,1}} Q_{g,\text{in}}(t) dt = \eta_{\text{Lim}} \cdot V_{g,\text{STP,tot}} \quad (\text{A-15})$$

Die Gasbildung hört bereits früher auf, falls zuvor der Anteil des Inventars der gasbildenden Stoffe, der am Gasbildungsprozess teilnimmt, verbraucht ist, wenn also der in den Gleichungen (A-13) definierte Zeitpunkt T_g erreicht ist.

Die Gasbildung dauert während der Prologphase also bis zum Zeitpunkt $t_{g,1}$:

$$t_{g,1} = \min(t'_{g,1}, T_g, t_{\text{voll}}) \quad (\text{A-16})$$

$t_{g,1}$ Zeitpunkt, bis zu dem die Gasbildung während der Prologphase andauert [s]

Falls die Gasbildung während der Prologphase durch Verbrauch der Anfangsflüssigkeit unterbrochen wird, dann setzt sie erst wieder ein, wenn über die Abdichtungen eine gewisse Lösungsmenge zutreten ist. Als Schwellenwert für das Wiedereinsetzen der Gasbildung wird eine zutretende Flüssigkeitsmenge vom Bruchteil θ_{Rest} der anfänglichen Lösungsmenge im Einlagerungsbereich angenommen (Gleichung (A-67) in Kapitel A.4.3)⁴². Der Zeitpunkt, zu dem diese Lösungsmenge über die Abdichtungen in den Einlagerungsbereich zutreten ist, wird mit $t'_{g,2}$ bezeichnet. Reicht die Anfangsflüssigkeit für die Gasbildung während der Prologphase aus, dann wird die Gasbildung

⁴⁰ Streng genommen begann die Gasbildung bereits mit der Abfallkonditionierung und -einlagerung, ein Teil des gasbildenden Inventars ist daher zu Beginn der Nachbetriebsphase bereits umgesetzt, und die dabei gebildeten Gase konnten entweichen. Das wird im Modell vernachlässigt.

⁴¹ Bei kurzer Prolog-Phase und gering durchlässigen Abdichtungen sind auch Fälle denkbar, bei denen die Gasbildung durch Verbrauch der Flüssigkeit zum Erliegen kommt, nachdem der Lösungszutritt zu den Einlagerungsbereichen eingesetzt hat. Dies wird im Modell nicht explizit berücksichtigt. Eine Parametervariation mit niedrigen und zeitlich langsam abfallenden Gasbildungsraten beschreibt jedoch die Auswirkungen näherungsweise.

⁴² Die Wahl dieses Schwellenwerts erfolgt dergestalt, dass die zutretene Flüssigkeit eine nennenswerte Gasbildung im Vergleich zu jener der Prologphase erlaubt. Der genaue Wert indes hat in den meisten Fällen keinen signifikanten Einfluss auf den Zeitpunkt des Wiedereinsetzens der Gasbildung, weil bis zur vollständigen Korrosion des Abdichtungssystems nur sehr geringe Lösungsmengen zutreten, die Zuflussrate danach aber sprunghaft ansteigt (vgl. Kapitel A.4.1).



ohne Unterbrechung fortgesetzt. Der Zeitpunkt, zu dem die Gasbildung nach dem Ende der Prologphase wieder einsetzt, ist also gegeben durch

$$t_{g,2} = \begin{cases} t'_{g,2} & t_{g,1} < t_{Voll} \\ t_{Voll} & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{A-17})$$

$t'_{g,2}$ Zeitpunkt, zu dem die in den Einlagerungsbereich zugetretene Flüssigkeitsmenge den Schwellenwert vom Bruchteil θ_{Rest} der Anfangsflüssigkeit überschreitet [s]

$t_{g,2}$ Zeitpunkt, zu dem die Gasbildung nach Ende der Prologphase wieder einsetzt [s]

Es wird vereinfachend angenommen, dass die gasbildenden Prozesse bei $t_{g,1}$ schlagartig aufhören und bei $t_{g,2}$ dort wieder einsetzen, wo sie zuvor aufgehört haben. Unter Berücksichtigung der Prologphase wird die Gasbildung anstelle von Gleichung (A-10) durch nachfolgende Gleichung parametrisiert, wobei die rechen-technischen Parameter n , a und T_g unverändert sind.

$$Q_{g,in}(t) = \begin{cases} a \cdot (t_0 + t)^n & 0 \leq t \leq t_{g,1} \\ a \cdot (t_0 + t - t_{g,2} + t_{g,1})^n & t_{g,2} < t < T_g + t_{g,2} - t_{g,1} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{A-18})$$

A.3 Prozesse während des Volllaufens der Restgrube ($t < T_{Voll}$)

Bei einem Lösungszutritt in die Grube läuft die Restgrube, d.h. die übrige Grube und die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche, grundsätzlich gleichzeitig voll. Im Modell wird dies aus Gründen der einfacheren Darstellung wie folgt umgesetzt: Während der Prologphase läuft nur die übrige Grube voll, die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche bleiben trocken. Diese laufen nach Abschluss der Prologphase, zu Beginn der Phase 1 (Lösungszutritt in die Einlagerungsbereiche) aufgrund der praktisch fehlenden Abdichtsysteme innerhalb sehr kurzer Zeit voll (vgl. Kapitel A.3.2.1)

A.3.1 Prozesse in der übrigen Grube

Der Gesamthohlraum in der übrigen Grube ist zu Beginn der Nachbetriebsphase (= Beginn Phase 0) mit Luft unter Atmosphärendruck gefüllt. Konvergenz und Gasbildung bewirken einen Druckanstieg, solange die Gase nicht in das Hutgestein, in dem in einiger Entfernung vom Grubengebäude hydrostatische Drücke herrschen, entweichen können und daher während der Zutrittsphase in der Grube eingeschlossen sind. Die aus dem Hutgestein zutretenden Wässer komprimieren die eingeschlossenen Gase zusätzlich. In den flüssigkeitsgefüllten Bereichen der Grube setzt sich der Druck aus dem hydrostatischen Druck der Flüssigkeitssäule im Grubengebäude und dem Gasdruck oberhalb der Flüssigkeitssäule zusammen.

Diese komplexen, räumlich und zeitlich unterschiedlichen Druckverhältnisse werden für die Berechnung der Konvergenz während der Prologphase vereinfacht durch einen zeitlich konstanten mittleren Fluiddruck in der übrigen Grube, $p_{Prol,RG}$, beschrieben. Für diesen Druck wird ein Wert



zwischen Atmosphärendruck, p_0 , und dem vollen hydrostatischen Druck auf der Bezugssohle nach Druckausgleich zwischen Hutgestein und Grubengebäude, $p_{w,Z}$, angesetzt:

$$p_{\text{Prol,RG}} = p_0 + \kappa_p \cdot (p_{w,Z} - p_0) \quad (\text{A-19})$$

mit

$p_{\text{Prol,RG}}$ mittlerer Fluiddruck in der Restgrube vom Zeitpunkt Verschluss bis t_{Voll} [Pa]

κ_p Parameter zur Festlegung von $p_{\text{Prol,RG}}$ [-]

p_0 Standarddruck = 0,1 MPa;

$p_{w,Z}$ hydrostatischer Absolutdruck (Lösung) in der Restgrube nach deren Volllaufen in der Bezugsteufe, d.h. am Ende des Abdichtsystems; [MPa]

Da der lithostatische Druck deutlich über dem Fluiddruck liegt, konvergieren die Hohlräume in der Grube. Dabei sind die unverfüllten und die verfüllten Volumina in den Mischungsbereichen und in der übrigen Grube zu berücksichtigen. Es gelten im Wesentlichen dieselben Gleichungen wie für die Einlagerungsbereiche nach der Prologphase, welche in Kapitel A.4.3 als Gleichungen (A-59) bis (A-63) aufgeführt sind, mit dem Unterschied, dass sich hier Anfangsbedingungen und Zeitnullpunkt auf den Beginn der Nachbetriebsphase beziehen, der Fluiddruck $p_{\text{Prol,RG}}$ statt $p_{\text{EB}}(t)$ beträgt und die Indizes EB durch VG bzw. GG zu ersetzen sind.

Die zutretenden Deckgebirgswässer sättigen sich am Steinsalz in der Grube auf; dabei entsteht gesättigte NaCl-Lösung, und das unverfüllte Hohlraumvolumen vergrößert sich. Durch Umlöseprozesse am Kalisalz bildet sich IP21-Lösung. Dabei entsteht gleichfalls neuer Hohlraum, welcher aber mit den Feststoffen, die bei diesem Prozess ausfallen, gefüllt wird. Dies entspricht in guter Näherung zusätzlichem mit kompaktierbarem Versatz verfülltem Hohlraum.

Konvergenz, Lösungszutritt und Umlösung laufen gleichzeitig ab. Im Modellansatz werden Konvergenz und Umlösung getrennt: Die Konvergenz wird bis zum Ende des Volllaufens mit den ursprünglich vorhandenen Volumina gerechnet, und auf die resultierenden Volumina wird für den Zeitpunkt t_{Voll} die Umlösung angewandt. Diese Näherung entspricht einer Grube, die praktisch bis zum Zeitpunkt t_{Voll} trocken ist und dann schlagartig vollläuft. Tatsächlich ist damit zu rechnen, dass die Zutrittsrate zu Beginn eher niedrig ist und dann ansteigt, sei es durch progressive Lösungsprozesse entlang des Zutrittspfads, sei es durch neotektonische Bildung neuer Wegsamkeiten im Hutgestein.

Die Porosität des ursprünglich vorhandenen kompaktierbaren Versatzes nimmt mit der Zeit durch Konvergenz ab. Dagegen weist der zum Schluss durch Umlösung gebildete Versatz eine Porosität von gut 40% auf. Im Modell werden zum Ende der Prologphase beide Versatzarten zu einem Gesamtvolumen mit einer mittleren Porosität zusammengefasst.

Die Berechnung der Volumina und Porositäten nach Konvergenz, Aufsättigung und Umlösung erfordert die folgenden Parameter:

c_{GG} Konvergenzrate der übrigen Grube; [a^{-1}]



V_{GG}	Volumen der übrigen Grube vor Auf- und Umlöseprozessen und Konvergenz; [m ³]
ζ_{GGt}	Anteil des verfüllten Volumens der übrigen Grube, bezogen auf das gesamte Volumen der übrigen Grube (vor den Auf- und Umlöseprozessen); [-]
ζ_{GGk}	Anteil des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens, bezogen auf das verfüllte Volumen der übrigen Grube (vor den Auf- und Umlöseprozessen); [-]
$\epsilon_{GG,v1,0}$	Porosität des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens der übrigen Grube; [-]
$\epsilon_{GG,v2,0}$	wirksame Porosität des mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens der übrigen Grube; [-]
$\phi_{GG,A}$	Anfangssättigung des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens der übrigen Grube vor instantanem Volllaufen; [-]
$\phi_{GG,N}$	Verhältnis von verfügbarem Flüssigkeitsvolumen im nicht oder gering kompaktierbaren Versatz zum wirksamen Porenvolumen des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes zum Zeitpunkt t=0 in der übrigen Grube; [-]

Die Volumenänderung des übrigen Grubengebäudes durch die Lösung von Salz beim Zutritt von Wässern und die nachfolgende Volumenbildung durch die Umbildung von NaCl-Lösung an Kalisalzen⁴³ werden gemäß Anhang E bei der Bestimmung der Volumina zu Ende der Prologphase, d.h. der Modell-Anfangsvolumina für die Phase 1 der übrigen Grube $V_{GG,u,p}$ und $V_{GG,v1,p}$, berücksichtigt.

Vereinfachend wird dazu angenommen, dass die zutretenden Wässer Süßwasser sind. Des Weiteren wird angenommen, dass die anfänglich im Gesamthohlraum vorhandene Luft mit der Zeit entweichen kann und die übrige Grube nach dem Volllaufen vollständig flüssigkeitsgesättigt ist. Beide vereinfachenden Annahmen führen zu einer Überschätzung des neugebildeten Volumens.

Im ersten Schritt sättigen sich die zutretenden Wässer am Salzgestein (Halit) auf. Das Volumen des durch diesen Auflösungsprozess neu entstehenden unverfüllten Hohlrums ist proportional zum anfänglich luftgefüllten Gesamthohlraumvolumen. Für das unversetzte Volumen, das nach Konvergenz vom anfänglichen unversetzten Volumen verbleibt, gilt

$$V_{GG,u,a} = V_{GG,0} \cdot (1 - \zeta_{GGt}) \cdot \exp \left[-c_{GG} \cdot \left(1 - \frac{p_{ProI,RG}}{p_{litho}} \right)^m \cdot t_{Voll} \right] \quad (A-20)$$

mit

$V_{GG,u,a}$ unverfülltes Volumen in der übrigen Grube zur Zeit t_{Voll} nach Konvergenz ohne Auf- und Umlösungsprozesse

⁴³ Für die Berechnung von konvergenzwirksamen Hohlraumvolumina wird Umlösung bis IP21-Lösung angenommen.



Das mit kompaktierbarem Versatz verfüllte Volumen $V_{GG,v1,a}$ und die zugehörige Porosität in der übrigen Grube nach Konvergenz $\varepsilon_{GG,v1,a}$ zur Zeit t_{Voll} ohne Auf- und Umlösungsprozesse berechnen sich unter Verwendung von $p_{ProI,RG}$ analog zu den Gleichungen (A-60) bis (A-63) in Kapitel A.4.3. Für das mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfüllte Volumen gilt

$$(\varepsilon \cdot V)_{GG,v2,a} = V_{GG,0} \cdot \zeta_{GGt} \cdot (1 - \zeta_{GGk}) \cdot \varepsilon_{GG,v2,0} \cdot e^{-\frac{\varepsilon_{GG} \cdot t_{Voll}}{\gamma_{GG}}} \quad (A-21)$$

Bei der anschließend zu betrachtenden Aufsättigung am Steinsalz entsteht neuer unversetzter Hohlraum. Bei der Berechnung werden die relativ geringen Mengen an Deckgebirgschwässern, die in die eventuell vorhandenen teilgesättigten Bereiche des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes gelangen, vernachlässigt. Das insgesamt vorhandene unversetzte Hohlraumvolumen zu Beginn von Phase 1 ist damit

$$V_{GG,u,p} = F_{NaCl} \cdot V_{GG,u,a} + (F_{NaCl} - 1) \cdot (V_{GG,v1,a} \cdot \varepsilon_{GG,v1,a} - V_{GG,0} \cdot \zeta_{GGt} \cdot \zeta_{GGk} \cdot \varepsilon_{GG,v1,0} \cdot \varphi_{GG,A}) \quad (A-22)$$

mit

$F_{NaCl} \approx 1,17$ Volumenvergrößerungsfaktor für die Aufsättigung von Süßwasser an NaCl-Salz; [-]

Im zweiten Schritt bildet sich durch Umlöseprozesse am Carnallit IP21-Lösung. Für die Volumenberechnung wird im Modell angenommen, dass die gesamte NaCl-Lösung aus dem unverfüllten und dem kompaktierbar versetzten Hohlraum (Salzgrus) umgelöst wird, nicht aber die Lösung aus dem Porenraum des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes (Salzbeton). Beim Umlöseprozess wird Carnallit aufgelöst. Zugleich werden aber verschiedene Salzminerale ausgefällt, die neben dem Halit, der nicht in Lösung geht, diesen Hohlraum teilweise ausfüllen: Bei gleichmäßiger Verteilung dieser Salze auf den neu entstehenden Hohlraum hätte dieser eine Porosität von 45%. Das Volumen des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten, durch die Umlösung neu entstandenen Hohlraums berechnet sich damit zu:

$$V_{GG,v1,n} = (F_{IP21,L} + F_{IP21,S} - 1) \cdot (V_{GG,u,p} + V_{GG,v1,a} \cdot \varepsilon_{GG,v1,a}) \quad (A-23)$$

Dieser hat eine Porosität $\varepsilon_{GG,v1,n}$ von

$$\varepsilon_{GG,v1,n} = \frac{F_{IP21,L} - 1}{F_{IP21,L} + F_{IP21,S} - 1} \quad (A-24)$$

mit

$F_{IP21,L} \approx 1,623$ Volumenfaktor für die Lösungsneubildung durch die Aufsättigung von NaCl-Lösung zu IP21-Lösung, bezogen auf das anfängliche Volumen der NaCl-Lösung; [-]

$F_{IP21,S} \approx 0,744$ Volumenfaktor für die Ausfällung von Feststoffen durch die Aufsättigung von NaCl-Lösung zu IP21-Lösung, bezogen auf das anfängliche Volumen der NaCl-Lösung; [-]



Damit liegt nach beendeter Umlösung kompaktierbarer Versatz mit einem Volumen $V_{GG,v1,p}$ und einer durchschnittlichen Porosität $\varepsilon_{GG,v1,p}$ vor:

$$V_{GG,v1,p} = V_{GG,v1,a} + V_{GG,v1,n} \quad (A-25)$$

$$\varepsilon_{GG,v1,p} = \frac{\varepsilon_{GG,v1,a} \cdot V_{GG,v1,a} + \varepsilon_{GG,v1,n} \cdot V_{GG,v1,n}}{V_{GG,v1,a} + V_{GG,v1,n}} \quad (A-26)$$

Weder das Volumen noch das wirksame Porenvolumen des mit nicht kompaktierbarem Versatz verfüllten Hohlraums ändern sich durch die Auf- und Umlöseprozesse; es gilt:

$$(\varepsilon \cdot V)_{GG,v2,p} = (\varepsilon \cdot V)_{GG,v2,a} \quad (A-27)$$

Die Volumina und Porositäten in den Mischungsbereichen werden in analoger Weise, jedoch ohne Auf- und Umlöseprozesse berechnet.

A.3.2 Prozesse in den Einlagerungsbereichen

A.3.2.1 Nicht abgedichtete Einlagerungsbereiche

Sobald der Flüssigkeitsspiegel in der Restgrube im Bereich der nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche die entsprechenden Einlagerungssohlen erreicht, gelangt Lösung zu den Abfällen. Damit setzt die Mobilisierung der Radionuklide in den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen bereits während der Prologphase ein. Die mobilisierten Radionuklide können mit den Lösungsbewegungen in andere Bereiche der Grube gelangen, aus der Grube in das Hutgestein und Deckgebirge können sie aber nicht austreten.

Die Ausbreitung der Radionuklide aus den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen während der Prologphase in der Restgrube wird im Modell nicht simuliert. Stattdessen wird unterstellt, dass die Radionuklide während der gesamten Prologphase im Einlagerungsbereich bleiben, nach einer sehr kurzen Phase 1 rasch mobilisiert werden und schnell in den Mischungsbereich gelangen. Dadurch setzt im Modell der Übertritt von Radionukliden aus den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen in das Hutgestein sehr früh ein. Um den raschen Transport in den Mischungsbereich zu Beginn der Phase 3 zu simulieren, wird im Modell die Gasbildung während der Prologphase in den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen rechnerisch unterbrochen: η_{Lim} wird sehr klein gewählt, damit ist $t_{g,1}$ praktisch sofort erreicht. In den Fällen mit Gaspolster drückt dann die zu Beginn von Phase 1 wiedereinsetzende Gasbildung die kontaminierte Lösung schnell in den Mischungsbereich.

Mit dieser rechnerischen Anpassung können die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche auch bei Berücksichtigung der Prologphase wie abgedichtete Einlagerungsbereiche mit unwirksamer Abdichtung modelliert werden.

A.3.2.2 Abgedichtete Einlagerungsbereiche

Während die Restgrube vollläuft, laufen in den abgedichteten Einlagerungsbereichen dieselben Prozesse ab wie während des späteren Lösungszutritts in diese Einlagerungsbereiche (Phase 1, siehe Kap. A.4), mit wenigen Ausnahmen:

- Es erfolgt noch kein Lösungszutritt durch die Abdichtungen
- somit erfolgt auch keine Korrosion des Salzbetons in den Abdichtungen

Daher gelten auch während der Prologphase (Phase 0) im Wesentlichen die in Kap. A.4 dargestellten Gleichungen zur Beschreibung der folgenden Prozesse:

- Konvergenz des unverfüllten Hohlraums in den Einlagerungsgrubenbauen und dem restlichen Einlagerungsbereich
- Konvergenz des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Hohlraums in den Einlagerungsgrubenbauen und dem restlichen Einlagerungsbereich
- Konvergenz des mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfüllten Hohlraums in den Einlagerungsgrubenbauen und dem restlichen Einlagerungsbereich

Die folgenden Größen werden berechnet:

$V_{EH,u,p}$	unverfülltes Volumen in den Einlagerungsgrubenbauen am Ende der Prologphase ($t = t_{voll}$); [m^3]
$V_{REB,u,p}$	unverfülltes Volumen im restlichen Einlagerungsbereich am Ende der Prologphase ($t = t_{voll}$); [m^3]
$V_{EH,v1,p}$	mit kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen in den Einlagerungsgrubenbauen am Ende der Prologphase ($t = t_{voll}$); [m^3]
$V_{REB,v1,p}$	mit kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen im restlichen Einlagerungsbereich am Ende der Prologphase ($t = t_{voll}$); [m^3]
$(\varepsilon \cdot V)_{EH,v2,p}$	wirksames Porenvolumen des mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens in den Einlagerungsgrubenbauen am Ende der Prologphase ($t = t_{voll}$); [m^3]
$(\varepsilon \cdot V)_{REB,v2,p}$	wirksames Porenvolumen des mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens im restlichen Einlagerungsbereich am Ende der Prologphase ($t = t_{voll}$); [m^3]
$\varepsilon_{EB,v1,p}$	Porosität des kompaktierbaren Versatzes im Einlagerungsbereich am Ende der Prologphase ($t = t_{voll}$); [-]
$p_{EB,p}$	Gasdruck im Einlagerungsbereich am Ende der Prologphase ($t = t_{voll}$) (nur in den Fällen mit Gaspolster); [Pa]



Daraus sind unter Verwendung der Gleichungen (A-3) bis (A-5) rückwärts wieder die Parameter zu bestimmen, die zu Beginn der Phase 1, d.h. bei $t = t_{Voll}$ als Anfangswerte dienen:

$V_{EH,p}$	Volumen der Einlagerungsgrubenbaue am Ende der Prologphase ($t = t_{Voll}$); [m ³]
$V_{REB,p}$	Volumen des restlichen Einlagerungsbereichs am Ende der Prologphase ($t = t_{Voll}$); [m ³]
$\zeta_{EHt,p}$	Anteil des verfüllten Volumens der Einlagerungsgrubenbaue bezogen auf das gesamte Volumen der Einlagerungsgrubenbaue am Ende der Prologphase ($t = t_{Voll}$); [-]
$\zeta_{REBt,p}$	Anteil des verfüllten Volumens des restlichen Einlagerungsbereichs bezogen auf das gesamte Volumen des restlichen Einlagerungsbereichs am Ende der Prologphase ($t = t_{Voll}$); [-]
$\zeta_{EHk,p}$	Anteil des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens bezogen auf das gesamte verfüllte Volumen der Einlagerungsgrubenbaue am Ende der Prologphase ($t = t_{Voll}$); [-]
$\zeta_{REBk,p}$	Anteil des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens bezogen auf das gesamte verfüllte Volumen des restlichen Einlagerungsbereichs am Ende der Prologphase ($t = t_{Voll}$); [-]
$\varepsilon_{EB,v2,p}$	wirksame Porosität des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im Einlagerungsbereich am Ende der Prologphase ($t = t_{Voll}$); [-]
$\varphi_{EB,A,p}$	Flüssigkeitsanteil im kompaktierbaren Versatz des gesamten Einlagerungsbereichs am Ende der Prologphase ($t = t_{Voll}$); [-]
$\varphi_{EB,N,p}$	Flüssigkeitsanteil im nicht oder gering kompaktierbaren Versatz des gesamten Einlagerungsbereichs am Ende der Prologphase ($t = t_{Voll}$); [-]

Dabei gilt:

$$V_{EH,v2,p} = (\varepsilon \cdot V)_{EH,v2,p} + (1 - \varepsilon_{EH,v2,0}) \cdot V_{EH,v2,0} \quad (A-28)$$

$$V_{REB,v2,p} = (\varepsilon \cdot V)_{REB,v2,p} + (1 - \varepsilon_{REB,v2,0}) \cdot V_{REB,v2,0} \quad (A-29)$$

$$\varepsilon_{EB,v2,p} = \frac{(\varepsilon \cdot V)_{EH,v2,p} + (\varepsilon \cdot V)_{REB,v2,p}}{V_{EH,v2,p} + V_{REB,v2,p}} \quad (A-30)$$

$$V_{EH,p} = V_{EH,u,p} + V_{EH,v1,p} + V_{EH,v2,p} \quad (A-31)$$

$$V_{REB,p} = V_{REB,u,p} + V_{REB,v1,p} + V_{REB,v2,p} \quad (A-32)$$

$$\zeta_{EHt,p} = \frac{V_{EH,v1,p} + V_{EH,v2,p}}{V_{EH,p}} \quad (A-33)$$

$$\zeta_{REBt,p} = \frac{V_{REB,v1,p} + V_{REB,v2,p}}{V_{REB,p}} \quad (A-34)$$



$$\zeta_{\text{EHk,p}} = \frac{V_{\text{EH,v1,p}}}{V_{\text{EH,v1,p}} + V_{\text{EH,v2,p}}} \quad (\text{A-35})$$

$$\zeta_{\text{REBk,p}} = \frac{V_{\text{REB,v1,p}}}{V_{\text{REB,v1,p}} + V_{\text{REB,v2,p}}} \quad (\text{A-36})$$

$$\varphi_{\text{EB,A,p}} = \frac{V_{\text{EH}} \cdot \zeta_{\text{EHT}} \cdot \zeta_{\text{EHk}} + V_{\text{REB}} \cdot \zeta_{\text{REBt}} \cdot \zeta_{\text{REBk}}}{V_{\text{EH,p}} \cdot \zeta_{\text{EHT,p}} \cdot \zeta_{\text{EHk,p}} + V_{\text{REB,p}} \cdot \zeta_{\text{REBt,p}} \cdot \zeta_{\text{REBk,p}}} \cdot \frac{\varepsilon_{\text{EB,v1,0}} \cdot \varphi_{\text{EB,A}}}{\varepsilon_{\text{EB,v1,p}}} \quad (\text{A-37})$$

$$\varphi_{\text{EB,N,p}} = \frac{V_{\text{EH}} \cdot \zeta_{\text{EHT}} \cdot (1 - \zeta_{\text{EHk}}) + V_{\text{REB}} \cdot \zeta_{\text{REBt}} \cdot (1 - \zeta_{\text{REBk}})}{V_{\text{EH,p}} \cdot \zeta_{\text{EHT,p}} \cdot (1 - \zeta_{\text{EHk,p}}) + V_{\text{REB,p}} \cdot \zeta_{\text{REBt,p}} \cdot (1 - \zeta_{\text{REBk,p}})} \cdot \frac{\varepsilon_{\text{EB,v2,0}} \cdot \varphi_{\text{EB,N}}}{\varepsilon_{\text{EB,v2,p}}} \quad (\text{A-38})$$

A.3.2.2.1 Fall ohne Gaspolster

Im Fall ohne Gaspolster werden alle Folgen der Gasbildung, insbesondere auch der ansteigende Druck im Einlagerungsbereich vernachlässigt. In den Einlagerungsbereichen sind während des Volllaufens der Restgrube nur die durch die Hohlraumkonvergenz bewirkten Prozesse zu betrachten:

- Konvergenz des unverfüllten Hohlraums in Einlagerungsgrubenbauen und restlichem Einlagerungsbereich (gemäß Gleichung (A-53))
- Konvergenz des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Hohlraums in Einlagerungsgrubenbau und restlichem Einlagerungsbereich (gemäß Gleichung (A-54) bis (A-56))
- Konvergenz des mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfüllten Hohlraums in den Einlagerungsgrubenbauen und dem restlichem Einlagerungsbereich (gemäß dem dritten Term in Gleichung (A-2))

A.3.2.2.2 Fälle mit Gaspolster

In den Fällen mit Gaspolster wird die Hohlraumkonvergenz in den Einlagerungsbereichen durch die Stützwirkung des Fluidrucks beeinflusst. Im Unterschied zum Fall ohne Gaspolster ist hier die gebildete Gasmenge und der daraus resultierende Druck zu berücksichtigen. Anfangs herrscht in den Einlagerungsbereichen Atmosphärendruck. Die Gasbildung wird unterbrochen, wenn die zu Beginn vorhandene Flüssigkeitsmenge verbraucht ist (Gleichung (A-15)).

Je nach Parameterkombination kann der Gasdruck in einem abgedichteten Einlagerungsbereich während des Volllaufens der Restgrube so weit ansteigen, dass er ohne Gasaustritt aus dem Einlagerungsbereich während der Prologphase zum Zeitpunkt t_{voll} über dem hydrostatischen Druck in der übrigen Grube liegt. Würde dieser Zustand weiter anhalten, so könnte nie ein Lösungszutritt in den Einlagerungsbereich erfolgen, und es würde auch nie eine Radionuklidfreisetzung aus diesem erfolgen. Sobald der Druck im Einlagerungsbereich jenen in der Restgrube übersteigt, besteht eine treibende Kraft für den Gasaustritt aus dem Einlagerungsbereich in die Restgrube. Begrenzend für den Gasfluss ist neben der für den Gasfluss wirksamen Querschnittsfläche die Gasdurchlässigkeit



(intrinsische Gaspermeabilität und relative Gaspermeabilität in Abhängigkeit der Gassättigung) des Abdichtsystems.

Im Modell wird angenommen, dass während der Prologphase Gas aus jedem Einlagerungsbereich über das Abdichtsystem in die Restgrube entweicht, sobald der Druck im Einlagerungsbereich den mittleren Fluiddruck in der Grube, $p_{\text{Prol,RG}}$, überschreitet. Dabei wird für den Gasfluss über das Abdichtsystem der entsprechende Ansatz verwendet wie im Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ während der Auspressphase (Einzelheiten siehe Kapitel A.6.2.2):

$$Q_{g,\text{STP,out}}(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } p_{\text{EB}}(t) \leq p_{\text{Prol,RG}} \\ \frac{K_1}{\mu_g} \cdot \frac{p_{\text{EB}}(t) - p_{\text{Prol,RG}}}{L_1} \cdot \frac{p_{\text{EB}}(t) + p_{\text{Prol,RG}}}{2 \cdot p_0} \cdot f_g \cdot A_1 \cdot \Theta(V_{g,\text{STP,m}}(t) - V_{g,\text{STP,num}}(t)) & \text{für } p_{\text{EB}}(t) > p_{\text{Prol,RG}} \end{cases} \quad (\text{A-39})$$

mit

$$V_{g,\text{STP,m}}(t) = V_{\text{EB},0} - V_{\text{EB,L},0} + \int_0^t Q_{g,\text{in}}(t') dt' + V_{g,\text{STP,num}}(t) - \int_0^t Q_{g,\text{STP,out}}(t') dt' \quad (\text{A-40})$$

$$V_{g,\text{STP,num}}(t) = 0,01 \cdot V_{\text{EB}}(t)$$

Im Übrigen gelten für die Hohlraumkonvergenz die Gleichungen aus Kap. A.4.3 mit Anfangsbedingungen und Zeitnullpunkt bezogen auf den Beginn der Nachbetriebsphase, keinem Lösungszutritt $Q_1(t)$ und einem Fluiddruck in der übrigen Grube von $p_{\text{Prol,RG}}$ anstelle von $p_{w,Z}$:

- Konvergenz des unverfüllten Hohlrums in Einlagerungsgrubenbauen und restlichem Einlagerungsbereich (gemäß Gleichung (A-59))
- Konvergenz des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Hohlrums in Einlagerungsgrubenbauen und restlichem Einlagerungsbereich (gemäß Gleichung (A-60) bis (A-63))
- Konvergenz des mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfüllten Hohlrums in Einlagerungsgrubenbauen und dem restlichen Einlagerungsbereich (gemäß dem dritten Term in Gleichung (A-2))

Dabei berechnet sich der Fluiddruck in Anlehnung an Gleichung (A-64), allerdings mit Einbezug eines eventuellen Gasaustritts aus dem Einlagerungsbereich:

$$p_{\text{EB}}(t) = p_0 \cdot \frac{\delta_T \cdot V_{g,\text{STP,m}}(t)}{V_{\text{EB}}(t) - V_{\text{EB,L},0}}$$

$$= p_0 \cdot \frac{\delta_T \cdot V_{g,\text{STP,m}}(t)}{V_{\text{EB,u}}(t) + \varepsilon_{\text{EB,v1}}(t) \cdot V_{\text{EB,v1}}(t) + \varepsilon_{\text{EB,v2,0}} \cdot V_{\text{EB,v2,0}} \cdot e^{-c_{\text{EB}} t / \gamma} - V_{\text{EB,L},0}} \quad (\text{A-41})$$

Der Druck am Ende der Prologphase und damit der Anfangsdruck für die Phase 1 ist

$$p_{\text{EB,p}} = p_{\text{EB}}(t = t_{\text{voll}}) \quad (\text{A-42})$$

Dieser Algorithmus unterstellt für die unwahrscheinlichen Parameterkombinationen, in denen trotz austretendem Gas der Druck auf sehr hohe Werte ansteigt, keine Bildung von neuen hydraulischen Wegsamkeiten (Frac-Bildung, vgl. Kapitel A.6.3). Sofern jedoch der Anfangsdruck für die Phase 1 über dem maßgebenden lithostatischen Druck des betrachteten Einlagerungsbereichs



liegt, weist die Phase 1 eine verschwindende Zeitdauer auf ($T_1=0$), und der Frac tritt umgehend zu Beginn der Phase 3 auf ($t_{\text{frac}} = t_{\text{voll}}$).

A.3.3 Radioaktiver Zerfall

Durch den radioaktiven Zerfall verändert sich das Radionuklidinventar während der Prologphase. Diese Veränderungen sind unabhängig von allen anderen Prozessen, sie werden durch die Bateman-Gleichungen (Gleichungen (A-153) bis (A-157) in Kapitel A.11) beschrieben.

Ausgehend vom Anfangsinventar zu Beginn der Nachbetriebsphase erlauben diese Gleichungen, das Radionuklidinventar in jedem Einlagerungsbereich für den Zeitpunkt t_{voll} , das Ende der Prologphase, zu ermitteln. Das derart ermittelte Inventar ist das Anfangsinventar für die Phasen 1 bis 8:

$$I_{i,p} = I_i(t = t_{\text{voll}}) \quad (\text{A-43})$$

A.3.4 Schnittstelle zwischen Prologphase und Phase 1

Bisher bezogen sich die Zeitangaben auf die Zeitskala, deren Nullpunkt der Beginn der Nachbetriebsphase ist. In den nachfolgenden Kapiteln beziehen sich die Zeitangaben auf die Zeitskala mit dem Nullpunkt zu Beginn der Phase 1. Desgleichen werden im Folgenden die Verhältnisse zu Beginn der Phase 1 als Anfangsbedingungen bezeichnet. Diese Anfangsbedingungen ergeben sich mit den in Kapitel A.3 neu berechneten Parameterwerten, mit Ausnahme der Gasbildung, deren rechen-technische Parameter sich auf den Beginn der Nachbetriebsphase beziehen. In den Termen, die sich im Folgenden auf die Gleichung (A-18) im Kapitel A.2.2 beziehen, ist daher stets t durch $t + t_{\text{voll}}$ substituiert.

A.4 Lösungszutritt in den Einlagerungsbereich ($0 \leq t \leq T_1$)

Zu Beginn der Phase 1 ($t = 0$ nach der ab hier verwendeten Zeitskala) weisen die abgedichteten Einlagerungsbereiche einen Fluiddruck von $p_{\text{EB,p}}$ auf, die Flüssigkeitsmenge ist unverändert die mit Abfällen und Versatz eingebrachte Anfangsflüssigkeit. Die Restgrube ist vollgelaufen, der Druckausgleich mit dem Hutgestein und Deckgebirge ist erreicht, und im Modell beträgt der Druck am (äußeren) Ende des Abdichtsystems in der Referenzteufe $p_{\text{w,z}}$. Wie in Kapitel A.3.2.1 ausgeführt wurde, werden die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche im Modell wie abgedichtete Einlagerungsbereiche mit unwirksamer Abdichtung simuliert. Entsprechend werden im Folgenden auch die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche als teilgesättigt angenommen, während die „übrige Grube“ (= Restgrube ohne die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche) als gesättigt betrachtet wird. Für die Berechnung des Lösungszutritts entlang der beiden Abdichtungen des ELB OF aus unterschiedlichen Baustoffen wird der Lösungsdruck auf der Seite „übrige Grube“ nach der Sohle differenziert und mit $p_{\text{w,2}}$ für die 2. Sohle und $p_{\text{w,4}}$ für die 4. Sohle bezeichnet. Verallgemeinernd wird dieser Druck mit $p_{\text{w,n}}$, $n = Z, 2$ oder 4 , bezeichnet:

$p_{\text{w,n}} = p_{\text{w,z}}$ hydrostatischer Druck in der übrigen Grube in der Referenzteufe, maßgebend für den Lösungszutritt durch die Abdichtsysteme in den ELB WSF und – formell – die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche



- $p_{w,n} = p_{w,2}$ hydrostatischer Druck in der übrigen Grube auf der 2. Sohle, maßgebend für den Lösungszutritt durch die Abdichtung aus Salzbeton in den ELB OF
- $p_{w,n} = p_{w,4}$ hydrostatischer Druck in der übrigen Grube auf der 4. Sohle, maßgebend für den Lösungszutritt durch die Abdichtung aus Magnesiabeton in den ELB OF

Mit Beginn der Phase 1 beginnt der Lösungszutritt in die Einlagerungsbereiche, sofern der Lösungsdruck $p_{w,z}$ in der übrigen Grube die anfänglichen Fluiddrücke in den Einlagerungsbereichen $p_{EB,p}$ übersteigt. Der Lösungszutritt dauert so lange, bis alle Grubenbaue des betrachteten Einlagerungsbereichs vollständig mit Lösung gefüllt sind (Fall 1, Kapitel A.4.2) oder bis der Fluiddruck im Einlagerungsbereich den hydrostatischen Druck erreicht hat ($p_{EB}(t) = p_{w,z}$; Fall 2, Kapitel A.4.3).

- $p_{EB}(t)$ Absolutdruck (Lösung) im Einlagerungsbereich; [MPa]
- $Q_1(t)$ Rate des Lösungszutritts in den Einlagerungsbereich (Zutrittsrate); [m^3/a]
- $V_{EB,L,0}$ Flüssigkeitsmenge zu Beginn im Einlagerungsbereich (identisch zu Beginn der Prologphase und zu Beginn von Phase 1); [m^3]
- $V_{EB}(t)$ Gesamthohlraumvolumen (Hohlraum- und Porenvolumen) im Einlagerungsbereich; [m^3]

A.4.1 Korrosion der Abdichtungen durch zutretende Salzlösung

Der Salzmörtel der Abdichtungen aus Salzbeton ist gegenüber magnesiumhaltiger Lösung, wie sie sich in der übrigen Grube durch Umlöseprozesse an Carnallit- und Hartsalzlagern einstellen kann, nicht beständig. Vereinfachend können die dabei ablaufenden chemischen Reaktionen folgendermaßen beschrieben werden (vgl. Anhang L): Die für die Stabilität verantwortlichen CSH-Phasen lösen sich unter Freisetzung von Calcium-Ionen auf. Zugleich werden magnesiumhaltige Phasen ausgefällt. Dabei ändern sich Porosität und Permeabilität des Materials. Modellhaft kann eine Abdichtung während des Korrosionsprozesses in vier Zonen unterteilt werden:

- eine Zone, in der noch das ursprüngliche Porenwasser des Salzbetons vorhanden ist
- eine Zone, die von der bei der Umsetzung entstehenden Lösung mit erhöhtem Calciumgehalt erreicht wurde
- eine Zone, in der die eigentliche Umsetzung stattfindet (Reaktionsfront); sie weist eine Pufferwirkung auf (zutretende Magnesium-Ionen werden ausgefällt, Calcium-Ionen freigesetzt)
- eine Zone, in der die Umsetzung abgeschlossen ist und die gegen weiter zutretende magnesiumhaltige Lösung praktisch inert ist

Wie in Anhang L gezeigt, dürfte Lösung mit erhöhtem Calciumgehalt die Permeabilität des Salzbetons zumindest nicht erhöhen. Zudem unterscheiden sich die Reaktionslösungen hinsichtlich ihrer Viskosität kaum von gesättigter NaCl-Lösung, d.h. der Porenlösung in unkorrodiertem Salzbeton⁴⁴. Die beiden ersten Zonen können daher für die Transportmodellierung zusammengefasst werden.

⁴⁴ Dies ergaben Viskositätsmessungen an Lösungen, welche die aufgrund der geochemischen Modellierung berechnete Zusammensetzung aufwiesen.



Außerdem ist aufgrund der – verglichen mit der Transportgeschwindigkeit in den Abdichtungen – schnellen chemischen Umsetzung die Reaktionsfront kurz im Verhältnis zur Länge der Abdichtung. Die Ausdehnung der drittgenannten Zone kann deshalb bei der Transportmodellierung vernachlässigt werden, die Reaktionsfront wird als schmal angesetzt.

Im Transportmodell setzt sich eine korrodierende Abdichtung damit aus einem unkorrodierten und einem korrodierten Abschnitt zusammen. Die Korrosion erfolgt in einer vernachlässigbar schmalen Reaktionsfront. In dieser geht nach mehrmaligem Austausch des Porenwassers durch magnesiumumhaltige Lösung der unkorrodierte in den korrodierten Salzbeton über.

In ähnlicher Weise erfolgt die Korrosion von Magnesiabeton, welcher für die Abdichtung des Einlagerungsbereichs Ostfeld auf der 4. Sohle vorgesehen ist, durch Lösungen mit einem niedrigen Magnesiumgehalt. In diesem Fall wandelt sich Sorelphase unter Abgabe von Magnesium-Ionen in Brucit um, wodurch sich Porosität und Permeabilität der Festphase erhöhen (vgl. Anhang L).

Die Anzahl Porenwasserzyklen für vollständige Korrosion des Baustoffs ergibt sich aus der volumetrischen Umlösekapazität der Lösung mit der höchsten Umlösekapazität am jeweiligen Feststoff, d.h. IP21-Lösung am Salzbeton bzw. NaCl-Lösung am Magnesiabeton, und dem tatsächlichen Magnesiumgehalt der zutretenden Lösung entsprechend folgender Beziehungen:

Salzbeton:

$$\varepsilon_{S,tot} \cdot n_{por,S} = \varepsilon_{S,tot} + (1 - \varepsilon_{S,tot}) \cdot \frac{1}{c_M \cdot \kappa_L} \quad (A-44)$$

mit

$n_{por,S}$ Anzahl Porenwasserzyklen für die vollständige Korrosion von Salzbeton; [-]

κ_L volumetrische Umlösekapazität von IP21-Lösung an Salzbeton, bezogen auf das Feststoffvolumen; [m^3 <Feststoff>/ m^3 <Lösung>]

$\varepsilon_{S,tot}$ Gesamtporosität von Salzbeton ; [-]

c_M Mg-Sättigung der zutretenden Lösung in Relation zu IP21-Lösung; [-]

Magnesiabeton:

$$\varepsilon_{M,tot} \cdot n_{por,M} = \begin{cases} \varepsilon_{M,tot} + \frac{c_E}{(c_E - c_M) \cdot \kappa_M} & \text{für } c_M < c_E \\ \infty & \text{für } c_M \geq c_E \end{cases} \quad (A-45)$$

mit

$n_{por,M}$ Anzahl Porenwasserzyklen für die vollständige Korrosion von Magnesiabeton; [-]



- K_M volumetrische Umlösekapazität von NaCl-Lösung an Magnesiabeton, bezogen auf das Gesamtvolumen („bulk volume“) des Betons; [$m^3 <gesamt (bulk)>/m^3 <Lösung>$]
- $\epsilon_{M,tot}$ Gesamtporosität von Magnesiabeton nach vollständiger Korrosion⁴⁵; [-]
- c_E Gleichgewichtskonzentration für Magnesium in der Porenlösung von Magnesiabeton bei NaCl-Sättigung und Anwesenheit von 3-1-8-Sorelphase und Brucit in Relation zu IP21-Lösung; [-]. $c_E = 0,122$.

Diese Gleichungen spiegeln wider, dass eine Abdichtung aus Salzbeton nur dann völlig korrosionsbeständig ist, wenn die zutretende Lösung kein Magnesium enthält, während ein Bauwerk aus Magnesiabeton gegenüber NaCl-gesättigten Lösungen, deren Magnesiumkonzentration mindestens c_E beträgt, chemisch langzeitstabil ist.

Das Fortschreiten der Korrosion entlang der Abdichtung berechnet sich gemäß:

$$x_{k,i}(t) = \min \left(\frac{V_{w,i,in}(t)}{n_{por,i} \cdot \epsilon_{i,tot} \cdot A_{1,i} \cdot L_{1,i}}, 1 \right) \quad (A-46)$$

mit

i verwendeter Baustoff ($i = S$: Salzbeton, $i = M$: Magnesiabeton); [-]

$x_{k,i}$ Verhältnis von korrodierter Länge der Abdichtung zur Gesamtlänge; [-]

$n_{por,i}$ Anzahl Porenwasserzyklen, die für die vollständige Korrosion des Baustoffs i erforderlich sind; [-]

$V_{w,i,in}(t)$ Volumen der Lösung, die bis zum Zeitpunkt t in die Abdichtung zugetreten ist; [m^3]. Dieses Lösungsvolumen ist in ausreichender Näherung gleich dem Lösungsvolumen, das bis zum Zeitpunkt t aus der Abdichtung in den dahinter liegenden Einlagerungsbereich zugetreten ist.

$$V_{w,i,in}(t) = \int_0^t Q_{1,i}(\tau) d\tau$$

$Q_{1,i}(t)$ Rate des Lösungszutritts entlang des Abdichtsystems bzw. der Abdichtung aus dem Baustoff i zum Zeitpunkt t ; [m^3/a]

$L_{1,i}$ Transportlänge des Abdichtsystems bzw. der Abdichtung aus dem Baustoff i ; [m]

$A_{1,i}$ Transportquerschnitt des Abdichtsystems bzw. der Abdichtung aus dem Baustoff i ; [m^2]

$\epsilon_{i,tot}$ Gesamtporosität des Baustoffs nach Korrosion; [-]

⁴⁵ Die Korrosion von Magnesiabeton ist mit einer Porositätserhöhung verbunden. Da die Poren der vollständig korrodierten Abdichtung – d.h. nachdem die Reaktionsfront ganz durch das Bauwerk gewandert ist – mit „unverbrauchter“ Grubenlösung gefüllt sind, ist die Porosität nach Korrosion der maßgebliche Parameter für die Berechnung.



und es gilt $x_{k,i}(t=0) = 0$

Die Transporteigenschaften der Abdichtung werden beschrieben durch

$K_{1,i}$ Permeabilität des Baustoffs i vor Korrosion; [m^2]

$K_{3,i}$ Permeabilität des Baustoffs i nach Korrosion; [m^2]

$K_{3/1,i}$ Quotient aus $K_{3,i}$ und $K_{1,i}$; [-]

Die Gleichung (A-46) gilt zunächst für eine einzelne Abdichtung. Wie in Anhang D dargelegt wird, setzen sich die Abdichtsysteme des Einlagerungsbereichs West-Südfeld aus mehreren parallelgeschalteten Abdichtungen zusammen, die alle aus Salzbeton bestehen ($i = S$). Die Parameter $L_{1,S}$ und $A_{1,S}$ des Abdichtsystems sind die Länge und der Querschnitt einer hydraulisch äquivalenten einfachen Abdichtung, wobei der Parameter $L_{1,S}$ gleich der Länge der kürzesten Abdichtung im System ist.

Lange Abdichtungen eines Abdichtsystems aus einheitlichem Baustoff korrodieren langsamer als kurze. Die Geschwindigkeit, mit der die Korrosionsfront fortschreitet, ist umgekehrt proportional zur Länge der Abdichtung; die Dauer bis zur vollständigen Korrosion wächst quadratisch mit der Länge.

Die Anwendung der Gleichung (A-46) auf ein System parallel geschalteter Abdichtungen entspricht somit der Näherung, dass der relative Fortschritt in allen Abdichtungen gleich ist und jenem der kürzesten Abdichtung entspricht. Der Fortschritt in den langen Abdichtungen wird somit stark überschätzt, die Näherung ist konservativ.

Etwas anders ist die Situation im Einlagerungsbereich Ostfeld, wo auf der 4. Sohle eine Abdichtung aus Magnesiabeton ($i = M$), auf der 2. Sohle eine Abdichtung aus Salzbeton ($i = S$) vorgesehen ist. Hier geht – je nach Magnesiumgehalt der zutretenden Lösung – die Korrosion der beiden Abdichtungen mit stark unterschiedlicher Geschwindigkeit vonstatten. Die beiden Abdichtungen werden deshalb in der Zutrittsphase separat modelliert.

A.4.2 Fall ohne Gaspolster

Im Fall ohne Gaspolster wird dem hydrostatischen Druck der Lösung außerhalb des Einlagerungsbereichs, $p_{w,z}$, während der Zutrittsphase kein Druckaufbau von innen entgegengesetzt. Für den Druck im Einlagerungsbereich wird konstant Atmosphärendruck (p_0) angenommen. Die volumetrische Lösungszutrittsrate $Q_{1,i}$ berechnet sich nach Darcy's Gesetz und unter Berücksichtigung der fortschreitenden Korrosion des Abdichtsystems bzw. der Abdichtung gemäß

$$Q_{1,i}(t) = \frac{K_{1,i}}{\mu_w} \cdot \frac{p_{w,n} - p_0}{L_{1,i} \cdot \left(\frac{x_{k,i}(t)}{K_{3/1,i}} + 1 - x_{k,i}(t) \right)} \cdot A_{1,i} \quad (\text{A-47})$$

mit

μ_w Viskosität der flüssigen Phase; [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$, Pa·s]



Für ein Abdichtsystem aus dem einheitlichem Baustoff Salzbeton, d.h. für den Einlagerungsbereich West-Südfeld, ergibt die Ableitung von Gl. (A-46) nach t folgende gewöhnliche Differentialgleichung für $x_{k,S}(t)$, das Verhältnis aus korrodierter Länge der hydraulisch äquivalenten Modellabdichtung zur Gesamtlänge:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{x_{k,S}(t)}{K_{3/1,S}} + 1 - x_{k,S}(t) \right) \cdot \frac{dx_{k,S}}{dt} = \frac{K_{1,S} \cdot (p_{w,Z} - p_0)}{\mu_w \cdot L_{1,S}^2 \cdot \varepsilon_{S,tot} \cdot n_{por,S}} \quad x_{k,S} < 1 \\ \frac{dx_{k,S}}{dt} = 0 \quad x_{k,S} = 1 \end{array} \right. \quad (A-48)$$

Für $K_{3/1,S} > 1$ ergibt die Integration mit den Substitutionen

$$\Lambda \equiv \frac{K_{1,S} \cdot (p_{w,Z} - p_0)}{\mu_w \cdot L_{1,S}^2 \cdot \varepsilon_{S,tot} \cdot n_{por,S}}$$

$$K \equiv 1 - \frac{1}{K_{3/1,S}}$$

$$t_K \equiv \frac{\mu_w \cdot L_{1,S}^2 \cdot \varepsilon_{S,tot} \cdot n_{por,S}}{2 \cdot K_{1,S} \cdot (p_{w,Z} - p_0)} \cdot \left(1 + \frac{1}{K_{3/1,S}} \right)$$

wobei t_K den Zeitpunkt bezeichnet, an dem die Korrosionsfront das Ende des Abdichtsystems erreicht,

$$x_{k,S}(t) = \begin{cases} \frac{1}{K} \cdot (1 - \sqrt{1 - 2 \cdot K \cdot \Lambda \cdot t}) & t < t_K \\ 1 & t \geq t_K \end{cases} \quad (A-49)$$

Falls keine Korrosion erfolgt, ist $K_{3/1,S} = 1$ und $x_{k,S}(t) = 0$.

Die kumulierte Flüssigkeitsmenge im Einlagerungsbereich $V_{EB,L}(t)$ ergibt sich aus der Summe des Anfangsflüssigkeitsvolumens $V_{EB,L,0}$ und der zugetretenen Lösungsmenge:

$$V_{EB,L}(t) = V_{EB,L,0} + \int_0^t Q_{1,S}(\tau) d\tau \quad (A-50)$$

$V_{EB,L}(t)$ Flüssigkeitsmenge im Einlagerungsbereich; [m^3]

$V_{EB,L,0}$ Anfangsflüssigkeitsvolumen; [m^3]

Im Fall des Einlagerungsbereichs Ostfeld wird der Lösungszutritt über die beiden Abdichtungsbauwerke aus Magnesiabeton und Salzbeton getrennt berechnet, damit der Korrosionsfortschritt gemäß Gl. (A-46) separat bestimmt werden kann:



$$V_{EB,L}(t) = V_{EB,L,0} + \int_0^t Q_{1,S}(\tau) d\tau + \int_0^t Q_{1,M}(\tau) d\tau \equiv V_{EB,L,0} + V_{w,S,in}(t) + V_{w,M,in}(t) \quad (A-51)$$

mit

$Q_{1,S}(t)$ Rate des Lösungszutritts (Zutrittsrate) durch die Abdichtung aus Salzbeton; [m^3/a]

$Q_{1,M}(t)$ Rate des Lösungszutritts (Zutrittsrate) durch die Abdichtung aus Magnesiabeton; [m^3/a]

$V_{w,i,in}(t)$ Volumen der Lösung, die bis zum Zeitpunkt t durch die Abdichtung aus dem Baustoff i zutreten ist; [m^3]

Sobald der Gesamthohlraum mit Lösung gefüllt ist (Zeitpunkt $t = T_1$), $V_{EB,L}(T_1) = V_{EB}(T_1)$, kann keine weitere Lösung mehr zutreten.

Der relative Lösungsfüllgrad im Einlagerungsbereich, $S_{EB}(t)$, berechnet sich nach Gl. (A-52).

$$S_{EB}(t) = \frac{V_{EB,L}(t)}{V_{EB}(t)} \quad (A-52)$$

$S_{EB}(t)$ relativer Lösungsfüllgrad im Einlagerungsbereich; [-]

Somit ist $S_{EB}(t = T_1) = 1$.

Für die Konvergenz des unverfüllten Volumens $V_{EB,u}$ gilt, nach dem Ansatz gemäß [PSE 1985] mit $f_1 = 1$ (keine Stützwirkung des Fluids) und speziell auch mit $f_2 = 1$ (kein stützender Feststoffversatz), $f_3 = 1$ (keine Temperaturdifferenz) und $f_r = 1$ (keine anderen Stützeffekte) folgende Differentialgleichung:

$$\frac{d}{dt} V_{EB,u}(t) = -c_{EB} \cdot V_{EB,u}(t) \quad (A-53)$$

Für die Konvergenz des mit kompaktierbarem Versatz gefüllten Volumens gilt basierend auf dem gleichen Ansatz, nun jedoch mit stützender Wirkung der Festphase ($f_2 \leq 1$):

$$\frac{d}{dt} V_{EB,v1}(t) = -c_{EB} \cdot f_2(\varepsilon_{EB,v1}(t)) \cdot V_{EB,v1}(t) \quad (A-54)$$

Die Porosität $\varepsilon_{EB,v1}(t)$ gehorcht dabei einer weiteren Differentialgleichung der Form:

$$\frac{d}{dt} \varepsilon_{EB,v1} = -c_{EB} \cdot (1 - \varepsilon_{EB,v1}(t)) \cdot f_2(\varepsilon_{EB,v1}(t)) \quad (A-55)$$



Der Faktor f_2 zur Beschreibung der Stützwirkung der Feststoffphase ist durch die folgende Gleichung gegeben:

$$f_2(\varepsilon_{EB,v1}) = \begin{cases} \varepsilon_{EB,v1} \cdot (1 - \varepsilon_{EB,v1} / \varepsilon_r) \cdot \left[\left(1 - \varepsilon_{EB,v1} / \varepsilon_r\right)^2 + \left(\varepsilon_{EB,v1} \cdot (1 - \varepsilon_{EB,v1} / \varepsilon_r)\right)^{1/m} \right]^{-m} & \varepsilon < \varepsilon_r \\ 1 & \varepsilon \geq \varepsilon_r \end{cases} \quad (\text{A-56})$$

ε_r charakteristische Porosität, ab der eine Stützwirkung durch die Feststoffphase hervorgerufen wird; [-]

m charakteristischer Exponent für die Konvergenz des kompaktierbaren Versatzes; abgeleitet aus dem Stoffgesetz für das sekundäre Kriechen von Steinsalz; [-]

A.4.3 Fälle mit Gaspolster

In diesem Abschnitt werden die Gleichungen nicht getrennt für den Einlagerungsbereich West-Südfeld und den Einlagerungsbereich Ostfeld angegeben. Mit $i = S$ gelten die Gleichungen für das Abdichtsystem des ELB WSF und für die Abdichtung des ELB OF aus Salzbeton auf der 2. Sohle. Mit $i = M$ gelten die Gleichungen für die Abdichtung des ELB OF aus Magnesiabeton auf der 4. Sohle. Der treibende Lösungsdruck in der übrigen Grube, $p_{w,n}$, und dessen Differenzierung nach Einlagerungsbereich bzw. Abdichtung wurde in der Einleitung zu Kapitel A.4 definiert.

Im Modellansatz mit Gaspolster wird berücksichtigt, dass die im Einlagerungsbereich zu Beginn der Prologphase vorhandene Luft und das während der Prologphase gebildete Gas (soweit diese nicht während der Prologphase aus dem Einlagerungsbereich ausgetreten sind) sowie das in der Phase 1 zusätzlich gebildete Gas durch die zutretende Flüssigkeit und die Konvergenz komprimiert werden, so dass ein Gegendruck $p_{EB}(t)$ entsteht. Es wird angenommen, dass während der Phase 1, der Periode des Lösungszutritts, kein Gas entweicht, selbst wenn dies in der Prologphase der Fall war (vgl. Kapitel A.3.2.2.2). Die Zutrittsrate $Q_{1,i}$ ergibt sich zu:

$$Q_{1,i}(t) = \frac{K_{1,i}}{\mu_w} \cdot \frac{p_{w,n} - p_{EB}(t)}{L_{1,i} \cdot \left(x_{k,i}(t) / K_{3/1,i} + 1 - x_{k,i}(t) \right)} \cdot A_{1,i} \quad (\text{A-57})$$

Dabei wird der korrodierte Anteil der Abdichtung, $x_{k,i}(t)$, mit einer analogen Differentialgleichung wie im Fall ohne Gaspolster berechnet. Diese ist im vorliegenden Fall allerdings nicht geschlossen lösbar.

$$\begin{cases} \left(\frac{x_{k,i}(t)}{K_{3/1,i}} + 1 - x_{k,i}(t) \right) \cdot \frac{dx_{k,i}}{dt} = \frac{K_{1,i}}{\mu_w \cdot L_{1,i}^2 \cdot \varepsilon_{i,tot} \cdot n_{por,i}} \cdot (p_{w,n} - p_{EB}(t)) & x_{k,i} < 1 \\ \frac{dx_{k,i}}{dt} = 0 & x_{k,i} = 1 \end{cases} \quad (\text{A-58})$$



Für die Konvergenz des unverfüllten Volumens $V_{EB,u}$ gilt unter der Annahme einer Stützwirkung durch das Fluid, nach dem Ansatz gemäß [PSE 1985] mit $f_2 = 1$ (kein stützender Feststoffversatz), $f_3 = 1$ (keine Temperaturdifferenz) und $f_r = 1$ (keine anderen Stützwirkungen) folgende Differentialgleichung:

$$\frac{d}{dt} V_{EB,u}(t) = -c_{EB} \cdot f_1(p_{EB}(t)) \cdot V_{EB,u}(t) \quad (A-59)$$

mit dem Druck $p_{EB}(t)$ im Einlagerungsbereich.

Für die Konvergenz des mit kompaktierbaren Versatz gefüllten Volumens gilt basierend auf dem gleichen Ansatz, jedoch unter der zusätzlichen Annahme einer stützenden Wirkung der Festphase ($f_2 < 1$):

$$\frac{d}{dt} V_{EB,v1}(t) = -c_{EB} \cdot f_1(p_{EB}(t)) \cdot f_2(\varepsilon_{EB,v1}(t)) \cdot V_{EB,v1}(t) \quad (A-60)$$

Die Porosität $\varepsilon_{EB,v1}(t)$ gehorcht dabei der Differentialgleichung:

$$\frac{d}{dt} \varepsilon_{EB,v1} = -c_{EB} \cdot (1 - \varepsilon_{EB,v1}(t)) \cdot f_1(p_{EB}(t)) \cdot f_2(\varepsilon_{EB,v1}(t)) \quad (A-61)$$

Die funktionalen Zusammenhänge für das Konvergenzverhalten des kompaktierbaren Versatzes sind gemäß [PSE 1985] die folgenden Gleichungen, wobei als Grenzdruck der mittlere lithostatische Druck p_{litho} benutzt wird,

$$f_1(p_{EB}) = \left(1 - \frac{p_{EB}}{p_{litho}}\right)^m \quad (A-62)$$

$$f_2(\varepsilon_{EB,v1}) = \begin{cases} \varepsilon_{EB,v1} \cdot (1 - \varepsilon_{EB,v1} / \varepsilon_r) \cdot \left[(1 - \varepsilon_{EB,v1} / \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_{EB,v1} \cdot (1 - \varepsilon_{EB,v1} / \varepsilon_r))^{1/m} \right]^{-m} & \varepsilon < \varepsilon_r \\ 1 & \varepsilon \geq \varepsilon_r \end{cases} \quad (A-63)$$

p_{litho} lithostatischer Druck; [MPa]

Der Druck im Einlagerungsbereich wird aus der aktuellen Gasmenge $V_{g,STP}(t)$, den aktuellen Gesamthohlraumvolumina der Kompartimente $V_{EB,u}(t)$, $\varepsilon_{EB,v1}(t) \cdot V_{EB,v1}(t)$ und $(\varepsilon V)_{EB,v2}(t)$ und dem aktuell im Einlagerungsbereich vorhandenen Lösungsvolumen $V_{EB,L}(t)$ ermittelt:

$$\begin{aligned} p_{EB}(t) &= p_0 \cdot \frac{\delta_T \cdot V_{g,STP}(t)}{V_{EB}(t) - V_{EB,L}(t)} \\ &= p_0 \cdot \frac{\delta_T \cdot V_{g,STP}(t)}{V_{EB,u}(t) + \varepsilon_{EB,v1}(t) \cdot V_{EB,v1}(t) + \varepsilon_{EB,v2,0} \cdot V_{EB,v2,0} \cdot e^{-c_{EB} t / \gamma} - V_{EB,L}(t)} \end{aligned} \quad (A-64)$$

mit:



- $V_{g,STP}(t)$ Anfangsgasmenge (hier bezüglich Beginn Phase 1) und bis zum Zeitpunkt t durch Korrosion und Degradation organischer Stoffe gebildete kumulierte Gasmenge im Einlagerungsbereich, angegeben als Volumen STP, dargestellt als explizite Funktion der Zeit; [m^3_{STP}]
- δ_T Faktor zur Umrechnung des Gasvolumens vom Bezugspunkt STP auf die Referenztemperatur im Grubengebäude; [-]

Die Parametrisierung der durch Korrosion und Degradation organischer Stoffe gebildeten Gasmenge im Einlagerungsbereich wurde in Kapitel A.2.2 beschrieben. Die Summe aus Anfangsgasmenge und bis zum Zeitpunkt t im Einlagerungsbereich gebildeter Gasmenge, $V_{g,STP}(t)$, errechnet sich mit Hilfe der Gleichungen (A-41) und (A-42) wie folgt:

$$V_{g,STP}(t) = \frac{p_{EB,p}}{p_0} \cdot (V_{EB}(t=0) - V_{EB,L,0}) + \int_0^t Q_{g,in}(\tau + t_{Voll}) d\tau \quad (A-65)$$

mit

- $Q_{g,in}(t)$ Gasbildungsrate; [m^3_{STP}/s] gemäß Kapitel A.2.2, Gleichung (A-18) und Zeitangabe bezogen auf den Beginn der Nachbetriebsphase

Das kumulierte Lösungsvolumen $V_{EB,L}(t)$ ist die Summe aus dem Anfangsflüssigkeitsvolumen und dem durch Lösungszutritt während Phase 1 dazugekommenen Volumen.

$$V_{EB,L}(t) = V_{EB,L,0} + \int_0^t \sum_{i=S,M} Q_{1,i}(\tau) d\tau \quad (A-66)$$

mit $Q_{1,M}(\tau) = 0$ außer für den ELB OF.

Falls die Gasbildung während der Prologphase unterbrochen wurde, weil die anfänglich vorhandene Flüssigkeitsmenge verbraucht wurde⁴⁶ ($t_{g,1} < \min(t_{Voll}, T_g)$), dann setzt sie definitionsgemäß wieder ein, sobald die zugetretene Flüssigkeitsmenge den Anteil θ_{Rest} des Anfangsflüssigkeitsvolumens überschreitet. Der in Kapitel A.2.2 definierte Zeitpunkt $t'_{g,2} > t_{Voll}$ wird folgendermaßen berechnet⁴⁷:

$$\int_0^{t'_{g,2} - t_{Voll}} \sum_{i=S,M} Q_{1,i}(\tau) d\tau = \theta_{Rest} \cdot V_{EB,L,0} \quad (A-67)$$

mit $Q_{1,M}(\tau) = 0$ außer für den ELB OF.

⁴⁶ Die Abnahme der Flüssigkeitsmenge im Einlagerungsbereich, $V_{EB,L}(t)$, aufgrund des Flüssigkeitsverbrauchs für die Gasbildung wird im Modell vernachlässigt.

⁴⁷ Der Zeitpunkt $t'_{g,2}$ bezieht sich definitionsgemäß auf den Zeitnullpunkt zu Beginn der Nachbetriebsphase.



Mit dem Druck im Einlagerungsbereich, der gemäß Gleichung (A-64) bestimmt wird, lässt sich Gl. (A-57) für die Zutrittsrate wie folgt schreiben:

$$Q_{1,i}(t) = \frac{K_{1,i} \cdot A_{1,i}}{\mu_w \cdot L_{1,i} \cdot (x_{k,i}(t)/K_{3/1,i} + 1 - x_{k,i}(t))} \cdot \left(p_{w,n} - \left(p_0 \cdot \frac{\delta_T \cdot V_{g,STP}(t)}{V_{EB}(t) - V_{EB,L}(t)} \right) \right) \quad (A-68)$$

wodurch sich für das Laugenvolumen im Einlagerungsbereich eine weitere Differentialgleichung ergibt:

$$\frac{d}{dt} V_{EB,L}(t) = \sum_{i=S,M} \left[\frac{K_{1,i} \cdot A_{1,i}}{\mu_w \cdot L_{1,i} \cdot (x_{k,i}(t)/K_{3/1,i} + 1 - x_{k,i}(t))} \cdot \left(p_{w,n} - \left(p_0 \cdot \frac{\delta_T \cdot V_{g,STP}(t)}{V_{EB}(t) - V_{EB,L}(t)} \right) \right) \right] \quad (A-69)$$

wobei für den ELB WSF nur der Term $i = S$ auftritt und $p_{w,n} = p_{w,Z}$ ist. In der Gleichung für den ELB OF treten beide Summanden auf, und im Term $i = S$ ist $p_{w,n} = p_{w,2}$, im Term $i = M$ $p_{w,n} = p_{w,4}$.

Damit ergibt sich für den ELB WSF ein System von fünf Differentialgleichungen (A-58), (A-59), (A-60), (A-61) und (A-69), die durch die sechs Variablen $x_{k,S}(t)$, $V_{EB,u}(t)$, $V_{EB,v1}(t)$, $\varepsilon_{EB,v1}(t)$, $V_{EB,L}(t)$ und $p_{EB}(t)$ und die Beziehung Gleichung (A-64) miteinander gekoppelt sind. Das Gesamthohlraumvolumen im Einlagerungsbereich, $V_{EB}(t)$, berechnet sich dabei nach Gleichung (A-2), allerdings bezogen auf den Zeitnullpunkt und die Anfangsbedingungen zu Beginn der Phase 1. Für den ELB OF sind es eine Differentialgleichung und eine Variable mehr: $x_{k,M}(t)$ und Gleichung (A-58) mit $i = M$.

Dieses Gleichungssystem ist für die numerische Lösung wenig geeignet. Es wird deshalb durch ein System von sechs (bzw. sieben) Differentialgleichungen ersetzt, das ohne zusätzlich zu erfüllende Beziehung zwischen den abhängigen Variablen zu lösen ist. Dieses Gleichungssystem besteht aus den vier (bzw. fünf) Differentialgleichungen (A-58) (ein- bzw. zweimal), (A-59), (A-60) und (A-61) sowie

$$\frac{d}{dt} V_{EB,L}(t) = \sum_{i=S,M} \left[\frac{K_{1,i} \cdot A_{1,i}}{\mu_w \cdot L_{1,i} \cdot (x_{k,i}(t)/K_{3/1,i} + 1 - x_{k,i}(t))} \cdot (p_{w,n} - p_{EB}(t)) \right] \quad (A-69a)$$

$$\frac{d}{dt} p_{EB}(t) = p_0 \cdot \delta_T \cdot \frac{\frac{d}{dt} V_{g,STP}(t) \cdot (V_{EB}(t) - V_{EB,L}(t)) - V_{g,STP}(t) \cdot \left(\frac{d}{dt} V_{EB}(t) - \frac{d}{dt} V_{EB,L}(t) \right)}{(V_{EB}(t) - V_{EB,L}(t))^2} \quad (A-70)$$

mit der Anfangsbedingung $p_{EB}(t = 0) = p_{EB,p}$ und den gleichen ergänzenden Anmerkungen zu Gl. (A-69a) wie zu Gl. (A-69).

Für den Einlagerungsbereich West-Südfeld, für den die Gleichungen für das gesamte Abdichtungssystem gelöst werden, ergibt sich die Dauer der Zutrittsphase T_1 als erste Lösung der Gleichung $p_{EB}(t) = p_{w,Z}$ für $t > 0$. Sofern $p_{EB,p} > p_{w,Z}$ ist $T_1 = 0$, d.h. es findet kein Lösungszutritt statt und nur die Anfangsflüssigkeit wird ausgepresst.



Im Einlagerungsbereich Ostfeld kommt der Zutritt von Lösung durch den Ostquerschlag auf der 2. Sohle zum Erliegen, sobald der Fluiddruck im Einlagerungsbereich den hydrostatischen Druck in der Grube auf dem Niveau der 2. Sohle, $p_{w,2}$, erreicht hat. Da für die Auspressphase die beiden Abdichtungen wieder zu einem Abdichtsystem zusammengefasst werden (vgl. Abschnitt A.6), beginnt die Lösungsauspressung im Modell aber erst dann, wenn der hydraulische Druck im Einlagerungsbereich den hydrostatischen Druck auf dem Referenzniveau überschreitet, d.h. $p_{EB}(t) > p_{w,Z}$. Diese Unstetigkeit im zeitlichen Druckverlauf wird durch folgenden Algorithmus überbrückt:

Sei t_S der Zeitpunkt, zu dem gilt: $p_{EB}(t_S) = p_{w,2}$. Falls bei $t = t_S$ die hydraulische Leitfähigkeit der Abdichtung aus Magnesiabeton größer ist als diejenige der Salzbetonabdichtung auf der 2. Sohle,

$$\frac{A_{1,S}}{L_{1,S}} \cdot \frac{K_{1,S} \cdot K_{3/1,S}}{x_{k,S}(t_S) + K_{3/1,S} \cdot (1 - x_{k,S}(t_S))} \leq \frac{A_{1,M}}{L_{1,M}} \cdot \frac{K_{1,M} \cdot K_{3/1,M}}{x_{k,M}(t_S) + K_{3/1,M} \cdot (1 - x_{k,M}(t_S))} \quad (\text{A-71})$$

muss nicht viel angepasst werden. Es genügt, für den Rest der Zutrittsphase

$$Q_{1,S}(t) = 0 \quad t_S \leq t \leq T_1$$

zu setzen (da der Lösungszutritt über die untere Abdichtung überwiegt) und den Lösungszutritt entlang der unteren Abdichtung weiterlaufen zu lassen, bis der Druck im Inneren des OF den Wert $p_{w,Z}$ erreicht hat. T_1 ist nach wie vor durch $p_{EB}(T_1) = p_{w,Z}$ definiert.

Ist dagegen der Lösungszutritt durch die obere Abdichtung größer als durch die untere,

$$\frac{A_{1,S}}{L_{1,S}} \cdot \frac{K_{1,S} \cdot K_{3/1,S}}{x_{k,S}(t_S) + K_{3/1,S} \cdot (1 - x_{k,S}(t_S))} > \frac{A_{1,M}}{L_{1,M}} \cdot \frac{K_{1,M} \cdot K_{3/1,M}}{x_{k,M}(t_S) + K_{3/1,M} \cdot (1 - x_{k,M}(t_S))} \quad (\text{A-72})$$

dann könnte bereits nennenswert Gas entlang der 2. Sohle austreten, während auf der 4. Sohle noch Lösung Zutritt. Dieser Fluss im Gegenstrom ist in PROSA so nicht vorgesehen. Stattdessen wird zu diesem Zeitpunkt der Übergang von der Zutritts- in die Auspressphase mit folgenden Korrekturen vollzogen:

- (i) Die Zutrittsphase ist beendet: $T_1 = t_S$
- (ii) Die Gasmenge in Mol bleibt konstant: $V_{g,STP}(T_1) = V_{g,STP}(t_S)$
- (iii) Der Druck wird instantan von $p_{w,2}$ auf $p_{w,Z}$ erhöht. $p_{EB}(T_1) = p_{w,Z}$

- (iv) Die Flüssigkeitsmenge wird entsprechend erhöht:

$$\Delta V_{EB,L}(T_1) = \frac{p_{w,Z} - p_{w,2}}{p_{w,Z}} \cdot V_{g,STP}(t_S) \quad (\text{A-73})$$

- (v) Der Korrosionsfortschritt der Abdichtung auf der 4. Sohle wird entsprechend angepasst:

$$x_{k,M}(T_1) = \min \left(\frac{V_{w,M,in}(t_S) + \Delta V_{EB,L}(T_1)}{n_{por,M} \cdot \varepsilon_{M,tot} \cdot A_{1,M} \cdot L_{1,M}}, 1 \right) \quad (\text{A-74})$$



Der relative Lösungsfüllgrad im Einlagerungsbereich bei Ende der Zutrittsphase, $S_{EB}(t=T_1)$, wird wiederum nach Gleichung (A-52) berechnet.

A.5 Mobilisierung des Inventars ($t = T_1$)

Die Mobilisierung des Radionuklidinventars wird unter den folgenden Annahmen berechnet:

- Die Mobilisierung erfolgt instantan zur Zeit $t = T_1$.
- Mobilisiert werden kann nur der Anteil des Inventars, der im flüssigkeitsgesättigten Teil des Einlagerungsbereichs liegt; dieser Anteil wird aus der Lösungsfüllhöhe im Einlagerungsbereich H und der Stapelhöhe des eingelagerten Abfalls H_{Abf} berechnet. β ist die relative Abfallstapelhöhe, bezogen auf die Höhe des kompaktierbaren Versatzes im Einlagerungsgrubenbau.
- Nicht berücksichtigt werden die Sorption an den Anteilen der Festphasen BFA und Salzbeton, die im mit Flüssigkeit gefüllten Bereich vorliegen, sowie die limitierte Löslichkeit von Radionukliden. Entsprechende Ansätze sind aber der Vollständigkeit halber in den Gleichungen enthalten.

Für den Fall ohne Gaspolster gilt für den Lösungsfüllgrad des Einlagerungsbereichs $S_{EB}(T_1) = 1$; bei vorhandenem Gaspolster ist $S_{EB}(T_1) < 1$.

Zur Berechnung der Konzentration im Porenwasser wird die radionuklidspezifische Größe f_L (in m^{-3}) eingeführt, die das Verhältnis zwischen der Konzentration im Porenwasser und dem Inventar im Abfall bezeichnet. Dieses Verhältnis bleibt nach Abschluss des Lösungszutritts und der Mobilisierung zeitlich konstant und wird für alle Radionuklide, außer für ^{14}C in der Verbindung CH_4 , zum Zeitpunkt $t=T_1$ wie folgt ermittelt.

$$C_L(t = T_1) = I(t = T_1) \cdot f_L \quad (A-75)$$

wobei

C_L Konzentration des betrachteten Radionuklids im Porenwasser im Einlagerungsbereich zur Zeit T_1 ; [Bq/m^3]

$I(t=T_1)$ Inventar des betrachteten Radionuklids im Einlagerungsbereich unter Berücksichtigung von radioaktivem Zerfall und Bildung aus dem Zerfall von Vorläufernukliden zum Zeitpunkt T_1 ; [Bq]

f_L radionuklidspezifisches Verhältnis zwischen der Konzentration im Porenwasser und dem Inventar im Abfall; [m^{-3}]

mit

$$f_L = \min(f'_L, f''_L) \quad (A-76)$$



$$f'_L = \frac{i_{rel}}{V_{EB,L}(T_1) + i_{rel} \cdot \sum_j M_j \cdot K_{d,j}} \quad (A-77)$$

$$f''_L = \frac{i_{rel} \cdot C'_{sol} \cdot 10^3 \frac{l}{m^3}}{C'_{norad} \cdot 10^3 \frac{l}{m^3} \cdot V_{EB,L}(T_1) + \frac{\min_{t \in [T_1, T_1+T_3]} I(t)}{\lambda \cdot N_L} \cdot i_{rel}} \quad (A-78)$$

C'_{norad}	Verhältnis der Menge der entsprechenden nicht radioaktiven Isotope zum Gesamthohlraumvolumen im gesättigten Teil des Einlagerungsbereichs zur Zeit T_1 ; [mol/l]
C'_{sol}	Löslichkeitsgrenze; [mol/l]
i_{rel}	mobilisierter Anteil des Inventars, vgl. Gl. (A-100); [-]
λ_i	Zerfallskonstante des Radionuklids i ; [1/s]
N_L	Loschmidt-Zahl bzw. Avogadro-Konstante: $6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
$I(t)$	Radionuklidinventar im Einlagerungsbereich zur Zeit t ; [Bq]
M_j	Masse der sorbierenden Festphase j in den Einlagerungsgrubenbauen; [kg]
$K_{d,j}$	K_d -Wert an Festphase j ; [m^3/kg]

Eine Ausnahme bildet hierbei die Berechnung der Mobilisierung des (unter Standardbedingungen gasförmigen) $^{14}\text{CH}_4$. Für das ^{14}C -Inventar im CH_4 wird nur die Mobilisierung in der Flüssigphase berücksichtigt, wobei die Konzentration im Porenwasser mittels des Henry'schen Gesetzes ermittelt wird. Der maximal gelöste Anteil an $^{14}\text{CH}_4$ berechnet sich wie folgt:

$$p_i \cdot V_g = n_{g,i} \cdot R \cdot T \quad (A-79)$$

$$p_i = \frac{n_{g,i} \cdot R \cdot T}{V_g} = \frac{(n_i - n_{l,i}) \cdot R \cdot T}{V_g} \quad (A-80)$$

$$C_L' = p_i \cdot H_i \quad (A-81)$$

$$p_i = \frac{n_{l,i}}{V_l \cdot H_i} \quad (A-82)$$

$$\frac{n_{l,i}}{V_l \cdot H_i} = \frac{(n_i - n_{l,i}) \cdot R \cdot T}{V_g} \quad (A-83)$$

$$n_{l,i} = \frac{n_i \cdot H_i \cdot R \cdot T \cdot V_l}{V_g + H_i \cdot R \cdot T \cdot V_l} \quad (A-84)$$



$$f_L = \frac{C_L'}{n_i} = \frac{n_{i,i}}{n_i \cdot V_l} = \frac{H_i \cdot R \cdot T}{V_g + H_i \cdot R \cdot T \cdot V_l} \quad (\text{A-85})$$

mit

p_i	Partialdruck der Komponente i (hier $^{14}\text{CH}_4$) in der Gasphase; [Pa]
n_i	Menge der Komponente i; [mol]
$n_{g,i}$	Menge der Komponente i in der Gasphase; [mol]
$n_{l,i}$	Menge der Komponente i in Lösung; [mol]
V_g	maßgebendes Volumen der Gasphase im Einlagerungsbereich (s.u.); [m^3]
V_l	maßgebendes Volumen der Flüssigkeit im Einlagerungsbereich (s.u.); [m^3]
C_L'	Konzentration des betrachteten Radionuklids (hier ^{14}C) im Porenwasser im Einlagerungsbereich; [mol/l]
H_i	Henry-Konstante der Komponente i (hier CH_4); [$\text{mol}/\text{Pa} \cdot \text{m}^3$]
R	Gaskonstante = 8,314 J/(mol·K)
T	Temperatur; [K]

Für die Festlegung der maßgebenden Volumina V_g und V_l wird für die abgedichteten Einlagerungsbereiche der Zeitpunkt gewählt, zu dem der Anteil in der gelösten Phase $n_{l,i}/n_i$ das Maximum erreicht. Dies ist nach Gl. (A-84) der Fall, wenn V_g/V_l minimal und somit, nach Gl. (A-52), $S_{EB}(t)$ maximal wird. Für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ ergibt dies folgendes Gleichungssystem:

Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“:

t_{Lmax} Zeitpunkt des maximalen Lösungsfüllstands im Zeitintervall $[T_1, T_1+T_3]$, definiert durch

$$S_{EB}(t_{Lmax}) = \max_{t \in [T_1, T_1+T_3]} (S_{EB}(t)) \quad (\text{A-86})$$

$$V_l = V_{EB,L}(t_{Lmax}) \quad (\text{A-87})$$

$$V_g = V_{EB}(t_{Lmax}) - V_{EB,L}(t_{Lmax}) \quad (\text{A-88})$$

Im Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ fließen ab dem Zeitpunkt $t=T_1$ unter Umständen Gas und damit auch Anteile der Komponente i in der Gasphase in nennenswertem Ausmaß aus dem Einlagerungsbereich ab. Die oben aufgeführten Beziehungen zur Herleitung der Gleichung für f_L gelten deshalb für $t=T_1$, für spätere Zeiten müsste die Abnahme von n_i durch diesen Abfluss berücksichtigt werden. Vereinfachend wird stattdessen die Gl. (A-85) für $t=T_1$ ausgewertet:

Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“:

$$V_l = V_{EB,L}(t = T_1) \quad (\text{A-89})$$



$$V_g = V_{EB}(t = T_1) - V_{EB,L}(t = T_1) \quad (\text{A-90})$$

Die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche sind anders zu behandeln. Die folgenden Überlegungen gelten für den Einlagerungsbereich Nordfeld (der Zentralteil ist in diesem Zusammenhang wegen seines erheblich kleineren Inventars an ^{14}C ohne Bedeutung). Aufgrund der Geometrie und der fehlenden Abdichtung kann sich hier kein Gaspolster ausbilden; die Zutrittsphase ist sehr kurz, die Auspressphase aufgrund der hohen Gasbildungsrate und des kleinen Einlagerungsbereichs ebenfalls (im Referenzfall ca. 100 a). Spätestens danach werden sich die gebildeten Gase in den Abbaun des Nordfelds ansammeln. Die Gesamtheit dieser Abbaue entspricht im Parametersatz dem Maximalwert für den Mischungsbereich (vgl. Abschnitt A.8) für das Nordfeld. Unter der Annahme, dass sich hier für das $^{14}\text{CH}_4$ ein Gleichgewicht gemäß Henry einstellt, ergibt sich für die Konzentration in Lösung durch Umformung von Gleichung (A-85):

$$C'_{L,NF} = \frac{n_i}{\frac{V_g}{H_i \cdot R \cdot T} + V_l} \quad (\text{A-91})$$

mit

$C'_{L,NF}$ Konzentration des betrachteten Radionuklids (hier ^{14}C) im Porenwasser des Nordfelds (Einlagerungsbereich + Mischungsbereich + sonstige Abbaue); [mol/l]

Dabei sind V_g und V_l die Gas- und Lösungsvolumina im Nordfeld. Der Term $V_l + V_g/(H_i \cdot R \cdot T)$ kann somit als „effektives Verdünnungsvolumen“ für das $^{14}\text{CH}_4$ verstanden werden. Im Referenzfall für den Einlagerungsbereich Nordfeld ist der Beitrag $V_g/(H_i \cdot R \cdot T)$ um mehr als eine Größenordnung höher als V_l , d.h. die Konzentration in Lösung ist überwiegend durch die Gasmenge bestimmt (vgl. den Nachweis anhand der Parameterwerte in Anhang J).

Zwischen dem Einsetzen der Gasbildung⁴⁸ im Einlagerungsbereich Nordfeld und dem restlosen Vollaufen des Nordfelds verstreicht ausreichend Zeit, um einen signifikanten Anteil der gesamten Gasmenge zu bilden. Die Mengen an gebildetem Gas und mikrobiell generiertem $^{14}\text{CH}_4$ sind miteinander korreliert. Für die Berechnung der maßgebenden Volumina V_g und V_l sowie der gelösten Menge $^{14}\text{CH}_4$ wird deshalb angenommen, dass sich zwar 100% des $^{14}\text{CH}_4$, jedoch erst 70% der gesamten Gasmenge gebildet haben. Für die Fälle „mit Gaspolster“ gilt somit

$$V_g = \frac{p_0}{p_{w,z}} \cdot \left[(1 - \zeta_{VG,t} + \zeta_{VG,t} \cdot \zeta_{VG,k} \cdot \varepsilon_{VG,0,1}) \cdot V_{VG,0} + 0.7 \cdot \eta \cdot V_{g,STP,tot} \right] \quad (\text{A-92})$$

$$V_l = (1 - \zeta_{EH,t} + \zeta_{EH,t} \cdot \zeta_{EH,k} \cdot \varepsilon_{EB,0,1}) \cdot V_{EH} + (1 - \zeta_{VG,t} + \zeta_{VG,t} \cdot \zeta_{VG,k} \cdot \varepsilon_{VG,0,1}) \cdot V_{VG,0} - V_g \quad (\text{A-93})$$

mit

⁴⁸ Aufgrund der bei den Abfällen vorhandenen Restfeuchte hat die Umsetzung der Abfälle bereits heute, d.h. vor dem Verschließen des ERAM, begonnen



$V_{VG,0}$ Volumen des Mischungsbereichs vor Konvergenz⁴⁹; [m³]

V_g Volumen der Gasphase entsprechend Gleichung (A-92)

Im weiteren Fortgang der Modellierung ist für die Höhe der Radionuklidfreisetzung in das Deckgebirge die Radionuklid-Konzentration im Mischungsbereich maßgeblich. Daher muss f_L so bestimmt werden, dass sich dort die Konzentration $C'_{L,NF}$, wie in Gleichung (A-91) berechnet, einstellt⁵⁰. Diese steht mit der gelösten Stoffmenge in Zusammenhang:

$$C'_{L,NF} = \frac{n_{i,i}}{(1 - \zeta_{VG,t} + \zeta_{VG,t} \cdot \zeta_{VG,k} \cdot \varepsilon_{VG,0,1}) \cdot V_{VG,0}} \quad (A-94)$$

Das Lösungsvolumen aus dem nicht abgedichteten Einlagerungsbereich, $V_{EB,L}(T_1)$, ist klein und kann deshalb gegenüber V_{VG} vernachlässigt werden, ebenso die Volumina unkontaminierter Lauge, die aus der übrigen Grube zutreten, während die Lösung aus dem Einlagerungsbereich ausgepresst wird. $n_{i,i}$ berechnet sich daher nach

$$n_{i,i} = C'_L \cdot V_{EB,L}(T_1) = f_L \cdot n_i \cdot V_{EB,L}(T_1) \quad (A-95)$$

Durch Kombination mit den Gleichungen (A-94) und (A-91) ergibt sich

$$f_L = \frac{(1 - \zeta_{VG,t} + \zeta_{VG,t} \cdot \zeta_{VG,k} \cdot \varepsilon_{VG,0,1}) \cdot V_{VG,0}}{V_{EB,L}(T_1)} \cdot \frac{1}{\frac{V_g}{H_i \cdot R \cdot T} + V_i} \quad (A-96)$$

mit Berechnung von V_g und V_i gemäß (A-92) und (A-93).

Im Fall „ohne Gaspolster“ wird für V_g die zu Beginn der Zutrittsphase im Einlagerungsbereich vorhandene Luft, komprimiert auf den Druck $p_{w,Z}$, angesetzt.

Fall „ohne Gaspolster“:

$$V_i = V_{EB,L}(t = T_1) \quad (A-97)$$

$$V_g = \frac{p_0}{p_{w,Z}} \cdot (V_{EB}(t = 0) - V_{EB,L}(t = 0)) \quad (A-98)$$

Die Berechnung des mobilisierten Anteils des Inventars i_{rel} mittels der relativen Stapelhöhe des Abfalls, β , für die Fälle mit Gaspolster beruht auf folgenden Annahmen (vgl. auch Anhang I):

⁴⁹ Wie in Anhang J gezeigt, ist bei den geltenden Parameterwerten der Volumenbeitrag der Flüssigphase für die Berechnung der ¹⁴CH₄-Konzentration von untergeordneter Bedeutung; daher kann die Konvergenz des Mischungsbereichs bis zum Zeitpunkt der Berechnung der Konzentration vernachlässigt werden; auch Parametervariationen für das Volumen des Mischungsbereichs innerhalb der vorgegebenen Bandbreiten sind ohne Belang.

⁵⁰ Ab hier wird der Mischungsbereich als lösungsgesättigt, d.h. frei von einer Gasphase, betrachtet.



- Die eingelagerten Abfälle befinden sich vollständig im kompaktierbaren Versatz der Einlagerungsgrubenbaue. Die relative Stapelhöhe β ist das Verhältnis zwischen der Abfallstapelhöhe und der Höhe des kompaktierbaren Versatzes in den Einlagerungsgrubenbauen. Es gilt $\beta \leq 1$.
- Es wird angenommen, dass der kompaktierbare Versatz der Einlagerungsgrubenbaue an der Basis des Einlagerungsbereichs liegt und zuerst mit Flüssigkeit gesättigt wird (konservativ).
- Es wird konservativ unterstellt, dass die gesamte bei $t=0$ vorhandene Flüssigkeit im Einlagerungsbereich sofort und in vollem Umfang zur Sättigung des kompaktierbaren Versatzes und somit zur Radionuklidmobilisierung beiträgt.
- Das Verhältnis zwischen der Stapelhöhe der eingelagerten Abfälle $H_{\text{Abf}}(t)$ und der Höhe des kompaktierbaren Versatzes in den Einlagerungsgrubenbauen $H_{\text{EH},v1}(t)$ sei zeitlich konstant. Diese Annahme ist in Gl. (A-99) formuliert.

$$\beta = \frac{H_{\text{Abf}}(t)}{H_{\text{EH},v1}(t)} = \text{const.} \quad (\text{A-99})$$

mit

H_{Abf} Stapelhöhe des Abfalls im Einlagerungsbereich; [m]

$H_{\text{EH},v1}$ Höhe des kompaktierbaren Versatzes des Einlagerungsgrubenbaus; [m]

β relative Abfallstapelhöhe; [-]

Unter Berücksichtigung der in Anhang I hergeleiteten Beziehung Gl. (I-5) für i_{rel} und der plausiblen Näherung der zeitlichen Konstanz von $V_{\text{EH},v1}(t)/V_{\text{EB},v1}(t)$ ergibt sich mit Gl. (A-86) für die Fälle mit Gaspolster

$$i_{\text{rel}} \equiv \max_{t \in [T_1, T_1+T_3]} \left[\frac{H(V_{\text{EB},L}(t)})}{H_{\text{Abf}}(t)} \right] = \min \left[1, \frac{1}{\beta} \cdot \max_{t \in [T_1, T_1+T_3]} \left(\frac{V_{\text{EB},L}(t) \cdot V_{\text{EB},v1,0}}{V_{\text{EH}} \cdot \zeta_{\text{EHL}} \cdot \zeta_{\text{EHK}} \cdot V_{\text{EB},v1}(t) \cdot \varepsilon_{\text{EB},v1}(t)} \right) \right] \quad (\text{A-100})$$

mit

$H(V_{\text{EB},L}(t))$ Höhe des flüssigkeitsgesättigten Bereichs im Einlagerungsbereich; [m]

Im Fall ohne Gaspolster gilt

$$i_{\text{rel}} = 1 \quad (\text{A-101})$$

In Verbindung mit den Gleichungen (A-76) bis (A-78) beschreibt Gleichung (A-100) die Mobilisierung der Radionuklide entsprechend dem Anteil des Abfalls, der im flüssigkeitsgesättigten Teil des Einlagerungsbereichs liegt. Falls die Lösungsfüllhöhe die Abfallstapelhöhe übersteigt, wird das gesamte Radionuklidinventar mobilisiert. Dies trifft im Fall ohne Gaspolster immer zu.

Bemerkungen:

- Im Modell ändert sich die Radionuklid-Konzentration im Porenwasser im Laufe der Auspressphase (Phase 3) nicht, abgesehen vom explizit behandelten, über $I(t)$ berücksichtigten radioaktiven Zerfall.



- Der Einfluss der Löslichkeit wird für jedes Radionuklid – unter Berücksichtigung der Inventarentwicklung durch radioaktiven Zerfall während der Auspressphase – gesondert angewendet. Dabei wird gegebenenfalls berücksichtigt, dass neben dem Radionuklid auch nicht radioaktive Isotope des Elements in mobilisierbarer Form zum Erreichen der Löslichkeitsgrenze beitragen. Der Einfluss anderer radioaktiver Isotope wird dabei jedoch vernachlässigt.

A.6 Lösungsauspressung aus dem Einlagerungsbereich ($T_1 \leq t \leq T_1 + T_3$)

Es werden drei verschiedene Fälle betrachtet: Im Fall ohne Gaspolster ist die Konvergenz des Salzgebirges die einzige treibende Kraft der Auspressung. Im Fall mit Gaspolster wird die radionuklidhaltige Lösung durch den Fluiddruck im Einlagerungsbereich, welcher vom Anfangsdruck zum Zeitpunkt $t = T_1$, der Gasbildung, der Gasspeicherung und der Konvergenz abhängt, aus dem Einlagerungsbereich gepresst. In Bezug auf die Gasspeicherung im Einlagerungsbereich bestehen zwei Varianten: (i) Das Gas hat keine Möglichkeit zu entweichen, solange noch Lösung im Hohlraum ist (Fall mit Gaspolster, ohne Gasfluss), oder (ii) es existiert ein ungesättigter Pfad, z.B. entlang einer Abdichtung auf einer hoch gelegenen Sohle, auf dem das Gas zeitgleich mit der Lösung austreten kann (Fall mit Gaspolster, mit Gasfluss).

Während der Auspressphase ist nicht mehr damit zu rechnen, dass sich die Permeabilität des Abdichtsystems durch Auskristallisation oder Korrosionsprozesse noch wesentlich ändert. Es wird vereinfachend angenommen, dass der hydraulische Widerstand des Abdichtsystems während der Auspressphase konstant bleibt. Dies entspricht der Annahme im Modell, dass das Verhältnis aus korrodierter Länge zur Gesamtlänge der Modell-Abdichtung nach dem Ende der Zutrittsphase konstant bleibt:

$$x_{k,i}(t > T_1) = x_{k,i}(T_1) \quad (\text{A-102})$$

Die Zusammenfassung der beiden, bisher getrennt modellierten Abdichtungen zum ELB OF in ein Abdichtsystem wird weiter unten beschrieben. Zunächst wird die entlang des Abdichtsystems harmonisch gemittelte Permeabilität K'_3 definiert, welche eine einfachere Formulierung der Gleichungen für die Auspressphase erlaubt. Damit kann im Folgenden auch auf den Index $i = S, M$ verzichtet werden.

$$\frac{L_1}{K'_3} = \frac{L_1 \cdot x_k(T_1)}{K_1 \cdot K_{3/1}} + \frac{L_1 \cdot (1 - x_k(T_1))}{K_1} \quad (\text{A-103})$$

$$K'_3 = \frac{K_1 \cdot K_{3/1}}{x_k(T_1) + K_{3/1} \cdot (1 - x_k(T_1))}$$

Im Falle des ELB OF errechnet sich der hydraulische Widerstand des Abdichtsystems in der Auspressphase über das Kirchhoff'sche Gesetz als „Parallelschaltung“ der beiden teilweise korrodierten Abdichtungen auf der 2. Sohle (aus Salzbeton) und auf der 4. Sohle (aus Magnesiabeton):

$$\frac{A_1}{L_1} \cdot K'_3 = \frac{A_{1,S}}{L_{1,S}} \cdot \frac{K_{1,S} \cdot K_{3/1,S}}{x_{k,S}(T_1) + K_{3/1,S} \cdot (1 - x_{k,S}(T_1))} + \frac{A_{1,M}}{L_{1,M}} \cdot \frac{K_{1,M} \cdot K_{3/1,M}}{x_{k,M}(T_1) + K_{3/1,M} \cdot (1 - x_{k,M}(T_1))} \quad (\text{A-104})$$



Als transportwirksame Porosität des Abdichtsystems zum ELB OF während der Auspressphase, ε_1 , wird vereinfachend der Wert der Abdichtung aus Salzbeton angesetzt. Dieser dürfte i.A. geringer als jener der Abdichtung aus Magnesiabeton sein, so dass dies einer pessimistischen Vereinfachung entspricht.

Situationen sind denkbar, in denen die Zutritts- und die Auspressphase nicht zeitlich voneinander getrennt sind, sondern bereits während eines Lösungszutritts auch Lösung austritt („Durchströmung“). In diesem Fall sind aber die hydraulischen Gradienten kleiner als in den betrachteten Fällen, was sowohl die Zutrittsraten von Lösung als auch die maximalen Radionuklidbewegungen insgesamt verringert (siehe Anhang K).

A.6.1 Fall ohne Gaspolster

Für die Konvergenz des unverfüllten Volumens und des Porenvolumens wird dasselbe Verhalten angenommen wie während der Zutrittsphase. Da in diesem Modellfall der Einlagerungsbereich während der Auspressphase vollständig mit Lösung gefüllt ist, entspricht die Rate der Lösungsauspressung der Abnahme des Gesamthohlraumvolumens durch Konvergenz. Abhängig vom hydraulischen Widerstand des Abdichtsystems bedingt dies einen mehr oder weniger hohen Lösungsdruck im Einlagerungsbereich. Die stützende Wirkung dieses Drucks, d.h. die Rückwirkung auf die Konvergenz, wird im Modell berücksichtigt. Eine Frac-Bildung als Folge der Überschreitung eines Grenzdrucks und die dadurch verursachte Bildung von zusätzlichen Wegsamkeiten wird im Modell ebenfalls berücksichtigt (vgl. Kapitel A.6.3).

Der Druck im Einlagerungsbereich wird bestimmt durch die erforderliche Druckdifferenz entlang des Abdichtsystems für das Auspressen der Flüssigkeit im Einklang mit der durch den Druck mitbestimmten Konvergenz des Einlagerungsbereichs. Die Volumina der einzelnen Kompartimente des Einlagerungsbereichs verändern sich gemäß den folgenden Gleichungen mit der Zeit (vgl. Kapitel A.4.3):

$$\frac{d}{dt} V_{EB,u}(t) = -c_{EB} \cdot f_1(p_{EB}(t)) \cdot V_{EB,u}(t) \quad (A-105)$$

$$\frac{d}{dt} V_{EB,v1}(t) = -c_{EB} \cdot f_1(p_{EB}(t)) \cdot f_2(\varepsilon_{EB,v1}(t)) \cdot V_{EB,v1}(t) \quad (A-106)$$

$$\frac{d}{dt} \varepsilon_{EB,v1} = -c_{EB} \cdot (1 - \varepsilon_{EB,v1}(t)) \cdot f_1(p_{EB}(t)) \cdot f_2(\varepsilon_{EB,v1}(t)) \quad (A-107)$$

Für die Austrittsrate der Lösung $Q_{w,out}$ gelten somit folgende Beziehungen:



$$\begin{aligned}
Q_{w,out}(t) &= -\frac{d}{dt} V_{EB,L}(t) = \frac{K'_3 \cdot A_1}{\mu_w \cdot L_1} \cdot (p_{EB}(t) - p_{w,Z}) \\
&= -\frac{d}{dt} V_{EB}(t) = -\frac{d}{dt} V_{EB,u}(t) - \frac{d}{dt} (\varepsilon_{EB,v1}(t) \cdot V_{EB,v1}(t)) - \frac{d}{dt} (\varepsilon V)_{EB,v2}(t) \\
&= -\frac{d}{dt} V_{EB,u}(t) - V_{EB,v1}(t) \cdot \frac{d}{dt} \varepsilon_{EB,v1}(t) - \varepsilon_{EB,v1}(t) \cdot \frac{d}{dt} V_{EB,v1}(t) + \frac{c_{EB} \cdot V_{EB,v2,0} \cdot \varepsilon_{EB,v2,0}}{\gamma} \cdot e^{-c_{EB} t/\gamma}
\end{aligned} \tag{A-108}$$

mit

$Q_{w,out}(t)$ Austrittsrate der Lösung aus dem Einlagerungsbereich ; [m³/s]

woraus sich aus den Gleichungen (A-105) bis (A-107) die folgende Gleichung für $p_{EB}(t)$ ergibt:

$$p_{EB}(t) = p_{w,Z} + c_{EB} \cdot \frac{\mu_w \cdot L_1}{K'_3 \cdot A_1} \cdot \left[f_1(p_{EB}(t)) \cdot V_{EB,u}(t) + f_1(p_{EB}(t)) \cdot f_2(\varepsilon_{EB,v1}(t)) \cdot V_{EB,v1}(t) + \frac{\varepsilon_{EB,0,2} \cdot V_{EB,v2,0}}{\gamma} \cdot e^{-c_{EB} t/\gamma} \right] \tag{A-109}$$

Als Anfangsbedingung werden die Werte $V_{EB,u}(T_1)$, $V_{EB,v1}(T_1)$, $\varepsilon_{EB,v1}(T_1)$ verwendet, und $p_{EB}(t=T_1)$ ergibt sich mittels der Gleichung (A-109) aus diesen.

Durch Lösung des Gleichungssystems (A-105) bis (A-107) und Gleichung (A-109) ergibt sich $p_{EB}(t)$ und mit der ersten Teilgleichung aus Gleichung (A-108) die Rate der Lösungsauspressung aus dem Einlagerungsbereich $Q_{w,out}(t)$.

Dieses Gleichungssystem mit einer Randbedingung in Form der Gleichung (A-109) ist allerdings für eine numerische Lösung mit der verwendeten Standardsoftware wenig geeignet. Für die numerische Lösung wird daher der Modellfall „ohne Gaspolster“ in den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ mit einem sehr kleinen, „numerischen“ Gaspolster überführt (vgl. Kapitel A.6.2.1). Dieses „numerische“ Gaspolster bewirkt, dass die Fluid-Füllung des Einlagerungsbereichs geringfügig kompressibel ist. Physikalisch kann seine Wirkung mit jener der Flüssigphasen-Kompressibilität und der Kompressibilität der residualen Gassättigung im Porenvolumen der Verfüllung verbunden werden.

Die Phase 3 (Lösungsauspressung) für den Fall „ohne Gaspolster“ wird somit durch die Gleichungen des Falls „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ mit der Bedingung $V_{g,STP}(t) \equiv 0$ simuliert.

A.6.2 Fälle mit Gaspolster

In diesem Fall ist im Einlagerungsbereich ein Gaspolster vorhanden, welches entsprechend dem aktuellen Druck komprimiert wird. Übersteigt der Druck im Einlagerungsbereich einen kritischen Wert p_{frac} , dann wird die Bildung von hydraulischen Wegsamkeiten mit hoher Permeabilität unterstellt („Frac-Bildung“). Im Modell wird in diesem Fall ein rascher Druckabbau im Einlagerungsbereich während einer relativ kurzen Zeitspanne Δt_{frac} angenommen (vgl. Kapitel A.6.3). Der Druck im Einlagerungsbereich wird dabei auf den hydrostatischen Druck $p_{w,Z}$ entspannt, und die Austrittsrate $Q_{w,out}$ nach der Druckentlastung entspricht einem widerstandsfreien Austreten der noch verblei-



benden Flüssigkeit aus dem Einlagerungsbereich entsprechend der Volumenänderung durch Konvergenz.

A.6.2.1 Fall ohne Gasfluss aus dem Einlagerungsbereich

Dieser Fall beruht auf der Modellannahme, dass das Gas während der gesamten Auspressphase nicht aus dem Einlagerungsbereich entweichen kann. Der sich durch die Gasbildung und die Konvergenz des Einlagerungsbereichs aufbauende Gasdruck presst ausschließlich die Lösung durch das Abdichtsystem aus dem Einlagerungsbereich.

In diesem Fall gilt mit geringfügigen Änderungen ($K_1 \rightarrow K'_3$, Einfügen des „numerischen“ Gaspolsters) dasselbe Differentialgleichungssystem wie während der Zutrittsphase (Abschnitt A.4.3). Die Lösung des Differentialgleichungssystems braucht nur entsprechend weiter berechnet zu werden, die Rate des Flüssigkeitsaustritts entspricht dabei dem negativen Zutritt von Flüssigkeit:

$$Q_{w,out} = -\frac{d}{dt}V_{EB,L}(t) \quad (A-110)$$

Das zu lösende Gleichungssystem lautet wie folgt:

- Gleichung für $\frac{d}{dt}V_{EB,u}$, gegeben durch die Gleichung (A-59)
- Gleichung für $\frac{d}{dt}V_{EB,v1}$, gegeben durch die Gleichung (A-60)
- Gleichung für $\frac{d}{dt}\varepsilon_{EB,v1}$, gegeben durch die Gleichung (A-61)

$$\frac{d}{dt}V_{EB,L} = -Q_{w,out}(t) = \frac{K'_3 \cdot A_1}{\mu_w \cdot L_1} \cdot (p_{w,Z} - p_{EB}(t)) \quad (A-111)$$

Wie für die Zutrittsphase wird auch hier der Druck im Einlagerungsbereich $p_{EB}(t)$ über eine Differentialgleichung berechnet. Anders als für die Zutrittsphase wird hier jedoch die im Einlagerungsbereich vorhandene Gasmenge $V_{g,STP}(t)$ (Gleichung (A-65)) aus „numerischen“ Gründen geringfügig, proportional zum Gesamthohlraum $V_{EB}(t)$ erhöht. Die derart erhöhte Gasmenge wird mit $V_{g,STP,m}(t)$ bezeichnet.

$$V_{g,STP,m}(t) = V_{g,STP}(t) + V_{g,STP,num}(t)$$

$$V_{g,STP,num}(t) = 0.01 \cdot V_{EB}(t) \quad (A-112)$$

$$\frac{d}{dt}V_{g,STP,num}(t) = 0.01 \cdot \frac{d}{dt}V_{EB}(t)$$

$V_{g,STP,m}(t)$ aus numerischen Gründen geringfügig erhöhte Gasmenge im Einlagerungsbereich;
[m³_{STP}]



Die Gleichung (A-70) aus der Zutrittsphase verändert sich dadurch zu:

$$\frac{d}{dt} p_{EB}(t) = p_0 \cdot \delta_T \cdot \frac{\frac{d}{dt} V_{g,STP,m}(t) \cdot (V_{EB}(t) - V_{EB,L}(t)) - V_{g,STP,m}(t) \cdot \left(\frac{d}{dt} V_{EB}(t) - \frac{d}{dt} V_{EB,L}(t) \right)}{(V_{EB}(t) - V_{EB,L}(t))^2} \quad (A-113)$$

mit der Anfangsbedingung $p_{EB}(t=T_1) = \max(p_{w,Z}, p_{EB,p})$

Für die Berechnung des Falls „ohne Gaspolster“, die auf eine Berechnung mit dem kleinen „numerischen“ Gaspolster zurückgeführt wurde (siehe Kapitel A.6.1), vereinfacht sich Gleichung (A-113) mit Hilfe von Gleichung (A-112) wie folgt:

$$\frac{d}{dt} p_{EB}(t) = \frac{\delta_T \cdot p_0}{100} \cdot \frac{V_{EB}(t) \cdot \frac{d}{dt} V_{EB,L}(t) - \frac{d}{dt} V_{EB}(t) \cdot V_{EB,L}(t)}{(V_{EB}(t) - V_{EB,L}(t))^2} \quad (A-114)$$

mit unveränderter Anfangsbedingung.

Das Ende der Auspressphase ist erreicht, falls entweder (i) die Lösung sowohl aus dem Einlagerungsbereich als auch aus dem Abdichtsystem ausgepresst wurde oder (ii) die Auspressrate auf einen sehr geringen Wert abgesunken ist:

$$T_3 = \min(T_{3,1}, T_{3,2})$$

$$V_{EB,L}(t = T_1 + T_{3,1}) = -L_1 \cdot A_1 \cdot \varepsilon_1 \quad (A-115)$$

$$Q_{w,out}(t = T_1 + T_{3,2}) = 0.001 \cdot \max_{t \in [T_1, T_1 + T_3]} (Q_{w,out}(t))$$

A.6.2.2 Fall mit Gasfluss aus dem Einlagerungsbereich

Dieser Fall beruht auf der Annahme, dass ein gewisser Anteil der Querschnittsfläche des Abdichtsystems (z.B. eine Abdichtung auf einer hochgelegenen Sohle) vom Gaspolster erreicht wird, so dass dort Gas entweichen kann.

Das Gleichungssystem zur Beschreibung der Auspressphase für die Variante „mit Gasfluss“ setzt sich wie folgt zusammen:

- Gleichungen (A-59), (A-60), (A-61) und (A-111) unverändert
- Gleichungen (A-112) und (A-113) mit Anpassungen
- eine zusätzliche Differentialgleichung für den Gasfluss aus dem Einlagerungsbereich

Die Anpassung der Gleichung (A-112) lautet für den Fall „mit Gasfluss“ wie folgt:

$$V_{g,STP,m}(t) = V_{g,STP}(t) + V_{g,STP,num}(t) - V_{g,STP,out}(t)$$

$$V_{g,STP,num}(t) = 0.01 \cdot V_{EB}(t) \quad (A-116)$$

$$\frac{d}{dt} V_{g,STP,num}(t) = 0.01 \cdot \frac{d}{dt} V_{EB}(t)$$

Die Gleichung (A-113) wird dahingehend angepasst, dass je nach aktuellem Gasgehalt im Einlagerungsbereich zwischen den beiden Formulierungen des Abschnitts A.6.2.1 (Gleichungen (A-113) und (A-114)) gewechselt wird:

$$\frac{d}{dt} p_{EB}(t) = \frac{p_0 \cdot \delta_T}{(V_{EB}(t) - V_{EB,L}(t))^2} \cdot \begin{cases} \frac{d}{dt} V_{g,STP,m}(t) \cdot (V_{EB}(t) - V_{EB,L}(t)) - V_{g,STP,m}(t) \cdot \left(\frac{d}{dt} V_{EB}(t) - \frac{d}{dt} V_{EB,L}(t) \right) & \text{für } V_{EB,L}(t)/V_{EB}(t) < 0.99 \\ 0.01 \cdot \left(\frac{d}{dt} V_{EB,L}(t) \cdot V_{EB}(t) - V_{EB,L}(t) \cdot \frac{d}{dt} V_{EB}(t) \right) & \text{für } V_{EB,L}(t)/V_{EB}(t) \geq 0.99 \end{cases} \quad (A-117)$$

unverändert mit der Anfangsbedingung $p_{EB}(t=T_1) = \max(p_{w,Z}, p_{EB,p})$

Die zusätzliche Differentialgleichung für den Gasfluss lautet:

$$V_{g,STP,out}(t) = \int_{T_1}^t Q_{g,STP,out}(t') dt' \quad (A-118)$$

$$Q_{g,STP,out}(t) = \frac{K'_3}{\mu_g} \cdot \frac{p_{EB}(t) - p_{w,Z}}{L_1} \cdot \frac{p_{EB}(t) + p_{w,Z}}{2 \cdot p_0 \cdot \delta_T} \cdot f_g \cdot A_1 \cdot \Theta(V_{g,STP,m}(t) - V_{g,STP,num}(t))$$

$\Theta(x)$ Heaviside-Funktion: $\Theta(x>0) = 1$, $\Theta(x \leq 0) = 0$

μ_g Viskosität der Gasphase; [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, Pa·s]

f_g Produkt aus dem gasgefüllten Anteil der Querschnittsfläche des Abdichtsystems und der relativen Permeabilität für Gas in diesem Querschnittsflächenanteil; [-]

$Q_{g,STP,out}(t)$ Rate des aus dem Einlagerungsbereich austretenden Gasvolumens; [$\text{m}^3_{STP}/\text{s}$]

Die Dauer der Austrittsphase bestimmt sich gleich wie im Fall „ohne Gasfluss“ (Gleichung (A-115)).

Bei der Modellierung des Falls „mit Gasfluss“ wird vernachlässigt, dass sich durch den Gasaustritt die für die Flüssigphase zur Verfügung stehende Querschnittsfläche der Abdichtung bzw. ihre relative Permeabilität verringert. Diese Vereinfachung bei der Modellierung des 2-Phasenprozesses ist konservativ, da sie auf eine zu hohe Austrittsrate für die Flüssigkeit führt.

Falls das Material der Abdichtungen geklüftet ist, bilden die Klüfte aufgrund der Kapillareffekte bevorzugte Wegsamkeiten für den Gasfluss. In diesem Falle beschreibt der Parameter für die Permeabilität, K'_3 , die Durchlässigkeit der geklüfteten Abdichtung. Bei einer starken Klüftung ist dies in



erster Näherung die Durchlässigkeit des Kluftsystems allein. Je vollständiger die Gasphase das Kluftsystem ausfüllt, desto mehr gleicht sich die Gesamttransmissivität des Abdichtsystems für Gas dem Produkt aus Querschnittsfläche und Permeabilität an, d.h. umso größer müsste im Modell der Faktor f_g sein. Sofern dieser Faktor nicht angehoben wird, unterschätzt das Modell aufgrund der gewählten vereinfachten Abbildung der 2-Phasenprozesse für den Fall eines geklüfteten Materials in den Abdichtungen bei entsprechender Wahl der Permeabilität K'_3 den Gasaustritt aus dem Einlagerungsbereich. Zudem überschätzt das Modell bei gasgefülltem Kluftsystem den Lösungsaustritt in besonderem Maße durch Vernachlässigung der Reduktion der relativen Permeabilität für Flüssigkeit unter teilgesättigten Verhältnissen.

Mit vorgegebenem relativ kleinem Querschnittsflächenanteil für den Gasaustritt f_g unterschätzt das Modell somit den Gasfluss und überschätzt den Lösungsaustritt entlang des Abdichtsystems. Beides sind konservative Näherungen, da der Transport der Radionuklide in der Flüssigphase erfolgt.

A.6.3 Auspressen von Flüssigkeit nach Frac-Bildung

Sofern der Druck im Einlagerungsbereich zu einem Zeitpunkt t_{frac} den Frac-Druck p_{frac} erreicht, wird die Bildung einer zusätzlichen hydraulischen Wegsamkeit zwischen dem Einlagerungsbereich und dem Mischungsbereich unterstellt, welche das Abdichtsystem kurzschließt (vgl. Anhang F).

$$p_{\text{EB}}(t_{\text{frac}}) = p_{\text{frac}} \quad (\text{A-119})$$

Es wird dabei unterstellt, dass sich nach Ausbilden der zusätzlichen Wegsamkeit der hohe Druck im Einlagerungsbereich durch Auspressen von Flüssigkeit mit einer konstanten Rate während einer vorgegebenen kurzen Zeitperiode Δt_{frac} auf den Druck $p_{w,z}$ abbaut. Die neu gebildete zusätzliche Wegsamkeit wird als derart permeabel angenommen, dass sich trotz fortschreitender Konvergenz und auch bei anhaltender Gasbildung kein nennenswerter Druck im Einlagerungsbereich mehr aufbaut. Da der Ort der Ausbildung der zusätzlichen Wegsamkeit nicht vorhergesagt werden kann, wird auch für den Fall „mit Gasfluss“ konservativ angenommen, dass der Druckabbau ausschließlich durch Auspressen von Flüssigkeit erfolgt.

Das Auspressen von Fluiden aus dem Einlagerungsbereich (Phase 3) im Falle einer Frac-Bildung wird wie folgt modelliert:

$T_1 < t < t_{\text{frac}}$: gemäß Abschnitt A.6.1 und A.6.2 mit unveränderten Parametern

$t_{\text{frac}} < t < t_{\text{frac}} + \Delta t_{\text{frac}}$ ⁵¹:

$$Q_{w,\text{out}}(t) = \text{const.} = \frac{1}{\Delta t_{\text{frac}}} \cdot \min \left[\frac{p_{\text{frac}} - p_{w,z}}{p_{w,z}} \cdot (V_{\text{EB}}(t_{\text{frac}}) - V_{\text{EB,L}}(t_{\text{frac}})), V_{\text{EB,L}}(t_{\text{frac}}) + L_1 \cdot A_1 \cdot \varepsilon_1 \right] \quad (\text{A-120})$$

$$Q_{g,\text{STP},\text{out}}(t) = 0 \quad (\text{A-121})$$

⁵¹ Zur numerischen Vereinfachung wird angenommen, dass der Radionuklidtransport auch zu Zeiten $> t_{\text{frac}}$ entlang des Abdichtsystems erfolgt (vgl. Kapitel A.7). Dazu wird $Q_{w,\text{out}}$ für die kurze Phase des Druckausgleichs derart gewählt, dass auch das Porenwasser im Abdichtsystem während der Frac-Phase ausgepresst wird.



$t > t_{\text{frac}} + \Delta t_{\text{frac}}$:

Nach der Freisetzung von Lösung zur Druckentlastung wird ein konstanter Druck im Einlagerungsbereich angenommen:

$$p_{\text{EB}}(t) = p_{\text{w,Z}} = \text{const.}$$

Das System der Differentialgleichungen gemäß Kapitel A.6.1 und A.6.2 reduziert sich dadurch auf ein System von 3 Differentialgleichungen zur Beschreibung der Konvergenz (A-59), (A-60) und (A-61).

Der Fluidfluss aus dem Einlagerungsbereich wird der Abnahme des Gesamthohlraumvolumens $V_{\text{EB}}(t)$ (vgl. Gleichung (A-2)) gleichgesetzt:

Fälle „ohne Gasfluss“ (mit und ohne Gaspolster):

$$Q_{\text{w,out}}(t) = -\frac{dV_{\text{EB,L}}(t)}{dt} = -\frac{dV_{\text{EB}}(t)}{dt} + Q_{\text{g,in}}(t) \cdot \frac{p_0}{p_{\text{w,Z}}} \quad (\text{A-122})$$

mit der neuen Anfangsbedingung für $V_{\text{EB,L}}(t)$ nach der Druckentlastung von

$$V_{\text{EB,L}}(t_{\text{frac}} + \Delta t_{\text{frac}}) = V_{\text{EB,L}}(t_{\text{frac}}) - \Delta t_{\text{frac}} \cdot Q_{\text{w,out}}(t_{\text{frac}} + 0)^{52} \quad (\text{A-123})$$

Im Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ wird ein Fluidaustritt im gleichen Verhältnis wie unmittelbar vor der Frac-Bildung angenommen. Der Lösungsanteil wird dabei mit γ_{w} bezeichnet:

$$\gamma_{\text{w}} = \frac{Q_{\text{w,out}}(t = t_{\text{frac}} - 0)}{Q_{\text{w,out}}(t_{\text{frac}} - 0) + Q_{\text{g,STP,out}}(t_{\text{frac}} - 0) \cdot \frac{p_0}{p_{\text{EB}}(t_{\text{frac}} - 0)}} \quad (\text{A-124})$$

$$Q_{\text{w,out}}(t) = -\frac{dV_{\text{EB,L}}(t)}{dt} = \gamma_{\text{w}} \cdot \left(-\frac{dV_{\text{EB}}(t)}{dt} + Q_{\text{g,in}}(t) \cdot \frac{p_0}{p_{\text{w,Z}}} \right) \quad (\text{A-125})$$

$$Q_{\text{g,STP,out}}(t) = (1 - \gamma_{\text{w}}) \cdot \left(-\frac{dV_{\text{EB}}(t)}{dt} + Q_{\text{g,in}}(t) \cdot \frac{p_0}{p_{\text{w,Z}}} \right) \cdot \frac{p_{\text{w,Z}}}{p_0} \quad (\text{A-126})$$

mit derselben neuen Anfangsbedingung für $V_{\text{EB,L}}(t)$ wie in den Fällen „ohne Gasfluss“.

Das Ende der Austrittsphase wird mit einer leicht abgeänderten Gleichung (A-115) bestimmt:

$$T_3 = \min(T_{3,1}, T_{3,2})$$

$$V_{\text{EB,L}}(t = T_1 + T_{3,1}) = -L_1 \cdot A_1 \cdot \varepsilon_1 \quad (\text{A-127})$$

$$Q_{\text{w,out}}(t = T_1 + T_{3,2}) = 0.001 \cdot \max_{t \in [t_{\text{frac}} + \Delta t_{\text{frac}}, T_1 + T_3]} (Q_{\text{w,out}}(t))$$

⁵² $t_{\text{frac}} - 0$ steht für Zeiten unmittelbar vor, $t_{\text{frac}} + 0$ für Zeiten unmittelbar nach der Frac-Bildung



A.7 Verzögerung während Transport entlang des Abdichtsystems ($T_1 \leq t \leq T_1 + T_{TG}$)

Der Transport entlang des Abdichtsystems wird als reiner Advektionsprozess mit zeitlich veränderlicher Transportgeschwindigkeit, abhängig von $Q_{w,out}(t)$, simuliert.

Dispersions- und Diffusionsprozesse in Transportrichtung bleiben damit unberücksichtigt. Für die berechneten Radionuklidfreisetzungen ist dies unerheblich, es sei denn, die advective Transportzeit übersteigt die Halbwertszeit des Radionuklids deutlich und die Dispersion ist stark. Bei den im Endlager herrschenden Bedingungen und für relevante Radionuklide reicht eine Verkürzung der advectiven Transportzeit um den Faktor 2 oder weniger aus, um die Vernachlässigung des Dispersionseffekts bei Annahme eines rein advectiven Transportes auch für diesen Fall zu kompensieren. Die probabilistischen Rechnungen decken die Verkürzung der Transportzeit zur Kompensation des vernachlässigten Dispersionseffekts ab.

Die Austrittsphase von Lösung aus dem Einlagerungsbereich und damit auch von Lösung aus dem Abdichtsystem in den Mischungsbereich dauert von $t = T_1$ bis $t = T_1 + T_3$. Während einer anfänglichen Zeitperiode der Dauer T_{TG} wird allerdings nichtkontaminierte Lösung aus dem Abdichtsystem in den Mischungsbereich ausgepresst. Der Zutritt von kontaminierter Lösung in den Mischungsbereich beginnt bei $t = T_1 + T_{TG}$ und dauert bis $t = T_1 + T_3$.

Ist $T_{TG} > T_3$, erfolgt keine Freisetzung von Radionukliden in den Mischungsbereich. Die Austrittsphase stoppt somit, bevor die Radionuklidfront das Ende des Abdichtsystems erreicht.

Bei einem rein advectiven Transport verändert sich die Konzentration lediglich durch den radioaktiven Zerfall. Unter der vereinfachenden Annahme, dass für die Berechnung der Freisetzung eines Radionuklids aus einer Zerfallskette die Sorptionsparameter sämtlicher Vorläufernuklide gleich jener des betrachteten Tochternuklids sind, ist die Radionuklid-Konzentration am Ausgang des Abdichtsystems (eingangs Mischungsbereich), $C_{VG,in}(t)$, gleich jener im Einlagerungsbereich zur selben Zeit.

$$C_{VG,in}(t) = C_L(t) = l(t) \cdot f_L \quad (A-128)$$

Die Verzögerung der Freisetzung aus dem Abdichtsystem in den Mischungsbereich, T_{TG} , ist definiert durch:

$$L_1 = \int_{T_1}^{T_1+T_{TG}} \frac{Q_{w,out}(t)}{\varepsilon_1 \cdot A_1 \cdot R_T} dt \quad (A-129)$$

mit

R_T Retentionsfaktor des betrachteten Radionuklids in der Abdichtung; [-]

ε_1 Transportporosität der Abdichtung; [-]

Für den Retentionsfaktor gilt:



$$\varepsilon_1 \cdot R_T = \varepsilon_1 + \rho_A \cdot K_{d,A} \quad (\text{A-130})$$

mit

ρ_A Masse des sorbierenden Feststoffs in der Abdichtung pro Volumeneinheit; [kg/m³]

$K_{d,A}$ K_d -Wert des betrachteten Radionuklids am sorbierenden Feststoff der Abdichtung; [m³/kg]

In allen dargelegten Modellrechnungen wird konservativ

$$R_T = 1 \quad (\text{A-131})$$

gesetzt (Begründung siehe Hauptteil des Berichts).

Bemerkungen:

Gleichung (A-129) beschreibt die Verzögerung beim Transport durch ein homogen poröses Medium. Das Material des Abdichtsystems kann jedoch lokal auch hydraulisch wirksame Risse aufweisen. In diesem Fall bewegt sich die Lösung lokal vorwiegend entlang dieser Risse. Die Radionuklide diffundieren jedoch aus den Rissen in die angrenzende Matrix und werden dadurch beim Transport durch das Abdichtsystem verzögert (Matrixdiffusion). Der hier verwendete Modellansatz beschreibt den Radionuklidtransport auch für lokal „geklüftete“ Abdichtungen, sofern A_1 den Querschnitt des Abdichtsystems beschreibt, der während des Transportprozesses weitgehend durch advektiv eingetragene oder eindiffundierte Radionuklide gesättigt ist. Die eigentliche „Kluftporosität“ ist für die hier betrachteten Prozesse nicht relevant. Sie bestimmt lediglich die lokale Transportgeschwindigkeit in der „Kluft“. Über längere Distanzen beschreibt sie damit den Transport von Wasserinhaltsstoffen, die dauernd im „Kluftsystem“ verbleiben und nicht in die Matrix diffundieren; für die Berechnung der Transportgeschwindigkeit gelöster Inhaltsstoffe ist sie nicht maßgebend.

Die Auswirkungen von Frac-Bildung bei Überschreiten des kritischen Gasdrucks werden in Bezug auf den Lösungsfluss gemäß Abschnitt A.6.3 beschrieben. Der Transport der Radionuklide wird in diesem Fall von Beginn der Austrittsphase an mit Gleichung (A-129), mit dem gemäß Abschnitt A.6.3 berechneten, zeitabhängigen Lösungsaustritt und mit folgenden Parameteranpassungen berechnet:

$R_T = 1$ in jedem Fall, unabhängig von der Datenlage für den Fall ohne Frac-Bildung

ε_1, A_1 unverändert

Dieses Vorgehen ist angemessen: In Bezug auf die Sorption ist es konservativ. Bezüglich Porosität und Fließquerschnitt gibt es bis zum Zeitpunkt der Frac-Bildung die Verhältnisse korrekt wieder und führt bei Frac-Bildung wegen des relativ großen, kurzfristig ausgepressten Lösungsvolumens trotz nicht angepasstem $\varepsilon_1 \cdot A_1$ zu keiner nennenswerten weiteren Verzögerung.



A.8 Mischung in der übrigen Grube ($T_1 + T_{TG} \leq t \leq T_1 + T_3$)

Nach dem Abdichtsystem folgt ein Mischungsbereich mit dem Anfangs-Gesamtvolumen (Konturvolumen) $V_{VG,0}$, dem Gesamthohlraumvolumen $V_{VG}(t)$ und der für diese Volumina maßgebenden Konvergenzrate c_{VG} . Der Zutritt von Radionukliden in den Mischungsbereich beginnt zur Zeit $t = T_1 + T_{TG}$ und endet zur Zeit $t = T_1 + T_3$. Falls T_{TG} größer als T_3 ist, erfolgt keine Radionuklidfreisetzung aus dem Abdichtsystem.

Die Radionuklid-Konzentration beim Zutritt aus dem Abdichtsystem in den „Mischungsbereich Grubengebäude“, $C_{VG,in}(t)$, entspricht der Konzentration im Einlagerungsbereich zu der Zeit, als das betrachtete Lösungspaket den Einlagerungsbereich verlassen hat, verändert durch den radioaktiven Zerfall bis zur Zeit t (vgl. Abschnitt A.7), und somit

$$C_{VG,in}(t) = I(t) \cdot f_L \quad t \geq T_1 + T_{TG} \quad (A-132)$$

$C_{VG,in}(t)$ Konzentration beim Zutritt aus dem Abdichtsystem in den Mischungsbereich; [Bq/m^3]

Die Konzentration im Mischungsbereich, $C_{VG,out}(t)$, kann als Produkt aus dem Radionuklidinventar $I(t)$ und einem Transferfaktor $f_5(t)$ gemäß Gleichung (A-133) beschrieben werden.

$$C_{VG,out}(t) = I(t) \cdot f_5(t) \quad (A-133)$$

$C_{VG,out}(t)$ Konzentration beim Austritt aus dem Mischungsbereich; [Bq/m^3]

$f_5(t)$ nuklidabhängiger Transferfaktor des Mischungsbereichs; [m^{-3}]

Zu Beginn der Phase 5, bei Einsetzen des Radionuklidzutritts in den Mischungsbereich zum Zeitpunkt $t = T_1 + T_{TG}$, gilt als Anfangsbedingung $C_{VG,out}(t = T_1 + T_{TG}) = 0$ und somit

$$f_5(t = T_1 + T_{TG}) = 0 \quad (A-134)$$

Zusätzlich zur radionuklidhaltigen Lösung aus dem Einlagerungsbereich tritt Lösung ohne Radionuklide aus dem übrigen Grubengebäude zu (Zutrittsrate $Q_{GG}(t)$). Es wird dabei unterstellt, dass dieser Lösungszutritt aus der übrigen Grube durch deren Konvergenz bestimmt ist und diese durch den PSE-Ansatz [PSE 1985] modelliert werden kann. Ferner wird angenommen, dass die Lösung aus der gesamten übrigen Grube über den Mischungsbereich des betrachteten Einlagerungsbereichs ins Deckgebirge ausgepresst wird.

Für die Modellierung der Konvergenz der übrigen Grube wird deren Volumen ebenfalls in die drei Kompartimente unterteilt, einen unverfüllten, einen kompaktierbar verfüllten und einen nicht oder gering kompaktierbar verfüllten Anteil. Die Anfangsbedingungen bezogen auf den Zeitpunkt $t=0$ (Beginn der Phase 1) ergeben sich aus der Konvergenz und den Auf- und Umlöseprozessen während der Prologphase gemäß Kapitel A.3.1.

Die Volumenänderung durch die Konvergenz der übrigen Grube ab Beginn der Phase 1 wird mit den Gleichungen des Abschnitts A.4.3 beschrieben. Der Fluidinnendruck (hier p_{GG} im Gegensatz



zu $p_{EB}(t)$ in Gleichung (A-62)) wird als zeitlich konstant angenommen. Die Zutrittsrate Q_{GG} aus der übrigen Grube in den Mischungsbereich ergibt sich somit aus der Lösung des Gleichungssystems des Abschnitts A.4.3 mit den entsprechenden weiteren Parametern:

m	charakteristischer Exponent des Stoffgesetzes für das sekundäre Kriechen von Steinsalz (gleicher Parameter wie für Einlagerungsbereiche); [-]
ε_r	charakteristische Porosität, ab der eine Stützwirkung einsetzt (gleicher Parameter wie für Einlagerungsbereiche); [-]
$p_{litho,GG}$	mittlerer lithostatischer Druck für die übrige Grube; [MPa]
p_{GG}	hydraulischer Absolutdruck in der übrigen Grube, als konstant angenommen; [MPa]

Der Mischungsbereich ist selbst Teil der übrigen Grube; streng genommen ist daher der Lösungszutritt aus der übrigen Grube zum Mischungsbereich um den Konvergenzanteil des Mischungsbereichs geringer als der Fluss, der mit den Parametern der übrigen Grube und den Gleichungen des Abschnittes A.4.3 berechnet wird. Da der Unterschied jedoch sehr gering und die Annahme, dass die gesamte übrige Grube über den betrachteten Mischungsbereich entwässert, extrem – aber konservativ – ist, wird hier keine entsprechende Korrektur vorgenommen.

Die oben angesprochene Konvergenz des Mischungsbereichs muss jedoch bei der Berechnung der Flüssigkeitsbilanz und des Transferfaktors $f_5(t)$ berücksichtigt werden. Sie wird ebenfalls mittels des PSE-Ansatzes beschrieben. Die Druckverhältnisse und die Volumenverteilung im Mischungsbereich werden analog denen der übrigen Grube parametrisiert, d.h.:

c_{VG}	Konvergenzrate des feldspezifischen Mischungsbereichs; [a^{-1}]
ζ_{VGt}	Anteil des verfüllten Volumens des Mischungsbereichs bezogen auf das Gesamtvolumen des Mischungsbereichs; [-]
ζ_{VGk}	Anteil des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens bezogen auf das verfüllte Volumen des Mischungsbereichs; [-]
$p_{litho,VG}$	lithostatischer Druck für den Mischungsbereich; [MPa]
p_{VG}	hydraulischer Absolutdruck im Mischungsbereich, als konstant angenommen; [MPa]

Der gesamte Lösungsaustritt aus dem Mischungsbereich, $Q_v(t)$, beträgt damit:

$$Q_v(t) = Q_{w,out}(t) + Q_{VG}(t) + Q_{GG}(t) \quad (A-135)$$

Q_v	Rate des gesamten Lösungsaustritts aus dem Mischungsbereich; [m^3/s]
Q_{VG}	Rate des Lösungsaustritts, der aus der Konvergenz des Mischungsbereichs resultiert; [m^3/s]
Q_{GG}	Rate des Lösungsaustritts, der aus dem Lösungszutritt in den Mischungsbereich aus der übrigen Grube resultiert, welcher seinerseits aus der Konvergenz der Grubenbaue in der übrigen Grube verursacht wird; [m^3/s]



Im Mischungsbereich kann Sorption am sorbierenden Anteil des Versatzmaterials erfolgen. Diese wird – bei ausreichender Datenlage – als Vergrößerung der Pufferkapazität des Mischungsbereichs berücksichtigt, nicht jedoch als Retardation im Sinne einer zeitlichen Transportverzögerung. Für den Retentionsfaktor R_{VG} gilt Gl. (A-136).

$$R_{VG}(t) = 1 + \frac{M_{VG}}{V_{VG}(t)} \cdot K_d \quad (\text{A-136})$$

R_{VG} Retentionsfaktor des Mischungsbereichs; [-]

M_{VG} sorptionswirksame Masse im Mischungsbereich; [kg]

K_d K_d -Wert; [m^3/kg]

$V_{VG}(t)$ Gesamthohlraum des Mischungsbereichs; [m^3]

In allen Modellrechnungen wird die Sorption im Mischungsbereich vernachlässigt (Begründung siehe Hauptteil des Berichts).

Da der Mischungsbereich jenen Teil der übrigen Grube beschreibt, wo sich die kontaminierte Lösung aus dem Einlagerungsbereich mit der Lösung aus der übrigen Grube vermischt, ist eine vollständige Konvergenz des Mischungsbereichs ausgeschlossen. Es wird daher ein Zusatzterm $V_{VG,D}$ zum Gesamthohlraumvolumen des Mischungsbereichs in der Größe von ca. 1% seines anfänglichen Gesamthohlraumvolumens $V_{VG}(t=0)$ eingeführt, der nicht der Konvergenz unterliegt.

Die Bilanzgleichung für den Gehalt eines Radionuklids im Mischungsbereich lautet damit:

$$\frac{d}{dt} [f_5(t) \cdot (R_{VG}(t) \cdot V_{VG}(t) + V_{VG,D})] = f_L \cdot Q_{w,out}(t) - f_5(t) \cdot (Q_{w,out}(t) + Q_{GG}(t) + Q_{VG}(t)) \quad t > T_1 + T_{TG} \quad (\text{A-137})$$

mit $Q_{w,out}(t) = 0$ für $t > T_1 + T_3$.

Aus dieser Gleichung ergibt sich für den Transferfaktor $f_5(t)$ die folgende Differentialgleichung:

$$\frac{d}{dt} f_5 = f_L \cdot \frac{Q_{w,out}(t)}{M_{VG} \cdot K_d + V_{VG}(t) + V_{VG,D}} - f_5(t) \cdot \frac{Q_{w,out}(t) + Q_{GG}(t)}{M_{VG} \cdot K_d + V_{VG}(t) + V_{VG,D}} \quad t > T_1 + T_{TG} \quad (\text{A-138})$$

Mit der Parametrisierung der einzelnen Beiträge zur Lösungsaustrittsrate $Q_v(t)$ des Mischungsbereichs endet der Lösungsaustritt nie; aus rechentechnischen Gründen wird aber ein Ende der Austrittsphase ($T_1 + T_3 + T_5$) definiert: Der Austritt von Lösung aus dem Mischungsbereich wird so lange berechnet, bis der Zutritt von Radionukliden zum Mischungsbereich beendet ist ($T_1 + T_3$) und darüber hinaus, bis das im Verdünnungsbereich vorhandene mobile Radionuklidinventar zu 99% abgetragen ist, d.h., als Näherung:

$$V_{VG}(t = T_1 + T_3 + T_5) = 0,01 \cdot V_{VG}(t = T_1 + T_3) \quad (\text{A-139})$$



A.9 Transportverzögerung im Hutgestein und Deckgebirge ($t_A \leq t \leq t_E$)

Das Modell unterstellt, dass sich die Lösungs- und Radionuklidaustritte aus den verschiedenen Einlagerungsbereichen vor dem Übertritt ins Hutgestein vereinigen und der weitere Transport durch Hutgestein und Deckgebirge entlang eines gemeinsamen Pfades erfolgt. Diese Annahme ist ungünstiger als der alternative Fall, in dem die Freisetzung aus dem Grubengebäude entlang mehrerer Pfade durch Hutgestein und Deckgebirge erfolgt. Die gesamte Radionuklidtransportrate entspricht somit der Summe der Radionuklidtransportraten aus den einzelnen Einlagerungsbereichen. Die Transportrate für das Radionuklid i aus dem Mischungsbereich des Einlagerungsbereichs j ergibt sich aus der Konzentration $C_{VG,out,i,j}$ gemäß den Gleichungen (A-133) und (A-138) sowie der Lösungsaustrittsrate $Q_{v,j}$ aus dem Mischungsbereich gemäß Gleichung (A-135).

Die unabhängige Berechnung der Radionuklidtransportraten aus dem Mischungsbereich für jeden Einlagerungsbereich ist zulässig, selbst wenn der Mischungsbereich für alle Einlagerungsbereiche derselbe ist, da die Prozesse im Mischungsbereich im mathematischen Sinne linear sind. Wesentlich ist jedoch, dass dabei die Radionuklidtransportraten summiert werden und nicht die Radionuklidkonzentrationen (vgl. Gleichung (A-145)).

Treibende Kraft für den Transport durch Hutgestein und Deckgebirge ist ausschließlich der Lösungsaustritt aus dem Grubengebäude. Nach den hydrogeologischen Modellrechnungen zum Hutgestein und Deckgebirge ist die Grundwasserbewegung im Hutgestein oberhalb der potentiellen Austrittsstellen aus der Salzstruktur ohne Auspressung aus dem Grubengebäude sehr gering und eher nach unten gerichtet.

Sorption führt zu einer Transportverzögerung. Die Modellierung erfolgt in analoger Weise zu jener entlang des Abdichtsystems als reiner Advektionsprozess. Es wird keine weitere Vermischung mit Wässern aus Hutgestein und Deckgebirge unterstellt; eine solche wird durch die Verdünnung im oberflächennahen Grundwasser (vgl. Kapitel A.10) mit berücksichtigt.

Die radionuklidspezifischen Größen werden nachfolgend systematisch mit einem Index i gekennzeichnet, die feldspezifischen mit einem Index j .

L_2	Transportdistanz durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Oberkreide und Quartär); [m]
A_2	Transportquerschnittsfläche für ausgepresste Lösung; [m ²]
ε_2	Fließporosität des Transportpfades durch Hutgestein und Deckgebirge; [m]
ε_D	Diffusionszugängliche Porosität des Transportpfades durch Hutgestein und Deckgebirge; [m]
ρ_{DGL}	Feststoffdichte des transportrelevanten Materials entlang des Transportpfades durch Hutgestein und Deckgebirge; [kg/m ³]

Die transportrelevanten Parameter werden in Anlehnung an die Eigenschaften der Schichtenfolge DGL gewählt. Für den Retentionsfaktor entlang des Transportpfades durch Hutgestein und Deckgebirge, $R_{D,i}$, gilt:



$$R_{D,i} = 1 + \frac{1 - \varepsilon_D}{\varepsilon_D} \cdot \rho_{DGL} \cdot K_{d,DGL,i} \quad (\text{A-140})$$

$R_{D,i}$ Retentionsfaktor für den Transportpfad durch Hutgestein und Deckgebirge; [-]

Wegen der sehr ähnlichen Werte für ε_2 und ε_D in der Schichtenfolge DGL wird vereinfachend angenommen, dass die diffusionszugängliche Porosität und die Fließporosität gleich sind:

$$\varepsilon_D = \varepsilon_2 \quad (\text{A-141})$$

Die Zeitpunkte von Beginn bzw. Ende des Übertritts eines Radionuklids aus der Grube ins Hutgestein werden wie folgt ermittelt:

$$t_{A,i} = \min_j (T_{1,j} + T_{TG,i,j}) \quad (\text{A-142})$$

$t_{A,i}$ Zeitpunkt, zu dem ein spezifisches Radionuklid i erstmals aus den Mischungsbereichen aus- und in das Hutgestein eintritt; dies ist identisch mit dem Zeitpunkt, zu dem erstmals ein Radionuklid i in einen Mischungsbereich eintritt; [s]

$$t_E = \max_j (T_{1,j} + T_{3,j} + T_{5,j}) \quad (\text{A-143})$$

t_E Zeitpunkt, zu dem der Radionuklidaustritt aus allen Mischungsbereichen ins Hutgestein endet; [s]

Entsprechend der einleitend genannten ungünstigen Annahme entspricht der Lösungsfluss entlang des Transportpfads durch das Hutgestein und Deckgebirge der Summe der Lösungsaustritte aus allen Einlagerungsbereichen und der übrigen Grube:

$$Q_D(t) = Q_{GG}(t) + \sum_j Q_{w,out,j}(t) \quad (\text{A-144})$$

$Q_D(t)$ Lösungsfluss entlang des Transportpfads durch Hutgestein und Deckgebirge = Lösungsaustrittsrate aus dem Grubengebäude; [m^3/s]

Die Konzentrationen eines Radionuklids i im Hutgestein, $C_{D,i}(t)$, ist:

$$C_{D,i}(t) \cdot Q_D(t) = \sum_j C_{VG,out,i,j}(t) \cdot Q_{v,j}(t) \quad (\text{A-145})$$

mit

$C_{D,i}(t)$ Konzentration des Radionuklids i im Hutgestein; [Bq/m^3]

Die Konzentration des Radionuklids i bei Austritt aus dem Mischungsbereich j entspricht der Gleichung (A-133) (Abschnitt A.8) für ein Radionuklid i :



$$C_{VG,out,i,j}(t) = I_{i,j}(t) \cdot f_{5,i,j}(t) \quad (A-146)$$

Hieraus folgt, dass der Transferfaktor, $f_{D,i,j}$, eines Radionuklids i aus dem Einlagerungsbereich j bis ins Hutgestein wie folgt ermittelt werden kann:

$$f_{D,i,j}(t) = \frac{f_{5,i,j}(t) \cdot Q_{V,j}(t)}{Q_D(t)} \quad (A-147)$$

$f_{D,i,j}(t)$ nuklidabhängiger Transferfaktor zwischen dem Einlagerungsbereich und dem Hutgestein; [m^{-3}]

Als Folge des advektiven Transportes durch Hutgestein und Deckgebirge verzögert sich die Freisetzung ins oberflächennahe Grundwasser um die Transportzeit $T_{TD,i}(t)$. Diese Transportzeit ist abhängig von der (zeitlich variablen) Lösungsaustrittsrates und der Radionuklidrückhaltung durch Sorption. Sie ist somit radionuklid- und zeitabhängig und bestimmt sich gemäß:

$$L_2 = \int_t^{t+T_{TD,i}(t)} \frac{Q_D(\tau)}{R_{D,i} \cdot \epsilon_2 \cdot A_2} d\tau \quad t_{A,i} \leq t \leq t_E \quad (A-148)$$

$T_{TD,i}(t)$ nuklidabhängige Zeitdauer der Verzögerung durch den Transport durch das Hutgestein und Deckgebirge; der Zeitpunkt t bezeichnet den Beginn des Transportes am Salzspiegel; [s]

A.10 Verdünnung in der Biosphäre ($t_A + T_{TD}(t_A) \leq t \leq t_E + T_{TD}(t_E)$)

Nach dem Transport durch Hutgestein und Deckgebirge erreichen die radionuklidhaltigen Lösungen die Biosphäre. Die dortige Verdünnung wird durch den für die Verdünnung zur Verfügung stehenden Grundwasserfluss Q_{GW} bestimmt. Damit das Grundwasser überhaupt als Trinkwasser verwendet werden kann, darf sein Salzgehalt nicht zu hoch sein. Bei gesättigter Salzlösung und somit bei der potentiell kontaminierten, aus dem Grubengebäude ausgepressten Salzlösung muss der Verdünnungsfaktor mindestens 500 betragen. Der Verdünnungsfaktor zwischen dem Salzspiegel und dem oberflächennahen Grundwasser F_{verd} beträgt somit

$$F_{verd}(t) = \max\left(500, \frac{Q_D(t) + Q_{GW}}{Q_D(t)}\right) \quad (A-149)$$

Q_{GW} verdünnungswirksamer Grundwasserfluss; [m^3/s]

$F_{verd}(t)$ Verdünnung der aufsteigenden Lösung im Grundwasser; [-]

Die Freisetzung in die Biosphäre beginnt zur Zeit $t = t_A + T_{TD}(t_A)$ und endet bei $t = t_E + T_{TD}(t_E)$. Die Radionuklid-Konzentration im oberflächennahen Grundwasser, $C_{B,i}(t)$, berechnet sich nach:

$$C_{B,i}(t) = \frac{1}{F_{verd}(t)} \cdot \sum_j f_{D,i,j}(t') \cdot I_{i,j}(t) \quad (A-150)$$



wobei

t' den Zeitpunkt des Eintritts des Flüssigkeitspakets ins Deckgebirge bezeichnet, das zur Zeit t aus dem Deckgebirge in die Biosphäre freigesetzt wird; [s]

$$t' + T_{TD,i}(t') = t \quad (\text{A-151})$$

$I_{i,j}(t)$ feldspezifisches und radionuklidabhängiges Inventar; [Bq]

$C_{B,i}(t)$ Konzentration des Radionuklids i im oberflächennahen Grundwasser; [Bq/m³]

A.11 Resultierende Dosiswerte

Aus den Konzentrationen der Radionuklide im Grundwasser (inkl. ihrer Tochternuklide) werden die Dosiswerte D (in Sv/a) mittels der in [Pröhl & Gering 2002] zusammengestellten Dosiskonversionsfaktoren DF berechnet. Diese sind definiert (und wurden berechnet) als Effektivdosis der zu betrachtenden erwachsenen Einzelperson, die gemäß der allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 StrlSchV in einer Umgebung lebt und sich aus dieser ernährt, in der alles genutzte Wasser die Konzentration von 1 Bq/l für das betrachtete Radionuklid aufweist.

$$D_i(t) = C_{B,i}(t) \cdot DF'_i \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \quad (\text{A-152})$$

mit

D_i Dosis aufgrund der Freisetzung des Radionuklids i und seiner in einem säkularen Zerfallsgleichgewicht befindlichen Folgenuklide in die Biosphäre; [Sv·a⁻¹]

DF'_i Dosiskonversionsfaktor für das Radionuklid i , angepasst gemäß Gleichung (A-171) zur Berücksichtigung seiner Folgenuklide in einem säkularen Zerfallsgleichgewicht; [Sv·a⁻¹/(Bq·l⁻¹)]

Der radioaktive Zerfall und der Aufbau von Tochternukliden werden über die Bateman-Gleichung berechnet. Für die Aktivität des i -ten Radionuklids innerhalb einer Zerfallsreihe gilt:

$$\frac{d}{dt} I_i = \lambda_i \cdot \left(\sum_k I_k(t) - I_i(t) \right) \quad (\text{A-153})$$

mit

$I_i(t)$ Aktivitätsinventar des Radionuklids i zur Zeit t , Zeitnullpunkt und Anfangsinventar bezogen auf den Beginn der Phase 1; [Bq]

λ_i Zerfallskonstante des Radionuklids i ; [1/s]

$I_k(t)$ Aktivitätsinventar des direkten Vorläuferradionuklids von i zur Zeit t (im Fall von verzweigten Ketten kann ein Radionuklid mehrere direkte Vorläufer haben); [Bq]

Die Zerfallskonstante ist dabei definiert durch:



$$\lambda_i = \ln(2) / \text{HWZ}_i \quad (\text{A-154})$$

mit

HWZ_i Halbwertszeit des Radionuklids i ; [s]

Die Gleichung (A-153) ergibt mit der Anfangsbedingung:

$$I_i(t=0) = I_{i,0} \quad (\text{Zeitnullpunkt und Anfangsinventar bezogen auf Beginn Phase 1}) \quad (\text{A-155})$$

$$I_i(t) = I_{i,0} \cdot e^{-\lambda_i \cdot t} + \lambda_i \cdot e^{-\lambda_i \cdot t} \sum_k \int_0^t I_k(t') e^{+\lambda_i \cdot t'} dt' \quad (\text{A-156})$$

wobei k wiederum die direkten Vorläuferradionuklide des betrachteten Radionuklids bezeichnet. Für das Anfangsnuklid der Zerfallsreihe vereinfacht sich die Gleichung (A-156) auf die bekannte Beziehung:

$$I_{\text{anf}}(t) = I_{\text{anf},0} \cdot e^{-\lambda_{\text{anf}} \cdot t}$$

Durch sukzessives Einsetzen in Gl. (A-156) können die Aktivitäten der Folgenuklide i rekursiv berechnet werden. Dies führt auf die Gleichung

$$I_i(t) = I_{i,0} \cdot e^{-\lambda_i \cdot t} + \sum_j \left(I_j(t) - I_{j,0} \cdot e^{-\lambda_j \cdot t} \right) \cdot \frac{\lambda_j}{\lambda_i - \lambda_j} + \sum_j \sum_k \left(I_k(t) - I_{k,0} \cdot e^{-\lambda_k \cdot t} \right) \cdot \frac{\lambda_k}{\lambda_i - \lambda_k} \cdot \frac{\lambda_j}{\lambda_j - \lambda_i} + \sum_j \sum_k \sum_l \dots \sum_{\text{anf}} \left(I_{\text{anf}}(t) - I_{\text{anf},0} \cdot e^{-\lambda_{\text{anf}} \cdot t} \right) \cdot \frac{\lambda_{\text{anf}}}{\lambda_i - \lambda_{\text{anf}}} \cdot \frac{\lambda_j}{\lambda_j - \lambda_i} \cdot \frac{\lambda_k}{\lambda_k - \lambda_i} \dots \cdot \frac{\lambda_{\text{anf}-1}}{\lambda_{\text{anf}-1} - \lambda_i} \quad (\text{A-157})$$

Die Berechnung der Freisetzung von Radionukliden aus Zerfallsreihen ist im Modell konservativ vereinfacht, indem

- im Falle eines Tochternuklids, das schwächer sorbiert als seine Mutternuklide, auch für die Mutternuklide die geringere Sorption des Tochternuklids unterstellt wird (nur im Zusammenhang mit der Berechnung der Freisetzung des Tochternuklids) und
- im Falle eines langlebigen Mutternuklids mit kürzerlebigen Folgenukliden der volle Dosisbeitrag der Folgenuklide jenem des Mutternuklids durch Anpassung des Dosisumwandlungsfaktors unter Annahme eines säkularen Zerfallsgleichgewichts zugeschlagen wird. Die Anpassung des Dosisumwandlungsfaktors wird weiter unten beschrieben.



Die erstgenannte Vereinfachung führt bei der ^{238}U -Zerfallsreihe mit dem Referenzparametersatz zu einer erheblichen Überschätzung der Freisetzung von ^{226}Ra in das oberflächennahe Grundwasser. Die Elemente Uran und Thorium legen innerhalb des Nachweiszeitraums aufgrund ihrer guten Sorption entlang des Transportpfads durch Hutgestein und Deckgebirge nur etwa $\frac{1}{3}$ der Transportdistanz zurück. Das ^{226}Ra , welches aus diesen Vorläufernukliden gebildet wird, zerfällt weitestgehend während des Transports entlang der verbleibenden Strecke, da seine Halbwertszeit von 1 600 a um etwa eine Größenordnung kürzer ist als die verbleibende Transportzeit entlang des Transportpfads. Die Vereinfachung, für die Sorption der Vorläufer Uran und Thorium den geringen Sorptionswert von Radium zu unterstellen, führt somit zu einer Überschätzung der Freisetzung von ^{226}Ra um mehr als drei Größenordnungen. Ohne weitere Korrekturen würde dies die Ergebnisse der deterministischen Modellrechnungen verfälschen. Aus diesem Grund wird für das ^{226}Ra ein spezieller Algorithmus angewandt:

Das ^{226}Ra entsteht aus seinen Vorläufern in der ^{238}U -Zerfallsreihe. Weil das ^{230}Th noch stärker als seine Vorläufer ^{238}U und ^{234}U durch Sorption entlang des Transportpfads durch Hutgestein und Deckgebirge zurückgehalten wird, ist letztlich die „Transportfront“ des Urans auf dem Transportpfad die Startlinie für den Transport des Tochternuklids ^{226}Ra durch Hutgestein und Deckgebirge. Währenddessen wirkt jedoch der radioaktive Zerfall auf das ^{226}Ra wie auf ein Einzelnuclid, so dass es weitgehend zerfällt, wenn die Transportzeit entlang des restlichen Transportpfads zu lang ist. Aus dieser Überlegung ergibt sich folgender spezieller Algorithmus für die Berechnung der ^{226}Ra -Freisetzung in das oberflächennahe Grundwasser:

(i) Berechnung der Transportfront für Uran zum Zeitpunkt t:

$$L_{F,U}(t) = \min \left[L_2, \int_{t_{A,U}}^t \frac{Q_D(\tau)}{R_{D,U} \cdot \varepsilon_2 \cdot A_2} d\tau \right] \quad t_{A,U} \leq t \leq t_E \quad (\text{A-158})$$

mit

$t_{A,U}$ Zeitpunkt, zu dem Uran (^{238}U) erstmals aus den Mischungsbereichen aus- und in das Hutgestein eintritt; dies ist identisch mit dem Zeitpunkt, zu dem Uran erstmals in einen Mischungsbereich eintritt; [s]

$$L_{F,U}(t) = \begin{cases} L_{F,U}(t_E) & t > t_E \\ 0 & t < t_{A,U} \end{cases} \quad (\text{A-159})$$

(ii) Bestimmung der Obergrenze für die Auspressrate durch das Hutgestein

Ob das Radium von der Transportfront bis in das oberflächennahe Grundwasser gelangen kann, hängt davon ab, ob die Transportzeit durch den restlichen Weg entlang des Hutgesteins und Deckgebirges nicht wesentlich größer ist als die Halbwertszeit des ^{226}Ra . Die Transportgeschwindigkeit ist proportional zur – zeitlich variablen – Auspressrate aus der Grube. Zu den Zeiten, zu welchen eine Freisetzung von ^{226}Ra bis in das oberflächennahe Grundwasser realistischer Weise in Betracht gezogen werden muss, ist in der Regel die Gasbildung bereits weitgehend abgeklun-



gen und erheblich geringer als der Volumenstrom durch die Hohlraumkonvergenz der Grubenbaue. Auch diese ist dann zumeist schon deutlich zurückgegangen, weil die Stützwirkung des kompaktierbaren Versatzes eingesetzt hat. Bei den probabilistischen Modellrechnungen sind allerdings auch Fälle denkbar, in denen die Auspressrate zu späten Zeiten vorübergehend nochmals zunimmt, z.B. durch Wiedereinsetzen einer aufgrund von Wassermangel unterbrochen Gasbildung. Daher wird für die Berechnung der Transportgeschwindigkeit des ^{226}Ra als ungünstige Annahme der Maximalwert der Auspressrate im relevanten Zeitintervall verwendet, allerdings gemittelt über ein Zeitintervall t_M , damit kurze, sehr hohe Auspressraten (insbesondere nach einem Frac) kein zu hohes Gewicht bekommen.

$$\bar{Q} = \frac{1}{t_M} \max_{t_{A,U} \leq t \leq t_E} \left[\int_t^{t+t_M} Q_D(\tau) d\tau \right] \quad (\text{A-160})$$

mit

\bar{Q} Maximum der gemittelten Auspressrate durch das Hutgestein ab dem Zeitpunkt, zu dem Uran (^{238}U) erstmals aus den Mischungsbereichen aus- und in das Hutgestein eintritt; [m^3/s]

t_M Zeitdauer der Mittelung; angesetzt wird $t_M = 1\,000$ Jahre

(iii) Berechnung des Zerfalls von ^{226}Ra auf dem Weg von der Transportfront des Urans bis in das oberflächennahe Grundwasser:

$$z_{\text{Ra}}(t) = \exp \left[-\lambda_{^{226}\text{Ra}} \cdot \frac{R_{D,\text{Ra}} \cdot \varepsilon_2 \cdot A_2}{Q} \cdot (L_2 - L_{F,U}(t)) \right] \quad (\text{A-161})$$

(iv) Berücksichtigung von $z_{\text{Ra}}(t)$ für späte Zeiten ($t \geq 25'000$ a)

Die Berücksichtigung des unter (iii) ermittelten Zerfallsfaktors $z_{\text{Ra}}(t)$ darf erst zu vergleichsweise späten Zeiten erfolgen, nämlich dann, wenn das Anfangsinventar des ^{226}Ra weitestgehend zerfallen ist und damit freigesetztes ^{226}Ra praktisch ausschließlich aus dem Zerfall seiner Vorläufernuklide stammt. Zu früheren Zeiten gelangt die erste der oben genannten konservativen Vereinfachungen ohne Einschränkung zur Anwendung und die ^{226}Ra -Konzentration im oberflächennahen Grundwasser wird nach Gleichung (A-150) berechnet, wobei t' und $f_{D,i,j}(t')$ für $i = ^{226}\text{Ra}$ berechnet werden.

Als Grenze zwischen „früheren“ und späten Zeiten in Bezug auf die ^{226}Ra -Freisetzung wird der Zeitpunkt $t = 25\,000$ Jahre angesetzt. Dieser Wert ist ein geeigneter Zeitpunkt für den „Schnitt“, weil dann das Anfangsinventar des ^{226}Ra um den Faktor 50 000 zerfallen ist (15,6 Halbwertszeiten), während andererseits erst geringe Mengen des Vorläufers ^{230}Th durch Zerfall von ^{234}U entstanden sind (HWZ von ^{230}Th : 75 000 a). Zu diesem Zeitpunkt weist das ^{226}Ra -Inventar im System daher ein Minimum auf, so dass ein Wechsel des Algorithmus geringe verfälschende Einflüsse hat.



Da bei den Modellrechnungen weder Löslichkeitsgrenzen noch Sorptionsprozesse im Grubengebäude berücksichtigt werden⁵³, hat der in Kapitel A.8, Gl. (A-133) definierte Transferfaktor des Mischungsbereichs für alle Nuklide denselben Wert. Nach Gl. (A-147) ist somit auch der Transferfaktor zwischen Einlagerungsbereich und Hutgestein, $f_{D,i,j}(t)$, für alle Nuklide der ^{238}U -Zerfallsreihe gleich. Nach Gl. (A-147) in Verbindung mit Gl. (A-145) ist damit

$$C_{D,Ra226}(t) = \sum_j f_{D,Ra226,j}(t) \cdot I_{Ra226,j}(t) \quad (\text{A-162})$$

die ^{226}Ra -Konzentration im Transportpfad durch Hutgestein und Deckgebirge an dessen Basis, d.h. am Salzspiegel. Da das Zwischenglied ^{230}Th stärker sorbiert als dessen langlebige Vorläufer ^{238}U und ^{234}U , ist Gl. (A-162) auch eine konservative Näherung für die ^{226}Ra -Konzentration an der Uran-Transportfront.

Um die ^{226}Ra -Konzentration im oberflächennahen Grundwasser zur Zeit t unter Verwendung des Zerfallsfaktors $z_{Ra}(t)$ zu ermitteln, ist von der ^{226}Ra -Konzentration an der Uran-Transportfront im Transportpfad durch Hutgestein und Deckgebirge zur Zeit t' auszugehen, wobei $t - t'$ der Transportzeit von Radium von der Uran-Transportfront bis in das oberflächennahe Grundwasser entspricht. In vereinfachender Näherung wird t' gemäß Gl. (A-151) berechnet, das heißt entsprechend der Transportzeit von Radium vom Salzspiegel bis in das oberflächennahe Grundwasser. Die Gleichung (A-113), ausgewertet für die Zeit t' , beschreibt somit näherungsweise die ^{226}Ra -Konzentration in jenem Porenwasser des Transportpfads durch Hutgestein und Deckgebirge, welches zur Zeit t in das oberflächennahe Grundwasser übertritt. Da sich die Größe $I_{Ra226,j}(t)$ zu diesen späten Zeiten nur noch langsam verändert, kann diese Größe auch für die Zeit t anstelle von t' ausgewertet werden.

Während des Transports von der Uran-Transportfront bis in das oberflächennahe Grundwasser nimmt die ^{226}Ra -Konzentration im Porenwasser um den unter (iii) ermittelten Zerfallsfaktors $z_{Ra}(t)$ ab. Beim Übertritt in das oberflächennahe Grundwasser sinkt die ^{226}Ra -Konzentration um den Faktor $F_{verd}(t)$ ab (vgl. Kapitel A.10).

Die Konzentration von ^{226}Ra im oberflächennahen Grundwasser berechnet sich somit nach:

$$C_{B,i}(t) = \begin{cases} \frac{1}{F_{verd}(t)} \cdot \sum_j f_{D,i,j}(t') \cdot I_{i,j}(t) & t + t_{Voll} \leq 25000 \text{ a} \\ z_{Ra}(t) \cdot \frac{1}{F_{verd}(t)} \cdot \sum_j f_{D,i,j}(t') \cdot I_{i,j}(t) & t + t_{Voll} > 25000 \text{ a} \end{cases} \quad (\text{A-163})$$

Aufgrund der relativ langen Transportzeiten entlang des Transportpfads durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Oberkreide und Quartär) sind die Radionuklide mit kurzen und mittleren Halbwertszeiten beim Austritt ins oberflächennahe Grundwasser im säkularen Zerfallsgleichgewicht, wobei das Gleichgewicht für die Summe aus gelösten und sorbierten Radionukliden gilt. Beim Übertritt ins oberflächennahe Grundwasser verschiebt sich das Verhältnis der Konzentrationen in

⁵³ mit Ausnahme des ^{14}C



Lösung; sehr kurzlebige Radionuklide und stark sorbierende Radionuklide mit mittlerer Halbwertszeit erreichen nach kurzer Distanz ein neues Gleichgewicht, das den Sorptionsverhältnissen im oberflächennahen Grundwasser entspricht. Diese Verschiebung wird im vorliegenden Modell nicht explizit modelliert, sondern durch eine Maximalwertbetrachtung berücksichtigt.

Für die Erläuterung des Vorgehens wird eine Zerfallsreihe betrachtet, deren langlebiges Mutternuklid anstelle des bisher verwendeten Index i den Index 0 trage, und dessen Folgenuklide mit Index 1, 2, ... sowohl mittel- als auch kurzlebig sein können. Der Index der Folgenuklide bezeichnet die Generation, d.h. das Folgenuklid k entsteht durch Zerfall aus dem Radionuklid mit Index $k-1$.

Beim Austritt aus dem Transportpfad durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Oberkreide und Quartär) erfüllen die Konzentrationen der gelösten Radionuklide der betrachteten Zerfallsreihe die folgende Gleichung

$$C_{D,k} = \frac{R_{D,0}}{R_{D,k}} \cdot C_{D,0} \quad (\text{A-164})$$

mit

0 Index des Mutternuklids, ab welchem die Zerfallsreihe betrachtet wird

k Index für Folgenuklide (zu berücksichtigen sind alle in der Zerfallsreihe folgenden Radionuklide, solange deren Halbwertszeit kleiner ist als die des Mutternuklids 0); [-]

$C_{D,k}$ Konzentration des Radionuklids k ausgangs Transportpfad durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Oberkreide und Quartär); [Bq/m^3]

$R_{D,k}$ Retentionsfaktor des Radionuklids k entlang des Transportpfads durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Oberkreide und Quartär); [-]

Durch die in Kapitel A.10 diskutierte Verdünnung verringert sich die Konzentration vor Verschiebung des Gleichgewichts auf die Konzentration $C'_{D,k}$

$$C'_{D,k} = \frac{C_{D,k}}{F_{\text{verd}}} \quad (\text{A-165})$$

mit $C'_{D,0} = C_{B,0}$ gemäß Kapitel A.10.

Als maßgebende hydrogeologische Schicht für die Verschiebung des Konzentrationsgleichgewichts im oberflächennahen Grundwasser wird die unterste durchlässige Schicht der Oberkreide, die Oberen Alleringerslebener Schichten betrachtet. Deren k_f -Wert beträgt ca. $3 \cdot 10^{-6}$ m/s, die Gesamtporosität 30 %. Die hydrogeologischen Modellrechnungen ergeben in dieser Schicht einen hydraulischen Gradienten von ungefähr 0,003 m/m, eine Filtergeschwindigkeit des Grundwassers von rund 0,3 m/a und eine Abstandsgeschwindigkeit von 1 m/a. Es wird angenommen, dass die aus dem Transportpfad durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Oberkreide und Quartär) austre-



tende Lösung in den Oberen Alleringerslebener Schichten 100 m zurücklegt, bevor sie verdünnt in die Biosphäre übertritt. Unter Berücksichtigung der Gesamtporosität beträgt damit die Aufenthaltsdauer eines nichtsorbiierenden Radionuklids in den Oberen Alleringerslebener Schichten wenigstens rund 100 Jahre und jene eines sorbierenden Radionuklids

$$T_{B,k} = \frac{L_{AQU} \cdot \varepsilon_{AQU,tot}}{K_{f,AQU} \cdot i_{AQU}} \cdot R_{B,k} \quad (A-166)$$

mit

L_{AQU} Länge der Transportstrecke in den Oberen Alleringerslebener Schichten; [m]

$\varepsilon_{AQU,tot}$ Diffusionszugängliche Porosität in den Oberen Alleringerslebener Schichten; [-]

$K_{f,AQU}$ Durchlässigkeitsbeiwert für die Oberen Alleringerslebener Schichten; [m/s]

i_{AQU} Hydraulischer Gradient in den Oberen Alleringerslebener Schichten; [m/m]

sowie $R_{B,k}$ als Retentionsfaktor des Radionuklids k in den Oberen Alleringerslebener Schichten:

$$R_{B,k} = 1 + \frac{1 - \varepsilon_{AQU,tot}}{\varepsilon_{AQU,tot}} \cdot \rho_{AQU} \cdot K_{d,AQU,k} \quad (A-167)$$

mit

ρ_{AQU} Feststoffdichte der Oberen Alleringerslebener Schichten; [kg/m³]

$K_{d,AQU,k}$ K_d -Wert des Radionuklids k in den Oberen Alleringerslebener Schichten; [m³/kg]

Falls die Halbwertszeit des Radionuklids k, $T_{1/2,k}$, kurz ist gegenüber dieser Aufenthaltszeit, dann zerfällt das Radionuklid k weitgehend in den Oberen Alleringerslebener Schichten, und seine Konzentration in der Biosphäre ergibt sich aus dem radioaktiven Zerfall seines Vorläufernuklids (k-1). Näherungsweise ist ein solches Radionuklid beim Eintritt in die Biosphäre im säkularen Zerfallsgleichgewicht mit dem Vorläufernuklid (k-1) bezogen auf die Sorptionsverhältnisse in den Oberen Alleringerslebener Schichten. Es wird daher in den Modellrechnungen nicht explizit modelliert, sondern nur implizit über seinen Dosisbeitrag zum Vorläufernuklid berücksichtigt.

Falls die Halbwertszeit des Radionuklids k jedoch nicht kurz ist gegenüber seiner Aufenthaltszeit in den Oberen Alleringerslebener Schichten, dann liegt die gelöste Konzentration zwischen jener ausgangs Transportpfad durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Oberkreide und Quartär) und jener des säkularen Zerfallsgleichgewichts entsprechend der Sorption in den Oberen Alleringerslebener Schichten.

Diese Überlegungen erlauben eine rekursive Abschätzung der Konzentrationsverhältnisse beim Eintritt in die Biosphäre.

Die Konzentration des Radionuklids k-1 in Lösung beim Eintritt in die Biosphäre, $C_{B,k-1}$, sei bereits rekursiv ermittelt. Dann ergibt eine Maximalwertbetrachtung als ungünstige Schätzung für die Konzentration des Folgenuklids k:



$$\begin{aligned} \text{Falls } T_{1/2,k} < \frac{1}{10} \cdot T_{B,k} &\Rightarrow C_{B,k} = \frac{R_{B,k-1}}{R_{B,k}} \cdot C_{B,k-1} \\ \text{sonst} &C_{B,k} = \max\left(\frac{R_{B,k-1}}{R_{B,k}} \cdot C_{B,k-1}, C'_{D,k}\right) \end{aligned} \quad (\text{A-168})$$

Mit den Gleichungen (A-164) und (A-165) entspricht dies:

$$\begin{aligned} \text{Falls } T_{1/2,k} < \frac{1}{10} \cdot T_{B,k} &\Rightarrow C_{B,k} = \frac{R_{B,k-1}}{R_{B,k}} \cdot C_{B,k-1} \\ \text{sonst} &C_{B,k} = \max\left(\frac{R_{B,k-1}}{R_{B,k}} \cdot C_{B,k-1}, \frac{R_{D,0}}{R_{D,k}} \cdot C_{B,0}\right) \end{aligned} \quad (\text{A-169})$$

und für die Konzentrationsverhältnisse

$\chi_k = C_{B,k}/C_{B,0}$ Konzentrationsverhältnis des Radionuklids k zum Mutternuklid 0 in Lösung beim Eintritt in die Biosphäre; [-]

$$\begin{aligned} \text{Falls } T_{1/2,k} < \frac{1}{10} \cdot T_{B,k} &\Rightarrow \chi_k = \frac{R_{B,k-1}}{R_{B,k}} \cdot \chi_{k-1} \\ \text{sonst} &\chi_k = \max\left(\frac{R_{B,k-1}}{R_{B,k}} \cdot \chi_{k-1}, \frac{R_{D,0}}{R_{D,k}}\right) \end{aligned} \quad (\text{A-170})$$

mit $\chi_0 = 1$

Mit Hilfe der rekursiv berechneten Konzentrationsverhältnisse χ_k der Radionuklide der betrachteten Zerfallsreihe beim Eintritt in die Biosphäre ist der angepasste Dosiskonversionsfaktor DF'_i für das betrachtete Mutternuklid wie folgt zu berechnen:

$$DF'_i = DF_i + \sum_{k=1}^{\infty} \chi_k \cdot DF_k \quad (\text{A-171})$$

Für einzelne Radionuklide von Zerfallsreihen ergibt dieses Vorgehen eine doppelte Berücksichtigung des Beitrages, einerseits durch die explizite Berechnung seiner Freisetzung in die Biosphäre und andererseits durch den Zuschlag zum Dosiskonversionsfaktor eines längerlebigen Vorläufer-nuklids. Dies ist eine konservative Näherung.

A.12 Parameter

A_1	hydraulisch wirksame Querschnittsfläche des Abdichtsystems; [m^2]
A_2	Transportquerschnittsfläche für ausgepresste Lösung; [m^2]
$C_{v,in}(t)$	Konzentration beim Zutritt aus dem Abdichtsystem in den Mischungsbereich; [Bq/m^3]
$C_{v,out}(t)$	Konzentration beim Austritt aus dem Mischungsbereich; [Bq/m^3]
C_L	Konzentration des betrachteten Radionuklids im Porenwasser im Einlagerungsbereich zur Zeit T_1 ; [Bq/m^3]
C_L'	Konzentration des betrachteten Radionuklids im Porenwasser im Einlagerungsbereich zur Zeit T_1 ; [mol/l]
C'_{norad}	Konzentration der entsprechenden nicht radioaktiven Isotope im Porenwasser zur Zeit T_1 ; [mol/l]
C'_{sol}	Löslichkeitsgrenze; [mol/l]
$C_{D,i}(t)$	Konzentration des Radionuklids i im Hutgestein; [Bq/m^3]
$C_{B,i}(t)$	Konzentration des Radionuklids i im oberflächennahen Grundwasser; [Bq/m^3]
C_E	Gleichgewichtskonzentration für Magnesium in der Porenlösung von Magnesiabeton bei NaCl-Sättigung und Anwesenheit von 3-1-8-Sorelphase und Brucit in Relation zu IP21-Lösung; [-]
C_{GG}	Konvergenzrate der übrigen Grube; [a^{-1}]
C_M	Mg-Sättigung der zutretenden Lösung in Relation zu IP21-Lösung; [-]
C_{VG}	Konvergenzrate des feldspezifischen Mischungsbereichs; [a^{-1}]
C_{EB}	Konvergenzrate des unverfüllten Volumens im Einlagerungsbereich; [a^{-1}]
D	Dosis; [$Sv \cdot a^{-1}$]
DF_i'	angepasster Dosiskonversionsfaktor für das Radionuklid i ; [$Sv \cdot a^{-1}/Bq \cdot l^{-1}$]
DF_i	Dosiskonversionsfaktor des Radionuklids i ; [$Sv \cdot a^{-1}/Bq \cdot l^{-1}$]
F_{NaCl}	Volumenvergrößerungsfaktor für die Aufsättigung von Süßwasser an NaCl-Salz; [-]
F_{IP21}	Volumenvergrößerungsfaktor bei Umlösung von NaCl-Lösung zu IP21-Lösung; [-]
$F_{verd}(t)$	Verdünnung der aufsteigenden Lösung im Grundwasser; [-]
f_g	Produkt aus dem gasgefüllten Anteil der Querschnittsfläche des Abdichtsystems und der relativen Permeabilität für Gas in diesem Querschnittsflächenanteil; [-]
f_L	Verhältnis zwischen der Konzentration im Porenwasser des Einlagerungsbereichs und dem Inventar im Abfall; [m^{-3}]
$f_5(t)$	nuklidabhängiger Transferfaktor des Mischungsbereichs; [-]
$f_{D,ij}(t)$	nuklidabhängiger Transferfaktor zwischen dem Einlagerungsbereich und dem Hutgestein; [-]
H	Höhe eines Bereiches; [m]
H_i	Henry-Konstante der Komponente i (hier CH_4); [$mol/Pa \cdot m^3$]
HWZ_i	Halbwertszeit des Radionuklids i ; [s]
H_{Abf}	Stapelhöhe des Abfalls im Einlagerungsgrubenbau; [m]
$H_{EH,v1}$	Höhe des kompaktierbaren Versatzes des Einlagerungsgrubenbaus; [m]
$I(t)$	Radionuklidinventar im Einlagerungsbereich; [Bq]
I_i	Inventar des Radionuklids i ; [Bq]
I_k	Inventar der direkten Mutternuklide von i (im Fall von verzweigten Ketten kann ein Radionuklid mehrere direkte Vorläufer haben); [Bq]
$I_{i,j}(t)$	feldspezifisches und radionuklidabhängiges Inventar; [Bq]
i_{AQU}	Hydraulischer Gradient in den Oberen Alleringerslebener Schichten; [m/m]
i_{rel}	mobilisierter Anteil des Inventars; [-]
$K_{1,M}$	Permeabilität von Magnesiabeton vor Korrosion; [m^2]
$K_{1,S}$	Permeabilität von Salzbeton vor Korrosion; [m^2]
$K_{3/1,M}$	Permeabilitätserhöhung von Magnesiabeton bei vollständiger Korrosion; [m^2]
$K_{3/1,M}$	Permeabilitätserhöhung von Salzbeton bei vollständiger Korrosion; [m^2]
K_3'	Permeabilität des Abdichtsystems während der Auspressphase; [m^2]
K_d	K_d -Wert; [m^3/kg]



$K_{d,A}$	K_d -Wert des betrachteten Radionuklids an dem Feststoff der Abdichtung; [m^3/kg]
$K_{d,j}$	K_d -Wert an Festphase j ; [m^3/kg]
$K_{d,ZEM}$	K_d -Wert von Salzbeton; [m^3/kg]
$K_{f,AQU}$	Durchlässigkeitsbeiwert für die Oberen Alleringerslebener Schichten; [m/s]
L_1	Länge des Abdichtsystems (mit Permeabilität K_1); [m]
L_2	Transportdistanz vom Salzspiegel zur Biosphäre; [m]
L_{AQU}	Länge der Transportstrecke durch die Oberen Alleringerslebener Schichten; [m]
M_j	Masse der sorbierenden Festphase j in den Einlagerungsgrubenbauen; [kg]
M_{VG}	sorptionswirksame Zementsteinmasse im Mischungsbereich; [kg]
m	charakteristischer Exponent für die Konvergenz des kompaktierbaren Versatzes; abgeleitet aus dem Stoffgesetz für das sekundäre Kriechen von Steinsalz; [-]
N_L	Loschmidt-Zahl bzw. Avogadro-Konstante: $6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
n_i	Menge der Komponente i ; [mol]
$n_{i,i}$	Menge der Komponente i in Lösung; [mol]
$n_{g,i}$	Menge der Komponente i in der Gasphase; [mol]
$n_{por,M}$	Anzahl Porenwasserzyklen für die vollständige Korrosion von Magnesiabeton; [-]
$n_{por,S}$	Anzahl Porenwasserzyklen für die vollständige Korrosion von Salzbeton; [-]
p_i	Partialdruck der Komponente i (hier $^{14}CH_4$) in der Gasphase; [Pa]
p_0	Standarddruck = 0,1 MPa;
$p_{EB}(t)$	Absolutdruck (Lösung) im Einlagerungsbereich; [MPa]
$p_{w,Z}$	hydrostatischer Absolutdruck (Lösung) am Ende des Abdichtsystems; [MPa]
p_{frac}	eine Rissbildung auslösender Druck im Bereich; [MPa]
p_{GG}	hydraulischer Absolutdruck (Lösung) in der übrigen Grube, als konstant angenommen; [MPa]
p_{litho}	lithostatischer Druck; [MPa]
$p_{litho,GG}$	mittlerer lithostatischer Druck für die übrige Grube; [MPa]
$p_{litho,VG}$	lithostatischer Druck für den Mischungsbereich; [MPa]
p_{VG}	hydraulischer Absolutdruck (Lösung) im Mischungsbereich; [MPa]
$p_{W,n}$	hydrostatischer Druck (Lösung) in der übrigen Grube am Ende des Abdichtsystems (=Druck auf 2. Sohle für Salzbeton-Abdichtung des ELB OF, Druck auf 4. Sohle für Abdichtung aus Magnesiabeton, Druck auf Referenzteufe für alle Abdichtsysteme)
\bar{Q}	Maximum der gemittelten Auspressrate durch das Hutgestein ab dem Zeitpunkt, zu dem Uran (^{238}U) erstmals aus den Mischungsbereichen aus- und in das Hutgestein eintritt; [m^3/s]
$Q_1(t)$	Rate des Lösungszutritts (Zutrittsrate); [m^3/a]
$Q_{1,S}(t)$	Rate des Lösungszutritts (Zutrittsrate) durch die Abdichtung aus Salzbeton; [m^3/a]
$Q_{1,M}(t)$	Rate des Lösungszutritts (Zutrittsrate) durch die Abdichtung aus Magnesiabeton; [m^3/a]
$Q_{g,in}(t)$	Gasbildungsrate; [m^3_{STP}/s]
$Q_{g,1e2,tot}$	Gasbildungsrate zur repräsentativ frühen Zeit $t = 100$ Jahre bei einer Teilnahme des gesamten Stoffinventars am Gasbildungsprozess; [m^3_{STP}/a]
$Q_{g,1e4,tot}$	Gasbildungsrate zur repräsentativ späten Zeit $t = 10'000$ Jahre bei einer Teilnahme des gesamten Stoffinventars am Gasbildungsprozess; [m^3_{STP}/a]
$Q_{g,1e2,e}$	Gasbildungsrate zur repräsentativ frühen Zeit $t = 100$ Jahre; [m^3_{STP}/a]
$Q_{g,1e4,e}$	Gasbildungsrate zur repräsentativ späten Zeit $t = 10'000$ Jahre; [m^3_{STP}/a]
$Q_{w,out}(t)$	Austrittsrate der Lösung aus dem Einlagerungsbereich; [m^3/s]
$Q_{g,STP,out}(t)$	Rate des aus dem Einlagerungsbereich austretenden Gasvolumens; [m^3_{STP}/s]
Q_V	Rate des Lösungsaustritts aus dem Mischungsbereichs; [m^3/s]
Q_{VG}	Rate des Lösungsaustritts, der aus der Konvergenz des Mischungsbereichs resultiert; [m^3/s]
Q_{GG}	Rate des Lösungsaustritts, der aus der Konvergenz der übrigen Grube resultiert; [m^3/s]
$Q_D(t)$	Gesamter Lösungsfluss durch das Deckgebirge; [m^3/s]
Q_{GW}	Grundwasserfluss, der für die Verdünnung zur Verfügung steht; [m^3/s]
R	Gaskonstante = 8,314 J/(mol·K)



$R_{D,i}$	Retentionsfaktor entlang des Transportpfads durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Oberkreide und Quartär); [-]
R_T	Retentionsfaktor des betrachteten Radionuklids in der Abdichtung; [-]
R_{VG}	Retentionsfaktor des Mischungsbereichs; [-]
$S_{EB}(t)$	relativer Lösungsfüllgrad im Einlagerungsbereich; [-]
T_1	Dauer von Phase 1 (Zutrittsphase); spezifisch für einen Einlagerungsbereich; [s]
T_2	Dauer von Phase 2 (Mobilisierung); instantan; [s]
T_3	Dauer von Phase 3 (Auspressung aus dem Einlagerungsbereich), Freisetzung in das Abdichtsystem; spezifisch für einen Einlagerungsbereich; [s]
T_5	Dauer der Auspressung aus dem Mischungsbereich ausschließlich durch Konvergenz und Zutritt von Lösung aus der übrigen Grube (d.h. nach dem Ende von Phase 3); spezifisch für einen Einlagerungsbereich; [s]
T_7	Dauer von Phase 7 (Verdünnung im oberflächennahen Grundwasser); instantan; [s]
T_g	Dauer der Gasbildung; [s]
$T_{TD,i}(t)$	Transportverzögerung im Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär), spezifisch für ein Radionuklid i ; abhängig vom Zeitpunkt der Transporte; entspricht der (radionuklidspezifischen, zeitabhängigen) Dauer der Phase 6 (T_6); [s]
T_{TG}	Transportverzögerung im Abdichtsystem; spezifisch für einen Einlagerungsbereich und ein Radionuklid; entspricht der (radionuklidspezifischen) Dauer der Phase 4 (T_4); [s]
t_{Lmax}	Zeitpunkt des maximalen Lösungsfüllstands im Zeitintervall $[T_1, T_1+T_3]$; [s]
$t_{A,i}$	Zeitpunkt, zu dem ein spezifisches Radionuklid i erstmals aus den Mischungsbereichen aus- und in das Hutgestein eintritt; dies ist identisch mit dem Zeitpunkt, zu dem erstmals ein Radionuklid i in den Mischungsbereich eintritt; [s]
$t_{E,i}$	Zeitpunkt, zu dem der Austritt aus allen Mischungsbereichen endet; [s]
t'	Zeitpunkt des Eintritts des Flüssigkeitspakets in den Transportpfad durch Hutgestein und Deckgebirge, das zur Zeit t aus diesem in die Biosphäre freigesetzt wird; [s]
Δt_{frac}	Zeitdauer des Druckabbaus nach Frac-Bildung; [a]
t_M	Zeit, über welche die Auspressrate in das Hutgestein vor der Bestimmung des Maximums gemittelt wird; [a]
t_{voll}	Zeitpunkt der vollständigen Füllung der übrigen Grube mit Lösung; [a]
$V_{EB}(t)$	Hohlraum- und Porenvolumen im Einlagerungsbereich; [m^3]
$V_{EB,L,0}$	Flüssigkeitsmenge zu Beginn im Einlagerungsbereich; [m^3]
$V_{EB,u,0}$	im Einlagerungsbereich vorhandenes unversetztes Hohlraumvolumen zum Zeitpunkt $t=0$; [m^3]
$V_{EB,u}(t)$	im Einlagerungsbereich vorhandenes unversetztes Hohlraumvolumen als Funktion der Zeit; [m^3]
$V_{EB,v1}(t)$	mit kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen des Einlagerungsbereichs als Funktion der Zeit; [m^3]
$V_{EB,v2,0}$	mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen des Einlagerungsbereichs zum Zeitpunkt $t=0$; [m^3]
V_{EH}	Volumen der Einlagerungsgrubenbaue vor Konvergenz; [m^3]
$V_{EB,L}(t)$	Flüssigkeitsmenge im Einlagerungsbereich; [m^3]
$V_{EB,L,0}$	Anfangsflüssigkeitsvolumen; [m^3]
V_g	Volumen der Gasphase im Einlagerungsbereich; [m^3]
$V_{g,STP,e}$	gesamte bis Ende der Gasbildung gebildete Nettogasmenge im Einlagerungsbereich, angegeben als Volumen STP; [m^3_{STP}]
$V_{g,STP}(t)$	Anfangsgasmenge und bis zum Zeitpunkt t gebildete kumulierte Nettogasmenge im Einlagerungsbereich, angegeben als Volumen STP; [m^3_{STP}]
$V_{g,STP,m}(t)$	aus numerischen Gründen geringfügig erhöhte Gasmenge im Einlagerungsbereich; [m^3_{STP}]
$V_{g,STP,tot}$	kumulierte Gasmenge nach langer Zeit (1 Mio. Jahre) bei einer Teilnahme des gesamten Stoffinventars am Gasbildungsprozess, angegeben als Volumen STP; [m^3_{STP}]
$V_{GG,0}$	Volumen der übrigen Grube vor Auf- und Umlöseprozessen und Konvergenz; [m^3]
V_l	Volumen der Lösung im Einlagerungsbereich; [m^3]



V_{REB}	Volumen des Einlagerungsbereichs vor Konvergenz, abzüglich des Volumens der Einlagerungsgrubenbaue (restliche Grubenbaue); [m ³]
$V_{\text{VG},0}$	Volumen des Mischungsbereichs vor Konvergenz; [m ³]
$V_{\text{VG}}(t)$	Volumen des Mischungsbereichs zum Zeitpunkt t; [m ³]
$V_{\text{VG},D} \approx 0.01 \cdot V_{\text{VG},0}$	nicht konvergierendes Volumen des Mischungsbereichs; [m ³]
$V_{w,i,in}(t)$	Volumen der Lösung, die durch die Abdichtung (i = S: Salzbeton, i = M: Magnesiabeton) zugetreten ist; [m ³]
β	relative Abfallstapelhöhe, bezogen auf die Höhe des kompaktierbaren Versatzes in den Einlagerungsgrubenbauen; [-]
γ	Reduktionsfaktor für die Konvergenzrate des Porenvolumens des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes; [-]
δ_T	Gasvolumenumrechnung auf die Referenztemperatur im Grubengebäude; [-]
$\varepsilon_{\text{EB},v1,0}$	Porosität des kompaktierbaren Versatzes im Einlagerungsbereich vor Einsetzen der Wirkung der Konvergenz (Zeit t=0); [-]
$\varepsilon_{\text{EB},v1}(t)$	wirksame Porosität des kompaktierbaren Versatzes im Einlagerungsbereich als Funktion der Zeit; [-]
$\varepsilon_{\text{EB},v2,0}$	Porosität des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes vor Einsetzen der Wirkung der Konvergenz (Zeitpunkt t=0); [-]
$\varepsilon_{\text{GG},v1,0}$	Porosität des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens der übrigen Grube vor Einsetzen der Konvergenz und vor Auf- und Umlöseprozessen; [-]
$\varepsilon_{\text{GG},v2,0}$	wirksame Porosität des mit nicht kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens der übrigen Grube; [-]
ε_1	Transportporosität des Abdichtsystems; [-]
ε_2	Fließporosität im Hutgestein; [-]
$\varepsilon_{\text{AQU,tot}}$	Diffusionszugängliche Porosität in den Oberen Alleringerslebener Schichten; [-]
ε_D	Diffusionszugängliche Porosität im Hutgestein; [-]
$\varepsilon_{\text{M,tot}}$	Gesamtporosität von Magnesiabeton nach vollständiger Korrosion; [-]
ε_r	charakteristische Porosität des kompaktierbaren Versatzes, ab der eine Stützwirkung durch die Feststoffphase hervorgerufen wird; [-]
$\varepsilon_{\text{S,tot}}$	Gesamtporosität von Salzbeton; [-]
ζ_{GGt}	Anteil des verfüllten Volumens der übrigen Grube, bezogen auf das gesamte Volumen der übrigen Grube (vor Auf- und Umlöseprozessen); [-]
ζ_{GGk}	Anteil des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens, bezogen auf das verfüllte Volumen der übrigen Grube (vor den Auf- und Umlöseprozessen); [-]
ζ_{VGt}	Anteil des verfüllten Volumens des Mischungsbereichs bezogen auf das gesamte Volumen des Mischungsbereichs; [-]
ζ_{VGk}	Anteil des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens bezogen auf das verfüllte Volumen des Mischungsbereichs; [-]
ζ_{EHt}	Anteil des verfüllten Volumens der Einlagerungsgrubenbaue bezogen auf das gesamte Volumen der Einlagerungsgrubenbaue; [-]
ζ_{REBt}	Anteil des verfüllten Volumens der restlichen Grubenbaue des Einlagerungsbereichs bezogen auf das gesamte Volumen der restlichen Grubenbaue des Einlagerungsbereichs; [-]
ζ_{EHk}	Anteil des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens bezogen auf das verfüllte Volumen der Einlagerungsgrubenbaue; [-]
ζ_{REBk}	Anteil des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens bezogen auf das gesamte Volumen der restlichen Grubenbaue des Einlagerungsbereichs; [-]
η	Anteil des Inventars der gasbildenden Stoffe, der am Gasbildungsprozess teilnimmt; [-]
η_{Lim}	Quotient der kumulierten Gasmenge, die sich bis zum Verbrauch der Anfangsflüssigkeit im Einlagerungsbereich bilden kann, und der kumulierten Gasmenge nach langer Zeit ohne Begrenzung durch verfügbare Flüssigkeit; [-]



κ_L	volumetrische Umlösekapazität von IP21-Lösung an Salzbeton, bezogen auf das Gesamtvolumen („bulk volume“) des Betons; [$\text{m}^3 \text{ <Feststoff> / m}^3 \text{ <Lösung>}$]
κ_M	volumetrische Umlösekapazität von IP21-Lösung an Magnesiabeton, bezogen auf das Feststoffvolumen; [$\text{m}^3 \text{ <Feststoff> / m}^3 \text{ <Lösung>}$]
λ_i	Zerfallskonstante des Radionuklids i ; [$1/\text{s}$]
μ_g	Viskosität der Gasphase; [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, Pa·s]
μ_w	Viskosität der flüssigen Phase; [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, Pa·s]
ρ_A	Masse des sorbierenden Feststoffs in der Abdichtung pro Volumeneinheit; [kg/m^3]
ρ_{DGL}	Feststoffdichte des transportrelevanten Materials im Hutgestein; [kg/m^3]
φ_A	Verhältnis von Flüssigkeitsvolumen im kompaktierbaren Versatz des Einlagerungsbereichs zum Porenvolumen des kompaktierbaren Versatzes zum Zeitpunkt $t=0$ im betrachteten Einlagerungsbereich; [-]
φ_N	Verhältnis von verfügbarem Flüssigkeitsvolumen im nicht oder gering kompaktierbaren Versatz zum wirksamen Porenvolumen des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes zum Zeitpunkt $t=0$ im betrachteten Einlagerungsbereich; [-]
$\varphi_{GG,A}$	Anfangssättigung des mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumens der übrigen Grube; [-]
$\varphi_{GG,N}$	Verhältnis von verfügbarem Flüssigkeitsvolumen im nicht oder gering kompaktierbaren Versatz zum wirksamen Porenvolumen des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes zum Zeitpunkt $t=0$ in der übrigen Grube; [-]
θ_{Rest}	Schwellenwert für das Verhältnis aus neu zugetretener Lösungsmenge und Anfangsflüssigkeit im Einlagerungsbereich, bei dem eine evtl. unterbrochene Gasbildung nach Ende der Prologphase wieder einsetzt; [-]
$\Theta(x)$	Heaviside-Funktion: $\Theta(x>0) = 1$, $\Theta(x\leq 0) = 0$

Anhang B Kurzbeschreibung des Rechenprogramms

Das Rechenprogramm PROSA wurde mit der Programmiersprache Matlab 6.5.1 [The MathWorks 2003] erstellt und läuft in dieser Softwareumgebung sowohl auf PC als auch unter UNIX.

Im deterministischen Rechenmodus setzt PROSA die in Anhang A beschriebenen Algorithmen zur Berechnung der Strahlenexposition für vorgegebene Parameterwerte um und ermöglicht die Darstellung der Ergebnisse.

Im probabilistischen Rechenmodus wählt PROSA wiederholt probabilistisch die Parameterwerte (probabilistische Festlegung des Rechenfalls), führt die zugehörigen deterministischen Berechnungen gemäß Anhang A aus und speichert die Parameterwerte und die für die spätere Auswertung erforderlichen Ergebnisse ab. Die statistische Auswertung der abgespeicherten Rechenergebnisse erfolgt nicht durch PROSA.

Die in Anhang A beschriebenen Rechenalgorithmen erfordern die numerische Integration eines Systems von gekoppelten gewöhnlichen Differentialgleichungen sowie die numerische Integration von analytisch oder numerisch ermittelten Funktionen. Dies erfolgt in PROSA auf einem Zeitraster, das zu Beginn des Rechenlaufs definiert wird. Gegebenenfalls wird während des Programmablaufs noch weiter verfeinert, um zu einer stabilen Lösung zu kommen.

Bei den probabilistischen Simulationen treten Datensätze mit einer großen Bandbreite von Parameterkombinationen auf. Dadurch können sich die Charakteristika der numerisch zu lösenden Probleme stark verändern, weshalb eine besonders hohe Stabilität und Flexibilität des Lösungsverfahrens erforderlich ist.

B.1 Benutzung des Programms

Die Benutzerführung erfolgt über eine graphische Oberfläche (GUI). Neben den vorhandenen Standardoptionen ist die Schaltfläche „Rechenmodus“ von besonderer Bedeutung: über sie wird der Rechnungstyp bestimmt und die Rechnung gestartet. Die Schaltfläche enthält die folgenden Optionen:

- Deterministisch: (Zeitverlauf oder Parametervariation) – Rechnung mit festgelegten Parameterwerten
- Probabilistisch: Rechnungen mit probabilistisch ermittelten Parameterwerten
- Rearrange memory: Freigeben von nicht mehr benutztem Hauptspeicher



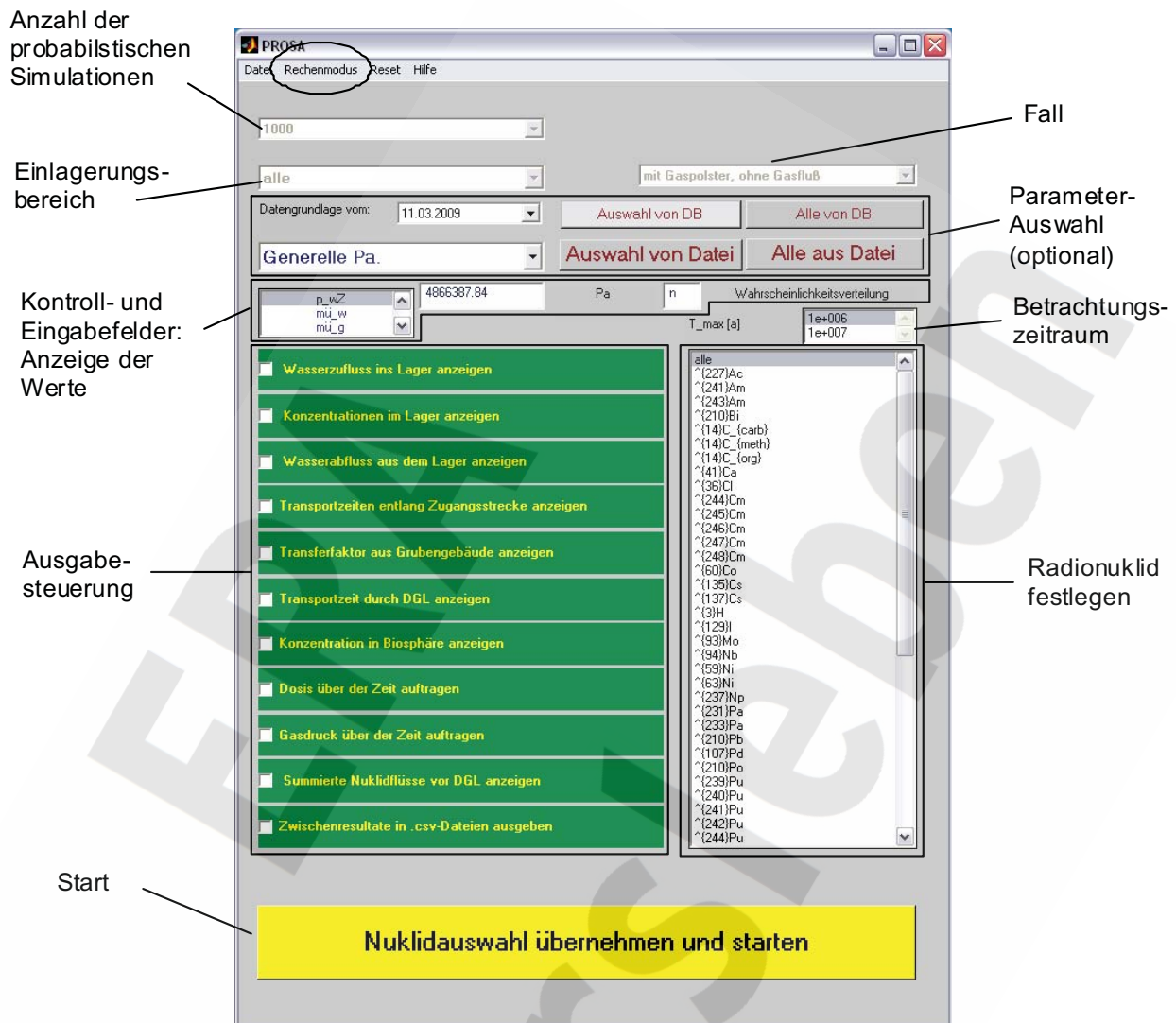


Abbildung B-1: Beispiel für die graphische Benutzeroberfläche (GUI)

Die weitere Programmsteuerung erfolgt im Wesentlichen identisch für beide (deterministische und probabilistische) Rechenarten. Dabei wird in der GUI von links oben nach rechts unten vorgegangen. Rote Schaltfelder ermöglichen alternative Parametereingaben, grüne bezeichnen optionale Angaben und dunkelblaue Felder enthalten editierbare Größen.

Bei der probabilistischen Rechnung ist zunächst die Anzahl der Realisierungen festzulegen. Je nach Wahl des Rechenmodus erfolgt die weitere Benutzerführung. Weiter sind die zu berechnenden Felder und der Fall bezüglich der Auswirkung der Gasbildung (s.u.) auszuwählen. Die möglichen Optionen sind selbsterklärend. Im Bereich „Parameterauswahl“ kann durch Anklicken der ersten Schaltfläche zwischen den verschiedenen Parametergruppen gewechselt werden. Die einzelnen Parameter erscheinen dabei mit Wert und Typ der Verteilungsfunktion im Anzeigebereich. Zwischen den Parametern kann mit dem Parameterschaltfeld gewechselt werden. Während der

Betrachtungszeitraum in PROSA generell 10^6 Jahre beträgt, kann es für einzelne Rechenfälle – insbesondere im Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ (s.u) – von Vorteil sein, die zeitliche Entwicklung der Dosiswerte in der Biosphäre auch zu späteren Zeiten zu kennen. Aus diesem Grund kann die Dauer des Betrachtungszeitraums optional auf 10^7 Jahre verlängert werden. Mittels der unteren Schaltfelder werden die graphische Wiedergabe sowie die Speicherung⁵⁴ von Zwischenergebnissen während der Rechnung gesteuert. Eine Rechnung für sämtliche oder ein spezifisches Radionuklid ist möglich, wobei auch eine Einzelnuklidrechnung noch den Zuwachs aus den im Inventar vorhandenen, zugehörigen Vorläufernukliden beinhaltet.

Die Rechnung wird schließlich mittels des Feldes „Nuklidauswahl übernehmen und starten“ begonnen.

B.2 Auswahl des Falls bezüglich der Auswirkung der Gasbildung

Ein grundsätzlicher Unterschied in den betrachteten Vorgängen entsteht durch die unterstellte Auswirkung der Gasbildung im Einlagerungsbereich. Das Verhalten des Gases wird mittels Auswahl eines der Fälle mit oder ohne Gaspolster festgelegt. Für den Fall mit Gaspolster ist noch zu unterscheiden, ob das Gas im Einlagerungsbereich verbleibt oder während der Auspressphase austritt. Entsprechend werden drei Fälle, „ohne Gaspolster“, „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ und „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ unterschieden.

B.3 Programmablauf

Nach Starten des GUI wird zunächst die Datenbank eingelesen: Die jeweils aktuellen Parameter werden mit Referenzwert, Bandbreite und Verteilung übernommen. Nach der Festlegung des Rechenfalls werden die nötigen Initialisierungen im Programm durchgeführt. Dann folgt die eigentliche Rechnung, die in 9 Programmphasen unterteilt ist. In der Phase 0 („Prologphase“), in welcher die Restgrube noch nicht vollgelaufen ist, werden die Prozesse, die während des Volllaufens stattfinden, berechnet. Die Phasen 0 bis 5 werden jeweils für die einzelnen Einlagerungsbereiche berechnet, die Ergebnisse dann zusammengefasst und Phase 6 bis Phase 8 berechnet.

Phase 0: Prozesse während des Volllaufens der übrigen Grube

In der Phase 0 werden die Prozesse berechnet, die sich abspielen, während die übrige Grube durch Wasser aus Hutgestein und Deckgebirge vollläuft: Hohlraumkonvergenz, radioaktiver Zerfall, Auf- und Umlöseprozesse am Ende des Volllaufens und in den Fällen „mit Gaspolster“ Gasbildung und ggf. Entweichen von Gas aus den Einlagerungsbereichen durch die Abdichtungen. Vereinfachend wird für die gesamte Prologphase ein konstanter, mittlerer Fluiddruck in der übrigen Grube

⁵⁴ Standardmäßig werden bei deterministischen Berechnungen eine Reihe von Zwischenergebnissen aus den einzelnen Programmphasen von PROSA als Textdateien (mit Trennzeichen in .csv-Dateien) gespeichert, bei probabilistischen Rechnungen erfolgt dagegen keine solche Speicherung von Zwischenergebnissen. Je nach Bedarf kann die Option zur Speicherung von Zwischenergebnissen deaktiviert bzw. aktiviert werden. Grundsätzlich ist der Zeitbedarf für eine Rechnung ohne Speicherung von Zwischenergebnissen kleiner als für eine Rechnung mit Zwischenspeicherung.



angenommen, der zwischen Atmosphärendruck und dem vollen hydrostatischen Druck nach Druckausgleich zwischen Hutgestein und Grubengebäude liegt. Lösungszutritt in die Einlagerungsbereiche findet in dieser Phase noch nicht statt. Die Gasbildung kann daher nur solange anhalten, bis das anfängliche Lösungsvolumen eines Einlagerungsbereiches durch den Prozess der Gasbildung aufgebraucht ist. In den Einlagerungsbereichen steigt der Druck durch Konvergenz und Gasbildung (in den Fällen „mit Gaspolster“) an. Überschreitet der Druck in den Einlagerungsbereichen durch die Gasbildung den Wert des mittleren Fluiddrucks im Grubengebäude, fließt Gas aus dem Einlagerungsbereich in die Restgrube ab. Grundlage für die Berechnung des Gasflusses ist der entsprechende Ansatz im Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“, der dort während der Auspressphase (Phase 3) verwendet wird.

Phase 1: Lösungszutritt in den Einlagerungsbereich

Berechnet wird der Zutritt von Lösung in den Einlagerungsbereich. Der resultierende Lösungsfüllgrad wird bestimmt. Beim Fall mit Gaspolster geht zu jedem Zeitpunkt das während dieser Phase bisher (durch Gasbildung) kumulierte Gasvolumen in die Berechnungen mit ein. Wurde bei Berücksichtigung der Prologphase die Gasbildung in Phase 0 wegen Flüssigkeitsmangel unterbrochen, dann setzt sie erst wieder ein, wenn eine definierte Lösungsmenge in den Einlagerungsbereich zugeflossen ist. Sollte bereits in Phase 0 die maximale Gasmenge produziert worden sein, findet in Phase 1 keine Gasentwicklung mehr statt. Die Phase endet, wenn der Zufluss in den Einlagerungsbereich dadurch abbricht, dass der Lösungsdruck im Einlagerungsbereich den hydrostatischen Druck des Mischungsbereichs erreicht oder der Einlagerungsbereich ganz gefüllt ist. Dies erfordert eine numerische Nullstellenbestimmung im Fall „ohne Gaspolster“. Im Fall „mit Gaspolster“ wird die Differentialgleichung numerisch gelöst.

Phase 2: Mobilisierung der Radionuklide im Einlagerungsbereich

Die Mobilisierung der Radionuklide wird als instantaner Prozess zwischen der Phase 1 (Lösungszutritt in den Einlagerungsbereich) und der Phase 3 (Lösungsausritt aus dem Einlagerungsbereich) entsprechend der Lösungsfüllhöhe im Einlagerungsbereich ermittelt. Für jedes Radionuklid wird die Konzentration in der Lösung unter Berücksichtigung der Sorption ermittelt und dann überprüft, ob die Löslichkeitsgrenze überschritten wird und es zur Ausfällung kommt. Hierbei werden neben den betrachteten Radionukliden die nicht radioaktiven Isotope des Elements sowie Sorption an BFA und Zementstein berücksichtigt. Die Sorption an diesen Phasen ist identisch 0, die Möglichkeit, Sorption zu berücksichtigen, ist aber grundsätzlich im Programm vorhanden. Die Konzentration im Porenwasser bleibt ab diesem Zeitpunkt – abgesehen vom radioaktiven Zerfall – konstant.

Ein Sonderfall ist ^{14}C , dessen Behandlung sich gemäß Anhang A von allen anderen Radionukliden bzw. Spezies unterscheidet.

Der Rechenschritt zur Ermittlung der Mobilisierung der Radionuklide im Einlagerungsbereich erfolgt im Programm wegen der dazu erforderlichen Ermittlung des maximalen Lösungsfüllstands (vgl. Gl. (A-86) in Anhang A) erst nach der Ausführung der Rechnungen für Phase 3.



Phase 3: Lösungsabfluss aus dem Einlagerungsbereich

Durch Konvergenz des Gesamthohlraumvolumens kommt es zum Auspressen der Lösung. Dieser Vorgang wird verfolgt, bis sämtliche Lösung aus dem Einlagerungsbereich ausgepresst wurde oder die Auspressrate auf einen sehr niedrigen Wert abgesunken ist (vgl. Gl. (A-115) bzw. (A-127) in Anhang A). Die zugrunde liegende Differentialgleichung wird dabei numerisch gelöst. Für den Fall mit Gaspolster müssen zwei potentielle Entwicklungen unterschieden werden: ein Fall, bei dem das Gas im Einlagerungsbereich verbleibt und der sich aufbauende Gasdruck lediglich zum Auspressen der Lösung beiträgt, sowie der Fall, dass das Gas zusätzlich – ganz oder teilweise – ebenfalls austritt. In beiden Fällen gehen der Flüssigkeitsdruck in dem Einlagerungsbereich sowie die Permeabilität des Abdichtsystems – die im allgemeinen nicht mit der Permeabilität des Abdichtsystems während des Zuflusses, Phase 1, identisch ist – über eine Beziehung vom Darcy-Typ in die Betrachtungen ein. Das Programm berücksichtigt eine eventuelle Frac-Bildung im Salzgestein, indem innerhalb eines einzigen Zeitschritts soviel radionuklidhaltige Lösung in den Mischungsbereich ausgepresst wird, bis Druckausgleich hergestellt ist.

Phase 4: Radionuklidtransport entlang des Abdichtsystems

Ab dem Beginn der Auspressphase fließt Lösung durch das Abdichtsystem in den Mischungsbereich. Zu Beginn treten dabei keine Radionuklide aus. Erst wenn die kontaminierte Lösung aus dem Einlagerungsbereich die Lösung im Porenraum des Abdichtsystems vollständig verdrängt hat, gelangt kontaminierte Lösung in den Mischungsbereich. Für sorbierende Radionuklide ist die Transportfront zusätzlich um den Retardationsfaktor verzögert⁵⁵. Die Freisetzung von Radionukliden in den Mischungsbereich endet mit dem Ende der Auspressung. Daher kann es vorkommen, dass stärker sorbierende Radionuklide den Mischungsbereich nie erreichen. Das Integral des ausgepressten Volumens über die Zeit wird mittels der Trapezregel gelöst und daraus durch Vergleich mit dem in der Abdichtung zur Verfügung stehenden Volumen und Berücksichtigung der Sorptionswirkung die Zeitdauer bis zum Beginn der Freisetzung der Radionuklide in den Mischungsbereich ermittelt. Im Fall einer Frac-Bildung gelten die geänderten Transportparameter (Porosität; keine Sorption in der Abdichtung) bereits ab Beginn der Auspressphase.

Phase 5: Transfer im Mischungsbereich

Im Mischungsbereich vermischt sich die aus dem Abdichtsystem austretende Lösung mit dem Lösungsvolumen im Mischungsbereich. Dies erfolgt im Modell als „mixing-tank“, d.h. instantan erfolgt eine vollständige Durchmischung im Gesamthohlraumvolumen des Mischungsbereichs. Entsprechend findet zwar Sorption⁵⁵, aber keine Retardierung der Radionuklide im Mischungsbereich statt. Aus anderen Grubenteilen tritt auch weitere Lösung in den Mischungsbereich zu. Dies, die Auspressung aus dem jeweiligen Einlagerungsbereich und die Volumenverringerung des Mischungsbereichs infolge Konvergenz bestimmen die Auspressung von Lösung aus dem Mischungsbereich. Daher setzt sich die Auspressung aus dem Mischungsbereich auch nach dem Ende der Auspres-

⁵⁵ Bei den durchgeführten Rechnungen wurde die Sorption wegen des nicht eindeutig prognostizierbaren chemischen Milieus konservativ vernachlässigt und der Kd-Wert in den Rechnungen mit 0 angesetzt (vgl. Anhang H).



sung aus dem Einlagerungsbereich fort und wird rechnerisch berücksichtigt, bis das Gesamthohlraumvolumen des Mischungsbereichs auf 1% des Wertes am Ende der Lösungsauspressung aus dem Einlagerungsbereich, d.h. am Ende von Phase 3, abgesunken ist.

Diese Phase stellt mit der Lösung der Differentialgleichung besonders hohe numerische Anforderungen.

Phase 6/7: Radionuklidtransport durch Hutgestein und Deckgebirge / Radionuklidkonzentration im oberflächennahen Grundwasser

Die Phasen 6 und 7 werden zusammengefasst berechnet. Die Lösungsausstritte aus den verschiedenen Grubenbereichen vereinigen sich und werden gemeinsam durch Hutgestein und Deckgebirge in das oberflächennahe Grundwasser hochgepresst. Dabei wird die Sorption der Radionuklide als Retardierung berücksichtigt. Das von einem Lösungsvolumenpaket bereits durchflossene Porenvolumen des Transportpfads durch Hutgestein und Deckgebirge wird mit der Trapezregel in Form einer numerischen Integration auf der Grundlage des allgemeinen Zeitrasters ermittelt. Die Beiträge der einzelnen Radionuklide aus den Einlagerungsbereichen zur Radionuklidkonzentration beim Austritt in das oberflächennahe Grundwasser werden unter Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls und Aufbaus aus Vorläufernukliden berechnet. Aufgrund der gewählten Zeitdiskretisierung kann es vorkommen, dass zu dem Zeitpunkt des Auftretens der maximalen Konzentration eines Radionuklids im oberflächennahen Grundwasser mehrere aufeinander folgende Zeitpunkte t_n gehören, zu denen das zugehörige Lösungspaket den Verdünnungsbereich verlassen hat. In diesem Fall wird konservativerweise der größte der n Radionuklidflüsse zur Bestimmung der Konzentration im oberflächennahen Grundwasser verwendet.

Die Lösung aus dem Grubengebäude vermischt sich mit dem oberflächennahen Grundwasser. Der Verdünnungsfaktor wird berechnet aus dem Verhältnis des Grundwasserflusses, mit dem sich die ausgepresste Salzlösung vermischt, und der Austrittsrate aus Hutgestein und Deckgebirge. Da eine Verdünnung um mindestens den Faktor 500 erforderlich ist, damit das Wasser aufgrund seines Salzgehaltes überhaupt trinkbar wird und landwirtschaftlich intensiv genutzt werden kann, wird dies als Mindestverdünnung vorausgesetzt. Die zu einem bestimmten Zeitpunkt in die Biosphäre gelangende Radionuklidkonzentration ergibt sich somit als Produkt der Austrittskonzentration zum betrachteten Zeitpunkt und dem Inversen des Verdünnungsfaktors.

Phase 8: Dosis in der Biosphäre

Aus den Konzentrationen der Radionuklide im oberflächennahen Grundwasser (inkl. ihrer Tochter-nuklide) werden die Dosiswerte mittels Dosisumwandlungsfaktoren berechnet. Dies wird jeweils pro Radionuklid durchgeführt. Die Gesamtdosis in der Biosphäre ergibt sich durch Addition der einzelnen Beiträge.



B.4 Ergebnisausgabe

Während der Berechnung erfolgt eine graphische Ausgabe bzw. Speicherung der Zwischenergebnisse gemäß den zu Beginn gewählten Optionen sowie eine Textausgabe, die über die wichtigsten Resultate und Besonderheiten der laufenden Simulation sowie den Rechenfortschritt informiert. Nach Abschluss der Berechnungen erfolgen die Aufbereitung der Ergebnisse sowie die Datenausgabe.

Im deterministischen Fall gibt ein Ausgabefile (dosis.mat) den zeitlichen Verlauf der Summendosis sowie die Beiträge der einzelnen Radionuklide an, eine Graphik enthält neben dem zeitlichen Dosisverlauf in der Biosphäre auch die wichtigsten Zwischenergebnisse und Parameterwerte.

Im Fall probabilistischer Rechnungen erfolgen ebenfalls eine graphische Anzeige der Zwischenergebnisse sowie eine laufende Darstellung des Histogramms der Dosismaxima und deren Zeitpunkte. Es werden zusätzlich die probabilistischen Datensätze, die wesentlichen Ergebnisse jeder Realisierung und die aktuellen Histogramme gespeichert.

ERFORSCHUNG
Morsleben

Anhang C Modellparameter

Die numerischen Berechnungen zur Langzeitsicherheitsanalyse basieren auf einem Satz von Modellparameterwerten. Die Modellparameter ergeben sich aus dem Modellkonzept, das in Anhang A beschrieben ist. Im vorliegenden Anhang werden sie mit ihren Referenzwerten, den Bandbreiten und Verteilungsfunktionen aufgelistet.

Ein Modellparameter besitzt in der Regel einen Referenzwert und eine Bandbreite. Die Referenzwerte sind in einem realistischen Bereich verhalten konservativ gewählte Werte, welche für die verschiedenen Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems und speziell der Barrieren derart bestimmt sind, dass die resultierende Strahlenexposition wahrscheinlich überschätzt wird, jedoch ohne Extremfälle mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit abzudecken. Die Angabe von Bandbreiten für die Parameter ergänzt den Referenzwert in der Weise, dass bei den Modellrechnungen auch Extremfälle berücksichtigt werden können. Abhängig von der Art der Parameter und der Unsicherheit bezüglich ihrer Werte werden den Parametern unterschiedliche Verteilungsfunktionen zugeordnet:

u	Gleichverteilung („uniform“)
e	Log–Gleichverteilung
n	(abgeschnittene) Normalverteilung
l	(abgeschnittene) Log–Normalverteilung
t	Dreiecks–Verteilung („triangular“)

Die Parametrisierung der Verteilungsfunktionen unter Verwendung der vorgegebenen Werte für den Referenzwert und die Bandbreite ist in Anhang N, Kapitel N.1 angegeben.

Die Parameter lassen sich mehrfach unterteilen. Zum einen erfolgt eine Unterteilung in allgemeine (Kapitel C.1), elementspezifische (Kapitel C.2) und radionuklidspezifische Parameter (Kapitel C.3). Darüber hinaus sind die Parameter je nach dem Ort ihres Wirkens unterscheidbar (Hutgestein und Deckgebirge, restliches Grubengebäude, Einlagerungsbereiche etc.). Die allgemeinen Parameter lassen sich in zwei Gruppen einteilen, nämlich in einen Satz aus Parametern, die für jeden der Einlagerungsbereiche zu Grunde gelegt werden (Kapitel C.1.4), und in einen Satz von Parametern, die zwar gleichartig sind, jedoch für jeden der Einlagerungsbereiche spezifisch sein können (Kapitel C.1.6). Ebenso gibt es elementspezifische und radionuklidspezifische Parameter, die ebenfalls allgemein und spezifisch für jeden Einlagerungsbereich sind.

Der Anhang C ist dementsprechend wie folgt strukturiert:

Anhang C Modellparameter	C-1
C.1 Allgemeine Parameter	C-2
C.1.1 Übergeordnete, allgemeine Parameter.....	C-2
C.1.2 Allgemeine Parameter für das oberflächennahe Grundwasser und die Biosphäre	C-4
C.1.3 Allgemeine Parameter für Hutgestein und Deckgebirge.....	C-4
C.1.4 Allgemeine Parameter für das Grubengebäude und die Einlagerungsbereiche.....	C-5
C.1.5 Parameter des Hauptanhydrit zwischen Zentralteil und Ostfeld	C-9
C.1.6 Allgemeine Parameter für die Einlagerungsbereiche	C-16
C.2 Elementspezifische Parameter	C-31
C.2.1 Elementspezifische Parameter für das oberflächennahe Grundwasser.....	C-31



C.2.2 Elementspezifische Parameter für den Transportpfad durch Hutgestein und Deckgebirge	C-31
C.2.3 Elementspezifische Parameter für die Einlagerungsbereiche	C-32
C.3 Radionuklidspezifische Parameter	C-33
C.3.1 Übergreifende, radionuklidspezifische Parameter	C-33
C.3.2 Radionuklidspezifische Parameter für die Biosphäre	C-35
C.3.3 Radionuklidspezifische Parameter für die Einlagerungsbereiche.....	C-37

Zudem wird zwischen drei Arten von Parametern unterschieden:

- *Basisparameter*: grundlegende, modellunabhängige Daten (z.B. Halbwertszeiten, Radionuklidinventare, Abmessungen einzelner Strecken eines Abdichtsystems)
- *modellspezifische Parameter*: spezielle Parameter für das Nachweiskonzept mit PROSA (z.B. θ_{Rest} , der Schwellenwert für das Wiedereinsetzen der Gasbildung im Einlagerungsbereich)
- *abgeleitete Parameter*: Parameter, die in dieser Form für das Nachweiskonzept mit PROSA definiert wurden (vgl. Anhang A), aber auf *Basisparameter*, evtl. zusammen mit *modellspezifischen Parametern* zurückgeführt werden können (z.B. die effektive Länge und der effektive Querschnitt eines Abdichtsystems, das sich aus mehreren Strecken zusammensetzt). Bei den abgeleiteten Parametern ergeben sich Referenzwerte, Minima und Maxima aus den zugrunde gelegten *Basis- bzw. modellspezifischen Parametern* und der Rechenvorschrift. Jedem abgeleiteten Parameter wird separat eine Verteilungsfunktion zugewiesen.

Die Zuordnung der Parameter zu einer dieser drei Gruppen wird in den nachfolgenden Kapiteln des Anhangs C durch eine systematische Auflistung ebenfalls kenntlich gemacht.

C.1 Allgemeine Parameter

C.1.1 Übergeordnete, allgemeine Parameter

Die übergeordneten, allgemeinen Parameter umfassen die chemischen und physikalischen Parameter (nicht element- oder radionuklidspezifisch), die standortunabhängig sind, wie z.B. physikalische Konstanten (Tabelle C-1 und Tabelle C-2). Abgesehen von der mit Ungewissheiten behafteten Diffusionskonstante wird keinem dieser Parameter eine Bandbreite zugewiesen.

Tabelle C-1: Übergeordnete, allgemeine Parameter (Basisparameter)

Parameter	Wert	Bedeutung	
c_E	$0,122 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$	Gleichgewichtskonzentration für Mg in Porenlösung des Magnesia-betons	–
D_W	$1\cdot 10^{-9} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	Molekulare Diffusionskonstante in freier Flüssigkeit	$1\cdot 10^{-10} - 1\cdot 10^{-8}$ (e)
F_{NaCl}	1,171 [-]	Volumenfaktor durch die Aufsättigung von Süßwasser zu NaCl-Lösung	–
$F_{\text{IP21,L}}$	1,623 [-]	Volumenfaktor für die Lösungsneubildung durch die Aufsättigung von NaCl-Lösung zu IP21-Lösung	–



Tabelle C-1: Übergeordnete, allgemeine Parameter (Basisparameter) (Fortsetzung)

Parameter	Wert	Bedeutung	
$F_{IP21,S}$	0,744 [-]	Volumenfaktor für die Bildung sekundärer Feststoffe durch die Aufsättigung von NaCl-Lösung zu IP21-Lösung	–
g	$9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$	Erdbeschleunigung	–
H_{CH_4}	$3,6\cdot 10^{-9} \text{ mol}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$	Henry-Konstante für Methan in Salzlösung	–
t_{Geo}	30'000 a	Zeitpunkt der Änderung der Permeabilität des Hutgesteins durch geogene Einflüsse	–
μ_g	$1\cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$	Dynamische Viskosität des Gases	–
μ_w	$2,04\cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$	Dynamische Viskosität von gesättigter NaCl-Lösung	–
ρ_{Hal}	$2'165 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Feststoffdichte von Steinsalz	–
ρ_{IP21}	$1'292 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Dichte der IP21-Lösung	–
ρ_{NaCl}	$1'198 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Dichte der NaCl-Lösung	–
ρ_w	$1'000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Dichte von Süßwasser	–

Tabelle C-2: Übergeordnete, allgemeine Parameter (abgeleitete Parameter)

Parameter	Beschreibung	Verwendete Parameter
F_{IP21}	Volumenfaktor durch die Aufsättigung von NaCl-Lösung zu IP21-Lösung	$F_{IP21,L}$, $F_{IP21,S}$
F_{NaCl}^{PROSA}	Volumenfaktor durch die Aufsättigung von Süßwasser zu NaCl-Lösung	F_{NaCl}

- Der *Volumenfaktor durch die Aufsättigung von NaCl-Lösung zu IP21-Lösung* (F_{IP21}) wird aus dem *Volumenfaktor für die Lösungsneubildung durch die Aufsättigung von NaCl-Lösung zu IP21-Lösung* ($F_{IP21,L}$) und dem *Volumenfaktor für die Bildung sekundärer Feststoffe durch die Aufsättigung von NaCl-Lösung zu IP21-Lösung* ($F_{IP21,S}$) berechnet:

$$F_{IP21} = F_{IP21,L} + F_{IP21,S} - 1 = 1,367$$

- Der in PROSA verwendete *Volumenfaktor durch die Aufsättigung von Süßwasser zu NaCl-Lösung* (F_{NaCl}) wird aus dem gleichnamigen (!) *Volumenfaktor aus dem Basisdatensatz* wie folgt berechnet:

$$F_{NaCl}^{PROSA} = F_{NaCl}^{Basis} - 1 = 0,171^{56}$$

⁵⁶ Dies gilt für PROSA bis Version 7.5, für Version 8 (inklusive Prolog) sind die Formeln in Anhang A so angepasst, dass der Basisparameter von F_{NaCl} verwendet wird.



C.1.2 Allgemeine Parameter für das oberflächennahe Grundwasser und die Biosphäre

Das oberflächennahe Grundwasser beinhaltet die Grundwässer von der Geländeoberfläche bis einschließlich jene in den Oberen Alleringerslebener Schichten und den Unteren Walbecker Schichten. Die Parameter wurden, wenn möglich, für diese Gesteine bzw. für vergleichbare Gesteine bestimmt. Es handelt sich ausschließlich um Basisparameter.

Tabelle C-3: Allgemeine Parameter für das oberflächennahe Grundwasser und die Biosphäre mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen

Parameter	Wert	Bedeutung	Bandbreite
A_{AQU}	$1,25 \cdot 10^4 \text{ m}^2$	Transportquerschnittsfläche des oberflächennahen Grundwasserleiters	–
i_{AQU}	$3,00 \cdot 10^{-3} [-]$	Hydraulischer Gradient im oberflächennahen Grundwasserleiter	–
$K_{f,\text{AQU}}$	$3,00 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	Durchlässigkeitsbeiwert für den oberflächennahen Grundwasserleiter	–
KS_{AQU}	1,0 [-]	Faktor für Variation der K_d -Werte im oberflächennahen Grundwasserleiter	0,1 – 3,0 (l)
L_{AQU}	100 m	Länge der Transportstrecke im oberflächennahen Grundwasserleiter	20 – 250 (n)
min_{verd}	500 [-]	Mindestverdünnung für aus der Salzstruktur ausgepresste Lösung im oberflächennahen Grundwasserleiter	–
Q_{GW}	$15'000 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	Oberflächennaher Grundwasserfluss	10'000 – 100'000 (l)
$\varepsilon_{\text{AQU,eff}}$	0,10 [-]	Fließporosität im oberflächennahen Grundwasserleiter	0,08 – 0,12 (n)
$\varepsilon_{\text{AQU,tot}}$	0,30 [-]	Diffusionszugängliche Porosität im oberflächennahen Grundwasserleiter	0,25 – 0,35 (n)
ρ_{AQU}	$2'650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Feststoffdichte des oberflächennahen Grundwasserleiters	–

C.1.3 Allgemeine Parameter für Hutgestein und Deckgebirge

Für die quantitative Langzeitsicherheitsanalyse wird für den Transport durch das Hutgestein und das Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) ein modellhafter Transportpfad unterstellt, dessen Merkmale in Anlehnung an Struktur und Eigenschaften der Schichtenfolge DGL "Deckanhydrit – Grauer Salzton – Leinekarbonat" und innerhalb dieser für den Grauen Salzton festgelegt werden. Die entsprechenden Parameter wurden, wenn möglich, für diese Gesteine bzw. für vergleichbare Gesteine bestimmt.



Tabelle C-4: Allgemeine Parameter für Hutgestein und Deckgebirge mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (Basisparameter)

Parameter	Wert	Bedeutung	Bandbreite
$A_{2,tot}$	500 m ²	Querschnittsfläche der Wegsamkeit im Hutgestein und Deckgebirge	–
$a_{L,DGL}$	4 m	Longitudinale Dispersionslänge für die Transportstrecke im Hutgestein und Deckgebirge	2 – 8 (t)
$D_{p,D}$	$5,0 \cdot 10^{-10}$ m ² ·s ⁻¹	Porendiffusionskonstante für die Wegsamkeit im Hutgestein und Deckgebirge	$3,0 \cdot 10^{-10}$ – $7,0 \cdot 10^{-10}$ (u)
KS_{DGL}	1 [-]	Faktor für Variation der K_d -Werte der Wegsamkeit im Hutgestein und Deckgebirge	0,1 – 3 (l)
L_2	220 m	Länge der Wegsamkeit im Hutgestein und Deckgebirge	–
ε_2	0,3 [-]	Porosität der Wegsamkeit im Hutgestein und Deckgebirge	0,2 – 0,3 (t)
κ	0,3 [-]	Transportwirksamer Anteil der Querschnittsfläche der Wegsamkeit im Hutgestein und Deckgebirge	0,1 – 0,5 (u)
ρ_D	2'650 kg·m ⁻³	Feststoffdichte für die Wegsamkeit im Hutgestein und Deckgebirge	–

Tabelle C-5: Allgemeine Parameter für Hutgestein und Deckgebirge mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (abgeleitete Parameter)

Parameter	Beschreibung	Verwendete Parameter
A_2	Effektive Transportquerschnittsfläche in Hutgestein und Deckgebirge	$A_{2,tot}, \kappa$

- Die *Effektive Transportquerschnittsfläche in Hutgestein und Deckgebirge* (A_2) wird aus der *Querschnittsfläche in Hutgestein und Deckgebirge* ($A_{2,tot}$) und dem *Transportwirksamen Anteil der Querschnittsfläche im Hutgestein* (κ) berechnet:

$$A_2 = A_{2,tot} \cdot \kappa = 150 \text{ m}^2 \quad (50 - 250 \text{ m}^2)$$

Die Bandbreite wird auf gleiche Weise berechnet. Dabei wird der Wert für den *Fließwirksamen Anteil der Transportquerschnittsfläche in Hutgestein und Deckgebirge* (κ) variiert. Der Parameter ist gleichverteilt.

C.1.4 Allgemeine Parameter für das Grubengebäude und die Einlagerungsbereiche

Diese Gruppe von Parametern (Tabelle C-6) dient zur Beschreibung der Prozesse im übrigen Grubengebäude und in den Einlagerungsbereichen. Dabei kann unterschieden werden in Parameter, die nur das übrige Grubengebäude, Gegebenheiten und Prozesse darin betreffen, sowie Parameter, die sich auf Gegebenheiten und Prozesse in den Einlagerungsbereichen beziehen, jedoch nicht spezifisch für einen einzelnen Einlagerungsbereich sind (z.B. KS_{BFA} , $LS_{C,sol}$).



Tabelle C-6: Allgemeine Parameter für das übrige Grubengebäude und für Einlagerungsbereiche (jedoch nicht spezifisch für einen Einlagerungsbereich) mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (Basisparameter)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
c_M	0,1 [-]	Magnesiumkonzentration in der Grubenlösung relativ zur IP21-Lösung	0,0 – 1,0 (t)
c_{GG}	$4 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$	Volumenkonvergenzrate für unversetzte Hohlräume in der übrigen Grube	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$ (e)
CS_{norad}	1,0 [-]	Faktor für Variation der Konzentration an nicht radioaktiven Kohlenstoff-Isotopen	0,1 – 10,0 (l)
KS_{BFA}	1,0 [-]	Faktor für Variation der K_d -Werte an BFA	0,1 – 3,0 (l)
KS_{ZEM}	1,0 [-]	Faktor für Variation der K_d -Werte an Zement	0,1 – 3,0 (l)
$LS_{\text{C,sol}}$	1,0 [-]	Faktor für Variation der Löslichkeitsgrenzen	0,3 – 10,0 (l)
m	5 [-]	Spannungsexponent im Grubengebäude	–
p_0	$1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$	Anfangsgasdruck in der Grube	–
p_G	$2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$	Gaseindringdruck in eine Abdichtung	0 – $2,4 \cdot 10^6$ (u)
T_{Ref}	21 °C	Temperatur im Grubengebäude	–
t_{voll}	7'500 [a]	Zeitpunkt der vollständigen Füllung der Restgrube mit Lösung	1'500 – 25'000 (l)
z_A	108 mNN	Niveau der Aller	105 – 110 (u)
z_G	-332 mNN	Bezugsniveau im Grubengebäude	-372 – -291 (n)
z_R	131 mNN	Niveau der Rasenhängebank	–
z_S	-140 mNN	Niveau des Salzspiegels	-170 – -120 (n)
ϵ_{BFA}	0,37 [-]	Porosität der BFA	–
ϵ_{SB}	0,20 [-]	Porosität des Salzbetons	0,15 – 0,25 (t)
ϵ_{SG}	0,40 [-]	Porosität des Salzgrusversatzes	–
ϵ_r	0,3 [-]	Grenzporosität der Stützwirkung von kompaktierbarem Versatz im Grubengebäude	–
ϕ_{SB}	1,00 [-]	Relativer Anfangsfüllgrad des Salzbetons mit Flüssigkeit	0,95 – 1,05 (n)
ϕ_{SG}	0,3 [Gew.-%]	Relativer Anfangsfüllgrad des Salzgrusversatzes	0,1 – 0,5 (t)
ρ_{lit}	$2'200 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Mittlere Gesteinsdichte	–

Tabelle C-7: Allgemeine Parameter für das übrige Grubengebäude und für Einlagerungsbereiche (jedoch nicht spezifisch für einen Einlagerungsbereich) mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (modellspezifische Parameter)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
f_g	0,03 [-]	Produkt aus dem Anteil der gasdurchströmten Querschnittsfläche im Abdichtsystem und der relativen Permeabilität für Gas während des Auspressvorgangs	0,01 – 0,1 (l)
V_{GG}	7'077'563 m ³	Volumen des übrigen Grubengebäudes	4'403'088 – 7'263'086 (t)
γ_{GG}	1'000 [-]	Reduktionsfaktor für die Konvergenzrate des wirksamen Porenvolumens des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im übrigen Grubengebäude	–
κ_p	0,1 [-]	Mittlerer wirksamer Anteil des hydrostatischen Drucks im übrigen Grubengebäude während des Volllaufens	0,0 – 0,5 (t)
κ_{SB}	0,001 [-]	Porositätsfaktor für den Salzbeton	–
$\zeta_{GG,k}$	0,337 [-]	Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz im übrigen Grubengebäude	0,101 – 0,351 (n)
$\zeta_{GG,t}$	0,800 [-]	Totaler Verfüllgrad des übrigen Grubengebäudes	0,793 – 0,808 (n)

- Der Wert für das *Produkt aus dem Anteil der gasdurchströmten Querschnittsfläche im Abdichtsystem und der relativen Permeabilität für Gas während des Auspressvorgangs* (f_g) wird wie folgt begründet: Die relative Permeabilität ist 0,1, der Querschnittsanteil wird für die Summe der Abdichtungen auf den obersten Sohlen berechnet (2. Sohle im OF, 1. und 2. Sohle im WSF). Unter Berücksichtigung des Quotienten aus Länge der Modellabdichtung und Länge der jeweiligen Abdichtung ergibt sich ein Wert von 0,033 für das OF und 0,028 für das WSF.
- Das *Gesamtvolumen des übrigen Grubengebäudes* (V_{GG}) wird dem HIS [DBE 2003] entnommen (vgl. Anhang D.3.6).
- Der Wert für den *Reduktionsfaktor für die Konvergenzrate des Porenvolumens des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im übrigen Grubengebäude* (γ_{GG}) ist ein numerischer Wert für unendlich, d.h. dieser Versatz wird als de facto nicht kompaktierbar modelliert.
- Der Wert für den *mittleren wirksamen Anteil des hydrostatischen Drucks im übrigen Grubengebäude während des Volllaufens* (κ_p) beschreibt den mittleren wirksamen Anteil des hydraulischen Drucks (d.h. auf dem Bezugsniveau Z_G) während der gesamten Phase zwischen $t = 0$ und $t = t_{voll}$. Das Minimum entspricht Atmosphärendruck, das Maximum dem hydrostatischen Druck vom Niveau der 3. Sohle bis zum Salzspiegel unter der Annahme einer IP21-Lösung.
- Über den *Porositätsfaktor für den Salzbeton* (κ_{SB}) wird berücksichtigt, dass nur ein Teil des Porenwassers im Salzbeton für die Prozesse in der Grube verfügbar ist. Der Wert ist mit 0,001



für alle Bereich des Grubengebäudes so gewählt, dass die Lösungsmenge im Porenhohlraumvolumen im Salzbeton praktisch nicht berücksichtigt wird.

- Der *Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz* ($\zeta_{GG,k}$) berechnet sich aus den zwei Teilvolumina „mit kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ und „mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ (vgl. Anhang D.3.6).
- Der *totale Verfüllgrad* ($\zeta_{GG,t}$) berechnet sich aus den drei Teilvolumina „unverfülltes Volumen“, „mit kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ und „mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ (vgl. Anhang D.3.6).

abgeleitete Parameter:

Tabelle C-8: Allgemeine Parameter für das übrige Grubengebäude und für Einlagerungsbereiche (jedoch nicht spezifisch für einen Einlagerungsbereich) mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (abgeleitete Parameter)

Parameter	Beschreibung	Verwendete (Basis-)Parameter
m_{GG}	Spannungsexponent im übrigen Grubengebäude	m
$\varepsilon_{GG,v1,0}$	Porosität des kompaktierbaren Versatzes vor Konvergenz im übrigen Grubengebäude	ε_{SG}
$\varepsilon_{GG,v2,0}$	wirksame Porosität des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im übrigen Grubengebäude	$\varepsilon_{SB}, \kappa_{SB}$
$\varepsilon_{GG,r}$	Grenzporosität der Stützwirkung von kompaktierbarem Versatz im übrigen Grubengebäude	ε_r
$\phi_{GG,A}$	Relativer Anfangsfüllgrad des kompaktierbaren Versatzes mit Flüssigkeit im übrigen Grubengebäude	$V_{GG}, \varepsilon_{SG}, \phi_{SG}, \rho_{Hal}, \rho_W, \zeta_{GG,t}, \zeta_{GG,k}$
$\phi_{GG,N}$	Relativer Anfangsfüllgrad des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes mit Flüssigkeit im übrigen Grubengebäude	ϕ_{SB}

- Der *Spannungsexponent im übrigen Grubengebäude* (m_{GG}) ist gleich dem *Spannungsexponent im Grubengebäude* (m):

$$m_{GG} = m = 5$$

- Die *Porosität des kompaktierbaren Versatzes vor Konvergenz im übrigen Grubengebäude* ($\varepsilon_{GG,v1,0}$) ist gleich der *Porosität des Salzgrusversatzes* (ε_{SG}):

$$\varepsilon_{GG,v1,0} = \varepsilon_{SG} = 0,4$$

- Die *wirksame Porosität des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im übrigen Grubengebäude* ($\varepsilon_{GG,v2,0}$) ist gleich der *Porosität des Salzbetons* (ε_{SB}), multipliziert mit dem Porositätsfaktor (κ_{SB}):

$$\varepsilon_{GG,v2,0} = \varepsilon_{SB} \cdot \kappa_{SB} = 2,0 \cdot 10^{-4} (1,5 \cdot 10^{-4} - 2,5 \cdot 10^{-4})$$



Dies gilt auch für die Bandbreite. Der Parameter ist triangular verteilt.

- Die *Grenzporosität der Stützwirkung von kompaktierbarem Versatz im übrigen Grubengebäude* ($\varepsilon_{GG,r}$) ist gleich der *Grenzporosität der Stützwirkung von kompaktierbarem Versatz im Grubengebäude* (ε_r):

$$\varepsilon_{GG,r} = \varepsilon_r = 0,3$$

- Der *Relative Anfangsfüllgrad des kompaktierbaren Versatzes mit Flüssigkeit im übrigen Grubengebäude* ($\phi_{GG,A}$) wird berechnet aus dem *mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Volumen im restlichen Grubengebäude* ($V_{GG} \cdot \zeta_{GG,t} \cdot \zeta_{GG,k}$), der *Porosität des Salzgrusversatzes* (ε_{SG}), der *Restfeuchte im Salzgrus* (ϕ_{SG}), der *Feststoffdichte von Steinsalz* (ρ_{Hal}) und der *Dichte von Wasser* (ρ_W).

$$\begin{aligned} \phi_{GG,A} &= \frac{(V_{GG} \cdot \zeta_{GG,t} \cdot \zeta_{GG,k} - V_{GG} \cdot \zeta_{GG,t} \cdot \zeta_{GG,k} \cdot \varepsilon_{SG}) \cdot \rho_{Hal} \cdot \frac{\phi_{SG}}{100 \cdot \rho_W}}{V_{GG} \cdot \zeta_{GG,t} \cdot \zeta_{GG,k} \cdot \varepsilon_{SG}} \\ &= \frac{1 - \varepsilon_{SG}}{\varepsilon_{SG}} \cdot \rho_{Hal} \cdot \frac{\phi_{SG}}{100 \cdot \rho_W} = 9,74 \cdot 10^{-3} (0 - 1,62^{-2}) \end{aligned}$$

Für das Minimum wird ein Wert von 0 angenommen. Das Maximum wird aus dem Maximum von ϕ_{SG} berechnet. Der Parameter ist triangular verteilt.

- Der *relativer Anfangsfüllgrad des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes mit Flüssigkeit im übrigen Grubengebäude* ($\phi_{GG,N}$) ist gleich dem *relativen Anfangsfüllgrad des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes mit Flüssigkeit im Grubengebäude* (ϕ_{SB}):

$$\phi_{GG,N} = \phi_{SB} = 1,00 (0,95 - 1,05)$$

Dies gilt auch für die Bandbreite. Der Parameter ist normalverteilt.

C.1.5 Parameter des Hauptanhydrit zwischen Zentralteil und Ostfeld

In diesem Abschnitt des Anhangs werden die zu unterstellenden hydraulischen Eigenschaften und die Eigenschaften für den Transport von Radionukliden im Hauptanhydrit dargelegt und begründet. Die Grundlagen dazu und weitergehende Angaben sind in [BGR 2000a] enthalten. Die Übertragung hydraulischer Daten (Gesamthohlraumvolumen, Durchlässigkeit) von Wegsamkeiten, die im wesentlichen in Längsrichtung der Mulde ausgebildet sind, auf einen postulierten Fließweg quer zur Muldenachse in der einfacheren Struktur der Westflanke der Ostmulde ist konservativ. Bei der Zuweisung von Parametern für das Alternativszenario werden deshalb nicht zusätzlich konservative Annahmen kumuliert.

Das konzeptuelle Modell für ausgedehnte hydraulische Wegsamkeiten im Hauptanhydrit beruht auf folgenden Definitionen [BGR 2000a]:

Kluftschar: Mit dem Begriff Kluftschar (Schar von Klüften) sind die in einem wenige Zentimeter mächtigen und einige Quadratmeter ausgedehnten Bereich vorhandenen parallelen und einander unmittelbar benachbarten Klüfte gemeint. Das Gestein zwischen den Klüften ist ebenfalls Bestandteil der Kluftschar.



Kluftzone: Als Kluftzone wird eine Anordnung aus mehreren Kluftscharen oder auch einzelnen Klüften bezeichnet, die zu großräumig deutlich erhöhten Permeabilitäten im Hauptanhydrit führen. Die derart innerhalb einer Kluftzone hydraulisch miteinander verbundenen Kluftscharen und/oder Einzelklüfte stellen ein Wegsamkeitsnetz dar. Der Gebirgsbereich zwischen den Kluftscharen ist Teil der Kluftzone.

Die unterstellte hydraulische Wegsamkeit werde durch eine W-E-verlaufende Kluftzone gebildet, die im Folgenden mit „Modellkluftzone“ bezeichnet wird.

Geometrische Parameter

Die geometrischen Verhältnisse und die relevanten Größen der Modellkluftzone sind in Abbildung C-1 dargestellt.

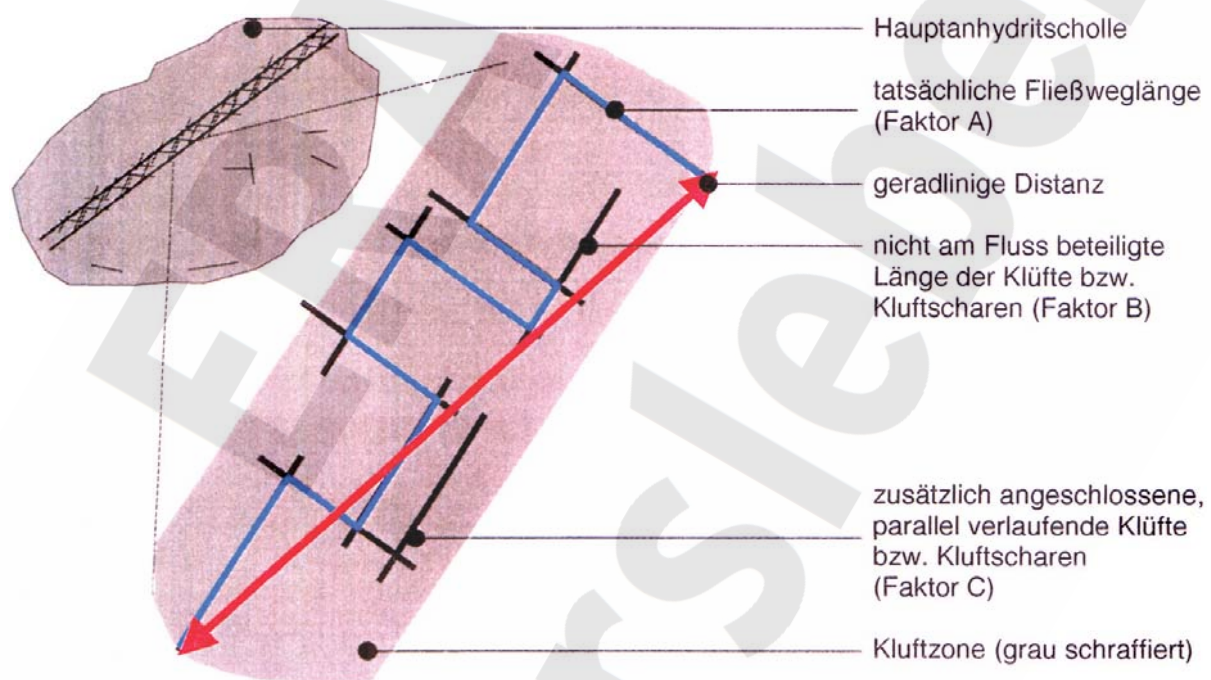


Abbildung C-1: Konzeptuelles geometrisches Modell der hydraulischen Wegsamkeiten im Hauptanhydrit (aus [BGR 2000a])

Aufgrund von standortspezifischen Beobachtungen und allgemeinen geologischen Erkenntnissen sind folgende Werte realistisch [BGR 2000a].

$$D_{KS} = 0,1 \text{ m}$$

Die maximale Mächtigkeit einer Kluftschar beträgt nach Beobachtungen bis zu 0,1 m. Für die Kluftscharen der Modellkluftzone wird der Maximalwert angenommen.

$$\varepsilon_{KS} = 0,01$$

Die Porosität einer Kluftschar wird mit $\leq 1 \%$ abgeschätzt.

$$V_{et,KZ} = 200 \text{ m}^3 \text{ (} 60 \text{ m}^3 \text{ - } 600 \text{ m}^3 \text{)}$$

Das gesamte Porenvolumen der vernetzten Kluftscharen, welche die Modellkluftzone bilden, wird aufgrund folgender Beobachtungen festgelegt: Beim Abteufen der Bohrung RB 506 trat Gas aus dem Hauptanhydrit aus, das Reservoirvolumen wurde aufgrund der ausgetretenen Gasmenge und des gemessenen Gasdrucks auf etwa 300 m^3 geschätzt. Modellrechnungen zum Interferenztest zwischen den Bohrungen RB 506, RB 507 und RB 607 konnten die Beobachtungen mit einem Hohlraumvolumen des maßgebenden hydraulischen Systems im Bereich von $800 \text{ m}^3 - 900 \text{ m}^3$ gut wiedergeben. Im Abbau 1a im Zentralteil tritt seit über 25 Jahren Lösung aus der darüberliegenden Anhydritscholle zu. Der kumulierte Zutritt beträgt bisher 120 m^3 , der Zutritt dauert noch an.

$$A = 2 (1,4 - 3)$$

Ein Fließweg entlang des Systems der vernetzten Kluftscharen in der Modellkluftzone verläuft nicht geradlinig. Der Faktor A bezeichnet das Verhältnis zwischen der Fließweglänge (geglättet innerhalb der einzelnen Kluftscharen) und der geradlinigen Distanz zwischen den beiden Enden der Kluftzone. Der Faktor 2 entspricht ungefähr dem diagonalen Weg durch ein nicht perfekt vernetztes kubisches System.

$$B = 10$$

Die Fließbewegung durch das vernetzte System der Kluftscharen erfolgt nur in einem Teil der Kluftscharenflächen. Einzelne Kluftscharen schneiden das System nur einmal, tragen damit nicht zur Vernetzung bei und werden deshalb höchstens lokal im Bereich der Verschneidung durchströmt. Gleichwohl ist deren Porenraum mit dem System hydraulisch verbunden. Selbst Kluftscharen, welche das System mehrfach schneiden, weisen Flächenanteile auf, die nicht an der Fließbewegung beteiligt sind, da nur die Flächenanteile zwischen den Schnittlinien zur Vernetzung beitragen und damit durchströmt werden, nicht aber die Bereiche der Kluftscharen außerhalb dieser Flächenanteile. Der Faktor B ist das Verhältnis zwischen der Gesamtfläche aller Kluftscharen der Modellkluftzone zur gesamten advektiv durchströmten Fläche und entspricht dem Produkt B·C der in Abbildung C-1 angegebenen Faktoren B und C. Der hier definierte Faktor B entspricht damit auch dem Verhältnis zwischen dem durchflossenen Porenvolumen und dem gesamten Porenvolumen der Modellkluftzone. Der Wert von 10 entspricht der allgemeinen Erfahrung.

$$L = 200 \text{ m}$$

Die zu unterstellende Länge der Modellkluftzone ist durch die geometrischen Verhältnisse und speziell die Länge der kurzzuschließenden Abdichtungen in den Ostquerschlägen gegeben.

Alle weiteren geometrischen Größen sind aus den vorstehend aufgeführten Größen abgeleitet oder für den Sicherheitsnachweis ohne Bedeutung. Dies gilt auch für die Querausdehnung der Kluftzone. Für die folgenden erläuternden Ausführungen werden für die beiden Querausdehnungen gleichwohl Werte eingeführt: Es seien $Y = 50 \text{ m}$ die größere und $D_{KZ} = 10 \text{ m}$ die kleinere Querausdehnung.

Die Gesamtfläche F_{tot} aller hydraulisch vernetzten Kluftscharen in der Modellkluftzone beträgt

$$F_{\text{tot}} = \frac{V_{\text{ef,KZ}}}{\varepsilon_{\text{KS}} \cdot D_{\text{KS}}} = 200'000 \text{ m}^2 \quad (60'000 \text{ m}^2 - 600'000 \text{ m}^2) \quad (\text{C-1})$$

Das an der Fließbewegung beteiligte Porenvolumen der Kluftzone $V_{\text{ef,KZ}}$ ist



$$V_{ef,KZ} = \frac{V_{et,KZ}}{B} = 20\text{m}^3 \quad (6\text{m}^3 - 60\text{m}^3) \quad (\text{C-2})$$

und die an der Fließbewegung beteiligte gesamte Kluftscharfläche

$$F_f = \frac{V_{ef,KZ}}{\varepsilon_{KS} \cdot D_{KS}} = \frac{V_{et,KZ}}{B \cdot \varepsilon_{KS} \cdot D_{KS}} = 20'000\text{m}^2 \quad (6'000\text{m}^2 - 60'000\text{m}^2) \quad (\text{C-3})$$

Die tatsächliche Fließweglänge zwischen den beiden Endpunkten der Wegsamkeit im Hauptanhydrit, L_f , ist länger als die geradlinige Verbindung zwischen den beiden Punkten, L ,

$$L_f = L \cdot A = 400\text{m} \quad (280\text{m} - 600\text{m}) \quad (\text{C-4})$$

und die mittlere Ausdehnung der durchflossenen kumulierten Kluftscharfläche quer zur Fließrichtung Y_f ist

$$Y_f = \frac{F_f}{L_f} = \frac{V_{et,KZ}}{B \cdot \varepsilon_{KS} \cdot D_{KS} \cdot L \cdot A} = 50\text{m} \quad (15\text{m} - 150\text{m}) \quad (\text{C-5})$$

Im anschließenden Abschnitt wird die maßgebende mittlere Transmissibilität der Kluftscharen T_{KS} abgeleitet. Aus dieser und den geometrischen Größen ergibt sich bei vorgegebenem Druckgradienten $\Delta p/L$ für die Fließrate entlang der Modellkluftzone Q_{KZ}

$$Q_{KZ} = \frac{Y_f \cdot T_{KS} \cdot \Delta p}{\mu_w \cdot L_f} = \frac{V_{et,KZ}}{B \cdot \varepsilon_{KS} \cdot D_{KS} \cdot L^2 \cdot A^2} \cdot \frac{T_{KS} \cdot \Delta p}{\mu_w} \quad (\text{C-6})$$

Die Größe μ_w ist dabei die dynamische Viskosität der Flüssigkeit.

Mit der üblichen Definition der Kluftzonen-Permeabilität K_{KZ} (gemittelt über den geometrischen Querschnitt der Modellkluftzone $A_{KZ} = Y \cdot D_{KZ}$) und der Kluftzonen-Transmissibilität T_{KZ} , wiedergegeben in Gleichung (C-7),

$$Q_{KZ} = \frac{Y \cdot D_{KZ} \cdot K_{KZ} \cdot \Delta p}{\mu_w \cdot L} = \frac{Y \cdot T_{KZ} \cdot \Delta p}{\mu_w \cdot L} \quad (\text{C-7})$$

ergibt sich

$$\begin{aligned} Y \cdot D_{KZ} \cdot K_{KZ} &= A_{KZ} \cdot K_{KZ} = Y \cdot T_{KZ} = \frac{V_{et,KZ}}{B \cdot \varepsilon_{KS} \cdot D_{KS} \cdot L \cdot A^2} \cdot T_{KS} \\ &= 25\text{m} \quad (7,5\text{m} - 75\text{m}) \cdot T_{KS} \end{aligned} \quad (\text{C-8})$$

Es ist zu beachten, dass die über den gesamten geometrischen Querschnitt der Modellkluftzone summierte Transmissibilität von den Annahmen zu ihrer Querausdehnung unabhängig ist.

Ähnliches gilt auch für die effektive Porosität (Fließporosität) $\varepsilon_{eff,KZ}$ und die totale Porosität $\varepsilon_{tot,KZ}$ der Modellkluftzone, sofern die sehr geringe Porosität der kompakten Gebirgsbereiche zwischen den Kluftscharen vernachlässigt wird:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{eff,KZ} \cdot A_{KZ} &= \frac{V_{ef,KZ}}{L} = \frac{V_{et,KZ}}{B \cdot L} = 0,1\text{m}^2 \quad (0,03\text{m}^2 - 0,3\text{m}^2) \\ \varepsilon_{tot,KZ} \cdot A_{KZ} &= \frac{V_{et,KZ}}{L} = 1\text{m}^2 \quad (0,3\text{m}^2 - 3\text{m}^2) \end{aligned} \quad (\text{C-9})$$



Bei einem vorgegebenen Druckgradienten entlang der Modellkluftzone ergibt sich für die Abstandsgeschwindigkeit v

$$v = \frac{Q_{KZ}}{\varepsilon_{\text{eff},KZ} \cdot A_{KZ}} = \frac{K_{KZ}}{\varepsilon_{\text{eff},KZ}} \cdot \frac{\Delta p}{\mu_w \cdot L} = \frac{T_{KS}}{\varepsilon_{KS} \cdot D_{KS} \cdot A^2} \cdot \frac{\Delta p}{\mu_w \cdot L} \quad (\text{C-10})$$

Maßgebende mittlere Permeabilität der Kluftscharen

Im Hauptanhydrit wurden zahlreiche hydraulische Tests ausgeführt, hauptsächlich in der Ostflanke der Ostmulde [BGR 2000a]. Für die Ermittlung der maßgebenden Kluftscharpermeabilität werden nur Tests berücksichtigt, deren Packerintervalle vollständig im Hauptanhydrit liegen. Da zudem im Nahbereich von Grubenbauen das Gestein durch den Ausbruch und die anschließenden gebirgsmechanischen Verformungen gestört sein kann, werden nur Tests in die Auswertung einbezogen, die weiter als 10 m von der Kontur des Grubenbaus entfernt waren. Eine gesonderte Auswertung der Tests im Nahbereich der Grubenbaue ergab jedoch im Vergleich zu den unten aufgeführten Werten keine höheren Transmissibilitäten, so dass die folgenden Ergebnisse auch für den konturnahen Bereich der Modellkluftzone als repräsentativ angenommen werden.

Hydraulisch dichte Gesteinsbereiche im Hauptanhydrit weisen eine Permeabilität von 10^{-20} m^2 und weniger auf. Als hydraulische Tests, welche eine oder mehrere permeable Kluftscharen beproben, werden jene interpretiert, die einer Permeabilität von 10^{-18} m^2 oder mehr entsprechen.

Die für die Auswertung beigezogenen Tests sind in Tabelle C-9 aufgeführt. Die Tests in der Bohrung RB 530 zwischen den Teufen 22,16 m und 35,59 m, für die in [BGR 2000a] lediglich untere Grenzen der Transmissibilität angegeben werden, wurden von BGR nochmals ausgewertet. Tabelle C-9 enthält die Ergebnisse dieser nachträglichen Auswertung.

Der Vergleich der oben ermittelten Gesamtfläche aller Kluftscharen $F_{\text{tot}} = 200'000 \text{ m}^2$ und der angenommenen Fläche der Modellkluftzone von $L \cdot Y = 10'000 \text{ m}^2$ ergibt unter Berücksichtigung des „Tortuositätsfaktors“ $A=2$ einen Mittelwert von 10 Kluftscharen in einer Bohrung quer durch die Modellkluftzone (in Richtung von D_{KZ}). Selbst unter Berücksichtigung der Unsicherheiten bei der Annahme von Y und D_{KZ} lässt sich daraus schließen, dass die Kluftscharen entlang einer Bohrung in einer Kluffzone im Mittel im Meterbereich auseinander liegen. Bei der Interpretation der in Tabelle C-9 aufgeführten Tests werden deshalb zwei alternative Annahmen getroffen:

- (i) Jeder Test beprobt genau eine Kluftchar, die gemessene Transmissibilität entspricht jener dieser Kluftchar.
- (ii) Die Tests mit Intervalllängen von weniger als 3 m quantifizieren jeweils eine Kluftchar. Die beiden Tests in RB 508 und RB 506 mit Intervalllängen von 6,3 m bzw. 31 m beproben 2 bzw. 10 Kluftscharen, deren mittlere Transmissibilitäten sind somit $\frac{1}{2}$ bzw. $\frac{1}{10}$ der gemessenen Werte.

Der Vergleich der oben berechneten Querausdehnung der durchflossenen kumulierten Kluftcharfläche Y_f zur Querausdehnung der Modellkluftzone Y zeigt, dass diese im Mittel nur eine Fließebene aufweist. Ohne dieses Ergebnis übermäßig zu belasten, folgt daraus, dass als maßgebender Mittelwert der Kluftchar-Transmissibilitäten für die Berechnung des hydraulischen Widerstandes



des Kluftscharnetzes die Mittelung „in der Fläche“ und damit das geometrische Mittel maßgebend ist.

Tabelle C-9: Für die Ermittlung der maßgebenden mittleren Kluftchartransmissibilität ausgewertete hydraulische Tests (aus [BGR 2000a], ergänzt durch eine nachträgliche Auswertung einzelner Tests durch BGR)

Nr	Bohrung	Test	Intervall		Intervall-Länge [m]	Transmissibilität [m ³]
			von [m]	bis [m]		
1	RB528	528224.00	17.66	19.16	1.50	1.50E-13
2	RB528	528225.00	19.16	20.66	1.50	7.50E-14
3	RB528	528226.00	20.66	22.16	1.50	1.50E-13
4	RB528	528227.00	22.16	23.66	1.50	7.50E-14
5	RB528	528228.00	23.66	25.16	1.50	7.50E-14
6	RB528	528229.00	25.16	27.76	2.60	2.60E-13
7	RB529	529238-39	28.05	29.55	1.50	3.00E-13
8	RB529	529240-41	29.55	31.66	2.11	4.22E-14
9	RB543	543108-09	20.00	21.50	1.50	1.50E-18
10	RB543	543110	18.50	20.00	1.50	3.00E-17
11	RB543	543122-23	17.00	18.50	1.50	3.00E-15
12	RB543	543106-07	36.20	37.70	1.50	3.00E-18
13	RB544	544210	20.00	21.50	1.50	1.50E-16
14	RB544	544211-12	18.50	20.00	1.50	7.50E-17
15	RB544	544213-14	17.00	18.50	1.50	1.50E-17
16	RB530	530130-31	22.16	23.66	1.50	1.00E-11
17	RB530	530132-33	23.66	25.16	1.50	9.00E-12
18	RB530	530134-35	25.16	26.66	1.50	4.00E-12
19	RB530	530136-37	26.66	28.16	1.50	1.00E-13
20	RB530	530138-39	28.16	29.66	1.50	5.00E-15
21	RB530	530140-42	29.66	31.16	1.50	7.00E-16
22	RB530	530143-44	31.16	32.66	1.50	4.00E-14
23	RB530	530145-46	32.66	34.16	1.50	2.00E-13
24	RB530	530147-48	34.09	35.59	1.50	2.00E-14
25	RB530	530149-50	35.59	37.83	2.24	2.24E-16
26	RB524	524105-06	11.40	12.90	1.50	7.50E-18
27	RB522	522123-24	13.40	15.00	1.60	4.80E-18
28	RB508		41.50	47.80	6.30	6.30E-18
29	RB506		32.50	63.50	31.0	1.55E-16

Die in Tabelle C-9 aufgeführten Tests ergeben für das geometrische Mittel der Kluftchartransmissibilität und dessen statistischen Fehler:



Annahme (i), 1 Kluftchar pro Test:

$$T_{KS} = 4,0 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3 (\pm 20 \%)$$

Annahme (ii), mehrere Kluftscharen in Test RB 508 und RB 506: $T_{KS} = 8,6 \cdot 10^{-16} \text{ m}^3 (\pm 15 \%)$

Nach Gleichung (C-8) beträgt die querschnittsintegrierte Transmissibilität der Modellkluftzone somit

$$A_{KZ} \cdot K_{KZ} = Y \cdot T_{KZ} = \begin{cases} 1,0 \cdot 10^{-13} \text{ m}^4 (3 \cdot 10^{-14} \text{ m}^4 - 3 \cdot 10^{-13} \text{ m}^4) & \text{Annahme (i)} \\ 2,2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^4 (6 \cdot 10^{-15} \text{ m}^4 - 7 \cdot 10^{-14} \text{ m}^4) & \text{Annahme (ii)} \end{cases}$$

Im Hauptanhydrit wurde ein Test durchgeführt, der direkt eine hydraulische Struktur grossräumig beprobt: Die aus dem Interferenztest RB 506-507-508-607 zwischen RB 507 und RB 607 mittels Modellrechnungen abgeleitete Transmissibilität der beprobten Struktur liegt zwischen 10^{-14} m^3 und 10^{-13} m^3 , der beste Schätzwert beträgt $7 \cdot 10^{-14} \text{ m}^3$. Als nächstliegende Interpretation handelt es sich bei der Struktur um eine Kluftzone mit einer Ausdehnung von wenigstens 68 m. Bei einer Querausdehnung dieser Kluftzone von einigen Dekametern ergibt dies eine querschnittsintegrierte Transmissibilität, die etwa einen Faktor 10 über dem aus den Kluftschardaten mit der Annahme (i) berechneten oberen Wertes liegt.

Die für dieses Szenario maßgebenden Parameter der Modellkluftzone sind deren querschnittsintegrierte Transmissibilität, der effektive und der totale Fließquerschnitt; sie sind in Tabelle C-10 zusammengestellt. Aus diesen Parametern lassen sich sowohl die Flüsse von Flüssigkeit und Gas in bzw. aus dem Einlagerungsbereich Ostfeld als auch die Parameter für den Radionuklidtransport ermitteln.

Tabelle C-10 : Maßgebende Parameter der Modellkluftzone für das Alternativszenario. Der geometrische Querschnitt der Modellkluftzone kann im Prinzip frei gewählt werden, die übrigen Parameter sind entsprechend festzulegen.

Parameter	Parameter des Abdichtsystems	Referenzwert	Bandbreite
Querschnittsintegrierte Transmissibilität	$A_1 \cdot K_1$	$5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^4$	$5 \cdot 10^{-16} - 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^4$
Effektiver Fließquerschnitt	$\varepsilon_1 \cdot A_1$	$0,1 \text{ m}^2$	$0,03 - 0,3 \text{ m}^2$
Totaler Fließquerschnitt	-	1 m^2	$0,3 - 3 \text{ m}^2$
Transportlänge	L_1	200 m	-
Gaseindringdruck	$p_{G,HA}$	0 MPa	-
Dispersionslänge	$a_{L,HA}$	0 m	-

Als Wahrscheinlichkeitsverteilungen werden sowohl für die querschnittsintegrierte Transmissibilität als auch für die beiden Fließquerschnitte Log-Gleichverteilungen angenommen.



C.1.6 Allgemeine Parameter für die Einlagerungsbereiche

Die einlagerungsbereichspezifischen Parameter können für jeden Einlagerungsbereich (West-Südfeld, Ostfeld, Nordfeld oder Zentralteil) unterschiedliche Werte annehmen. Sie beziehen sich auf Gegebenheiten und Prozesse in den Einlagerungsbereichen selber (Einlagerungsgrubenbaue, restliche Einlagerungsbereiche), den zugehörigen Abdichtungen und den zugehörigen Mischungsbereichen. Diese Parameter sind in den Tabellen C–11 bis C–15 aufgelistet. Die Angaben zu den Abdichtbauwerken sind zusammen mit der Berechnung der effektiven Parameter der Modellabdichtungen in Anhang D aufgelistet. In Tabelle C-11 und Tabelle C-12 sind die Basisparameter der einzelnen Einlagerungsbereiche Südfeld und Westfeld aufgelistet. Für Volumina, Massen und Mengen des gemeinsamen Einlagerungsbereichs West-Südfeld werden jeweils die Summen aus beiden Feldern verwendet. Für die anderen Parameter ist wegen seines größeren Volumens in der Regel das Südfeld maßgebend.

Tabelle C-11: Allgemeine Parameter für das Südfeld mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (Basisparameter)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
C_L	$4 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$	Volumenkonvergenzrate für unversetzte Hohlräume	$2 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$ (e)
C_{VG}	$8 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$	Volumenkonvergenzrate des Mischungsbereichs	$3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5}$ (e)
$D_{p,M}$	$5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Porendiffusionskonstante für das Material der Abdichtungen	–
h_{EB}	-241 mNN	Teufe der Firste des obersten Abbaus eines Einlagerungsbereichs	–
$K_{1,S}^{57}$	$1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$	Anfangspermeabilität der Abdichtung aus Salzbeton	$1 \cdot 10^{-19} - 1 \cdot 10^{-16}$ (l)
$K_3/K_{1,S}$	10'000 [-]	Permeabilitätsverhältnis der Modellabdichtung (Salzbeton) eines abgedichteten Einlagerungsbereichs vor und nach vollständiger Korrosion	1 – 10'000 (l)
M_{BFA}	$2,00 \cdot 10^7 \text{ kg}$	Masse BFA im Einlagerungsbereich, wirksam für Sorption	$6,67 \cdot 10^6 - 2,20 \cdot 10^7$ (l)
M_{ZEM}	$8,46 \cdot 10^5 \text{ kg}$	Masse Zementstein im Einlagerungsbereich, wirksam für Sorption	$2,10 \cdot 10^5 - 9,30 \cdot 10^5$ (l)
M_{H_2O}	$3,214 \cdot 10^6 \text{ kg}$	Masse des Wassers im Abfall	–
M_{VG}	$5,0 \cdot 10^7 \text{ kg}$	Zementmasse im Mischungsbereich eines Einlagerungsbereichs, wirksam für Sorption	$2,7 \cdot 10^7 - 7,3 \cdot 10^7$ (l)
V_A	$10'119 \text{ m}^3$	Abfallvolumen (Bulk)	–
V_{BFA}	$12'098 \text{ m}^3$	Volumen an BFA	–

⁵⁷ Der obere Wert der Bandbreite für K_1 ist sehr hoch gewählt; er liegt um 1 Größenordnung höher, als aufgrund der Materialeigenschaften des Salzbetons zu erwarten wäre. Bei den probabilistischen Rechnungen zeichnen sich die Realisierungen mit hohem K_1 durch frühzeitige Korrosion (und damit Ausfall) des Abdichtsystems aus; sie decken damit auch sehr unwahrscheinliche Szenarien ab.



Tabelle C-11: Allgemeine Parameter für das Südfeld mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (Basisparameter) (Fortsetzung)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
ε_1	0,02	Fließporosität des Versatzmaterials in der Abdichtung während Auspressphase	0,001 – 0,2 (l)
ε_A	0,410 [-]	Porosität des Abfalls	–
$\varepsilon_{S,tot}$	0,2 [-]	Gesamtporosität des Abdichtmaterials Salzbeton	0,15 – 0,25 (t)
η	0,8 [-]	Anteil des beteiligten Inventars an der Gasbildung	0,1 – 1,0 (l)
κ_L	2 [-]	Volumetrische Umlösekapazität an Salzbeton durch IP21-Lösung	1 – 3 (n)
$\rho_{B,ZEM}$	197 kg·m ⁻³	Masse Zementstein pro Volumeneinheit des Salzbetons	100 – 200 (t)

Tabelle C-12: Allgemeine Parameter für das Westfeld mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (Basisparameter)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
c_L	5·10 ⁻⁶ a ⁻¹	Volumenkonvergenzrate für unversetzte Hohlräume	2·10 ⁻⁶ – 2·10 ⁻⁵ (e)
c_{VG}	8·10 ⁻⁶ a ⁻¹	Volumenkonvergenzrate des Mischungsbereichs	3·10 ⁻⁶ – 3·10 ⁻⁵ (e)
$D_{p,M}$	5·10 ⁻¹⁰ m ² ·s ⁻¹	Porendiffusionskonstante für das Material der Abdichtungen	–
h_{EB}	-324 mNN	Teufe der Firste des obersten Abbaus eines Einlagerungsbereichs	–
M_{BFA}	1,55·10 ⁷ kg	Masse BFA im Einlagerungsbereich, wirksam für Sorption	1,00·10 ⁷ – 1,70·10 ⁷ (l)
M_{ZEM}	1,09·10 ⁷ kg	Masse Zementstein im Einlagerungsbereich, wirksam für Sorption	2,70·10 ⁶ – 1,20·10 ⁷ (l)
M_{H_2O}	9,577·10 ⁵ kg	Masse des Wassers im Abfall	–
M_{VG}	5,0·10 ⁷ kg	Zementmasse im Mischungsbereich eines Einlagerungsbereichs, wirksam für Sorption	2,7·10 ⁷ – 7,3·10 ⁷ (l)
V_A	18'637 m ³	Abfallvolumen (Bulk)	–
V_{BFA}	13'842 m ³	Volumen an BFA	–
ε_A	0,505 [-]	Porosität des Abfalls	–
η	0,8 [-]	Anteil des beteiligten Inventars an der Gasbildung	0,1 – 1,0 (l)
$\rho_{B,ZEM}$	197 kg·m ⁻³	Masse Zementstein pro Volumeneinheit des Salzbetons	100 – 200 (t)



Tabelle C-13: Allgemeine Parameter für das Ostfeld mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (Basisparameter)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
c_L	$1 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$	Volumenkonvergenzrate für unversetzte Hohlräume	$3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5}$ (e)
c_{VG}	$8 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$	Volumenkonvergenzrate des Mischungsbereichs	$3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5}$ (e)
$D_{p,M}$	$5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Porendiffusionskonstante für das Material der Abdichtungen	–
h_{EB}	-280 mNN	Teufe der Firste des obersten Abbaus eines Einlagerungsbereichs	–
$K_{1,M}^{58}$	$1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$	Anfangspermeabilität der Abdichtung aus Magnesiabeton	$1 \cdot 10^{-19} - 1 \cdot 10^{-15}$ (l)
$K_{1,S}^{59}$	$1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$	Anfangspermeabilität der Abdichtung aus Salzbeton	$1 \cdot 10^{-19} - 1 \cdot 10^{-15}$ (l)
$K_3/K_{1,M}$	10'000 [-]	Permeabilitätsverhältnis der Modellabdichtung (Magnesiabeton) eines abgedichteten Einlagerungsbereichs vor und nach vollständiger Korrosion	1 – 10'000 (l)
$K_3/K_{1,S}$	10'000 [-]	Permeabilitätsverhältnis der Modellabdichtung (Salzbeton) eines abgedichteten Einlagerungsbereichs vor und nach vollständiger Korrosion	1 – 10'000 (l)
M_{BFA}	0 kg	Masse BFA im Einlagerungsbereich, wirksam für Sorption	–
M_{ZEM}	$4,53 \cdot 10^6 \text{ kg}$	Masse Zementstein im Einlagerungsbereich, wirksam für Sorption	$1,10 \cdot 10^6 - 5,00 \cdot 10^6$ (l)
M_{H_2O}	$2,203 \cdot 10^5 \text{ kg}$	Masse des Wassers im Abfall	–
M_{VG}	$5,0 \cdot 10^7 \text{ kg}$	Zementmasse im Mischungsbereich eines Einlagerungsbereichs, wirksam für Sorption	$2,7 \cdot 10^7 - 7,3 \cdot 10^7$ (l)
V_A	$6'138 \text{ m}^3$	Abfallvolumen (Bulk)	–
V_{BFA}	0 m^3	Volumen an BFA	–
ε_1	0,02	Fließporosität des Versatzmaterials in der Abdichtung während Auspressphase	0,001 – 0,2 (l)
ε_A	0,522 [-]	Porosität des Abfalls	–
$\varepsilon_{M,tot}$	0,3 [-]	Gesamtporosität des Materials Magnesiabeton	0,25 – 0,35 (t)

⁵⁸ Der obere Wert der Bandbreite für K_1 ist sehr hoch gewählt; er liegt um 1 – 2 Größenordnungen höher, als aufgrund der Materialeigenschaften des Magnesiabetons zu erwarten wäre. Bei den probabilistischen Rechnungen zeichnen sich die Realisierungen mit hohem K_1 durch frühzeitige Korrosion (und damit Ausfall) der Abdichtung aus; sie decken damit auch sehr unwahrscheinliche Szenarien wie z.B. ein frühzeitiges Versagen einer Abdichtung ab.

⁵⁹ Der obere Wert der Bandbreite für K_1 ist sehr hoch gewählt; er liegt um 1 – 2 Größenordnungen höher, als aufgrund der Materialeigenschaften des Salzbetons zu erwarten wäre. Bei den probabilistischen Rechnungen zeichnen sich die Realisierungen mit hohem K_1 durch frühzeitige Korrosion (und damit Ausfall) der Abdichtung aus; sie decken damit auch sehr unwahrscheinliche Szenarien wie z.B. ein frühzeitiges Versagen einer Abdichtung ab.



Tabelle C-13: Allgemeine Parameter für das Ostfeld mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (Basisparameter) (Fortsetzung)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
$\varepsilon_{S,tot}$	0,2 [-]	Gesamtporosität des Abdichtmaterials Salzbeton	0,15 – 0,25 (t)
η	0,8 [-]	Anteil des beteiligten Inventars an der Gasbildung	0,1 – 1,0 (l)
κ_L	2 [-]	Volumetrische Umlösekapazität an Salzbeton durch IP21-Lösung	1 – 3 (n)
κ_M	0,48 [-]	Volumetrische Umlösekapazität an Magnesiabeton durch NaCl-Lösung	–
$\rho_{B,ZEM}$	197 kg·m ⁻³	Masse Zementstein pro Volumeneinheit des Salzbetons	100 – 200 (t)

Tabelle C-14: Allgemeine Parameter für das Nordfeld mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (Basisparameter)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
c_L	4·10 ⁻⁵ a ⁻¹	Volumenkonvergenzrate für unversetzte Hohlräume	1·10 ⁻⁵ – 1·10 ⁻⁴ (e)
c_{VG}	2·10 ⁻⁵ a ⁻¹	Volumenkonvergenzrate des Mischungsbereichs	6·10 ⁻⁶ – 6·10 ⁻⁵ (e)
$D_{p,M}$	5·10 ⁻¹⁰ m ² ·s ⁻¹	Porendiffusionskonstante für das Material der Abdichtungen	–
$K_{1,S}$	1·10 ⁻¹⁴ m ²	Anfangspermeabilität der Abdichtung aus Salzbeton	–
$K_3/K_{1,S}$	1 [-]	Permeabilitätsverhältnis der Modellabdichtung (Salzbeton) eines abgedichteten Einlagerungsbereichs vor und nach vollständiger Korrosion	–
M_{BFA}	0 kg	Masse BFA im Einlagerungsbereich, wirksam für Sorption	–
M_{ZEM}	4,72·10 ⁵ kg	Masse Zementstein im Einlagerungsbereich, wirksam für Sorption	1,20·10 ⁵ – 5,20·10 ⁵ (l)
M_{H_2O}	1,05·10 ⁵ kg	Masse des Wassers im Abfall	–
M_{VG}	8,0·10 ⁶ kg	Zementmasse im Mischungsbereich eines Einlagerungsbereichs, wirksam für Sorption	2,0·10 ⁶ – 1,6·10 ⁷ (l)
V_A	1'701 m ³	Abfallvolumen (Bulk)	–
V_{BFA}	0 m ³	Volumen an BFA	–
ε_1	0,02	Fließporosität des Versatzmaterials in der Abdichtung während Auspressphase	0,001 – 0,2 (l)
ε_A	0,651 [-]	Porosität des Abfalls	–
$\varepsilon_{S,tot}$	0,2 [-]	Gesamtporosität des Abdichtmaterials Salzbeton	0,15 – 0,25 (t)
η	0,8 [-]	Anteil des beteiligten Inventars an der Gasbildung	0,1 – 1,0 (l)



Tabelle C-14: Allgemeine Parameter für das Nordfeld mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (Basisparameter) (Fortsetzung)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
κ_L	2 [-]	Volumetrische Umlösekapazität an Salzbeton durch IP21-Lösung	1 – 3 (n)
$\rho_{B,ZEM}$	197 kg·m ⁻³	Masse Zementstein pro Volumeneinheit des Salzbetons	100 – 200 (t)

Tabelle C-15: Allgemeine Parameter für den Zentralteil mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (Basisparameter)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
c_L	$8 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$	Volumenkonvergenzrate für unversetzte Hohlräume	$3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5}$ (e)
c_{VG}	$8 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$	Volumenkonvergenzrate des Mischungsbereichs	$3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5}$ (e)
$D_{p,M}$	$5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Porendiffusionskonstante für das Material der Abdichtungen	–
$K_{1,S}$	$1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$	Anfangspermeabilität der Abdichtung aus Salzbeton	–
$K_3/K_{1,S}$	1 [-]	Permeabilitätsverhältnis der Modellabdichtung (Salzbeton) eines abgedichteten Einlagerungsbereichs vor und nach vollständiger Korrosion	–
M_{BFA}	0 kg	Masse BFA im Einlagerungsbereich, wirksam für Sorption	$0 - 1,65 \cdot 10^5$ (t)
M_{ZEM}	$1,7 \cdot 10^4 \text{ kg}$	Masse Zementstein im Einlagerungsbereich, wirksam für Sorption	$0 - 1,9 \cdot 10^4$ (t)
M_{H_2O}	$1,39 \cdot 10^4 \text{ kg}$	Masse des Wassers im Abfall	–
M_{VG}	$5,0 \cdot 10^7 \text{ kg}$	Zementmasse im Mischungsbereich eines Einlagerungsbereichs, wirksam für Sorption	$2,7 \cdot 10^7 - 7,3 \cdot 10^7$ (l)
V_A	133 m ³	Abfallvolumen (Bulk)	–
V_{BFA}	150 m ³	Volumen an BFA	–
ε_1	0,02	Fließporosität des Versatzmaterials in der Abdichtung während Auspressphase	0,001 – 0,2 (l)
ε_A	0,675 [-]	Porosität des Abfalls	–
$\varepsilon_{S,tot}$	0,2 [-]	Gesamtporosität des Abdichtmaterials Salzbeton	0,15 – 0,25 (t)
η	0,8 [-]	Anteil des beteiligten Inventars an der Gasbildung	0,1 – 1,0 (l)
κ_L	2 [-]	Volumetrische Umlösekapazität an Salzbeton durch IP21-Lösung	1 – 3 (n)
$\rho_{B,ZEM}$	197 kg·m ⁻³	Masse Zementstein pro Volumeneinheit des Salzbetons	100 – 200 (t)

Tabelle C-16: Allgemeine Parameter für das West-Südfeld mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (modellspezifische Parameter)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
Δt_{frac}	1 a	Zeitdauer des Druckabbaus nach Frac-Bildung	–
$Q_{g,1e2,tot}$	$7,36 \cdot 10^3 \text{ m}^3_{\text{STP}} \cdot \text{a}^{-1}$	Gasbildungsrate im Einlagerungsbereich bei 100 a	$5,09 \cdot 10^2 - 1,7 \cdot 10^4$ (l)
$Q_{g,1e4,tot}$	$1,09 \cdot 10^2 \text{ m}^3_{\text{STP}} \cdot \text{a}^{-1}$	Gasbildungsrate im Einlagerungsbereich bei 10'000 a	$3,63 - 3,57 \cdot 10^2$ (l)
$V_{g,STP,tot}$	$1,37 \cdot 10^7 \text{ m}^3_{\text{STP}}$	Gesamte gebildete Gasmenge im Einlagerungsbereich	$5,24 \cdot 10^6 - 2,28 \cdot 10^7$ (l)
V_{EH}	$188'579 \text{ m}^3$	Gesamtvolumen der Einlagerungsgrubenbaue	$166'850 - 217'798$ (n)
V_{REB}	$1'142'827 \text{ m}^3$	Gesamtvolumen des restlichen Einlagerungsbereiches	$305'061 - 1'210'018$ (t)
V_{VG}	$395'288 \text{ m}^3$	Gesamtvolumen des Mischungsbereichs	$153'390 - 485'148$ (t)
V_{VGD}	500 m^3	Numerisches nichtkonvergierendes Zusatzvolumen des Mischungsbereichs	–
η_{lim}	0,2 [-]	Anteil des mit der Anfangsflüssigkeit stöchiometrisch gebildeten Gasvolumens am totalen Gasvolumen im Einlagerungsbereich	$0,1 - 0,3$ (n)
γ	1'000 [-]	Reduktionsfaktor für die Konvergenzrate des wirksamen Porenvolumens des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im Einlagerungsbereich	–
γ_{VG}	1'000 [-]	Reduktionsfaktor für die Konvergenzrate des wirksamen Porenvolumens des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im Mischungsbereich	–
θ_{Rest}	1 [-]	Schwellenwert für das Verhältnis aus neu zugetretener Lösungsmenge und Anfangsflüssigkeit im Einlagerungsbereich	$0,1 - 10$ (l)
$\zeta_{EH,k}$	0,949 [-]	Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz in den Einlagerungsgrubenbauen	$0,939 - 0,959$ (n)
$\zeta_{EH,t}$	0,902 [-]	Totaler Verfüllgrad für die Einlagerungsgrubenbaue	$0,878 - 0,923$ (n)
$\zeta_{REB,k}$	0,420 [-]	Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz in den restlichen Einlagerungsbereichen	$0,390 - 0,449$ (n)
$\zeta_{REB,t}$	0,715 [-]	Totaler Verfüllgrad für die restlichen Einlagerungsbereiche	$0,695 - 0,734$ (n)



Tabelle C-16: Allgemeine Parameter für das West-Südfeld mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (modellspezifische Parameter) (Fortsetzung)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
$\zeta_{VG,k}$	0,019 [-]	Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz im Mischungsbereich	0,019 – 0,105 (n)
$\zeta_{VG,t}$	0,934 [-]	Totaler Verfüllgrad für den Mischungsbereich	0,923 – 0,987 (n)

Tabelle C-17: Allgemeine Parameter für das Ostfeld mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (modellspezifische Parameter)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
Δt_{frac}	1 a	Zeitdauer des Druckabbaus nach Fracbildung	–
$Q_{g,1e2,tot}$	$2,50 \cdot 10^3 \text{ m}^3_{STP} \cdot \text{a}^{-1}$	Gasbildungsrate im Einlagerungsbereich bei 100 a	$1,19 \cdot 10^2 - 6,49 \cdot 10^3$ (l)
$Q_{g,1e4,tot}$	$2,04 \cdot 10^1 \text{ m}^3_{STP} \cdot \text{a}^{-1}$	Gasbildungsrate im Einlagerungsbereich bei 10'000 a	$8,18 \cdot 10^{-1} - 7,03 \cdot 10^1$ (l)
$V_{g,STP,tot}$	$2,96 \cdot 10^6 \text{ m}^3_{STP}$	Gesamte gebildete Gasmenge im Einlagerungsbereich	$1,67 \cdot 10^6 - 4,72 \cdot 10^6$ (l)
V_{EH}	53'429 m ³	Gesamtvolumen der Einlagerungsgrubenbaue	49'448 – 57'963 (t)
V_{REB}	178'754 m ³	Gesamtvolumen des restlichen Einlagerungsbereiches	0 – 265'086 (t)
V_{VG}	395'288 m ³	Gesamtvolumen des Mischungsbereichs	153'390 – 485'148 (t)
V_{VGD}	500 m ³	Numerisches nichtkonvergierendes Zusatzvolumen des Mischungsbereichs	–
η_{lim}	0,25 [-]	Anteil des mit der Anfangsflüssigkeit stöchiometrisch gebildeten Gasvolumens am totalen Gasvolumen im Einlagerungsbereich	0,1 – 0,4 (n)
γ	1'000 [-]	Reduktionsfaktor für die Konvergenzrate des wirksamen Porenvolumens des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im Einlagerungsbereich	–
γ_{VG}	1'000 [-]	Reduktionsfaktor für die Konvergenzrate des wirksamen Porenvolumens des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im Mischungsbereich	–
θ_{Rest}	1 [-]	Schwellenwert für das Verhältnis aus neu zugetretener Lösungsmenge und Anfangsflüssigkeit im Einlagerungsbereich	0,1 – 10 (l)



Tabelle C-17: Allgemeine Parameter für das Ostfeld mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (modellspezifische Parameter) (Fortsetzung)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
$\zeta_{EH,k}$	0,372 [-]	Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz in den Einlagerungsgrubenbauen	0,332 – 0,417 (n)
$\zeta_{EH,t}$	1 [-]	Totaler Verfüllgrad für die Einlagerungsgrubenbaue	–
$\zeta_{REB,k}$	0,246 [-]	Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz in den restlichen Einlagerungsbereichen	0,176 – 0,246 (n)
$\zeta_{REB,t}$	0,815 [-]	Totaler Verfüllgrad für die restlichen Einlagerungsbereiche	0,732 – 0,815 (n)
$\zeta_{VG,k}$	0,019 [-]	Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz im Mischungsbereich	0,019 – 0,105 (n)
$\zeta_{VG,t}$	0,934 [-]	Totaler Verfüllgrad für den Mischungsbereich	0,923 – 0,987 (n)

Tabelle C-18: Allgemeine Parameter für das Nordfeld mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (modellspezifische Parameter)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
Δt_{frac}	1 a	Zeitdauer des Druckabbaus nach Fracbildung	–
$Q_{g,1e2,tot}$	$3,63 \cdot 10^2 \text{ m}^3_{STP} \cdot \text{a}^{-1}$	Gasbildungsrate im Einlagerungsbereich bei 100 a	$2,31 \cdot 10^1 – 7,21 \cdot 10^2$ (l)
$Q_{g,1e4,tot}$	$2,75 \cdot 10^0 \text{ m}^3_{STP} \cdot \text{a}^{-1}$	Gasbildungsrate im Einlagerungsbereich bei 10'000 a	$1,26 \cdot 10^{-1} – 1,01 \cdot 10^1$ (l)
$V_{g,STP,tot}$	$3,0 \cdot 10^5 \text{ m}^3_{STP}$	Gesamte gebildete Gasmenge im Einlagerungsbereich	$2,33 \cdot 10^5 – 1,07 \cdot 10^6$ (l)
V_{EH}	$2'136 \text{ m}^3$	Gesamtvolumen der Einlagerungsgrubenbaue	$2'133 – 2'139$ (t)
V_{REB}	0 m^3	Gesamtvolumen des restlichen Einlagerungsbereiches	–
V_{VG}	$100'251 \text{ m}^3$	Gesamtvolumen des Mischungsbereichs	$76'584 – 139'500$ (t)
V_{VGD}	500 m^3	Numerisches nichtkonvergierendes Zusatzvolumen des Mischungsbereichs	–
η_{lim}	0,001 [-]	Anteil des mit der Anfangsflüssigkeit stöchiometrisch gebildeten Gasvolumens am totalen Gasvolumen im Einlagerungsbereich	–



Tabelle C-18: Allgemeine Parameter für das Nordfeld mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (modellspezifische Parameter) (Fortsetzung)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
γ	1'000 [-]	Reduktionsfaktor für die Konvergenzrate des wirksamen Porenvolumens des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im Einlagerungsbereich	–
γ_{VG}	1'000 [-]	Reduktionsfaktor für die Konvergenzrate des wirksamen Porenvolumens des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im Mischungsbereich	–
θ_{Rest}	0,3 [-]	Schwellenwert für das Verhältnis aus neu zugetretener Lösungsmenge und Anfangsflüssigkeit im Einlagerungsbereich	–
$\zeta_{EH,t}$	0,799 [-]	Totaler Verfüllgrad für die Einlagerungsgrubenbaue	0,798 – 0,800 (n)
$\zeta_{EH,k}$	0,997 [-]	Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz in den Einlagerungsgrubenbauen	0,997 – 0,997 (n)
$\zeta_{REB,k}$	1 [-]	Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz in den restlichen Einlagerungsbereichen	–
$\zeta_{REB,t}$	1 [-]	Totaler Verfüllgrad für die restlichen Einlagerungsbereiche	–
$\zeta_{VG,k}$	0,000 [-]	Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz im Mischungsbereich	0,000 – 0,080 (n)
$\zeta_{VG,t}$	0,727 [-]	Totaler Verfüllgrad für den Mischungsbereich	0,727 – 0,856 (n)

Tabelle C-19: Allgemeine Parameter für den Zentralteil mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (modellspezifische Parameter)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
Δt_{frac}	1 a	Zeitdauer des Druckabbaus nach Frac-Bildung	–
$Q_{g,1e2,tot}$	$1,01 \cdot 10^2 \text{ m}^3_{STP} \cdot \text{a}^{-1}$	Gasbildungsrate im Einlagerungsbereich bei 100 a	$1,49 \cdot 10^0 – 2,79 \cdot 10^2$ (l)
$Q_{g,1e4,tot}$	$6,73 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3_{STP} \cdot \text{a}^{-1}$	Gasbildungsrate im Einlagerungsbereich bei 10'000 a	$6,93 \cdot 10^{-4} – 1,19 \cdot 10^0$ (l)
$V_{g,STP,tot}$	$6,10 \cdot 10^4 \text{ m}^3_{STP}$	Gesamte gebildete Gasmenge im Einlagerungsbereich	$4,35 \cdot 10^4 – 8,26 \cdot 10^4$ (l)
V_{EH}	$66'236 \text{ m}^3$	Gesamtvolumen der Einlagerungsgrubenbaue	54'780 – 81'309 (t)



Tabelle C-19: Allgemeine Parameter für den Zentralteil mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (modellspezifische Parameter) (Fortsetzung)

Parameter	Wert	Beschreibung	Bandbreite
V_{REB}	0 m ³	Gesamtvolumen des restlichen Einlagerungsbereiches	–
V_{VG}	395'288 m ³	Gesamtvolumen des Mischungsbereichs	153'390 – 485'148 (t)
V_{VGD}	500 m ³	Numerisches nichtkonvergierendes Zusatzvolumen des Mischungsbereichs	–
η_{lim}	0,001 [-]	Anteil des mit der Anfangsflüssigkeit stöchiometrisch gebildeten Gasvolumens am totalen Gasvolumen im Einlagerungsbereich	–
γ	1'000 [-]	Reduktionsfaktor für die Konvergenzrate des wirksamen Porenvolumens des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im Einlagerungsbereich	–
γ_{VG}	1'000 [-]	Reduktionsfaktor für die Konvergenzrate des wirksamen Porenvolumens des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im Mischungsbereich	–
θ_{Rest}	0,3 [-]	Schwellenwert für das Verhältnis aus neu zugetretener Lösungsmenge und Anfangsflüssigkeit im Einlagerungsbereich	–
$\zeta_{\text{EH,k}}$	0,517 [-]	Totaler Verfüllgrad für die Einlagerungsgrubenbaue	0,419 – 0,610 (n)
$\zeta_{\text{EH,t}}$	0,950 [-]	Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz in den Einlagerungsgrubenbauen	0,929 – 0,965 (n)
$\zeta_{\text{REB,k}}$	1 [-]	Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz in den restlichen Einlagerungsbereichen	–
$\zeta_{\text{REB,t}}$	1 [-]	Totaler Verfüllgrad für die restlichen Einlagerungsbereiche	–
$\zeta_{\text{VG,k}}$	0,019 [-]	Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz im Mischungsbereich	0,019 – 0,105 (n)
$\zeta_{\text{VG,t}}$	0,934 [-]	Totaler Verfüllgrad für den Mischungsbereich	0,923 – 0,987 (n)

- Für die *Zeitdauer des Druckabbaus nach Frac-Bildung* (Δt_{frac}) ist eine Pulsdauer von 1 Jahr hinreichend kurz; eine weitere Verkleinerung beeinflusst die resultierende Radionuklidkonzentration nicht (vgl. Anhang F, Kapitel F.3.3).
- Die Parameter für die Gasbildung ($Q_{g,1e2,tot}$, $Q_{g,1e4,tot}$, $V_{g,STP,tot}$) sind modellspezifisch in PROSA verwendet. Sie basieren auf [Colenco 2002c].
- Das *Gesamtvolumen der Einlagerungsgrubenbaue* (V_{EH}) ist gleich der Summe aus den drei Teilvolumina „unverfülltes Volumen“, „mit kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ und „mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ (vgl. Anhang D).
- Das *Gesamtvolumen des restlichen Einlagerungsbereiches* (V_{REB}) ist gleich der Summe aus den drei Teilvolumina „unverfülltes Volumen“, „mit kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ und „mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ (vgl. Anhang D).
- Das *Gesamtvolumen des Mischungsbereichs* (V_{VG}) ist gleich der Summe aus den drei Teilvolumina „unverfülltes Volumen“, mit „kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ und „mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ (vgl. Anhang D).
- *Numerisches nichtkonvergierendes Zusatzvolumen des Mischungsbereichs* (V_{VGD}). Dieses Volumen ist aus numerischen Gründen notwendig, wird aber möglichst klein gewählt.
- Der *Anteil des mit der Anfangsflüssigkeit stöchiometrisch gebildeten Gasvolumens am totalen Gasvolumen im Einlagerungsbereich* (η_{Lim}) basiert auf [Colenco 2002c] und dem Anfangswassergehalt im Einlagerungsbereich, welcher sich aus der Masse des Wassers (M_{H2O}) und der Anfangsfeuchte im Salzgrusversatz zusammensetzt.
- Die Werte für den *Reduktionsfaktor für die Konvergenzrate des wirksamen Porenvolumens des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes* (γ bzw. γ_{GG}) sind numerische Werte für unendlich, d.h. dieser Versatz wird als de facto nicht kompaktierbar modelliert.
- Der *Schwellenwert für das Verhältnis aus neu zugetretener Lösungsmenge und Anfangsflüssigkeit im Einlagerungsbereich* (θ_{Rest}), bei dem eine evtl. unterbrochene Gasbildung nach Ende der Prologphase wieder einsetzt, ist abgeschätzt. Er kann in weiten Bereichen variiert werden, ohne die Resultate signifikant zu beeinflussen.
- Der *Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz in den Einlagerungsgrubenbauen* ($\zeta_{EH,k}$) wird berechnet aus den beiden Teilvolumina „mit kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ und „mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ (vgl. Anhang D).
- Der *totale Verfüllgrad für die Einlagerungsgrubenbaue* ($\zeta_{EH,t}$) wird berechnet aus den drei Teilvolumina „unverfülltes Volumen“, „mit kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ und „mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ (vgl. Anhang D).
- Der *Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz in den restlichen Einlagerungsbereichen* ($\zeta_{REB,k}$) wird berechnet aus den beiden Teilvolumina „mit kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ und „mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ (vgl. Anhang D).



- Der *totale Verfüllgrad für die restlichen Einlagerungsbereiche* ($\zeta_{REB,t}$) wird berechnet aus den drei Teilvolumina „unverfülltes Volumen“, „mit kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ und „mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ (vgl. Anhang D).
- Der *Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz im Mischungsbereich* ($\zeta_{VG,k}$) wird berechnet aus den beiden Teilvolumina „mit kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ und „mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ (vgl. Anhang D).
- Der *totale Verfüllgrad für den Mischungsbereich* ($\zeta_{VG,t}$) wird berechnet aus den drei Teilvolumina „unverfülltes Volumen“, „mit kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ und „mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfülltes Volumen“ (vgl. Anhang D).

Tabelle C-20: Allgemeine Parameter für die Einlagerungsbereiche mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (abgeleitete Parameter)

Parameter	Beschreibung	Verwendete (Basis-)Parameter
A_1	Effektive Querschnittsfläche der Abdichtung	$A_{AB,Index}, L_{AB,Index}$
I_{Nuklid}	Radionuklidinventar (für die einzelnen Radionuklide)	I_{Nuklid}
L_1	Effektive Länge der Abdichtung	$L_{AB,Index}$
m	Spannungsexponent in den Einlagerungsbereichen	m
m_{VG}	Spannungsexponent in den Mischungsbereichen	m
n_{por}	Anzahl Porenwasserzyklen zur Korrosion des Salzbetons	κ_L
p_{frac}	Kritischer Fluiddruck für Frac-Bildung	$h_{EB}, z_R, \rho_{lit}, g$
β_{EB}	Relative Abfallstapelhöhe	$V_A, V_{EH}, \zeta_{EH,t}, \zeta_{EH,k}$
$\varepsilon_{EB,v1,0}$	Porosität des kompaktierbaren Versatzes vor Konvergenz	$\varepsilon_{SG}, \varepsilon_{BFA}, \varepsilon_A, V_A, V_{BFA}, V_{EH}, V_{REB}, \zeta_{EH,t}, \zeta_{REB,t}, \zeta_{EH,k}, \zeta_{REB,k}$
$\varepsilon_{EB,v2,0}$	wirksame Porosität des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im Einlagerungsbereich	$\varepsilon_{SB}, \kappa_{SB}$
ε_r	Grenzporosität der Stützwirkung von kompaktierbarem Versatz in den Einlagerungsbereichen	ε_r
$\varepsilon_{VG,v1,0}$	Porosität des kompaktierbaren Versatzes im Mischungsbereich	ε_{SG}
$\varepsilon_{VG,v2,0}$	wirksame Porosität des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im Mischungsbereich	$\varepsilon_{SB}, \kappa_{SB}$
$\varepsilon_{VG,r}$	Grenzporosität der Stützwirkung von kompaktierbarem Versatz in den Mischungsbereichen	ε_r

Tabelle C-20: Allgemeine Parameter für die Einlagerungsbereiche mit Bandbreiten und Verteilungsfunktionen (abgeleitete Parameter) (Fortsetzung)

Parameter	Beschreibung	Verwendete (Basis-)Parameter
ϕ_A	Relativer Anfangsfüllgrad des kompaktierbaren Versatzes mit Flüssigkeit im Einlagerungsbereich	M_{H_2O} , V_A , V_{BFA} , V_{EH} , V_{REB} , $\varepsilon_{EB,0,1}$, ε_{SG} , ρ_{Hal} , ρ_W , ϕ_{SG} , $\zeta_{EH,k}$, $\zeta_{EH,t}$, $\zeta_{REB,k}$, $\zeta_{REB,t}$
ϕ_N	Relativer Anfangsfüllgrad des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes mit Flüssigkeit im Einlagerungsbereich	ϕ_{SB}

- Der effektive Querschnitt des Abdichtsystems (A_1) und die effektive Länge des Abdichtsystems (L_1) werden im Hinblick auf den hydraulischen Gesamtwiderstand aus den Querschnittsflächen und Längen der einzelnen Abdichtungen $A_{AB,Index}$ und $L_{AB,Index}$ berechnet (vgl. Anhang D, Kapitel D.2):

$$L_1 = \min \{ L_{AB,Index} \}$$

$$\frac{L_1}{A_1} = R_{hydr,tot} = \sum \frac{A_{AB,Index}}{L_{AB,Index}}$$

Die Bandbreite für A_1 eines Einlagerungsbereiches reicht vom jeweiligen Minimalwert der Einzelquerschnitte bis zur Summe der Einzelquerschnitte. Die Bandbreite für L_1 eines Einlagerungsbereiches reicht von 80% bis 150% des Referenzwertes. Beide Parameter sind normalverteilt. Zu beachten ist, dass für das gemeinsame West-Südfeld nur die Einzelabdichtungen des Südfeldes zur Ermittlung von L_1 und A_1 herangezogen werden dürfen. Für die Einlagerungsbereiche Nordfeld und Zentralteil werden keine wirksamen Abdichtungen angenommen. Ihnen wird als Querschnitt ein Wert von 20 m² und eine Länge von 1 m zugewiesen.

- Die in PROSA zu verwendenden Inventare besitzen keine Bandbreite und werden wie folgt ermittelt:

$$I_{Nuklid,West/Südfeld} = I_{Nuklid,Westfeld} + I_{Nuklid,Südfeld}$$

$$I_{Nuklid,Ostfeld} = I_{Nuklid,Ostfeld}$$

$$I_{Nuklid,Nordfeld} = I_{Nuklid,Nordfeld} + I_{Nuklid,UMF}$$

$$I_{Nuklid,Zentralteil} = I_{Nuklid,Zentralteil}$$

- Der Spannungsexponent in den Einlagerungsbereichen (m nach PROSA) ist gleich dem Spannungsexponent im Grubengebäude (m als Basisparameter).

$$m^{PROSA} = m^{Basis} = 5 \text{ (ohne Bandbreite)}$$

- Der Spannungsexponent in den Mischungsbereichen (m_{VG}) ist gleich dem Spannungsexponent im Grubengebäude (m):

$$m_{VG} = m = 5 \text{ (ohne Bandbreite)}$$



- Der *kritische Fluiddruck für Frac-Bildung* (p_{frac}) wird ermittelt aus den Teufen h_{EB} und z_{R} , der Dichte ρ_{lit} und der Erdbeschleunigung (g):

$$p_{\text{frac}} = (z_{\text{R}} - h_{\text{EB}}) \cdot \rho_{\text{lit}} \cdot g = 8,03 \cdot 10^6 \text{ Pa für das WSF bzw. } 8,87 \cdot 10^6 \text{ Pa für das OF (ohne Bandbreite)}$$

Mit dem Verfüllkonzept ist keine Frac-Bildung für das Nordfeld und den Zentralteil möglich. Es wird daher für diese beiden Einlagerungsbereiche ein modelltechnischer Wert von 1'000 MPa verwendet.

- Die *relative Abfallstapelhöhe* (β_{EB}) wird näherungsweise bestimmt aus dem Verhältnis der Volumina von Abfall im Einlagerungsbereich (V_{A}) und vom kompaktierbaren Versatz in den Einlagerungsgrubenbauen (Altversatz) ($V_{\text{EH}} \cdot \zeta_{\text{EH,t}} \cdot \zeta_{\text{EH,k}}$):

$$\beta_{\text{EB}} = V_{\text{A}} / V_{\text{EH}} \cdot \zeta_{\text{EH,t}} \cdot \zeta_{\text{EH,k}}$$

Bandbreite = 50% bis 150% des Referenzwerts

Für das Ostfeld ergibt sich somit $\beta_{\text{EB}} = 0,309$ (0,154 – 0,463). Der Parameter ist normalverteilt.

Für die anderen Einlagerungsbereiche gilt:

NF: $\beta_{\text{EB}} = 0,95$ Bandbreite = 0,8 bis 1,0

WSF und ZT: $\beta_{\text{EB}} = 0,001$ (für den zusammengesetzten ELB WSF kann kein β_{EB} berechnet werden)

- Die *Gesamtporosität des kompaktierbaren Versatzes vor Konvergenz* ($\varepsilon_{\text{EB},0,1}$) wird berechnet aus den Porositäten und Volumina für Salzgrus, BFA und Abfall (ε_{SG} , ε_{BFA} , ε_{A} , V_{BFA} , V_{A} , $V_{\text{EH}} \cdot \zeta_{\text{EH,t}} \cdot \zeta_{\text{EH,k}}$, $V_{\text{REB}} \cdot \zeta_{\text{REB,t}} \cdot \zeta_{\text{REB,k}}$) im gesamten Einlagerungsbereich:

$$\varepsilon_{\text{EB},v1,0} = \frac{\varepsilon_{\text{BFA}} \cdot V_{\text{BFA}} + \varepsilon_{\text{A}} \cdot V_{\text{A}} + \varepsilon_{\text{SG}} \cdot (V_{\text{REB}} \cdot \zeta_{\text{REB,t}} \cdot \zeta_{\text{REB,k}} + V_{\text{EH}} \cdot \zeta_{\text{EH,t}} \cdot \zeta_{\text{EH,k}} - V_{\text{A}} - V_{\text{BFA}})}{V_{\text{REB}} \cdot \zeta_{\text{REB,t}} \cdot \zeta_{\text{REB,k}} + V_{\text{EH}} \cdot \zeta_{\text{EH,t}} \cdot \zeta_{\text{EH,k}}}$$

WSF: 0,403

OF: 0,413

NF: 0,651

ZT: 0,401

(alle ohne Bandbreite)

- Die *wirksame Porosität des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im Einlagerungsbereich* ($\varepsilon_{\text{EB},0,2}$) ist gleich der *Porosität des Salzbetons* (ε_{SB}), multipliziert mit dem Porositätsfaktor (κ_{SB}):

$$\varepsilon_{\text{EB},v2,0} = \varepsilon_{\text{SB}} \cdot \kappa_{\text{SB}} = 2,0 \cdot 10^{-4}$$

Auf die Festlegung einer Bandbreite kann verzichtet werden, denn die entsprechende verfügbare Lösungsmenge ist gering im Vergleich mit jener im kompaktierbaren Versatz ($\varphi_{\text{A}} \cdot \varepsilon_{\text{EB},v1,0}$).

- Die *Gesamtporosität des Salzbetons im Abdichtsystem* ($\varepsilon_{\text{M,tot}}$) ist gleich der *Porosität des Salzbetons* (ε_{SB}):

$$\varepsilon_{\text{M,tot}} = \varepsilon_{\text{SB}} = 0,2 \text{ (0,15 – 0,25)}$$

Dies gilt auch für die Bandbreite. Der Parameter ist triangular verteilt.



- Die Grenzporosität der Stützwirkung von kompaktierbarem Versatz in den Einlagerungsbereichen (ε_r nach PROSA) ist gleich der Grenzporosität der Stützwirkung von kompaktierbarem Versatz im Grubengebäude (ε_r aus Datenbank).

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r = 0,3 \text{ (ohne Bandbreite)}$$

- Die Porosität des kompaktierbaren Versatzes vor Konvergenz im Mischungsbereich ($\varepsilon_{VG,0,1}$) ist gleich der Porosität des Salzgrusversatzes (ε_{SG}):

$$\varepsilon_{VG,v1,0} = \varepsilon_{SG} = 0,4 \text{ (ohne Bandbreite)}$$

- Die Porosität des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes im Mischungsbereich ($\varepsilon_{VG,0,2}$) ist gleich der Porosität des Salzbetons (ε_{SB}) multipliziert mit dem Porositätsfaktor (κ_{SB}):

$$\varepsilon_{VG,v2,0} = \varepsilon_{SB} \cdot \kappa_{SB} = 2,0 \cdot 10^{-4} (1,5 \cdot 10^{-4} - 2,5 \cdot 10^{-4})$$

Die Bandbreite ist hier ohne Bedeutung, da das Porenwasser von kompaktierbarem Versatz überwiegt.

- Die Grenzporosität der Stützwirkung von kompaktierbarem Versatz in den Einlagerungsbereichen ($\varepsilon_{VG,r}$) ist gleich der Grenzporosität der Stützwirkung von kompaktierbarem Versatz im Grubengebäude (ε_r):

$$\varepsilon_{VG,r} = \varepsilon_r = 0,3 \text{ (ohne Bandbreite)}$$

- Der relative Anfangsfüllgrad des kompaktierbaren Versatzes mit Flüssigkeit (ϕ_A) wird berechnet aus dem Volumen des kompaktierbaren Versatzes im Einlagerungsgrubenbau ($V_{EH} \cdot \zeta_{EH,t} \cdot \zeta_{EH,k}$) und im restlichen Einlagerungsbereich ($V_{REB} \cdot \zeta_{REB,t} \cdot \zeta_{REB,k}$), dem Volumen der BFA (V_{BFA}) und des Abfalls (V_A), der Porosität und der Restfeuchte im Salzgrus (ε_{SG} , ϕ_{SG}), der Porosität des kompaktierbaren Versatzes im Einlagerungsbereich ($\varepsilon_{EB,v1,0}$), der Masse Wasser im Abfall (M_{H_2O}), der Feststoffdichte von Steinsalz (ρ_{Hal}) und der Dichte von Wasser (ρ_W):

$$\phi_A = \frac{(V_{EH} \cdot \zeta_{EH,t} \cdot \zeta_{EH,k} - V_A - V_{BFA} + V_{REB} \cdot \zeta_{REB,t} \cdot \zeta_{REB,k}) \cdot (1 - \varepsilon_{SG}) \cdot \rho_{Hal} \cdot \frac{\phi_{SG}}{100 \cdot \rho_W} + \frac{M_{H_2O}}{\rho_W}}{(V_{EH} \cdot \zeta_{EH,t} \cdot \zeta_{EH,k} + V_{REB} \cdot \zeta_{REB,t} \cdot \zeta_{REB,k} \cdot \varepsilon_{SG}) \cdot \varepsilon_{EB,v1,0}}$$

$$\text{WSF: } 0,0293 \text{ (0 - 0,0593)} \quad \text{OF: } 0,0183 \text{ (0 - 0,0423)}$$

$$\text{NF: } 0,0948 \text{ (0 - 0,0950)} \quad \text{ZT: } 0,0107 \text{ (0 - 0,0176)}$$

Für das Minimum wird ein Wert von 0 angenommen. Für das Maximum wird zur Berechnung das Minimum für $V_{EH} \cdot \zeta_{EH,t} \cdot \zeta_{EH,k}$ und $V_{REB} \cdot \zeta_{REB,t} \cdot \zeta_{REB,k}$ und das Maximum von ϕ_{SG} verwendet⁶⁰. Der Parameter ist normalverteilt.

- Der relative Anfangsfüllgrad des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes mit Flüssigkeit im Einlagerungsbereich (ϕ_N nach PROSA) ist gleich dem relativen Anfangsfüllgrad des nicht

⁶⁰ Aus dem relativen Anfangsfüllgrad und dem Porenvolumen wird im Modell die Anfangsflüssigkeitsmenge im Einlagerungsbereich berechnet. Die Vernachlässigung der Korrelation von ϕ_A und V_{REB} kann dazu führen, dass probabilistisch gewählte Anfangsflüssigkeitsmengen größer sind als diejenigen, die mit Abfällen und Salzgrus eingebracht werden können.



oder gering kompaktierbaren Versatzes mit Flüssigkeit im Grubengebäude (ϕ_N aus Datenbank). Der Parameter ist normalverteilt.

$$\phi_N^{\text{PROSA}} = \phi_N^{\text{Basis}} = 1 \text{ (0,95 - 1,05)}$$

C.2 Elementspezifische Parameter

Die Elemente unterscheiden sich in ihren chemischen Eigenschaften. Eigenschaften, die für die Modellrechnungen relevant sind, sind Sorptionsverhalten an verschiedenen Materialien (Zement und BFA in den Einlagerungsbereichen, Grauer Salztön der Schichtenfolge DGL stellvertretend für den Transportpfad durch Hutgestein und Deckgebirge, Sedimente der oberflächennahen Grundwasserträger). Ferner kann die Löslichkeitsgrenze einen wesentlichen Einfluss auf die Mobilisierung von Radionukliden haben.

C.2.1 Elementspezifische Parameter für das oberflächennahe Grundwasser

Die K_d -Werte für den Transport im oberflächennahen Grundwasser (Tabelle C-21) wurden an vergleichbaren Sedimenten im Bereich des Projekts Gorleben ermittelt [Colenco 1998]. Dabei wurde sowohl die Sedimentzusammensetzung als auch die Salinität des Grundwassers berücksichtigt. Sie stellen Basisparameter dar.

Tabelle C-21: K_d -Werte für den Transport im oberflächennahen Grundwasser (Oberkreide).

Element	K_d [m^3/kg]	Element	K_d [m^3/kg]
Ac	$3,0 \cdot 10^{-1}$	Pa	$6,0 \cdot 10^{-1}$
Am	$1,0 \cdot 10^{-1}$	Pb	$1,0 \cdot 10^0$
Bi	$1,7 \cdot 10^0$	Pd	$2,0 \cdot 10^{-1}$
C_{carb}	$2,0 \cdot 10^{-4}$	Po	$1,2 \cdot 10^0$
C_{meth}	0	Pu	$1,0 \cdot 10^{-1}$
C_{org}	0	Ra	$4,0 \cdot 10^{-2}$
Ca	$2,0 \cdot 10^{-3}$	Rb	$2,0 \cdot 10^{-3}$
Cl	$1,0 \cdot 10^{-4}$	Se	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Cm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	Sm	$5,0 \cdot 10^{-2}$
Co	$1,0 \cdot 10^{-2}$	Sn	$4,0 \cdot 10^{-2}$
Cs	$7,0 \cdot 10^{-2}$	Sr	$2,0 \cdot 10^{-3}$
I	$2,0 \cdot 10^{-3}$	Tc	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Mo	0	Th	$2,0 \cdot 10^{-1}$
Nb	$6,0 \cdot 10^{-2}$	U	$2,0 \cdot 10^{-3}$
Ni	$2,0 \cdot 10^{-2}$	Zr	$4,0 \cdot 10^{-2}$
Np	$1,0 \cdot 10^{-2}$		

C.2.2 Elementspezifische Parameter für den Transportpfad durch Hutgestein und Deckgebirge

Die K_d -Werte für den Grauen Salztön (Tabelle C-22) wurden für die wichtigsten Elemente (Am, C_{carb} , Cs, Pu, Ra und U) experimentell bestimmt [INE 2003]. Entsprechend einer konservativen



Herangehensweise wurde immer der kleinste K_d -Wert aus dem System Salzbeton/IP21-Lösung/Salztön zu Grunde gelegt. Für die meisten anderen Elemente stammen sie aus einem Datensatz für die Unterkreide im Deckgebirge des Endlagers Konrad [PTB 1986], auf die ein Reduktionsfaktor von 70 % aufgrund des vergleichsweise geringeren Tonanteils der Schichtfolge von Morsleben angewendet wurde⁶¹. Für einige Elemente (Ca, Co, Rb, Sm, Pd) wurden Abschätzungen aufgrund chemisch ähnlicher Elemente (Sr, Ni, Cs, Am) durchgeführt. Für die Elemente Bi, Cl, I, Mo, Po und Sn sowie die organischen ¹⁴C-Spezies wurden die K_d -Werte konservativ auf 0 gesetzt.

Tabelle C-22: K_d -Werte für das Deckgebirge.

Element	K_d [m^3/kg]	Element	K_d [m^3/kg]
Ac	$4,9 \cdot 10^{-1}$	Pa	$7,0 \cdot 10^{-1}$
Am	$4,0 \cdot 10^{-1}$	Pb	$2,8 \cdot 10^{-2}$
Bi	0	Pd	$1,4 \cdot 10^{-2}$
C _{carb}	$3,0 \cdot 10^{-3}$	Po	0
C _{meth}	0	Pu	$4,0 \cdot 10^{-1}$
C _{org}	0	Ra	$4,0 \cdot 10^{-3}$
Ca	$1,4 \cdot 10^{-4}$	Rb	$3,5 \cdot 10^{-2}$
Cl	0	Se	$3,5 \cdot 10^{-4}$
Cm	$7,0 \cdot 10^{-1}$	Sm	$7,0 \cdot 10^{-1}$
Co	$1,4 \cdot 10^{-2}$	Sn	0
Cs	$3,0 \cdot 10^{-3}$	Sr	$1,4 \cdot 10^{-4}$
I	0	Tc	$3,5 \cdot 10^{-4}$
Mo	0	Th	$7,0 \cdot 10^{-1}$
Nb	$7,0 \cdot 10^{-1}$	U	$2,0 \cdot 10^{-1}$
Ni	$1,4 \cdot 10^{-2}$	Zr	$7,0 \cdot 10^{-1}$
Np	$4,2 \cdot 10^{-2}$		

C.2.3 Elementspezifische Parameter für die Einlagerungsbereiche

Für die Einlagerungsbereiche sind die Sorption an Zement und BFA ($K_{d,BFA}$, $K_{d,ZEM}$), die Löslichkeitsgrenze (C_{sol}), aber auch die Konzentration an nicht radioaktiven Isotopen eines Elements (C_{norad}) von Bedeutung.

Wegen der Unsicherheit bezüglich des chemischen Milieus im Grubengebäude wird die Sorption konservativ vernachlässigt, d.h. die Sorption von Elementen wird sowohl an BFA als auch an Zement im Modell nicht berücksichtigt (K_d -Wert = 0 m^3/kg). Analog wird bei der Berücksichtigung der Löslichkeitsgrenzen vorgegangen: Es wird für keines der Elemente eine Löslichkeitsbegrenzung unterstellt, außer für den carbonatischen Anteil des Kohlenstoffs. Dessen Löslichkeit hängt in weiten Bereichen kaum von der Lösungszusammensetzung ab. Es wird eine Löslichkeitsgrenze von $1 \cdot 10^{-5}$ mol/l (vgl. Anhang H) angenommen.

⁶¹ Die Abweichung der K_d -Werte, ausgehend vom Datensatz des Endlagers Konrad, für die in [Vejmelka 2003] untersuchten Elemente ergibt im Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen vertretbare Näherungswerte (die Unterschiede liegen etwa innerhalb einer Größenordnung).



Die Löslichkeitsgrenzen gelten elementspezifisch. Daher tragen auch stabile Isotope eines Elements zum Erreichen der Löslichkeitsgrenze bei, falls nennenswerte Konzentrationen eines (oder mehrerer) solcher stabiler Isotope vorliegen. In diesem Fall werden beim Überschreiten der Löslichkeitsgrenze die Isotope eines Elements gemäß ihrem jeweiligen Verhältnis ausgefällt, und die Konzentration dieses Elements in Lösung stellt sich auf den Wert der Löslichkeitsgrenze ein. Ein entsprechendes Inventar wird nur für ^{12}C -Kohlenstoff berücksichtigt. Aus der CO_2 -Menge, die aus mikrobieller Umbildung mit der gesamten zur Verfügung stehenden Nitratmenge resultiert, und dem Gesamthohlraumvolumen im entsprechenden Einlagerungsbereich (jeweils unter Verwendung der Referenzparameter) errechnet sich die Stoffmenge Carbonat pro Volumen (mit der Dimension einer Konzentration; Tabelle C-23). Der Quotient aus der Löslichkeitsgrenze für Carbonat (10^{-5} mol/l) und diesem Wert ergibt den Anteil des gelösten Carbonats. Dieser Anteil gilt auch für $^{14}\text{CO}_3^{2-}$.

Tabelle C-23: Theoretische $^{12}\text{CO}_3^{2-}$ Konzentration in den Einlagerungsbereichen

Bereich	theoretische Konzentration [mol/l]
Nordfeld	$2,50 \cdot 10^{-1}$
Ostfeld	$3,95 \cdot 10^{-2}$
West-Südfeld	$2,84 \cdot 10^{-2}$
Zentralteil	$1,26 \cdot 10^{-3}$

C.3 Radionuklidspezifische Parameter

Radionuklidspezifische Parameter existieren für die Einlagerungsbereiche (Inventare), die Biosphäre (Dosiskonversionsfaktoren, Kennwerte) und übergeordnet (Halbwertszeiten und Zuordnung zu bzw. innerhalb von Zerfallsketten).

C.3.1 Übergreifende, radionuklidspezifische Parameter

Die übergreifenden radionuklidspezifischen Parameter sind in ihrer Anwendung nicht auf einen einzelnen Bereich des Systems beschränkt. Entsprechende Parameter sind die Halbwertszeiten als Basisparameter und die Zugehörigkeit zu einer Zerfallsreihe bzw. die Position innerhalb der Zerfallsreihe als modellspezifische Parameter. Die Halbwertszeiten sind im Allgemeinen der "Karlsruher Nuklidkarte" [Pfennig 1998] entnommen. Als Halbwertszeit für ^{79}Se wurde $1,1 \cdot 10^6 \text{ a}$ verwendet. Die Zugehörigkeit zu einer Zerfallsreihe (CN) wird für Radionuklide der 4N-Kette, 4N+1-Kette, 4N+2-Kette und 4N+3-Kette mit den Ziffern 0, 1, 2 bzw. 3 belegt. Die übrigen Radionuklide, die nicht zu diesen Zerfallsreihen gehören, werden durchnummeriert. Innerhalb der Zerfallsreihen werden die Radionuklide in der Reihenfolge ihres Auftretens von 1 ausgehend durchnummeriert (CP). Radionuklide, die keiner Zerfallsreihe angehören, besitzen einheitlich den Wert $\text{CP} = 1$. Als Basis für diese Indizierung dient ebenfalls die "Karlsruher Nuklidkarte". Die Werte sind in Tabelle C-24 aufgelistet.



Tabelle C-24: Halbwertszeiten (in Jahren), Zugehörigkeit zu und Position in Zerfallsreihen

Nuklid	HWZ [a]	CN	CP
³ H	1,23·10 ¹	10	1
¹⁴ C _{carb}	5,73·10 ³	25	1
¹⁴ C _{meth}	5,73·10 ³	26	1
¹⁴ C _{org}	5,73·10 ³	24	1
³⁶ Cl	3,00·10 ⁵	6	1
⁴¹ Ca	1,03·10 ⁵	5	1
⁶⁰ Co	5,27·10 ⁰	7	1
⁵⁹ Ni	7,50·10 ⁴	14	1
⁶³ Ni	1,00·10 ²	15	1
⁷⁹ Se	1,10·10 ⁶	18	1
⁸⁷ Rb	4,80·10 ¹⁰	17	1
⁹⁰ Sr	2,86·10 ¹	21	1
⁹³ Zr	1,50·10 ⁶	23	1
⁹⁴ Nb	2,00·10 ⁴	13	1
⁹³ Mo	3,50·10 ³	12	1
⁹⁹ Tc	2,10·10 ⁵	22	1
¹⁰⁷ Pd	6,50·10 ⁶	16	1
¹²⁶ Sn	2,35·10 ⁵	20	1
¹²⁹ I	1,57·10 ⁷	11	1
¹³⁵ Cs	2,00·10 ⁶	8	1
¹³⁷ Cs	3,02·10 ¹	9	1
¹⁵¹ Sm	9,30·10 ¹	19	1
²⁴⁸ Cm	3,40·10 ⁵	0	1
²⁴⁴ Pu	8,00·10 ⁷	0	2
²⁴⁴ Cm	1,81·10 ¹	0	3
²⁴⁰ Pu	6,56·10 ³	0	4
²³⁶ U	2,34·10 ⁷	0	5
²³² Th	1,41·10 ¹⁰	0	6
²²⁸ Ra	5,75·10 ⁰	0	7
²²⁸ Th	1,91·10 ⁰	0	8
²²⁴ Ra	1,00·10 ⁻²	0	9
²⁴⁵ Cm	8,50·10 ³	1	1
²⁴¹ Pu	1,44·10 ¹	1	2
²⁴¹ Am	4,32·10 ²	1	3
²³⁷ Np	2,14·10 ⁶	1	4
²³³ Pa	7,39·10 ⁻²	1	5
²³³ U	1,59·10 ⁵	1	6
²²⁹ Th	7,88·10 ³	1	7

Tabelle C-24: Halbwertszeiten (in Jahren), Zugehörigkeit zu und Position in Zerfallsreihen (Fortsetzung)

Nuklid	HWZ [a]	CN	CP
²⁴⁶ Cm	$4,73 \cdot 10^3$	2	1
²⁴² Pu	$3,75 \cdot 10^5$	2	2
²³⁸ U	$4,47 \cdot 10^9$	2	3
²³⁴ U	$2,46 \cdot 10^5$	2	4
²³⁰ Th	$7,54 \cdot 10^4$	2	5
²²⁶ Ra	$1,60 \cdot 10^3$	2	6
²¹⁰ Pb	$2,23 \cdot 10^1$	2	7
²¹⁰ Bi	$1,37 \cdot 10^{-2}$	2	8
²¹⁰ Po	$3,79 \cdot 10^{-1}$	2	9
²⁴⁷ Cm	$1,56 \cdot 10^7$	3	1
²⁴³ Am	$7,37 \cdot 10^3$	3	2
²³⁹ Pu	$2,41 \cdot 10^4$	3	3
²³⁵ U	$7,04 \cdot 10^8$	3	4
²³¹ Pa	$3,28 \cdot 10^4$	3	5
²²⁷ Ac	$2,18 \cdot 10^1$	3	6
²²⁷ Th	$5,13 \cdot 10^{-2}$	3	7
²²³ Ra	$3,13 \cdot 10^{-2}$	3	8

C.3.2 Radionuklidspezifische Parameter für die Biosphäre

Aus den Konzentrationen der Radionuklide im oberflächennahen Grundwasser (inkl. ihrer Tochter-nuklide) werden die Dosiswerte D [Sv/a] mittels der in [Pröhl & Gering 2002] zusammengestellten Dosiskonversionsfaktoren DFE berechnet. Diese sind definiert (und wurden berechnet) als Effektivdosis der zu betrachtenden erwachsenen Einzelperson, die gemäß der allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 StrlSchV in einer Umgebung lebt und sich aus dieser ernährt, in der das Grundwasser die Konzentration von 1 Bq/l für das betrachtete Radionuklid aufweist.

Das radioaktive Gefährdungspotential des ERAM wird in diesem Bericht durch das radionuklid-spezifische Inventar und den jeweiligen Dosiskoeffizienten für die Ingestion DF_{Ing} – entsprechend den Werten der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) zur Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) – definiert.

In der Tabelle C-25 sind neben den Dosiskonversionsfaktoren und Dosiskoeffizienten für die Ingestion, die den Beitrag der relevanten – aber nicht aufgeführten – Töchter beinhalten, soweit diese nicht explizit berücksichtigt werden, die Halbwertszeiten der potentiell langzeitsicherheitsrelevanten Radionuklide sowie deren Inventar zum Zeitpunkt 30.06.2005 [BfS 2000a, BfS 2006 und BfS 2007] aufgeführt. In dieser Zusammenstellung ist das Inventar der Radium-VBA mit berücksichtigt.



Tabelle C-25: Halbwertszeiten, Dosiskonversionsfaktoren, Dosiskoeffizienten und Aktivitäten der potentiell langzeitsicherheitsrelevanten Radionuklide sowie ^3H , Co-60, Sr-90 und Cs-137 im ERAM zum Stichtag 30.06.2005

RN	HWZ [a]	DFE [Sv·l·Bq ⁻¹ ·a ⁻¹]	Dosiskoeffizient (Ing) [Sv·Bq ⁻¹]	Inventar [Bq]
^3H	$1,23 \cdot 10^1$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$3,18 \cdot 10^{12}$
^{14}C	$5,73 \cdot 10^3$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-10}$	$3,30 \cdot 10^{12}$
^{36}Cl	$3,00 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$9,3 \cdot 10^{-10}$	$3,87 \cdot 10^9$
^{41}Ca	$1,03 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$	$7,39 \cdot 10^7$
^{60}Co	$5,27 \cdot 10^0$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-9}$	$2,50 \cdot 10^{14}$
^{59}Ni	$7,50 \cdot 10^4$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$6,3 \cdot 10^{-11}$	$1,76 \cdot 10^{11}$
^{63}Ni	$1,00 \cdot 10^2$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$1,81 \cdot 10^{13}$
^{79}Se	$1,10 \cdot 10^6$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-9}$	$1,94 \cdot 10^8$
^{87}Rb	$4,80 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$2,71 \cdot 10^7$
^{90}Sr	$2,86 \cdot 10^1$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-8}$	$5,85 \cdot 10^{12}$
^{93}Zr	$1,50 \cdot 10^6$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$9,31 \cdot 10^9$
^{94}Nb	$2,00 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$2,71 \cdot 10^{10}$
^{93}Mo	$3,50 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-9}$	$2,41 \cdot 10^8$
^{99}Tc	$2,10 \cdot 10^5$	$8,8 \cdot 10^{-6}$	$6,4 \cdot 10^{-10}$	$1,03 \cdot 10^{11}$
^{107}Pd	$6,50 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$3,7 \cdot 10^{-11}$	$6,70 \cdot 10^7$
^{126}Sn	$2,35 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$4,7 \cdot 10^{-9}$	$2,42 \cdot 10^8$
^{129}I	$1,57 \cdot 10^7$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$2,13 \cdot 10^8$
^{135}Cs	$2,00 \cdot 10^6$	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-9}$	$3,71 \cdot 10^8$
^{137}Cs	$3,02 \cdot 10^1$	$9,5 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$1,38 \cdot 10^{14}$
^{151}Sm	$9,30 \cdot 10^1$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$9,8 \cdot 10^{-11}$	$2,74 \cdot 10^{11}$
^{248}Cm	$3,40 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-7}$	$2,20 \cdot 10^7$
^{244}Pu	$8,00 \cdot 10^7$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$2,08 \cdot 10^4$
^{244}Cm	$1,81 \cdot 10^1$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$6,60 \cdot 10^9$
^{240}Pu	$6,56 \cdot 10^3$	$9,6 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$6,56 \cdot 10^{10}$
^{236}U	$2,34 \cdot 10^7$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-8}$	$4,83 \cdot 10^7$
^{232}Th	$1,41 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$5,88 \cdot 10^6$
^{228}Ra	$5,75 \cdot 10^0$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-7}$	$8,21 \cdot 10^8$
^{228}Th	$1,91 \cdot 10^0$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-8}$	$1,25 \cdot 10^9$
^{224}Ra	$1,00 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{-8}$	$5,56 \cdot 10^7$
^{245}Cm	$8,50 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$2,25 \cdot 10^6$
^{241}Pu	$1,44 \cdot 10^1$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-9}$	$1,36 \cdot 10^{12}$
^{241}Am	$4,32 \cdot 10^2$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$2,19 \cdot 10^{11}$
^{237}Np	$2,14 \cdot 10^6$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$8,48 \cdot 10^7$
^{233}Pa	$7,39 \cdot 10^{-2}$	$8,8 \cdot 10^{-6}$	(in ^{237}Np)	-
^{233}U	$1,59 \cdot 10^5$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-8}$	$5,05 \cdot 10^6$
^{229}Th	$7,88 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-7}$	$4,53 \cdot 10^5$
^{246}Cm	$4,73 \cdot 10^3$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$2,65 \cdot 10^6$
^{242}Pu	$3,75 \cdot 10^5$	$9,4 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$1,17 \cdot 10^8$
^{238}U	$4,47 \cdot 10^9$	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-8}$	$4,36 \cdot 10^8$
^{234}U	$2,46 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-8}$	$1,14 \cdot 10^9$
^{230}Th	$7,54 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$1,72 \cdot 10^6$
^{226}Ra	$1,60 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$3,93 \cdot 10^{11}$



Tabelle C-25: Halbwertszeiten, Dosiskonversionsfaktoren, Dosiskoeffizienten und Aktivitäten der potentiell langzeitsicherheitsrelevanten Radionuklide sowie ^3H , Co-60, Sr-90 und Cs-137 im ERAM zum Stichtag 30.06.2005 (Fortsetzung)

RN	HWZ [a]	DFE [Sv·l·Bq ⁻¹ ·a ⁻¹]	Dosiskoeffizient (Ing) [Sv·Bq ⁻¹]	Inventar [Bq]
²¹⁰ Pb	$2,23 \cdot 10^1$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$1,30 \cdot 10^8$
²¹⁰ Bi	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	(in ²¹⁰ Pb)	-
²¹⁰ Po	$3,79 \cdot 10^{-1}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	(in ²¹⁰ Pb)	-
²⁴⁷ Cm	$1,56 \cdot 10^7$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$2,63 \cdot 10^4$
²⁴³ Am	$7,37 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$9,53 \cdot 10^7$
²³⁹ Pu	$2,41 \cdot 10^4$	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$6,83 \cdot 10^{10}$
²³⁵ U	$7,04 \cdot 10^8$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-8}$	$8,22 \cdot 10^7$
²³¹ Pa	$3,28 \cdot 10^4$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-7}$	$1,69 \cdot 10^6$
²²⁷ Ac	$2,18 \cdot 10^1$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$7,63 \cdot 10^6$
²²⁷ Th	$5,13 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	(in ²²⁷ Ac)	-
²²³ Ra	$3,13 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	(in ²²⁷ Ac)	-
Summe				$4,22 \cdot 10^{14}$

C.3.3 Radionuklidspezifische Parameter für die Einlagerungsbereiche

Bei dieser Parametergruppe handelt es sich um die Angaben zum Inventar in den einzelnen Einlagerungsbereichen.

Im sogenannten Untertagemessfeld (UMF) wurden Betriebsabfälle des ERAM eingelagert. Ferner wurden dort im Rahmen von Versuchen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle mit höherer Aktivität kurzlebiger Radionuklide Spezialcontainer mit ⁶⁰Co-Strahlenquellen und festen Abfällen eingebracht. Dieses Abfallinventar beträgt ⁶⁰Co = $2,3 \cdot 10^{14}$ Bq bzw. ¹³⁷Cs = $6,1 \cdot 10^{13}$ Bq. Aus verschiedenen Gründen (z.B. Kurzlebigkeit der Radionuklide, voraussichtliche Dauer bis zum vollständigen Volllaufen des ERAM, realistische Transportzeiten durch Hutgestein und Deckgebirge) kann auch die Freisetzung von geringen Anteilen dieser Radionuklide aus dem UMF in die Biosphäre mit sehr hoher Zuverlässigkeit ausgeschlossen werden. Allerdings war das Radionuklidinventar zum Zeitpunkt der Einlagerung hoch. Um das Inventar des UMF in die Analyse einzubeziehen, wurde entschieden, anstelle der Modellierung eines eigenen Einlagerungsbereichs UMF die Inventare der darin enthaltenen Radionuklide (⁶⁰Co und ¹³⁷Cs) zum Inventar des Einlagerungsbereiches Nordfeld zu addieren, der - wie das UMF - gegenüber dem übrigen Grubengebäude nur einen geringen Einschluss gewährleistet.

Die sogenannte Radium-VBA beinhaltet Radium-Strahlenquellen verschiedener Herkunft. Sie ist in einem Sohlenbohrloch in einem neu aufgefahrenen Streckenstummel im Ostfeld endgelagert. Wie in Anhang R gezeigt wird, ist das aus dem Streckenstummel in den übrigen Einlagerungsbereich austretende ²²⁶Ra-Inventar gering im Vergleich mit dem im Abbau 2 eingelagerten Inventar. Das ²²⁶Ra-Inventar der Radium-VBA (²²⁶Ra-Inventar = $3,7 \cdot 10^{11}$ Bq) kann deshalb vernachlässigt werden und ist nicht dem Modell-Inventar des Ostfelds zuzurechnen.

Das Inventar an ¹⁴C liegt in unterschiedlicher chemischer Form vor. Dabei ist zwischen organischem, anorganischem und als Carbid gebundenem ¹⁴C zu unterscheiden. Es wird davon ausgegangen, dass alles als Carbid gebundene ¹⁴C in Methan (¹⁴CH₄) und das anorganisch gebundene



^{14}C vollständig in CO_2 übergeht. Es wird angenommen, dass aus 4 Teilen organisch gebundenem ^{14}C 3 Teile Methan (CH_4) und ein Teil CO_2 entstehen (vgl. Kapitel J.1.2 in Anhang J). Daraus ergeben sich die Angaben für die drei in den Berechnungen verwendeten Fraktionen $^{14}\text{C}_{\text{org}}$ (unverändert gelöstes organisches ^{14}C), $^{14}\text{C}_{\text{carb}}$ (carbonatisch gebundenes ^{14}C , z.B. als CO_3^{2-} , oder HCO_3^-) und $^{14}\text{C}_{\text{meth}}$ (^{14}C -Methan). Die Ermittlung dieser drei Komponenten des Inventars ist in Anhang J dargestellt.

Tabelle C-26: Radionuklidinventare der Einlagerungsbereiche in Bq. Die kurzlebigen Töchter der Zerfallsketten (kursiv gedruckt) sind aus rechentechnischen Gründen aufgeführt. Ihre Inventare sind jedoch irrelevant.

Nuklid	West-Südfeld		Ostfeld	Nordfeld	Zentralteil
	Südfeld	Westfeld			
^3H	$7,56 \cdot 10^{11}$	$1,22 \cdot 10^{12}$	$1,00 \cdot 10^{11}$	$1,10 \cdot 10^{12}$	$7,70 \cdot 10^8$
$^{14}\text{C}_{\text{carb}}$	$5,46 \cdot 10^{11}$	$2,84 \cdot 10^{11}$	$1,20 \cdot 10^{11}$	$1,71 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^9$
$^{14}\text{C}_{\text{meth}}$	$1,81 \cdot 10^{12}$	$4,82 \cdot 10^{11}$	$1,20 \cdot 10^9$	$4,20 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^9$
$^{14}\text{C}_{\text{org}}$	0	0	0	0	0
^{36}Cl	$7,69 \cdot 10^8$	$2,25 \cdot 10^9$	$8,30 \cdot 10^8$	$1,70 \cdot 10^7$	$5,10 \cdot 10^6$
^{41}Ca	$3,10 \cdot 10^7$	$3,68 \cdot 10^7$	$6,00 \cdot 10^6$	$2,40 \cdot 10^4$	$4,83 \cdot 10^4$
^{60}Co	$8,39 \cdot 10^{12}$	$2,50 \cdot 10^{12}$	$2,40 \cdot 10^{12}$	$2,34 \cdot 10^{14}$	$3,00 \cdot 10^{12}$
^{59}Ni	$8,90 \cdot 10^{10}$	$3,72 \cdot 10^{10}$	$4,90 \cdot 10^{10}$	$3,80 \cdot 10^8$	$2,26 \cdot 10^8$
^{63}Ni	$1,30 \cdot 10^{13}$	$2,29 \cdot 10^{12}$	$2,80 \cdot 10^{12}$	$1,20 \cdot 10^{10}$	$1,69 \cdot 10^{10}$
^{79}Se	$1,30 \cdot 10^8$	$3,89 \cdot 10^7$	$2,50 \cdot 10^7$	$6,40 \cdot 10^4$	$2,30 \cdot 10^5$
^{87}Rb	$4,60 \cdot 10^3$	$1,74 \cdot 10^7$	$8,20 \cdot 10^6$	$1,20 \cdot 10^6$	$2,70 \cdot 10^5$
^{90}Sr	$3,23 \cdot 10^{12}$	$2,20 \cdot 10^{12}$	$4,10 \cdot 10^{11}$	$9,30 \cdot 10^9$	$1,20 \cdot 10^9$
^{93}Zr	$4,09 \cdot 10^9$	$4,42 \cdot 10^9$	$7,90 \cdot 10^8$	$2,70 \cdot 10^6$	$6,31 \cdot 10^6$
^{94}Nb	$8,10 \cdot 10^9$	$9,39 \cdot 10^9$	$9,50 \cdot 10^9$	$8,50 \cdot 10^7$	$3,40 \cdot 10^7$
^{93}Mo	$8,70 \cdot 10^7$	$1,30 \cdot 10^8$	$2,20 \cdot 10^7$	$1,40 \cdot 10^6$	$4,30 \cdot 10^5$
^{99}Tc	$4,51 \cdot 10^{10}$	$3,02 \cdot 10^{10}$	$2,70 \cdot 10^{10}$	$8,30 \cdot 10^8$	$2,20 \cdot 10^8$
^{107}Pd	$1,24 \cdot 10^7$	$5,40 \cdot 10^7$	$5,40 \cdot 10^5$	$4,10 \cdot 10^3$	$2,39 \cdot 10^4$
^{126}Sn	$1,01 \cdot 10^8$	$9,02 \cdot 10^7$	$5,00 \cdot 10^7$	$7,40 \cdot 10^5$	$2,80 \cdot 10^5$
^{129}I	$9,08 \cdot 10^6$	$1,95 \cdot 10^8$	$8,60 \cdot 10^6$	$6,70 \cdot 10^3$	$1,60 \cdot 10^4$
^{135}Cs	$2,58 \cdot 10^8$	$5,55 \cdot 10^7$	$5,70 \cdot 10^7$	$8,40 \cdot 10^4$	$3,79 \cdot 10^5$
^{137}Cs	$5,80 \cdot 10^{13}$	$1,28 \cdot 10^{13}$	$4,90 \cdot 10^{12}$	$6,19 \cdot 10^{13}$	$1,59 \cdot 10^{11}$
^{151}Sm	$8,16 \cdot 10^{10}$	$1,45 \cdot 10^{11}$	$4,70 \cdot 10^{10}$	$4,50 \cdot 10^8$	$1,20 \cdot 10^8$
^{248}Cm	0	$2,20 \cdot 10^7$	$3,40 \cdot 10^2$	0	0
^{244}Pu	0	$2,00 \cdot 10^4$	$7,80 \cdot 10^2$	0	0
^{244}Cm	$1,58 \cdot 10^9$	$4,02 \cdot 10^9$	$1,00 \cdot 10^9$	$1,80 \cdot 10^6$	$4,40 \cdot 10^5$
^{240}Pu	$1,36 \cdot 10^9$	$6,23 \cdot 10^{10}$	$1,90 \cdot 10^9$	$9,50 \cdot 10^6$	$2,28 \cdot 10^6$
^{236}U	$8,17 \cdot 10^6$	$1,00 \cdot 10^7$	$3,00 \cdot 10^7$	$7,40 \cdot 10^4$	$1,89 \cdot 10^4$
^{232}Th	$3,80 \cdot 10^5$	$4,70 \cdot 10^6$	$8,00 \cdot 10^5$	0	0
^{228}Ra	$8,20 \cdot 10^8$	$5,70 \cdot 10^6$	$5,60 \cdot 10^5$	0	0
^{228}Th	$1,20 \cdot 10^9$	$5,10 \cdot 10^7$	$3,60 \cdot 10^6$	$6,10 \cdot 10^3$	$1,70 \cdot 10^3$
^{224}Ra	$9,80 \cdot 10^5$	$5,10 \cdot 10^7$	$3,60 \cdot 10^6$	0	$1,70 \cdot 10^3$



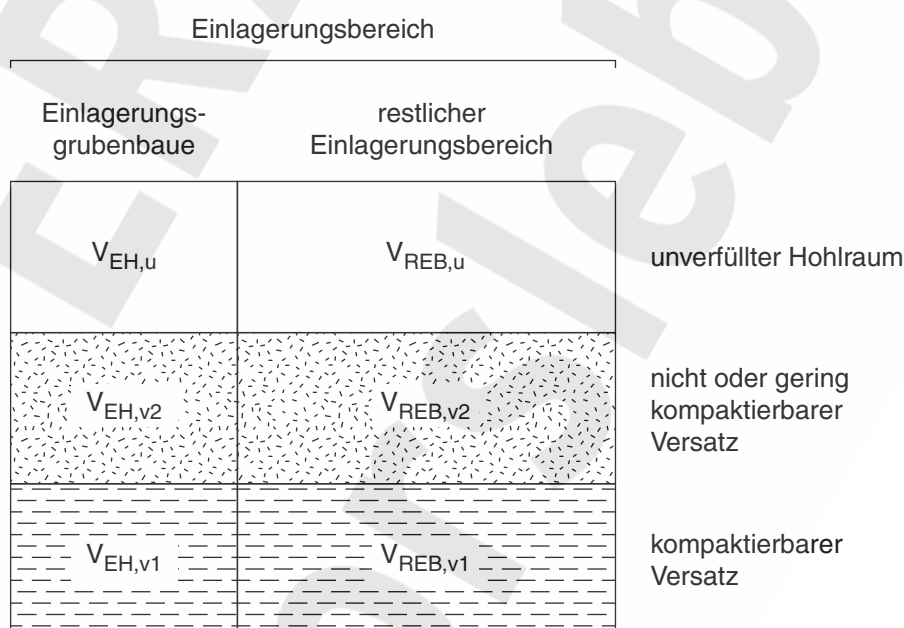
Tabelle C-26: Radionuklidinventare der Einlagerungsbereiche in Bq. Die kurzlebigen Töchter der Zerfallsketten (kursiv gedruckt) sind aus rechentechnischen Gründen aufgeführt. Ihre Inventare sind jedoch irrelevant. (Fortsetzung)

Nuklid	West-Südfeld		Ostfeld	Nordfeld	Zentralteil
	Südfeld	Westfeld			
²⁴⁵ Cm	4,99·10 ⁵	1,39·10 ⁶	3,60·10 ⁵	8,30·10 ²	2,08·10 ²
²⁴¹ Pu	2,89·10 ¹¹	9,40·10 ¹¹	1,10·10 ¹¹	1,60·10 ¹⁰	1,59·10 ⁸
²⁴¹ Am	9,39·10 ¹⁰	1,10·10 ¹¹	1,40·10 ¹⁰	5,80·10 ⁸	2,27·10 ⁷
²³⁷ Np	1,45·10 ⁷	1,61·10 ⁷	5,40·10 ⁷	1,20·10 ⁵	3,12·10 ⁴
²³³ Pa	0	0	0	0	0
²³³ U	3,73·10 ³	4,06·10 ⁶	9,60·10 ⁵	2,00·10 ⁴	4,60·10 ³
²²⁹ Th	2,71·10 ³	3,80·10 ⁵	4,60·10 ⁴	2,00·10 ⁴	4,50·10 ³
²⁴⁶ Cm	1,21·10 ⁵	2,46·10 ⁶	6,90·10 ⁴	0	3,00·10 ⁰
²⁴² Pu	1,71·10 ⁷	6,50·10 ⁷	3,50·10 ⁷	1,30·10 ⁵	2,94·10 ⁴
²³⁸ U	2,07·10 ⁷	3,15·10 ⁸	1,00·10 ⁸	1,30·10 ⁵	3,40·10 ⁴
²³⁴ U	7,20·10 ⁷	7,44·10 ⁸	3,20·10 ⁸	3,00·10 ⁵	7,60·10 ⁴
²³⁰ Th	6,91·10 ⁵	6,15·10 ⁵	4,10·10 ⁵	3,80·10 ¹	8,40·10 ⁰
²²⁶ Ra	1,12·10 ¹⁰	1,21·10 ¹⁰	1,00·10 ⁷	0	0
²¹⁰ Pb	1,70·10 ⁷	1,10·10 ⁸	2,70·10 ⁶	0	0
²¹⁰ Bi	0	0	0	0	0
²¹⁰ Po	0	0	0	0	0
²⁴⁷ Cm	0	2,60·10 ⁴	3,40·10 ²	0	0
²⁴³ Am	2,21·10 ⁷	5,92·10 ⁷	1,40·10 ⁷	3,50·10 ⁴	8,90·10 ³
²³⁹ Pu	1,12·10 ⁹	6,55·10 ¹⁰	1,70·10 ⁹	8,40·10 ⁶	1,94·10 ⁶
²³⁵ U	2,02·10 ⁶	6,01·10 ⁷	2,00·10 ⁷	3,70·10 ⁴	8,53·10 ³
²³¹ Pa	4,80·10 ⁴	1,60·10 ⁶	3,90·10 ⁴	1,10·10 ¹	2,50·10 ⁰
²²⁷ Ac	1,30·10 ⁴	7,60·10 ⁶	2,00·10 ⁴	0	0
²²⁷ Th	0	0	0	0	0
²²³ Ra	0	0	0	0	0

Anhang D Herleitung der geometrischen Parameter für Einlagerungsbereiche, Mischungsbereiche und Abdichtsysteme

Im vorliegenden Anhang wird die Herleitung der geometrischen Parameter für die Einlagerungsbereiche und die Abdichtsysteme beschrieben. Dazu werden zunächst in Kapitel D.1 die relevanten geometrischen Parameter der Einlagerungsbereiche allgemein definiert. In Kapitel D.2 wird das allgemeine Konzept für die Ermittlung der effektiven Parameter der Abdichtsysteme vorgestellt. In Kapitel D.3 wird zum einen die konkrete Bestimmung der in Kapitel D.1 definierten geometrischen Parameter der einzelnen Einlagerungsbereiche durchgeführt und andererseits das in Kapitel D.2 beschriebene Konzept zur Bestimmung der effektiven Parameter der Abdichtsysteme auf die einzelnen Einlagerungsbereiche angewendet. In Kapitel D.4 werden detaillierte Darstellungen der Einlagerungsbereiche und zur Lage der Abdichtsysteme präsentiert.

D.1 Definition der effektiven geometrischen Parameter in den Einlagerungsbereichen



4651/einlagerungsbereich.eps/shu/02.07.04

Abbildung D-1: Schematische Darstellung der relevanten Volumina in einem Einlagerungsbereich. Dabei stehen die Indizes u für unverfüllten Hohlraum, v1 für kompaktierbaren Versatz und v2 für nicht oder gering kompaktierbaren Versatz. (vgl. Text)

Es werden verschiedene Arten von Hohlräumen unterschieden. Ein Einlagerungsbereich (Index EB) wird einerseits unterteilt in Einlagerungsgrubenbaue (Index EH) und den restlichen Einlagerungsbereich (Index REB), wobei für die Einlagerungsbereiche Nordfeld und Zentralteil kein restlicher Einlagerungsbereich ausgewiesen wird. Andererseits wird unterschieden in offenen (unverfüllten) Hohlraum, mit kompaktierbarem Versatz (Abfälle, Braunkohlefilterasche, Salzgrus) verfüllten

Hohlraum und mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz (Salzbeton) verfüllten Hohlraum. Diese Unterteilung ist in Abbildung D-1 in schematischer Weise skizziert.

Das Einführen von Volumenverhältnissen als Parameter ist aufgrund der Ausrichtung auf probabilistische Rechnungen notwendig und erlaubt, unter Verwendung von unkorrelierten Parametern konsistente und plausible Datensätze für die 6 Teilvolumina eines Einlagerungsbereiches zu generieren. Eingangsgrößen für die Modellrechnungen, welche die Volumina in den Einlagerungsbereichen charakterisieren, sind:

- V_{EH} Gesamtvolumen der Einlagerungsgrubenbaue im Einlagerungsbereich; [m³]
 V_{REB} Gesamtvolumen des restlichen Einlagerungsbereichs; [m³]
 $\zeta_{EH,t}$ totaler Verfüllgrad (kompaktierbarer und nicht oder gering kompaktierbarer Versatz) des Gesamtvolumens der Einlagerungsgrubenbaue; [-]
 $\zeta_{REB,t}$ totaler Verfüllgrad (kompaktierbarer und nicht oder gering kompaktierbarer Versatz) des Gesamtvolumens des restlichen Einlagerungsbereichs; [-]
 $\zeta_{EH,k}$ Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz in den Einlagerungsgrubenbaue; [-]
 $\zeta_{REB,k}$ Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz des restlichen Einlagerungsbereichs; [-]

Die in Abbildung D-1 aufgeführten Teilvolumina werden mit dem ERAM HIS 7.7.2.3 – Hohlrauminformationssystem für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben [DBE 2003] ermittelt. Die Eingangsgrößen für die Modellrechnungen ergeben sich aus diesen wie folgt:

$$\zeta_{EH,t} = \frac{V_{EH,v1} + V_{EH,v2}}{V_{EH}} \quad \zeta_{REB,t} = \frac{V_{REB,v1} + V_{REB,v2}}{V_{REB}} \quad (D-1)$$

$$\zeta_{EH,k} = \frac{V_{EH,v1}}{V_{EH,v1} + V_{EH,v2}} \quad \zeta_{REB,k} = \frac{V_{REB,v1}}{V_{REB,v1} + V_{REB,v2}} \quad (D-2)$$

Umgekehrt gilt:

$$V_{EH,u} = (1 - \zeta_{EH,t}) \cdot V_{EH} \quad (D-3)$$

$$V_{EH,v1} = \zeta_{EH,t} \cdot \zeta_{EH,k} \cdot V_{EH} \quad (D-4)$$

$$V_{EH,v2} = \zeta_{EH,t} \cdot (1 - \zeta_{EH,k}) \cdot V_{EH} \quad (D-5)$$

und analog für den restlichen Einlagerungsbereich (REB):

$$V_{REB,u} = (1 - \zeta_{REB,t}) \cdot V_{REB} \quad (D-6)$$

$$V_{REB,v1} = \zeta_{REB,t} \cdot \zeta_{REB,k} \cdot V_{REB} \quad (D-7)$$

$$V_{REB,v2} = \zeta_{REB,t} \cdot (1 - \zeta_{REB,k}) \cdot V_{REB} \quad (D-8)$$

Innerhalb PROSA werden bei probabilistischen Modellrechnungen die 6 Parameter V_{EH} , V_{REB} und ζ_i unkorreliert entsprechend ihrer Verteilungsfunktionen gewählt und daraus diejenigen Modellgrößen des Einlagerungsbereiches (Index EB) abgeleitet, wie sie in die Gleichungen zur Prozessbeschrei-



bung eingehen ($V_{EB,u}$, $V_{EB,v1}$, $V_{EB,v2}$). Dazu werden das jeweilige Volumen in den Einlagerungsgrubenbauen und das jeweilige Volumen im restlichen Einlagerungsbereich addiert und als ein einheitliches Gesamtvolumen betrachtet, d.h.:

$$V_{EB,u} = (1 - \zeta_{EH,t}) \cdot V_{EH} + (1 - \zeta_{REB,t}) \cdot V_{REB} \quad (D-9)$$

$$V_{EB,v1} = \zeta_{EH,t} \cdot \zeta_{EH,k} \cdot V_{EH} + \zeta_{REB,t} \cdot \zeta_{REB,k} \cdot V_{REB} \quad (D-10)$$

$$V_{EB,v2} = \zeta_{EH,t} \cdot (1 - \zeta_{EH,k}) \cdot V_{EH} + \zeta_{REB,t} \cdot (1 - \zeta_{REB,k}) \cdot V_{REB} \quad (D-11)$$

Die Materialeigenschaften wie Porosität oder Konvergenzverhalten werden als gleichartig für das gesamte jeweilige Volumen angenommen.

Das Vorgehen zur Bestimmung der Referenzwerte und Bandbreiten der Parameter ist für die einzelnen Einlagerungsbereiche in den entsprechenden Abschnitten des Kapitels D.3 erläutert.

D.2 Konzept für die Ermittlung der effektiven geometrischen Parameter eines Abdichtsystems

Das Abdichtsystem wird i.a. nicht nur durch eine einzelne Strecke, sondern durch mehrere seriell und/oder parallel geschaltete Strecken gebildet⁶². In Bezug auf die Langzeitsicherheit können zwei effektive Parameter definiert werden, bei deren Bestimmung die folgenden drei Bedingungen gewährleistet werden müssen:

- (1) korrekter hydraulischer Gesamtwiderstand
- (2) korrektes oder konservatives Ergebnis für die Transportzeit
- (3) korrekte oder konservative Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen der zutretenden Lösung und dem Versatz (Korrosion des Salzbetons bzw. des Magnesiabetons)

Im Hinblick auf die Korrosion müssen die beiden effektiven Parameter des Abdichtsystems auf dasselbe (oder ein ungünstig höheres) Verhältnis von Lösungsfließrate zu Porenvolumen führen wie jenes für die ungünstigste Strecke.

Zunächst werden die allgemeinen Gleichungen für den hydraulischen Widerstand (Abschnitt D.2.1) und die Transportzeit (Abschnitt D.2.2) angegeben und anschließend deren Anwendung unter Berücksichtigung der Bedingungen (1) und (2) zur Bestimmung der effektiven geometrischen Parameter eines Abdichtsystems erläutert (Abschnitt D.2.3). In Abschnitt D.2.3 wird auch die Bedingung (3) hinsichtlich der Korrosion geprüft.

D.2.1 Allgemeine Gleichung für den hydraulischen Widerstand

Der hydraulische Widerstand einer Strecke ist proportional zum Quotienten aus Länge (L) und Querschnittsfläche (A). Der Proportionalitätsfaktor ist das Inverse der Permeabilität. Da hier die

⁶² Im vorliegenden Sicherheitsnachweis bestehen die Abdichtsysteme allerdings ausschließlich aus parallel angeordneten Strecken.



effektiven geometrischen Parameter unter der Annahme einer identischen Permeabilität in den maßgebenden Strecken ermittelt werden, wird der hydraulische Widerstand dem Quotienten L/A gleichgesetzt und mit R_{hydr} bezeichnet.

$$R_{\text{hydr}} = \frac{L}{A} \quad (\text{D-12})$$

Bei serieller Schaltung gilt für zwei Widerstände

$$R_{\text{hydr,tot}} = R_{\text{hydr,1}} + R_{\text{hydr,2}} \quad (\text{D-13})$$

Für die Parallelschaltung zweier Widerstände gilt

$$\frac{1}{R_{\text{hydr,tot}}} = \frac{1}{R_{\text{hydr,1}}} + \frac{1}{R_{\text{hydr,2}}} \quad (\text{D-14})$$

bzw.

$$R_{\text{hydr,tot}} = \frac{R_{\text{hydr,1}} \cdot R_{\text{hydr,2}}}{R_{\text{hydr,1}} + R_{\text{hydr,2}}} \quad (\text{D-15})$$

D.2.2 Allgemeine Gleichung für die Transportzeit

Die Transportzeit T für Radionuklide entlang einer Zugangsstrecke bzw. eines Abdichtsystems wird mit Gleichung (D-16) berechnet.

$$\int_0^T Q dt = R_T \cdot \varepsilon \cdot A \cdot L \quad (\text{D-16})$$

In Gleichung (D-16) ist Q der Volumenfluss, R_T ist der Retentionsfaktor im Versatz des Abdichtsystems, der sich aus der Sorption⁶³ eines Radionuklids am Material der Abdichtungen ergibt, und ε ist die Porosität im Abdichtsystem. In allgemeinen, verzweigten Netzen weisen nicht alle Wege durch das Netz dieselbe Zeit auf. Auch der Volumenfluss entlang eines Weges ist nicht in allen Strecken gleich.

Mit den hydraulischen Widerständen der einzelnen Strecken eines Netzwerkes kann für eine Strecke i der Anteil des Volumenflusses durch diese Strecke, Q_i , bezogen auf den gesamten Volumenfluss, Q_{tot} , also $Q_i/Q_{\text{tot}} = \Phi_i$, ermittelt werden. Es werden dazu vereinfachend zeitlich konstante Volumenflüsse vorausgesetzt. Die Transportzeit, T_i , entlang einer Strecke i ist damit

$$T_i = c \cdot \frac{A_i \cdot L_i}{Q_i/Q_{\text{tot}}} = c \cdot \frac{A_i \cdot L_i}{\Phi_i} \quad (\text{D-17})$$

⁶³ Von der Sorption an Zementstein und Magnesiabeton wird in den Rechnungen wegen nicht ausreichender Datenbasis kein Kredit genommen.



mit einem Proportionalitätsfaktor c , der unabhängig von der Strecke i ist.

D.2.3 Ermittlung der effektiven Parameter und ihrer Bandbreiten

Mit den Gleichungen (D-12) bis (D-15) wird der hydraulische Widerstand $R_{\text{hydr,tot}}$ des Systems von Strecken, die gemeinsam ein Abdichtsystem bilden, ermittelt. Die effektiven Parameter des Abdichtsystems, L_1 und A_1 , ergeben einen korrekten hydraulischen Widerstand (erste Bedingung), falls

$$R_{\text{hydr,tot}} = \frac{L_1}{A_1} \quad (\text{D-18})$$

Die effektiven Parameter müssen nach Bedingung (2), ein korrektes oder konservatives Ergebnis für die Transportzeit, so gewählt werden, dass sie eine Transportzeit ergeben, die der kürzesten unter allen möglichen Wegen durch das Netz entspricht. Es soll gelten

$$c \cdot A_1 \cdot L_1 = \min_{\text{alle Wege}} \left\{ \sum_i T_i \right\} \quad (\text{D-19})$$

Hierbei wird die minimale Transportzeit gesucht. Die Summe über i beinhaltet die Aufsummierung der Transportzeiten in den hydraulisch wirksamen Strecken, die einen Weg ergeben.

Aus Gleichung (D-19) ergibt sich unter Berücksichtigung von Gleichung (D-17)

$$A_1 \cdot L_1 = \min_{\text{alle Wege}} \left\{ \sum_i \frac{A_i \cdot L_i}{Q_i / Q_{\text{tot}}} \right\} \quad (\text{D-20})$$

Im Spezialfall einer reinen Parallelschaltung mehrerer Strecken ist $Q_i / Q_{\text{tot}} = R_{\text{hydr,tot}} / R_i$ und somit gilt

$$L_1 = \min_i \{L_i\} \quad (\text{D-21})$$

was in einem solchen Fall zu einer direkten Festlegung von L_1 führt, so dass A_1 wiederum direkt aus Gleichung (D-18) ermittelt werden kann.

Für parallel geschaltete Strecken und ohne Sorption entspricht die inverse Transportzeit durch die Abdichtungen dem Verhältnis von Lösungsfließrate und Porenvolumen der kürzesten Abdichtung; Gleichung (D-16). In allen anderen Abdichtungen ist das Verhältnis von Lösungsfließrate zu Porenvolumen kleiner. Dadurch, dass die Bedingung (2) erfüllt wird, ist auch die Bedingung (3) hinsichtlich der Korrosion des Materials der Abdichtungen erfüllt.

Die Bandbreiten für die probabilistische Modellierung wurden für L_1 und A_1 bezüglich des Referenzwertes im Allgemeinen wie folgt festgelegt:

Bandbreite für L_1 von 80% bis 150% des Referenzwertes



Bandbreite für A_1 vom Minimalwert der Einzelquerschnitte bis zur Summe der Einzelquerschnitte

D.3 Feldspezifische geometrische Parameter

In diesem Kapitel wird die Bestimmung der geometrischen Parameter für die Einlagerungsbereiche und ihre Abdichtsysteme einlagerungsbereichsspezifisch dargestellt. Die Angaben zu den Volumina der Einlagerungsbereiche entstammen dem Hohlrauminformationssystem (HIS) für das ERAM [DBE 2003]. Dabei ist „eingebrachter Versatz“ immer „kompaktierbarer Versatz“, während das „zusätzliche Verfüllvolumen“ näherungsweise als zu 100% mit Salzbeton verfülltes Volumen betrachtet wird⁶⁴. Die dort enthaltenen Fehlergrenzen gehen – neben konzeptuellen Überlegungen – stets in die Bandbreiten der Volumina bzw. deren Verhältnisse (ζ_i) ein. Die Minimal- und Maximalwerte der Verhältnisse ergeben sich aus den entsprechenden Kombinationen der minimalen und maximalen Volumina.

Die Lokationen und Ausdehnungen der Einlagerungsbereiche sind in den Abbildungen des Kapitels D.4 dargestellt.

D.3.1 Gemeinsames West-Südfeld

Da möglicherweise die im Einlagerungsbereich Westfeld gebildete Gasmenge so groß ist, dass es bei wirksamer Abdichtung des Westfeldes gegen das Südfeld zu einer Frac-Bildung kommt, ist eine hydraulische Anbindung des Westfeldes an das Südfeld vorgesehen. Dazu wird ein Großbohrloch zwischen dem West- und dem Südfeld aufgefahren, das im Südfeld auf dem Niveau der 1. Sohle anschließt. Für die Sicherheitsanalyse wird daher von einem gemeinsamen Einlagerungsbereich West-Südfeld ausgegangen. Die Abdichtungen zwischen dem Westfeld und dem Südfeld auf der 3. und 4. Sohle befinden sich somit innerhalb dieses gemeinsamen Einlagerungsbereichs. Sie dienen dazu, den Lösungsübertritt in das Westfeld nach einem erfolgten Lösungszutritt in das Südfeld zu behindern oder mindestens zu verzögern. Diese Abdichtungen werden in den Modellrechnungen mit dem Programm PROSA nicht berücksichtigt.

D.3.1.1 Volumina und Verfüllung

Die Einlagerungsgrubenbaue im kombinierten West-Südfeld umfassen die Abbaue auf der 5a-Sohle (Abbaue 1, 2 und 3) des Südfeldes und die Hohlräume auf der 4. Sohle (inklusive Westgesenk) im Westfeld und besitzen ein aufgefahrenes Hohlraumvolumen von 188'579 m³. Die Bandbreite für das aufgefahrene Hohlraumvolumen reicht von 166'850 bis 217'798 m³. Das aufgefahrene Hohlraumvolumen teilt sich auf in 18'390 m³ unverfüllten Hohlraum, 161'568 m³ kompaktierbaren Versatz und 8'621 m³ nicht oder gering kompaktierbaren Versatz. Das unverfüllte Volumen kann von 16'499 bis 20'933 m³ variieren, der kompaktierbare Versatz von 142'240 bis 187'559 m³ und der nicht oder gering kompaktierbare Versatz von 8'111 bis 9'306 m³.



Tabelle D-1: Geometrische Parameter für den Einlagerungsbereich West-Südfeld

West-Südfeld	Referenz	Minimum	Maximum	Verteilungsfunktion
V_{EH}	188'579	166'850	217'798	(n)
V_{REB}	1'142'827	305'061	1'210'018	(t)
ζ_{EHt}	0,902	0,878	0,923	(n)
ζ_{REBt}	0,715	0,695	0,734	(n)
ζ_{EHk}	0,949	0,939	0,959	(n)
ζ_{REBk}	0,420	0,390	0,449	(n)

Der restliche Einlagerungsbereich West-Südfeld setzt sich aus den Kalilagern und den sonstigen Grubenbauen zusammen und besitzt ein aufgefahrenes Hohlraumvolumen von 1'142'827 m³. Die Bandbreite beträgt 1'088'700 m³ bis 1'210'018 m³. Das aufgefahrene Hohlraumvolumen teilt sich auf in 325'788 m³ unverfüllten Hohlraum, 343'499 m³ kompaktierbaren Versatz und 473'540 m³ nicht oder gering kompaktierbaren Versatz. Das unverfüllte Volumen kann von 314'534 bis 340'123 m³ variieren, der kompaktierbare Versatz von 318'934 bis 371'685 m³ und der nicht oder gering kompaktierbare Versatz von 455'232 bis 498'210 m³. Die geometrischen Parameter (Referenzwerte mit ihren Bandbreiten) für den Einlagerungsbereich West-Südfeld sind in Tabelle D-1 zusammengestellt.

Der Fall, dass nur ein kleiner Teil des Südfelds an den Prozessen, welche die Radionuklidfreisetzung bestimmen, teilnimmt, wird über das Volumen des restlichen Einlagerungsbereichs West-Südfeld gesteuert. Das verwendete Minimalvolumen wird hierzu auf 305'061 m³ festgesetzt. Dieser Wert ergibt sich dadurch, dass für den gesamten Einlagerungsbereich nur die Abbaue 8s, 9n und 9s auf der 4a-Sohle, die Abbaue 1s, 8n und 8s auf der 3. Sohle, die Abbaue 1s auf der 3a und der 2. Sohle, die Abbaue 1n und 1s auf der 2a-Sohle und der Abbau 1n auf der 1. Sohle berücksichtigt werden.

D.3.1.2 Abdichtsystem

Für beide Einlagerungsbereiche zusammen (wie für den Einlagerungsbereich Südfeld alleine) bilden die Strecken zwischen den Kalilagern B und C, parallelgeschaltet, das Abdichtsystem für die Freisetzung in den Zentralteil des Grubengebäudes (Mischungsbereich). Angaben zu den Strecken befinden sich in Tabelle D-2. Die beiden nördlichen Richtstrecken, die den ELB WSF mit der Grube Marie verbinden, werden für den Sicherheitsnachweis als unendlich große hydraulische Widerstände betrachtet, weil hier unter vergleichsweise einfachen Bedingungen (geneigte Strecken, regelmäßige Querschnitte) Bauwerke von hoher Qualität mit einer Länge von 200 m errichtet werden können.

Nach den in Kapitel D.2 zusammengestellten Regeln ergeben sich aus Tabelle D-2 die folgenden effektiven Parameter für das Abdichtsystem des Einlagerungsbereiches West-Südfeld:

⁶⁴ Tatsächlich ist geplant, bereits während der Betriebsphase die Abfälle mit Salzgrus abzudecken. Außerdem soll das Haufwerk, das bei den Infrastrukturmaßnahmen anfallen wird, als Verfüllmaterial verwendet werden. Die sich daraus ergebenden Unterschiede in den Versatzanteilen sind jedoch so gering, dass sie praktisch keinen Einfluss auf die Modellresultate haben.



$$R_{\text{hydr,tot}} = \frac{L_1}{A_1} = 1/4,375 \text{ m}^{-1} = 0,2286 \text{ m}^{-1}$$

$$L_1 = \min\{L_i\} = 26 \text{ m}$$

Tabelle D-2: Aufstellung der Strecken zur Ermittlung der Abmessungen des Abdichtsystems des Einlagerungsbereiches West-Südfeld für die Freisetzung in den Zentralteil des Grubengebäudes (Mischungsbereich).

Sohle / Teufe	Beschreibung	L [m]	A [m ²]	1/R _{hydr} ^(*) [m]
-253	nördl. Verb. B - C, 09YEA25 R001	75	17	0,227
	Ostquerschlag, 09YEQ01	75	20	0,267
	südl. Wetterstrecke, 09YEA52 R004	75	16	0,213
-291	nördl. Verb. B - C, 12YKA24 R001	38	12	0,316
	Ostquerschlag, 12YEQ01 R001	75	20,5	0,273
	südl. Wetterstrecke, 12YER51 R002	75	17,5	0,233
	Richtstrecke, 12YER51 R001	75	20	0,267
-332	nördl. Verb. B - C, 15YKA24 R001	26	18	0,692
	Ostquerschlag, 15YEQ01	75	21	0,280
	südl. Wetterstrecke, 15YEA32 R002	75	30	0,400
-372	Ostquerschlag, 17YEQ01	26	26	1,000
	südl. Wetterstrecke, 17YER51 R003	70	14,5	0,207
Summe			232,5	4,375
Minimum		26	12	0,207
Maximum		75	30	1,000

(*) gemäß Gleichung (D-12)

Somit folgt für die effektiven Parameter des Abdichtsystems

$L_1 = 26 \text{ m}$ Bandbreite: 20,8 m – 39 m

$A_1 = 113,8 \text{ m}^2$ Bandbreite: 12 m² – 232,5 m²

Bestimmend für diese Werte sind in erster Linie die kurze nördliche, querschlägige Verbindung zwischen den Kalilagern B und C auf der 3. Sohle und der Ostquerschlag auf der 4. Sohle.

D.3.2 Ostfeld

D.3.2.1 Volumina und Verfüllung

Die Einlagerung von Abfällen erfolgte im Ostfeld in einen Hohlraum auf der 4. Sohle. Darüber hinaus wurde die Radium-VBA in einen neu aufgefahrenen Streckenstummel nördlich des Ostquerschlages auf der 4. Sohle verbracht. Da nur den beiden Ostquerschlägen auf der 2. und 4. Sohle eine Funktion als Abdichtung zugewiesen werden kann, sind sämtliche Abbau des Ostfeldes potentiell dem Einlagerungsbereich Ostfeld zuzurechnen. Da die Wirksamkeit von möglichen Abdichtungen zwischen den verschiedenen Abbauen des Ostfeldes weder als gegeben noch als nicht gegeben unterstellt werden kann und es a priori nicht klar ist, was eine ungünstige Annahme ist,



werden die Volumina des Einlagerungsbereichs über weite Intervalle variiert. Der Einlagerungsbereich hat hier mindestens die Ausdehnung des Einlagerungsgrubenbaus („kleiner“ Einlagerungsbereich)⁶⁵ und umfasst maximal alle Abbaue des Ostfeldes („großer“ Einlagerungsbereich).

Der Einlagerungsgrubenbau und die direkt angrenzenden Grubenbaue umfassen ein Gesamtvolumen von 53'429 m³ (davon 6'138 m³ Abfälle, 13'741 m³ Salzgrus). Das restliche, derzeit unverfüllte Hohlraumvolumen soll zu 100 % mit Salzbeton verfüllt werden. $V_{EH,u}$ ist demnach gleich 0, was den Minimalwert für diesen Parameter darstellt. Der kompaktierbare Versatz kann von 17'499 bis 22'812 m³ variieren und der nicht oder gering kompaktierbare Versatz von 31'949 bis 35'151 m³.

Die Abbaue 1, 3 und 4 haben sowohl untereinander, als auch zum Einlagerungsgrubenbau gute hydraulische Verbindungen. Ihr Volumen von 178'754 m³ wird daher als Referenzvolumen für den restlichen Einlagerungsbereich angenommen. Es teilt sich auf in 33'100 m³ unverfüllten Hohlraum, 35'809 m³ kompaktierbaren Versatz und 109'845 m³ nicht oder gering kompaktierbaren Versatz.

Im Maximalfall werden alle Grubenbaue des Ostfelds (außer dem Einlagerungsgrubenbau) als restlicher Einlagerungsbereich berücksichtigt. Er teilt sich auf in 63'962 m³ unverfüllten Hohlraum, 37'431 m³ kompaktierbaren Versatz und 151'864 m³ nicht oder gering kompaktierbaren Versatz. Das unverfüllte Volumen kann im Rahmen der Messungengenauigkeit von 62'067 bis 66'049 m³ variieren, der kompaktierbare Versatz von 33'385 bis 42'614 m³ und der nicht oder gering kompaktierbare Versatz von 147'397 bis 156'423 m³. Für die obere Bandbreite wird der gesamte restliche Einlagerungsbereich Ostfeld inklusive Messungengenauigkeiten berücksichtigt. Die Untergrenzen für den Anteil des Gesamtversatzes und für den Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz ergeben sich aus den Variationen für das gesamte Ostfeld. Die Obergrenzen entsprechen den Referenzwerten. Der Fall, dass kein (nur ein sehr kleiner) restlicher Einlagerungsbereich Ostfeld am Prozess der Radionuklidfreisetzung teilnimmt ("kleines" Ostfeld), wird über das Volumen des restlichen Einlagerungsbereichs Ostfeld gesteuert ($V_{REB} = 0$ m³). Die geometrischen Parameter (Referenzwerte mit ihren Bandbreiten und der zugehörigen Verteilungsfunktion) für den Einlagerungsbereich Ostfeld sind in Tabelle D-3 zusammengestellt.

Tabelle D-3: Geometrische Parameter für das Ostfeld

Ostfeld	Referenz	Minimum	Maximum	Verteilungsfunktion
V_{EH}	53'429	49'448	57'963	(t)
V_{REB}	178'754	0	265'086	(t)
ζ_{EHt}	1,000	1,000	1,000	(n)
ζ_{REBt}	0,815	0,732	0,815	(n)
ζ_{EHk}	0,372	0,332	0,417	(n)
ζ_{REBk}	0,246	0,176	0,246	(n)

⁶⁵ vgl. die Ausführungen zur Auswertung der probabilistischen Rechnungen in Kapitel 5.2



D.3.2.2 Abdichtsystem

Das Abdichtsystem zwischen dem Einlagerungsbereich Ostfeld und den potentiellen Auspressorten wird durch Parallelschaltung der beiden Ostquerschläge auf der 2. Sohle und auf der 4. Sohle) gebildet (Tabelle D-4). Eine hydraulisch wirksame Verbindung über den Hauptanhydrit wird in einem alternativen Szenario betrachtet.

Tabelle D-4: Aufstellung der abgedichteten Strecken des Einlagerungsbereiches Ostfeld.

Sohle / Teufe	Beschreibung	L [m]	A [m ²]	1/R _{hydr} [m]
-291	Ostquerschlag, 12YEQ01 R001	150	21	0,140
-372	Ostquerschlag, 17YEQ 01	110	22,5	0,205
Summe			37,9	0,345
Minimum		88	21,0	0,140
Maximum		165	43,5	0,205

Die entsprechenden effektiven Parameter sind

$L_1 = 110 \text{ m}$ Bandbreite: 88 m – 165 m

$A_1 = 37,9 \text{ m}^2$ Bandbreite: 21 m² – 43,5 m²

Die Abdichtung des Ostquerschlags auf der 2. Sohle wird aus Salzbeton erstellt, diejenige des Ostquerschlags auf der 4. Sohle aus Magnesiabeton. Weil diese beiden Materialien unterschiedliche chemische und – spätestens aufgrund der fortschreitenden Korrosion der Baustoffe – auch unterschiedliche hydraulische Eigenschaften aufweisen, werden sie im Modell während der Zutrittsphase separat betrachtet. Die effektiven Parameter sind somit nur für die Auspressphase relevant. Die Größen L_1 und A_1 werden gleich wie für den ELB WSF berechnet. Der Stand der Korrosion der beiden Abdichtungen zu Beginn der Auspressphase wird unter Verwendung der ermittelten Größen L_1 und A_1 mit Hilfe von Gl. (A-104) über die Permeabilität des Abdichtsystems während der Auspressphase, K'_3 , berücksichtigt.

D.3.3 Einlagerungsbereich Nordfeld

D.3.3.1 Volumina und Verfüllung

Im Nordfeld wurden 1'701 m³ feste Abfälle in einem insgesamt aufgefahrenen Hohlraumvolumen von 2'136 m³ auf der 4. Sohle eingebracht. Neben den Abfällen sind 5 m³ nicht oder gering kompaktierbarer Versatz eingebracht. Der unverfüllte Hohlraum beträgt 430 m³ mit einer Bandbreite von 427 bis 433 m³. Gegen die potentiellen Auspressorte lässt sich dieser Einlagerungsbereich nicht durch Abdichtungen abtrennen. Der Einlagerungsbereich Nordfeld besteht deshalb ausschließlich aus den Einlagerungsgrubenbauen. Die geometrischen Parameter (Referenzwerte mit ihren Bandbreiten und der zugehörigen Verteilungsfunktion) für den Einlagerungsbereich Nordfeld sind in Tabelle D-5 zusammengestellt.



Tabelle D-5: Geometrische Parameter für den Einlagerungsbereich Nordfeld

Nordfeld	Referenz	Minimum	Maximum	Verteilungsfunktion
V_{EH}	2'136	2'133	2'139	(t)
V_{REB}	0	0	0	(t)
ζ_{EHt}	0,799	0,798	0,800	(n)
ζ_{EHk}	0,997	0,997	0,997	(n)

D.3.3.2 Abdichtsystem

Die Wirksamkeit eines Abdichtsystems vom Einlagerungsbereich Nordfeld gegen die potentiellen Austrittsorte ist nicht zu garantieren. Aus numerischen Gründen wird das Abdichtsystem wie folgt parametrisiert:

$L_1 = 1 \text{ m}$ keine Bandbreite

$A_1 = 20 \text{ m}^2$ keine Bandbreite

D.3.4 Einlagerungsbereich Zentralteil

D.3.4.1 Volumina und Verfüllung

Die Einlagerungsgrubenbaue des Einlagerungsbereiches Zentralteil umfassen nur einen sehr kleinen Teil vom Zentralteil des Grubengebäudes, nämlich die Abbaue 1an und 1as auf der 4a-Sohle und die Durchsumpfungsrube auf der 4. Sohle. Das Inventar des Untertagemessfeldes (UMF) wird dem Nordfeld zugewiesen (vgl. Anhang C.3.3).

In diese Einlagerungsgrubenbaue mit einem Gesamtvolumen von $66'236 \text{ m}^3$ wurden insgesamt 133 m^3 feste Abfälle, 150 m^3 Braunkohlefilterasche und 24 m^3 flüssige Abfälle, welche beim Abbinden mit ca. 35 m^3 Braunkohlefilterasche reagiert haben, eingebracht. Das Gesamtvolumen teilt sich auf in $3'293 \text{ m}^3$ unverfüllten Hohlraum, $32'550 \text{ m}^3$ kompaktierbaren Versatz und $30'393 \text{ m}^3$ nicht oder gering kompaktierbaren Versatz. Das unverfüllte Volumen kann im Rahmen der Messungenauigkeit von $2'802$ bis $3'955 \text{ m}^3$ variieren, der kompaktierbare Versatz von $22'749$ bis $45'797 \text{ m}^3$ und der nicht oder gering kompaktierbare Versatz von $29'229$ bis $31'557 \text{ m}^3$. Gegen die potentiellen Auspressorte aus der Grube in das Hutgestein lassen sich die Einlagerungsgrubenbaue nicht durch Abdichtungen abtrennen. Der Einlagerungsbereich Zentralteil besteht deshalb ausschließlich aus den Einlagerungsgrubenbauen. Die geometrischen Parameter (Referenzwerte mit ihren Bandbreiten) für den Einlagerungsbereich Zentralteil sind in Tabelle D-6 zusammengestellt.

Tabelle D-6: Geometrische Parameter für den Einlagerungsbereich Zentralteil

Zentralteil	Referenz	Minimum	Maximum	Verteilungsfunktion
V_{EH}	66'236	54'780	81'309	(t)
V_{REB}	0	0	0	(t)
ζ_{EHt}	0,950	0,929	0,965	(n)
ζ_{EHk}	0,517	0,419	0,610	(n)

D.3.4.2 Abdichtsystem

Die Wirksamkeit eines Abdichtsystems für den Zentralteil ist nicht zu garantieren. Aus numerischen Gründen wird das Abdichtsystem wie folgt parametrisiert:

$L_1 = 1 \text{ m}$ keine Bandbreite

$A_1 = 20 \text{ m}^2$ keine Bandbreite

D.3.5 Mischungsbereiche

Im Mischungsbereich vermischt sich die aus einem Einlagerungsbereich austretende Lösung mit unkontaminierter Lösung aus der übrigen Grube bzw. kontaminierter Lösung aus anderen Einlagerungsbereichen. Im Modell wird im Mischungsbereich lediglich die Vermischung mit Lösung aus der übrigen Grube simuliert, die Vermischung mit kontaminierter Lösung aus anderen Einlagerungsbereichen wird der Schnittstelle Mischungsbereich – Transportstrecke durch Hutgestein und Deckgebirge zugewiesen (vgl. Einleitung zu Kapitel 3.3 und Kapitel A.9 in Anhang A). Der Mischungsbereich dämpft den Anstieg der Radionuklidaustrittsrates in das Hutgestein gegenüber jener aus dem Einlagerungsbereich. Je kleiner der Mischungsbereich ist, umso geringer ist die Dämpfung. Als Mischungsbereich wird deshalb die Gesamtheit derjenigen Grubenbaue gewählt, die mit hoher Wahrscheinlichkeit Teil des Transportpfads vom Einlagerungsbereich zur Austrittsstelle in das Hutgestein sind; dabei können auch alternative Transportpfade durch die Grube betrachtet werden. Aufgrund der Geometrie des Grubengebäudes können zwei Mischungsbereiche unterschieden werden. In den Mischungsbereich Nordfeld tritt nur Lösung aus dem ELB Nordfeld über. In den Mischungsbereich Zentralteil treten Lösungen aus dem ELB Zentralteil, dem ELB Ostfeld und dem ELB West-Südfeld über.

D.3.5.1 Mischungsbereich Nordfeld

Für das Nordfeld lassen sich drei mögliche Wegsamkeiten von den Einlagerungsgrubenbauen über die Steinsalzabbaue in das Deckgebirge im Nordfeld ausmachen. Als Referenzwert für das aufgefahrene Hohlraumvolumen des resultierenden Mischungsbereichs wurde das Volumen einer Variante bestehend aus den Abbauen 16YEA23/R003, 16YEA23/R004, 15YER22/R008, 15YER22/R009 und 12YER22/R006 festgelegt. Dieses beträgt $100'251 \text{ m}^3$, aufgeteilt in $27'320 \text{ m}^3$ unverfülltes Volumen und $72'931 \text{ m}^3$ nicht oder gering kompaktierbaren Versatz. Aus diesen Teilvolumina ergeben sich der Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz sowie der



totale Verfüllgrad für den Referenzfall. Diese Werte stellen gleichzeitig die Minima der Bandbreite dar.

Das minimale Volumen ergibt sich aus der Variante mit den Abbauen 16YEA24/R002, 15YEQ21/R002, 15YEQ21/R003 und 12YER22/R006 mit 20'095 m³ unverfülltem Volumen, 4'506 m³ kompaktierbarem Versatz und 51'983 m³ nicht oder gering kompaktierbarem Versatz. Hieraus berechnet sich das Maximum für den Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz. Das maximale Volumen ergibt sich aus der Variante mit den Abbauen 16YEA23/R002 und 12YER22/R007 mit 20'105 m³ unverfülltem Volumen und 119'395 m³ nicht oder gering kompaktierbarem Versatz. Hieraus berechnet sich das Maximum für den totalen Verfüllgrad. Die geometrischen Parameter (Referenzwerte mit ihren Bandbreiten) für den Mischungsbereich Nordfeld sind in Tabelle D-7 zusammengestellt.

Tabelle D-7: Geometrische Parameter für den Mischungsbereich Nordfeld

	Referenz	Minimum	Maximum	Verteilungsfunktion
V_{VG}	100'251	76'584	139'500	(t)
$\zeta_{VG,t}$	0,727	0,727	0,856	(n)
$\zeta_{VG,k}$	0,000	0,000	0,080	(n)

D.3.5.2 Mischungsbereich Zentralteil

Die Grubenbaue des Zentralteils, die sich unmittelbar östlich des Kalilagers C und oberhalb der Referenzteufe von -332 mNN befinden, liegen auf dem potentiellen Austrittspfad durch den Zentralteil, welcher für die Einlagerungsbereiche Zentralteil, Ostfeld und West-Südfeld maßgeblich ist. Für den Minimalwert werden nur die Grubenbaue der Abbaureihe 2n gewählt, welche oberhalb der Referenzteufe von -332mNN liegen. Für die Obergrenze werden alle Abbaue des Zentralteils östlich des Kalilagers C gewählt.

Das Gesamtvolumen setzt sich im Referenzfall aus 25'987 m³ unverfülltem Hohlraum, 6'984 m³ kompaktierbarem Versatz und 362'317 m³ nicht oder gering kompaktierbarem Versatz zusammen. Aus diesen Teilvolumina ergeben sich der Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz sowie der totale Verfüllgrad für den Referenzfall. Der Referenzwert des Anteils des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz ist gleichzeitig auch der Minimalwert. Der Maximalwert ergibt sich aus den Teilvolumina des maximalen Gesamtvolumens mit 37'558 m³ unverfülltem Hohlraum, 46'993 m³ kompaktierbarem Versatz und 400'597 m³ nicht oder gering kompaktierbarem Versatz. Der Minimalwert für den totalen Verfüllgrad ergibt sich aus den Teilvolumina des maximalen Gesamtvolumens. Der Maximalwert ergibt sich aus den Teilvolumina des minimalen Gesamtvolumens mit 1'995 m³ unverfülltem Hohlraum, 6'810 m³ kompaktierbarem Versatz und 144'585 m³ nicht oder gering kompaktierbarem Versatz.



Tabelle D-8: Geometrische Parameter für den Mischungsbereich Zentralteil

	Referenz	Minimum	Maximum	Verteilungs- funktion
V_{VG}	395'288	153'390	485'148	(t)
$\zeta_{VG,t}$	0,934	0,923	0,987	(n)
$\zeta_{VG,k}$	0,019	0,019	0,105	(n)

D.3.6 Übriges Grubengebäude

Das gesamte Grubengebäude setzt sich aus den beiden Teilen Schachanlage Marie und Schachanlage Bartensleben zusammen. Die Einlagerung der radioaktiven Abfälle erfolgte in der Schachanlage Bartensleben.

Die Schachanlage Bartensleben (ohne die Volumina der zuvor genannten Einlagerungsbereiche) umfasst ein aufgefahrenes Gesamtvolumen von 4'477'822 m³. Das Gesamtvolumen teilt sich auf in 887'962 m³ unverfüllten Hohlraum, 392'914 m³ kompaktierbaren Versatz und 3'196'948 m³ nicht oder gering kompaktierbaren Versatz. Das unverfüllte Volumen kann im Rahmen der Messungenauigkeit von 877'360 bis 900'903 m³ variieren, der kompaktierbare Versatz von 363'938 bis 424'875 m³ und der nicht oder gering kompaktierbare Versatz von 3'161'790 bis 3'241'476 m³.

Die Schachanlage Marie umfasst ein aufgefahrenes Gesamtvolumen von 2'599'739 m³. Das Gesamtvolumen teilt sich auf in 524'031 m³ unverfüllten Hohlraum, 1'516'140 m³ kompaktierbaren Versatz und 559'568 m³ nicht oder gering kompaktierbaren Versatz. Das unverfüllte Volumen kann im Rahmen der Messungenauigkeit von 510'108 bis 538'702 m³ variieren, der kompaktierbare Versatz von 1'451'982 bis 1'584'073 m³ und der nicht oder gering kompaktierbare Versatz von 546'351 bis 573'057 m³.

Als Referenzwert für das Volumen des übrigen Grubengebäudes wird die Summe der Referenzwerte aus beiden Schachanlagen unterstellt. Die Bandbreite wird durch das minimale Volumen der übrigen Grube Bartensleben und die Summe der maximalen Volumen beider Schachanlagen begrenzt. Der Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz und der totale Verfüllgrad werden aus den Referenzdaten der Einzelmolumina berechnet. Die Bandbreiten ergeben sich aus den Teilvolumina für die Summe der beiden Schachanlagen. Eine Ausnahme bildet das Minimum für den Anteil des kompaktierbaren Versatzes, welcher aus den Teilvolumina der übrigen Schachanlage Bartensleben berechnet wird. Die geometrischen Parameter (Referenzwerte mit ihren Bandbreiten) für das übrige Grubengebäude sind in Tabelle D-9 zusammengestellt.

Tabelle D-9: Geometrische Parameter für die übrige Grube

Übrige Grube	Referenz	Minimum	Maximum	Verteilungs- funktion
V_{GG}	7'077'563	4'403'088	7'263'086	(t)
$\zeta_{GG,t}$	0,800	0,793	0,808	(n)
$\zeta_{GG,k}$	0,337	0,101	0,351	(n)



D.4 Darstellung der Einlagerungsbereiche und der Abdichtungen

Die Abbildungen D-2 bis D-6 zeigen die Lage und maximale Erstreckung der Einlagerungsbereiche und die Lage der Abdichtungen. In den Grafiken haben die unterschiedlichen Schattierungen/Farben die folgenden Bedeutungen:

blau schraffiert	maximale Ausdehnung des jeweiligen Einlagerungsbereichs
grün	Diese Bereiche sind so verfüllt, dass sie eine besondere hydraulische Wirksamkeit haben (Entfernen der Auflockerungszone und eventuell Nachverpressen zum Gewährleisten einer firstbündigen Verfüllung); sie werden zur Definition der Abdichtsysteme für das Modell und die Berechnungen herangezogen
grün schraffiert	Diese Bereiche sind ebenfalls so verfüllt, dass sie eine besondere hydraulische Wirksamkeit haben (Entfernen der Auflockerungszone und eventuell Nachverpressen zum Gewährleisten einer firstbündigen Verfüllung), bilden jedoch nicht einen Teil der Abdichtsysteme für das Modell und die Berechnungen
violett	Diese Bereiche sind firstbündig verfüllt, jedoch ohne Entfernen der Auflockerungszone und Nachverpressen. Sie bilden daher nicht einen qualifizierten hydraulischen Widerstand und werden im Sicherheitsnachweis nicht explizit berücksichtigt.
rot	Kalilager
graue Linien	Hohlräume des Grubengebäudes

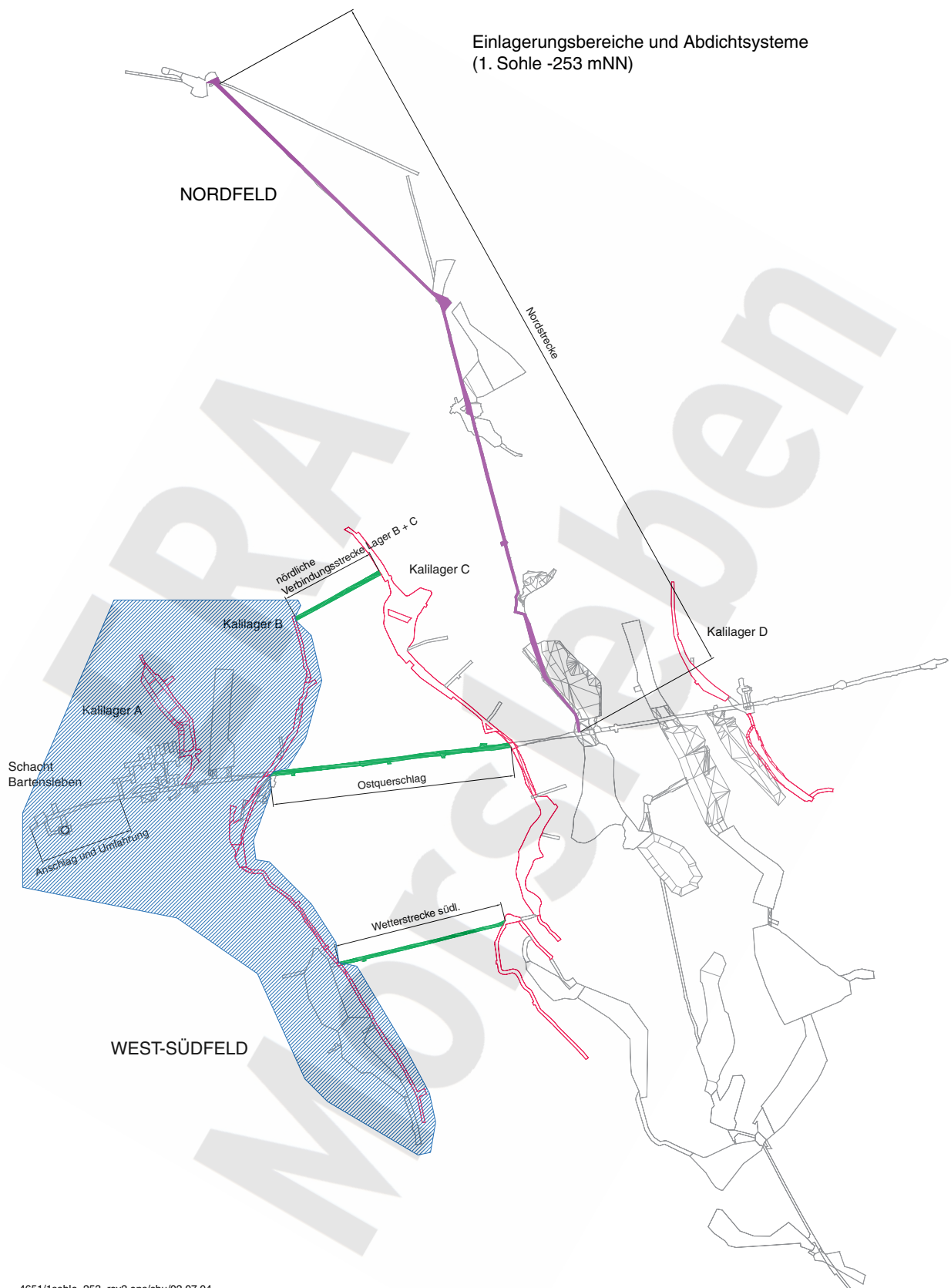


Abbildung D-2: Lokationen der hydraulisch wirksam verfüllten Abdichtungen (grün) sowie der übrigen firstbündig verfüllten Bereiche (violett), der Kallilager (rot) und Maximalausdehnung der Modell-Einlagerungsbereiche (blau schraffiert) auf der 1. Sohle

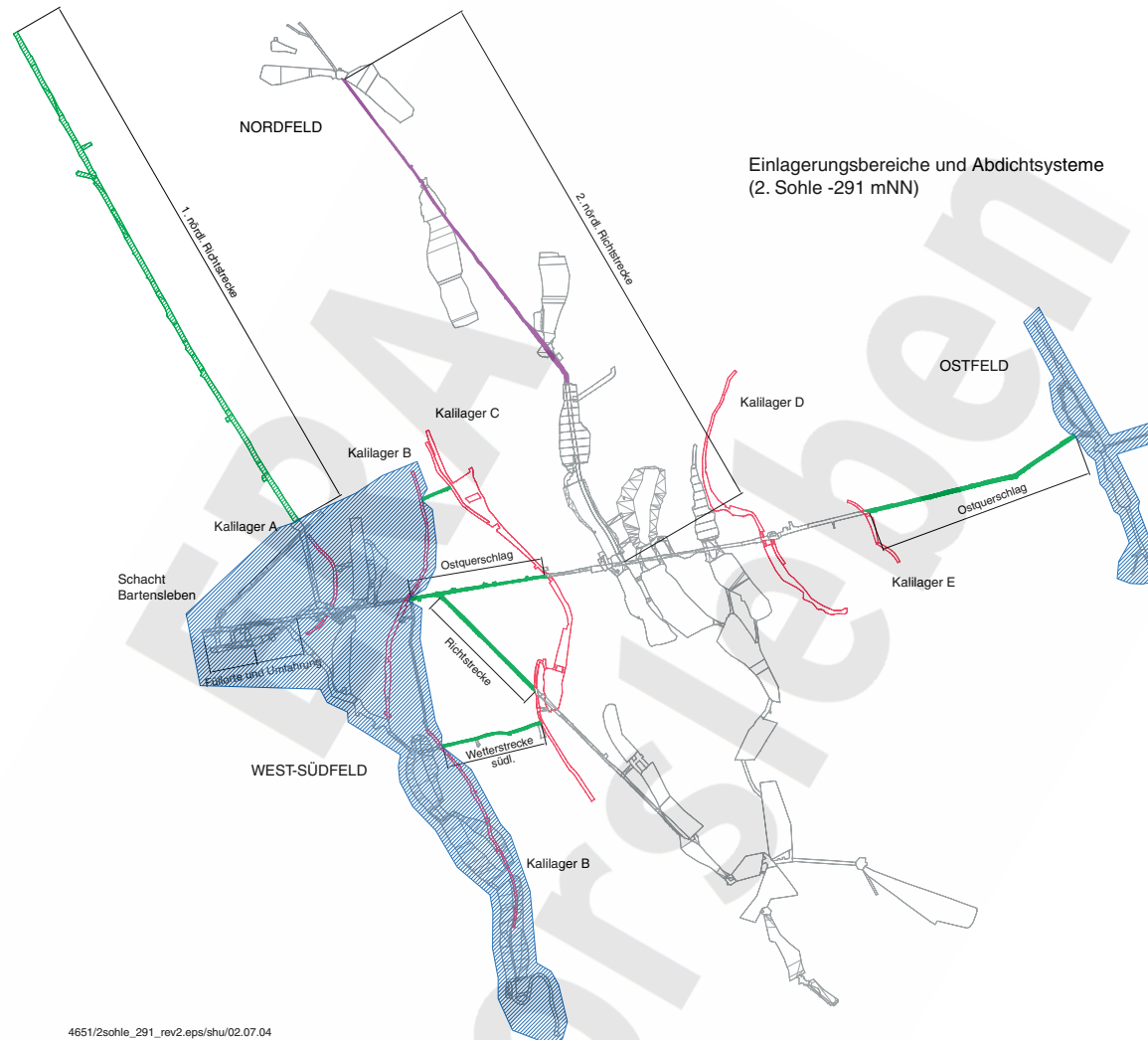


Abbildung D-3: Lokationen der Abdichtungen (grün; grün schraffiert: nicht Bestandteil des Abdichtsystems), der übrigen firstbündig verfüllten Bereiche (violett), der Kallager (rot) und Maximalausdehnung der Modell-Einlagerungsbereiche (blau schraffiert) auf der 2. Sohle

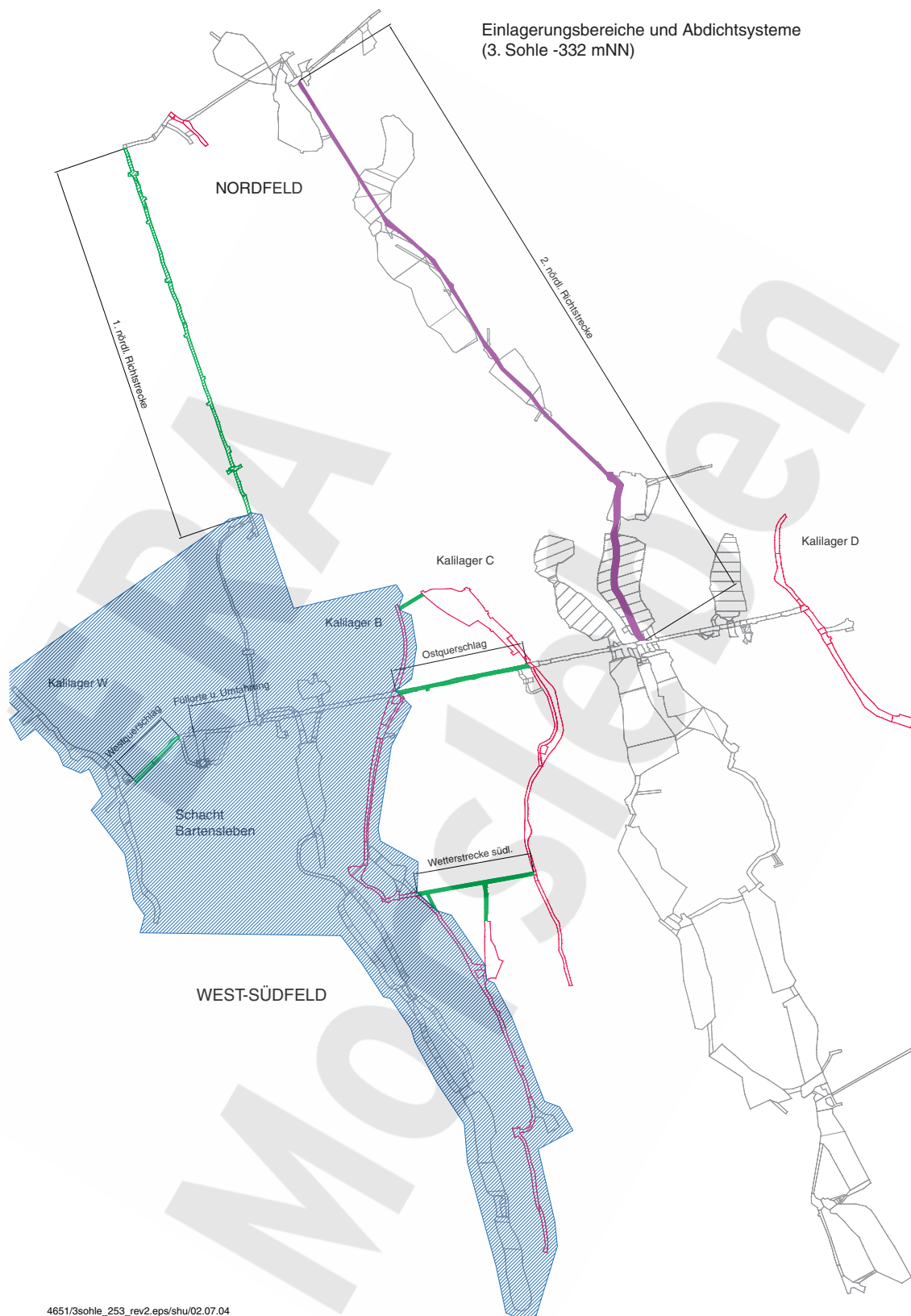
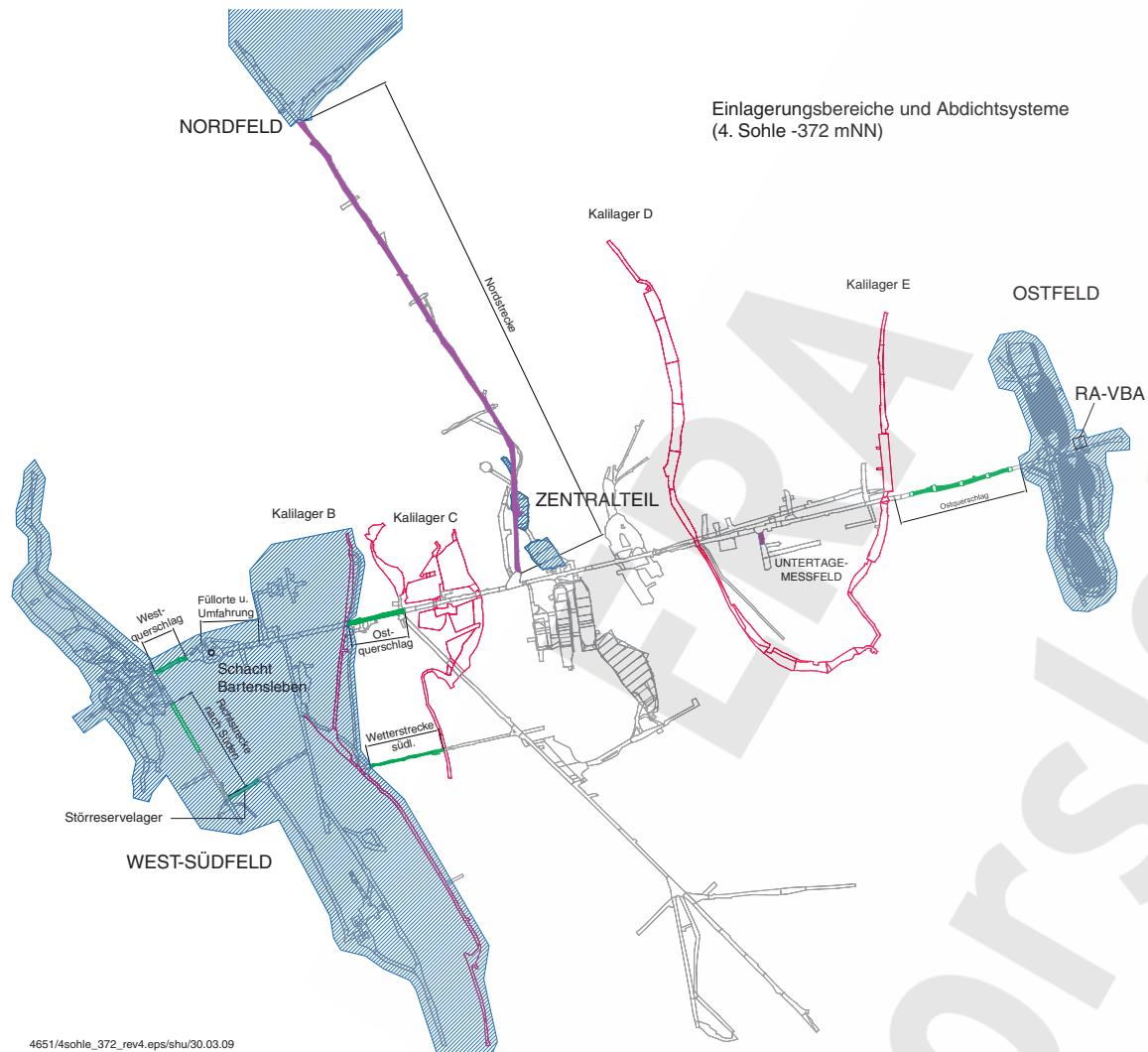


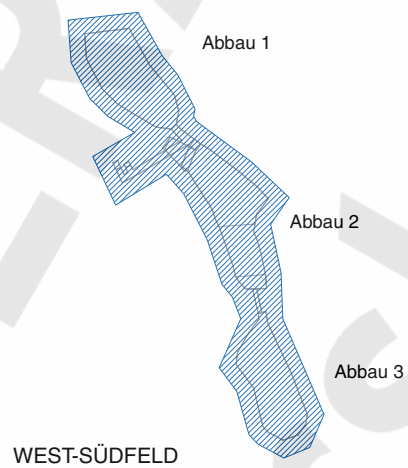
Abbildung D-4: Lokationen der Abdichtungen (grün; grün schraffiert: nicht Bestandteil des Abdichtsystems), der übrigen firstbündig verfüllten Bereiche (violett), der Kaliager (rot) und Maximalausdehnung der Modell-Einlagerungsbereiche (blau schraffiert) auf der 3. Sohle



4651/4sohle_372_rev4.eps/shu/30.03.09

Abbildung D-5: Lokationen der Abdichtungen (grün; grün schraffiert: nicht Bestandteil des Abdichtsystems), der übrigen firstbündig verfüllten Bereiche (violett), der Kallager (rot) und Maximalausdehnung der Modell-Einlagerungsbereiche (blau schraffiert) auf der 4. Sohle

Einlagerungsbereich
(5a-Sohle -395 mNN, West-Südfeld)



4651/5a_sohle_253_rev2.eps/shu/07.06.02

Abbildung D-6: Maximalausdehnung des Modell-Einlagerungsbereichs (blau schraffiert) auf der 5a Sohle

Anhang E Volumen-Neubildung durch Lösungs- und Umlösungsprozesse

Die Aufsättigung ungesättigter Lösung an Steinsalz, bzw. an den Kalilagern führt zur Vergrößerung des Hohlraumvolumens (vgl. Kapitel 3.1.2 und 3.3.1). Zur Ermittlung der Volumenbilanzen werden im Folgenden die Ergebnisse von Modellrechnungen zur Auflösung von Halit in Wasser und der Umlösung von Carnallit in NaCl-Lösung betrachtet.

E.1 Auflösung von Halit

Bei der Auflösung von Halit bis zur Sättigung an NaCl ist die Gesamtvolumenbilanz negativ, d.h. das Volumen an gesättigter NaCl-Lösung ist kleiner als das zu ihrer Bildung benötigte Volumen an Wasser und Halit. Im Grubengebäude kann in das so entstandene "Leervolumen" neue ungesättigte Lösung nachfließen und sich ihrerseits wieder aufsättigen. Bei 25°C lösen sich in 1'000 g H₂O ca. 360 g Halit [Sander 1988]. Bei einer Dichte von 1'198 kg/m³ für die gesättigte NaCl-Lösung und 2'165 kg/m³ für den Halit folgt daraus, dass für 1 m³ anfängliches Hohlraumvolumen – unter Berücksichtigung des nachfließenden Wassers – 0,171 m³ Halit gelöst werden. Für die Auflösung von Halit steht diejenige Wassermenge zur Verfügung, die im offenen Hohlraumvolumen und im Porenvolumen des kompaktierbaren Versatzes des restlichen Grubengebäudes Platz findet. Das Porenwasser des Salzbetons ist schon an NaCl gesättigt. Die Volumenvergrößerung durch Halitauflösung in der Restgrube wird gemäß den Gleichungen im Anhang A, Kapitel A.3.1 berechnet. Der Faktor zur Bestimmung des Volumenzuwachses (F_{NaCl}) beträgt gemäß den obigen Ausführungen 1,171.

E.2 Umlösung von Carnallit

Bei der vollständigen Umlösung von Carnallit im Kontakt zu NaCl-Lösung ist als Endprodukt neben den neugebildeten Mineralen Kainit und Halit eine R-Lösung (im quinären System, entspricht der IP19-Lösung im hexären System) zu erwarten. Das Erreichen dieser Lösungszusammensetzung erfolgt über den Zwischenschritt der Q-Lösung (IP21-Lösung) unter Bildung von Sylvin und Halit. Die Reaktion von Q- zu R-Lösung stellt sich als eine Art Kreisprozess dar, bei dem aus der Q-Lösung unter Auflösung von Kieserit Kainit und eine KCl-untersättigte Lösung entstehen. Ist nun Sylvin vorhanden, so reagiert dieser mit der KCl-untersättigten Lösung wiederum zu Q-Lösung unter Bildung von Kainit. Dieser Prozess wird solange stattfinden, bis entweder kein Kieserit mehr verfügbar ist, dann resultiert eine Q-Lösung, oder bis kein Sylvin mehr verfügbar ist, dann resultiert eine R-Lösung [Sander 1988]. Betrachtet man anstelle des quinären Systems das hexäre System, so gestaltet sich dieser Prozess wegen zusätzlich beteiligter Ca-haltiger Minerale etwas komplexer, verläuft aber prinzipiell ähnlich.

Für den Nachweis der Langzeitsicherheit wird nur die Entwicklung bis zur Q-Lösung betrachtet. Hierfür gibt es mehrere Gründe:



- Aufgrund der geringen Lösegeschwindigkeit des Kieserits ist davon auszugehen, dass die Bildung der R-Lösung relativ langsam fortschreitet (im Vergleich zur Bildung einer NaCl- oder Q-Lösung durch Um- bzw. Auflösung). Eine genaue Quantifizierung ist bisher jedoch nicht erfolgt [Sander 1988].
- Häufig werden in Carnallitlagern Q-Lösungen gefunden. Dann ist entweder der Kreisprozess noch im Gang oder aber wegen Kieseritmangels zum Stehen gekommen [Sander 1988]. Aus der angenommenen Zusammensetzung für den Carnallit geht hervor, dass die Kieseritmenge nicht zur Bildung der R-Lösung als Endprodukt ausreichen wird.
- Der Unterschied im beteiligten Gesamtvolumen (Lösung und beteiligte Feststoffe) bei der Entwicklung von der Q- zur R-Lösung ist sehr gering ($< 5\%$) [Sander 1988]. Die Variation der Zusammensetzung im Salzgestein überwiegt diesen Fehler vermutlich deutlich.
- Das beteiligte Feststoffvolumen bei der Entwicklung von der Q- zur R-Lösung nimmt zu (wenn auch nur gering). Eine Art Selbstabdichtung ist prinzipiell möglich.

Mit einem Liter NaCl-Lösung reagiert die entsprechende Menge Carnallit unter Bildung von IP21-Lösung und den Mineralen Halit, Kainit, Sylvit und Polyhalit. Dabei verringert sich das Gesamtvolumen geringfügig. Dadurch kann NaCl-Lösung nachfließen, die ihrerseits wieder mit dem Carnallit reagiert. Dies geschieht solange, bis das Gesamtvolumen der Produkte gleich dem Gesamtvolumen der Edukte (ohne zusätzlich zufließende Lösung) ist.

Mit Berücksichtigung des Nachflusses an NaCl-Lösung werden 744 cm^3 Feststoff und $1'623 \text{ cm}^3$ IP21-Lösung gebildet. Es ist anzunehmen, dass der neugebildete Feststoff am Ort seiner Entstehung verbleibt und mit dem zusätzlich gebildeten Lösungsvolumen ein poröses Aggregat bildet, für das sich rechnerisch eine Porosität von $45,6\%$ ergibt. Das entspricht annähernd der Porosität des eingebrachten Salzgruses. Daher wird diese neugebildete Menge an Umlösungsprodukten dem schon vorhandenen Anteil an kompaktierbarem Versatz zugerechnet. Die Volumenzunahme durch Carnallitumlösung in NaCl-Lösung wird gemäß den Gleichungen im Anhang A, Kapitel A.3.1 berechnet. Dabei betragen die Faktoren $F_{IP21,L}$ und $F_{IP21,S}$ zur Bestimmung des Volumenzuwachses $1,623$ bzw. $0,744$.



Anhang F Konvergenz von verfüllten und unverfüllten Hohlräumen

Das in einem Grubengebäude wie dem ERAM vorhandene Gesamthohlraumvolumen (Porenvolumen des Versatzmaterials und unverfüllte Hohlräume) nimmt mit der Zeit durch die Gebirgskonvergenz ab.

Die Verringerung des Gesamthohlraumvolumens führt dabei u.a. zu einem Auspressen von Lösung, die in den jeweiligen Hohlräumen vorhanden ist. Außerdem wird eine gegebenenfalls im abgedichteten Einlagerungsbereich vorhandene Gasmenge durch die Konvergenz komprimiert bzw. ebenfalls ausgepresst. Dies führt, wenn das Gas nicht entweichen oder in irgendeiner Form gebunden werden kann, zu einem Druckaufbau. Daher ist die Konvergenz in zweifacher Hinsicht für den Lösungsaustritt aus den Einlagerungsbereichen wesentlich und muss im Modell in geeigneter Weise berücksichtigt werden. Der Druck eines Fluids innerhalb eines Grubenbaus stützt diesen jedoch auch und wirkt dadurch der Konvergenz entgegen.

Da ebenso ein poröser Versatz eine stützende Wirkung ausüben kann, ist die Konvergenz von unverfülltem und verfülltem Hohlraumvolumen zu unterscheiden. Die Art des Versatzes ist in diesem Zusammenhang von Bedeutung, da dieser das Ausmaß der stützenden Wirkung beeinflusst. Da im ERAM unterschiedliche Arten von Versatz zum Einsatz kommen, wird diesen Unterschieden Rechnung getragen.

In diesem Anhang wird das mathematische Konzept zur Beschreibung der Konvergenz dargestellt (Abschnitt F.1). Des Weiteren werden zusammenfassend die Parameter definiert, die einen Einlagerungsbereich in Bezug auf die Konvergenz charakterisieren (Abschnitt F.2). Es wird gezeigt, wie der gewählte Konvergenzansatz sowohl die Stützwirkung eines Fluiddrucks im Inneren als auch die des Versatzmaterials berücksichtigt.

Der Druck in einem vertikal ausgedehnten Hohlraum kann durch Konvergenz rechnerisch derart ansteigen, dass er im Firstbereich zum Überschreiten der geringsten Gebirgsspannung, zu einem Öffnen des Gebirges und damit zur Bildung neuer Wegsamkeiten für das Fluid führt (konvergenzbedingte Frac-Bildung). Die modelltechnische Umsetzung der Frac-Bildung wird im Abschnitt F.3.1 beschrieben.

F.1 Mathematisches Konzept für die Beschreibung der Gebirgskonvergenz

Wie oben erläutert, ist die Konvergenz abhängig vom Verfüllgrad der Hohlräume und dem Kompaktionsverhalten des Versatzes. Es wird daher unterschieden zwischen (1) unverfüllten Hohlräumen, (2) mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfüllten Hohlräumen und (3) mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Hohlräumen. Für diese drei Arten von Hohlräumen werden im Modell explizite Zeitabhängigkeiten verwendet.



- (1) **Unverfüllte Hohlräume:**
Zur Beschreibung der Konvergenz von unverfüllten Hohlräumen wird eine empirische Näherung verwendet, die sich auf eine in der Literatur publizierte, hoch nichtlineare Differentialgleichung für die Konvergenz von Hohlräumen abstützt.
- (2) **Mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfüllte Hohlräume:**
Das Porenvolumen von nicht oder gering kompaktierbarem Versatz ist definitionsgemäß zeitlich konstant, sofern es nicht durch Lösungs- oder Ausfällungsprozesse verändert wird. Sofern eine Abnahme des Porenraums von „nicht oder gering kompaktierbarem Versatz“ simuliert werden soll, gelangt vereinfachend ein Exponentialansatz, bezogen auf das wirksame Porenvolumen (vgl. Kapitel 4.2), zur Anwendung.
- (3) **Mit kompaktierbarem Versatz verfüllte Hohlräume:**
Zur Beschreibung der Konvergenz von Hohlräumen mit kompaktierbarem Versatz wird eine empirische Näherung verwendet, die sich auf eine in der Literatur publizierte, hoch nichtlineare Differentialgleichung für die Konvergenz von mit Salzgrus verfüllten Hohlräumen abstützt.

Es wird angenommen, dass unverfülltes Hohlraumvolumen und kompaktierbar verfülltes Hohlraumvolumen unabhängig voneinander konvergieren. Dies entspricht dem konzeptuellen Modell, dass bei der Konvergenz der kompaktierbare Versatz nicht in den unverfüllten Hohlraum ausweicht, z.B. wegen dazwischen liegender mechanischer Barrieren (Salzbeton, Salzgestein).

In Abschnitt F.1.1 werden der in der Literatur publizierte Ansatz aufgeführt und erste Vereinfachungen vorgenommen.

Die resultierenden Zeitabhängigkeiten für alle drei Arten von Hohlräumen, wie sie im Modell zur Anwendung kommen, werden in Abschnitt F.1.2 zusammengefasst. Eine Zusammenstellung aller Parameter, die für die Beschreibung des Konvergenzverhaltens maßgebend sind, enthält Abschnitt F.2.

F.1.1 Grundlegende Gleichung für die Konvergenz von kompaktierbarem Versatz

Grundlage bildet die in [PSE 1985] begründete Gleichung für die Konvergenz von Hohlräumen, die mit Salzgrus versetzt sind. Vorgreifend sei hier die Annahme festgehalten, dass das Konvergenzverhalten des kompaktierbaren Versatzes in den Einlagerungsgrubenbauen (Abfälle, Braunkohlefilterasche, Salzgrus) ähnlich ist wie jenes von reinem Salzgrus. Die mathematische Beschreibung der Konvergenz beruht somit auf dem Ansatz, dass die zeitliche Volumenverminderung $dV(t)/dt$ zu jedem Zeitpunkt proportional zum aktuellen Volumen V ist.

Die Konvergenz von Hohlräumen, die mit Salzgrus und / oder unter Druck stehenden Flüssigkeiten gefüllt sind, wird mit dem PSE-Ansatz [PSE 1985] wie folgt modelliert:

$$\frac{d}{dt} V(t) = -K(p, \varepsilon, T) \cdot V(t) \quad (\text{F-1})$$

und



$$K(p, \varepsilon, T) = c \cdot f_r \cdot f_1(p) \cdot f_2(\varepsilon) \cdot f_3(T) \quad (\text{F-2})$$

wobei

V Hohlraumvolumen (Volumen des Grubenbaus); [m^3]

c Konvergenzrate des unverfüllten Hohlraums ohne Stützwirkung durch den Fluiddruck; [a^{-1}]

p Fluiddruck im Inneren des Hohlraumes; [Pa]

T Temperatur im Hohlraum; [K]

ε Porosität des Versatzes; [-]

Da das Feststoffvolumen bei der Konvergenz unverändert bleibt, nimmt nur das Porenvolumen ab, und es gilt:

$$\frac{d}{dt} V(t) = \frac{d}{dt} (\varepsilon \cdot V) = V \frac{d\varepsilon}{dt} + \varepsilon \frac{dV}{dt} \quad (\text{F-3})$$

und daraus, mit Gl. (F-1)

$$\frac{d}{dt} \varepsilon = -(1 - \varepsilon) \cdot K(p, \varepsilon, T) \quad (\text{F-4})$$

Der Faktor f_r beinhaltet eine zusätzliche Stützwirkung: Werte kleiner als 1 können benutzt werden, um die Reduktion der Konvergenz durch nicht berücksichtigte Prozesse einzubeziehen, z.B. die zusätzliche Stützwirkung von Abfallmatrix und Behältern. Im Folgenden wird keine zusätzliche Stützwirkung außer der des Versatzmaterials angenommen und f_r daher immer auf den Wert 1 gesetzt.

Die Abhängigkeit der Konvergenz vom Druck im Inneren wird durch den Faktor f_1 berücksichtigt:

$$f_1(p) = \left(\frac{p_{\text{litho}} - p}{p_{\text{litho}}} \right)^m \quad (\text{F-5})$$

mit:

p_{litho} Gebirgsdruck in der entsprechenden Teufe; [Pa]

m charakteristischer Exponent des Stoffgesetzes für das sekundäre Kriechen von Steinsalz; [-]

Die Stützwirkung des Korngerüstes des Versatzes in Abhängigkeit von der Porosität wird durch den Faktor f_2 in der Gleichung (F-2) beschrieben:



$$f_2(\varepsilon) = \begin{cases} \varepsilon \cdot (1 - \varepsilon / \varepsilon_r) \cdot \left[(1 - \varepsilon / \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon \cdot (1 - \varepsilon / \varepsilon_r))^{1/m} \right]^{-m} & \varepsilon < \varepsilon_r \\ 1 & \varepsilon \geq \varepsilon_r \end{cases} \quad (\text{F-6})$$

mit:

ε_r charakteristische Porosität, ab der eine Stützwirkung durch die betrachtete Verfüllung hervorgerufen wird; [-]

Die Funktion f_3 trägt der Tatsache Rechnung, dass mit höherer Temperatur die Kriechgeschwindigkeit des Salzes anwächst, was zu einer schnelleren Konvergenz der Hohlräume führt [PSE 1985]. Im zu betrachtenden Fall sind die Temperaturänderungen jedoch so gering, dass sie nicht in die Berechnung einbezogen werden. Damit gilt

$$f_3 = 1 \quad (\text{F-7})$$

F.1.2 Resultierende Zeitabhängigkeiten für Hohlraumvolumina

Bei unverfüllten Hohlräumen sind die Funktionen f_2 und f_3 ebenso wie der Reduktionsfaktor f_r definitionsgemäß 1, und das Volumen nimmt ohne Stützwirkung durch einen Fluidinnendruck exponentiell mit der Konvergenzrate c ab. Da die Einlagerungsbereiche jedoch abgedichtet werden, wird sich in ihnen ein Druck aufbauen. Dieser wirkt der Konvergenz entgegen (Funktion f_1). Die zeitliche Änderung des unverfüllten Hohlraumvolumens, V_u , ist somit beschrieben durch:

$$\frac{d}{dt} V_u(t) = -c \cdot f_1(p) \cdot V_u(t) \quad (\text{F-8})$$

Die zeitliche Änderung des Porenvolumens von Hohlräumen mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz, $V_{v2}(t)$, wird, wie in Abschnitt F.1 erwähnt, vereinfacht durch ein Exponentialgesetz simuliert.

$$(\varepsilon_{v2} \cdot V_{v2})(t) = V_{v2,0} \cdot \varepsilon_{v2} \cdot e^{-c \cdot t / \gamma} \quad (\text{F-9})$$

Hier ist $V_{v2,0}$ das mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz verfüllte Gesamtvolumen eines Hohlräume zum Zeitpunkt $t = 0$, also zu Beginn der Konvergenz. ε_{v2} ist die wirksame Porosität (vgl. Kapitel 4.2) des Versatzes vor Konvergenz und γ (>1) beschreibt die Verringerung der Konvergenzrate von Hohlräumen mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz gegenüber jenem von unverfüllten Hohlräumen. Für nicht oder gering kompaktierbaren Versatz ist $\gamma = \infty$.

Die zeitliche Abnahme des Porenvolumens von Hohlräumen, die mit kompaktierbarem Versatz verfüllt sind, $V_{v1}(t)$, wird entsprechend Gleichung (F-10) beschrieben.



$$\frac{d}{dt} V_{v1}(t) = -c \cdot f_1(p) \cdot f_2(\varepsilon_{v1}(t)) \cdot V_{v1}(t) \quad (\text{F-10})$$

Die Porosität des kompaktierbaren Versatzes ändert sich entsprechend Gleichung (F-4):

$$\frac{d}{dt} \varepsilon_{v1} = -c \cdot (1 - \varepsilon_{v1}(t)) \cdot f_1(p) \cdot f_2(\varepsilon_{v1}(t)) \quad (\text{F-11})$$

In Gleichung (F-10) ist V_{v1} das mit kompaktierbarem Versatz verfüllte Gesamtvolumen. ε_{v1} ist die Porosität des Versatzes, die sich entsprechend der Gleichung (F-11) ebenfalls mit der Zeit ändert.

Zum kompaktierbaren Versatz zählen außer Salzgrus auch Braunkohlefilterasche sowie die Abfälle. Dabei wird angenommen, dass die Stützwirkung dieser Versatzstoffe bei Konvergenz derjenigen von Salzgrus vergleichbar ist.

F.1.3 Hohlraumvolumina eines Bereichs

Im Modell werden verschiedene Grubenbaue zu Bereichen zusammengefasst. In einem Einlagerungsbereich werden dabei Einlagerungsgrubenbau und restlicher Einlagerungsbereich unterschieden. Jeder dieser Teilbereiche wird dabei unterteilt in einen unverfüllten Volumenanteil und einen Volumenanteil mit kompaktierbarem Versatz sowie einen solchen mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz, soweit dies erforderlich ist. In Anhang D sind die Zusammenhänge zwischen diesen Volumina aufgeführt und die Beziehungen zwischen den unterschiedlich konvergierenden Volumina V_u , V_{v1} und V_{v2} sowie den Eingangsgrößen für die Modellrechnungen

- Anfangshohlraumvolumina des Einlagerungsgrubenbaus (V_{EH}) und des restlichen Einlagerungsbereichs (V_{REB})
- relative Verfüllgrade mit kompaktierbarem und nicht oder gering kompaktierbarem Versatz (ζ_i)

angegeben. In gleicher Weise werden auch die Volumina der Mischungsbereiche und der übrigen Grube parametrisiert und beschrieben.

F.2 Parametrisierung der Konvergenz

Die im Modell verwendete Gleichung für die Abnahme des Gesamthohlraumvolumens eines Einlagerungsbereichs, eines Mischungsbereichs bzw. der übrigen Grube setzt sich aus der Summe der drei Beiträge (1) Volumina von unverfüllten Hohlräumen, (2) Porenvolumen des kompaktierbaren Versatzes und (3) wirksames Porenvolumen des nicht oder gering kompaktierbaren Volumens zusammen:

$$V(t) = V_u(t) + \varepsilon_{v1}(t) \cdot V_{v1}(t) + \varepsilon_{v2,0} \cdot V_{v2,0} \cdot e^{-ct/\gamma} \quad (\text{F-12})$$

Das Konvergenzverhalten von Einlagerungsbereichen, von Mischungsbereichen sowie der übrigen Grube wird somit durch folgende Größen beschrieben: $V_u(t)$, $V_{v1}(t)$, $V_{v2,0}$, $\varepsilon_{v1}(t)$, $\varepsilon_{v2,0}$ und c , m , p_{litho} , ε_r und γ .



F.3 Frac-Bildung

Im Modellkonzept wird die Möglichkeit einer Rissbildung im umliegenden Gestein durch einen starken Anstieg des Fluiddrucks im Innern eines Hohlraums sowohl als Folge der Gasbildung (Frac-Bildung) als auch des alleinigen Wirkens der Konvergenz berücksichtigt.

F.3.1 Konvergenzbedingte Frac-Bildung

Auch ohne Gasbildung erreicht der Fluiddruck an der Firste eines vertikal ausgedehnten Hohlraums (oder eines hydraulisch kommunizierenden Hohlraumsystems) mit der Zeit einen Wert, der über dem dort herrschenden Gebirgsdruck liegt. Unter lithostatischen Verhältnissen entsteht der Überdruck an der Firste dabei durch eine Druckerhöhung infolge der Konvergenz auf lithostatische Druckverhältnisse an der Sohle:

$$p_{\text{litho}}(\text{Sohle}) = \rho_{\text{litho}} \cdot g \cdot h_{\text{Sohle}} > p_{\text{frac}} = p_{\text{litho}}(\text{Firste}) = \rho_{\text{litho}} \cdot g \cdot h_{\text{Firste}} \quad (\text{F-13})$$

mit:

p_{frac} eine Rissbildung auslösender Druck im Bereich; [MPa]

$p_{\text{litho}}(\text{Sohle})$ lithostatischer Druck an der Sohle des Bereichs; [MPa]

$p_{\text{litho}}(\text{Firste})$ lithostatischer Druck an der Firste des Bereichs; [MPa]

h_{Sohle} Tiefe der Sohle des Bereichs; [m]

h_{Firste} Tiefe der Firste des Bereichs; [m]

ρ_{litho} durchschnittliche Dichte des überlagernden Gesteins; [kg/m³]

Der Grenzdruck p_{frac} wird spezifisch für jeden Bereich festgelegt. Vereinfachend wird er dem lithostatischen Druck an der Firste des Bereichs unter der Annahme eines ungestörten Spannungsfeldes (Gleichung (F-13)) gleichgesetzt. Zur Frac-Bildung kommt es, wenn der Fluiddruck den kritischen Wert, im Modell den lithostatischen Druck, überschreitet:

$$p(t_{\text{frac}}) > p_{\text{frac}} \quad (\text{F-14})$$

Dadurch liegt dem Modell die Vorstellung zugrunde, dass ein Frac entsteht, wenn für die für die maßgebliche Spannungsdifferenz $p_{\text{litho}}(\text{Firste}) - p_{\text{frac}} \geq 0$ gilt, d.h. das Fluid im Inneren die Gesteinsmatrix auseinander drücken kann. Dabei wird die Zugfestigkeit des Salzgesteins in erster Näherung ebenso vernachlässigt wie die Störung des isotropen Spannungszustandes durch den Hohlraum selbst.

Für Kavernen, insbesondere für die Öl- und Gasspeicherung, liegen zur Frac-Bildung Felduntersuchungen vor [Alla et al. 1993], [Fokker 1995]. Dabei wird beobachtet, dass Kavernen, die sich an den Rändern des Salzstockes befinden, bei schnellem Druckanstieg und vorhergehender längerer Entlastung einen Frac bilden können, bevor das Fluid wieder den lithostatischen Druck erreicht



hat. Dies wird darauf zurückgeführt, dass sich das Gestein der neuen Belastung nicht schnell genug durch Kriechen entziehen kann. Kavernen, die jedoch mehr im Inneren der Salzstöcke liegen, zeigen sich resistenter gegen weiträumige Frac-Bildung. Als Grund wird angegeben, dass die herrschenden Spannungsverhältnisse im Fernfeld wieder lithostatischen Bedingungen entsprechen.

Der Grenzdruck in der Höhe des lithostatischen Druckes (Voraussetzung für Gleichung (F-13)) ist daher nur gerechtfertigt, wenn von einem ungestörten Spannungsfeld um den betrachteten Grubenbau ausgegangen werden kann. Diese Annahme ist zulässig:

- Da in einiger Entfernung (wenige Radien) vom betrachteten Bereich wieder ein weitgehend ungestörtes Spannungsfeld angenommen werden kann, ist die Frac-Bildung dort tatsächlich durch den lithostatischen Druck beschränkt. Vor Erreichen des lithostatischen Druckes kann Rissbildung, die zu Ausströmung aus dem Lagerbereich führt, nur dann auftreten, wenn höher durchlässige Strukturen im Bereich des gestörten Spannungsfeldes existieren und durch den räumlich beschränkten Riss erschlossen werden.
- Ein weiterer Faktor wirkt behindernd auf die Rissbildung: Entscheidend für das Öffnen eines Risses um einen in erster Näherung runden Hohlraum sind die tangentialen Spannungen. Eine elastische Theorie führt aber für diese Spannungskomponente am Rand des Grubenbaus auf den doppelten Wert des lithostatischen Druckes. Dieser Wert wäre dann, bei elastischem Verhalten des Gesteins, der Grenzwert für das Auftreten eines Fracs. Unterstellt man plastisches Materialverhalten, so liegt dieser Wert tiefer, ggf. unter dem lithostatischen Druck. Die Tangentialspannung weist jedoch in geringer Entfernung von der Kontur des Hohlraumes ein Maximum auf, das in jedem Fall über dem lithostatischen Druck liegt und als Grenzwert für radiale Rissausbreitung über große Entfernung angesehen werden kann.
- Entlang von Abdichtungen ist kurz nach der Verfüllung mit Spannungen zu rechnen, die unter den lithostatischen Spannungen liegen. Zudem wird ein anisotroper Spannungszustand anzutreffen sein. Der Frac-Druck hängt hier von Geometrie, Gebirgsverhalten und der Zeit ab. Es ist aber davon auszugehen, dass sich durch Kriechen des Gebirges hier Spannungen in der Größe des lithostatischen Drucks einstellen, bevor der Fluiddruck im Inneren des Bereichs wesentlich ansteigt. Die Hauptspannungen werden sich im Laufe des Kriechvorganges angleichen und gegen den Wert des lithostatischen Drucks streben.

F.3.2 Frac-Bildung durch Gasbildung

Gasbildung im Einlagerungsbereich verstärkt den Druckanstieg. Dadurch kann der Grenzdruck p_{frac} früher überschritten werden und Rissbildung eintreten. Die Ausführungen des vorhergehenden Abschnitts gelten sinngemäß.

F.3.3 Konzept des Flüssigkeitsaustritts nach der Frac-Bildung

Nach der Ausbildung eines Fracs zum Zeitpunkt t_{frac} wird die Beschreibung des Ausströmens von Fluid aus einem Einlagerungsbereich in den Mischungsbereich neu parametrisiert, indem die Dauer der erhöhten Freisetzung von Fluid aus dem Bereich bis zum Druckausgleich auf hydrostatische



Druckverhältnisse als Parameter gewählt wird. Diese Parameterwahl ist sinnvoll, da (i) zur Permeabilität von neu gebildeten Rissen keine Aussage gemacht werden kann und (ii) die Wahl einer kurzen Auspressdauer konservativ ist und die Auswirkungen dabei nicht vom gewählten Wert abhängen (siehe unten). Für die Auspressung von Fluiden aus dem Bereich im Anschluss an diese Zeitperiode erhöhter Freisetzung werden hydrostatische Verhältnisse im betreffenden Bereich angenommen.

Der Parameter der konzeptionellen Beschreibung ist somit die Zeitdauer Δt_{frac} einer erhöhten Freisetzung von Fluid aus dem Bereich. Als Folge der erhöhten Fluidfreisetzung fällt der Druck auf hydrostatische Verhältnisse ab. Das innerhalb dieser Zeit freizusetzende Fluidvolumen ergibt sich aus der Druckdifferenz zwischen dem auslösenden Fluiddruck p_{frac} und dem hydrostatischen Druck $p_{w,z}$. Die Auspressrate an Fluid aus dem Bereich während dieses Zeitraumes folgt aus der Kenntnis der Zeitdauer der Freisetzung Δt_{frac} und dem freizusetzenden Volumen:

$$Q_{w,\text{out}}(t) = \text{const.} = \frac{1}{\Delta t_{\text{frac}}} \cdot \min \left[\frac{p_{\text{frac}} - p_{w,z}}{p_{w,z}} \cdot (V_{\text{EB}}(t_{\text{frac}}) - V_{\text{EB,L}}(t_{\text{frac}})), V_{\text{EB,L}}(t_{\text{frac}}) \right] \quad (\text{F-15})$$

mit

$V_{\text{EB,L}}$ Lösungsvolumen im Einlagerungsbereich zum Zeitpunkt t_{frac} ; [m³]

Nach Entstehen des Fracs wird kein hydraulisch relevanter Widerstand zwischen dem betroffenen Einlagerungsbereich und der übrigen Grube angenommen, so dass die Auspressung von Fluiden aus dem Einlagerungsbereich direkt aus der anschließenden Konvergenz des Bereichs und eventuell der Gasbildung im Bereich resultiert, wobei eine Stützwirkung durch den im Bereich wirksamen hydrostatischen Druck in der Berechnung der Konvergenz berücksichtigt wird.

Im Szenario „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ erfolgt während der kurzen Phase des Druckausgleichs nach der Frac-Bildung vereinfachend und konservativ zuerst eine Freisetzung der Lösung und nachfolgend des Gases aus dem Bereich.

Die Zeitdauer einer erhöhten Freisetzung ist nicht relevant, solange sie kurz ist gegenüber der Zeit, während der die Lösung im Mischungsbereich durch den Lösungszutritt aus der übrigen Grube ausgetauscht wird. Dies wird im Folgenden gezeigt. Numerisch wird im Modell eine Zeitdauer von 1 Jahr angesetzt.

Das effektive Volumen im Mischungsbereich, V_{eff} , ist – bei wirksamer Sorption – radionuklidspezifisch und setzt sich aus dem Lösungsvolumen des Mischungsbereichs $V_{\text{VG}}(t)$ und dem sorbierenden Material M_{VG} sowie dessen Sorptionskoeffizienten K_d zusammen:

$$V_{\text{eff}} = V_{\text{VG}}(t) + M_{\text{VG}} \cdot K_d \quad (\text{F-16})$$

Vor dem Zutritt der Lösung aufgrund von Frac-Bildung sei die Radionuklid-Konzentration im Mischungsbereich gleich Null. Durch einen Zustrom unkontaminierter Lösung Q_1 aus der übrigen Grube und einen Zustrom kontaminierter Lösung $Q_{w,\text{out}}$ mit der Konzentration $C_{w,\text{out}}$ kommt es zum Aufbau einer Konzentration $C(t)$ im Mischungsbereich (siehe Abbildung F-1). Die Konzentration



$C_{w,out}$ sei die Konzentration im Einlagerungsbereich zum Zeitpunkt der Frac-Bildung. Der Fluss aus dem Einlagerungsbereich ergibt sich aus Gleichung (F-15), wobei ein Gesamtvolumen an kontaminierter Lösung, V_{frac} , über die Zeitdauer Δt_{frac} freigesetzt wird.

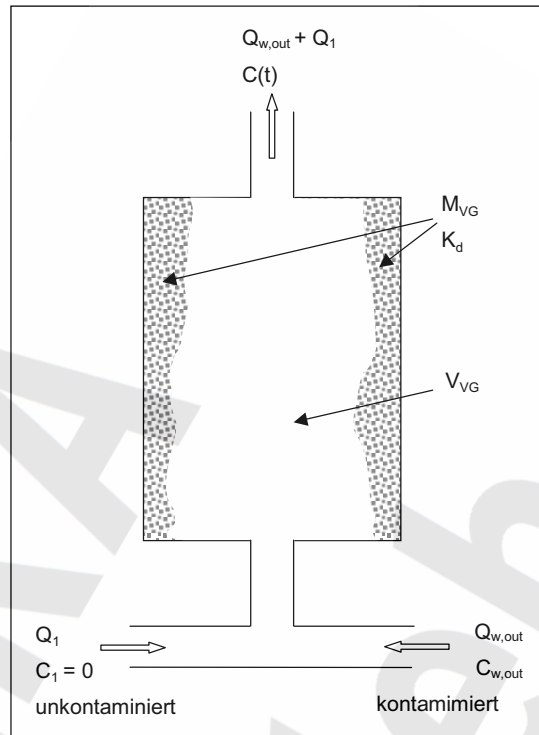


Abbildung F-1: Schematische Darstellung des Mischungsbereichs.

Die Änderung der Konzentration bei konstantem Fluss im Mischungsbereich wird durch die Gleichung (F-17) und die Randbedingung (F-18) beschrieben:

$$V_{eff} \frac{dC}{dt} = Q_{w,out} \cdot C_{w,out} - (Q_1 + Q_{w,out}) \cdot C \quad (F-17)$$

$$C(t = t_{frac}) = 0 \quad (F-18)$$

Als Lösung ergibt sich bei Vernachlässigung der zeitlichen Änderung von V_{eff} und Q_1 während der kurzen zu betrachtenden Zeitperiode Δt_{frac} :

$$C(t) = C_{w,out} \cdot \frac{Q_{w,out}}{Q_1 + Q_{w,out}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{Q_1 + Q_{w,out}}{V_{eff}} \cdot (t - t_{frac})} \right) \quad t_{frac} \leq t \leq t_{frac} + \Delta t_{frac} \quad (F-19)$$

mit V_{eff} als effektivem Volumen des Mischungsbereichs inkl. Sorption (vgl. Gleichung (F-16) und Anhang A, Kap. A.8). Am Ende der erhöhten Freisetzung, $t_{frac} + \Delta t_{frac}$, ist die Konzentration im Verdünnungsbereich maximal und beträgt:

$$C_{\max} = C(t_{\text{frac}} + \Delta t_{\text{frac}}) = C_{w,\text{out}} \cdot \frac{Q_{w,\text{out}}}{Q_1 + Q_{w,\text{out}}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{Q_1 + Q_{w,\text{out}}}{V_{\text{eff}}} \cdot \Delta t_{\text{frac}}} \right) \quad (\text{F-20})$$

Unter der Verwendung der Definition von $Q_{w,\text{out}}$, als dem Fluss, der notwendig ist zum Druckabbau im Bereich über die Zeitdauer von Δt_{frac}

$$Q_{w,\text{out}} = \frac{V_{\text{frac}}}{\Delta t_{\text{frac}}} \quad (\text{F-21})$$

ergibt sich für die maximale Konzentration:

$$C_{\max} = C_{w,\text{out}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{Q_1 \cdot \Delta t_{\text{frac}}}{V_{\text{eff}}} \right)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{Q_1 \cdot \Delta t_{\text{frac}} + V_{\text{frac}}}{V_{\text{eff}}}} \right) \quad (\text{F-22})$$

Wird die Zeitdauer der erhöhten Freisetzung genügend klein gewählt, so ist die maximale Konzentration unabhängig von der Zeitdauer der Freisetzung:

$$C_{\max} = C_{w,\text{out}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{V_{\text{frac}}}{V_{\text{eff}}}} \right) \quad Q_1 \cdot \Delta t_{\text{frac}} \ll V_{\text{eff}} \quad (\text{F-23})$$

Die Wahl der Zeitdauer einer erhöhten Freisetzung spielt im Modell somit keine signifikante Rolle, solange sie kurz ist gegenüber der Zeit, in der die Lösung im Mischungsbereich durch den Zutritt aus der übrigen Grube ausgetauscht wird. Ist sie länger, ergibt sich eine niedrigere Konzentration im Mischungsbereich. Numerisch wird im Modell eine Zeitdauer von 1 Jahr angesetzt, was aufgrund der zu erwartenden Flüsse ausreicht.

Anhang G Modellierung der Gasbildung

Die Gasentwicklung kann auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers einen wesentlichen Einfluss haben. Für die Sicherheitsanalyse wird darum eine Prognose des zeitlichen Verlaufs der Gasentwicklung benötigt. Zu diesem Zweck wurde das Programm GASGEN entwickelt. Mit GASGEN werden die beiden wichtigsten gasbildenden Prozesse modelliert, nämlich der mikrobielle Abbau der organischen Stoffe und die anaerobe Korrosion der unedlen Metalle. Diese Prozesse werden im Modell gekoppelt. Um die bestehenden Unsicherheiten sowohl bei den Stoffinventaren als auch bei den Reaktionsgeschwindigkeiten der gasbildenden Prozesse angemessen zu berücksichtigen, wurde eine umfangreiche probabilistische Analyse durchgeführt. Das Grundprinzip der Modellierung beruht auf bestehenden Konzepten, doch wurden die mikrobiellen Prozesse detaillierter dargestellt, und das Modell wurde auf einige besondere Gegebenheiten im ERAM ausgerichtet.

Modellgrundlagen, Parameter und Ergebnisse der Modellierung der Gasbildung sind ausführlich in einem separaten Bericht [Colenco 2002c] dokumentiert. Im Folgenden werden die wesentlichen Modellgrundlagen, das Konzept der Modellierung und die Zusammenfassung der Ergebnisse dargestellt. Für detailliertere Angaben zur Modellumsetzung, zu Modelleinschränkungen, zur Parametrisierung und zu den Resultaten sei auf den o. g. Bericht verwiesen.

G.1 Modellgrundlagen

Die Gasentwicklung im Endlager wird durch die anaerobe Metallkorrosion und den mikrobiellen Abbau der organischen Stoffe dominiert. Ein Teil der dabei entstehenden Gase kann durch die mikrobielle Methanogenese umgesetzt oder durch die Wechselwirkung mit calciumhaltigen Stoffen (Zement) ausgefällt werden. Die Radiolyse als dritter gasbildender Prozess trägt im ERAM nur in einem vernachlässigbaren Ausmaß zur Gasentwicklung bei und wird bei der Simulation vernachlässigt.

G.1.1 Metallkorrosion

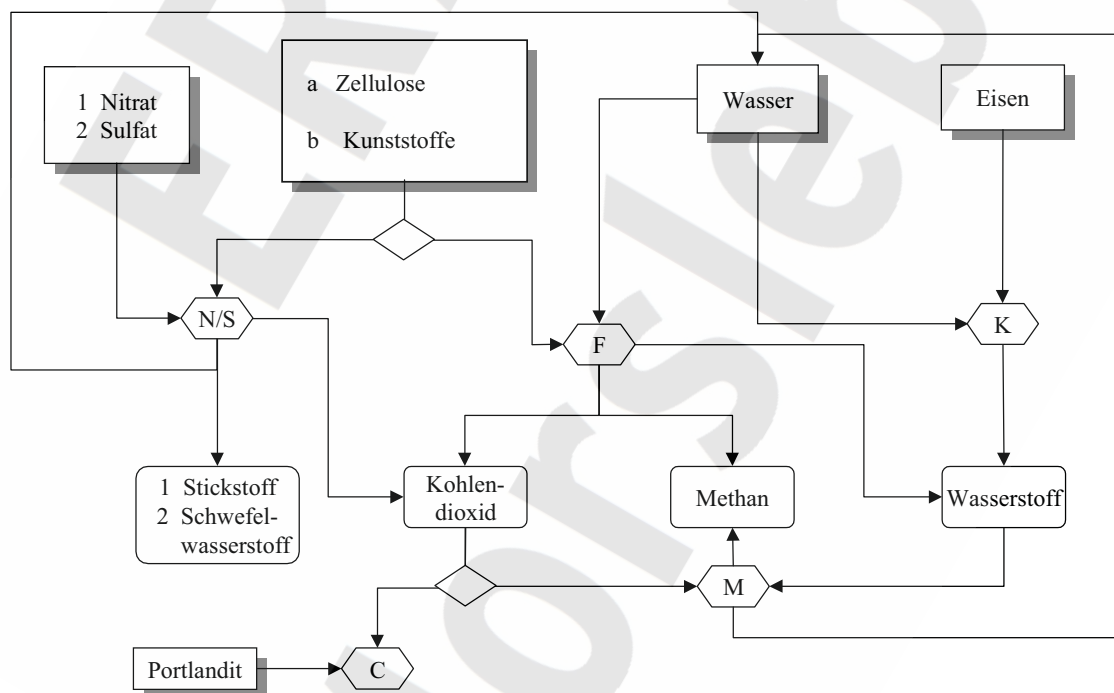
Bei der anaeroben Metallkorrosion werden unedle Metalle wie Eisen, Aluminium und Zink durch Wasser oxidiert. Als Produkt entstehen die entsprechenden Oxide und Wasserstoff. Da die Korrosion an der Metalloberfläche stattfindet, hängt die resultierende zeitliche Gasentwicklung sowohl von der Masse der Metalle als auch von deren Oberfläche ab. Die gesamte Oberfläche der metallischen Abfälle verringert sich im Laufe der Zeit durch das Fortschreiten der Korrosion, wobei die Abnahme nicht proportional zur Abnahme der Metallmasse ist, sondern zusätzlich von der Form der einzelnen Metallstücke abhängt. Dünnwandige Bleche, wie sie z.B. für Fässer verwendet werden, weisen während der Dauer der Korrosion eine fast konstante Oberfläche auf, sind jedoch nach einer relativ kurzen Zeit vollständig korrodiert. Bei Metallstücken mit einer komplexen Geometrie verändert sich im Laufe der Zeit die Oberfläche, da die dünnwandigen Anteile nach kurzer Zeit vollständig korrodiert sind, während die dickwandigen Anteile bis zur vollständigen Korrosion längere Zeit brauchen. Zusätzlich beeinflussen lokal unterschiedliche Korrosionsraten aufgrund kleinräumig veränderlicher Verhältnisse den zeitlichen Ablauf.



G.1.2 Mikrobielle Abbauprozesse

Der mikrobielle Abbau von organischen Abfällen führt unter anaeroben Bedingungen, wie sie in einem verschlossenen Endlager nach relativ kurzer Zeit zu erwarten sind, vorwiegend zu gasförmigen Produkten wie Methan und Kohlendioxid sowie zu Wasser. In einem ersten Schritt werden die polymeren organischen Stoffe zu kleineren Einheiten hydrolysiert und anschließend weiter zu den Endprodukten abgebaut. In Gegenwart von Elektronenakzeptoren wie Nitrat und Sulfat können unterschiedliche mikrobielle Reaktionen ablaufen. Die Reihenfolge der Reaktionen wird durch die freie Reaktionsenthalpie bestimmt. Wenn Nitrat vorhanden ist, wird dieses bevorzugt für die Denitrifikation als Elektronenakzeptor verwendet. Nachdem das Nitrat aufgebraucht ist, kann Sulfat bei der Sulfatreduktion als Elektronenakzeptor verwendet werden. Anschließend findet die Fermentation als Abbaureaktion ohne externen Elektronenakzeptor statt. Methanogene Bakterien können aus Kohlendioxid und Wasserstoff Methan bilden.

Eine Übersicht über die im Modell berücksichtigten Prozesse gibt Abbildung G-1.



Prozesse im Modell zur Prognose der Gasentwicklung

Abbildung G-1: Schema der im Modell berücksichtigten Prozesse. N steht für Denitrifikation, S für Sulfatreduktion, F für Fermentation, M für Methanogenese, K für Korrosion und C für Carbonatisierung

G.2 Modelltechnische Umsetzung

Die räumliche Verteilung der gasbildenden Stoffe in den Einlagerungsbereichen ist relativ heterogen. Dies führt folglich zu einer heterogenen Verteilung der Gasbildung. Eine modellmäßige Berücksichtigung dieser Heterogenitäten wäre nur sinnvoll, wenn einerseits detaillierte Informationen zur räumlichen Verteilung der Stoffe im Grubengebäude vorhanden wären und andererseits die gasbildenden Prozesse differenziert beschrieben werden könnten. Da beide Voraussetzungen nicht erfüllt sind, ist es sinnvoller, die Einlagerungsgrubenbaue eines Einlagerungsbereichs zusammen als Mischtank zu modellieren. Dabei wird angenommen, dass Abfallinventare, Wasser, Elektronenakzeptoren und Mikroorganismen homogen im betrachteten Raum verteilt sind.

Bei der Umsetzung der chemischen und mikrobiellen Reaktionen im Modell GASGEN müssen mikroskopische und makroskopische Aspekte berücksichtigt werden. Experimentell bestimmte Reaktionsgeschwindigkeiten beziehen sich, vor allem bei den mikrobiellen Prozessen, nicht auf eine Einzelreaktion, sondern auf eine Bruttoreaktion als Summe von mehreren gekoppelten Reaktionen.

Anstelle der Modellierung einer Vielzahl von Teilreaktionen mit unzureichender Parameterbasis wird ein weniger detailliertes Modell verwendet, für das die entsprechenden makroskopischen Parameter leichter zugänglich sind. Mit dem eingesetzten Modell wurden die klassischen einfachen Konzepte weiter entwickelt und gleichzeitig der beschränkten Datenbasis Rechnung getragen.

Jede Reaktion wird im Modell als eine Reaktion erster Ordnung simuliert. Dabei wird ein Edukt y mit einer Geschwindigkeitskonstanten λ umgesetzt.

$$dy/dt = - \lambda \cdot y \quad (G-1)$$

Wenn an der Reaktion noch ein zweites Edukt teilhat, wird dies bei der Massenbilanz berücksichtigt und die mögliche Limitierung durch das zweite Edukt durch einen Regelparameter gesteuert.

Das Grundmodell von GASGEN ist in einem deterministischen Modul implementiert. Dieses berechnet die Gasentwicklung für einen festen vorgegebenen Datensatz. Da sämtliche Eingangsdaten für die Berechnungen mit Unsicherheiten behaftet sind, müssen diese in den Modellrechnungen berücksichtigt werden.

Aus diesem Grund wird zur Modellierung ein probabilistischer Ansatz gewählt. Bei dem verwendeten probabilistischen Code *CIRCE* handelt es sich um eine hauseigene Weiterentwicklung des public domain codes *CIRCE* des Oak Ridge National Laboratory (USA). Dieses Paket basiert auf der *Latin Hypercube Sampling Methode* (LHS). Bei dem LHS-Verfahren wird sichergestellt, dass auch für kleine Probenzahlen der gesamte mögliche Varianzbereich des Parameters adäquat Berücksichtigung findet.

Das Softwarepaket beruht auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Parametersätzen, die in dem externen Modell GASGEN als Inputparameter Verwendung finden. Dabei können auch Korrelationen zwischen verschiedenen Inputparametern berücksichtigt werden.



Das deterministische Modell berechnet für jeden Parametersatz die Resultate, welche anschließend statistisch ausgewertet werden können. Die Resultate können dann für jedes Reaktionsprodukt als Bandbreiten mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung dargestellt werden. Diese reflektieren die Bandbreiten der Eduktmengen und der Geschwindigkeitskonstanten.

Die Inventardaten stammen für die gasbildenden Stoffe in den radioaktiven Abfällen aus [BfS 2000b], für die Metalle und Cellulose in den restlichen Einlagerungsbereichen sowie der übrigen Grube aus [DBE 2005]. Die Herleitung der Reaktionsparameter ist in [Colenco 2002c] dokumentiert. Die zeitliche Entwicklung der Korrosion wurde aufgrund der Berechnungen von [BfS 2003] parametrisiert.

G.3 Ableitung der Gasbildungsraten für die Sicherheitsanalyse

Als Ergebnis der probabilistischen Berechnungen liegen nicht nur die zeitabhängige Verteilung der Mengen der Gase, sondern auch deren effektive Bildungsraten vor. Die statistischen Verteilungen der ermittelten Gasbildungsraten sind in guter Näherung log-normal verteilt, mit ausgeprägt hoher Gewichtung bei hohen Raten.

Das Verfahren der Parametrisierung geht von zwei charakteristischen Perzentilen der Gasbildungsraten aus. Die Einhüllenden der Gesamtgasbildungsraten folgen unabhängig vom Einlagerungsbereich näherungsweise einem Potenzgesetz zwischen den repräsentativen frühen und späten Zeiten (100, resp. 10'000 Jahre). Dadurch ist es möglich, einen funktionalen und integrierbaren Zusammenhang zwischen den Bandbreiten der berechneten Gasbildungsraten und der Zeit aufzustellen. Die Gasbildungsraten zu diesen beiden Zeiten bilden Eingangsgrößen der Modellierung, sie werden entsprechend durch Referenzwerte, Bandbreiten und eine log-normale Verteilungsfunktion festgelegt.

Als zusätzlicher Parameter wird die Gesamtgasmenge $V_{g,STP,tot}$ berücksichtigt, die bis zum Abschluss der Gasbildung erzeugt werden kann. Als Referenzwert dient der 50%-Perzentilwert der Modellierung. Das Minimum wird durch den 2.5%-Perzentilwert und das Maximum durch die stöchiometrische Summe aller potentiell zu bildenden Gase ohne Berücksichtigung gasverbrauchender Prozesse definiert.

Der potentielle Verlauf der Gesamtgasbildung kann danach durch vier voneinander unabhängige Parameter beschrieben werden:

- der kumulierte Gasmenge $V_{g,STP,tot}$ (bei einer Teilnahme von 100% des Inventars an den Gasbildungsprozessen),
- der Gasbildungsrate $Q_{g,1e2,tot}$ zu repräsentativ frühen Zeiten ($t = 100$ Jahre, bei einer Teilnahme von 100% des Inventars an den Gasbildungsprozessen),
- der Gasbildungsrate $Q_{g,1e4,tot}$ zu repräsentativ späten Zeiten ($t = 10'000$ Jahre, bei einer Teilnahme von 100% des Inventars an den Gasbildungsprozessen) und
- dem Anteil des Inventars an den Gasbildungsprozessen η .



Letzterer ist kein Ergebnis der GASGEN-Berechnungen, berücksichtigt jedoch, dass ein Teil des Inventars durch aufkriechendes Salz eingeschlossen werden kann oder aus anderen Gründen nicht an den Prozessen der Gasbildung teilnimmt. Die Parametrisierung der Gasbildung mit Hilfe dieser vier Parameter ist in Anhang A, Kap. A.2.2 beschrieben.

ERA
Morsleben



G.4 Übersicht über die Ergebnisse

Die nachfolgende Tabelle G-1 gibt einen Überblick über die auf diese Weise bestimmten Parameter zur Beschreibung der Gasbildungsprozesse in jedem Einlagerungsfeld.

Tabelle G-1: Referenzwerte und Bandbreiten der Gasbildungsraten und maximalen Gasmenngen

Einlagerungsbe- reich	Parameter	Minimum	Referenzwert	Maximum
West-Südfeld	$Q_{g,1e2,tot}$ [m^3/a]	5,09E+02	7,36E+03	1,70E+04
	$Q_{g,1e4,tot}$ [m^3/a]	3,63E+00	1,09E+02	3,57E+02
	$V_{g,STP,tot}$ [m^3]	5,24E+06	1,37E+07	2,28E+07
Westfeld	$Q_{g,1e2,tot}$ [m^3/a]	5,54E+02	7,41E+03	1,65E+04
	$Q_{g,1e4,tot}$ [m^3/a]	3,94E+00	9,24E+01	2,99E+02
	$V_{g,STP,tot}$ [m^3]	6,10E+06	9,55E+06	2,12E+07
Südfeld	$Q_{g,1e2,tot}$ [m^3/a]	8,68E+01	1,02E+03	2,00E+03
	$Q_{g,1e4,tot}$ [m^3/a]	6,58E-02	2,24E+00	1,78E+01
	$V_{g,STP,tot}$ [m^3]	3,85E+05	6,54E+05	1,57E+06
Ostfeld	$Q_{g,1e2,tot}$ [m^3/a]	1,19E+02	2,50E+03	6,49E+03
	$Q_{g,1e4,tot}$ [m^3/a]	8,18E-01	2,04E+01	7,03E+01
	$V_{g,STP,tot}$ [m^3]	1,67E+06	2,96E+06	4,72E+06
Nordfeld	$Q_{g,1e2,tot}$ [m^3/a]	2,31E+01	3,63E+02	7,21E+02
	$Q_{g,1e4,tot}$ [m^3/a]	1,26E-01	2,75E+00	1,01E+01
	$V_{g,STP,tot}$ [m^3]	2,33E+05	3,00E+05	1,07E+06
Zentralteil	$Q_{g,1e2,tot}$ [m^3/a]	1,49E+00	1,01E+02	2,79E+02
	$Q_{g,1e4,tot}$ [m^3/a]	6,93E-04	6,73E-02	1,91E+00
	$V_{g,STP,tot}$ [m^3]	4,35E+04	6,10E+04	8,26E+04
übrige Grube	$Q_{g,1e2,tot}$ [m^3/a]	5,51E+01	2,23E+03	5,19E+03
	$Q_{g,1e4,tot}$ [m^3/a]	1,20E+00	6,45E+00	5,89E+01
	$V_{g,STP,tot}$ [m^3]	6,34E+05	1,35E+06	2,21E+06

Anhang H Chemisches Milieu im Grubengebäude, Löslichkeit und Sorption

H.1 Grundsätzliche Überlegungen zum chemischen Milieu

Die Mobilisierung und der Transport (die Transportverzögerung) der Radionuklide werden wesentlich durch das chemische Milieu beeinflusst. Die Prozesse, die vom chemischen Milieu abhängen und die für den Nachweis der Langzeitsicherheit im Allgemeinen berücksichtigt werden (können), sind Löslichkeit und Sorption (vgl. Anhang A).

Die Lösungszusammensetzung, d.h. das chemische Milieu wird bestimmt durch:

- Art der Ausgangslösung (z.B. NaCl-Lösung, IP21-Lösung)
- Kontakt zu anstehendem Salzgestein und dessen Auf-/Umlösung (Art, Menge, Kinetik der Reaktionen)
- Kontakt zu Versatzstoffen und deren Auflösung (Art, Menge, Kinetik der Reaktionen)
- Kontakt zu anderen nicht radionuklidhaltigen Inhaltsstoffen (z.B. Metalle) und deren Reaktion mit der Lösung (Art, Menge, Kinetik der Reaktionen)
- Kontakt zu den radionuklidhaltigen Abfallstoffen und deren Reaktion mit der Lösung (Art, Menge, Kinetik der Reaktionen)
- Temperatur
- Druck

Die Art der Lösung wird bestimmt über den Zutrittspfad. Das wahrscheinliche Szenario ist der Zutritt von Wässern aus dem Hutgestein, die sich auf ihrem Weg durch das Grubengebäude im Kontakt zum anstehenden Salzgestein aufkonzentrieren, bis schließlich eine bezüglich des anstehenden Salzgesteins gesättigte Lösung entstanden ist. Im Kontakt mit den Abfällen, dem Salzbeton und anderen Stoffen wird sich die Zusammensetzung der Lösung verändern. Dass schließlich reine NaCl- oder IP21-Lösung vorliegt, kann als Extremfall betrachtet werden; alle weiteren Lösungszusammensetzungen, die dazwischen liegen, sind ebenfalls denkbar. Dabei ist streng genommen die Kinetik der Reaktionen von Bedeutung. Die Zugänglichkeit der Festphasen für die zutretende Lösung ist ebenfalls relevant.

Im Allgemeinen werden für die Modellierung des chemischen Milieus Gleichgewichtsmodelle verwendet. Dabei werden alle Komponenten als homogen über dieses System verteilt angenommen. Für das Stilllegungskonzept ist eine homogene Durchmischung eher unwahrscheinlich. Eine Ursache für die Ungewissheit bei der Modellierung der Lösungszusammensetzung im ERAM ist die Reduzierung der tatsächlichen räumlichen und zeitlichen Variationen von Feststoff- und Lösungsmenge (und -art) auf ein Gleichgewichtsmodell. Es müssen dazu Bereiche und deren Inventare identifiziert/definiert werden, in denen (ohne größere Abstraktion) die Reaktionen zwischen Feststoff und Lösung als ein Gleichgewichtssystem modelliert werden können.



Sofern für die geochemische Modellierung ein Gleichgewichtsmodell verwendet wird, ist das Verhältnis von Lösung zu Feststoff entscheidend. Jedoch kann die in einem Batch-Modell zur Verfügung stehende Lösungsmenge unterschiedlich interpretiert werden. Beim Zutritt von Lösung in die Einlagerungsbereiche und zu den Abfällen und Versatzstoffen darin können zwei Grenzfälle unterschieden werden:

- Reaktion der Feststoffe nur mit der Lösung im Porenvolumen (die überstehende Lösung im unverfüllten Volumenanteil reagiert nicht)
- Reaktion der Feststoffe mit der gesamten Lösungsmenge, d.h. auch mit der überstehenden Lösung im unverfüllten Volumenanteil; das Lösungs- zu Feststoffverhältnis ist in diesem Fall größer

Das chemische Milieu kann nicht nur zwischen diesen beiden Grenzfällen starke Unterschiede aufweisen, sondern auch für einen einzelnen dieser Fälle im Rahmen der Parameterbandbreiten für Feststoffinventar und Hohlraumvolumen stark variieren. Auch die Zusammensetzung der unterstellten Ausgangslösung ist von großer Bedeutung.

H.2 Chemisches Milieu und Löslichkeitsgrenzen

Die Löslichkeit eines Elements bestimmt, welche Anteile der einzelnen Radionuklide aus dem Abfall freigesetzt werden. Im Modell wird davon ausgegangen, dass zuerst alle Elemente (d.h. die entsprechenden Radionuklide) mobilisiert werden, welche mit der Lösung in Kontakt stehen (vgl. Anhang I). Hieraus ergibt sich eine rechnerische, inventarbegrenzte Konzentration in Lösung. Überschreitet diese Konzentration einen bestimmten, vom chemischen Milieu abhängigen Wert, so sind neben den Radionuklidspezies in Lösung auch sekundäre, radionuklidhaltige Mineralphasen⁶⁶ stabil. Ist dies der Fall, so ist die Konzentration löslichkeitsbegrenzt. Die Konzentration in Lösung kann diesen Wert (die Löslichkeitsgrenze) nicht überschreiten, auch wenn die inventarbegrenzte Konzentration höher ist. Es wird dann nur ein Teil des Radionuklidinventars mobilisiert. Dabei wird – konservativ – diese Löslichkeitsgrenze auf jedes Radionuklid eines Elements gesondert angewendet. Es werden jedoch eventuell vorhandene nicht radioaktive Isotope berücksichtigt (vgl. Anhang A).

Die Löslichkeitsgrenze eines Elements in einer Lösung ist stark abhängig von der Zusammensetzung der Lösung, d.h. vom chemischen Milieu. Speziell der pH-Wert, der Eh-Wert und verfügbare Komplexbildner sind hierbei von Bedeutung. Es können sowohl organische Komplexbildner (EDTA, Zitronensäure etc. aus den Abfällen), als auch anorganische Komplexbildner (z.B. CO_3^{2-} aus der mikrobiellen Gasbildung) eine Rolle spielen. Komplexbildner erhöhen im Allgemeinen die Löslichkeit der Radionuklide. Der Einfluss des pH-Werts auf die Löslichkeit der Actiniden ist komplexer. Sie hängt zugleich von der Anwesenheit anorganischer Komplexbildner, wie Carbonationen ab. So ist z.B. bei Anwesenheit von Carbonationen ein annähernd neutraler pH-Wert günstig, d.h. die Löslichkeit ist niedrig. Bei Abwesenheit von Carbonationen nimmt die Löslichkeit mit steigendem pH-Wert ab. Auch der Eh-Wert hat großen Einfluss auf die Löslichkeit. Bei reduzierenden

⁶⁶ Es werden keine weiteren Prozesse wie feste Lösungen oder Mitfällung berücksichtigt (= konservativ).



Bedingungen (und z.B. der Anwesenheit von Sulfidionen) wird die Löslichkeit einiger Radionuklide (z.B. Tc, Ni, Fe) stark verringert.

Die bisher beschriebenen Vorgänge beeinflussen die allgemeine chemische Zusammensetzung. Einige Eigenschaften (z.B. CO_3^{2-} -Konzentration) sind jedoch auch von Druck und Temperatur abhängig. So hängt allgemein die Stabilität von Mineralphasen bezüglich der Lösung von der Temperatur ab. Das hat Einfluss auf die Auflösung der Salzminerale, Versatzstoffe und – von besonderer Bedeutung – auf die Ausfällung von Feststoffen aus der Lösung (z.B. Fällung von radionuklidhaltigen Festphasen). Die zu ihrer Beschreibung verwendeten Löslichkeitskonstanten sind temperaturabhängig. Die Temperatur im Grubengebäude wird mit 21°C angenommen. Die Verwendung thermodynamischer Daten, die für 25°C ermittelt wurden, ist demnach möglich.

Der Druck wirkt sich eher indirekt über die Löslichkeit von Gasen aus. Über chemische Gleichgewichte (z.B. CO_2 – Kohlensäure – Carbonat) kann so die Konzentration anorganischer Komplexbildner (z.B. CO_3^{2-}) beeinflusst werden.

Die Löslichkeitsgrenzen werden grundsätzlich im Modell berücksichtigt. Wegen der nicht abschließend zu klärenden Frage nach dem sich einstellenden chemischen Milieu ist jedoch die Parametrisierung in vielen Fällen unsicher oder gänzlich unmöglich. Für die Löslichkeitsgrenzen wurde deshalb (außer für Kohlenstoff) auf die Anwendung verzichtet (was konservativ ist); unter anderem auch, weil sich vermutlich wegen der hohen Komplexbildner-Konzentrationen die Löslichkeitsgrenzen nur in wenigen Ausnahmefällen tatsächlich auswirken werden.

Für das Carbonat hingegen ist die maximale Konzentration über weite Bereiche des chemischen Milieus und auch bei den beiden extremen Annahmen der Ausgangslösung (NaCl-/IP21-Lösung) ähnlich (in beiden Fällen ca. 10^{-5} mol/l) und wird deshalb berücksichtigt. Ferner wird hier auch der nicht radioaktive Kohlenstoff ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$), welcher in größeren Mengen bei der mikrobiellen Gasbildung freigesetzt wird, berücksichtigt, da sich diese Isotope chemisch gleich verhalten. Überschreitet die Gesamtkonzentration (Summe aller Isotope des carbonatischen Kohlenstoffs) die Löslichkeitsgrenze, so wird das Carbonat ausgefällt. Die gelöste Menge an radioaktivem Carbonat wird über das Verhältnis zwischen gelöstem und nicht gelöstem Carbonat berechnet.

Die Menge an nicht radioaktivem Carbonat im System wird folgendermaßen ermittelt: Der größte Teil entsteht durch den mikrobiellen Abbau von Organika. Die schnellste Abbaureaktion ist die „Denitrifikation“ – die Umsetzung von Cellulose zu CO_2 und H_2O mit dem Sauerstoff aus dem in den Abfällen enthaltenen Nitrat. Konservativerweise wird nur das so gebildete Carbonat berücksichtigt. Aus dieser Menge und dem Gesamthohlraumvolumen im entsprechenden Einlagerungsbereich errechnet sich eine durchschnittliche Stoffmenge Carbonat pro Volumen (mit der Dimension einer Konzentration). Der Quotient aus der Löslichkeitsgrenze für Carbonat (10^{-5} mol/l) und diesem Wert ergibt den Anteil des gelösten Carbonats. Dieser Anteil gilt auch für das $^{14}\text{CO}_3^{2-}$.



H.3 Chemisches Milieu und Sorption

In ähnlicher Weise wie die Löslichkeit wird auch die Rückhaltung von Radionukliden durch Sorption vom chemischen Milieu beeinflusst. Speziell der pH-Wert ist hier von Bedeutung. Für die Sorption ist die Betrachtung jedoch komplizierter, da Sorption an unterschiedlichen Orten und an unterschiedlichen Materialien stattfinden kann: BFA und Zement in den Einlagerungsgrubenbauen (Abfälle und Versatzmaterial), Versatzmaterial in den Abdichtungen, Zement in der Restgrube und dem Verdünnungsbereich (Versatzmaterial), Gestein im Deckgebirge (Grauer Salzton), Gestein im oberflächennahen Aquifer. Die Lösungsentwicklung hängt vom gesamten Weg aus dem Grubengebäude ab, wobei – wie leicht einsichtig ist – die geometrische Anordnung, d.h. der Weg, von großer Bedeutung ist.

Für die Sorption, die durch das K_d -Konzept berücksichtigt wird (vgl. Anhang A), ist die Parametrisierung schwierig. Wegen der niedrigen resultierenden Konzentrationen ist in den Experimenten eine Unterscheidung zwischen Sorption und Löslichkeit nicht immer möglich (z.B. für Tc). Hinzu kommt die sehr starke Abhängigkeit von pH-Wert und genereller Lösungszusammensetzung. Da keine eindeutigen Aussagen über die im Grubengebäude/den Einlagerungsbereichen vorliegende Chemie getroffen werden können, ist es nicht möglich, einen belastbaren Satz von K_d -Werten aufzustellen. Daher wird auf die Sorption im Grubengebäude und den Abdichtungssystemen verzichtet (was konservativ ist). Im Deckgebirge und im oberflächennahen Grundwasserleiter, für die Sorptionsdaten durch Experimente abgesichert sind, wird sie jedoch berücksichtigt.



Anhang I Modellierung der Mobilisierung von Radionukliden in den Einlagerungsbereichen

In diesem Anhang wird die modellhafte Behandlung der Mobilisierung der Radionuklide in den Einlagerungsbereichen beschrieben. Neben dem Volumen an Lösung, das mit den Abfällen in Kontakt kommt, bestimmen die Löslichkeit und die Sorption die mobilisierbare Menge an Radionukliden zu einem definierten Zeitpunkt. Die beiden letztgenannten Prozesse sind im Programm enthalten (vgl. Anhang A.5), werden aber in diesem allgemein gehaltenen Anhang nicht weiter diskutiert. Der Sonderfall des ^{14}C wird im Anhang J behandelt.

I.1 Voraussetzungen

In den jeweiligen Einlagerungsbereichen befindet sich ein bekanntes Inventar an Radionukliden. Die Abfälle liegen in der Regel in Form von Abfallgebänden vor, in denen die Radionuklide fixiert sind. Wenn Lösung in die Einlagerungsgrubenbaue gelangt, kommen die Radionuklide in Kontakt mit dieser Lösung. Im Modell wird angenommen, dass die Radionuklide sofort in Lösung gehen, wenn die Abfallgebände mit dieser in Kontakt kommen. Somit wird die Mobilisierung ohne Sorption und Löslichkeit als instantaner Prozess zum Zeitpunkt $t=T_1$ durch

$$C_L(t=T_1) = f_L \cdot I(t=T_1) = \frac{i_{\text{rel}}}{V_{\text{EB,L}}(T_1)} \cdot I(t=T_1) \quad (\text{I-1})$$

wobei

C_L	Konzentration des betrachteten Radionuklids im Porenwasser im Einlagerungsbereich zur Zeit T_1 ; [Bq/m^3]
T_1	Dauer von Phase 1 (Zutrittsphase); spezifisch für einen Einlagerungsbereich, damit $t = T_1$ Zeitpunkt der Mobilisierung; [s]
$I(t=T_1)$	Inventar des betrachteten Radionuklids im Einlagerungsbereich unter Berücksichtigung von radioaktivem Zerfall und Bildung aus dem Zerfall von Vorläufernukliden zum Zeitpunkt T_1 ; [Bq]
f_L	radionuklidspezifisches Verhältnis zwischen der Konzentration im Porenwasser und dem Inventar im Abfall; [m^{-3}]
$V_{\text{EB,L}}(T_1)$	Flüssigkeitsmenge zum Zeitpunkt T_1 im Einlagerungsbereich; [m^3]
i_{rel}	mobilisierter Anteil des Inventars; [-]

beschrieben (vollständige Beschreibung mit Einfluss von Sorption und Löslichkeit in Anhang A.5).

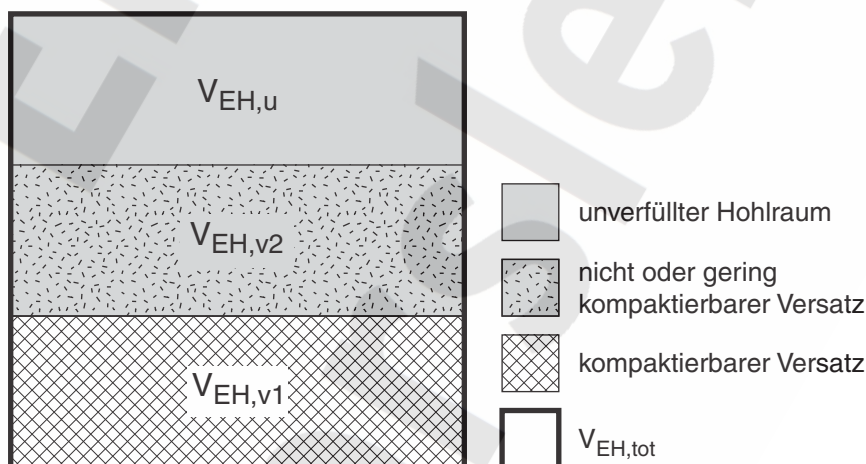
Im Folgenden wird die Herleitung des mobilisierbaren Anteils des Inventars i_{rel} diskutiert.



Die Abfallgebilde haben eine bekannte Stapelhöhe im jeweiligen Einlagerungsgrubenbau. Der Einlagerungsgrubenbau wird geometrisch als ein teilweise mit Versatz gefüllter Quader betrachtet, der sich von unten her mit der zutretenden Lösung füllt. Es wird angenommen, dass die Menge an Radionuklidinventar aus den Abfallgebilden mobilisiert werden kann, die bei maximaler Füllhöhe der Lösung mit dieser in Berührung steht. Das Volumen des Einlagerungsgrubenbaus ist aufgrund der Gebirgskonvergenz zeitabhängig. Es wird jedoch angenommen, dass die unten definierte relative Abfallstapelhöhe (Verhältnis von Abfallstapelhöhe zur Höhe des kompaktierbaren Versatzes) zeitunabhängig ist.

I.2 Mathematische Umsetzung

Die Abbildung I-1 zeigt eine schematische Darstellung eines Einlagerungsgrubenbaus (Gesamtvolumen $V_{EH,tot}$) mit den zu unterscheidenden Volumina zum Zeitpunkt $t=0$. Die Volumina $V_{EH,u}$ und $V_{EH,v2}$ sind unversetztes respektive mit nicht oder gering kompaktierbarem Versatz versetztes Volumen. Im Volumen $V_{EH,v1}$ (das mit kompaktierbarem Versatz, also mit Salzgrus und Braunkohlefilterasche, gefüllte Volumen) befinden sich die radionuklidhaltigen Abfälle. Es wird konservativ unterstellt, dass sich dieses Volumen an der Basis des Einlagerungsgrubenbaus und dieser sich an der Basis des Einlagerungsbereichs befindet und der kompaktierbare Versatz des Einlagerungsgrubenbaus daher zuerst mit Lösung in Berührung kommt.



4651/v_aufteilung.eps/shu/13.06.02

Abbildung I-1: Schematische Darstellung der relevanten Volumina in einem Einlagerungsgrubenbau

Die Ermittlung des mit Lösung in Kontakt stehenden Anteils des Inventars i_{rel} erfolgt über die relative Abfallstapelhöhe β . Diese ist definiert als die Abfallstapelhöhe, bezogen auf die Höhe des kompaktierbaren Versatzes im Einlagerungsgrubenbau.

Es wird angenommen, dass das Verhältnis β aus der Stapelhöhe des Abfalls $H_{Abf}(t)$ und der Höhe des kompaktierbaren Versatzes $H_{EH,v1}(t)$ zeitlich konstant ist:

$$\beta = \frac{H_{Abf}(t)}{H_{EH,v1}(t)} = \text{const.} \quad (I-2)$$

Die Berechnung des mit Lösung in Kontakt stehenden Anteils in einem Einlagerungsgrubenbau beruht auf folgenden Annahmen:

- Der Abfall befindet sich vollständig im kompaktierbaren Versatz, d.h. $\beta \leq 1$. Das Volumen des kompaktierbaren Versatzes entspricht dem Volumen $V_{EH,v1}$.
- Der kompaktierbare Versatz befindet sich an der Basis des Einlagerungsgrubenbaus und wird zuerst mit Lösung gefüllt (konservativ).
- Es wird konservativ unterstellt, dass die bei $t=0$ bereits vorhandene Anfangsflüssigkeit im Einlagerungsbereich (also die Restfeuchte, aber ohne das Porenwasser im Salzbeton) in vollem Umfang zur Füllung des kompaktierbaren Versatzes im Einlagerungsgrubenbau und somit zur Radionuklidmobilisierung beiträgt.
- Die relative Lösungsfüllhöhe des kompaktierbaren Versatzes (Füllhöhe der Lösung, $H(V_{EB,L})$, dividiert durch die Höhe des kompaktierbaren Versatzes, $H_{EH,v1}$) sei gleich dem Verhältnis aus Flüssigkeitsvolumen $V_{EB,L}$ und aktuellem Porenvolumen des kompaktierbaren Versatzes im Einlagerungsgrubenbau zum Zeitpunkt des maximalen Lösungsfüllstands t_{Lmax} .

mit

t_{Lmax} Zeitpunkt des maximalen Lösungsfüllstands; [a]

Der maximale relative Lösungsfüllgrad im Einlagerungsbereich im Zeitintervall $[T_1, T_1+T_3]$, $S_{EB}(t = t_{Lmax})$, ist definiert durch

$$S_{EB}(t_{Lmax}) = \max_{t \in [T_1, T_1+T_3]} (S_{EB}(t)) = \frac{V_{EB,L}(t_{Lmax})}{V_{EB}(t_{Lmax})} \quad (I-3)$$

Dabei ist $V_{EB}(t_{Lmax})$ das Gesamthohlraumvolumen in einem Einlagerungsbereich zur Zeit $t = t_{Lmax}$, das sich aus der Summe der Porenvolumina des kompaktierbaren ($V_{EB,v1}(t_{Lmax})$) und nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes ($V_{EB,v2}(t_{Lmax})$) sowie dem unverfüllten Hohlraum ($V_{EB,u}(t_{Lmax})$), (Abbildung A-3) zusammensetzt, während $V_{EB,L}(t_{Lmax})$ die Flüssigkeitsmenge zum gleichen Zeitpunkt ist.

Die letzte der oben genannten Annahmen bedeutet für den Zeitpunkt der Radionuklidmobilisierung, dass

$$\frac{H(V_{EB,L}(t_{Lmax}))}{H_{EH,v1}(t_{Lmax})} = \frac{V_{EB,L}(t_{Lmax})}{V_{EH,v1}(t_{Lmax}) \cdot \varepsilon_{EB,v1}(t_{Lmax})} \quad (I-4)$$

Gl. (I-5) mit den Näherungen (I-2) und (I-4) beschreibt, welcher Anteil der Radionuklide sich im mit Salzlösung gefüllten Bereich befindet. Falls die Lösungsfüllhöhe die Abfallstapelhöhe übersteigt, steht das gesamte Radionuklidinventar mit Salzlösung in Kontakt (siehe Abbildung I-2 rechts).

$$i_{rel} = \begin{cases} \frac{H(V_{EB,L}(t_{Lmax}))}{H_{Abf}(t_{Lmax})} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{V_{EB,L}(t_{Lmax})}{V_{EH,v1}(t_{Lmax}) \cdot \varepsilon_{EB,v1}(t_{Lmax})} & \text{falls } \frac{V_{EB,L}(t_{Lmax})}{V_{EH,v1}(t_{Lmax}) \cdot \varepsilon_{EB,v1}(t_{Lmax})} < \beta \\ 1 & \text{falls } \frac{V_{EB,L}(t_{Lmax})}{V_{EH,v1}(t_{Lmax}) \cdot \varepsilon_{EB,v1}(t_{Lmax})} \geq \beta \end{cases} \quad (I-5)$$



Mit Gl. (I-5) wird also die Lösungsfüllhöhe im Einlagerungsbereich zum Zeitpunkt $t = t_{Lmax}$ über das Lösungsvolumen im Einlagerungsbereich zu diesem Zeitpunkt bestimmt. Der erste Fall entspricht somit den Verhältnissen in Abbildung I-2, links, während in Abbildung I-2, rechts, das gesamte Radionuklidinventar mit Lösung in Kontakt steht, also $i_{rel} = 1$.

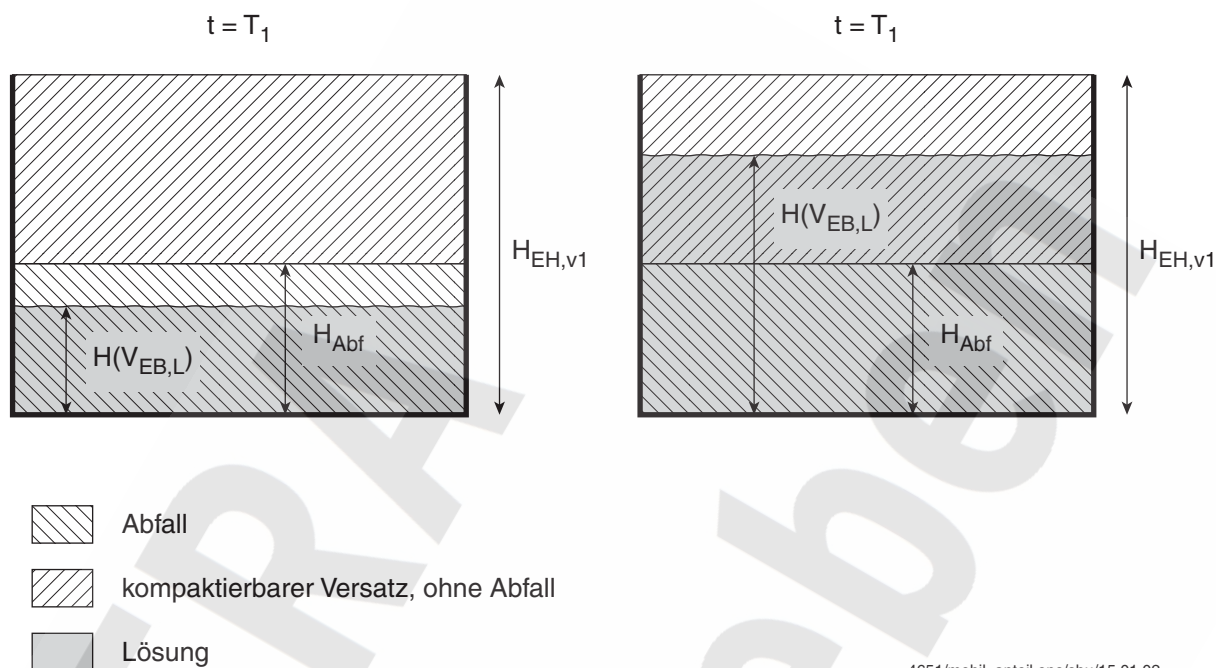


Abbildung I-2: Schematische Darstellung verschiedener Höhen im kompaktierbaren Versatz: Abfallstapelhöhe, H_{Abf} , Füllhöhe der Lösung, $H(V_{EB,L})$, und Höhe des kompaktierbaren Versatzes, $H_{EH,v1}$.

I.3 Parameter

Die relativen Abfallstapelhöhen der Einlagerungsbereiche, definiert gemäß Gl. I-2, sind in der Tabelle I-1 aufgeführt.

Tabelle I-1: Werte für die relative Abfallstapelhöhe in den Einlagerungsbereichen.

Einlagerungsbereich	West-Südfeld	Ostfeld	Nordfeld	Zentralteil
Relative Abfallstapelhöhe, β	0 ⁶⁷	0,4	0,95 ⁶⁷	0 ⁶⁷

⁶⁷ Auf Grund der komplexen Verhältnisse wird für den ELB WSF in jedem Fall von einer vollständigen Mobilisierung $i_{rel} = 1$ ausgegangen und β modelltechnisch klein gewählt. In den beiden nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen ELB NF und ELB ZT kommt es unabhängig vom Wert von β zur vollständigen Mobilisierung, da diese Einlagerungsbereiche in jedem Fall volllaufen.

Anhang J Mobilisierung und Transportverhalten von ^{14}C in Lösung

Die meisten der Radionuklide sind anorganisch gebunden, d.h. sie liegen als Anion oder als Kation vor. Für ihre Mobilisierung sind die Löslichkeit der entsprechenden Festphase und die Sorption ausschlaggebend; der Transport beschränkt sich auf die wässrige Phase, und es genügt, eine einzige chemische Spezies pro Nuklid zu berücksichtigen. Die wichtigste Ausnahme bildet das ^{14}C , da sich vom Kohlenstoff die Vielfalt der organischen Verbindungen ableitet. Aufgrund der Herkunft der Abfälle liegt das ^{14}C schon zu Beginn in unterschiedlichen chemischen Formen vor, die sich in ihrer Mobilisierung und ihrem Transportverhalten unterscheiden. Hinzu kommt, dass sie sich unter den Bedingungen des ERAM auch in Spezies mit anderen Eigenschaften umwandeln können.

In diesem Anhang sollen daher zunächst die relevanten Spezies des ^{14}C , die in den Abfällen vorkommen, in Kategorien mit vergleichbarem Mobilisierungs- und Transportverhalten eingeteilt werden. Es wird untersucht, welche Verbindungen unter ERAM-Bedingungen daraus entstehen. Dann wird entsprechend den Angaben über die Abfälle das ^{14}C -Inventar auf diese Kategorien verteilt. Für diese wird schließlich Mobilisierung und Transport konzeptualisiert.

J.1 Relevante Spezies

J.1.1 Primäre Stoffklassen

^{14}C tritt in den Abfällen primär in den folgenden Spezies bzw. Stoffklassen auf:

- Carbonate (d.h. in oxidierter, anorganischer Form)
- Carbide (d.h. in reduzierter Form)
- niedermolekulare, leicht mobilisierbare organische Verbindungen (z.B. Methanol)
- hochmolekulare organische Verbindungen (z.B. Tierkadaver, Pflanzenteile)

Bei den Betriebsabfällen der Kernkraftwerke handelt es sich in erster Linie um Carbonate. Der Kohlenstoff ist hier in einer stabilen chemischen Form gebunden.

Carbide entstehen im Reaktor durch Neutronenaktivierung von Stickstoff, der in Metallen gebunden ist. Auf diese Weise enthalten Stähle, die dem Neutronenfluss im Reaktor ausgesetzt waren, stets auch ^{14}C in carbidischer Form. Dieser Abfalltyp spielt im ERAM aber nur eine untergeordnete Rolle. Dagegen wurde eine Kassette mit bestrahltem Aluminiumnitrid (AlN) eingelagert; dieses enthält eine signifikante Aktivität an Aluminiumcarbid (Al_4C_3). Bei der Reaktion von Carbiden mit Wasser, wie sie bei der Auflösung des bestrahlten AlN bzw. der Korrosion der Stähle eintreten wird, entstehen gasförmige Kohlenwasserstoffe – in erster Linie Methan ($^{14}\text{CH}_4$), aber auch weitere niedermolekulare Alkane und Alkene, wie Ethan, Propan, Propen [Deng et al. 1997].

Niedermolekulare Verbindungen stammen in der Regel aus der Produktion und Anwendung isotoopenmarkierter Verbindungen für die Forschung (Medizin und Biochemie). Es handelt sich dabei zumeist um leicht wasserlösliche Verbindungen. Zunächst sind das C_1 -Metaboliten, die als Grundverbindungen für weitere Synthesen eingesetzt werden, wie Formiat, Cyanid, Cyanamid, Methanol



und Methanal, des weiteren auch längerkettige aliphatische Alkohole und Carbonsäuren sowie Benzolderivate.

Bei der Anwendung dieser markierten Verbindungen in der Forschung (Biologie, Biochemie) verbleiben schließlich auch die Forschungsobjekte, d.h. Tierkadaver und Pflanzenteile, als radioaktiver Abfall. Hier handelt es sich in der Regel um hochmolekulare Verbindungen, die erst nach Verwesung in eine lösliche Form überführt werden. Das Aktivitätsinventar ist hier jedoch gering.

J.1.2 Sekundäre Stoffklassen

Für die Transportmodellierung ist weniger von Bedeutung, in welcher Form das ^{14}C ursprünglich in den Abfällen vorhanden ist, sondern was bei der Mobilisierung und den damit verbundenen chemischen Reaktionen daraus entsteht.

Wie im vorigen Abschnitt bereits ausgeführt, reagieren die Carbide mit Wasser zu gasförmigen Kohlenwasserstoffen, hauptsächlich zu Methan ($^{14}\text{CH}_4$), z.B.:



Dieses wird im Weiteren als chemisch inert betrachtet.

Die niedermolekularen Verbindungen sind sehr gut wasserlöslich, d.h. sie können unverändert gelöst und transportiert werden. Sie werden aus verständlichen Gründen aber auch sehr leicht mikrobiell abgebaut. Sofern Mikroben überhaupt geeignete Lebensbedingungen finden, kann davon ausgegangen werden, dass diese Substanzen vollständig zu CO_2 und CH_4 umgesetzt werden. Für den Extremfall eines reinen Aliphaten (repräsentiert z.B. durch längerkettige aliphatische Alkohole) entstehen dabei Methan und Kohlendioxid im Verhältnis 3 zu 1:



Bei sauerstoffhaltigen Verbindungen ist der Anteil an CO_2 entsprechend höher. Wie in Abschnitt J.3 gezeigt wird, ist der mobilisierte Anteil am ^{14}C -Inventar für $^{14}\text{CH}_4$ deutlich größer als für $^{14}\text{CO}_2$. Das Verhältnis 3:1 ist also die ungünstigste sinnvolle Annahme.

Hochmolekulare Verbindungen (z.B. aus Kadavern) müssen zunächst hydrolysiert werden, bevor sie gelöst werden können. De facto ist das nur bei mikrobiellem Abbau zu erwarten. Dabei entstehen gleichfalls Kohlendioxid und Methan. Für das Mengenverhältnis wird dieselbe Annahme getroffen wie für die niedermolekularen Verbindungen.

Carbonate stehen mit Kohlendioxid im Gleichgewicht. Das $^{14}\text{CO}_2$, das beim mikrobiellen Abbau entsteht, erhöht daher die Menge an $^{14}\text{CO}_3^{2-}$ – solange die Lösung genügend Base enthält (z.B. Portlandit aus dem Versatz).

J.2 Inventare für die Transportrechnungen

Im Folgenden wird die Verteilung des ^{14}C auf die einzelnen Einlagerungsbereiche des ERAM dargestellt (Tabelle J-1). Die Aufteilung der Gesamt- ^{14}C -Aktivität erfolgt in die Kategorien „ ^{14}C -Aktivität



organisch gebunden“, „ ^{14}C -Aktivität als Carbid gebunden“ und „ ^{14}C -Aktivität anorganisch gebunden“.

Tabelle J-1: ^{14}C -Einlagerungen in Bq

Einlagerungsbereich		^{14}C organisch gebunden [Bq]	^{14}C als Carbid gebunden [Bq]	^{14}C anorganisch gebunden [Bq]
WSF	SF	$1,56 \cdot 10^{12}$	$6,4 \cdot 10^{11}$	$1,56 \cdot 10^{11}$
	WF	$6,42 \cdot 10^{11}$		$1,23 \cdot 10^{11}$
NF		$5,6 \cdot 10^{10}$		$3,1 \cdot 10^9$
OF		$1,6 \cdot 10^9$		$1,2 \cdot 10^{11}$
ZT		$1,34 \cdot 10^9$		$2,6 \cdot 10^8$
Gesamt		$2,26 \cdot 10^{12}$	$6,4 \cdot 10^{11}$	$4,02 \cdot 10^{11}$

Es zeigt sich, dass das meiste organisch gebundene ^{14}C im Einlagerungsbereich WSF vorkommt, gefolgt vom ELB NF und dem ELB OF. ^{14}C -Carbid liegt nur im ELB WSF vor. Das ELB OF enthält praktisch nur anorganisch gebundenes ^{14}C . Insgesamt überwiegt das organisch gebundene ^{14}C ; Carbide sind ca. 20%, der anorganische Anteil liegt bei 13%.

Das organisch gebundene ^{14}C kann mikrobiell umgesetzt werden. Zwar sind die Verhältnisse im ERAM für Mikroorganismen extrem (hohe Salinität, hoher pH-Wert), doch konnte mikrobielle Tätigkeit auch unter hoch salinaren Bedingungen nachgewiesen werden, selbst im hoch alkalischen pH-Bereich (bis pH 12) [Ito 1997], [Wiegel 1998], [van de Vossen et al. 1999], [Pedersen 1999]. Lediglich bei pH-Werten > 12 scheint ein mikrobieller Abbau unmöglich zu sein. Ein so hoher pH-Wert ist typisch für frischen Zement bzw. Salzbeton; Reaktion mit magnesiumhaltiger Lösung (entstanden durch Umlösungsprozesse an Kalilagern) führt zu einer deutlichen Erniedrigung des pH-Werts. Im Einlagerungsbereich WSF sind größere Mengen an Hartsalz und Carnallit vorhanden, so dass mit der Einstellung entsprechend niedriger pH-Werte und so mit mikrobieller Tätigkeit zu rechnen ist. Im Nordfeld fehlen vergleichbare Kalilager. Hier ist am Verwesungsgeruch allerdings bereits heute mikrobielle Aktivität festzustellen. Da bei den mikrobiellen Prozessen der pH-Wert sinkt, ist damit zu rechnen, dass sich die Mikroben auch weiterhin ihr günstiges Milieu selbst erzeugen und die ^{14}C -haltigen Verbindungen ebenfalls völlig umgesetzt werden. Im ELB OF und im ELB ZT ist der Gehalt an organischem ^{14}C irrelevant.

Nach vollständiger Mobilisierung des ^{14}C -Inventars und Umsetzung wie in Abschnitt J.1.2 beschrieben kann daher die folgende Aufteilung auf sekundäre Stoffklassen angenommen werden:

Tabelle J-2: ^{14}C - Inventare nach Mobilisierung und chemischer Umsetzung

Einlagerungsbereich		$^{14}\text{CH}_4$ [Bq]	$^{14}\text{CO}_3^{2-}$ [Bq]
WSF	SF	$1,81 \cdot 10^{12}$	$5,46 \cdot 10^{11}$
	WF	$4,82 \cdot 10^{11}$	$2,84 \cdot 10^{11}$
NF		$4,20 \cdot 10^{10}$	$1,71 \cdot 10^{10}$
OF		$1,20 \cdot 10^9$	$1,20 \cdot 10^{11}$
ZT		$1,01 \cdot 10^9$	$5,95 \cdot 10^8$
Gesamt		$2,34 \cdot 10^{12}$	$9,68 \cdot 10^{11}$



J.3 Transportverhalten

Nachdem die Vielzahl der ursprünglich vorhandenen ^{14}C -haltigen Verbindungen auf Methan und Kohlendioxid eingeschränkt werden konnte, ist für diese beiden nun der Modellansatz zur Transportmodellierung abzuleiten. Wie im Folgenden gezeigt, muss für Kohlendioxid nur der Transport in Lösung (als Carbonat) betrachtet werden, während Methan sowohl in der Lösung als auch in der Gasphase in signifikanten Mengen vorkommen wird; daher sind in diesem Fall beide Transportpfade zu betrachten.

J.3.1 Kohlendioxid / Carbonat

Kohlendioxid ist eines der Stoffwechselprodukte beim anaeroben mikrobiellen Abbau von Organika und ein wasserlösliches Gas. Im alkalischen Milieu steht es mit Hydrogencarbonat und Carbonat im Gleichgewicht („Carbonatisierung“). Aufgrund der verfügbaren Mengen an basischen Versatzmaterialien im ERAM (im wesentlichen der Portlanditgehalt von Braunkohlefilterasche, Zement und Salzbeton) kann der in der Gasphase verbleibende Anteil von $^{14}\text{CO}_2$ vernachlässigt werden; relevant ist nur der Transport in der gelösten Phase. Bei der Reaktion mit Portlandit entsteht Calciumcarbonat, das nur begrenzt löslich ist und daher zum größten Teil in der festen Phase vorliegt.

Die Sorption von Carbonat an den im ERAM zu betrachtenden Festphasen ist unbedeutend und wird daher nicht betrachtet. Wichtig ist dagegen die Löslichkeit; weitgehend unabhängig von der Lösungszusammensetzung (NaCl oder IP21, Komplexbildner) liegt sie für Calciumcarbonat bei ca. 10^{-5} mol/l. Bei der Anwendung dieser Löslichkeitsgrenze im Modell ist das nicht radioaktive Carbonat mit zu berücksichtigen; die molare Menge an $^{14}\text{CO}_3^{2-}$ ist demgegenüber verschwindend gering. Falls das Löslichkeitsprodukt erreicht wird, bleibt der Anteil von ^{14}C , der dem Verhältnis $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ entspricht, mobilisiert. Im Übrigen erfolgt die Transportmodellierung des $^{14}\text{CO}_3^{2-}$ wie für die anderen Radionuklide.

Inaktives (im wesentlichen ^{12}C -) Carbonat liegt z.T. bereits in den Versatzmaterialien (z.B. Flugaschen) vor; der größte Teil entsteht allerdings beim mikrobiellen Abbau der Organika. Diese Menge muss nun für die Modellierung konservativ festgelegt werden. Aufgrund entsprechender Studien kann davon ausgegangen werden, dass ein Teil der leicht abbaubaren organischen Verbindungen relativ schnell mikrobiell abgebaut wird. Zu diesen Verbindungen gehört vor allem jener Teil der leicht abbaubaren Stoffe (vorwiegend Cellulose), der durch mikrobielle Denitrifikation zu Carbonat abgebaut wird. Für das Inventar an ^{12}C -Carbonat wird nur die Menge dieser aus Inventardaten bekannten Stoffe eingesetzt. Die Modellannahme ist, dass aus Cellulose und Nitrat mikrobiell Kohlendioxid entsteht und dieses, über den Gesamthohlraum des Einlagerungsbereichs gleichmäßig verteilt, als Carbonat gebunden wird. Dabei werden die anorganischen Carbonate im Abfall und im Versatzmaterial sowie jene abbaubaren organischen Stoffe, welche durch langsamere und später einsetzende Abbauprozesse zu Carbonat umgesetzt werden, konservativ vernachlässigt. Ebenfalls vernachlässigt wird das Carbonat, welches sich zum Zeitpunkt der Radionuklidmobilisierung im ungesättigten Teil des Einlagerungsbereichs befindet. Die Menge an gebildetem Carbonat ist mit der durch mikrobiellen Abbau gebildeten Gasmenge korreliert (vgl. Anhang G). Da eindeutige Voraussagen bezüglich der Gasbildung nicht möglich sind, wird die Stoffmenge an ^{12}C -Carbonat im Einlagerungsbereich innerhalb weiter Bandbreiten variiert.



J.3.2 Methan (gelöst)

Methan ist wie alle Gase in begrenzter Menge wasserlöslich; im Unterschied zu Kohlendioxid handelt es sich dabei um eine rein physikalische Löslichkeit. Sie wird durch das Henry'sche Gesetz beschrieben; d.h. die gelöste Konzentration eines Gases ist proportional zu seinem Partialdruck in der Gasphase.

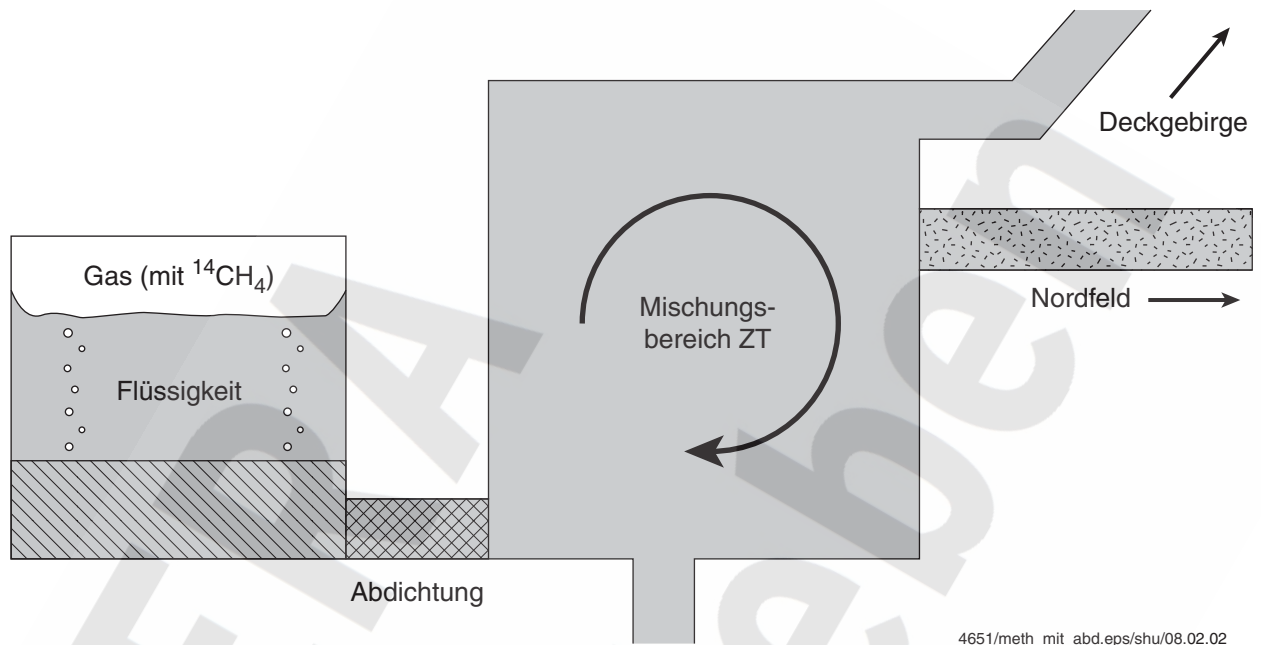


Abbildung J-1: Mobilisierung des $^{14}\text{CH}_4$ in den abgedichteten Einlagerungsbereichen

Für die Transportmodellierung muss nun zwischen den abgedichteten Einlagerungsbereichen (ELB WSF, ELB OF) und den nicht abgedichteten (ELB NF, ELB ZT) unterschieden werden. In den abgedichteten Bereichen wird davon ausgegangen, dass das gesamte Gas, das beim Abbau der Abfälle gebildet wird, bis zum Beginn der Auspressphase im Einlagerungsbereich verbleibt. Im Fall „ohne Gaspolster“ wird angenommen, dass die Gasbildung nur zu $^{14}\text{CH}_4$ führt; die Bildung nicht radioaktiver Gase wird nicht betrachtet. Das ist eine ungünstige Annahme, weil auf diese Weise das $^{14}\text{CH}_4$ lediglich durch die Luft, welche sich zu Beginn im Einlagerungsbereich befindet, verdünnt wird, was eine hohe Konzentration in Lösung zur Folge hat. Der „mobilisierte Anteil“ des Methans, wie der gelöste Anteil im Zusammenhang mit dem Transport in gelöster Form bezeichnet wird, wird zum Zeitpunkt seines Maximums bestimmt, wenn das Verhältnis aus Lösungs- zu Gasvolumen im Einlagerungsbereich maximal wird, d.h. etwa zu Beginn der Auspressphase. Zu diesem Zeitpunkt ist die Gasbildung bereits weitgehend abgeschlossen. Die entsprechenden Gleichungen sind in Anhang A, Kapitel A.5, aufgeführt.

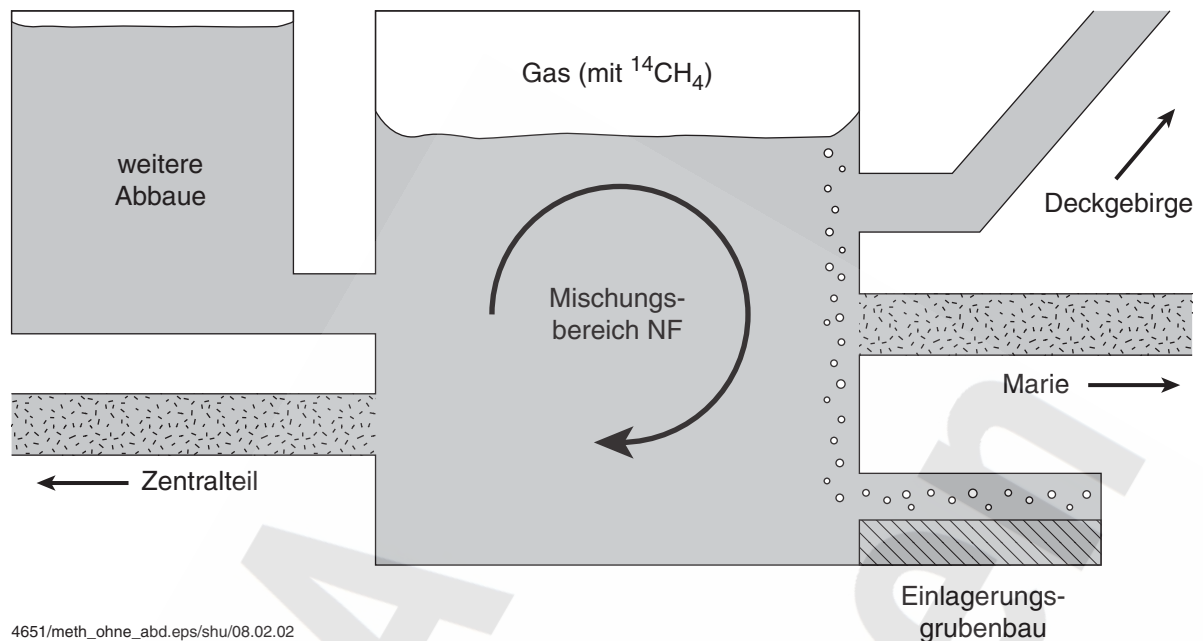


Abbildung J-2: Mobilisierung des $^{14}\text{CH}_4$ im Fall des ELB NF (nicht abgedichteter Einlagerungsbereich)

Die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche sind anders zu behandeln. Die folgenden Überlegungen gelten für den ELB NF (der Zentralteil ist in diesem Zusammenhang wegen seines erheblich kleineren Inventars an ^{14}C ohne Bedeutung). Aufgrund der Geometrie und der fehlenden Abdichtung kann sich hier kein Gaspolster ausbilden; die Zutrittsphase ist sehr kurz, die Auspressphase aufgrund der hohen Gasbildungsrate und des kleinen Einlagerungsbereichs ebenfalls (im Referenzfall ca. 100 a). Spätestens danach werden sich die gebildeten Gase in den Abbaue des Nordfelds ansammeln. Ein Entweichen in das Grubenfeld Marie oder in Richtung Zentralteil wird im Model ausgeschlossen. Dies ist eine ungünstige Annahme, denn sie führt zu höheren Konzentrationen des ^{14}C in der Gas- und damit auch in der gelösten Phase. Für die Berechnung des gelösten Anteils an $^{14}\text{CH}_4$ werden im Folgenden die Volumenverhältnisse unter Einbezug aller Abbaue des Nordfelds zu Grunde gelegt.

Es ist anzunehmen, dass zwischen dem Einsetzen der Gasbildung⁶⁸ im ELB NF und dem restlosen Volllaufen des Nordfelds eine gewisse Zeit verstreicht, die genügt, um einen signifikanten Anteil der gesamten Gasmenge zu bilden. Die Mengen an gebildetem Gas und mikrobiell generiertem $^{14}\text{CH}_4$ sind miteinander korreliert – wenn nur wenig Gas gebildet wird, kann auch nur wenig $^{14}\text{CH}_4$ entstehen. Für die Berechnung der maßgebenden Volumina an Gas- und Flüssigphase sowie der gelösten Menge $^{14}\text{CH}_4$ wird konservativ angenommen, dass sich zwar 100% des $^{14}\text{CH}_4$, jedoch erst 70% der gesamten Gasmenge gebildet haben.

⁶⁸ Aufgrund der bei den Abfällen vorhandenen Restfeuchte hat die Umsetzung der Abfälle bereits heute, d.h. vor dem Verschließen des ERAM, begonnen.

Wie in Anhang A (Kapitel A.5) gezeigt, gilt für die Konzentration des gelösten $^{14}\text{CH}_4$:

$$C'_{L,NF} = \frac{n_i}{\frac{V_g}{H_i \cdot R \cdot T} + V_l} \quad (\text{J-3})$$

mit

$C'_{L,NF}$ Konzentration des betrachteten Radionuklids (hier ^{14}C) im Porenwasser des Nordfelds (Einlagerungsbereich + Mischungsbereich + sonstige Abbaue); [mol/l]

n_i Menge an $^{14}\text{CH}_4$; [mol]

V_g Volumen der Gasphase; [m^3]

V_l Volumen der Flüssigphase; [m^3]

H_i Henry-Konstante für Methan = $3,6 \cdot 10^{-6}$ mol/(Pa· m^3)

R Gaskonstante = 8,314 J/(mol·K)

T Temperatur; [K]

Der Term $V_l + V_g/(H_i \cdot R \cdot T)$ kann somit als „effektives Verdünnungsvolumen“ für das $^{14}\text{CH}_4$ verstanden werden. V_g ist die Summe aus anfänglich ungesättigtem Gesamthohlraumvolumen des Nordfelds (Komponente Luft in der Gasblase) und der gebildeten Gasmenge, komprimiert auf den hydrostatischen Druck. V_l ist die Differenz aus Gesamthohlraumvolumen und V_g . Im Modell entspricht die Summe aller Abbaue des Nordfelds ohne den Einlagerungsbereich dem Maximalwert für den Mischungsbereich (zur Bestimmung des Referenzwerts des Mischungsbereichs wurden die Abbaue ausgeschlossen, welche von der ausgepressten Lösung nicht notwendigerweise durchströmt werden). Das Gesamtvolumen für alle Abbaue des Nordfelds ergibt sich daher als Summe aus Einlagerungsbereich und dem Maximalwert für den Mischungsbereich.

Tabelle J-3: Verwendete Parameter für den Einlagerungsbereich Nordfeld

Parameter	Wert	Einheit
V_{EH}	2'136	m^3
$\zeta_{EH,k}$	0,997	-
$\zeta_{EH,t}$	0,799	-
$\varepsilon_{EB,v1,0}$	0,651	-
$\varepsilon_{EB,v2,0}$	$2 \cdot 10^{-4}$	-
ϕ_A	0,0948	-
ϕ_N	1	-
$V_{VG,max}$	$1,395 \cdot 10^5$	m^3
$\zeta_{VG,k}$	0	-
$\zeta_{VG,t}$	0,727	-
$\varepsilon_{VG,v1,0}$	0,4	-
$\varepsilon_{VG,v2,0}$	$2 \cdot 10^{-4}$	-
$V_{g,STP,tot}$	$3,0 \cdot 10^5$	m^3
η	0,8	-



Mit den Parametern für den ELB NF (Tabelle J-3) errechnet sich ein Gesamthohlraum von ca. $40'000 \text{ m}^3$, dieser ist zu Beginn ungesättigt, d.h. mit Luft gefüllt. Zusammen mit dem gebildeten Gas ($0,7 \cdot \eta \cdot V_{g,STP, \text{tot}}$) sind das $2 \cdot 10^5 \text{ m}^3(\text{STP})$; d.h. die Größe des gasgefüllten Volumens, V_g , beträgt beim hydrostatischen Druck (4,9 MPa) $4'100 \text{ m}^3$. $V_g/(H_i \cdot R \cdot T)$ hat damit einen Wert von $4,6 \cdot 10^5 \text{ m}^3$; das ist mehr als das zwanzigfache von V_l . In Hinblick auf Gl. (J-3) bedeutet dies, dass die Konzentration des betrachteten $^{14}\text{CH}_4$ in Lösung kaum vom Flüssigkeitsvolumen abhängt. Mit anderen Worten: Die Menge an Methan, die aus der Gasphase in die Lösung übergeht, ist klein (aufgrund der geringen Löslichkeit und der Volumenverhältnisse im ELB NF); der größte Teil verbleibt in der Gasphase. Der Partialdruck des $^{14}\text{CH}_4$ in der Gasphase hängt daher nur von deren Volumen ab, das zum überwiegenden Teil durch die gebildete Gasmenge und kaum durch die anfangs vorhandene Luft bestimmt ist. Aus diesem Grund ist die Konzentration des Methans in Lösung von den Parametern, die das Gesamthohlraumvolumen betreffen (vor allem V_{VG}), unabhängig.

Im Modell wird die Konzentration von Radionukliden im Mischungsbereich dynamisch aus der Konzentration im Einlagerungsbereich und der Lösungsauspressung berechnet. Der mobilisierte Anteil des Inventars muss daher im Falle des $^{14}\text{CH}_4$ im ELB NF „rückwärts“ so berechnet werden, dass sich (unter der Voraussetzung, dass die gesamte Flüssigkeit aus dem Einlagerungsbereich in vernachlässigbar kurzer Zeit ausgepresst wird) im Mischungsbereich die Konzentration gemäß Gl. (J-3) einstellt. Dies ist im Anhang A detailliert beschrieben.

Wird das gelöste Methan (aus den abgedichteten und den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen) weiter transportiert, dann sinkt der hydrostatische Druck, indem die Lösung aufsteigt. Dies könnte ein Ausgasen zur Folge haben. Gleichzeitig verringert sich jedoch auch die gelöste $^{14}\text{CH}_4$ -Konzentration durch Mischung mit Lösung, die aus der übrigen Grube ausgepresst wird. Im Modell wird konservativerweise angenommen, dass diese Verdünnung genügt, um das Ausgasen zu verhindern.

Der Transport durch das Hutgestein und Deckgebirge erfolgt ohne Retardation. Die Verdünnung im oberflächennahen Grundwasser und die Berechnung der Dosis erfolgt wie bei den anderen Radionukliden.



Anhang K Effekte bei mehreren abgedichteten Zugangsstrecken (Abdichtungen)

K.1 Einleitung

In diesem Anhang werden Effekte angesprochen, die durch das Vorhandensein von mehreren abgedichteten Zugangsstrecken (Abdichtungen) oder anderen hydraulischen Wegsamkeiten zu einem Einlagerungsbereich auftreten können und die im vorliegenden Modellkonzept für die Sicherheitsanalyse, welches auf einer Modellabdichtung beruht, nicht explizit berücksichtigt werden. Es wird gezeigt, dass diese Effekte in der Sicherheitsanalyse in angemessener Weise indirekt abgedeckt werden.

Jeder der Einlagerungsbereiche⁶⁹ ist in Wirklichkeit durch mehrere abgedichtete Zugangsstrecken oder andere hydraulische Wegsamkeiten mit dem übrigen Grubengebäude verbunden. Diese bilden zusammen das Abdichtsystem, welches den Lösungszutritt zum Einlagerungsbereich quantitativ erfassbar bestimmt.

Das Abdichtsystem wird im Modell durch die Modellabdichtung dargestellt⁷⁰. Diese wird durch eine Länge, eine Fließquerschnittsfläche, die querschnittsflächengemittelte Permeabilität sowie die Parameter zur Quantifizierung von Korrosion und ggf. Sorption charakterisiert. Die Parameter der Modellabdichtung werden so bestimmt, dass die Modellabdichtung für die Bewegung von Salzlösung und Gas denselben hydraulischen Widerstand darstellt wie das System der möglichen Wegsamkeiten im Grubengebäude und dass die Transportzeit entlang der Modellabdichtung gleich ist wie jene entlang des ungünstigsten Weges durch das tatsächlich vorliegende System. Die Ermittlung der Parameter für die Modellabdichtung ist im Detail in Anhang D dargelegt.

In der Modellabdichtung erfolgt die Bewegung von Salzlösung entweder in den Einlagerungsbereich hinein oder aber – eventuell gemeinsam mit einer Gasbewegung – aus diesem heraus. Gleichzeitig stattfindende Bewegungen von Salzlösung in den Einlagerungsbereich hinein und aus diesem heraus oder gegenläufige Bewegungen von Lösung und Gas können durch das Modell aufgrund seiner Auslegung somit nicht explizit betrachtet werden. Insbesondere kann das Modell keine Durchströmung eines Einlagerungsbereiches beschreiben.

Im vorliegenden Anhang wird diskutiert, welche Auswirkungen mehrere Wegsamkeiten zwischen einem Einlagerungsbereich und der übrigen Grube haben können. Die Überlegungen werden i.a. für zwei Abdichtungen angestellt. Die Erweiterung auf eine größere Zahl von hydraulischen Wegsamkeiten ist sinngemäß möglich.

Effekte, die auf das Vorhandensein mehrerer Abdichtungen zwischen einem abgedichteten Einlagerungsbereich und der übrigen Grube – im Gegensatz zu einer Verbindung über eine einzige

⁶⁹ Für die Einlagerungsbereiche ZT und NF kann kein hydraulisch wirksames Abdichtsystem definiert werden. Diese Einlagerungsbereiche sind deshalb von der folgenden Diskussion ausgeschlossen.

⁷⁰ Für den Einlagerungsbereich OF trifft dies nur für die Phase der Lösungsausressung aus dem Einlagerungsbereich zu.



Modellabdichtung – zurückzuführen sind, beruhen auf unterschiedlichen Druckdifferenzen entlang der verschiedenen Abdichtungen. Solche können auftreten durch

- unterschiedliche Druckbeaufschlagung der Abdichtungen auf Seite der übrigen Grube
- unterschiedliche vertikale Druckgradienten im Einlagerungsbereich und in der übrigen Grube aufgrund von
 - (i) unterschiedlichen Lösungsdichten
 - (ii) einem vertikal ausgedehnten Gaspolster im Einlagerungsbereich

Mit dem Begriff „Ende der Abdichtung“ wird jener räumliche Bereich des Grubengebäudes bezeichnet, der zur übrigen Grube gehört und an die Abdichtung angrenzt. Nach den Modellannahmen herrscht dort nach dem Volllaufen der übrigen Grube, d.h. ab der Modellzeit $t=0$, ein fester, vorgegebener hydraulischer Druck. Im ersten der oben genannten Fälle wird diese Annahme für die Diskussion fallengelassen.

K.2 Unterschiedliche Druckbeaufschlagung der Abdichtungen

Eine unterschiedliche Druckbeaufschlagung der Abdichtungen ist nur möglich, falls deren „Enden“ hydraulisch schlecht verbunden sind, d.h. dass die Abdichtungen aus dem Einlagerungsbereich in hydraulisch unabhängige Teile des Grubengebäudes führen. Dies ist z.B. möglich, falls die Verfüllung von Grubenbauen in der übrigen Grube lokal sehr wirksame hydraulische Widerstände bewirkt. In diesem Fall sind unterschiedliche hydraulische Bedingungen an den „Enden der Abdichtungen“ in die Betrachtung einzubeziehen. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden (Überlegungen für zwei Abdichtungen):

- Die zwei hydraulisch unabhängigen Teile des Grubengebäudes, in welche die beiden Abdichtungen führen, sind über großräumig unterschiedliche, jedoch hydraulisch vergleichbare Pfade an einen Lösungszu- bzw. -austrittsort und damit an das Hutgestein angeschlossen (vgl. Abbildung K-1).
- Der eine Teil des Grubengebäudes ist hydraulisch äußerst schlecht mit einem Lösungszu- bzw. -austrittsort und darüber mit dem Hutgestein verbunden (vgl. Abbildung K-2).

Fall 1: Hydraulisch vergleichbare Pfade zu Lösungszu- bzw. -austrittsort (Abbildung K-1)

Sofern an den Enden der beiden Abdichtungen ungefähr gleichzeitig der mit den Modellannahmen festgelegte Druck vorliegt, läuft die Zutritts- und Auspressphase im Rahmen der Modellgenauigkeit so ab, wie durch das Rechenmodell (mit einer Modellabdichtung) beschrieben. In diesem Fall herrschen entlang der beiden Abdichtungen auch nicht deutlich unterschiedliche Druckdifferenzen. Dadurch, dass die kontaminierte Salzlösung beim Austritt entlang der Abdichtungen jedoch in verschiedene Teile des Grubengebäudes gelangt, werden die Radionuklide aus den beiden Grubenteilen mit größter Wahrscheinlichkeit zeitlich verschoben ins Hutgestein austreten. Das Modell ist in diesem Fall somit angemessen und konservativ.



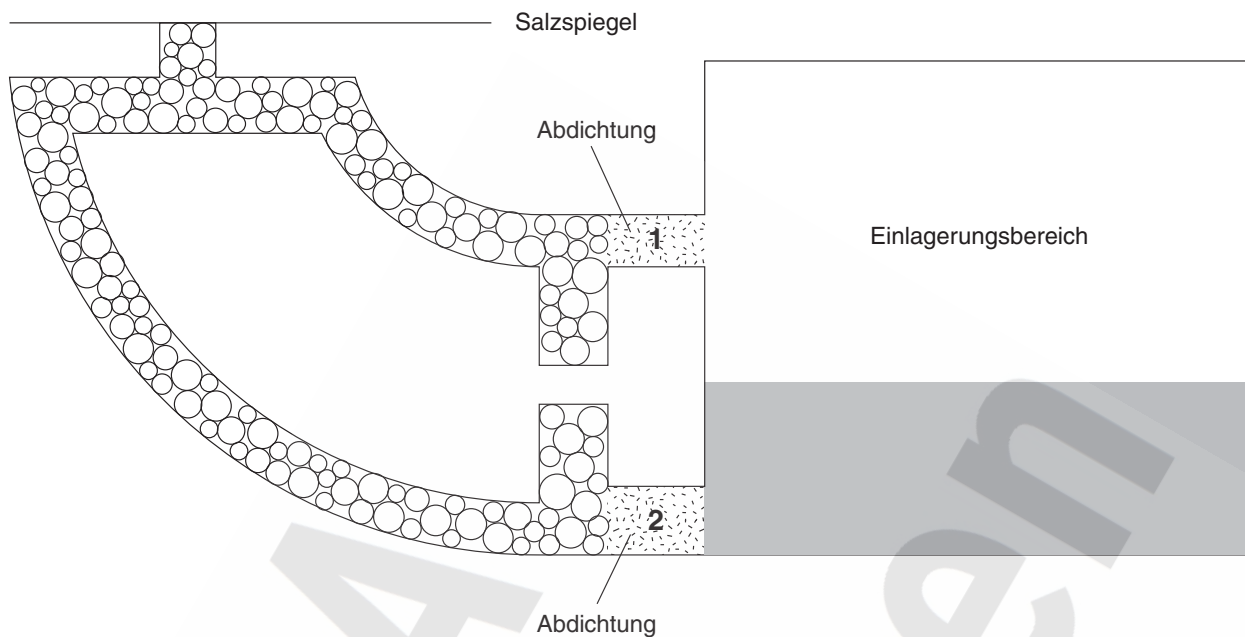


Abbildung K-1: Schematische Darstellung des Falles mit schlechter hydraulischer Verbindung der Enden der Abdichtung und mit vergleichbaren hydraulischen Verbindungen zum Hutgestein

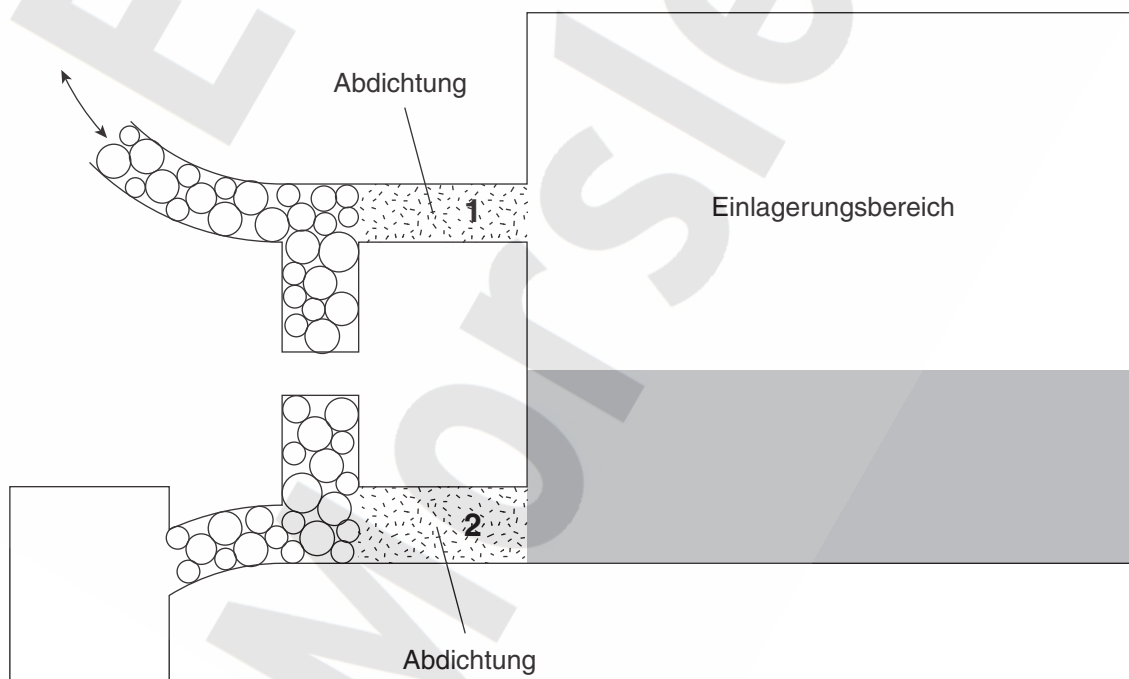


Abbildung K-2: Schematische Darstellung des Falles mit schlechter hydraulischer Verbindung der Enden der Abdichtungen, davon eine ohne hydraulische Verbindung zum Hutgestein

Sofern das Ende der oberen Abdichtung (bezeichnet als Abdichtung 1) wesentlich früher den hohen Lösungsdruck aufweist als das Ende der unteren Abdichtung (bezeichnet als Abdichtung 2), vgl. Abbildung K-1, setzt der Lösungszutritt zum Einlagerungsbereich mit einer gegenüber dem Rechenmodell reduzierten Rate ein, da er nur über eine Abdichtung erfolgt. Sofern im Einlagerungsbereich am Ort der Abdichtung 2 der Lösungsdruck rascher ansteigt als am (anderen) Ende dieser Abdichtung, so kann bereits während der Zutrittsphase (Lösungszutritt über die Abdichtung 1) kontaminierte Lösung entlang der Abdichtung 2 aus dem Einlagerungsbereich austreten.

Solange allerdings Salzlösung über die Abdichtung 1 zutritt und gleichzeitig Lösung über die Abdichtung 2 austritt, sind die hydraulischen Druckbedingungen im Einlagerungsbereich und am „Ende der Abdichtung 2“ derart, dass die ausgetretene Lösung nicht ins Hutgestein gelangen kann, da sie ein niedrigeres hydraulisches Potential aufweist als die Lösung im Hutgestein (vgl. Abbildung K-1). Erst nach Abschluss der Zutrittsphase in die Grube ist eine Freisetzung von vorzeitig aus dem Einlagerungsbereich ausgetretener Salzlösung ins Hutgestein möglich. Dieser Fall, bei dem das „Ende der Abdichtung 2“ bei vergleichbarer Verbindung zum Hutgestein erst sehr spät den vollen hydrostatischen Druck aufweist, setzt jedoch voraus, dass dieser Bereich an ein wesentlich größeres Volumen angeschlossen ist als der hydraulisch unabhängige Teil am „Ende der Abdichtung 1“. Entsprechend unwahrscheinlich ist in diesem Fall ein rasches Auspressen der über die Abdichtung 2 ausgetretenen Radionuklide ins Hutgestein nach dem Volllaufen des dort angeschlossenen großen Volumens. Ohne genauere Analyse wird dieser sehr hypothetische Fall durch das Rechenmodell jedoch nur mit der Annahme einer relativ hohen Permeabilität der Modellabdichtung abgedeckt, welche im Modell zu einem frühen Einsetzen der Auspressphase führt.

Weist andererseits die untere Abdichtung (Abdichtung 2, vgl. Abbildung K-1), wesentlich früher den hohen Druck auf als die obere Abdichtung (Abdichtung 1), dann kann während der Zutrittsphase zunächst nur Gas entlang der Abdichtung 1 entweichen. Je nachdem, wann auch das Ende der Abdichtung 1 den hohen Lösungsdruck aufweist, entspricht dies dem Fall „mit Gaspolster“, jedoch mit geringerer Gesamtgasmenge, oder dem Fall „ohne Gaspolster“. Das Rechenmodell deckt somit dieses Szenario ab.

Fall 2: Nur eine Abdichtung mit hydraulisch wirksamer Verbindung zum Hutgestein

Es führe die Abdichtung 1 zum Teil des Grubengebäudes mit Verbindung zum Hutgestein und die Abdichtung 2 zum Teil ohne wirksame Verbindung (vgl. Abbildung K-2). Der Zutritt von Salzlösung erfolgt damit ausschließlich entlang der Abdichtung 1 und mit einer geringeren Rate als im Rechenmodell, da dort auch die Abdichtung 2 dem Abdichtsystem zugerechnet und als Zutrittspfad für Salzlösung betrachtet wird. Auch in diesem Fall tritt kontaminierte Lösung entlang der Abdichtung 2 aus dem Einlagerungsbereich aus, sobald der Lösungsdruck im Einlagerungsbereich am Ort dieser Abdichtung genügend angestiegen ist. Sofern die Abdichtung 2 oben in den Einlagerungsbereich führt, entweicht entlang der Abdichtung 2 Gas. Im Gegensatz zum vorher diskutierten Fall 1 kann die Salzlösung bzw. das Gas, das derart während der Zutrittsphase aus dem Einlagerungsbereich entwichen ist, auch nach dem Ende der Zutrittsphase in die Grube nicht direkt ins Hutgestein freigesetzt werden. Vielmehr müssen diese Fluide während der Auspressphase entlang der Abdichtung 2 erneut in den Einlagerungsbereich gelangen, bevor sie anschließend entlang der Abdichtung 1 freigesetzt werden. Dieser Fall entspricht somit der Parameterwahl, bei welcher der Einlagerungsbereich um jenen Teil des Grubengebäudes vergrößert wird, mit dem er über die Abdichtung 2 verbunden ist, und in dem das Abdichtsystem nur von der Abdichtung 1 gebildet wird



(Argumentation für insgesamt 2 Abdichtungen). Bei geeigneter Wahl der Parameterbandbreiten ist dieser Fall durch das Rechenmodell und die Parametervariationen abgedeckt.

K.3 Unterschiedliche vertikale Dichtegradienten

Sind die „Enden der Abdichtungen“ hydraulisch gut verbunden, können bei unterschiedlichen vertikalen Dichtegradienten im Einlagerungsbereich und in der übrigen Grube Effekte eintreten, die im Rechenmodell mit einer Modellabdichtung nicht speziell abgebildet werden.

Unterschiedliche Dichteeffekte können sich in der Grube durch Umlösungsprozesse einstellen. Beim Zutritt von Wässern werden sich diese im Bereich der Zutrittsstelle am Salzspiegel zu einer gesättigten NaCl-Lösung aufsättigen. Je nach Fließweg, Ausbildung, Oberfläche und Zugänglichkeit der anstehenden Kalisalze sowie Wechselwirkung mit dem Salzbeton wird der Mg-Gehalt in der Lösung mehr oder weniger schnell ansteigen. Bei intensiver Wechselwirkung mit Kalisalz und ohne Kontakt zu Salzbeton entsteht eine an $MgCl_2$ gesättigte Lösung mit der Zusammensetzung von IP21-Lösung (vgl. Anhang E). Für die Sicherheitsanalyse und damit auch für die Analyse der möglichen Dichteeffekte ist die Möglichkeit einzubeziehen, dass sich in der Restgrube oder im ELB WSF IP21-Lösung bilden wird.

Durch Wechselwirkung mit Zement aus dem Salzbeton und zementierten Abfällen verändert sich die Dichte der $MgCl_2$ -Lösung zusätzlich, die möglichen Werte liegen in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen der Lösungsmenge, deren anfänglicher $MgCl_2$ -Konzentration und der Masse des beteiligten Zementes zwischen den Dichten von NaCl-Lösung und von IP21-Lösung.

Die Dichte der Lösung in der Grube liegt damit zwischen jener von NaCl-Lösung und von IP21-Lösung:

NaCl-Lösung	ρ_{NaCl}	=	1'198	kg/m ³
IP21-Lösung	ρ_{IP21}	=	1'291	kg/m ³
Maximaler Dichteunterschied	$\Delta\rho_{D,max}$	=	93	kg/m ³

Eine weitere Ursache für unterschiedliche vertikale Dichtegradienten innerhalb und außerhalb eines Einlagerungsbereichs ist die Ausbildung eines Gaspolsters im Einlagerungsbereich. Im Bereich hoher Gassättigung bestimmt die geringe Gasdichte den vertikalen Druckverlauf.

Im Folgenden werden die Strömungsverhältnisse in den Abdichtungen eines Einlagerungsbereichs bei unterschiedlichen vertikalen Druckgradienten diskutiert.

K.3.1 Strömungsverhältnisse in den Abdichtungen

1 Situation mit Lösungssättigung bis zur obersten Abdichtung

Betrachtet wird zunächst ein Einlagerungsbereich, der über mehrere Abdichtungen in verschiedenen Teufen mit der übrigen Grube verbunden und der bis oberhalb der obersten Abdichtung mit Lösung gesättigt ist. Im Einlagerungsbereich sei die Dichte der Lösung geringer als außerhalb. Die



vertikalen Druckgradienten seien rein hydrostatisch. Die Verhältnisse sind in Abbildung K-3 dargestellt.

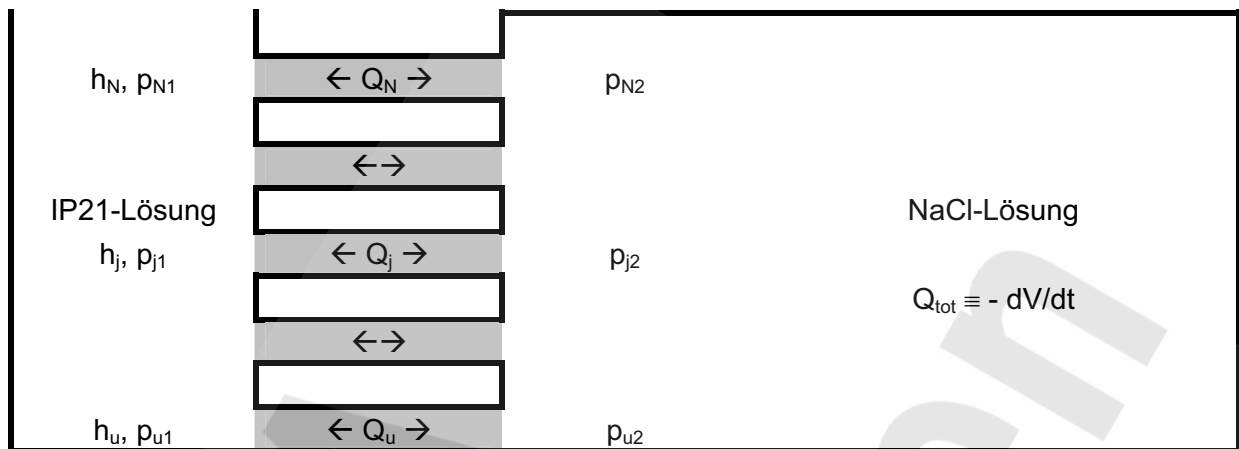


Abbildung K-3: Definition der Parameter zur Ermittlung der Strömungsverhältnisse in den Abdichtungen

Es seien h_u , k_u , l_u und A_u die Tiefe, Permeabilität, Länge und Fließquerschnitt der untersten Abdichtung. Es bezeichne der Index j , $j = 1 \dots N$ von unten nach oben die anderen Abdichtungen mit den analogen Parametern. Der Druck in der Tiefe der Abdichtungen ist außerhalb des Einlagerungsbereichs mit dem Index 1, innerhalb des Einlagerungsbereichs mit dem Index 2 gekennzeichnet. Lösungsbewegungen in den Abdichtungen sind als positive Werte Q_i angegeben, wenn sie aus dem Einlagerungsbereich in die übrige Grube führen.

Die hydraulischen Widerstände der einzelnen Abdichtungen, R_i , $i = u, 1 \dots N$, und jener des gesamten Abdichtungs-systems R_{tot} berechnen sich gemäß

$$R_i = \frac{l_i}{k_i \cdot A_i} \quad \frac{1}{R_{tot}} = \sum_{i=u,1}^N \frac{1}{R_i} \quad (K-1)$$

Die Druckdifferenz entlang der untersten Abdichtung ist

$$\Delta p_u = p_{u2} - p_{u1} \quad (K-2)$$

Für jede Abdichtung $j=1 \dots N$ können – mit Bezug auf die unterste Abdichtung – die folgenden beiden Größen definiert werden, welche nur von den Parametern der betrachteten Abdichtung und der Dichtedifferenz zwischen der Lösung im Einlagerungsbereich und in der übrigen Grube Δp_D abhängen:

$$\Delta p_{Dj} \equiv (h_j - h_u) \cdot g \cdot \Delta p_D \quad W_j \equiv \frac{\Delta p_{Dj}}{\mu_w \cdot R_j} \quad (K-3)$$

mit μ_w die dynamische Viskosität der Lösung und g die Gravitationskonstante.

Die Raten der Lösungsbewegung entlang der Abdichtungen sind damit

$$Q_u = \frac{\Delta p_u}{\mu_w \cdot R_u} \quad Q_j = \frac{\Delta p_u + \Delta p_{Dj}}{\mu_w \cdot R_j} \quad (\text{K-4})$$

Der Gesamtfluss durch das Abdichtsystem ergibt sich daraus, unter Verwendung der Gleichungen (K-1) und (K-3) zu

$$Q_{\text{tot}} = \sum_{i=u,1}^N Q_i = \frac{\Delta p_u}{\mu_w \cdot R_{\text{tot}}} + \sum_{j=1}^N W_j \quad (\text{K-5})$$

und aufgelöst nach der Druckdifferenz entlang der untersten Abdichtung

$$\Delta p_u = \mu_w \cdot R_{\text{tot}} \cdot \left(Q_{\text{tot}} - \sum_{j=1}^N W_j \right) \quad (\text{K-6})$$

Die Aufteilung des Flusses auf die Abdichtungen ist

$$\frac{Q_i}{Q_{\text{tot}}} = \frac{R_{\text{tot}}}{R_i} \cdot \left(1 - \frac{1}{Q_{\text{tot}}} \cdot \sum_{j=1}^N W_j \right) + \frac{W_i}{Q_{\text{tot}}} \quad i = u, 1 \dots N \quad (W_{i=u} \equiv 0) \quad (\text{K-7})$$

Die Transportzeit (ohne Sorption) von Radionukliden während der Auspressphase entlang der Abdichtung i , T_i , ist im Vergleich zur Transportzeit gemäß dem Rechenmodell mit der einen Modellabdichtung T_P

$$\frac{T_i}{T_P} = \frac{l_i \cdot A_i}{l_P \cdot A_P} \cdot \frac{Q_{\text{tot}}}{Q_i} \quad (\text{K-8})$$

Sofern im Gegensatz zu der oben betrachteten Situation die schwerere Lösung im Einlagerungsbereich und die leichtere Lösung auf der Seite der übrigen Grube an den Abdichtungen ansteht, sind die oben angegebenen Gleichungen mit Bezug auf die oberste Abdichtung anstelle der untersten Abdichtung umzuschreiben.

2 Situation mit ausgedehntem Gaspolster im Einlagerungsbereich

Sofern die unterschiedlichen Dichtegradienten nicht durch verschiedene Salzgehalte sondern durch ein Gaspolster im Einlagerungsbereich verursacht werden, sind die oben definierten Parameter und die angegebenen Gleichungen wie nachfolgend beschrieben anzupassen⁷¹.

⁷¹ Die Lösungsdichte im Einlagerungsbereich und in der übrigen Grube sei gleich.



2.1 Einsetzen des Gaseintritts in die Abdichtung

Damit Gas in die anfänglich lösungsgesättigte Abdichtung eintreten kann, ist die Lösung aus deren Porenraum in die übrige Grube zu verdrängen. Maßgebend für diesen Prozess sind in erster Linie die Überwindung des Gaseintrittsdrucks (Kapillardruck bei der residualen Gassättigung) und der Fließwiderstand der Lösungsbewegung in den Abdichtungen.

Für die quantitative Abschätzung dieses Prozesses ist Δp_{Dj} für die Abdichtungen im gesättigten Bereich =0 zu setzen. Für die Abdichtungen im ungesättigten Bereich ist bei der Berechnung der Druckdifferenz Δp_{Dj} als Bezugstiefe nicht die unterste Abdichtung, sondern der Lösungspegel zu verwenden und diese zudem um den Gaseindringdruck zu verringern. Mit diesen Änderungen bleiben die Bedeutungen der definierten Größen und die Gleichungen unverändert.

2.2 Stationärer Gasaustritt über eine oder mehrere der oberen Abdichtungen

Der Zustand eines stationären Gasaustritts über obere Abdichtungen wird mit folgenden Annahmen quantitativ untersucht: Die Lage des Lösungspegels sei in ausreichendem Ausmaß stationär. Abdichtungen, über welche Gas austritt, weisen eine Gassättigung von ungefähr $s_g = 0,5$ auf. Dieser Wert zeigte sich in speziellen 2-Phasen-Modellrechnungen als typisch. Die relative Permeabilität für Gas unterscheidet sich bei dieser Gassättigung nur um wenige 10 % vom Wert 1, ihr Einfluss kann deshalb hier vernachlässigt werden. Der Druckabfall entlang der oberen Abdichtungen sei ausreichend gering, dass die Expansion des austretenden Gases in den Abdichtungen vernachlässigt werden kann.

Die oben aufgeführten Gleichungen (K-1) und (K-2) gelten unverändert. Die weiteren Gleichungen sind mit folgenden Definitionen anzupassen:

h_{LP} Tiefe des Lösungspegels

ρ Dichte der Lösung im Einlagerungsbereich und in der übrigen Grube

μ_g dynamische Viskosität von Gas ($\mu_g = 1 \cdot 10^{-5}$ Pa·s)

$$\Delta p_{Dj} = \begin{cases} (h_j - h_{LP}) \cdot g \cdot \rho & h_j > h_{LP} \\ 0 & h_j < h_{LP} \end{cases} \quad (\text{K-3a}')$$

Je nach den Verhältnissen tritt nicht über alle Abdichtungen oberhalb des Lösungspegels Gas aus, über die unteren dieser Abdichtungen kann Lösung zutreten. Dies ist bei der Berechnung der W_j Werte zu beachten, da die beiden Fluide unterschiedliche Viskositäten besitzen.

$$W_j = \begin{cases} \frac{\Delta p_{Dj}}{\mu_g \cdot R_j} & h_j > h_{LP} \text{ und } Q_j > 0 \\ \frac{\Delta p_{Dj}}{\mu_w \cdot R_j} & h_j > h_{LP} \text{ und } Q_j < 0 \\ 0 & h_j < h_{LP} \end{cases} \quad (\text{K-3b}')$$



$$Q_j = \begin{cases} \frac{\Delta p_u + \Delta p_{Dj}}{\mu_g \cdot R_j} & h_j > h_{LP} \text{ und } Q_j > 0 \\ \frac{\Delta p_u + \Delta p_{Dj}}{\mu_w \cdot R_j} & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{K-4b}')$$

Sei $N1 \leq N$ der Index der untersten Abdichtung, über die Gas austritt. $N1$ ist iterativ zu bestimmen, indem zunächst für $N1$ der Index der untersten Abdichtung oberhalb des Lösungspegels verwendet und mit Hilfe der hier angegebenen Gleichungen (K-3b'), (K-4b') und (K-6') das Vorzeichen von Q_{N1} bestimmt wird. Sofern dieses negativ ist, d.h. sofern über die Abdichtung $N1$ ein Zutritt in den Einlagerungsbereich erfolgt, sind $N1$ um 1 zu erhöhen und die Gleichungen (K-3b'), (K-4b') und (K-6') erneut zu lösen. Der Iterationsprozess ist solange fortzusetzen, bis Q_{N1} positiv ist.

$$Q_{\text{tot}} = \Delta p_u \cdot \left[\sum_{i=u,1}^{N1-1} \frac{1}{\mu_w \cdot R_i} + \sum_{j=N1}^N \frac{1}{\mu_g \cdot R_j} \right] + \sum_{j=1}^N W_j \quad (\text{K-5}')$$

$$\Delta p_u = \frac{Q_{\text{tot}} - \sum_{j=1}^N W_j}{\sum_{i=u,1}^{N1-1} \frac{1}{\mu_w \cdot R_i} + \sum_{j=N1}^N \frac{1}{\mu_g \cdot R_j}} \quad (\text{K-6}')$$

Die Gleichung (K-7) ist in diesem Fall nicht gültig, stattdessen muss auf die Gleichungen (K-4b'), (K-5') und (K-6') zurückgegriffen werden. Gleichung (K-8) ist nicht anwendbar.

K.3.2 Diskussion der Auswirkungen für die Zutrittsphase

Während der Zutrittsphase ist Δp_u negativ. Eine entgegengesetzte Bewegungsrichtung von Fluid in den Abdichtungen auf den verschiedenen Sohlen, also ein positives Q_j , tritt bei den in Abbildung K-3 dargestellten Verhältnissen zuerst in der obersten Abdichtung (Index N) ein. Voraussetzung ist somit, dass Δp_{DN} größer ist als der Betrag von Δp_u (vgl. Gl. (K-4) bzw. (K-4b')).

Solange der Lösungspegel im Einlagerungsbereich die oberste Abdichtung (noch) nicht erreicht, entspricht Δp_{DN} der hydrostatischen Druckdifferenz zwischen dem Lösungspegel und der obersten Abdichtung, abzüglich des Gaseindringdrucks. Im ELB WSF ist diese hydrostatische Druckdifferenz bei einem Lösungspegel auf der 3. Sohle rund 1 MPa, somit $\Delta p_{DN} < 1$ MPa. Ein Austreten von Gas über die oberste Abdichtung kann somit nach Gl. (K-4b') erst bei Druckdifferenzen zwischen übriger Grube und Einlagerungsbereich (Δp_u) von weniger als 1 MPa einsetzen. Beim ELB OF sind die Bedingungen bei einem Lösungspegel auf der 4. Sohle ähnlich.

Sofern die Gasbildung zu diesem Zeitpunkt noch hoch ist, steigt der Druck im Einlagerungsbereich weiterhin rasch an, und die Strömungsrichtung kehrt sich innerhalb relativ kurzer Zeit in allen Abdichtungen um. Die Zeitdauer von gegenläufigen Bewegungsrichtungen in den Abdichtungen ist somit kurz und die Auswirkung mehrerer Abdichtungen gegenüber dem Rechenmodell mit einer Modellabdichtung gering.



Falls sich ein Zustand mit gleichzeitigem Gasaustritt über eine obere Abdichtung und Lösungszutritt über die unteren Abdichtungen einstellt und lange Zeit andauert, bedeutet dies, dass die Gasbildung durch das Entweichen von Gas kompensiert wird und weiter Salzlösung nachfließen kann. Dies führt zu einer größeren Menge zugetretener Salzlösung am Ende der Zutrittsphase als unter den vereinfachenden Modellannahmen mit den beiden Fällen „mit Gaspolster“. Es bedeutet aber auch, dass die Gasbildungsrate nicht hoch genug ist, um das Auspressen von Salzlösung nennenswert zu verstärken. Dieser Zustand mit gleichzeitigem Lösungszutritt und Gasaustritt wird detaillierter im Kapitel K.3.4 diskutiert.

Erreicht der Lösungspegel im Einlagerungsbereich während der Zutrittsphase die oberste Abdichtung, dann ist, unter der extremen Annahme einer IP21-Lösung in der übrigen Grube und einer reinen NaCl-Lösung im Einlagerungsbereich $\Delta p_{DN} = 0,1 \text{ MPa}$ im ELB WSF und $\Delta p_{DN} = 0,07 \text{ MPa}$ im ELB OF. Diese Werte sind sehr klein gegenüber den typischen Druckdifferenzen zwischen der übrigen Grube und dem Einlagerungsbereich während der Zutrittsphase. Gegenläufige Lösungsbewegungen aufgrund von Dichteeffekten beeinflussen die Zutrittsphase somit nicht in relevantem Ausmaß.

K.3.3 Auswirkungen während der Auspressphase (Lösungsflüsse)

Während der Auspressphase bezeichnet Q_{tot} die Rate des insgesamt durch Gasbildung und Konvergenz aus dem Einlagerungsbereich ausgepressten Fluidvolumens. Diese erreicht für den ELB WSF je nach den Verhältnissen Werte in der Größenordnung von $0,1 \text{ m}^3/\text{a}$ bis $1 \text{ m}^3/\text{a}$ für den Referenz-Anfangswert der Abdichtungspemeabilität und bis zu einigen $10 \text{ m}^3/\text{a}$ bei relativ hohen Anfangspemeabilitäten, entsprechend früher Korrosion des Abdichtsystems sowie ungünstigen Annahmen in Bezug auf Konvergenz und Gasbildung. Hohe Auspressraten treten bei früh einsetzenden Auspressphasen auf, die niederen Werte entsprechen späten Zeiten von einigen Zehntausend bis Hunderttausend Jahren. Nennenswert unterschiedliche vertikale Dichtegradienten aufgrund von unterschiedlichen Lösungszusammensetzungen sind nach so langer Zeit wenig plausibel.

Anhand der in Kapitel K.3.1 aufgeführten Gleichungen werden im Folgenden die Voraussetzungen für dichtebedingte gegenläufige Lösungsbewegung in den Abdichtungen für das West-Südfeld aufgezeigt. Eine solche tritt ein, falls $\Delta p_u < 0$, somit, nach Gleichung (K-6), falls

$$Q_{tot} < \sum_{j=1}^N W_j \quad (\text{K-9})$$

d.h. falls die Brutto-Auspressrate aufgrund von Gasbildung und Konvergenz geringer ist als die Summe der W -Werte aller Abdichtungen.

In Tabelle K-1 sind die W -Werte und deren Summe für verschiedene Permeabilitäten der einzelnen Abdichtungen des ELB WSF aufgeführt (siehe Anhang D für die Längen und Fließquerschnitte der einzelnen Abdichtungen).



Tabelle K-1: W-Werte der Abdichtungen des ELB WSF für verschiedene Permeabilitäten der einzelnen Abdichtungen und maximalem Dichteunterschied (NaCl-Lösung im ELB WSF, IP21-Lösung in der übrigen Grube). Die W-Werte hängen nur von den Eigenschaften und der Teufenlage der jeweiligen Abdichtung, nicht aber von jenen der anderen Abdichtungen ab.

	K [m ²]	W-Wert [m ³ /a]	K [m ²]	W-Wert [m ³ /a]	K [m ²]	W-Wert [m ³ /a]
Sohle 253	1.E-18	0,0004	1.E-18	0,0004	1.E-18	0,0004
12YKA24R001	1.E-18	0,0001	1.E-18	0,0001	1.E-14	1,2703
Übrige 291 m Sohle	1.E-18	0,0003	1.E-18	0,0003	1.E-18	0,0003
15YKA24R001	1.E-18	0,0001	1.E-14	1,3753	1.E-14	1,3753
Übrige 332 m Sohle	1.E-18	0,0001	1.E-18	0,0001	1.E-18	0,0001
17YEQ01	1.E-18	-	1.E-14	-	1.E-14	-
Übrige 372 m Sohle	1.E-18	-	1.E-18	-	1.E-18	-
Summe W_j		0,0010		1,38		2,65

Diese Werte und die oben aufgeführten Gleichungen erlauben folgende Schlussfolgerungen:

Sofern die Abdichtungen nicht durch Korrosion ihre Abdichtwirkung verlieren, setzen gegenläufige Lösungsbewegungen aufgrund von Dichteunterschieden erst bei extrem geringen Gesamtauspressraten ein, für die Referenzfallpermeabilitäten von 10^{-18} m^2 erst bei $Q_{\text{tot}} = 0,001 \text{ m}^3/\text{a}$. Bei einer Auspressrate von $1 \text{ m}^3/\text{a}$ müssen die Permeabilitäten der Abdichtungen den Wert von $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ erreichen, damit bei maximalem Dichteunterschied gegenläufige Lösungsbewegungen stattfinden, bei geringerem Dichteunterschied muss die Permeabilität umgekehrt proportional höher sein.

Sofern eine oder mehrere Abdichtungen des Abdichtsystems durchgehend korrodiert sind, tritt MgCl_2 -Lösung in den Einlagerungsbereich zu, und der treibende Dichteunterschied verringert sich. Die folgenden Angaben sind somit Extremfallbetrachtungen, da sie unverändert auf einem unterstellten maximalen Dichteunterschied von 90 kg/m^3 beruhen.

Sofern nur die kürzeste Abdichtung (15YKA24R001) auf der 332 m Sohle durch Zementkorrosion hoch durchlässig wird, setzt eine gegenläufige Lösungsbewegung bereits bei Auspressraten unterhalb von rund $1,4 \text{ m}^3/\text{a}$ ein. Die Auswertung der Gleichungen (K-7) und (K-8) ergibt jedoch, dass die dabei zutretende Lösungsmenge derart klein ist, dass der Gesamtfluss aus dem Einlagerungsbereich auch für geringe Werte von Q_{tot} von $0,1 \text{ m}^3/\text{a}$ nur im Promillebereich ansteigt. Die Lösungsbewegung aus dem Einlagerungsbereich wird in diesem Fall auf die Abdichtung mit erhöhter Permeabilität konzentriert, wodurch sich die Transportzeit verkürzt. Dieser Kanalisierungseffekt wird im Rechenmodell durch die Variation des Fließquerschnittes abgedeckt.

Sobald eine Abdichtung durchgehend korrodiert ist und dadurch durchlässig wird, fällt die Druckdifferenz entlang allen Abdichtungen auf geringe Werte ab. Ab diesem Zeitpunkt fehlt der Antrieb für die Korrosion der übrigen Abdichtungen weitgehend. Der Fall von mehreren durchgehend korrodierten Abdichtungen ist somit sehr unwahrscheinlich. Tritt er dennoch ein, können allerdings gegenläufige Lösungsbewegungen in nennenswertem Ausmaß einsetzen. In der Tabelle K-1 sind die W-Werte für zwei Fälle angegeben. In einem Fall ist zusätzlich zur kürzesten Abdichtung auf der



332 m-Sohle (15YKA24R001) auch die gleich lange Abdichtung auf der 372 m-Sohle korrodiert. Da letztere die unterste Abdichtung ist, ändert sich der summierte W-Wert nicht, d.h. eine gegenläufige Lösungsbewegung setzt ebenfalls bei Auspressraten unterhalb von rund $1,4 \text{ m}^3/\text{a}$ ein. Im Gegensatz zum oben beschriebenen Fall sind die Fließraten allerdings deutlich größer, sie liegen bei geringen Auspressraten Q_{tot} und maximalem Dichteunterschied bei ungefähr $0,8 \text{ m}^3/\text{a}$.

Falls zusätzlich zu den beiden relativ kurzen Abdichtungen auf der 332 m und der 372 m Sohle auch die 38 m lange Abdichtung auf der 291 m Sohle eine stark erhöhte Permeabilität aufweist, ist der summierte W-Wert $2,65 \text{ m}^3/\text{a}$. Gegenläufige Lösungsbewegung setzt in diesem Fall und bei maximalem Dichteunterschied unterhalb eines Wertes von gut $Q_{\text{tot}} = 2,6 \text{ m}^3/\text{a}$ ein. Wie oben begründet, ist das vollständige Korrodieren von mehreren Abdichtungen sehr unwahrscheinlich.

In Tabelle K-2 sind die Abflussraten aus dem Einlagerungsbereich (Summe aus Q_{tot} und Zutrittsrate über die unteren Abdichtungen) für verschiedene Werte von Q_{tot} und des Dichteunterschieds für den Fall aufgeführt, dass die beiden 26 m langen Abdichtungen vollständig korrodiert sind. Außer bei großen Dichteunterschieden und geringen Werten von Q_{tot} bleiben die Lösungszutrittsrate und damit auch die dichtebedingte Erhöhung der Auspressrate beschränkt. Eine durch Dichteeffekte relevante Erhöhung des Lösungsaustritts gegenüber den Modellrechnungen setzt somit zusätzlich zur Korrosion mehrerer Abdichtungen auch die höchst unwahrscheinliche Kombination von großem Dichteunterschied (möglich zu frühen Zeiten) und niedriger Auspressrate (typisch für späte Zeiten) voraus.

Tabelle K-2: Rate des Lösungsaustrittes aus dem ELB WSF aufgrund von dichtebedingten gegenläufigen Lösungsbewegungen für den Fall erhöhter Permeabilität der Abdichtungen 15YKA24R001 (332 m Sohle) und 17YEQ01 (372 m Sohle)

Brutto-Auspressrate Q_{tot} [m^3/a]	Austrittsrate aus Einlagerungsbereich [m^3/a]	
	$\Delta\rho_D = 90 \text{ kg}/\text{m}^3$ (Maximalwert) ($\Sigma W_j = 1,4 \text{ m}^3/\text{a}$)	$\Delta\rho_D = 9,0 \text{ kg}/\text{m}^3$ ($\Sigma W_j = 0,14 \text{ m}^3/\text{a}$)
1	1,2	1 (kein Lösungszutritt)
0,1	0,85	0,12

Unter Berücksichtigung des Umstandes, dass die durchgehende Korrosion gleich mehrerer Abdichtungen wenig wahrscheinlich ist, sehr niedrige Brutto-Auspressraten Q_{tot} erst nach langen Zeiten auftreten und zu diesen Zeiten große Dichteunterschiede als äußerst unwahrscheinlich außer Betracht gelassen werden können, folgt aus diesen Ergebnissen, dass dichtebedingte gegenläufige Lösungsbewegungen bei mehreren Abdichtungen die Lösungsaustrittsrate höchstens in vernachlässigbarem Ausmaß beeinflussen.

Beim ELB OF sind die Auswirkungen von Dichteunterschieden weniger ausgeprägt, da die vertikale Ausdehnung etwas geringer und die beiden Abdichtungen länger sind. Die dichtegetriebene Zirkulationsbewegung bei maximalem Dichteunterschied und einer Permeabilität beider Abdichtungen von 10^{-14} m^2 beträgt rund $0,3 \text{ m}^3/\text{a}$.



Sofern die schwerere Lösung im Einlagerungsbereich und die leichtere Lösung in der übrigen Grube anstehen, sind die Verhältnisse ähnlich und die Schlussfolgerungen die gleichen.

K.3.4 Auswirkungen während der Auspressphase (Gas-/Lösungsflüsse)

In diesem Kapitel werden die Strömungsverhältnisse in den Abdichtungen des ELB WSF diskutiert, die sich als Folge des Gaspolsters im Einlagerungsbereich einstellen können. Insbesondere soll untersucht werden, unter welchen Bedingungen es in der Auspressphase zu einem Abfluss von Gas und einem gleichzeitigen Zutritt von Lösung kommen kann. Ein solcher Prozess würde im Vergleich zu den Modellrechnungen die Radionuklidaustragung jedoch nicht verstärken, sondern die Phase des Lösungszutritts ausdehnen oder sogar eine zweite, späte Phase eines erneuten Lösungszutritts auslösen.

Für die quantitative Analyse wird angenommen, dass der Lösungspegel knapp über der 3. Sohle (-332 mNN) steht und die Gassättigung in den Abdichtungen der 2. und 1. Sohle durch Gasauspressung bereits auf einen stationären Wert angestiegen ist. Die Lösungsdichten im Einlagerungsbereich und in der übrigen Grube seien gleich.

Die W-Werte der Abdichtungen für diese Lage des Lösungspegels sind in Tabelle K-3 aufgeführt. Sie wurden mit dem Wert für die dynamische Viskosität von Gas von $1 \cdot 10^{-5}$ Pa·s für alle Abdichtungen der 1. und 2. Sohle berechnet. Da die 3. Sohle unterhalb des Lösungspegels liegt und die Lösungsdichte im ELB und außerhalb gleich ist, sind die W-Werte der Abdichtungen auf der 3. Sohle null.

Tabelle K-3: W-Werte der Abdichtungen des ELB WSF für verschiedene Permeabilitäten der einzelnen Abdichtungen bei maximalem Dichteunterschied, dem Lösungspegel im ELB WSF unmittelbar über der 3. Sohle und Gasfluss in den Abdichtungen der 1. und 2. Sohle

	K [m ²]	W-Wert [m ³ /a]	K [m ²]	W-Wert [m ³ /a]	K [m ²]	W-Wert [m ³ /a]
Sohle 253 m	1.E-18	2,0282	1.E-18	2,0282	1.E-18	2,0282
12YKA24R001	1.E-18	0,4280	1.E-16	42,8	1.E-14	4'280
Übrige 291 m Sohle	1.E-18	1,0481	1.E-18	1,0481	1.E-18	1,0481
15YKA24R001	1.E-18	0,0000	1.E-18	0,0000	1.E-14	0,0000
Übrige 332 m Sohle	1.E-18	0,0000	1.E-18	0,0000	1.E-18	0,0000
17YEQ01	1.E-14	-	1.E-14	-	1.E-14	-
Übrige 372 m Sohle	1.E-18	-	1.E-18	-	1.E-18	-
Summe W_j		3,5		46		4'280

Sofern die Abdichtungen auf der 1. und 2. Sohle keine erhöhte Permeabilität, sondern den Referenz-Anfangswert von 10^{-18} m² aufweisen, beträgt der W-Wert 3,5 m³/a: Ein Lösungszutritt setzt ein, sobald die Auspressrate Q_{tot} unter diesen Wert abfällt. Mit abnehmendem Wert von Q_{tot} nimmt die Lösungszutrittsrate zu, übersteigt aber auch bei sehr kleinem Q_{tot} und einer vollständig korrodierten Abdichtung 17YEQ01 den Wert von 3,2 m³/a nicht. Lösung tritt nicht aus dem Einlagerungsbereich aus. Solange alle Abdichtungen die Referenz-Permeabilität aufweisen, überschreitet die Lösungszutrittsrate bei keinem Q_{tot} den geringen Wert von 0,02 m³/a.



Steigt der Gasdruck im Einlagerungsbereich zu Beginn der Zutrittsphase ausreichend langsam an, dass zusätzlich auch die relativ kurze Abdichtung auf der 2. Sohle (12YKA24R001) durch zutretende Mg-haltige Lösung weitgehend oder vollständig korrodiert werden kann und eine erhöhte Permeabilität aufweist, ist auch bei höheren Brutto-Auspressraten, also noch während der nennenswerten Gasbildung ein Austreten von Gas und gleichzeitiges Zutreten von Lösung möglich: Bei einer Permeabilität der Abdichtung 12YKA24R001 von 10^{-16} m^2 setzt der Zutritt von Lösung beim Unterschreiten einer Auspressrate Q_{tot} von etwa $46 \text{ m}^3/\text{a}$ ein. Mit sinkender Auspressrate und bei korrodiertem Abdichtung auf der 4. Sohle steigt die Rate des Lösungszutritts in diesem Fall bis auf $16 \text{ m}^3/\text{a}$ an. Sofern die Permeabilität der Abdichtung auf der 2. Sohle den Wert von 10^{-14} m^2 erreicht, ist der W-Wert sehr groß und ein Lösungszutritt erfolgt auch bei hoher Gasbildungsrate und Konvergenz, d.h. bei großem Q_{tot} (vgl. Tabelle K-3). Der maximale Lösungszutritt ist bei vollständiger Korrosion der beiden 26 m langen Abdichtungen allerdings nicht wesentlich größer, er beträgt maximal etwa $40 \text{ m}^3/\text{a}$.

Im Sinne der Bewegung von Lösung entspricht ein solcher Zustand nicht einer Auspress- sondern einer Zutrittsphase: Salzlösung tritt zu, während Gas austritt. Voraussetzung ist, wie eingangs erwähnt, dass die Abdichtungen im Teufenbereich des Gaspolsters durch Auspressen von Gas eine ausreichend hohe Gassättigung erreicht haben, d.h. dass zuvor der Gaseindringdruck der Abdichtungen überwunden wurde. Unter welchen Umständen dies bereits während der anfänglichen Zutrittsphase eintreten kann oder ob dieser Zustand erst nach einer gewissen Überdruckphase im Einlagerungsbereich erreicht wird, während der sowohl Gas als auch Lösung ausgepresst werden, kann nur eine detailliertere 2-Phasen-Modellierung unter Verwendung von zahlreichen Annahmen zu den herrschenden Verhältnissen klären. Das hier als Möglichkeit aufgezeigte Eintreten einer zweiten Zutrittsphase nach einer ersten Auspressphase wird bei der Analyse der Langzeitsicherheit mit dem vereinfachenden Rechenmodell durch den Fall „mit Gaspolster“ für den ersten Zyklus, und durch den Fall „ohne Gaspolster“ – zeitlich vorgezogen – für den zweiten Zyklus abgedeckt.

Gleichzeitige gegenläufige Gas- und Lösungsbewegungen entlang der Abdichtungen werden mit dem vereinfachenden Rechenmodell zwar nicht explizit nachgebildet, mit den beiden Fällen "mit Gaspolster" und "ohne Gaspolster" und mit den Parametervariationen jedoch ausreichend berücksichtigt.



Anhang L Korrosion von Abdichtbauwerken durch Grubenlösung

L.1 Einleitung

Die Baustoffe, aus denen die Abdichtungen der Einlagerungsbereiche erstellt werden, sind gegenüber den sich in der Grube potentiell einstellenden Lösungen chemisch nicht stabil: Salzbeton reagiert mit magnesiumhaltigen Lösungen. Dabei werden die festigkeitsbildenden CSH-Phasen zerstört, Calcium geht in Lösung und magnesiumhaltige Phasen werden ausgefällt. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass dabei die Druckfestigkeit des Salzbetons verlorengeht und die Permeabilität nach ausreichend langer Durchströmung um Größenordnungen ansteigt [GRS 2003a]. Umgekehrt wird Magnesiabeton von Lösungen angegriffen, deren Magnesiumgehalt unter einem kritischen Wert liegt. Dann geben die festigkeitsbildenden Sorelphasen Magnesium in die Lösung ab. Dabei entsteht Brucit, was mit einer deutlichen Zunahme der Porosität verbunden ist und daher gleichfalls einen signifikanten Permeabilitätsanstieg erwarten lässt.

Über die Zusammensetzung der Lösungen, welche sich tatsächlich in der Grube vor den Abdichtungen einstellen werden, kann nur ausgesagt werden, dass sie an NaCl gesättigt sein werden und durch Lösungsprozesse an den Kalilagern auch Mg enthalten können. Wie hoch der Magnesiumgehalt schließlich sein wird, hängt u.a. von der Zugänglichkeit der Kalilager sowie von der diffusionskontrollierten Reaktion der dabei zunächst entstehenden Lösung mit dem Salzbeton der Versatzkörper ab. Daher kann nur prognostiziert werden, dass sich eine Mg-Konzentration zwischen 0 und 3,707 mol/l einstellen wird (vgl. Anhang H). Letzteres ist der Wert von IP21-Lösung.

Deshalb ist es nicht möglich, zwischen diesen beiden Baustoffen denjenigen auszuwählen, der mit Sicherheit von der Grubenlösung nicht angegriffen werden wird. Aus Sicht der Langzeitsicherheit darf die chemische Inkompatibilität zwischen Baustoff und Grubenlösung dennoch in Kauf genommen werden, sofern durch ausreichend niedrige Permeabilitätswerte und Diffusionskonstanten, große räumliche Mächtigkeiten der Bauwerke und die sonstigen Gegebenheiten die Standzeiten der Abdichtungen so lang sind, dass die sicherheitsrelevanten Prozesse, insbesondere die Gasbildung während der Zutrittsphase weitgehend abklingen.

In den folgenden Kapiteln L.2 und L.3 wird auf der Grundlage von Experimenten und geochemischen Modellrechnungen die Stöchiometrie der beiden Reaktionen festgestellt und daraus die volumetrische Umlösekapazität für die Korrosion abgeleitet. In Kapitel L.4 wird mit Hilfe eines zylindersymmetrischen Korrosionsmodells der Einfluss einer Auflockerungszone um die Abdichtung auf die Korrosion des Bauwerks dargestellt.

L.2 Korrosion von Salzbeton mit IP21-Lösung

Zur Stöchiometrie der chemischen Reaktion von Salzbeton mit IP21-Lösungen liegen verschiedene experimentelle Arbeiten sowie geochemische Modellrechnungen vor. In [GRS 2003a] wurden dazu Kaskadenversuche an aufgemahlene Proben sowie Einfach- und Mehrfachdurchströmungsversuche am Festkörper durchgeführt. Aus technischen Gründen wurden sämtliche Experimente nicht mit dem Baustoff der Originalrezeptur M2, aus welchem im ERAM die Abdichtungs-



bauwerke erstellt werden sollen, sondern mit einem Material der abgewandelten Rezeptur M2-4 durchgeführt. Dieses hat im Vergleich zu M2 einen geringeren Binder- und einen größeren Salzan- teil (Tabelle L-1), was zu einer deutlich höheren Permeabilität führt. Dadurch wurden Durchströ- mungsversuche unter Laborbedingungen erst möglich.

Tabelle L-1: Mischungszusammensetzung der Rezepturen M2 und M2-4

Bestandteil	M2	M2-4
	[kg/m ³]	[kg/m ³]
Salzzuschlag	1072	1380
CEM III/B 32,5 NW/HS	328	148
Steinkohlenflugasche	328	148
Wasser	267	267

Bei den Kaskadenversuchen wurde IP21-Lösung mit gemahlenem Salzbeton versetzt, die Reakti- onslösung nach ca. 3 Tagen filtriert, analysiert und dann erneut mit frischem Feststoff versetzt. Da sich bei jeder Kaskade das Volumen des Eluats verringert, konnte die Versuchsreihe nicht bis zum völligen Verbrauch des Magnesiums aus der Lösung durchgeführt werden. Extrapolation ergibt, dass bei einem Feststoff-/Lösungsverhältnis von etwa 8 kg/kg Lösung bzw. 12 kg/kg H₂O alles Magnesium aus der IP21-Lösung umgesetzt wäre. Mit einem Wassergehalt der Lösung von 0,873 kg/l, einer Dichte des M2-4 von 1,95 kg/l und einer Porosität von 20% ergibt sich eine volu- metrische Umlösekapazität von 4,45 m³/m³, bezogen auf das Volumen der reinen Festphase. Wie aus Tabelle L-1 ersichtlich, enthält der Salzbeton M2 die 2,2-fache Menge an Zement und Stein- kohlenflugasche wie M2-4. Setzt man einen linearen Zusammenhang zwischen Bindergehalt und Umlösekapazität voraus, dann ergibt sich für den Salzbeton M2 ein Feststoff-Lösungsverhältnis von 5,6 kg/kg H₂O, woraus ein Wert für die volumetrische Umlösekapazität $\kappa_L = 2 \text{ m}^3/\text{m}^3$, bezogen auf die reine Festphase, resultiert.

Die Mehrfachdurchströmungsversuche wurden an Probenkörpern mit einer Länge von 10 cm durchgeführt. In der Anfangsphase der Durchströmung mit IP21-Lösung nahm die Permeabilität des Salzbetons ab und erreichte nach drei Porenaustauschzyklen ein Minimum, das um etwa eine Größenordnung unterhalb des Anfangswerts lag. Mit fortschreitender Durchströmung nahm die Permeabilität wieder zu. Nach mehr als 20 Zyklen wurde der Wert der Anfangspermeabilität über- schritten, und ab etwa 25 Austauschzyklen setzte eine progressive Permeabilitätszunahme ein, die zum Schluss des Experiments, nach 34 Zyklen, etwa zwei Größenordnungen betrug. Diesen Zah- len kann die Stöchiometrie der Reaktion allerdings nicht unmittelbar entnommen werden, da die ausgepresste Lösung bereits nach dem ersten Austauschzyklus Magnesium in signifikanter Kon- zentration enthält, wie die chemische Analyse zeigt. Dies deutet auf eine ungleichmäßige Durch- strömung des Probenkörpers und/oder unvollständige Umsetzung während der Durchströmung hin. Aus der Magnesiumbilanz lässt sich näherungsweise berechnen, welches Volumen an IP21- Lösung benötigt würde, wenn die Umsetzung quantitativ wäre. Daraus resultiert eine volumetrische Umlösekapazität für M2-4 im Bereich zwischen 2,8 m³/m³ und 4,6 m³/m³, Umrechnung für die Re- zeptur von M2 ergibt einen Wert zwischen 1,3 m³/m³ und 2,1 m³/m³.

Die Ergebnisse der Kaskadenversuche werden durch geochemische Modellrechnungen bestätigt [GRS 2009]. Dabei ist es für die hier untersuchte Reaktion besonders wichtig, dass für den ther-



mododynamischen Datensatz des Modells die richtigen Phasen ausgewählt werden. Die thermodynamisch stabilsten Phasen wie Tobermorit als Repräsentant der CSH-Phasen oder Sepiolith, Talk und Chrysotil als Repräsentanten der Magnesium-Silikat-Hydrat-Phasen („MSH“) sind zwar gut charakterisiert und daher üblicherweise in den Modelldatensätzen enthalten. Sie bilden sich aber nachweislich erst bei Temperaturen deutlich oberhalb 100°C, was unter den Bedingungen des ERAM ausgeschlossen werden kann. Die Modellierung auf Basis dieser Daten ergibt, dass als MSH-Phase bevorzugt Serpentin (Verhältnis Magnesium zu Silizium wie 3:2) gebildet wird.

Stattdessen werden jedoch nanokristalline, hydrathaltige Phasen entstehen, die weniger gut charakterisierbar sind und für die es erst in der neueren Literatur einzelne Arbeiten mit thermodynamischen Daten gibt [Stoessel 1988], [Gunnarsson 2005]. Experimentelle Arbeiten zur Zementkorrosion haben gezeigt, dass bei der Reaktion von Silikaten mit magnesiumhaltiger Lösung MSH-Phasen mit einem Mg:Si-Verhältnis im Bereich 0,66 – 0,96 (frische Proben) bzw. 0,84 – 0,94 (bei 85°C während 6 Monaten gealterte Proben) entstehen, auch wenn die Ausgangsstoffe in Mengenverhältnissen weit außerhalb dieses Bereichs eingesetzt wurden [Brew & Glasser 2005]. Dieses Mg:Si-Verhältnis entspricht am ehesten dem von „Kerolit“ (2:3), der hydrathaltigen Phase von Talk. Sensitivitätsstudien bei den geochemischen Modellrechnungen haben ergeben, dass das System empfindlich auf eine Variation der Gleichgewichtskonstanten reagiert: Wenn der logK-Wert der hydrathaltigen Serpentinphase, in der Literatur auch als „Antigorit“ bezeichnet, erhöht wird, entsteht neben Antigorit auch Kerolit. Bei einer Erhöhung des logK-Werts von Antigorit um 1,5 ist nur noch der Kerolit relevant. Aus diesem Grund wird für die Modellierung des Referenzfalls die Bildung von Antigorit unterdrückt. In der Unsicherheitsanalyse wird zunächst ebenfalls auf diese Phase verzichtet.

In Abbildung L-1 ist das Ergebnis der geochemischen Modellierung des Referenzfalls [GRS 2009] dargestellt. Das Diagramm ist von rechts nach links zu lesen, dann beschreibt es den Reaktionsfortschritt wie unter realen Bedingungen: Die Korrosion von Salzbeton mit IP21-Lösung beginnt mit reiner Festphase, also einem unendlich großen Feststoff/Lösungsverhältnis z_i . Dieses wird mit zutretender Lösung immer kleiner. Bei Feststoff-Lösungsverhältnissen $z_i < 5,6$ verschwindet die CSH-Phase vollständig. Dieser Wert stimmt exakt mit den Ergebnissen der Kaskadenversuche [GRS 2009] überein, wenn der unterschiedliche Bindergehalt von M2 und M2-4, wie oben beschrieben, berücksichtigt wird. Bei noch kleineren z_i entsteht zunächst Brucit, später auch Magnesiumoxichlorid, also eine Sorelphase. Diese beiden Phasen werden bei der Korrosion von Salzbeton auch experimentell beobachtet. Ihre Bildung ist mit einer starken Volumenzunahme der Festphase verbunden, was die intermediäre Permeabilitätsabnahme bei den Durchströmungsversuchen [GRS 2003a] erklärt. Wenn sie sich unter der Bildung von MSH-Phasen wieder auflösen, nimmt das Volumen der Festphase wieder ab und die Permeabilität nimmt zu.



R7d mit Kerolit, ohne Chrysotil, ohne Talk, ohne Tobermorit

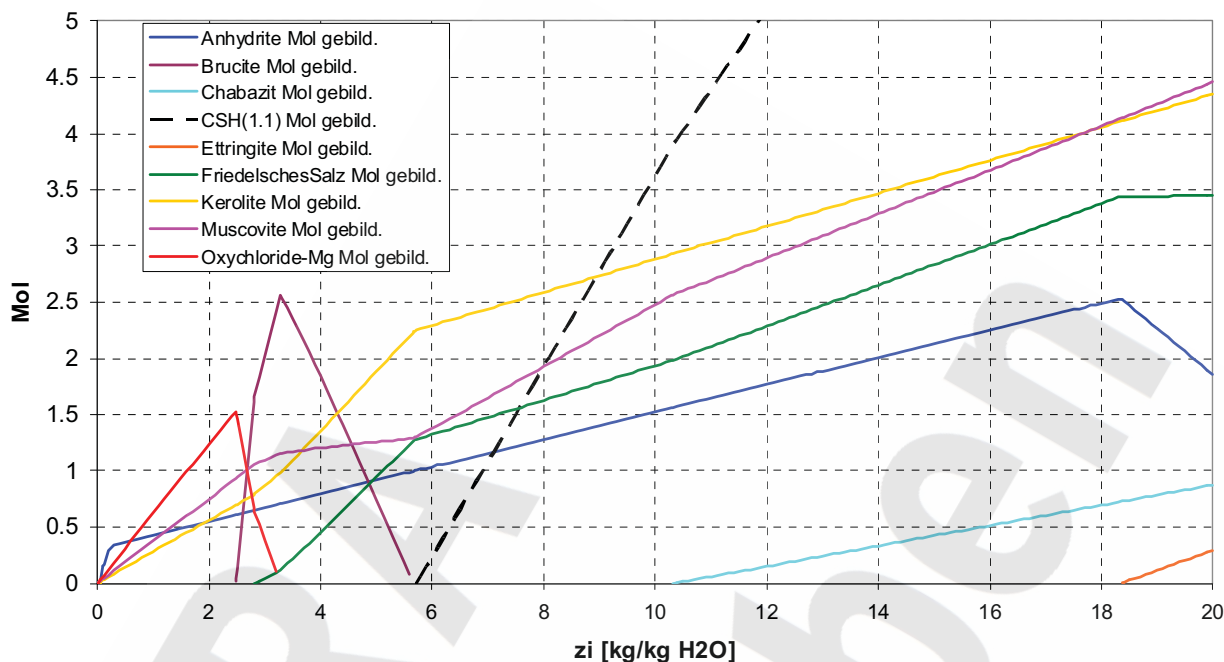


Abbildung L-1: Phasendiagramm für die geochemische Modellierung der Korrosion von Salzbeton M2 mit IP21-Lösung; Serpentinphasen (Chrysotil, Antigorit) unterdrückt (nach [GRS 2009]); aufgetragen ist der Phasenbestand in Abhängigkeit des Reaktionsfortschritts z_i

Würde statt Kerolit ein Serpentin, beispielsweise Antigorit, gebildet, dann wäre das Mg:Si-Verhältnis in der MSH-Phase doppelt so hoch wie im Kerolit. Für die Korrosion derselben Menge M2 würde in diesem Fall die doppelte Menge an IP21-Lösung benötigt, d.h. die volumetrische Umlösekapazität κ_L hätte den Wert von $1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ statt von $2 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Aus diesem Grund ergeben sich aus der Unsicherheitsanalyse der geochemischen Modellierung, in welcher Antigorit zugelassen und sein $\log K$ -Wert variiert wird, auch Umlösekapazitäten $< 2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ [GRS 2009]. Eine andere Quelle für Ungewissheiten ist die chemische Zusammensetzung des Salzbetons, die je nach Herkunft der Komponenten Zement und Flugasche variieren können. Ein hoher Aluminiumgehalt der Flugasche beispielsweise führt zu einem relativ „sauen“ Salzbeton, der durch IP21-Lösung stärker angegriffen wird. Durch spezifische Anforderungen an die chemische Zusammensetzung der Komponenten des Salzbetons kann die Umlösekapazität nach oben begrenzt werden

Aufgrund dieser Überlegungen und der Ergebnisse von [GRS 2009] wurde die Bandbreite der volumetrischen Umlösekapazität von IP21-Lösung an Salzbeton festgelegt: Der Referenzwert $\kappa_L = 2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ist durch die Kaskadenversuche und den Referenzfall der geochemischen Modellrechnungen gut abgesichert. Die untere Bandbreite von $\kappa_L = 1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ergibt sich, falls nicht Kerolit, sondern ein Serpentin als MSH-Phase gebildet wird. Höhere Umlösekapazitäten als $2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ können auftreten, wenn die Zusammensetzung der Komponenten des Salzbetons nicht basisch genug ist. In den Anforderungen an Salzbeton als Baustoff für Abdichtungsbauwerke im Steinsalz wurde die Umlösekapazität auf $\kappa_L \leq 3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ begrenzt [DBE 2009]. Dieser Wert wird gemäß den Ergeb-

nissen der geochemischen Modellierung eingehalten, wenn das Massenverhältnis $(Al_2O_3+MgO)/(CaO+SiO_2)$ im Salzbeton auf maximal 2,32 beschränkt wird [GRS 2009].

L.3 Korrosion von Magnesiabeton mit NaCl-Lösung

Die Abdichtung des Ostquerschlags auf der 4. Sohle zwischen Kalilager E und Ostfeld, welcher durch den Hauptanhydrit führt, wird aus dem Magnesiabeton DBM2 erstellt. Die Rezeptur dieses Baustoffs ist in Tabelle L-2 und Tabelle L-3 zusammengestellt:

Tabelle L-2: Ausgangszusammensetzung des Magnesiabetons DBM2 in Ma-% und mol/100 g gemäß [Voigt 2008]

Ausgangsmaterialien	Zusammensetzung in	
	Massen-%	mol/100g
MgO	10,00	0,2481
Quarzsand	34,79	0,5790
Anhydrit	29,72	0,2183
Microsilica	4,57	0,0761
S30-Lösung	20,58	
Woerment BV 787	0,34	

Tabelle L-3: Zusammensetzung der $MgCl_2$ -Sole S30 von der DEUSA International GmbH gemäß [Voigt 2008]

Konzentration in	Bestandteile					
	$MgCl_2$	$MgSO_4$	$NaCl$	KCl	$CaSO_4$	H_2O
g/L	371,9	27,1	4,2	0,7	0,1	891
mol/L	3,906	0,225	$7,2 \cdot 10^{-2}$	$9,4 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-4}$	49,458
mol/kg H_2O	4,3838	0,252	$8,1 \cdot 10^{-2}$	$10,5 \cdot 10^{-3}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$	55,508
$\rho_{25^\circ C} = 1295 \text{ kg/m}^3$ $\mu = 6,85 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ $pH = 5,3$						

Es kann davon ausgegangen werden, dass das MgO und die Microsilica-Suspension beim Abbinden schnell miteinander reagieren, wobei MSH-Phasen und Brucit gebildet werden [Wie 2006]. Dagegen wurde bei der geochemischen Modellierung des Abbindens in [Voigt 2008] der Quarz als inert angesetzt, da angenommen wurde, dass für nennenswerte Umsätze des Quarzsands zu Magnesiumsilicaten die Gebirgstemperatur zu gering und der Zeitraum von 30'000 Jahren zu kurz



sind. Die Berechnung mit dem Programm CHEMSAGE bei 25 °C auf der Grundlage einer modifizierten Datenbasis von [Harvie et al. 1984] ergab die in Tabelle L-4 dargestellte Zusammensetzung des abgebundenen Baustoffs.

Tabelle L-4: Zusammensetzung des abgebundenen Baustoffs DBM2 als Ergebnis der Modellierung mit CHEMSAGE gemäß [Voigt 2008]

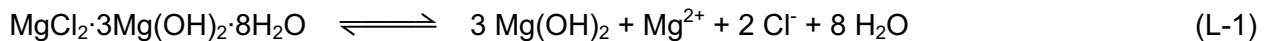
Komponenten	Ausgangsmaterial in g	Produkt nach Abbinden in g
Wasser(H ₂ O)	141,6	39,05
MgO	100	-
Anhydrit	297,2	297,2
Quarz	347	347
SiO ₂ (AQU)	45,7	2·10 ⁻⁹
Mg ²⁺	15,96	4,61
Ca ²⁺	-	1·10 ⁻³
Cl ⁻	44,01	12,35
SO ₄ ²⁻	3,44	1,51
3-1-8-Phase (Sorelphase)	-	184,97
Serpentin	-	105,44
Kieserit	-	2,78
Lösung	205,01	57,52
Feststoff	789,9	937,39
Gesamtsumme	994,91	994,91

Die Phasenanalyse der experimentell hergestellten Proben mittels Pulverdiffraktometrie (PXRD) ergab, dass ausschließlich die 3-1-8-Sorelphase gebildet wurde, nicht dagegen die metastabile 5-1-8-Phase [Voigt 2008]. Weiterhin ergab das Röntgendiffraktogramm Hinweise auf ein Magnesiumschichtsilicat, entweder Serpentin oder Talk. Wegen der geringen Größe des Reflexes war eine genauere Zuordnung nicht möglich.

Die Festigkeit des Magnesiabetons wird durch die Sorelphase hervorgerufen. Diese ist allerdings nur stabil, wenn der Magnesiumgehalt der Porenlösung hoch genug ist. Andernfalls zersetzt sie sich – unter Umkehrung ihrer Bildungsreaktion – in Brucit und gelöstes Magnesiumchlorid. Für die 3-1-8-Sorelphase⁷² lautet diese Reaktionsgleichung:

⁷² Der Name ist auf die stöchiometrische Zusammensetzung – 3Mg(OH)₂·MgCl₂·8H₂O – zurückzuführen.





Mit geochemischer Modellierung auf Grundlage des derzeit allgemein akzeptierten Datensatzes von [Harvie et al. 1984] wurde die Konzentration an MgCl_2 in Lösung berechnet, die sich bei NaCl-Sättigung im Gleichgewicht mit der 3-1-8-Sorelphase und Brucit einstellt. Das Ergebnis beträgt $0,51 \text{ mol Mg}^{2+}/\text{kg H}_2\text{O}$ und stimmt gut mit dem in [Voigt 2008] angegebenen Wert von $0,5 \text{ mol Mg}^{2+}/\text{kg H}_2\text{O}$ überein.

Für die Verwendung in der Langzeitsicherheitsanalyse muss dieser Wert noch in die übliche Konzentrationseinheit, mol/l, umgerechnet werden. Der Wassergehalt der an NaCl gesättigten Lösung mit MgCl_2 in der Gleichgewichtskonzentration beträgt gemäß derselben geochemischen Modellierung ca. $0,74 \text{ kg H}_2\text{O}/\text{kg Lösung}$, und mit dem Pitzer-Ansatz zur Dichteberechnung nach [Krumgalz 1995] ergibt sich eine Dichte von ca. $1,2 \text{ kg/l}$. Auf dieser Basis ergibt sich umgerechnet ein Magnesiumgehalt von $0,453 \text{ mol/l}$. Dies sind $12,2\%$ der Magnesiumkonzentration von IP21-Lösung ($3,707 \text{ mol/l}$).

Mit diesem Wert und der in Tabelle L-4 angegebenen Zusammensetzung des Magnesiabetons kann das Feststoff-/Lösungsverhältnis für eine vollständige Korrosion des Baustoffs auf einfache Weise berechnet werden. Der grundlegende Ansatz ist, dass beim Zutritt von NaCl-gesättigter, Mg-freier Lösung in den Porenraum des Magnesiabetons gerade so viel Sorelphase gemäß Gleichung (L-1) zersetzt wird, bis die Mg-Konzentration in der Lösung den Gleichgewichtswert von $0,453 \text{ mol/l}$ erreicht hat:

Der Baustoff Magnesiabeton enthält gemäß Tabelle L-4 $184,97 \text{ g}$ 3-1-8-Phase in $937,39 \text{ g}$ Festphase, das entspricht $197,32 \text{ g/kg}$ bzw. $0,4763 \text{ mol}$ 3-1-8-Phase pro kg Feststoff im Magnesiabeton. Die experimentell bestimmte Rohdichte des Magnesiabetons beträgt $2,17 \text{ g/cm}^3$, die Porenraumsättigung mit der nach dem Abbinden verbleibenden Lösung $77,7\%$ und die Porosität $18,7\%$ [K-UTEC 2008]. Mit der in [Voigt 2008] angegebenen Lösungsdichte von ca. $1,3 \text{ g/cm}^3$ sind das $0,1889 \text{ g}$ Lösung pro cm^3 Magnesiabeton, womit ein Feststoffgehalt von $1,981 \text{ g/cm}^3$ übrigbleibt. Der reale Baustoff enthält somit $0,944 \text{ mol/l}$ 3-1-8-Phase. Da 1 mol 3-1-8-Phase hydrolytisch 1 mol MgCl_2 freizusetzen vermag, ergibt sich für die Reaktion von NaCl-Lösung an Magnesiabeton eine volumetrische Umlösekapazität κ_M von $0,480 \text{ m}^3[\text{Feststoff}]/\text{m}^3[\text{Lösung}]^{73}$ als Quotient der beiden Konzentrationen $0,453 \text{ mol/l}$ und $0,944 \text{ mol/l}$.

Enthält die Lösung, welche in das Bauwerk eindringt, bereits Magnesium, allerdings unterhalb der Gleichgewichtskonzentration, dann muss pro Volumen Lösung weniger Sorelphase zersetzt werden, bis der Gleichgewichtszustand erreicht ist. Im Vergleich mit dem Zutritt reiner NaCl-Lösung hält das Bauwerk dementsprechend länger. Liegt die Mg-Konzentration in der zutretenden Lösung oberhalb der Gleichgewichtskonzentration, dann ist das Bauwerk chemisch stabil. Im hypotheti-

⁷³ Der hier abgeleitete Wert von $0,480 \text{ m}^3/\text{m}^3$ für κ_M , die Umlösekapazität von NaCl-Lösung an Magnesiabeton, bezieht sich auf das Gesamtvolumen des Feststoffs inkl. Porosität (auch als „bulk volume“ bezeichnet). Diese Definition erscheint zweckmäßig, da die Porosität des unkorrodierten Baustoffs für die Modellrechnungen des Langzeitsicherheitsnachweises nicht benötigt wird. Im Unterschied dazu ist die Umlösekapazität von IP21-Lösung an Salzbeton, κ_L , auf den „reinen Feststoff“ bezogen, d.h. ohne Porosität [GRS 2009]. Dies muss bei der Berechnung der Anzahl Porenwasserzyklen berücksichtigt werden (vgl. die Unterschiede in den entsprechenden Gleichungen (A-44) und (A-45)).



schen Fall, dass neben der Sorelphase noch Brucit vorliegt, könnte gemäß der Umkehrreaktion von Gleichung (L-1) sogar noch weitere Sorelphase aufgebaut werden.

Die Zersetzung von 3-1-8-Sorelphase zu Brucit ist mit einer Volumenabnahme der Festphase verbunden. Dadurch erhöht sich gemäß den geochemischen Modellrechnungen die Porosität des Baustoffs um ca. 10% [Voigt 2008]. Daraus kann geschlossen werden, dass die Permeabilität des Bauwerks durch diese Reaktion signifikant zunimmt. Durchströmungsversuche mit NaCl-Lösung liegen nicht vor.

Ein weiterer Hauptbestandteil des Magnesiabetons DBM2, ca. 30 Massen-%, ist Anhydrit (Tabelle L-4). Dieser kann gleichfalls herausgelöst werden, falls die zutretende Lösung nicht an CaSO_4 gesättigt ist. Dieser Prozess führt zu einer weiteren Erhöhung der Porosität und somit auch der Permeabilität. Wegen der geringen Löslichkeit des Calciums in Anwesenheit von Sulfat – die Konzentration von Ca^{2+} in IP21-Lösung liegt bei 1 mmol/kg H_2O – ist aber anzunehmen, dass die Grubenlösung an Calcium gesättigt ist und kein Anhydrit in Lösung geht. Selbst im hypothetischen Fall, dass die zutretende Lösung frei von Calcium wäre, würde die Auflösung des Anhydrits im DBM2 aufgrund der niedrigen Löslichkeit erheblich langsamer erfolgen als die Auflösung der Sorelphase. Dieser Prozess ist daher für die Standzeit der Abdichtung nicht relevant und wird nicht berücksichtigt.

L.4 Einfluss einer Auflockerungszone im Hauptanhydrit

Der abzudichtende Ostquerschlag zwischen dem Kalilager E und dem ELB OF auf der 4. Sohle (Ostquerschlag 17YEQ 01) verläuft durch den Hauptanhydrit. Nimmt man an, dass hier im Anhydrit eine Auflockerungszone ausgebildet ist, die eine höhere Permeabilität aufweist als das Abdichtmaterial, dann ist davon auszugehen, dass diese auch über lange Zeiträume hinweg nicht verheilt, da Anhydrit im Unterschied zu Steinsalz nicht plastisch ist. Nach dem Volllaufen der Restgrube wird dann Grubenlösung durch die Auflockerungszone um die Abdichtung in das Ostfeld sickern. Da für die Abdichtung des Ostquerschlags der Baustoff Magnesiabeton gewählt wurde, wird das Bauwerk nur dann von der einsickernden Lösung angegriffen, wenn deren Magnesiumgehalt unter etwa 0,453 mol/l liegt (vgl. Kapitel L.3). Ist letzteres der Fall, dann kann aufgrund des Konzentrationsgradienten Magnesium aus dem Bauwerk in die Auflockerungszone diffundieren, was dazu führt, dass das Bauwerk, zunächst im Randbereich auf der Zustromseite, auch diffusiv angegriffen wird. Dieser Prozess beschleunigt die Korrosion des Bauwerks.

Im Folgenden wird mit einem radialsymmetrischen FE-Modell für reaktiven Transport der Einfluss untersucht, den eine Auflockerungszone auf die Ausbreitung der Korrosionsfront in einem Abdichtbauwerk hat.

L.4.1 Korrosionsmodell

Das konzeptuelle Modell zur Korrosion einer Abdichtung mit Auflockerungszone betrachtet die Abdichtung vereinfachend als zylindersymmetrisches Bauwerk, das von einer ringförmigen Auflockerungszone umgeben ist (Abbildung L-2). Es wird angenommen, dass Abdichtung und Auflockerungszone homogen poröse Medien sind. An der Stirnseite von Abdichtung und Auflockerungszone stehe NaCl-gesättigte Grubenlösung an. Der hydrostatische Druck entspreche dem Niveau der



4. Sohle. Im Einlagerungsbereich herrsche Atmosphärendruck. Die Permeabilität der Auflockerungszone sei konstant, während die Permeabilität des Baustoffs vom Gehalt des Feststoffs an Sorelphase abhängt. Indem die Sorelphase Magnesium in die Porenlösung abgibt und dabei in Brucit übergeht, erhöht sich die Porosität und damit auch die Permeabilität des Bauwerks.

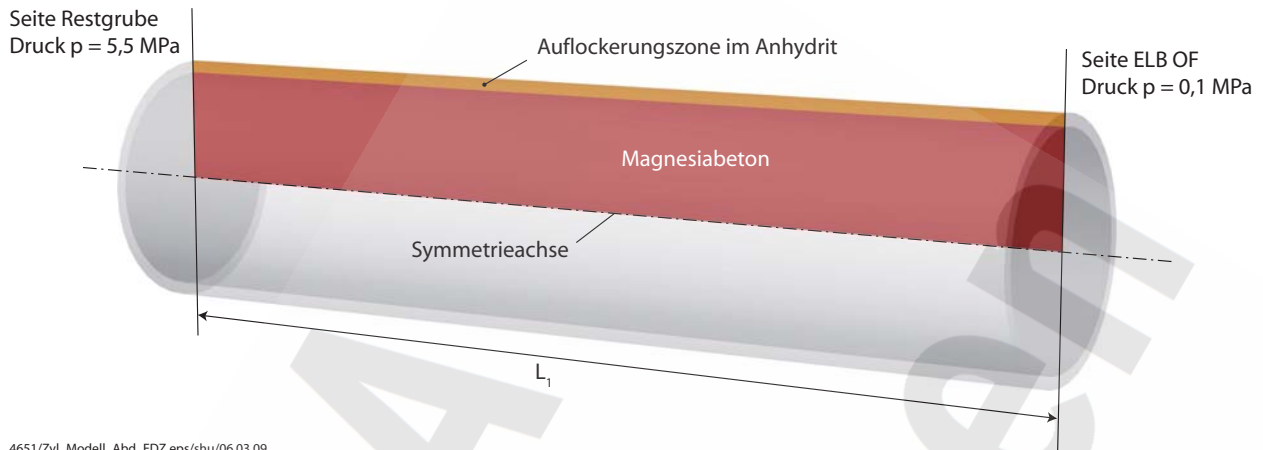


Abbildung L-2: 2D-Modell für die Korrosion eines Abdichtungsbauwerks mit Auflockerungszone im Hauptanhydrit

Die Porositätserhöhung wird im Korrosionsmodell nach der Gleichung

$$\varepsilon_M = \varepsilon_{M,0} + 0,1 \cdot \left(1 - C_s \cdot \frac{\bar{\kappa}_M}{C_E} \right) \quad (\text{L-2})$$

berechnet. Dabei ist

ε_M Porosität des teilweise korrodierten Magnesiabetons; [-]

$\varepsilon_{M,0}$ Porosität des unkorrodierten Magnesiabetons; [-]

$\bar{\kappa}_M$ Volumetrische Umlösekapazität für konzentrierte NaCl-Lösung an Magnesiabeton (reine Festphase, d.h. ohne Porosität); $\bar{\kappa}_M = \kappa_M / \varepsilon_{M,0} = 0,384 \text{ [m}^3/\text{m}^3\text{]}$, vgl. Kap. L.3

C_E Gleichgewichtskonzentration für Magnesium in der Porenlösung von Magnesiabeton bei NaCl-Sättigung und Anwesenheit von 3-1-8-Sorelphase und Brucit, relativ zur IP21-Lösung; 0,122 [-]; vgl. Kap. L.3

C_s Konzentration an eluierbarem Magnesium in der Festphase, relativ zur Mg-Konzentration von IP21-Lösung; $C_s = c_E / \bar{\kappa}_M = 0,318$ für 100% Sorelphase, $C_s = 0$ für 100% Brucit; [-]

Die Porositätserhöhung um 10% bei vollständiger Korrosion des Baustoffs gemäß Gleichung (L-2) entspricht den Ergebnissen der geochemischen Modellierung von Voigt [2008]. Für das Korrosionsmodell wurde ein exponentieller Zusammenhang zwischen Korrosionsfortschritt und Permeabilität gewählt:

$$K_M = K_{1,M} \cdot (K_{3/1,M})^{\left(1 - C_s \cdot \frac{K_M}{C_E}\right)} \quad (L-3)$$

mit

K_M Permeabilität des teilweise korrodierten Magnesiabetons; [m^2]

$K_{1,M}$ Anfangspermeabilität des Magnesiabetons; [m^2]

$K_{3/1,M}$ Permeabilitätserhöhung des Magnesiabetons bei vollständiger Korrosion; [-]

Der exponentielle Ansatz (Gleichung (L-3)) bedeutet für ein $K_{3/1,M}$ von 100, dass sich bei einem Material, welches homogen zu 50% korrodiert ist – wodurch sich nach Gleichung (L-2) die Porosität von 20% auf 25% vergrößert hat –, die Permeabilität um eine Größenordnung erhöht, bei vollständiger Korrosion um zwei Größenordnungen. Das entspricht eher den Erwartungen für eine Porositäts-Permeabilitätsbeziehung als ein hypothetischer linearer Zusammenhang zwischen K_M und C_s .

Die Hydraulik im Modellgebiet berechnet sich nach

$$\nabla(K \cdot \nabla h) = 0 \quad (L-4)$$

mit

K Permeabilität der jeweiligen hydraulischen Einheit, isotrop; [m^2]

h hydraulisches Potential; [m]

Die Gleichung für den Transport des gelösten Magnesiums im Porenwasser lautet

$$\frac{\partial(\varepsilon_M \cdot C_I)}{\partial t} = \nabla[D \nabla C_I - v_D C_I] + \varepsilon_M \cdot R_r \quad (L-5)$$

mit

v_D Darcy-Geschwindigkeit; [m/s]

Dabei ist R_r die Reaktionsrate und D der effektive Dispersionstensor, welcher sich aus dem dispersiven und dem diffusiven Beitrag zusammensetzt:

$$D_{ij} = (a_L - a_T) \cdot \frac{v_{Di} \cdot v_{Dj}}{|v_D|} + a_T |v_D| \delta_{ij} + \varepsilon_M \cdot D_p \cdot \delta_{ij} \quad (L-6)$$

mit

D_p Porendiffusionskonstante; [m^2/s]

i, j Indizes zur Kennzeichnung der Koordinaten



$$\delta_{ij} = 1 \text{ für } i = j \text{ und } = 0 \text{ für } i \neq j$$

Die Reaktionsrate R_r hat innerhalb der Auflockerungszone im Anhydrit den Wert 0. Im Bauwerk hängt sie von den Magnesiumgehalten des Baustoffs, C_s , und der Lösung, C_l , ab:

$$R_r = k_r \cdot \begin{cases} (C_E - C_l) \cdot C_s & \text{für } C_l \leq C_E \\ (C_l - C_E) \cdot \left(C_s - \frac{C_E}{\bar{\kappa}_M} \right) & \text{für } C_l > C_E \end{cases} \quad (\text{L-7})$$

mit

k_r Geschwindigkeitskonstante für die Reaktion von gelöstem Mg^{2+} mit Brucit; [s^{-1}]

Die eigentliche Korrosion findet nur im Fall $C_l \leq C_E$ statt, d.h. die Mg-Konzentration im Porenwasser liegt unterhalb der Gleichgewichtskonzentration. Ist dagegen die Mg-Konzentration in Lösung höher als die Gleichgewichtskonzentration und gleichzeitig die Mg-Konzentration in der Festphase niedriger als in 100% Sorelphase, dann kehrt sich das Vorzeichen der Reaktion um, d.h. Magnesium geht aus der Lösung in den Feststoff über, wobei sich Brucit in Sorelphase umwandelt. Der hypothetische Fall $C_s > C_E / \bar{\kappa}_M$, d.h. die Mg-Konzentration in der Festphase ist größer als in 100% Sorelphase, wird durch Gleichung (L-7) ebenfalls korrekt behandelt. Dann ist das Vorzeichen der Reaktionsrate immer positiv, d.h. unabhängig von der Mg-Konzentration im Porenwasser geht Magnesium in Lösung. Letzteres ist während der Modellrechnungen für den Ausgleich numerischer Instabilitäten wesentlich.

Die Differentialgleichung für die Festphase lautet:

$$\frac{\partial[(1 - \varepsilon_M) \cdot C_s]}{\partial t} = -\varepsilon_M \cdot R_r \quad (\text{L-8})$$

Transport kann somit nur durch Austausch über die gelöste Phase stattfinden.

L.4.2 Parameterwahl und Anfangsbedingungen

Die benötigten Modellparameter sind in Tabelle L-5 zusammengestellt. Der Wert der Geschwindigkeitskonstante für die Reaktion von gelöstem Mg^{2+} mit Brucit, $k_r = 10^{-7} s^{-1}$ gemäß Gleichung (L-7) ist ein Schätzwert. Die äquivalente Zeitkonstante von etwa 100 Tagen erscheint in Anbetracht der Dauer für das Abbinden des Baustoffs eher hoch. Andererseits zeigen die Einfachdurchströmungsversuche von IP21-Lösung an Salzbeton typische Reaktionsdauern von 50 – 150 Tagen [GRS 2003]. Wie die im folgenden Kapitel dargestellten Modellergebnisse ergeben, ist die Reaktionsfront mit $k_r = 10^{-7} s^{-1}$ bereits sehr schmal; die Reaktion verläuft erheblich schneller als Diffusion und Dispersion. Testrechnungen mit $k_r = 10^{-6} s^{-1}$ haben gezeigt, dass bei unveränderter räumlicher Diskretisierung numerische Instabilitäten im Bereich der Reaktionsfront auftreten. Eine feinere Diskretisierung erfordert mehr Rechenzeit, das eigentliche Ergebnis – die Dauer für die vollständige Korrosion des Bauwerks – wird durch Parametervariationen mit $k_r < 10^{-7} s^{-1}$ aber nicht beeinflusst. Die Wahl von $k_r = 10^{-7} s^{-1}$ erscheint somit angemessen.



Tabelle L-5: Parameter für das Korrosionsmodell einer Abdichtung aus Sorelbeton mit Auflockerungszone; Referenzwert durch **Fettdruck** hervorgehoben

Parameter		Wert	Einheit	Kommentar / Begründung
Länge der Abdichtung	L_1	110	m	-
Radius des Bauwerks	R_d	2,7	m	entspricht der Querschnittsfläche von 22,5 m ² ; vgl. Anhang D
Radius der Auflockerungszone	R_E	2,8	m	Annahme / Festlegung
Anfangspermeabilität des Magnesiabetons	$K_{1,M}$	10^{-18}	m ²	vgl. Anhang C
Anfangspermeabilität der Auflockerungszone	K_E	10^{-16}	m ²	Annahme / Festlegung
Permeabilitätserhöhung des Magnesiabetons durch vollständige Korrosion	$K_{3/1}$	100	-	Werte >> 100 beeinträchtigen die numerische Stabilität des Modells, beeinflussen aber die Korrosionsdauer nicht weiter.
Anfangsporosität des Magnesiabetons	$\epsilon_{M,0}$	20%	-	gerundeter Messwert (18,7%)
Anfangsporosität der Auflockerungszone	ϵ_E	1%	-	Annahme / Festlegung (Kluftwasserleiter)
Porendiffusionskonstante in Magnesiabeton	$D_{p,M}$	$5 \cdot 10^{-10}$ $5 \cdot 10^{-11}$	m ² /s	vgl. den Wert für Salzbeton, Anhang C
Porendiffusionskonstante in Auflockerungszone	$D_{p,E}$	$5 \cdot 10^{-10}$	m ² /s	Annahme
Longitudinale Pecletzahl	Pe_L	30	-	Schätzwert
Transversale Pecletzahl	Pe_T	5	-	Schätzwert
Anfängliche Mg-Konzentration der Grubenlösung	C_0	0,1	-	Annahme / Festlegung; vgl. Anhang C
Gleichgewichtskonzentration Mg ²⁺ über Brucit/Sorel-3-1-8	C_E	0,122	-	siehe Kapitel L.3; Konzentrationswert relativ zu IP21-Lösung
Volumetrische Umlösekapazität von NaCl-Lösung an Magnesiabeton	K_M	0,48	m ³ /m ³	siehe Kapitel L.3
Viskosität der Porenlösung	μ_w	$2,04 \cdot 10^{-3}$	Pa·s	Wert von NaCl-Lösung – ungünstige Annahme, da niedriger als für anfängliche Porenlösung erwartet
Geschwindigkeitskonstante der Reaktion von gelöstem Mg ²⁺ mit Brucit	k_r	$1 \cdot 10^{-7}$	s ⁻¹	Schätzwert; siehe Text

Als Anfangsbedingung für die Mg-Konzentration im Porenwasser von Baustoff und Auflockerungszone wurde ein Wert von $C_{0,M} = 1,144$ – relativ zum Mg-Gehalt von IP21-Lösung – gewählt. Dieser Wert entspricht der berechneten Mg-Konzentration nach Abbinden [Voigt 2008]. Der Anfangswert für die Konzentration von eluierbarem Mg in der Festphase des Baustoffs wurde entsprechend dem Verhältnis $c_E/\bar{\kappa}_M$ auf den Wert 0,318 gesetzt.

Der hydrostatische Druck auf der Zustromseite beträgt 5,5 MPa, entsprechend dem Niveau der -372m-Sohle. Abstromseitig wird Atmosphärendruck angenommen; dies entspricht dem Fall „ohne Gaspolster“.

L.4.3 Rechencode

Die Modellrechnungen wurden mit dem Programm FlexPDE, Version 5.1.3 [FlexPDE 2008], durchgeführt. Dieses bietet die Möglichkeit einer einfachen Eingabe der partiellen Differentialgleichungen und der sonstigen Gleichungen in Klartext und darüber hinaus verschiedene Vorzüge, z.B. eine automatische Mesh-Erzeugung, Mesh-Anpassung entsprechend den numerischen Erfordernissen während der Rechnung sowie die komfortable numerische und graphische Ausgabe der Modellergebnisse.

L.4.4 Ergebnisse

Der Fluss von Grubenlösung durch die Auflockerungszone macht zu Beginn der Modellrechnung, d.h. bei noch unkorrodiertem Baustoff, einen erheblichen Anteil am Fluss durch den gesamten abgedichteten Ostquerschlag aus. Die Querschnittsfläche der Auflockerungszone beträgt 7,5% der Querschnittsfläche des Bauwerks. Bei einer Anfangspermeabilität des Baustoffs von 10^{-18} m^2 und einer Permeabilität der Auflockerungszone von 10^{-17} m^2 ist der Fluss durch die Auflockerungszone fast so groß wie der Fluss durch den Baukörper, bei einer Permeabilität der Auflockerungszone von 10^{-16} m^2 7,5mal so hoch wie der Fluss durch den Baukörper. Aufgrund der geringen Fließporosität der Auflockerungszone von 1% ist die Abstandsgeschwindigkeit relativ hoch: Für eine Permeabilität von 10^{-16} m^2 beträgt sie 13 m/a.

Trotz dieser hohen Abstandsgeschwindigkeit sättigt sich die Lösung, welche aus der Grube in die Auflockerungszone eindringt, bereits auf den ersten Metern entlang des Transportweges an Magnesium auf, bis die Gleichgewichtskonzentration mit dem Baustoff erreicht ist. Der diffusive Austausch mit dem Bauwerk in radialer Richtung (Matrixdiffusion) erfolgt ausreichend rasch, so dass sich eine weitgehend planare Transport- bzw. Reaktionsfront ausbildet.

In Abbildung L-3 ist das Konzentrationsprofil von Magnesium im Bauwerk, entsprechend dem Gehalt an Sorelphase, nach 76'000 Jahren dargestellt. Die Abdichtung ist zu dieser Zeit über mehr als die Hälfte ihrer Länge korrodiert. Dennoch ist die Reaktionsfront noch kaum gekrümmt, ihre Mächtigkeit in Ausbreitungsrichtung beträgt im Bereich der Symmetrieachse weniger als 1 m und weitet sich gegen den Randbereich auf deutlich weniger als 10 m aus. Eine derart schmale Reaktionszone ist auf die im Vergleich mit den Transportprozessen schnelle chemische Reaktion zurückzuführen.



Weil die Reaktionsfront schmal im Vergleich zur Ausdehnung des Bauwerks ist, hat der funktionale Zusammenhang zwischen Mg-Konzentration und Permeabilität so gut wie keinen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Korrosion des Bauwerks: Der hydraulische Widerstand und damit der Fluss wird überwiegend durch den vollständig korrodierten sowie durch den noch völlig intakten Bereich bestimmt. Diese Feststellung wurde durch zusätzliche Sensitivitätsstudien bestätigt, bei denen ein anderer funktionaler Zusammenhang zwischen Mg-Konzentration und Permeabilität als der hier zu Grunde gelegte einfache Exponentialterm (Gleichung (L-3)) gewählt wurde. Selbst eine Reaktionsfortschritts-Permeabilitätsbeziehung mit einer intermediären Permeabilitätsabnahme um eine Größenordnung, wie sie für die Reaktion von Salzbeton mit IP21-Lösung u.a. aufgrund der Durchströmungsversuche [GRS 2003] zu vermuten ist, führt annähernd zu denselben Korrosionsdauern, sofern der Endwert der Permeabilität um mindestens zwei Größenordnungen oberhalb des Ausgangswerts liegt.

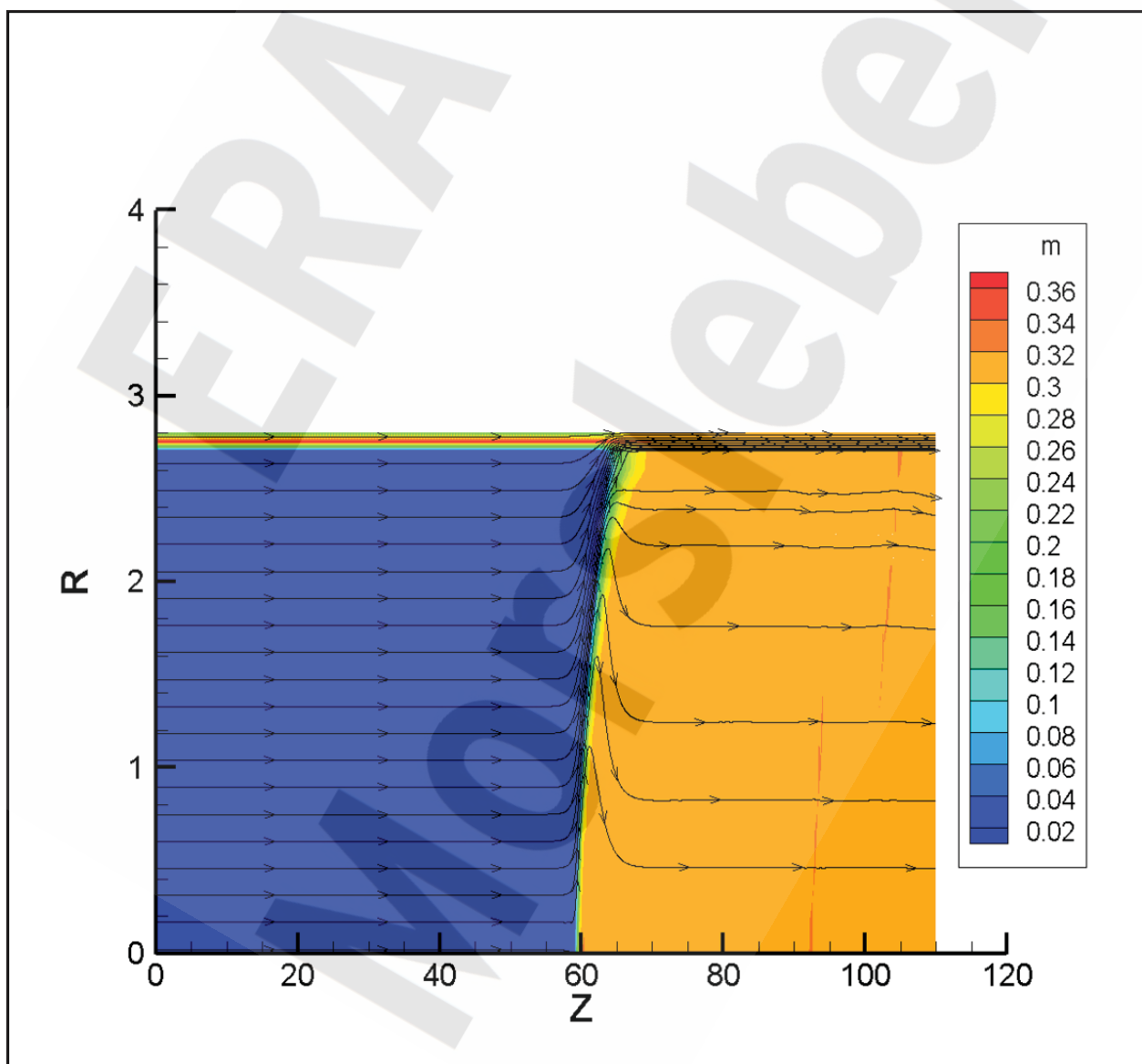


Abbildung L-3: Gehalt an Sorelphase im Bauwerk sowie Verlauf der Stromlinien nach 76'000 Jahren; Referenzparameter gemäß Tabelle L-5, $K_E = 10^{-16} \text{ m}^2$, $D_{p,M} = 5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, Mg-Sättigung der Grubenlösung 10%

In Abbildung L-3 sind außerdem die Trajektorien, welche am linken Modellrand starten, dargestellt. Diese verlaufen innerhalb des korrodierten Bereichs parallel zur Achse, um dann unmittelbar vor und innerhalb der Reaktionszone in radialer Richtung nach außen abzubiegen. Jenseits der Reaktionszone erfolgt der Fluss aufgrund des Permeabilitätskontrastes größtenteils innerhalb der Auflockerungszone. Durch den korrodierten Bereich der Abdichtung wird somit auf advektivem Wege ständig neue Grubenlösung bis an die Reaktionszone herangeführt, während die Auflockerungszone als Drainage für die Reaktionslösung, welche mit dem Baustoff im Gleichgewicht steht, fungiert.

Der Korrosionsverlauf, repräsentiert durch den Anstieg des Wasserflusses mit der Zeit, ist in Abbildung L-4 dargestellt. Im Referenzfall ($D_p = 5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $k_r = 1 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, $c_M = 0,1$) dauert die vollständige Korrosion ca. 100'000 Jahre. Der Fluss durch das Bauwerk – abstromseitig als Integral der Darcy-Geschwindigkeit über die Stirnfläche des Magnesiabetons berechnet – steigt gegen Ende des Korrosionsprozesses innerhalb weniger tausend Jahre um zwei Größenordnungen an. Der Endwert des Wasserflusses hängt vom Parameter $K_{3/1}$, der Permeabilitätserhöhung des Magnesiabetons durch vollständige Korrosion, ab. Dieser Wert wurde in den Modellrechnungen aus numerischen Gründen auf 100 begrenzt, was auf die berechnete Durchbruchzeit keinen Einfluss hat. Der über das Gesamtsystem integrierte Fluss nimmt deshalb allerdings lediglich um etwa eine Größenordnung zu, weil der Fluss durch die Auflockerungszone zu Beginn bereits ca. $0,15 \text{ m}^3/\text{a}$ beträgt.

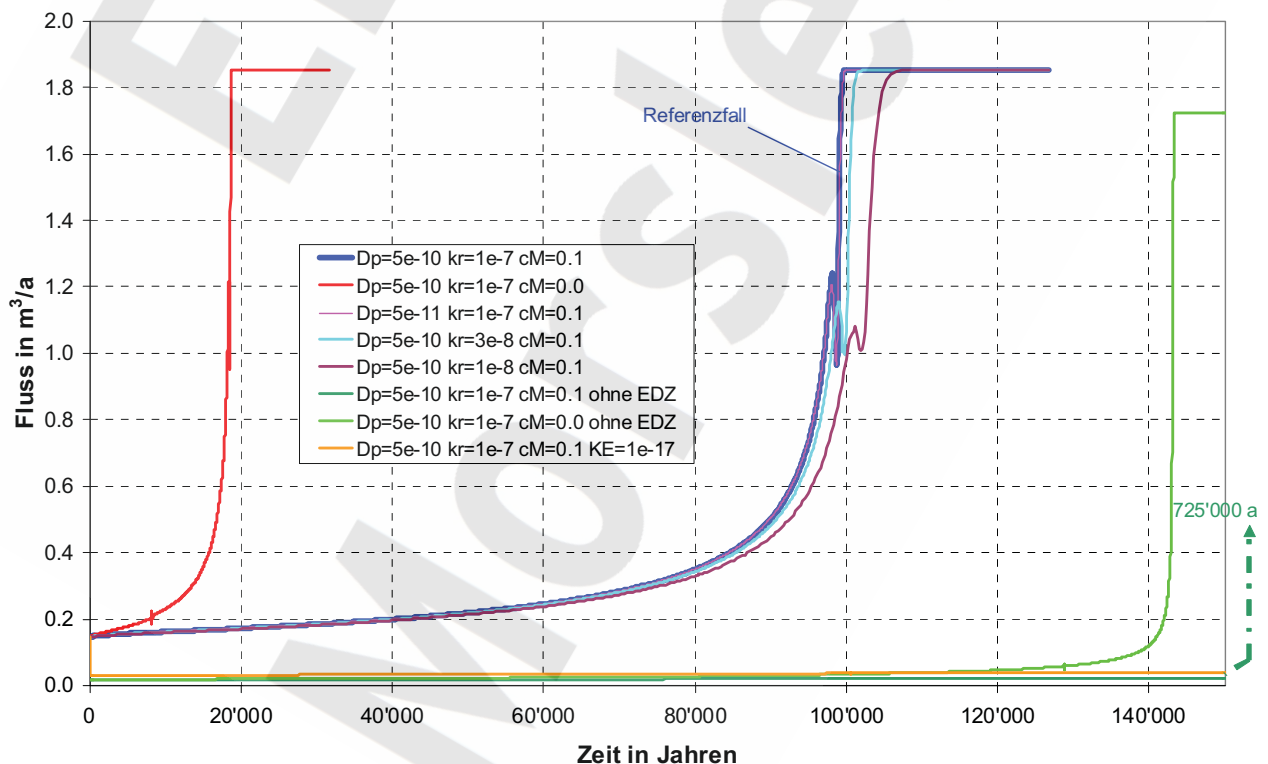


Abbildung L-4: Zeitlicher Verlauf des Wasserflusses durch Bauwerk und Gesamtsystem (inkl. Auflockerungszone) in Abhängigkeit von Diffusionskonstante, Reaktionsgeschwindigkeit und Mg-Konzentration der Grubenlösung

Der Einfluss von Parametervariationen ist ebenfalls an Abbildung L-4 ersichtlich. Eine zehnmal kleinere Diffusionskonstante im Magnesiabeton ($D_p = 5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$) bewirkt eine etwas schmalere Reaktionszone, wodurch sich im Randbereich des Bauwerks der Wasserfluss etwas rascher erhöht, was zu geringfügig kleineren Korrosionsdauern führt. Umgekehrt führt eine langsamere Reaktionsrate zu einer breiteren Reaktionszone und damit zu größeren Korrosionsdauern. Dabei ist der Unterschied in der Durchbruchzeit zwischen $k_r = 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ und $k_r = 3 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ gering; erst bei noch kleineren Werten von k_r ($\leq 1 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$), die bereits deutlich außerhalb der erwarteten Bandbreite liegen, reagiert das System sensitiv.

Bei Durchströmung mit gesättigter NaCl-Lösung beträgt die Korrosionsdauer lediglich 19'000 Jahre. Dies ist knapp 1/5 der Dauer im Referenzfall, d.h. bei einer Mg-Sättigung von 10%. Die Korrosionsdauer ist somit in guter Näherung proportional zur theoretisch berechneten Anzahl der Porenaustauschzyklen, welche gemäß Gleichung (A-45) bei reiner NaCl-Lösung 7,95 beträgt, bei 10%-iger Mg-Sättigung 39,3.

Das Korrosionsmodell wurde auch auf den Fall ohne Auflockerungszone angewandt. Dann beträgt die Korrosionsdauer bei einer Mg-Sättigung von 10% rechnerisch 725'000 Jahre, bei einer gesättigten NaCl-Lösung 143'000 Jahre. Mit dem analytischen Ansatz für den Fall ohne Gaspolster gemäß Gleichung (A-49) beträgt die Korrosionsdauer bei 10%-iger Mg-Sättigung 870'000 Jahre, bei reiner NaCl-Lösung 174'000 Jahre. Der Unterschied von 20% zwischen dem FE-Modell und dem analytischen Ansatz ist auf den Einfluss von Diffusion und Dispersion zurückzuführen.

Die Auflockerungszone verkürzt somit die Dauer für die vollständige Korrosion der Abdichtung um etwa einen Faktor 7,5. Das gilt sowohl für den Fall, dass die zutretende Lösung eine Mg-Sättigung von 10% aufweist, als auch für den Fall einer gesättigten NaCl-Lösung. Der Faktor 7,5 entspricht dabei näherungsweise der Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit des Gesamtsystems, welche durch die Auflockerungszone verursacht wird: Vor Korrosion beträgt der Fluss allein durch das Abdichtbauwerk $0,017 \text{ m}^3/\text{a}$, durch die Auflockerungszone $0,13 \text{ m}^3/\text{a}$. Der Fluss durch das Gesamtsystem erhöht sich aufgrund der Auflockerungszone somit um den Faktor 8,6.

Dieses Ergebnis bedeutet, dass der Einfluss der Auflockerungszone in guter Näherung vereinfachend berücksichtigt werden kann, indem ihr hydraulischer Leitfähigkeitswert zu demjenigen des Abdichtbauwerks addiert wird. Zurückzuführen ist dieses Resultat auf die Diffusion, welche einen ausreichend raschen Ausgleich der Magnesiumkonzentration in radialer Richtung zur Folge hat. Dies äußert sich in einer nahezu ebenen Reaktionsfront (Abbildung L-3) und führt dazu, dass die Reaktion genauso schnell voranschreitet, als ob die Grubenlösung mit derselben Rate unmittelbar durch das Bauwerk flösse.

Dieser Zusammenhang wurde durch eine Vergleichsrechnung überprüft, bei der die Auflockerungszone eine Permeabilität von $K_E = 10^{-17} \text{ m}^2$ aufweist. Der hydraulische Fluss durch das Gesamtbauwerk erhöht sich dadurch gegenüber dem Fall ohne Auflockerungszone um den Faktor 1,75. Bei 10%-iger Mg-Sättigung beträgt die Korrosionsdauer 430'000 Jahre, sie verkürzt sich somit gegenüber dem Fall ohne Auflockerungszone um den Faktor 1,7. Auch in diesem Fall ist also die Näherung, dass die Korrosionsdauer umgekehrt proportional zum Fluss durch das Gesamtsystem ist, gut erfüllt.



L.4.5 Zusammenfassung

Die Rechnungen mit dem 2-dimensionalen FE-Modell unter Kopplung von chemischer Reaktion und Transport zeigen, dass aufgrund der Diffusion ein rascher Mg-Transport in Lösung stattfindet, wodurch sich eine nahezu planare Reaktionsfront ausbildet, obwohl die Abstandsgeschwindigkeit in der Auflockerungszone um mehr als drei Größenordnungen höher ist als im Baustoff. Diese sehr effiziente „Matrixdiffusion“ führt dazu, dass die Mg-Konzentration in der Auflockerungszone bereits wenige Meter jenseits der Reaktionszone den Wert der Gleichgewichtskonzentration mit dem Baustoff erreicht hat.

Aus diesem Grund verläuft die Korrosion des Bauwerks in sehr guter Näherung mit derselben Geschwindigkeit, als ob die Grubenlösung, welche durch die Auflockerungszone fließt, unmittelbar durch das Abdichtungsbauwerk strömen würde. Deshalb kann der 1-dimensionale Modellansatz von PROSA auch für den Fall einer Abdichtung, welche von einer Auflockerungszone umgeben ist, angewandt werden. Dafür muss lediglich der Parameterwert für die Anfangspermeabilität des Bauwerks so angepasst werden, dass sich der korrekte Leitfähigkeitswert für das Gesamtsystem inkl. Auflockerungszone ergibt. Mit den hier für den Ostquerschlag betrachteten Geometrien und Permeabilitäten erhöht sich der Bruttofluss durch das Gesamtsystem aufgrund der Auflockerungszone um den Faktor 7,5.

Zusätzlich ergeben die Berechnungen mit dem FE-Modell, dass Diffusion und Dispersion im betrachteten Parameterbereich die Korrosion der Abdichtung gegenüber dem 1-dimensionalen Modellansatz von PROSA, welcher nur die advective Transportkomponente berücksichtigt, um ca. 20% beschleunigen. Daraus ergibt sich insgesamt, dass das 1D-Korrosionsmodell mit einer um den Faktor 10 auf 10^{-17} m^2 erhöhten Anfangspermeabilität des Magnesiabetons in ausreichender Näherung zum gleichen Ergebnis führt wie das FE-Modell mit einer Anfangspermeabilität des Magnesiabetons von 10^{-18} m^2 , einer 10 cm mächtigen Auflockerungszone mit einer Permeabilität von 10^{-16} m^2 und unter Berücksichtigung von Diffusion und Dispersion.

Die Berechnungen mit dem FE-Modell zeigen weiterhin, dass die Reaktionszone im Vergleich mit der Länge des Bauwerks ausgesprochen schmal ist. Im Kernbereich weist sie eine Mächtigkeit von ca. 1 m auf, im Randbereich von ca. 5 m. Der hydraulische Widerstand des teilweise korrodierten Bauwerks wird überwiegend durch die Permeabilitätswerte von vollständig korrodiertem und vollständig unkorrodiertem Magnesiabeton bestimmt. Der mittlere Permeabilitätswert der Reaktionszone sowie der genaue funktionale Zusammenhang zwischen Korrosionsfortschritt und Permeabilität wirken sich nur marginal auf die Korrosionsdauer aus. Diese Erkenntnis kann auch auf die Korrosion von Salzbeton mit IP21-Lösung übertragen werden, wo aufgrund der Durchströmungsversuche und geochemischer Überlegungen eine vorübergehende Permeabilitätsabnahme durch intermediäre Ausfällung Mg-haltiger Festphasen (Brucit und/oder Sorelphasen) erwartet wird. Diese Permeabilitätsabnahme hat wegen der im Vergleich zur Länge der Abdichtungen schmalen Reaktionszone keinen Einfluss auf die Korrosionsdauer des gesamten Bauwerks.

Die Parametervariationen von Reaktionsrate und Diffusionskonstante im Magnesiabeton innerhalb realistischer Bandbreiten ergaben keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse. Diese können somit als robust bezeichnet werden.



Anhang M Korrelierte Parameter für die probabilistischen Modellrechnungen

Für die probabilistischen Modellrechnungen ist neben der Festlegung geeigneter Bandbreiten für die Eingangsparameter auch die Identifizierung und Quantifizierung möglicher Korrelationen zwischen einzelnen Parametern notwendig. Korrelationen können sich ergeben, weil

- zwei oder mehrere Parameter aus physikalischen Gründen voneinander abhängig sind, oder
- durch Anpassung bestimmter Wertebereiche von Parametern die Änderung eines Szenarios im Modell simuliert werden kann; dafür müssen mehrere Parameter gleichzeitig geändert werden.

Korrelationen von Parametern können im Modell auf unterschiedliche Weise berücksichtigt werden:

- sofern möglich, durch Reduktion der Parameter auf die Freiheitsgrade des Systems; dies kann durch Einführung kombinierter oder abgeleiteter Parameter geschehen,
- durch Definition von Korrelationskoeffizienten zwischen Parametern, welche bei der probabilistischen Parameterwahl für Variationsrechnungen berücksichtigt werden,
- durch Algorithmen, die nach der probabilistischen Wahl der Parameter Spezialfälle identifizieren und Parameterwerte in geeigneter Weise anpassen.

Für die in diesem Bericht dargestellten Modellrechnungen wurden die Möglichkeiten i) und iii) angewandt.

M.1 Kombinierte und abgeleitete Parameter

- Verfüllgrade ζ_t und ζ_k

Die Volumina in den verschiedenen Teilen der Grube (Einlagerungsgrubenbaue, restliche Einlagerungsbereiche, Mischungsbereiche und übrige Grube) werden unterteilt in unversetzten Hohlraum, kompaktierbaren Versatz und nicht oder nur gering kompaktierbaren Versatz. Für die drei Volumenanteile existieren im Verfüllplan Referenzwerte und Bandbreiten. Für spezielle Fälle kann es erforderlich sein, diese Volumenanteile synchron zu variieren, z.B. um zu modellieren, dass ein Teil des Einlagerungsbereichs völlig gegenüber dem Einlagerungsgrubenbau abgedichtet ist. Dadurch verkleinert sich gleichzeitig der für die Prozesse relevante Anteil an unverfülltem Hohlraum, kompaktierbarem und nicht oder gering kompaktierbarem Versatz sowie der Anfangsflüssigkeitsgehalt. Daher werden der Modellierung nicht die verschiedenen Volumenanteile direkt, sondern das insgesamt aufgefahrene Volumen und die versetzten Anteile als Parameter zugrunde gelegt:

V_{EH} Gesamtvolumen der Einlagerungsgrubenbaue im Einlagerungsbereich; [m³]

V_{REB} Gesamtvolumen des restlichen Einlagerungsbereichs; [m³]

ζ_{EHT} totaler Verfüllgrad (kompaktierbarer und nicht oder gering kompaktierbarer Versatz) des Gesamtvolumens der Einlagerungsgrubenbaue; [-]



- ζ_{REBt} totaler Verfüllgrad (kompaktierbarer und nicht oder gering kompaktierbarer Versatz) des Gesamtvolumens des restlichen Einlagerungsbereichs; [-]
- ζ_{EHK} Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz in den Einlagerungsgrubenbauen; [-]
- ζ_{REBk} Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz des restlichen Einlagerungsbereichs; [-]

Diese Parameter werden aus den Teilvolumina und deren Bandbreiten, welche mit dem ERAM HIS [DBE 2003] ermittelt werden, abgeleitet. Innerhalb PROSA werden daraus diejenigen Modellgrößen des Einlagerungsbereichs (Index EB) berechnet, die für die Gleichungen zur Prozessbeschreibung erforderlich sind ($V_{EB,u}$, $V_{EB,v1}$, $V_{EB,v2}$). Die Materialeigenschaften wie Porosität oder Konvergenzverhalten werden als gleichartig für das gesamte jeweilige Volumen angenommen. Das Vorgehen zur Bestimmung der Referenzwerte und Bandbreiten der Parameter ist sowohl allgemein als auch für die einzelnen Einlagerungsbereiche in Kapitel D.3 erläutert.

- Anfangssättigungsgrad ϕ_A

Der Anfangssättigungsgrad des kompaktierbaren Versatzes beschreibt das Verhältnis der im kompaktierbaren Versatz vorhandenen Flüssigkeit zu seinem Porenvolumen bei Beginn der Zutrittsphase. Das Flüssigkeitsvolumen wird bestimmt über die Restfeuchte in den Abfällen [aus BfS 2000c] und die Restfeuchte im Salzversatz (0,3 Gew.-% mit Bandbreite 0,1 bis 0,5 Gew.-%). Das Porenvolumen errechnet sich aus den Angaben zur Porosität und dem Volumen des kompaktierbaren Versatzes ($\varepsilon_{EB,v1,0}$ und $V_{EH,v1}$). Für die Berechnung der Obergrenze von ϕ_A wird für die Restfeuchte im Salzgrus der Maximalwert und für das Volumen des kompaktierbaren Versatzes der Minimalwert verwendet.

- Relative Abfallstapelhöhe β

Die relative Abfallstapelhöhe beschreibt das Verhältnis der geometrischen Höhen der Volumina von Abfall (H_{Abf}) und kompaktierbarem Versatz ($H_{EH,v1}$). Es wird angenommen, dass dieses Verhältnis dem Quotienten der entsprechenden Volumina entspricht (vgl. Anhang I) Dabei geht als Volumen für den kompaktierbaren Versatz der Referenzwert aus dem ERAM HIS ein. Die Bandbreite berücksichtigt im Allgemeinen Variationen im Abfallvolumen bei gleichbleibendem kompaktierbarem Versatz.

- Hydrostatischer und lithostatischer Druck

Die Konvergenz von Grubenbauen wird nach dem PSE-Ansatz berechnet (vgl. Anhang F); sie hängt vom lithostatischen Druck und vom Fluiddruck im Grubenbau ab, welcher wiederum durch den hydrostatischen Druck auf dem jeweiligen Niveau beeinflusst wird.

Diese Korrelation zwischen dem lithostatischem Druck p_{litho} und dem hydrostatischen Druck $p_{w,z}$ wird im Modell vereinfacht berücksichtigt, indem beide auf dieselbe Teufe bezogen werden:

$$p_{w,z} = g \cdot [(z_A - z_S) \cdot \rho_W + (z_S - z_G) \cdot \rho_{IP21}] \quad (M-1)$$

$$p_{litho} = g \cdot (z_R - z_G) \cdot \rho_{lit} \quad (M-2)$$



mit

z_A	Wasserspiegel der Aller; [m NN]
z_S	Tiefe des Salzspiegels; [m NN]
z_G	Bezugsniveau im Grubengebäude; [m NN]
z_R	Niveau der Rasenhängebank; [m NN]
ρ_W	Dichte von Süßwasser; [kg/m ³]
ρ_{IP21}	Dichte von IP21-Lösung; [kg/m ³]
ρ_{lit}	Gesteinsdichte; [kg/m ³]
g	Erdbeschleunigung; [m/s ²]

- Mittlerer Fluiddruck in der übrigen Grube während des Volllaufens $p_{Prol,RG}$

Zum Zeitpunkt des Verschlusses herrscht in der Grube Atmosphärendruck, p_0 . Konvergenz und Gasbildung bewirken einen Druckanstieg, da die Gase nicht durch das flüssigkeitsgesättigte Hutgestein entweichen können und daher während der Zutrittsphase in der Grube eingeschlossen sind. Die aus dem Hutgestein zutretenden Wässer komprimieren die eingeschlossenen Gase ebenfalls. Zum Gasdruck addiert sich in den flüssigkeitsgefüllten Bereichen der Grube der hydrostatische Druck.

Diese komplexen, räumlich und zeitlich unterschiedlichen Druckverhältnisse werden vereinfacht durch einen mittleren Fluiddruck $p_{Prol,RG}$ in der übrigen Grube beschrieben, der während der gesamten Zutrittsphase konstant ist. Dieser liegt zwischen Atmosphärendruck p_0 und dem vollen hydrostatischen Druck $p_{w,Z}$. Folglich ist er mit dem Wert des hydrostatischen Drucks korreliert. Dies wird durch den Modellparameter κ_p berücksichtigt:

$$p_{Prol,RG} = p_0 + \kappa_p \cdot (p_{w,Z} - p_0) \quad (M-3)$$

- Effektive Transportquerschnittsfläche im Hutgestein und Deckgebirge A_2

Die effektive Transportquerschnittsfläche im Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) berechnet sich als Produkt aus der Mächtigkeit des Grauen Salztons, der typischen horizontalen Blockausdehnung und einem Faktor für das Channeling, da nicht der gesamte Querschnitt fließwirksam ist. Die gesamten Ungewissheiten dieser drei Größen sind in der Bandbreite des fließwirksamen Anteils der Transportquerschnittsfläche, κ , zusammengefasst:

$$A_2 = \kappa \cdot A_{2,tot} \quad (M-4)$$

M.2 Behandlung von Spezialfällen:

- Parameter für die Kanalisierung des Radionuklidtransports durch das Abdichtsystem

Zwischen dem West-/Südfeld und dem Zentralteil bzw. dem Ostfeld und dem Zentralteil befinden sich mehrere Abdichtungen, die hydraulisch als Widerstand wirken (vgl. Anhang D). Ist eine dieser Abdichtungen korrodiert, dann erhöht sich nicht nur die Permeabilität des gesamten Abdichtsystems, sondern die Bewegung von Flüssigkeit und Gas konzentriert sich stark auf diese Abdichtung, und die übrigen Abdichtungen des Systems werden vergleichsweise wenig durchströmt. Diese Kanalisierung führt zu einer Verkürzung der Transportzeit durch das Abdichtsystem, verglichen mit einer gleichmäßigen Durchströmung aller Abdichtungen. Im Modell wird dieser Effekt dadurch berücksichtigt, dass bei der Berechnung der Transportverzögerung T_{TG} die Querschnittsfläche des Abdichtsystems auf den Minimalwert der Bandbreite gesetzt wird, sofern das Abdichtsystem und somit dessen kürzeste Abdichtung zu 90% ihrer Länge oder mehr korrodiert ist. Der Minimalwert der Bandbreite für die Querschnittsfläche entspricht dem Wert für die Abdichtung mit dem kleinsten Querschnitt innerhalb des Abdichtsystems (vgl. Anhänge A und D).

- Parametrisierung der Gasbildung

Die Gasbildung wird durch 4 Parameter beschrieben:

- Die Gesamtgasmenge $V_{g,STP,tot}$ (bei einer Teilnahme von 100% des Inventars an den Gasbildungsprozessen)
- Die Gasbildungsrate $Q_{g,1e2,tot}$ zu repräsentativ frühen Zeiten $t = 100$ Jahre
- Die Gasbildungsrate $Q_{g,1e4,tot}$ zu repräsentativ späten Zeiten $t = 10'000$ Jahren
- Einen Skalierungsfaktor η , der berücksichtigt, dass nur ein Teil der Abfälle an den gasbildenden Prozessen teilnimmt. Dieser wird in gleicher Weise auf die probabilistisch gewählten Gasbildungsraten und die Gesamtgasmenge angewandt, wodurch die Korrelation zwischen Raten und Gesamtmenge gewährleistet ist.

Für die Gasbildungsrate zu späten Zeiten sind zusätzlich 2 Bedingungen zu erfüllen:

- $Q_{g,1e4,tot} < Q_{g,1e2,tot}$ (die Gasbildungsrate soll nicht zunehmen)
- Die Gesamtgasmenge, $V_{g,STP,tot}$, muss tatsächlich erreicht werden können:

$$\int_0^{\infty} Q_{g,in} d\tau = V_{g,STP,tot} \quad (M-5)$$

Die Gasbildungsrate $Q_{g,in}(t)$ wird durch eine Potenzfunktion parametrisiert, welche durch die Stützstellen $Q_{g,1e2,tot}$ und $Q_{g,1e4,tot}$ verläuft. Falls bei einer gewürfelten Parameterkombination die Gasbildungsrate mit der Zeit sehr stark abnimmt, können Fälle auftreten, in denen Bedingung ii) verletzt würde. Dann ist $Q_{g,1e4,tot}$ anzupassen (Details siehe Anhang A).



Anhang N Probabilistische Modellrechnungen

In diesem Anhang werden zunächst in Kapitel N.1 die Verteilungsfunktionen der Modellparameter erläutert. Diese sollen sowohl die ungewissen Sachverhalte und künftigen Entwicklungen im Grubengebäude, Hutgestein und Deckgebirge als auch die Parameterunsicherheit und natürliche Variabilität abdecken.

In Kapitel N.2 werden die Ergebnisse der probabilistischen Modellrechnungen vorgestellt. Diese wurden mit der Monte-Carlo-Methode und mit jeweils 2'000 Realisierungen für die drei Fälle „ohne Gaspolster“, „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ und „mit Gaspolster, mit Gasfluss“⁷⁴ durchgeführt. Die Parameterwerte für die einzelnen Realisierungen wurden – mit den in Anhang M genannten Ausnahmen – entsprechend den definierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen stochastisch und unabhängig voneinander gewählt.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Maxima der Strahlenexpositionen stellen die wichtigsten Resultate der Modellrechnungen dar. Für die Interpretation sind noch weitere Ausgabeparameter relevant. Einige davon werden hier erläutert, und es werden ausgewählte Ergebnisse vorgestellt.

Schließlich wird auf die statistische Qualität der Simulationsergebnisse eingegangen und somit die Belastbarkeit des gewählten Vorgehens behandelt (Kapitel N.3).

N.1 Verteilungsfunktionen

Bei den probabilistischen Rechnungen nehmen die Parameter bestimmte Werte mit festgelegten Wahrscheinlichkeiten an. Diese Wahrscheinlichkeiten folgen einer Verteilung, die für jeden Parameter abhängig von seiner physikalischen oder chemischen Natur sowie der Art der abzubildenden Ungewissheit festgelegt wurde. Die in den Rechnungen verwendeten Verteilungsfunktionen sind in Abbildung N-1 dargestellt. Die Parameter können normalverteilt, dreiecksverteilt, log-normalverteilt, log-gleichverteilt oder gleichverteilt sein (siehe Abbildung N-1).

Die log-Normal- und die log-Gleichverteilung entsprechen auf einer logarithmischen x-Achse (Parameterachse) einer Normal- oder Gleichverteilung. Diese Verteilungsfunktionen sind häufig angemessen, wenn sich die Bandbreite des Parameters über mehrere Größenordnungen erstreckt. Lineare Normal- bzw. Gleichverteilungen weisen in solch einem Fall den hohen Parameterwerten deutlich höhere Wahrscheinlichkeiten zu. Dies soll an einem Beispiel illustriert werden: Wenn ein Parameter mit Bandbreite zwischen 0,001 und 1 log-gleichverteilt ist, dann verhalten sich die Wahrscheinlichkeiten eines Parameterwerts zwischen 0,001 – 0,01, zwischen 0,01 – 0,1 und zwischen 0,1 – 1 wie 1:1:1, d.h. sie sind gleich. Bei einer lin-Gleichverteilung betragen die Verhältnisse 1:10:100.

⁷⁴ Definition der Fälle in Kapitel 3.3.6



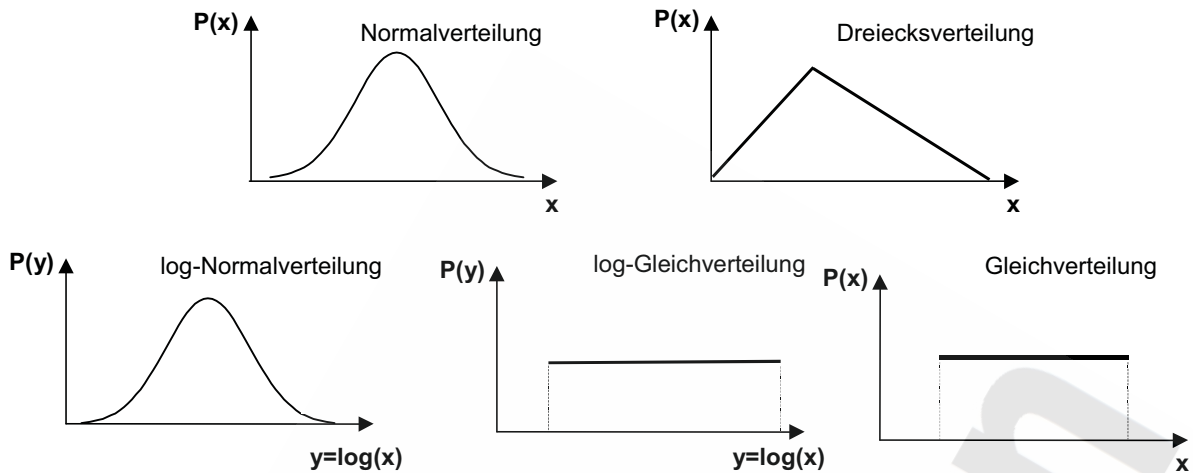


Abbildung N-1: Skizze der verwendeten Verteilungsfunktionen

Für die probabilistischen Rechnungen werden den Parametern jeweils ein Referenz- sowie ein Maximal- und ein Minimalwert zugeordnet. Innerhalb dieser Schranken nimmt der Parameter einen stochastisch ermittelten Wert gemäß seiner Wahrscheinlichkeitsverteilung an. Die Normal- und die log-Normalverteilung werden entsprechend abgeschnitten (siehe Abbildung N-2).

Der Erwartungswert (der „Schwerpunkt“ der Verteilung) stimmt i.a. nicht mit dem Referenzwert überein. Der Referenzwert wird als jener Wert interpretiert, der bei der Normalverteilung, der log-Normalverteilung und der Dreiecksverteilung mit der höchsten Wahrscheinlichkeit auftritt. Bei der Gleichverteilung und der log-Gleichverteilung hängt die Verteilungsfunktion nicht vom Referenzwert ab.

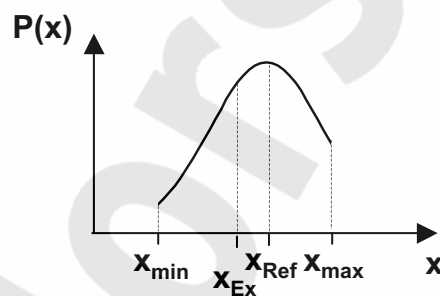


Abbildung N-2: Abgeschnittene Normalverteilung mit Minimal- (x_{\min}), Maximal- (x_{\max}), Referenz- (x_{Ref}) und Erwartungswert (x_{Ex}).

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, $P(x)$, der abgeschnittenen Normalverteilung ist durch Gl. (N-1) gegeben.

$$P(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_n \cdot N_n \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-(x-x_{\text{Ref}})^2/2\sigma_n^2} & \text{für } x_{\text{min}} \leq x \leq x_{\text{max}} \\ 0 & \text{für } x < x_{\text{min}} \text{ oder } x > x_{\text{max}} \end{cases} \quad \text{Normalverteilung} \quad (\text{N-1})$$

wobei x_{max} der Maximal-, x_{min} der Minimal-, x_{Ref} der Referenzwert und σ_n die Standardabweichung sind. N_n bezeichnet den Normierungsfaktor.

Die Standardabweichung wird wie folgt bestimmt:

- die jeweilige Differenz zwischen dem Minimal- bzw. dem Maximalwert und dem Referenzwert wird berechnet
- die größere dieser beiden Differenzen definiert die doppelte Standardabweichung.

$$\sigma_n = \frac{1}{2} \cdot \max\{x_{\text{max}} - x_{\text{Ref}}; x_{\text{Ref}} - x_{\text{min}}\} \quad (\text{N-2})$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der anderen Verteilungen ergeben sich nach den folgenden Gleichungen

$$P(y) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_l \cdot N_l \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-(y-y_{\text{Ref}})^2/2\sigma_l^2} & \text{für } y_{\text{min}} \leq y \leq y_{\text{max}} \\ 0 & \text{für } y < y_{\text{min}} \text{ oder } y > y_{\text{max}} \end{cases} \quad \text{Log-Normalverteilung} \quad (\text{N-3})$$

wobei $y = \log(x)$, $y_{\text{min}} = \log(x_{\text{min}})$, $y_{\text{max}} = \log(x_{\text{max}})$ und $y_{\text{Ref}} = \log(x_{\text{Ref}})$ gilt. N_l stellt wiederum den Normierungsfaktor dar. Die Bestimmung der Standardabweichung σ_l erfolgt analog zu Gl. (N-2).

$$P(x) = \begin{cases} \frac{2}{A} \cdot (x - x_{\text{min}}) & \text{für } x_{\text{min}} \leq x < x_{\text{Ref}} \\ \frac{2}{B} \cdot (x - x_{\text{max}}) & \text{für } x_{\text{Ref}} \leq x \leq x_{\text{max}} \\ 0 & \text{für } x < x_{\text{min}} \text{ oder } x > x_{\text{max}} \end{cases} \quad \text{Dreiecksverteilung} \quad (\text{N-4})$$

wobei $A = (x_{\text{max}} - x_{\text{min}}) \cdot (x_{\text{Ref}} - x_{\text{min}})$ und $B = (x_{\text{max}} - x_{\text{min}}) \cdot (x_{\text{Ref}} - x_{\text{max}})$ Normierungsfaktoren darstellen.



$$P(x) = \begin{cases} \frac{1}{(x_{\max} - x_{\min})} & \text{für } x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 0 & \text{für } x < x_{\min} \text{ oder } x > x_{\max} \end{cases} \quad \text{Gleichverteilung (N-5)}$$

$$P(y) = \begin{cases} \frac{1}{(y_{\max} - y_{\min})} & \text{für } y_{\min} \leq y \leq y_{\max} \\ 0 & \text{für } y < y_{\min} \text{ oder } y > y_{\max} \end{cases} \quad \text{Log-Gleichverteil. (N-6)}$$

wobei $y = \log(x)$, $y_{\min} = \log(x_{\min})$ und $y_{\max} = \log(x_{\max})$ gilt.

Ein Beispiel für die Verteilung eines Parameters, wie sie in den Rechnungen umgesetzt wird, ist in der Abbildung N-3 dargestellt. Die theoretisch vorgegebene Verteilungsfunktion wird mit 1'000 Realisierungen bereits gut wiedergegeben, und der Parameterbereich ist weiträumig abgedeckt. Die Zuordnung der Verteilungsfunktionen zu den einzelnen Parametern erfolgt in Anhang C.

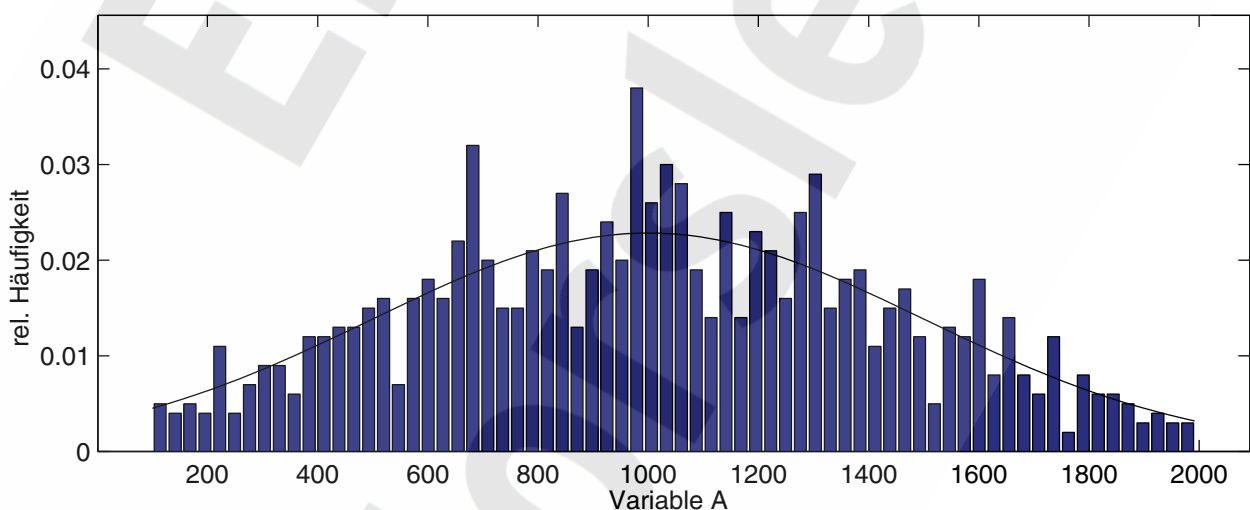


Abbildung N-3: Beispiel für die relative Häufigkeit der nach einer abgeschnittenen Normalverteilung ermittelten Parameterwerte für die Variable A bei 1'000 Realisierungen. Die durchgezogene Linie gibt die theoretische Verteilung wieder. Der Wertebereich liegt zwischen 100 und 2'000 und der Referenzwert bei 1'000.

N.2 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden ausgewählte Auswertungen der probabilistischen Rechnungen wiedergegeben und erläutert. Dabei wird besonderes Gewicht auf die Identifikation von Prozessen und die Kategorisierung der Einzelergebnisse gelegt.

N.2.1 Maximaldosis

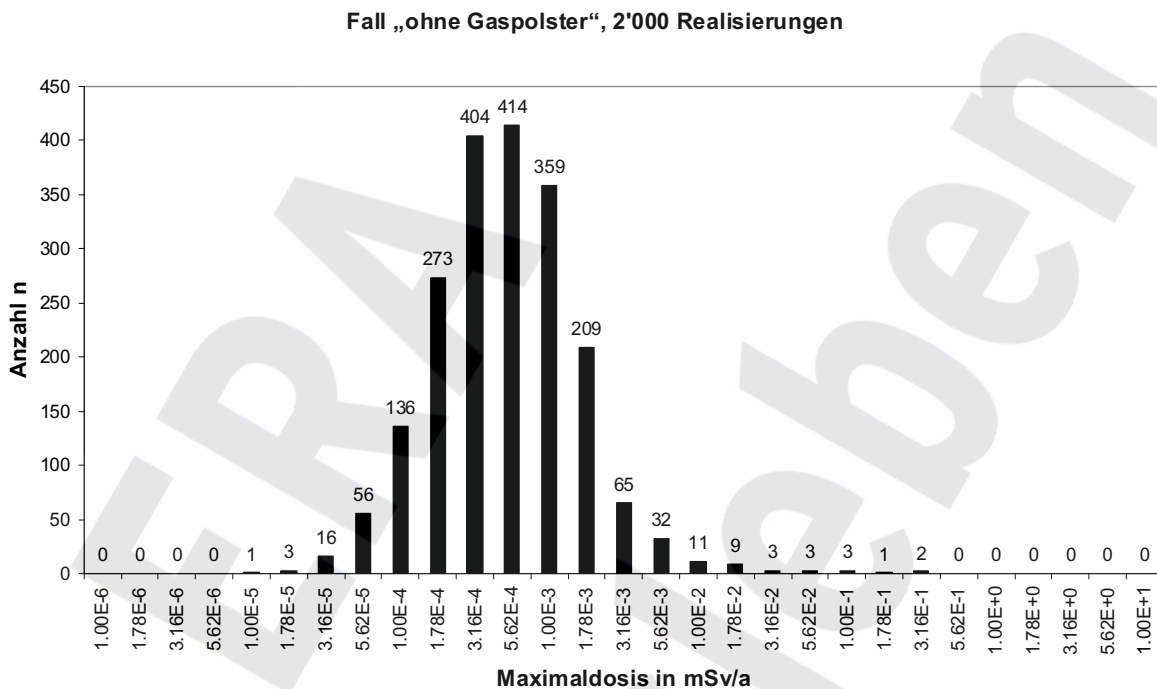


Abbildung N-4: Häufigkeitsverteilung der Maximaldosis für 2'000 Rechenläufe für den Fall „ohne Gaspolster“. Jede Klasse ist durch ihre Obergrenze definiert: So liegen z.B. 2 Werte im Intervall zwischen 0,178 mSv/a und 0,316 mSv/a.

Die Häufigkeitsverteilungen der Maximaldosis werden für die Fälle „ohne Gaspolster“, „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ und „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ in Abbildung N-4 bis Abbildung N-6 dargestellt. Alle Histogramme weisen eine leicht asymmetrische Verteilung der Werte auf einer logarithmischen Skala auf. Der Grund dafür ist, dass sich einige Prozesse stark nichtlinear auf die Dosis auswirken. Dazu gehören z.B. die Transportzeit (wegen des exponentiellen Zeitgesetzes für den radioaktiven Zerfall) oder der Grad, bis zu dem das Abdichtsystem korrodiert. Ein weiterer Grund ist die asymmetrisch gewählte Verteilungsfunktion von Parametern. Das Maximum der berechneten Verteilung („wahrscheinlichster“ Dosiswert) liegt für den Fall „ohne Gaspolster“ bei etwa 0,0005 mSv/a, für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ zwischen 0,0010 mSv/a und 0,0018 mSv/a und für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ bei etwa 0,0003 mSv/a.

Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“, 2'000 Realisierungen

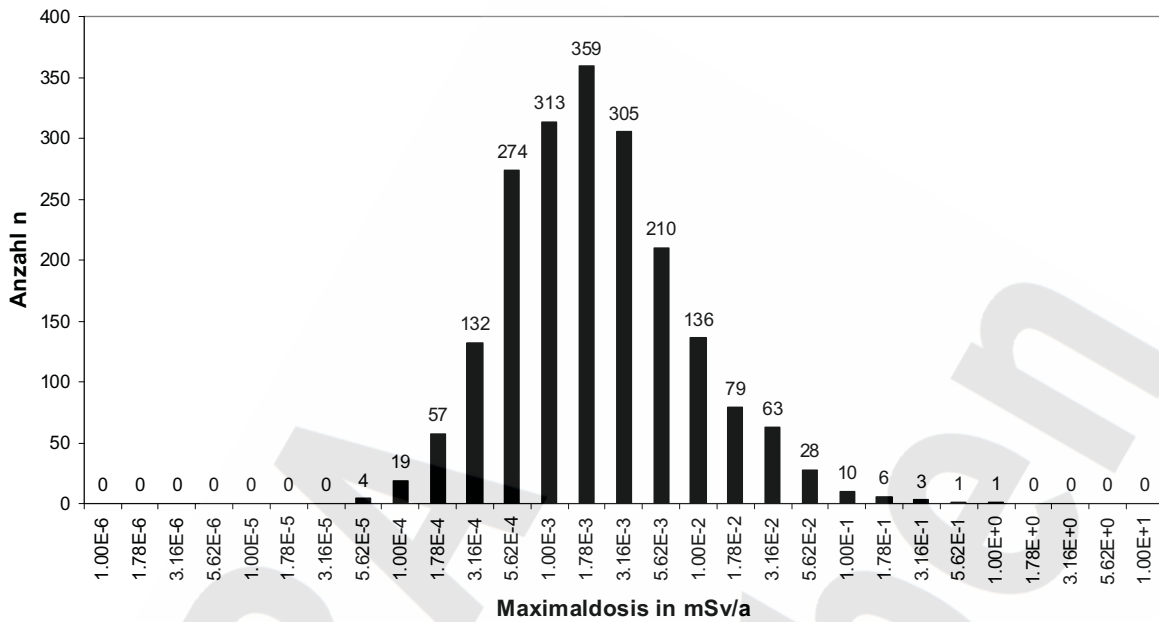


Abbildung N-5: Häufigkeitsverteilung der Maximaldosis für 2'000 Rechenläufe für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“

Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“, 2'000 Realisierungen

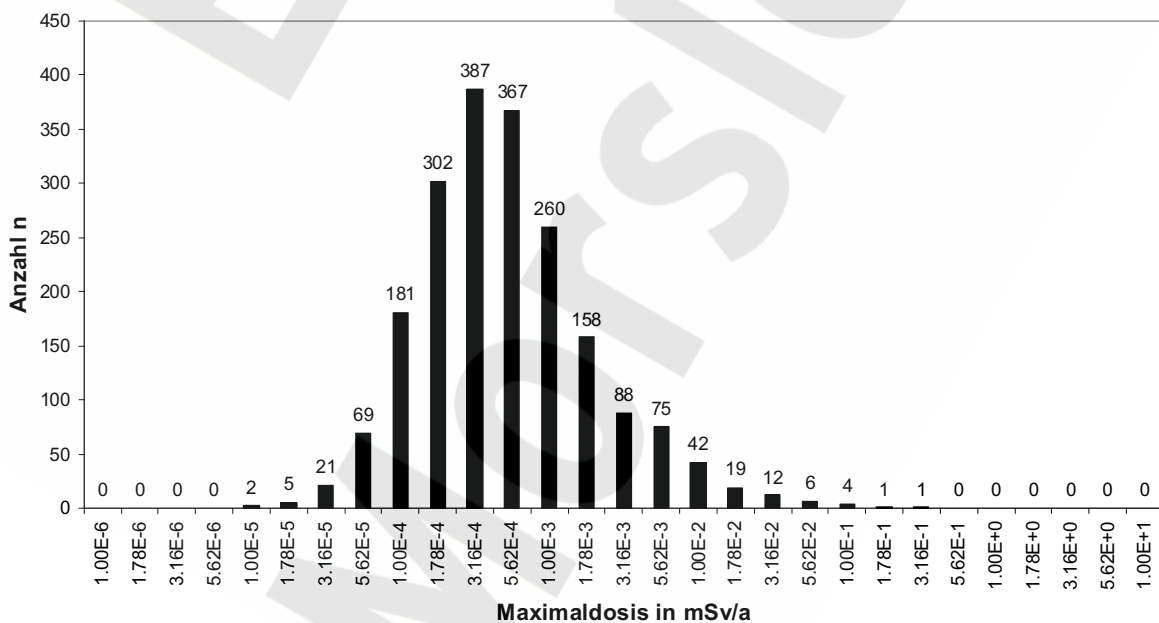


Abbildung N-6: Häufigkeitsverteilung der Maximaldosis für 2'000 Rechenläufe für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“



Bei den 2'000 Rechenfällen „ohne Gaspolster“ liegt die Maximaldosis stets unterhalb 0,3 mSv/a. Im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ wird dieser Wert in lediglich 4 der 2'000 Fälle überschritten⁷⁵. Für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ kommt es zu keiner einzigen Überschreitung.

Bei der Bewertung dieses Ergebnisses ist die konservative Auslegung des Modells zu berücksichtigen. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass trotzdem für alle drei Fälle die am häufigsten gefundenen und damit wahrscheinlichsten Maximaldosen im Bereich weniger $\mu\text{Sv/a}$ oder darunter liegen.

N.2.2 Zeitpunkt des Auftretens der Maximaldosis

Neben dem Maximalwert ist auch der zeitliche Verlauf der Dosis wichtig. In diesem Zusammenhang soll der Zeitpunkt, zu dem die Maximalwerte auftreten, diskutiert werden. Die Betrachtung der Zeitverteilung für die Maximaldosis für die 2'000 Realisierungen erlaubt wichtige Schlüsse auf die Dynamik des gesamten Systems, insbesondere auch auf die Bedeutung und das Verhalten der Abdichtsysteme (Abbildung N-7 bis Abbildung N-9). In diesen und den folgenden Abbildungen ist an der Art des Symbols erkennbar, welcher Einlagerungsbereich den größten Beitrag zur Maximaldosis liefert.

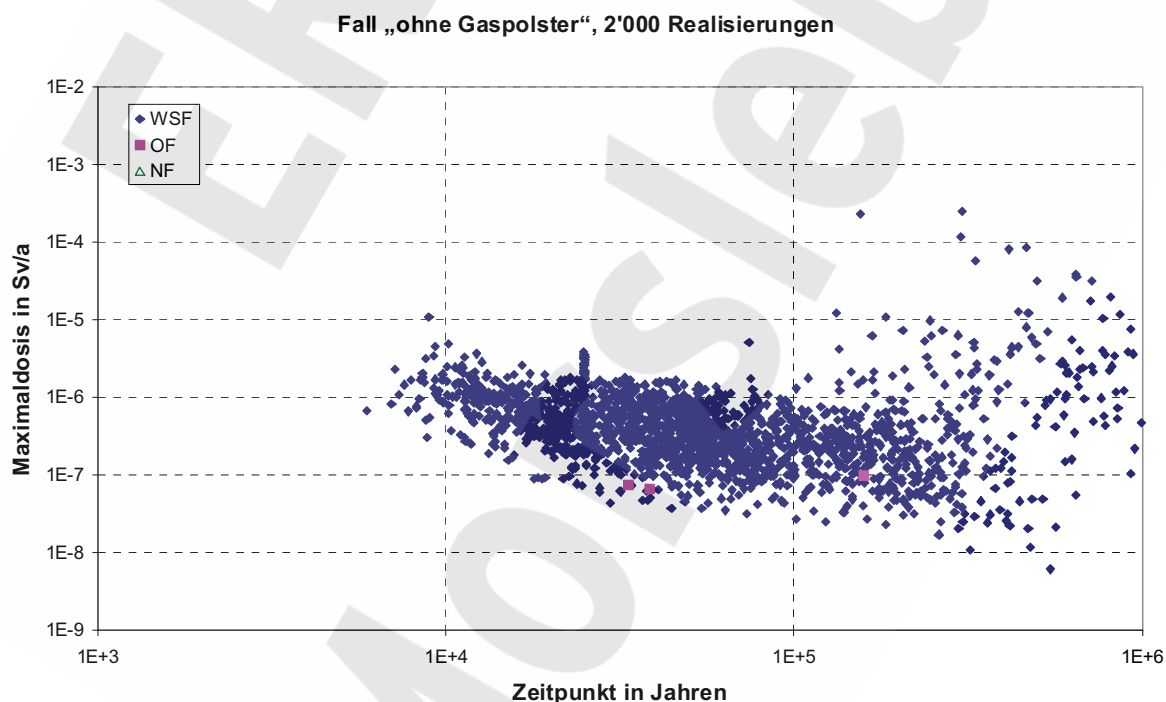


Abbildung N-7: Zeitpunkt und Wert der Maximaldosis für den Fall „ohne Gaspolster“

Im Fall „ohne Gaspolster“ (Abbildung N-7) wird das Dosismaximum in fast allen Fällen durch den ELB WSF bestimmt. Dabei fällt die deutliche Korrelation zwischen dem Zeitpunkt und der Höhe des Maximums auf. Die wenigen Dosismaxima nach mehr als 100'000 Jahren, die nicht dieser

⁷⁵ wovon zwei Rechenfälle eine Maximaldosis zwischen 0,3 mSv/a und 0,316 mSv/a ergeben und deshalb dem Intervall [0,178 mSv/a, 0,316 mSv/a] angehören

Korrelation folgen und oberhalb von 0,01 mSv/a liegen, werden sämtlich durch ^{234}U verursacht (vgl. Abbildung N-10).

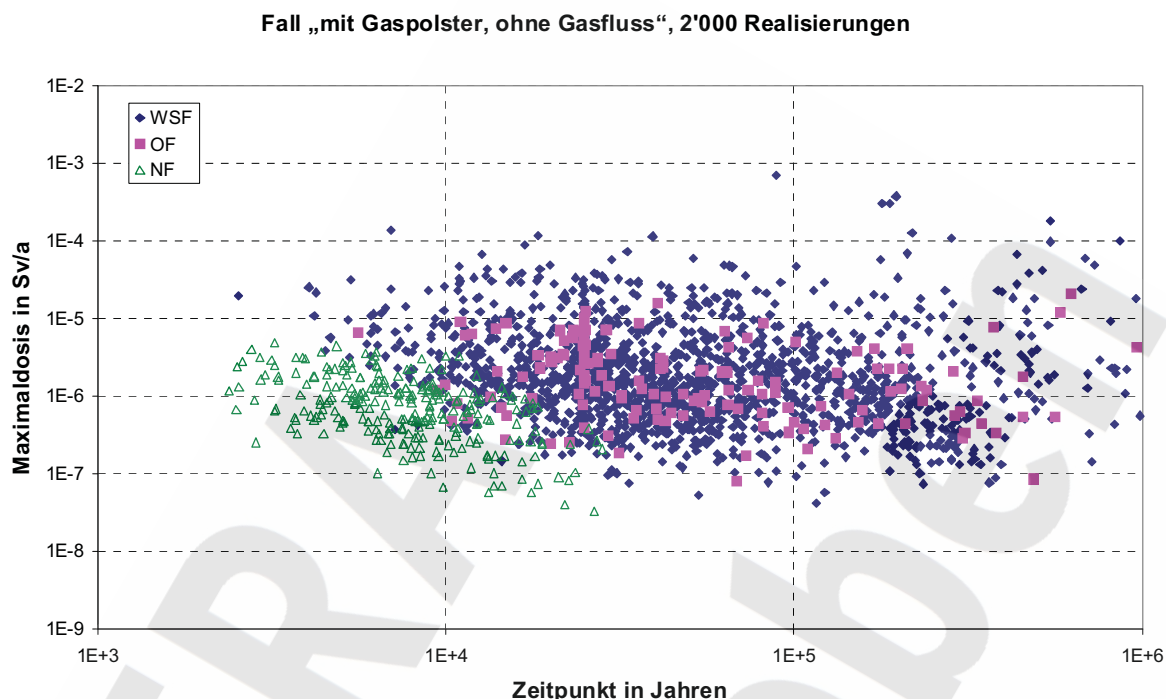


Abbildung N-8: Zeitpunkt und Wert der Maximaldosis für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“

Im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ (Abbildung N-8) ist keine deutliche Korrelation zwischen Zeitpunkt und Höhe der Dosismaxima erkennbar. In vielen Fällen ist nun der nicht abgedichtete ELB NF dosisdominierend; diese Maxima können ab ca. 2'000 Jahre erreicht werden. Der Grund dafür ist, dass die Gasbildung als zusätzliche treibende Kraft eine erhöhte Auspressung radionuklidhaltiger Lösung aus den Einlagerungsbereichen bewirkt. Dies wirkt sich besonders beim ELB NF aus, da hier die in kurzer Zeit gebildete Gasmenge im Verhältnis zum Volumen des Einlagerungsbereichs besonders hoch ist. Zudem beschleunigt der durch die Gasbildung zusätzlich verursachte Fluidstrom den Transport durch Hutgestein und Deckgebirge, was insgesamt zu höheren Maximaldosen führt. Die Maximaldosis aus dem ELB NF wird in den meisten Fällen durch das $^{14}\text{CH}_4$ bestimmt. Maxima aus dem ELB NF treten zu relativ frühen Zeiten, d.h. bis etwa 30'000 Jahre auf. Der Wert des Dosismaximums liegt dabei stets unterhalb 0,01 mSv/a. Sonst werden Dosismaxima vor 10'000 Jahren fast ausschließlich durch den ELB WSF verursacht. Diese Werte liegen meist deutlich höher als die aus dem ELB NF, zwei dieser frühen Maxima sind oberhalb 0,1 mSv/a. Durch das Ostfeld verursachte Dosismaxima treten wegen der langen Abdichtungen des ELB OF (mit einer Ausnahme) erst nach mehr als ca. 10'000 Jahren auf. Die höchsten Maxima überhaupt treten nach rund 100'000 Jahren oder später auf und werden durch den ELB WSF verursacht.

Die Fälle „ohne Gaspolster“ und „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ sind als Extremfälle aufzufassen. Die Resultate zeigen, dass für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ (Abbildung N-9) niedrigere Dosiswerte zu erwarten sind als für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“, da durch das Entweichen von Gas die radionuklidhaltige Lösung erheblich langsamer ausgepresst wird. Die Dosis-



maxima werden in der Regel erst zu späteren Zeiten als bei den Fällen „ohne Gaspolster“ und „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ erreicht: Solange sich noch Gas im Einlagerungsbereich befindet, wird überwiegend Gas durch die Abdichtungen ausgepresst, d.h. deutlich weniger Flüssigkeit als in den Fällen „ohne Gasfluss“. Wenn alles Gas ausgepresst ist, erhöht sich die Auspressrate für Flüssigkeit und damit für Radionuklide sprunghaft, und meistens wird erst dann das Dosismaximum erreicht.

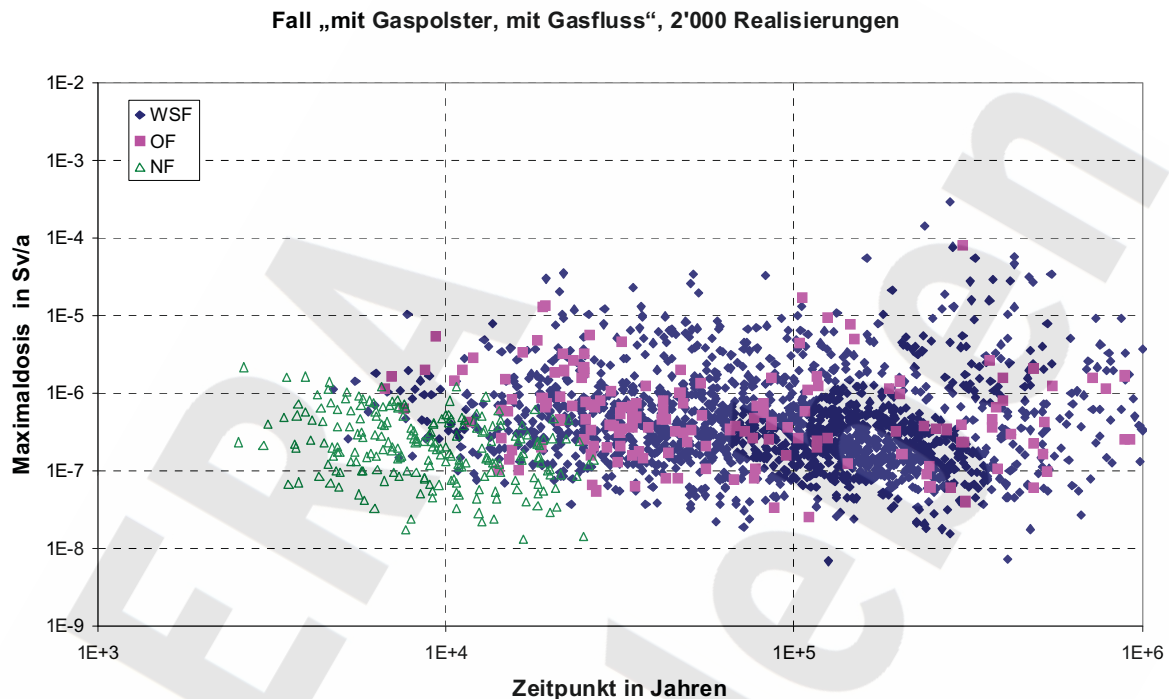


Abbildung N-9: Zeitpunkt und Wert der Maximaldosis für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“

Des Weiteren ist in Abbildung N-10 bis Abbildung N-12 nochmals Zeitpunkt und Wert der Maximaldosis aufgetragen, wobei zusätzlich das dosisdominierende Radionuklid an der Art des Symbols identifiziert werden kann. Im Fall „ohne Gaspolster“ (Abbildung N-10) sind die frühen Maxima nahezu ausschließlich durch $^{14}\text{CH}_4$ dominiert. Im Zeitintervall zwischen etwa 10'000 Jahren bis 500'000 Jahre, in welchem Zeitpunkt und Wert des Dosismaximums sehr gut miteinander korreliert sind, bestimmt ^{126}Sn das Dosismaximum. Zwischen etwa 100'000 Jahren und 500'000 Jahren, auch mit einer deutlichen Korrelation zwischen Zeitpunkt und Höhe des Maximums, aber oberhalb der Werte von ^{126}Sn , gibt es Realisierungen, in denen ^{237}Np den höchsten Dosisbeitrag liefert. Zwischen 10^5 Jahren und 10^6 Jahren liegen Fälle mit ^{226}Ra als dosisdominierendem Radionuklid. In diesem Zeitintervall gibt es auch zahlreiche Realisierungen, für die als dosisdominierendes Radionuklid ^{234}U ausgewiesen ist. Bei diesen Rechenfällen ist der Dosiswert meistens höher als bei den anderen Maxima, welche zur gleichen Zeit auftreten; sämtliche Fälle oberhalb 0,007 mSv/a gehören zu dieser Kategorie. Dabei ist zu beachten, dass der Dosisbeitrag „ ^{234}U “ in den Ergebnissen von PROSA die Summe der Dosisbeiträge dieses Radionuklids und aller weiteren Tochternuklide der ^{238}U -Zerfallsreihe repräsentiert, die entlang des Transportwegs durch Hutgestein und Deckgebirge und weiter im oberflächennahen Grundwasser gebildet werden, (vgl. Anhang A, Kapitel A.11). Der größte Beitrag stammt in diesen Fällen also ebenfalls vom ^{226}Ra .

Die Maxima bei genau 25'000 Jahren, welche ^{226}Ra zugewiesen werden, stellen einen Modellartefakt dar. Sie werden dadurch bewirkt, dass der Algorithmus, welcher Überkonservativitäten bei der vereinfachten Modellierung der ^{238}U -Zerfallsreihe verhindern soll, erst nach Zeiten > 25'000 Jahren einsetzt (vgl. Anhang A, Kapitel A.11, Gleichung (A-163)). Zu dieser Zeit ist das anfänglich vorhandene ^{226}Ra weitestgehend zerfallen, während der aus den Vorläufern ^{234}U und ^{230}Th aufgebaute Anteil noch vergleichsweise gering ist. Letzterer ist aber in einigen probabilistischen Rechnungen bereits groß genug, um das Dosismaximum zu bestimmen. Weil zu dieser Zeit die stärker sorbierenden Vorläuferradionuklide erst einen geringen Weg durch Hutgestein und Deckgebirge zurückgelegt haben und das daraus gebildete ^{226}Ra auf der restlichen Transportstrecke größtenteils zerfällt, wird der tatsächliche Beitrag des ^{226}Ra bei den Parameterkombinationen, die diese Rechenfälle charakterisieren, deutlich niedriger ausfallen.

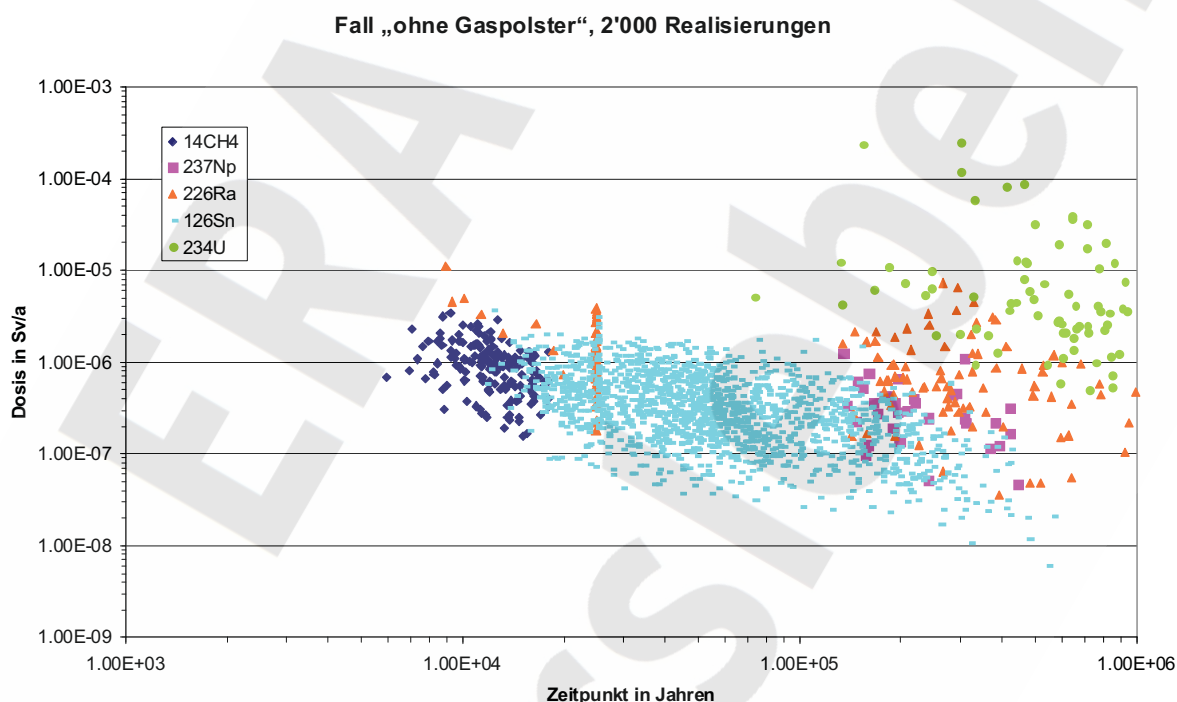


Abbildung N-10: Zeitpunkt und Wert der Maximaldosis sowie dosisdominierendes Radionuklid für den Fall „ohne Gaspolster“

Für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ sehen diese Ergebnisse qualitativ ähnlich aus (Abbildung N-11). Der wesentliche Unterschied zum vorigen Fall liegt in der Gasbildung als zusätzlicher treibender Kraft für die Radionuklidauspressung aus Einlagerungsbereichen und Grube, wodurch die Maxima früher auftreten und etwas höher ausfallen. Aus diesem Grund treten auch einige frühe, durch ^{226}Ra dominierte Maxima auf, das in diesen Fällen überwiegend aus dem Einlagerungsbereich West-Südfeld stammt (Abbildung N-8) und dem ursprünglich eingelagerten Radiuminventar zuzuordnen ist.

Die Ergebnisse des Falls „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ (Abbildung N-12) sind qualitativ zwischen denen der beiden anderen Fälle einzuordnen. Frühe Fälle, in denen die maximale Freisetzung durch ^{226}Ra bestimmt wird, kommen hier seltener vor als im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“.

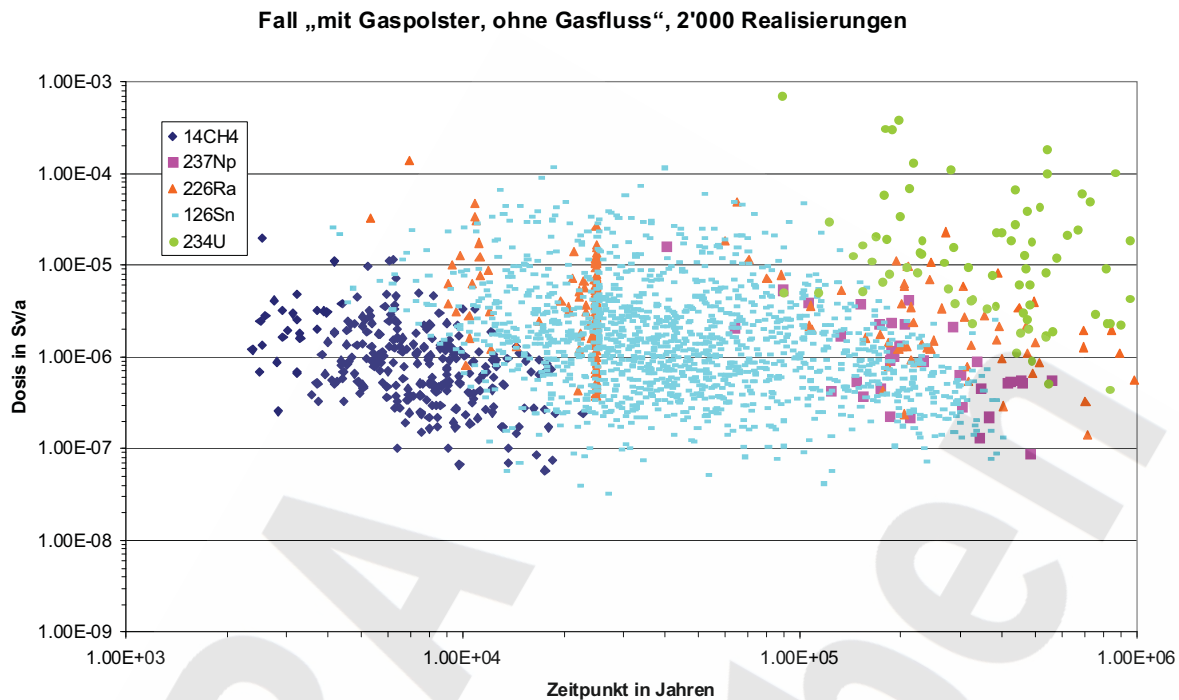


Abbildung N-11: Zeitpunkt und Wert der Maximaldosis sowie dosisdominierendes Radionuklid für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“

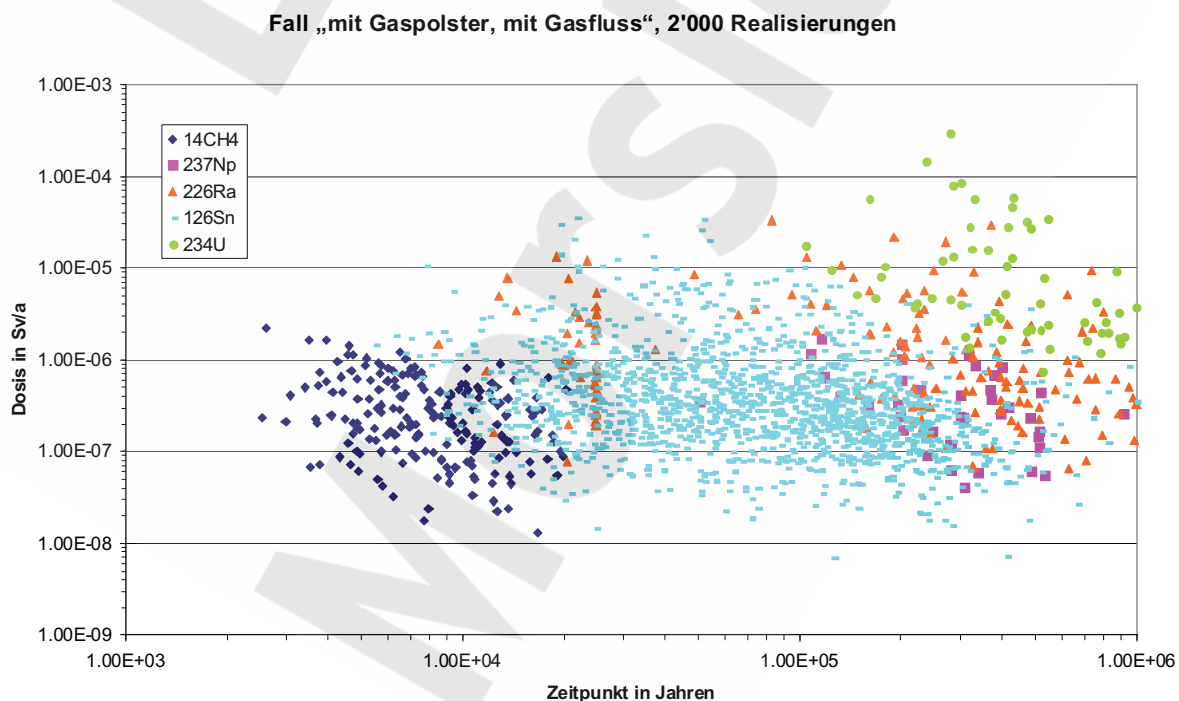


Abbildung N-12: Zeitpunkt und Wert der Maximaldosis sowie dosisdominierendes Radionuklid für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“

N.2.3 Abhängigkeit der Maximaldosis vom maximalen Lösungsfüllgrad

Der Lösungsfüllgrad entspricht dem Verhältnis von Lösungsmenge im Einlagerungsbereich zum Gesamthohlraumvolumen des Einlagerungsbereichs und ist damit eine zeitabhängige Größe. Er ist ein Maß für die zugetretene Lösungsmenge und daher für eine Reihe der später ablaufenden Prozesse von besonderer Bedeutung, insbesondere für die Konzentration der Radionuklide in der ausgepressten Lösung und für die Dauer der Auspressphase. Im Folgenden wird ausschließlich der maximale Lösungsfüllgrad des dosisbestimmenden Einlagerungsbereichs für die Fälle „mit Gaspolster“ betrachtet.

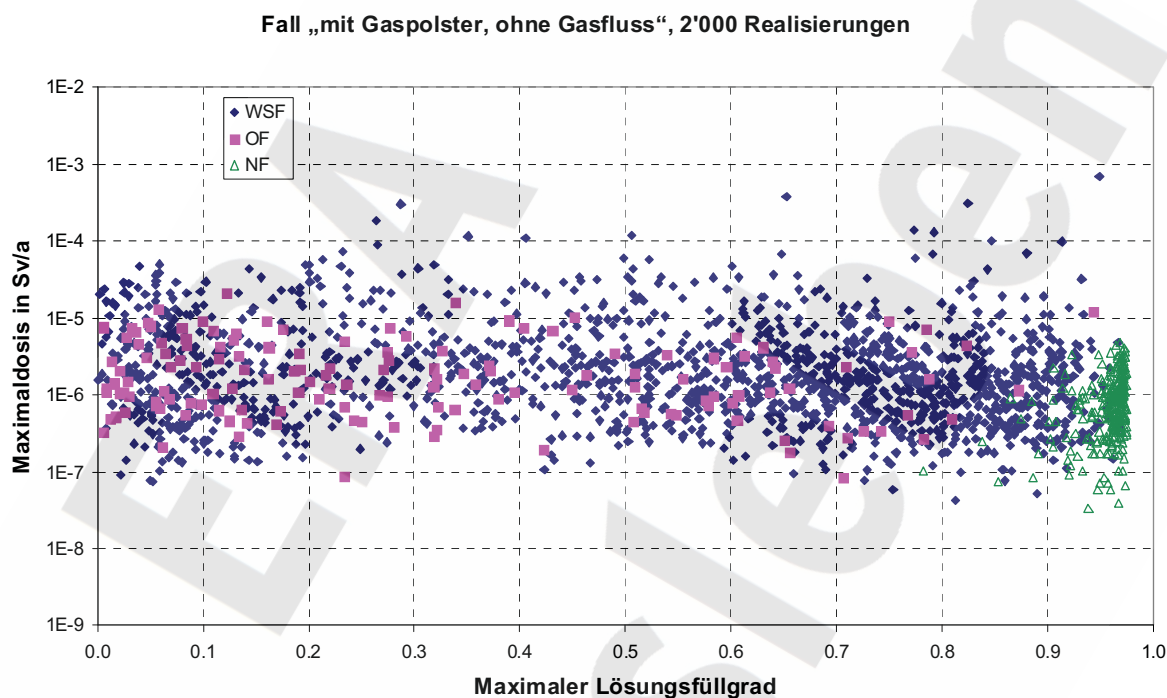


Abbildung N-13: Wert der Maximaldosis als Funktion des maximalen Lösungsfüllgrads im relevanten Einlagerungsbereich für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“

Im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ (Abbildung N-13) dominiert der ELB WSF die Dosis vor allem dann, wenn er weitgehend mit Lösung gefüllt ist. Bei solchen Verhältnissen treten auch die höchsten Dosismaxima auf. Dies ist auf die vergleichsweise kurzen Abdichtungen des ELB WSF zurückzuführen. In Fällen, in denen diese aufgrund der Korrosion des Salzbetons zu relativ frühen Zeiten ausfallen, ist die Gasbildung noch nicht weit fortgeschritten. Der Einlagerungsbereich wird dann weitgehend mit Lösung gefüllt, und die Gasbildung presst anschließend mit hoher Rate die radionuklidhaltige Lösung durch die korrodierte Abdichtung. Der ELB OF dagegen wird in den meisten Fällen nur zu einem geringen Anteil mit Lösung gefüllt, weil die Abdichtungen lang sind und in der Regel nur zu einem Bruchteil ihrer Länge korrodieren. Daher treten auch die durch den ELB OF bewirkten Dosismaxima meist bei kleinen Füllgraden auf. Im Einlagerungsbereich Nordfeld, der nicht abgedichtet ist, wird immer ein Lösungsfüllgrad von 1 erreicht (aufgrund der Behandlung im Rechenmodell als abgedichteten Einlagerungsbereich mit sehr kurzer Abdichtung bleibt der Lösungsfüllgrad i.d.R. knapp unter dem Wert von 1).

Niedrige Füllgrade in den abgedichteten Einlagerungsbereichen West-Südfeld und Ostfeld (Werte $< 0,1$) sind meist ein Zeichen dafür, dass das Abdichtsystem in diesem Fall nicht vollständig korrodiert ist. Die resultierenden Strahlenexpositionen werden dann durch die Vereinfachungen des Modells stark überschätzt:

- **Mobilisierter Anteil des Radionuklidinventars:** Wenn die Abdichtsysteme eine niedrige Permeabilität aufweisen und weitgehend unkorrodiert bleiben, sind im ELB WSF zu Beginn der Auspressphase ca. $11'000 \text{ m}^3$ Flüssigkeit vorhanden, im ELB OF ca. $3'600 \text{ m}^3$. Dabei handelt es sich größtenteils um Flüssigkeit, die mit den Abfällen eingebracht wurde, sowie um das Haftwasser des Salzversatzes (zum Vergleich: Das wirksame Gesamthohlraumvolumen des ELB WSF beträgt im Referenzfall $5,5 \cdot 10^5 \text{ m}^3$, jenes des ELB OF $5,6 \cdot 10^4 \text{ m}^3$). Im Modell wird nun angenommen, dass diese Flüssigkeit sich komplett bei den Abfällen befindet und das Radionuklidinventar löst (im ELB WSF vollständig, im ELB OF nur soweit, als die Abfallgebilde vom Flüssigkeitsspiegel erreicht werden; vgl. Anhang I, insbesondere Abbildung I-2).
- **Löslichkeit:** Unter diesen Bedingungen (kein nennenswerter Zutritt von Lösung zu den Einlagerungsbereichen, daher auch keine IP21-Lösung) wäre anzunehmen, dass zumindest bei den verfestigten Abfällen (Zement, BFA) die Radionuklide durch Sorption und begrenzte Löslichkeit weitgehend immobil sind. Bei den Modellrechnungen bleibt dies generell unberücksichtigt.
- **Freigesetzter Anteil der radionuklidhaltigen Lösung:** Das Modell berücksichtigt nicht die geometrischen Verhältnisse in den Einlagerungsbereichen: Die gesamte radionuklidhaltige Lösung kann ausgepresst werden. Im Fall kleiner Flüssigkeitsmengen führt diese Vereinfachung zu einer erheblichen Überschätzung des freigesetzten Radionuklidanteils: Die mit dem Salzversatz und den verfestigten Abfällen eingebrachte Feuchtigkeit ist physikalisch fixiert und daher nicht „flüssig“. Bei niedrigen Füllgraden ist es überkonservativ, davon auszugehen, dass sich alle Flüssigkeit vor der untersten Abdichtung ansammelt, um dort ausgepresst zu werden. Das gilt insbesondere für das Südfeld mit seinen Unterwerksbauten (-420 mNN, -454 mNN, -461 mNN und -475 mNN) unterhalb der tiefsten Abdichtung (-372 mNN). Im Einlagerungsbereich West-Südfeld darf zudem angenommen werden, dass in diesen Fällen der Flüssigkeitsspiegel im Südfeld das Niveau der 1. Sohle nicht erreicht. Dann tritt keine Flüssigkeit über die dauerhaft offene Verbindung zwischen dem Südfeld und dem Westfeld – von Abbau 1s auf der -253 mNN Sohle (SF) zum Westgesenk (WF, Bereich -332 mNN Sohle) – über. Da zudem die Strecken zwischen Süd- und Westfeld entsprechend Kategorie I, d.h. mit besonderen Anforderungen an die Dichtheit verfüllt werden, bleibt das Westfeld weitgehend trocken, und die dort in den Abfällen befindlichen Radionuklide werden weder mobilisiert noch ausgepresst. Die Menge an ^{234}U im Westfeld ist aber um eine Größenordnung höher als im Südfeld, an ^{238}U sogar um einen Faktor 15, vgl. Tabelle C-26. ^{238}U und ^{234}U sind Vorläufer des dosisrelevanten ^{226}Ra , ^{234}U ist oft selbst dosisdominierend. Auf diese Weise wird bei den Realisierungen mit einem Füllgrad deutlich unter 1 allein aus diesem Grund die Strahlenexposition um mehr als eine Größenordnung überschätzt.

Beim Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ (Abbildung N-14) treten im Vergleich zum vorigen Fall mehr Realisierungen auf, bei denen der Einlagerungsbereich Ostfeld eine niedrige Sättigung aufweist und das Dosismaximum dominiert. Auch beim Einlagerungsbereich West-Südfeld weisen die Rechenfälle mit den höchsten Maximaldosiswerten Lösungsfüllgrade kleiner als 0,3 auf. Ansonsten ist das Bild qualitativ ähnlich wie im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ (Abbildung N-13).



Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“, 2'000 Realisierungen

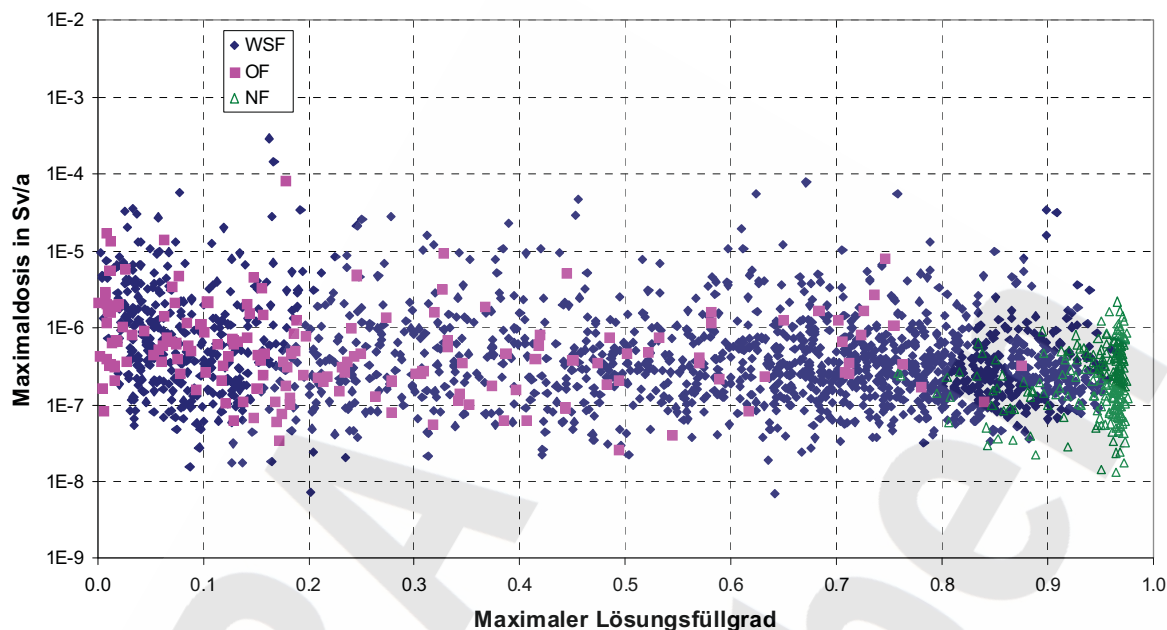


Abbildung N-14: Wert der Maximaldosis als Funktion des maximalen Lösungsfüllgrads im relevanten Einlagerungsbereich für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“

N.2.4 Dosisdominierende Radionuklide und Einlagerungsbereiche

Das dosisdominierende Radionuklid einer jeden Berechnung ist das Radionuklid mit dem maximalen Beitrag zum Dosismaximum, der dosisdominierende Einlagerungsbereich entsprechend der Einlagerungsbereich mit dem maximalen Beitrag.

Von den insgesamt 43 potentiell relevanten, in den Modellrechnungen berücksichtigten Radionukliden erweisen sich letztlich lediglich fünf als dosisdominierend: ^{14}C (als $^{14}\text{CH}_4$), ^{126}Sn , ^{226}Ra , ^{234}U und ^{237}Np . Es zeigt sich, dass in allen Fällen in Bezug auf den Gaseinfluss ^{126}Sn aus dem West-Südfeld am häufigsten die Dosis dominiert, gefolgt von ^{226}Ra aus dem West-Südfeld sowie $^{14}\text{CH}_4$ aus dem Nordfeld und – im Fall ohne Gaspolster – aus dem West-Südfeld. ^{126}Sn aus dem Ostfeld und ^{234}U aus dem West-Südfeld sind seltener dosisdominierend (Abbildung N-15 bis Abbildung N-17). In einigen der Fälle, in denen die Radionuklide der ^{238}U -Zerfallsreihe durch die Sorption entlang des Transportwegs durch Hutgestein und Deckgebirge wirksam zurückgehalten werden, liefert auch ^{237}Np den höchsten Beitrag zum Dosismaximum. Von besonderem Interesse für die Langzeitsicherheit sind allerdings die Fälle mit den höchsten Maximaldosiswerten (Abbildung N-18 bis Abbildung N-20). Hier hat das Nordfeld keine Bedeutung mehr. Die Realisierungen mit den höchsten Strahlenexpositionen werden im Fall ohne Gaspolster dominiert durch ^{234}U , ^{226}Ra , $^{14}\text{CH}_4$ und ^{126}Sn aus dem West-Südfeld, in den Fällen mit Gaspolster durch ^{126}Sn , ^{234}U und ^{226}Ra hauptsächlich aus dem West-Südfeld, seltener aus dem Ostfeld. Von ^{234}U , ^{226}Ra und ^{126}Sn kann angenommen werden, dass sie in Wirklichkeit an den Versatzstoffen in Einlagerungsbereich und Grube gut sorbieren; dies wurde in den Modellrechnungen jedoch nicht berücksichtigt (vgl. Anhang H). Für ^{126}Sn wurde außerdem für den Transportweg durch Hutgestein und Deckgebirge konservativ ein K_d -Wert von 0 angesetzt, weil weder für das ERAM noch für die vergleichbaren



Verhältnisse in der Unterkreide am Standort des Endlagers Konrad entsprechende Messungen vorliegen. Diese Annahme ist konservativ; unter Süßwasserverhältnissen zeigt Zinn eine starke Sorption an tonigen Materialien.

Fall „ohne Gaspolster“, 2'000 Realisierungen

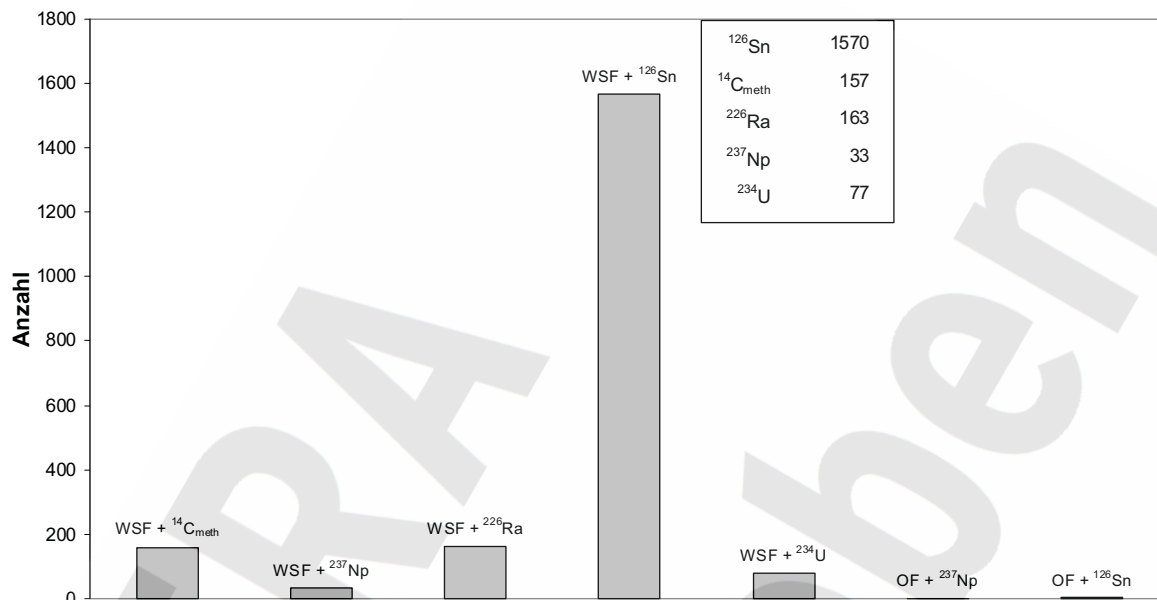


Abbildung N-15: Dominierende Kombination von Einlagerungsbereich und Radionuklid bei 2'000 Rechenläufen für den Fall „ohne Gaspolster“; die Legende gibt zusätzlich die Häufigkeit an, mit der ein Radionuklid die Maximaldosis dominiert

Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“, 2'000 Realisierungen

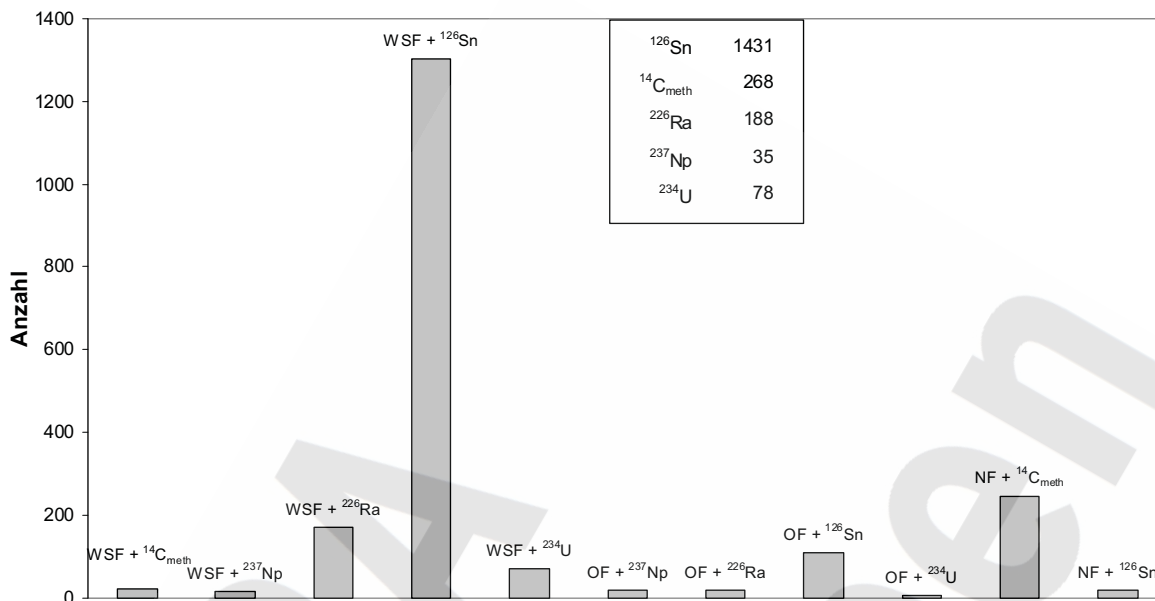


Abbildung N-16: Dominierende Kombination von Einlagerungsbereich und Radionuklid bei 2'000 Rechenläufen für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“

Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“, 2'000 Realisierungen

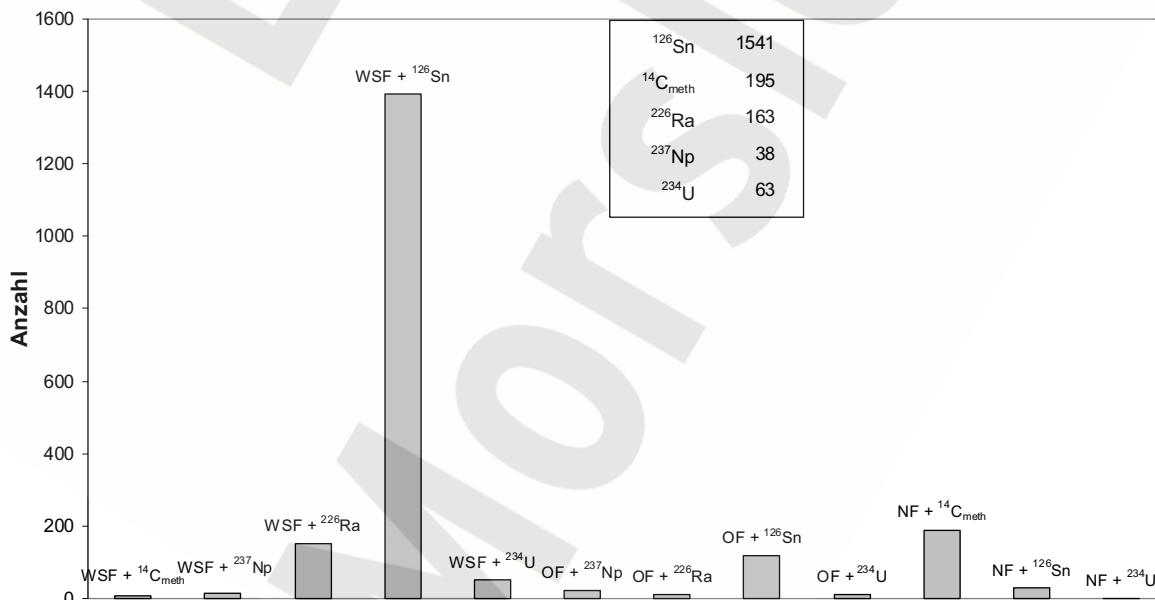


Abbildung N-17: Dominierende Kombination von Einlagerungsbereich und Radionuklid bei 2'000 Rechenläufen für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“



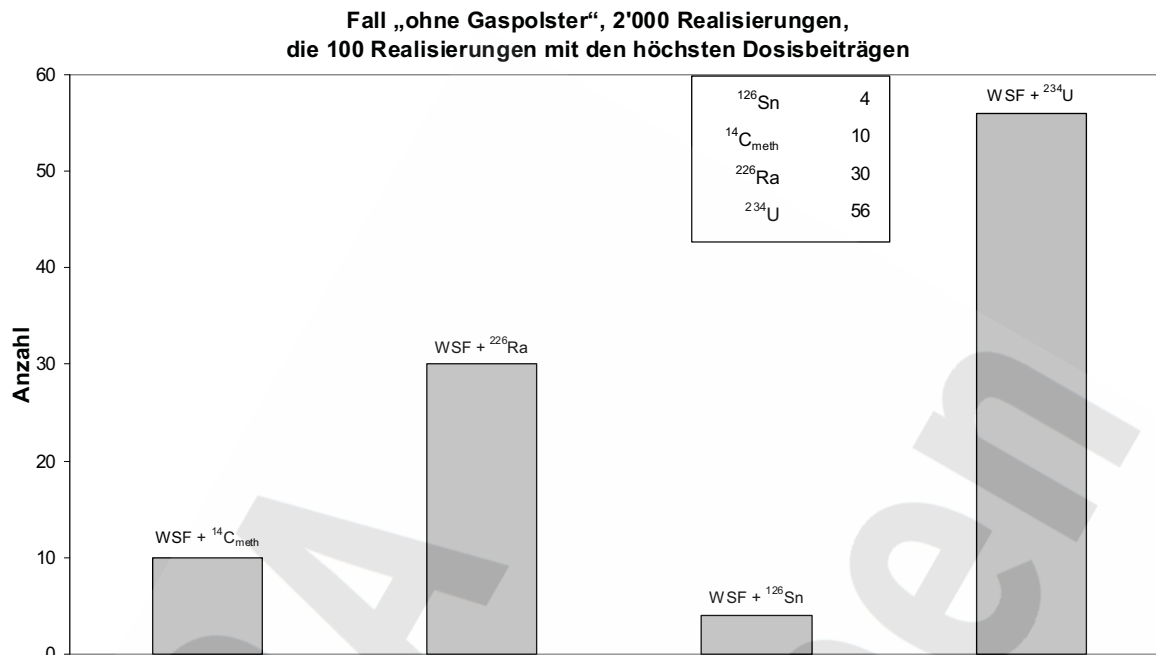


Abbildung N-18: Dominierende Kombination von Einlagerungsbereich und Radionuklid bei 2'000 Rechenläufen für den Fall „ohne Gaspolster“ (Realisierungen mit den 100 höchsten Dosiswerten)

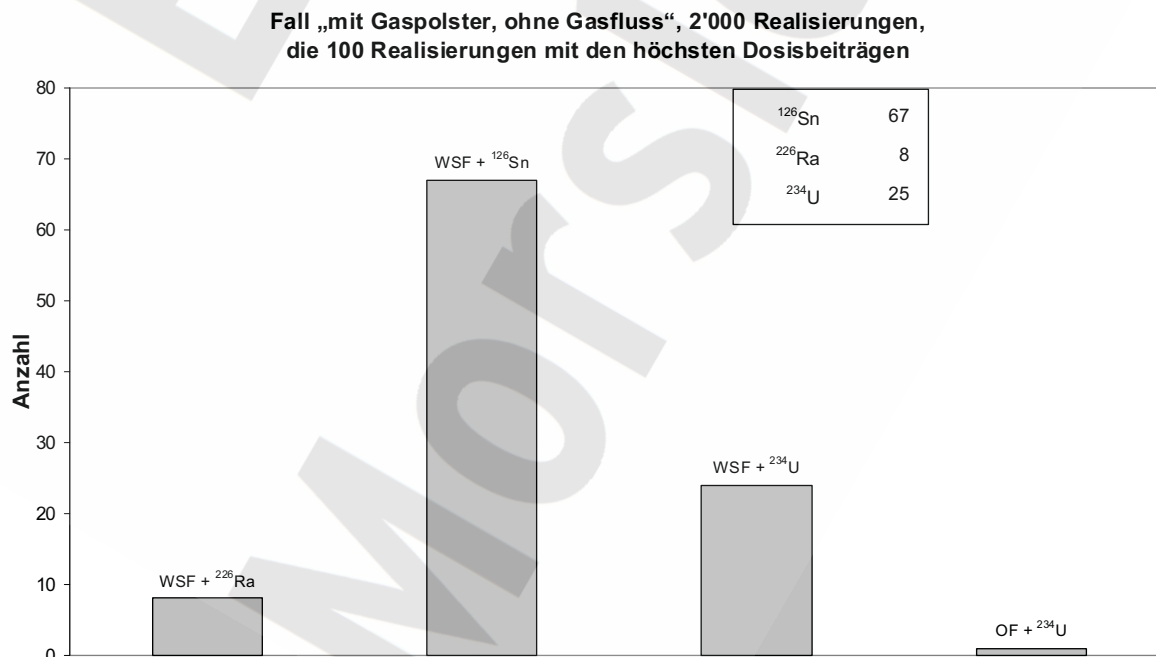


Abbildung N-19: Dominierende Kombination von Einlagerungsbereich und Radionuklid bei 2'000 Rechenläufen für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ (Realisierungen mit den 100 höchsten Dosiswerten)

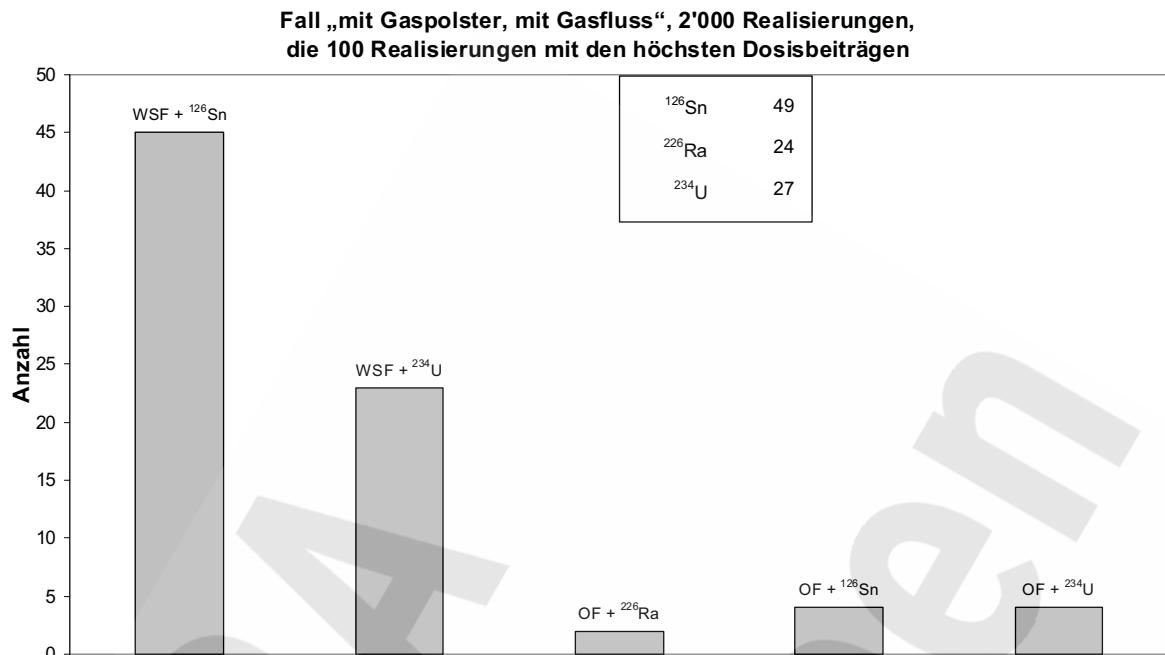


Abbildung N-20: Dominierende Kombination von Einlagerungsbereich und Radionuklid bei 2'000 Rechenläufen für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ (Realisierungen mit den 100 höchsten Dosiswerten)

N.3 Repräsentativität der Rechenfälle

Die Aussagen des vorigen Kapitels sind wesentlich von der Qualität der Monte-Carlo-Simulation bestimmt. Es muss sichergestellt sein, dass die Anzahl der Realisierungen ausreicht, um belastbare Ergebnisse zu erhalten und verlässliche statistische Aussagen machen zu können. Im Folgenden wird gezeigt, dass dies für die obigen Resultate zutrifft.

Abbildung N-21 bis Abbildung N-23 geben den Mittelwert der Maximaldosis als Funktion der Anzahl der bisher berechneten Realisierungen für die drei Fälle wieder. Dieser laufend berechnete Mittelwert stabilisiert sich in allen drei Fällen bereits nach ca. 100 – 200 Realisierungen. Dies zeigt, dass die gewählte Anzahl von Realisierungen ausreicht, um den Erwartungswert gut zu bestimmen. Auch die Bandbreite der ermittelten Dosiswerte ändert sich nach einigen Hundert Realisierungen nicht mehr. Dies wird später gezeigt.

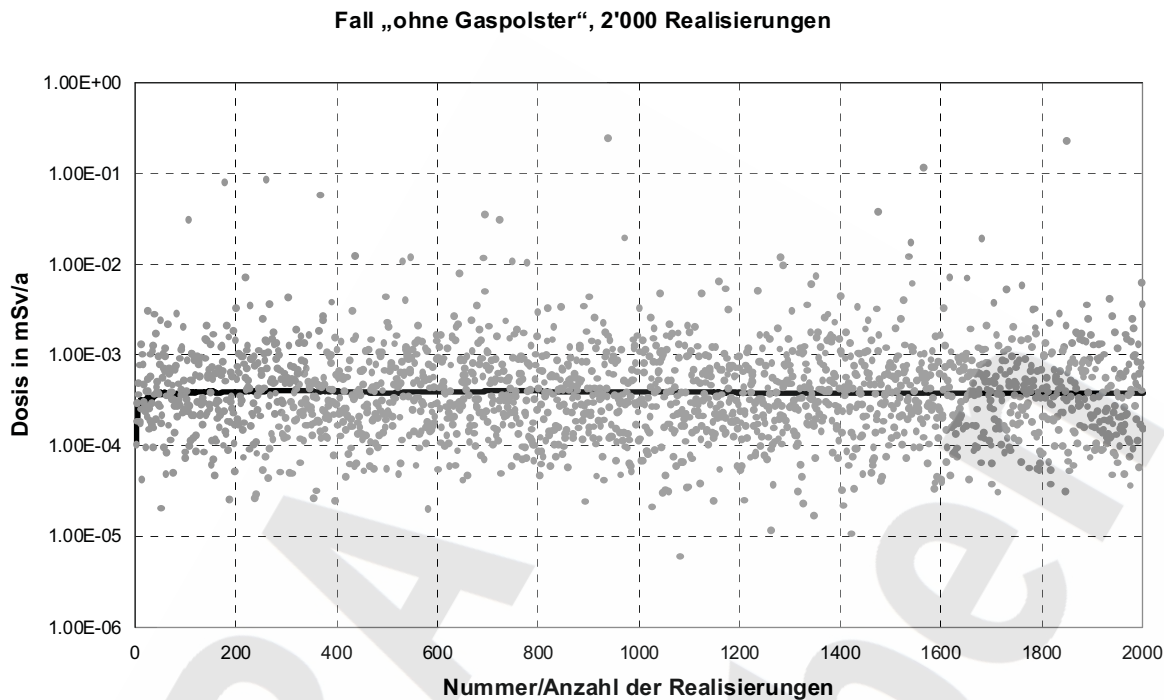


Abbildung N-21: Maximaldosis und laufender Mittelwert über die Anzahl der Realisierungen für den Fall „ohne Gaspolster“

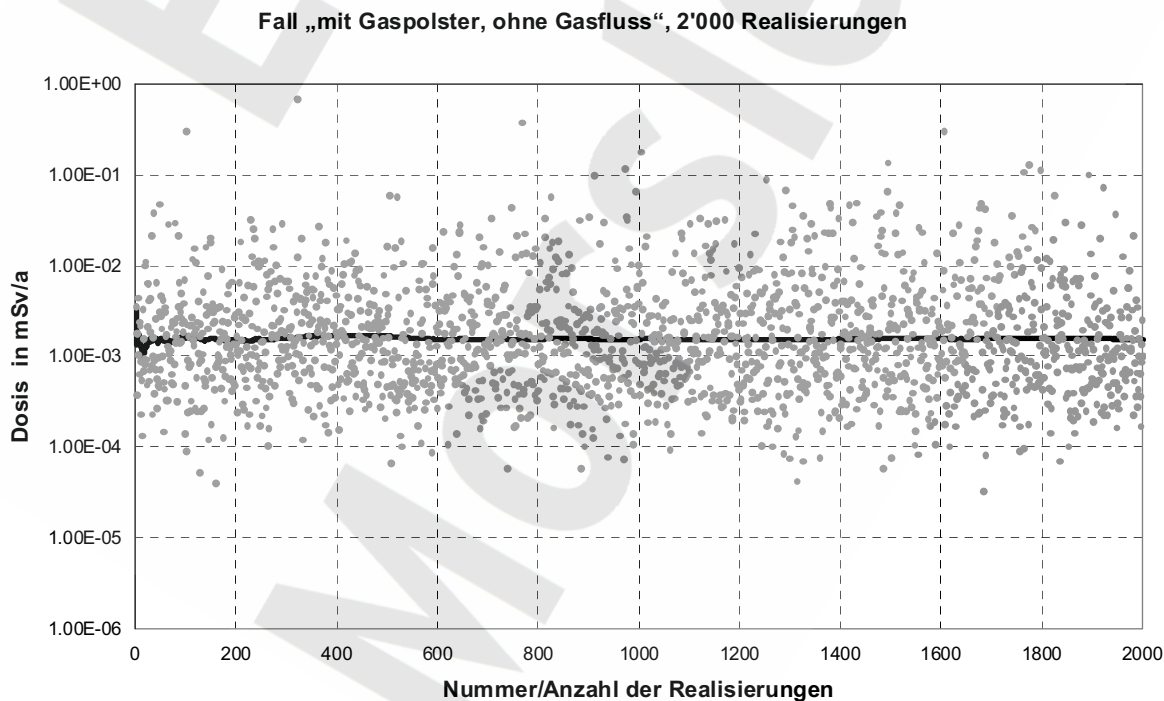


Abbildung N-22: Maximaldosis und laufender Mittelwert über die Anzahl der Realisierungen für den Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“

Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“, 2'000 Realisierungen

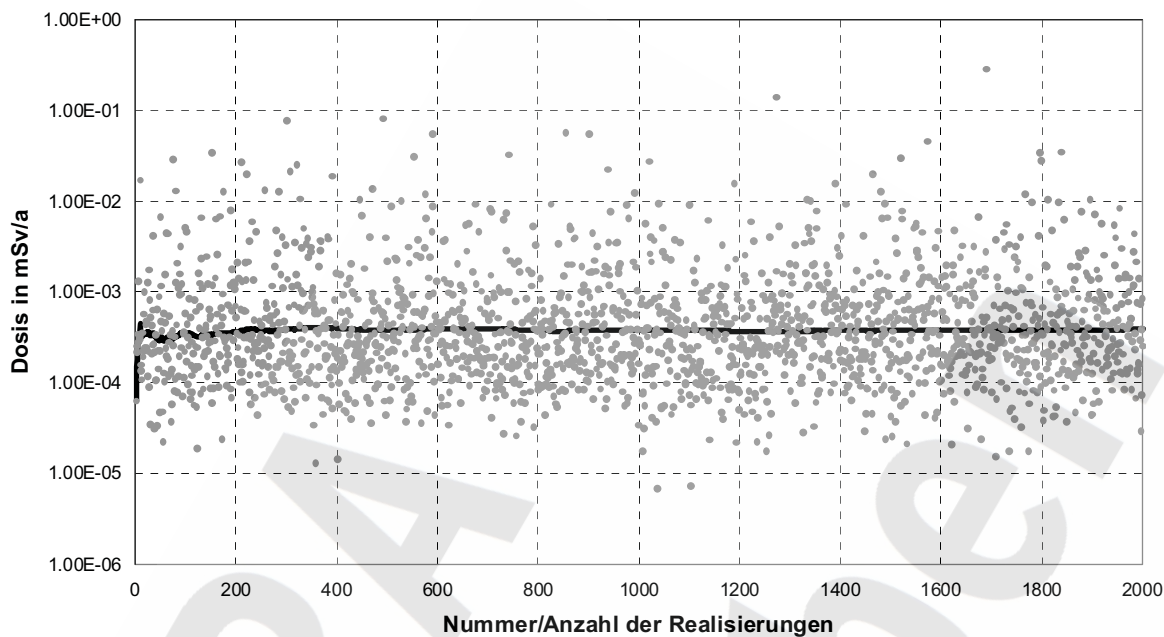
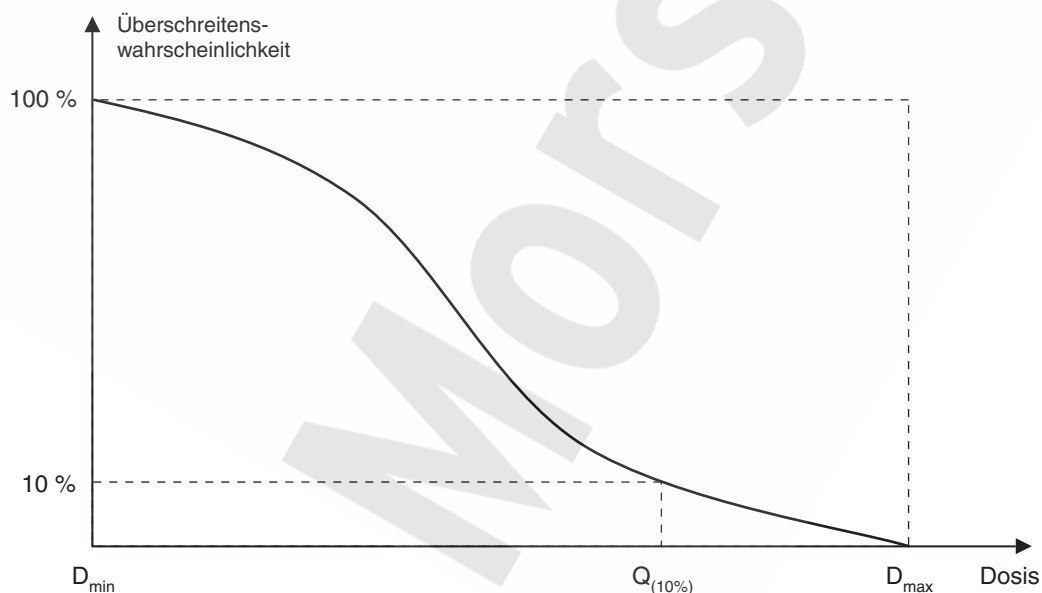


Abbildung N-23: Maximaldosis und laufender Mittelwert über die Anzahl der Realisierungen für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“

Eine weitere Möglichkeit, die statistische Zuverlässigkeit der erhaltenen Ergebnisse zu überprüfen, ist die Betrachtung der Quantile. Ein Quantil ist der (Dosis-)Wert, der mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit überschritten wird (Abbildung N-24).



4651/10p_quant.eps/shu/16.12.03

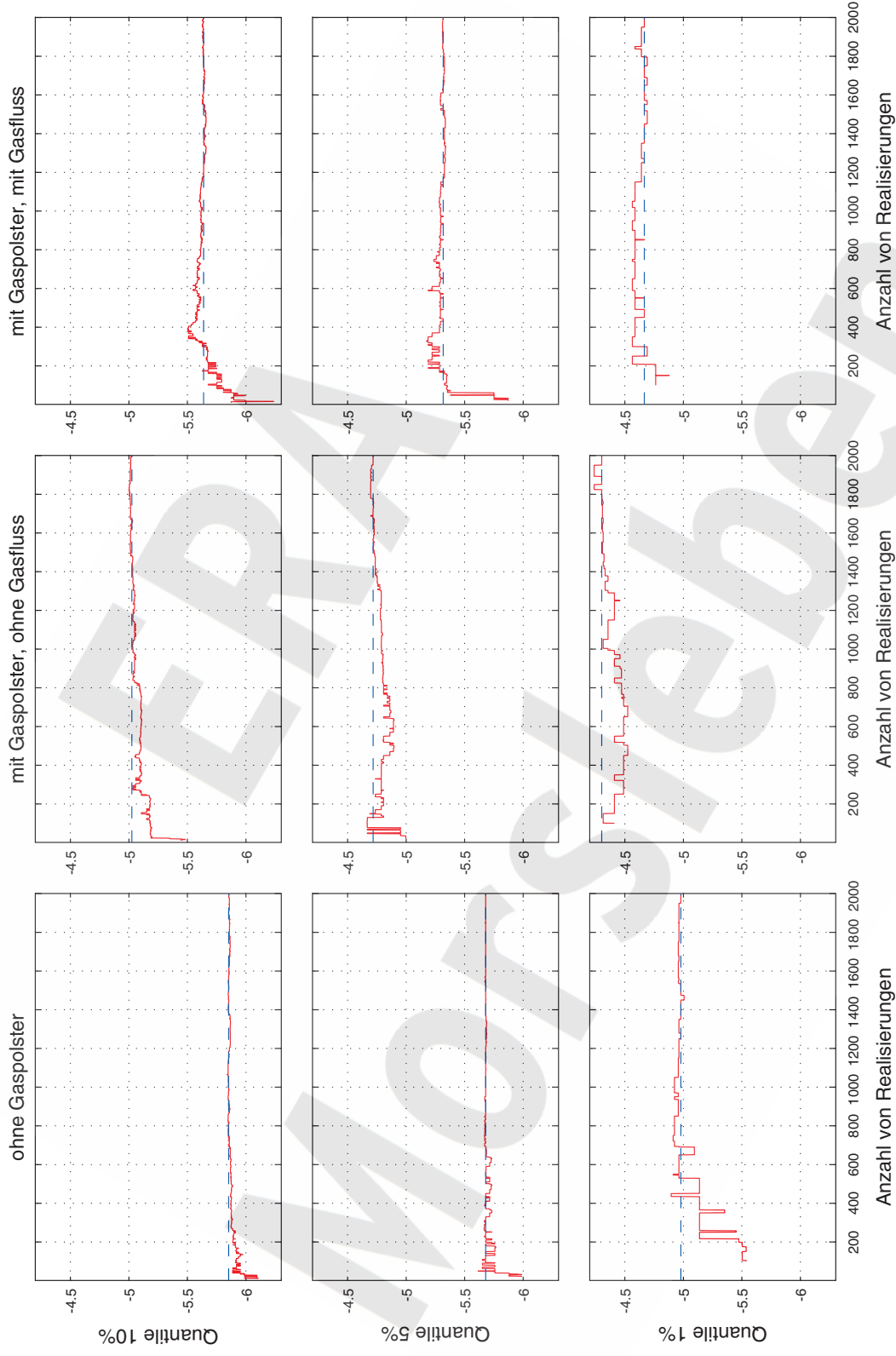
Abbildung N-24: Schematische Darstellung des 10%-Quantils



Die Aussagekraft der statistischen Ergebnisse wird aus der Betrachtung der Quantile ersichtlich (siehe Abbildung N-25). Quantile für höhere Überschreitenswahrscheinlichkeiten stabilisieren sich nach weniger Realisierungen als solche für niedrigere Überschreitenswahrscheinlichkeiten. Die Ergebnisse zeigen, dass 2'000 Realisierungen ausreichend sind, um eine zufriedenstellende Stabilität bis zur 1%-Quantile zu erreichen.

ERA
Morsleben





4651/berichte/50/quantilen.eps/shu/27.03.09

Abbildung N-25: Quantil (log. Dosiswert, der mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit überschritten wird) über der Anzahl Realisierungen



N.4 Zusammenfassung

In diesem Anhang wurden Ergebnisse der probabilistischen Rechnungen analysiert⁷⁶. Es konnte gezeigt werden, dass die erhaltenen Ergebnisse statistisch zuverlässig sind und eine fundierte Interpretation im probabilistischen Sinne ermöglichen.

In den meisten Rechenfällen ist der ELB WSF der dosisdominierende Einlagerungsbereich, wobei ¹²⁶Sn am häufigsten die Dosis bestimmt. Bei den Rechenfällen, bei denen das Nordfeld den höchsten Beitrag liefert (nur im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ von einer gewissen Bedeutung) ist das ¹⁴CH₄ die wichtigste Spezies. Seltener dominieren ²³⁴U und ²²⁶Ra aus dem West-Südfeld oder ¹²⁶Sn aus dem Ostfeld, in Ausnahmen auch ²³⁷Np aus dem West-Südfeld oder dem Ostfeld. Zusätzlich wurden die Einlagerungsbereiche und Radionuklide, die für die Realisierungen mit den höchsten Maximaldosen verantwortlich sind, identifiziert. Zumeist handelt sich hierbei um ¹²⁶Sn oder ²³⁴U aus dem ELB WSF, seltener um ²²⁶Ra, und in einigen Fällen ist es eines dieser Radionuklide aus dem ELB OF. Dabei repräsentiert ²³⁴U in den Ergebnissen von PROSA die Summe der Dosisbeiträge dieses Radionuklids und aller weiteren Tochternuklide der ²³⁸U-Zerfallsreihe, die entlang des Transportwegs durch Hutgestein und Deckgebirge und weiter im oberflächennahen Grundwasser gebildet werden. Der größte Beitrag stammt dabei vom ²²⁶Ra.

Von den 3 mal 2'000 Realisierungen wird der Wert von 0,3 mSv/a nach § 47, Abs. 1 StrlSchV nur im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ überschritten, und hier in 4 Realisierungen. In 53 Fällen liegt das Maximum oberhalb von 0,03 mSv/a. Bei der vorliegenden Stichprobengröße von 2'000 Realisierungen bedeutet dies, dass der Dosiswert von 0,03 mSv/a im Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“ mit einer Wahrscheinlichkeit von 97% bei einem Konfidenzgrad von 80% unterschritten wird.

⁷⁶ Die Korrelation der Maximaldosen mit den Parametern wird in Anhang O diskutiert.



Anhang O Identifikation relevanter Parameter

In diesem Anhang werden die Parameter mit dem größten Einfluss auf die Maximaldosis identifiziert. Ausgeschlossen von der Betrachtung sind die nicht variierten Parameter. Durch die Komplexität des nichtlinearen Systems mit einer Vielzahl von Eingangsparametern ist es nicht ohne weiteres möglich, diejenigen Einflussgrößen zu erkennen, die das Hauptergebnis, die Maximaldosis, am stärksten beeinflussen. Es wurden daher drei verschiedene Methoden angewandt, um basierend auf der Grundlage von 2'000 probabilistischen Rechnungen pro Fall die Relevanz der Parameter einschätzen zu können.

Für die Auswertung wurde bei allen logarithmisch verteilten Parametern sowie bei der Dosis jeweils mit dem logarithmierten Wert der Größe gearbeitet, ohne dass dies im Folgenden explizit angegeben wird. Da die radionuklidspezifischen Parameter ausschließlich über entsprechende Skalierungsfaktoren variiert werden, zeigt sich der Einfluss der radionuklidspezifischen Parameter anhand von diesen Skalierungsfaktoren.

O.1 Korrelationskoeffizient

O.1.1 Methode

Der Korrelationskoeffizient r_i von Parameter p_i und Dosis D berechnet sich nach

$$r_i = \frac{\text{Cov}(p_i, D)}{\sigma(p_i) \sigma(D)} \quad (\text{O-1})$$

wobei $\text{Cov}()$ die Kovarianz der betroffenen Größen und $\sigma()$ die Standardabweichung bezeichnet. Der Korrelationskoeffizient ist ein Maß dafür, inwieweit sich die Änderungen der Maximaldosis allein aus den Änderungen des Parameters p_i erklären lassen. Der Koeffizient variiert zwischen -1 und 1 , wobei 1 bzw. -1 einen eindeutigen linearen Zusammenhang zwischen der Größe und der Maximaldosis ausdrückt.

O.1.2 Ergebnis

Die Absolutwerte der Korrelationskoeffizienten sind wegen der Vielzahl der variierten Parameter allgemein sehr niedrig. Es lassen sich aber Gruppen von Parametern identifizieren, welche mit der Maximaldosis korreliert sind. Dies sind

- bei den einlagerungsbereichsspezifischen Parametern
 - die hydraulischen Parameter der Abdichtungen ($K_{1,i}$ und $K_3/K_{1,i}$)
 - die Parameter, welche die treibenden Kräfte für die Lösungsauspressung steuern (Konvergenzrate c_L sowie, bei den Fällen mit Gaspolster, die Parameter für die Gasbildung)



- bei den allgemeinen Parametern
 - die Verdünnung im oberflächennahen Grundwasser
 - die unabhängigen Parameter, welche die Transportdauer durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) beeinflussen: der Faktor der Variation der K_d -Werte im Deckgebirge (KS_{DGL}) und die Transportquerschnittsfläche im Hutgestein und Deckgebirge (A_2)
 - der Zeitpunkt des Volllaufens der übrigen Grube, t_{voll}
 - bei den Fällen „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ das Produkt aus dem Anteil der gasdurchströmten Querschnittsfläche im Abdichtsystem und der relativen Permeabilität für Gas während des Auspressvorgangs, f_g .

Diese Parameter beeinflussen maßgeblich die Verdünnung der aus dem Grubengebäude austretenden Lösung bzw. die Transportzeit. Es gibt jedoch keine scharfe Abgrenzung zu den weniger wichtigen Parametern, da in der Regel kein signifikanter Sprung in den Korrelationskoeffizienten besteht (siehe Tabelle O-1).

Tabelle O-1: Reihenfolge der Parameter, sortiert nach Korrelationskoeffizienten. Korrelationskoeffizienten mit einem Betrag $> 0,3$ sind dunkelgrau hinterlegt, $> 0,2$ hellgrau.

„ohne Gaspolster“									
Generelle Parameter		ELB WSF		ELB OF		ELB NF		ELB ZT	
Q_{GW}	-0.5082	c_L	0.4081	$Q_{g,1e2,tot}$	-0.0450	φ_N	0.0396	K_L	0.0483
KS_{DGL}	-0.2536	$K_{1,S}$	0.3664	β_{EB}	-0.0435	η	-0.0382	ζ_{VGk}	-0.0397
t_{voll}	-0.1661	$K_3/K_{1,S}$	0.1371	ζ_{EHk}	-0.0430	c_L	0.0379	ζ_{EHt}	0.0357
A_2	-0.1609	A_1	0.0667	$K_{1,S}$	0.0414	ϵ_1	0.0330	$\epsilon_{M,tot}$	0.0333
c_M	0.1031	L_1	-0.0595	c_{VG}	-0.0406	$\epsilon_{M,tot}$	-0.0313	φ_N	0.0310
„mit Gaspolster, ohne Gasfluss“									
Generelle Parameter		ELB WSF		ELB OF		ELB NF		ELB ZT	
Q_{GW}	-0.4221	c_L	0.2629	φ_N	0.0614	$Q_{g,1e2,tot}$	0.0609	K_L	0.0487
KS_{DGL}	-0.1744	η	0.2413	η	0.0596	V_{VG}	-0.0509	M_{BFA}	0.0416
c_{GG}	0.1475	$Q_{g,1e4,tot}$	0.2344	M_{VG}	-0.0403	$\rho_{B,ZEM}$	0.0480	ζ_{VGk}	-0.0351
A_2	-0.1401	$K_{1,S}$	0.2031	V_{REB}	-0.0391	ϵ_1	-0.0312	$Q_{g,1e2,tot}$	0.0312
t_{voll}	-0.0915	$K_3/K_{1,S}$	0.1373	ζ_{Vgt}	-0.0372	M_{ZEM}	-0.0289	$Q_{g,1e4,tot}$	0.0303
„mit Gaspolster, mit Gasfluss“									
Generelle Parameter		ELB WSF		ELB OF		ELB NF		ELB ZT	
Q_{GW}	-0.4029	c_L	0.3448	$Q_{g,1e2,tot}$	0.0788	$Q_{g,1e2,tot}$	0.0679	$Q_{g,1e2,tot}$	0.0492
KS_{DGL}	-0.2584	η	0.1731	$K_{1,M}$	0.0585	$Q_{g,1e4,tot}$	0.0360	$\epsilon_{M,tot}$	-0.0442
f_g	-0.1970	$Q_{g,1e4,tot}$	0.1583	c_L	0.0555	ζ_{EHt}	-0.0352	V_{VG}	0.0394
A_2	-0.1546	$K_{1,S}$	0.1123	ζ_{REBt}	0.0431	$\epsilon_{M,tot}$	0.0330	ϵ_1	0.0256
c_{GG}	0.1312	V_{REB}	-0.0732	K_L	-0.0431	ζ_{VGk}	0.0306	η	-0.0249

Des Weiteren ist festzustellen, dass die maximalen Korrelationskoeffizienten für die generellen Parameter sowie das West-Südfeld deutlich höher sind als für die Einlagerungsbereiche Ostfeld, Nordfeld und Zentralteil. Das hängt damit zusammen, dass letztere wenig bzw. gar keinen Einfluss auf die Maximaldosis haben (vgl. Anhang N).



Welche Parameter aufgrund ihrer Korrelationskoeffizienten als vernachlässigbar korreliert eingestuft werden können, lässt sich aus den hier statistisch ermittelten Korrelationskoeffizienten von jenen Parametern ableiten, welche physikalisch keinen Einfluss auf die Dosismaxima haben können und deshalb bei einer idealen Stichprobe den Korrelationskoeffizienten 0 haben. In Tabelle O-1 wurden aus diesem Grunde auch Parameter zur Sorption in der Grube, für den Fall „ohne Gaspolster“ zusätzlich Parameter zur Gasbildung aufgeführt. Mit den vorliegenden Stichproben wurden für solche Parameter Korrelationskoeffizienten bis 0,06 ermittelt.

O.2 Dosisrelevante Variabilität

O.2.1 Methode

Die dosisrelevante Variabilität DV_i bewertet die statistische Relevanz eines Parameters bezüglich der Änderung der Maximaldosis, die dieser aufgrund seiner Bandbreite hervorrufen kann (siehe Abbildung O-1). Sie wird wie folgt ermittelt

$$DV_i = |p_{i, \text{Extr}} - p_{i, \text{Ref}}| \cdot b_i \quad (\text{O-2})$$

Dabei gehen sowohl die Variabilität des Parameters über seinen Extremwert $p_{i, \text{Extr}}$ und seinen Referenzwert $p_{i, \text{Ref}}$ als auch die Steigung b_i der Regressionsgeraden $D' = b_0 + b_i \cdot p_i$ ein. Diese Steigung b_i repräsentiert die Sensitivität der Maximaldosis auf Änderungen des Parameters p_i . Da D und D' hier für den Logarithmus des Dosismaximums stehen, sagt der Wert von DV_i aus, um wie viele Größenordnungen in einem statistischen Sinne die maximale Dosis durch die Variation des betrachteten Parameters p_i verändert werden kann.

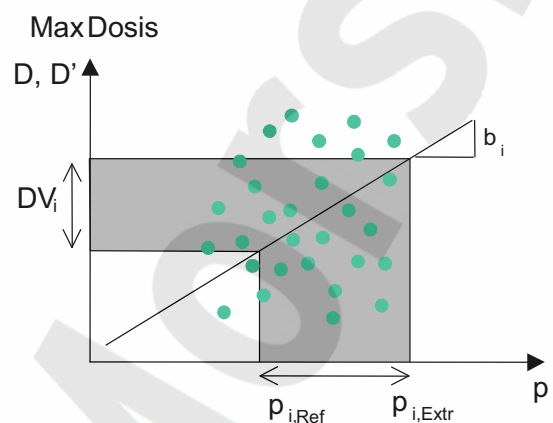


Abbildung O-1: Dosisrelevante Variabilität (DV_i) des Parameters p_i

Ein großer Wert von b_i bedeutet, dass eine kleine Änderung von p_i statistisch eine große Änderung von D zur Folge hat. Abbildung O-1 gibt auch diesen Zusammenhang schematisch wieder. Ein hoher Wert der dosisrelevanten Variabilität ist also auf einen großen Einfluss des betrachteten Parameters (betragsmäßig große Steigung b_i der Regressionsgeraden) und/oder eine hohe Variabilität des Parameterwerts ($p_{i, \text{Extr}} - p_{i, \text{Ref}}$) zurückzuführen.

O.2.2 Ergebnis

Diese Methode liefert ähnliche Ergebnisse wie die lineare Regression, auch die Aussage über die unscharfe Abtrennung der Gruppe der wichtigeren Parameter behält ihre Gültigkeit (vgl. Tabelle O-2). In Tabelle O-2 sind darüber hinaus dieselben Parameter wie in Tabelle O-1 markiert: Diese Werte können mit einiger Sicherheit als relevant betrachtet werden. Die durchweg relativ hohen Werte der dosisrelevanten Variabilität DV_i bestätigen dies.

Tabelle O-2: Reihenfolge der Parameter nach dosisrelevanter Variabilität DV_i

„ohne Gaspolster“									
Generelle Parameter (GP)		ELB WSF		ELB OF		ELB NF		ELB ZT	
Q_{GW}	-0.839	$K_{1,S}$	0.500	$Q_{g,1e2,tot}$	-0.069	η	-0.069	ζ_{VGk}	-0.078
KS_{DGL}	-0.349	c_L	0.488	η	0.065	φ_N	0.045	K_L	0.056
c_M	0.203	$K_3/K_{1,S}$	0.265	$K_{1,S}$	0.061	ε_1	0.040	V_{VG}	-0.049
t_{voll}	-0.198	V_{VG}	-0.088	V_{VG}	0.054	c_L	0.039	M_{BFA}	-0.049
A_2	-0.134	L_1	-0.085	$K_{1,M}$	0.051	$\varepsilon_{M,tot}$	-0.038	ζ_{EHt}	0.044
„mit Gaspolster, ohne Gasfluss“									
Generelle Parameter (GP)		ELB WSF		ELB OF		ELB NF		ELB ZT	
Q_{GW}	-0.832	η	0.531	η	0.127	$Q_{g,1e2,tot}$	0.119	M_{BFA}	0.106
KS_{DGL}	-0.294	$Q_{g,1e4,tot}$	0.426	φ_N	0.083	$\rho_{B,ZEM}$	0.118	ζ_{VGk}	-0.086
c_M	0.210	c_L	0.376	V_{REB}	-0.075	V_{VG}	-0.094	K_L	0.066
V_{GG}	0.203	$K_{1,S}$	0.336	ζ_{VGt}	-0.073	M_{ZEM}	-0.065	$Q_{g,1e2,tot}$	0.062
c_{GG}	0.186	$K_3/K_{1,S}$	0.326	$K_3/K_{1,S}$	-0.065	φ_A	0.063	$Q_{g,1e4,tot}$	0.046
„mit Gaspolster, mit Gasfluss“									
Generelle Parameter (GP)		ELB WSF		ELB OF		ELB NF		ELB ZT	
Q_{GW}	-0.806	c_L	0.494	$Q_{g,1e2,tot}$	0.143	$Q_{g,1e2,tot}$	0.128	$Q_{g,1e2,tot}$	0.093
KS_{DGL}	-0.431	η	0.374	$K_{1,M}$	0.103	ζ_{VGk}	0.071	V_{VG}	0.078
f_g	-0.273	$Q_{g,1e4,tot}$	0.291	ζ_{REBt}	0.102	$Q_{g,1e4,tot}$	0.061	$\varepsilon_{M,tot}$	-0.064
V_{GG}	0.164	$K_{1,S}$	0.18	η	0.091	$V_{g,STP,tot}$	-0.057	η	-0.053
c_{GG}	0.161	V_{REB}	-0.178	c_L	0.06	φ_A	-0.051	ζ_{VGk}	-0.039

O.3 Multilineare Regression

O.3.1 Methode

Im Gegensatz zum Korrelationskoeffizienten (Kapitel O.1.1) wird hier die Dosis durch eine Linearkombination mehrerer betrachteter Parameter ausgedrückt. So wird es möglich, die linearisierte Dosis D' wie folgt zu berechnen

$$D' = c_0 + c_1 \cdot p_1 + c_2 \cdot p_2 + \dots + c_m \cdot p_m \quad (O-3)$$

Dabei werden jeweils die zehn in Bezug auf ihren Korrelationskoeffizienten wichtigsten Parameter (vgl. Kapitel O.1) des untersuchten Einlagerungsbereichs und die zehn wichtigsten generellen Parameter berücksichtigt. Für jeden betrachteten Satz an Parametern (die Parameterwerte einer Realisierung) resultiert somit ein Wert von D' .

Eine Standardisierung der Parameter macht die ermittelten Linearfaktoren c_i vergleichbar. Das konstante Glied c_0 entfällt mit der Standardisierung, und es gilt $p_{i,j, std} = (p_{i,j} - m_i) / \sigma_i$ für jede Realisie-



rung $p_{i,j}$ des Parameters p_i ; dabei sind m_i der Mittelwert von p_i und σ_i die Standardabweichung, welche jeweils für die n betrachteten Realisierungen ermittelt werden.

$$m_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_{i,j} \quad (\text{O-4})$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (p_{i,j} - m_i)^2 \quad (\text{O-5})$$

Dies ermöglicht die Bestimmung einer Rangfolge der Parameter p_i . Anstelle von D' wird dabei die standardisierte linearisierte Dosis (D'_N) verwendet, die nach folgender Gleichung definiert wird:

$$D'_N = c_1' \cdot p_{1,\text{std}} + c_2' \cdot p_{2,\text{std}} + \dots + c_m' \cdot p_{m,\text{std}} \quad (\text{O-6})$$

Nach Gl. (O-7) lässt sich ein multilinearer Korrelationskoeffizient r_N zwischen D'_N und den analog normierten Dosiswerten aus den Modellrechnungen (D_N) bestimmen, um die Güte des Linearisierungsansatzes (O-3) bzw. (O-6) zu bewerten.

$$r_N = \frac{\text{Cov}(D'_N, D_N)}{\sigma(D'_N) \sigma(D_N)} \quad (\text{O-7})$$

O.3.2 Ergebnis

Die multilineare Regression führt auf wesentlich bessere Korrelationskoeffizienten r_N (siehe Tabelle O-3) als das in Kapitel O.1 betrachtete Verfahren der linearen Korrelationskoeffizienten. Da die Einlagerungsbereiche Nordfeld und Zentralteil selten bzw. nie für die Maximaldosis verantwortlich sind (vgl. Anhang N), werden deren Parameter in diese Auswertung nicht mit einbezogen.

Die mit Hilfe der multilinenaren Regression ermittelte Parameterreihenfolge ist aussagekräftiger als diejenige aus den beiden anderen bisher angewandten Methoden, da sie alle in Frage kommenden Parameter gleichzeitig berücksichtigt und bei relativ guter Reproduktion der Rechenergebnisse (Korrelation zwischen der Dosis gemäß der multilinenaren Regression D' und dem Ergebnis der Simulationen D) ein Maß für den Einfluss der einzelnen Parameter auf das Ergebnis liefert. Die mit dieser Methode ermittelten relativ wichtigen Parameter sind der oberflächennahe Grundwasserfluss, die Konvergenzrate im West-Südfeld, die Parameter des Transportwegs durch Hutgestein und Deckgebirge, die Permeabilität des Abdichtsystems vom ELB WSF sowie – in den Fällen mit Gaspolster – die Parameter für die Gasbildung.

Zu bemerken ist, dass der Zeitpunkt t_{voll} , zu dem das Volllaufen der übrigen Grube abgeschlossen ist, nicht auf den obersten Rängen platziert ist. Er hat also nur einen mäßigen Einfluss auf die Maximaldosis. Das Vorzeichen ist negativ, d.h. bei einem späteren Volllaufen ist die Maximaldosis statistisch geringer.



Tabelle O-3: Multilineare Regressionskoeffizienten für verschiedene Gruppen von Parametersätzen (GP = generelle Parameter)

„ohne Gaspolster“					
ELB WSF + GP			ELB WSF + ELB OF + GP		
	Parameter	Koeffizient		Parameter	Koeffizient
	Q_{GW}	-0.483		Q_{GW}	-0.482
	c_L	0.390		$c_L(ELB_WSF)$	0.387
	$K_{1,S}$	0.208		$K_{1,S}(ELB_WSF)$	0.204
	t_{Voll}	-0.179		t_{Voll}	-0.178
	KS_{DGL}	-0.166		KS_{DGL}	-0.166
	A_2	-0.159		A_2	-0.157
	c_M	0.133		c_M	0.133
	c_{GG}	0.085		c_{GG}	0.081
	$K_3/K_{1,S}$	0.072		$K_3/K_{1,S}(ELB_WSF)$	0.073
	L_1	-0.069		$L_1(ELB_WSF)$	-0.071
Korrelationskoeffizient	0.746		Korrelationskoeffizient	0.745	
„mit Gaspolster, ohne Gasfluss“					
ELB WSF + GP			ELB WSF + ELB OF + GP		
	Parameter	Koeffizient		Parameter	Koeffizient
	Q_{GW}	-0.398		Q_{GW}	-0.396
	c_L	0.253		$c_L(ELB_WSF)$	0.253
	$Q_{g,1e4,tot}$	0.248		$Q_{g,1e4,tot}(ELB_WSF)$	0.251
	η	0.240		$\eta(ELB_WSF)$	0.238
	c_{GG}	0.147		c_{GG}	0.147
	$K_{1,S}$	0.128		$K_{1,S}(ELB_WSF)$	0.131
	KS_{DGL}	-0.127		KS_{DGL}	-0.125
	A_2	-0.118		A_2	-0.112
	V_{REB}	-0.107		$V_{REB}(ELB_WSF)$	-0.106
	c_M	0.094		c_M	0.091
Korrelationskoeffizient	0.686		Korrelationskoeffizient	0.688	
„mit Gaspolster, mit Gasfluss“					
ELB WSF + GP			ELB WSF + ELB OF + GP		
	Parameter	Koeffizient		Parameter	Koeffizient
	Q_{GW}	-0.383		Q_{GW}	-0.382
	c_L	0.345		$c_L(ELB_WSF)$	0.344
	η	0.214		$\eta(ELB_WSF)$	0.215
	$Q_{g,1e4,tot}$	0.176		$Q_{g,1e4,tot}(ELB_WSF)$	0.178
	f_g	-0.170		f_g	-0.175
	KS_{DGL}	-0.169		KS_{DGL}	-0.164
	A_2	-0.156		A_2	-0.152
	c_{GG}	0.113		c_{GG}	0.114
	$Q_{g,1e2,tot}$	0.074		$Q_{g,1e2,tot}(ELB_OF)$	0.097
	Z_G	0.069		$Q_{g,1e2,tot}(ELB_WSF)$	0.074
Korrelationskoeffizient	0.690		Korrelationskoeffizient	0.694	

Darüber hinaus zeigt sich, dass in der Gruppe der wichtigen Parameter sowohl feldspezifische als auch generelle Parameter, gemessen an dem jeweiligen Absolutwert der ermittelten Linearfaktoren c_i' , auftreten und letztere einen wesentlichen Einfluss haben. Die Einschränkung bezüglich der unscharfen Abgrenzung zwischen wichtigeren und weniger wichtigen Parametern bleibt bestehen: die Werte der (normierten) Koeffizienten c_i' für die verschiedenen Parameter weisen keine signifikante Zäsur auf.

Eine zusätzliche Analyseverfahren liefert jedoch einen weiteren Indikator für die Bedeutung eines Parameters. Dazu wurde die Abhängigkeit des multilinearen Korrelationskoeffizienten r_N (vgl. Gl. (O-7)) von der Anzahl der bei der multilinearen Regression berücksichtigten Parameter berechnet. Zunächst wurde eine multilineare Regression mit den 20 wichtigsten Parametern, ausgewählt aufgrund ihrer Korrelationskoeffizienten gemäß Gl. (O-1), durchgeführt und die Parameter nach ihrem standardisierten Linearfaktor c_i' geordnet. Dann wurde – beginnend mit dem kleinsten Betrag von c_i' – ein Parameter nach dem anderen eliminiert und der Korrelationskoeffizient r_N jedes Mal neu berechnet. Als Beispiel ist in Abbildung O-2 für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ der Korrelationskoeffizient r_N als Funktion der Anzahl der verbleibenden Parameter aufgetragen. Wie ersichtlich, wirken sich die Parameter 20 – 14 kaum auf den Korrelationskoeffizienten aus. Dann wird der Einfluss zunehmend größer. Der Einfluss des Parameters Nr. 2 ist nach dieser Analyse etwa gleich groß wie der kumulierte Einfluss der Parameter Nr. 5 bis Nr. 10. Das Ergebnis dieser Methode lautet also für den betrachteten Fall, dass die ersten vier Parameter sehr wichtig, die Parameter Nr. 5 bis etwa Nr. 13 wichtig und die übrigen Parameter von geringerer Bedeutung sind.

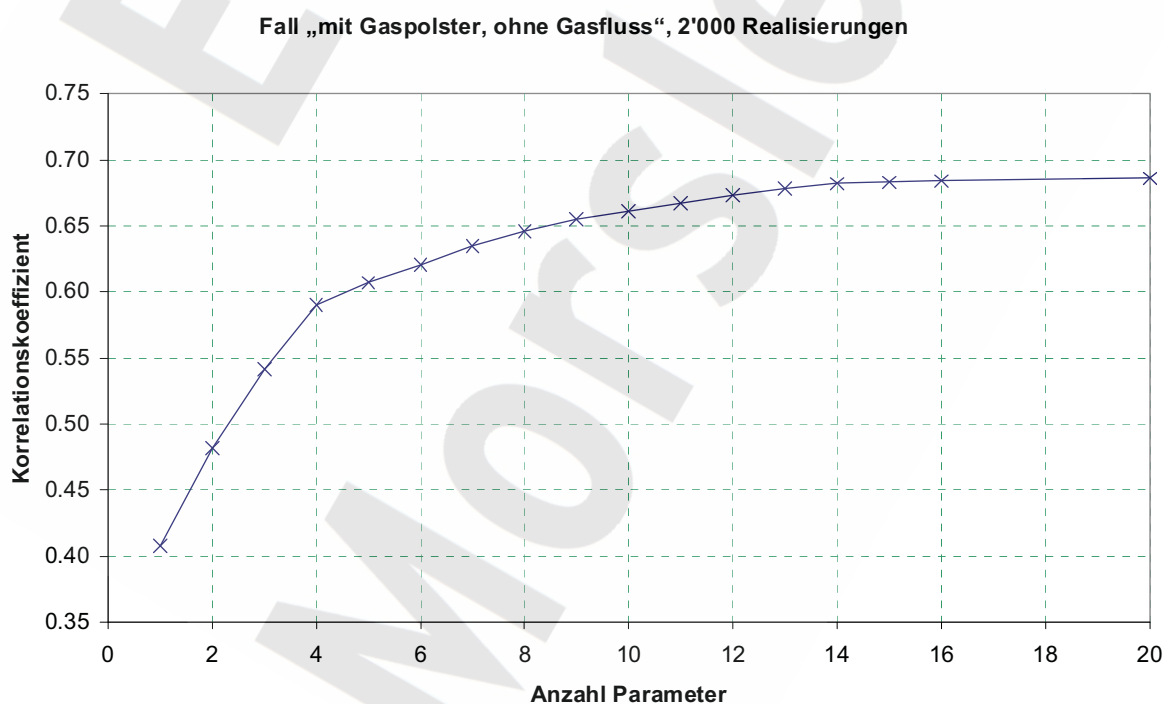


Abbildung O-2: Multilinearer Korrelationskoeffizient r_N als Funktion der Anzahl der Parameter, die in die multilineare Regression eingehen

O.4 Schlussfolgerungen

Die Auswertung der probabilistischen Rechnungen ergibt, dass mehrere Parametergruppen Auswirkungen auf die Maximaldosis haben:

- die Parameter, welche die Biosphäre charakterisieren, insbesondere die Verdünnung im oberflächennahen Grundwasser (Q_{GW})
- die Parameter, welche den Korrosionsprozess der Abdichtungen charakterisieren und für deren Standzeit maßgeblich sind ($K_{1,i}$, „ohne Gaspolster“ zudem $K_3/K_{1,i}$, c_M)
- die treibenden Kräfte für die Auspressung radionuklidhaltiger Lösung aus den Einlagerungsbereichen und der Grube (Konvergenzraten und Gasbildungsrate)
- die Parameter, welche die Transportzeit durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) beeinflussen: Transportquerschnitt A_2 und Sorption KS_{DGL}
- für den Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“: das Produkt aus dem Anteil der gasdurchströmten Querschnittsfläche in der Abdichtung und der relativen Permeabilität für Gas während des Auspressvorgangs (f_g)
- der Zeitpunkt des Volllaufens der übrigen Grube (t_{Voll})

Die Ungewissheiten bei den Parametern, die die Abfälle und die technischen Barrieren charakterisieren, sind von geringerem Einfluss als die geomechanischen, hydrogeologischen und geochemischen Eigenschaften des Standorts.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass die Korrelationen zwischen den Modellparametern und dem Maximalwert der Strahlenexposition ermittelt wurden. Die Strahlenexposition wird durch verschiedene Prozesse bestimmt, wobei i.a. jedoch nur ein Teil dieser Prozesse ihren Maximalwert maßgeblich beeinflusst. Einige der Prozesse üben je nach dem Wert ihrer Parameter eine unterschiedliche Wirkung aus (z.B. die Permeabilität des Abdichtsystems, die bei hohen Werten eine kurze Zutrittsphase, bei sehr niedrigen Werten evtl. eine Frac-Bildung verursachen kann; beide Extreme verursachen hohe Freisetzungsraten), während sich die Wirkung von anderen Prozessen bei Parametervariationen innerhalb ihrer Bandbreiten nicht wesentlich ändert. Dies bedeutet jedoch nicht notwendigerweise, dass die letztgenannten Prozesse unwichtig sind. Zudem kann die Freisetzung von Radionukliden, die in den durchgeführten Rechenfällen nie oder nur selten das Dosismaximum wesentlich mitbestimmen, auch stark von anderen als den identifizierten Parametern abhängen. Die hier durchgeführte multilineare Regression identifiziert – wie die in den Kapiteln O.1 und O.2 beschriebene einfache Regression – jene Parameter, deren Variation das Dosismaximum am stärksten verändert. Sie identifiziert somit wichtige Prozesse, kann jedoch keine abschließende Liste der sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Endlagersystems vermitteln. Die Bewertung der Ergebnisse muss deshalb durch Systemverständnis und Kenntnisse der Prozessabhängigkeiten ergänzt werden und darf sich nicht ausschließlich auf die hier untersuchten Regressionen abstützen.



Anhang P Freisetzung volatiler Radionuklide auf dem Gaspfad

Einige der im ERAM in nennenswerter Menge enthaltenen Radionuklide können chemische Verbindungen eingehen, die bei Standardbedingungen gasförmig sind oder einen so hohen Dampfdruck aufweisen, dass sie als volatil zu bezeichnen sind. Da mit den Abfällen große Mengen an Metallen und organischen Verbindungen eingebracht wurden, ist mit der Bildung entsprechend großer Gasmengen durch Korrosion und mikrobielle Zersetzung zu rechnen. Daher ist es nicht auszuschließen, dass – nach Aufbau eines genügend großen Überdrucks – diese Gase durch das Deckgebirge bis in die Atmosphäre gelangen und dabei auch radioaktive Gase in die Biosphäre transportieren. Im Folgenden werden die möglichen radiologischen Konsequenzen einer solchen Radionuklidfreisetzung auf dem Gaspfad ermittelt und bewertet.

P.1 Relevante Radionuklide in der Gasphase

Von den im ERAM vorhandenen Radionukliden können nur vier in nennenswerter Menge in die Gasphase übergehen: Tritium (^3H), Radiokohlenstoff (^{14}C), Iod (^{129}I) und Radon (^{222}Rn). Ihre Halbwertszeiten HWZ, Anfangsinventare I_0 (für ^{222}Rn : Anfangsinventar des Vorläuferradionuklids ^{226}Ra), Dosiskoeffizienten für Inhalation DF_{Inh} und Toxizitätsindizes TI (als Produkt aus Anfangsinventar und Dosiskoeffizient) sind in Tabelle P-1 zusammengestellt. Außer $^{14}\text{CH}_4$ können alle radioaktiven Gasspezies aus den nachfolgend aufgeführten Gründen vernachlässigt werden.

Tabelle P-1: Übersicht über die Auswahl der relevanten Radionuklide für den Gaspfad

Nuklid	Chem. Form	Kommentar	HWZ	I_0	DF_{Inh}	TI ^①
			[a]	[Bq]	[Sv/Bq]	[Sv]
^3H ($\equiv \text{T}$)	HTO	zu wenig volatil	$1,23 \cdot 10^1$	$3,67 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$6,61 \cdot 10^1$
	HT	$DF_{\text{Inh}} < DF_{\text{Inh}}(\text{CH}_3\text{T})$			$1,8 \cdot 10^{-15}$	$6,61 \cdot 10^{-3}$
	CH_3T				$1,8 \cdot 10^{-13}$	$6,61 \cdot 10^{-1}$
^{14}C	$^{14}\text{CH}_4$	sicherheitsrelevant	$5,73 \cdot 10^3$	$2,34 \cdot 10^{12}$	$6,2 \cdot 10^{-12}$ ⁷⁷	$1,45 \cdot 10^1$
	$^{14}\text{CO}_2$	weniger volatil als $^{14}\text{CH}_4$		$9,68 \cdot 10^{11}$		$6,00 \cdot 10^0$
^{129}I	I_2	höchstens in Spuren, kaum im Gas (Eh, pH, Lösungsmengen)	$1,57 \cdot 10^7$	$2,13 \cdot 10^8$	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$2,05 \cdot 10^1$
	HI	(vollständig dissoziiert: pH, hohe Löslichkeit in flüssiger Phase)				
	CH_3I	Bildung nicht plausibel			$7,4 \cdot 10^{-8}$	$1,58 \cdot 10^1$
^{222}Rn	Rn	zu kleine Halbwertszeit für direkte Freisetzung über Gaspfad	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$3,93 \cdot 10^{11}$ ⁷⁸	$2,5 \cdot 10^{-9}$ ⁷⁹	$9,72 \cdot 10^2$

- ① Kann ein Radionuklid in mehreren chemischen Formen auftreten, wird der Toxizitätsindex für jede chemische Form unter der Annahme ermittelt, dass das gesamte Inventar vollständig in der betrachteten chemischen Form vorliegt. Einzige Ausnahme ist das ^{14}C (Aufteilung in $^{14}\text{CH}_4$ und $^{14}\text{CO}_2$ gemäß Anhang J)

⁷⁷ Für $^{14}\text{CH}_4$ wird hier von einer vollständigen Umwandlung in $^{14}\text{CO}_2$ vor dem Eintreten in die Atmosphäre ausgegangen
⁷⁸ entspricht dem Inventar von ^{226}Ra

⁷⁹ entsprechend der von ICRP vorgeschlagenen Konvention, den Jahresaufenthalt in einer Wohnung (7'000 h/a), deren Radon-Konzentration 250 Bq/m^3 beträgt, als gleichbedeutend mit einer effektiven Dosis von 4 mSv/a durch eine andere Strahlung anzusehen, da diese beiden Expositionen zum gleichen Risiko führen [ICRP 1993]. Atemrate: $8'100 \text{ m}^3/\text{a}$ (in Konsistenz mit Kapitel P.3.5.2)



Tritium (^3H) kann als tritiiertes Wasser (HTO), tritiiertes Wasserstoff (HT) oder tritiiertes Methan (CH_3T) vorliegen. HTO ist unter ERAM-Bedingungen zu wenig volatil, und die beiden anderen Verbindungen weisen selbst mit dem Anfangsinventar des Tritiums einen erheblich geringeren Toxizitätsindex auf als $^{14}\text{CH}_4$. Wegen der vergleichsweise kurzen Halbwertszeit des Tritiums von 12,3 Jahren nimmt dessen Radiotoxizität zudem rasch weiter ab.

Für **Radiokohlenstoff** (^{14}C) sind vor allem die Gase Methan ($^{14}\text{CH}_4$) und Kohlendioxid ($^{14}\text{CO}_2$) zu betrachten. Letzteres ist deutlich weniger volatil als das Methan, denn es löst sich besser in der Flüssigkeit in der Grube und kann zusätzlich als Carbonat in der Festphase gebunden sein. Daher wird – vergleichbare Stoffmengen vorausgesetzt – erheblich mehr $^{14}\text{CH}_4$ als $^{14}\text{CO}_2$ auf dem Gaspfad transportiert. Auf der Grundlage konservativer Abschätzungen liegt das ^{14}C im ERAM nach den anfänglichen chemischen Umsetzungen überwiegend als $^{14}\text{CH}_4$ vor (Anhang J). Am Ende des Gaspfads, vor dem Eintreten in die Atmosphäre, ist allerdings davon auszugehen, dass das Methan in den ungesättigten Bodenschichten mikrobiell zu CO_2 oxidiert wird [Pröhl & Gering 2002].

Iod (^{129}I) kann unter ERAM-Bedingungen höchstens zu einem sehr kleinen Bruchteil des Radionuklidinventars in die Gasphase übergehen. Da die Radiotoxizität des gesamten ^{129}I im ERAM mit der des $^{14}\text{CH}_4$ vergleichbar ist, brauchen volatile Verbindungen des ^{129}I nicht berücksichtigt zu werden.

Radon kommt als Edelgas nur elementar vor. Seine Halbwertszeit von 3,8 Tagen (für das langlebige Isotop, ^{222}Rn) ist viel zu gering, als dass eine Freisetzung von der Grube bis in die Biosphäre zu betrachten wäre. Freisetzungen von ^{222}Rn sind nur in unmittelbarer Nähe seines Vorläufers in der Zerfallsreihe, ^{226}Ra , zu erwarten. Für die Bedingungen des ERAM hieße das, dass das ^{226}Ra zunächst über den Grundwasserpfad bis in den Biosphären-Aquifer transportiert wird und das ^{222}Rn , welches mit dem Radium im Zerfallsgleichgewicht steht, von dort in die Atmosphäre ausgast. Für den Grundwasserpfad ergibt sich im Referenzfall („mit Gaspolster, ohne Gasfluss“) für die Summe aus gelöstem und adsorbiertem ^{226}Ra im oberflächennahen Grundwasser ein Wert von maximal 0,006 Bq/l, im ungünstigsten Fall der probabilistischen Rechnungen von 0,5 Bq/l. Diese Werte liegen deutlich unter dem gemessenen Medianwert für Radon im deutschen Trinkwasser von 5,6 Bq/l [SSK 1995]. Die Strahlenexposition durch Freisetzung von Radon auf diesem Wege ist demnach unerheblich und wird im Folgenden nicht weiter betrachtet.

P.2 Szenarien

Im Folgenden werden von den möglichen Szenarien der Langzeitentwicklung des ERAM nur diejenigen betrachtet, welche für eine Freisetzung auf dem Gaspfad relevant sind.

In allen Szenarien wird vorausgesetzt, dass zum Zeitpunkt des Endlagerverschlusses

- der Porenraum in eventuell vorhandenen Wegsamkeiten durch Hutgestein und Deckgebirge mit Flüssigkeit gesättigt ist,
- der Gesamthohlraum, d.h. die Summe aus den unverfüllten Hohlräumen und dem Porenraum im kompaktierbaren Versatz im Grubengebäude, mit Luft gefüllt ist und
- sich bereits das gesamte $^{14}\text{CH}_4$ gebildet hat, vollständig in die Gasphase übergegangen, aber noch nicht aus der Grube entwichen ist.



P.2.1 Gasfreisetzung nach Volllaufen der Restgrube

Im Unterschied zum Referenzszenario „Wasserpfad“, für das unterstellt wird, dass das in der übrigen Grube gebildete Gas während des Volllaufens aus der Grube entweicht (Kapitel 3.3.1), wird in diesem Szenario angenommen, dass das Gas während der Phase des Volllaufens vollständig in der Grube verbleibt. Am Ende des Volllaufens der Restgrube existiert damit im Grubenhöchsten eine Gasblase. Es wird angenommen, dass die hydraulische Verbindung in das Hutgestein im Bereich der Gasblase an das Grubengebäude anschließt.

Nach dem Verfüllen und Verschließen des Endlagers fließen die Wässer aus dem Hutgestein mit endlicher Rate in die Grube. Währenddessen werden durch die Korrosion der Metalle und die mikrobielle Zersetzung der Organika weitere Gase gebildet. Zugleich verkleinert sich aufgrund der Konvergenz der Gesamthohlraum in der Grube. Diese Prozesse führen zu einem Anstieg des Fluiddrucks in der Restgrube. Wenn dieser den Wert des hydrostatischen Drucks am Salzspiegel erreicht hat, endet der Zutritt von Wässern. Das eingeschlossene Gas kann sich in der Grube – abgesehen von den Beschränkungen durch die Abdichtungen, siehe den folgenden Absatz – oberhalb des Flüssigkeitsspiegels frei bewegen. Gas, das unterhalb des Flüssigkeitsspiegels gebildet wird, steigt aufgrund seiner geringeren Dichte auf. Direkt unterhalb des Salzspiegels, an der Zutritts- und potentiellen Auspresstelle, sammelt sich Gas in einer großen Blase an und verhindert so, dass Flüssigkeit aus der Grube in das Hutgestein ausgepresst wird. Der Fluiddruck steigt durch Gasbildung und Konvergenz weiter an. Nachdem er die Summe aus hydrostatischem Druck und Gaseindringdruck überschreitet, beginnt Gas aus der Grube aus- und in Wegsamkeiten durch das Hutgestein einzudringen, und diese werden teilweise entsättigt. Sobald sich das Gas so den Weg durch das gesamte Hutgestein gebahnt hat, beginnt die Freisetzung durch das Deckgebirge und den oberflächennahen Grundwasserträger in die Atmosphäre. Die Gasflüsse sind dabei durch den Druck in der Grube und den Widerstand auf dem Transportweg durch das Hutgestein gegeben, welcher durch 2-Phasenprozesse bestimmt ist. In den ungesättigten Bodenschichten wird das $^{14}\text{CH}_4$ zu $^{14}\text{CO}_2$ mikrobiell oxidiert. Direkte Inhalation und der Verzehr von Nahrungsmitteln, in welche das ^{14}C über die Assimilation von $^{14}\text{CO}_2$ durch Pflanzen gelangt ist, bewirken eine Strahlenexposition für die Bevölkerung. Das Referenzszenario ist hier die großflächige Freisetzung von $^{14}\text{CO}_2$ über eine landwirtschaftliche Nutzfläche, ein Extremfall eine punktförmige Freisetzung in den Keller eines Wohnhauses.

Eine Fallunterscheidung ergibt sich für die abgedichteten Einlagerungsbereiche: Sind diese gasdicht abgeschlossen, dann braucht nur das Radionuklidinventar aus den Einlagerungsbereichen NF und ZT und die Gasbildung aus ELB NF, ELB ZT und übriger Grube betrachtet zu werden. Sind die abgedichteten Einlagerungsbereiche nicht gasdicht abgeschlossen, dann addieren sich ihre Beiträge zum Radionuklidinventar und zur Gasbildung. Wie die Parameterwerte (Tabelle J-2 und Tabelle G-1) zeigen, kann hierbei der ELB OF gegenüber dem ELB WSF vernachlässigt werden. Versagen die Abdichtungen erst nach langen Zeiten (im Referenzfall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“ für den ELB WSF nach 35'000 Jahren, weil der Salzbeton durch zutretende magnesiumhaltige Lösung korrodiert wird, Kapitel 5.1.1.3), dann ist dies für die Radionuklidfreisetzung auf dem Gaspfad nicht mehr relevant, weil das ^{14}C mit seiner Halbwertszeit von 5'730 Jahren bereits weitgehend zerfallen ist.

Bei seltenen, extremen Parameterkombinationen ergeben die Modellrechnungen für den Grundwasserpfad, dass der Gasdruck im ELB WSF den lithostatischen Druck an der Firste der obersten



Sohle in diesem Einlagerungsbereich überschreitet. Als Folge kann es zu einer Frac-Bildung vom Einlagerungsbereich durch das Salzgebirge und zu einem pulsartigen Austritt von Gas und Flüssigkeit in die übrige Grube kommen. Bei den durchgeführten probabilistischen Rechnungen trat dies, wenn überhaupt, meist erst zu späten Zeiten ein (nach mehr als 35'000 Jahren). Dann ist das ^{14}C ebenfalls so weit zerfallen, dass die Strahlenexposition durch dieses Szenario keine Rolle mehr spielt. Nur in fünf der 4'000 Realisierungen mit Gaspolster trat ein Frac nach ca. 20'000 – 35'000 Jahren auf. Wegen der sehr geringen Wahrscheinlichkeit werden diese Fälle nicht gesondert betrachtet.

P.2.2 Entwicklung „trockene Grube“

Bei der Entwicklung des Endlagersystems „trockene Grube“ treten keine signifikanten Lösungsmengen aus dem Hutgestein in die Grube zu, die Grube bleibt trocken. Auf dem Grundwasserpfad können dann keine Radionuklide aus der Grube freigesetzt werden, daher wird das Szenario der ungestörten Entwicklung bei der Modellierung des „Radionuklidtransports in Lösung“ dort nicht betrachtet. Eine Gasfreisetzung und ein Radionuklidtransport in der Gasphase (Gaspfad) ist aber auch aus einer trockenen Grube möglich.

Der Druck in der Grube entspricht zunächst Atmosphärendruck und steigt dann durch Konvergenz und Gasbildung an. Solange der Gasdruck kleiner ist als die Summe aus dem hydrostatischen Druck am Salzspiegel (2,4 MPa) und dem Eindringdruck für Gas in das Hutgestein, kann kein Gas aus der Grube entweichen.

Es ist offensichtlich, dass es im Fall der Entwicklung „trockene Grube“ länger dauert, bis sich ein ausreichender Druck für das Auspressen von Gas aus der Restgrube in das Hutgestein aufgebaut hat, als im Referenzszenario, wo das Gas durch zutretende Deckgebirgswässer zusätzlich komprimiert wird. Die resultierenden Strahlenexpositionen sind für die Entwicklung „trockene Grube“ daher stets geringer. Überschlagsrechnungen mit den Referenzparametern zeigen, dass es – je nach Dichtigkeit des ELB WSF gegenüber Gas – etwa 30'000 bis weit mehr als 50'000 Jahre dauert, bis in der Restgrube allein der Druck von 2,4 MPa überschritten wird. Bis dahin ist das ^{14}C aber weitgehend zerfallen, so dass aus seiner Freisetzung keine nennenswerte Strahlenexposition mehr resultieren kann. Aus diesem Grund genügt es für die Sicherheitsanalyse, sich auf Modellrechnungen für die vollgelaufene Restgrube zu beschränken.

P.3 Konzeptuelles Modell für die Freisetzung auf dem Gaspfad

Ab dem Zeitpunkt des Schachtverschlusses können zunächst keine Gase aus der Grube entweichen, weil das Hutgestein flüssigkeitsgesättigt ist. Im Modell setzt die Gasbildung zum Zeitpunkt des Endlagerverschlusses ein. Auch das $^{14}\text{CH}_4$ wird erst zu diesem Zeitpunkt gebildet. Weil die meisten ^{14}C -haltigen organischen Verbindungen (Fettsäuren, Fettalkohole und kurzkettige Metaboliten) mikrobiell leicht abbaubar sind, wird angenommen, dass sich das gesamte organische ^{14}C -Inventar instantan umsetzt. Das $^{14}\text{CH}_4$ verteilt sich gleichmäßig in der eingeschlossenen Luft und dem gebildeten Gas. Durch das Zutreten von Wässern aus dem Deckgebirge, die Gasbildung und die Hohlraumkonvergenz steigt der Gasdruck in der Grube an. Wenn dieser den Wert des hydrostatischen Drucks am Salzspiegel erreicht, endet der Zutritt von Deckgebirgswässern. Durch Hohlraumkonvergenz und Gasbildung baut sich anschließend ein Überdruck auf. Sobald dieser den



Wert des Gaseindringdrucks in die Wegsamkeiten durch das Hutgestein überschreitet, beginnt Gas in diese Wegsamkeiten einzudringen und sie teilweise zu entsättigen. Bei diesen Wegsamkeiten handelt es sich entweder um die Schichtenfolge DGL oder um vernetzte Klüfte im intakten Hutgestein. Ein Gasfluss erfolgt, sobald diese Entsättigung über die gesamte Transportlänge vorangeschritten ist. Die Auspressrate ist durch die Permeabilität des Transportwegs, die 2-Phasenverhältnisse und die dann noch wirkenden treibenden Kräfte (Gasbildung, Konvergenz) begrenzt. Das Deckgebirge oberhalb des Hutgesteins und der oberflächennahe Aquifer sind nicht Bestandteil des Modells, weil sie voraussichtlich nur wenig zu einer zusätzlichen Verzögerung oder Verminderung der Gasfreisetzungsrates in die Biosphäre beitragen.

Die Modellrechnungen werden mit dem Rechenprogramm TOUGH durchgeführt und simulieren das System Süßwasser – Wasserstoff, d.h. es werden die entsprechenden Dichten, Viskositäten und Löslichkeiten verwendet. Durch Zutritt von Deckgebirgswässern in die Grube nimmt der Salzgehalt im Hutgestein ab. Das Dichteprofil nach Volllaufen könnte höchstens mit Ungewissheiten abgeschätzt werden. Die Vernachlässigung der Unterschiede von Dichte und Viskosität von Süßwasser und Wasser mit geringem Salzgehalt ist im Vergleich mit den untersuchten Effekten und den bestehenden Ungewissheiten zulässig.

In den ungesättigten Bodenschichten erfolgt mikrobielle Oxidation zu $^{14}\text{CO}_2$, welches sich anschließend in der Biosphäre verdünnt und durch Inhalation und Ingestion zur Strahlenexposition der dort lebenden Menschen beiträgt.

P.3.1 Dauer des Volllaufens der Restgrube

Wie im Haupttext in Kapitel 4.1 ausgeführt wird, dauert es – bei vollständiger Trennung der Grubenteile Bartensleben und Marie und realistischen Annahmen über Zutritts- und Konvergenzraten – etwa 7'500 Jahre, bis der Grubenteil, in welchen der Zutritt von Deckgebirgswässern erfolgt, vollgelaufen ist. Selbst unter sehr ungünstigen Bedingungen ergibt sich eine Dauer von mindestens 1'500 Jahren. In den folgenden Modellrechnungen wird konservativ angenommen, dass in der Restgrube nach 2'000 Jahren der volle hydrostatische Druck erreicht ist: Alle Anfangsbedingungen beziehen sich auf diesen Zeitpunkt.

P.3.2 Aufbau von Gasdruck in der Restgrube

Das Modellkonzept geht davon aus, dass sich nach dem Volllaufen der Restgrube das gesamte eingeschlossene Gas in einer einzigen großen Blase direkt unterhalb des Salzspiegels befindet. Das Volumen dieser Gasblase unmittelbar nach dem Volllaufen, $V_{g,0}$, ist durch die Gasmenge zu diesem Zeitpunkt und den hydrostatischen Druck am Salzspiegel gegeben. Dieser ist durch den vertikalen Abstand bis zum Niveau der Aller und die Dichte des Grundwassers bestimmt. Durch Gasbildung, welche danach noch stattfindet, kann diese Gasblase nicht mehr wachsen, da sich der Gesamthohlraum der Grube nicht vergrößert und die Flüssigkeit als nicht komprimierbar zu betrachten ist. Fortgesetzte Gasbildung führt also zu einem Druckanstieg bei unverändertem Volumen der Gasblase. Die Hohlraumkonvergenz der Restgrube wirkt sich dagegen so aus, dass die Flüssigkeit die Gasblase komprimiert, indem sie deren Volumen verkleinert und so den Druck erhöht. Dieser Effekt der Konvergenz kann folgendermaßen abgebildet werden: Betrachtet man das Volumen der Gasblase zum Ende des Volllaufens der Restgrube als unveränderliches Modellvolumen, dann füllt sich dieses Volumen in dem Maße mit Flüssigkeit, in dem das Gesamthohlraum-



volumen der Grube durch Konvergenz abnimmt. Dadurch verringert sich das gasgefüllte Teilvolumen, und der Druck steigt dementsprechend. Weitere Gasbildung ändert dieses Teilvolumen nicht, sondern führt ausschließlich zu einem weiteren Druckanstieg.

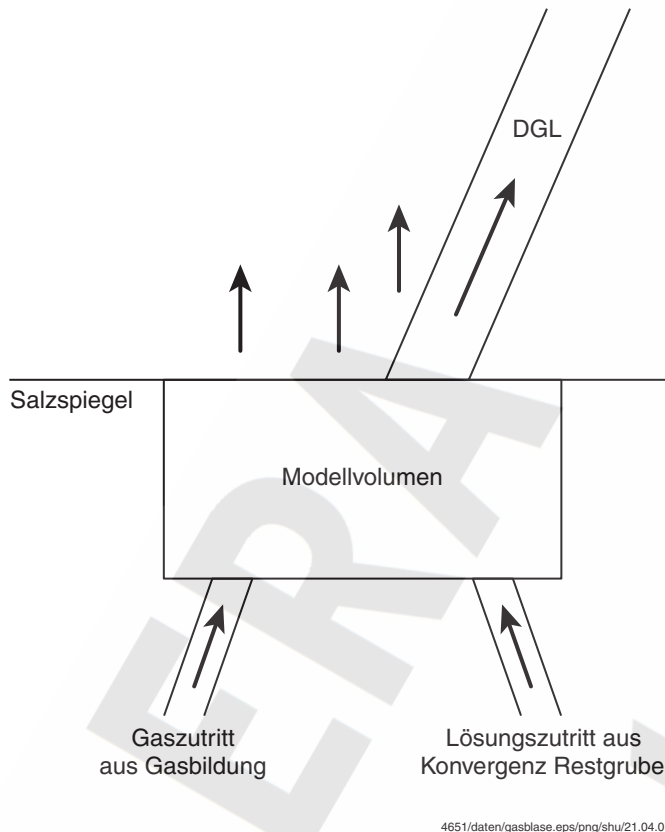


Abbildung P-1: Konzeptuelles Modell für die Gasfreisetzung aus der Grube; das Modellvolumen ist zu Beginn vollständig mit Gas bei hydrostatischem Druck gefüllt

Modellhaft lassen sich diese Prozesse also durch ein festes Volumen $V_{g,0}$ beschreiben, in welches Gas (aus der Gasbildung) und Flüssigkeit (entsprechend der Hohlraumkonvergenz) eingepresst werden. Dies ist in Abbildung P-1 dargestellt. Der Druck in diesem Volumen, welcher sich über die Flüssigkeit auf die gesamte Restgrube verteilt, übt eine Stützwirkung auf deren Hohlräume aus, wodurch sich die Konvergenz verlangsamt [PSE 1985]. Dies wird im Modell über den Quellterm für die Flüssigkeit berücksichtigt, wie weiter unten dargestellt.

Wenn der Druck soweit angestiegen ist, dass er die Summe aus hydrostatischem Druck am Salzspiegel und dem Gaseindringdruck in die Wegsamkeiten durch das Hutgestein überschreitet, beginnt das Auspressen von Gas, welches durch Dichteeffekte unterstützt wird. Gas tritt so lange aus, bis das Modellvolumen ganz mit Flüssigkeit gefüllt ist.

Zur Berechnung des Anfangsvolumens der Gasblase, $V_{g,0}$, und des Gaszutritts aus der Gasbildung, Q_g , wird der in Anhang G beschriebene Modellansatz für die Gasbildung mit den entsprechenden Parametern zu Grunde gelegt. Weil die schnellen Prozesse der Gasbildung nach dem Volllaufen der Grube weitgehend abgeklungen sind, ändert sich Q_g im zu betrachtenden Zeitintervall kaum und wird vereinfachend als konstant und gleich dem arithmetischen Mittelwert der Raten nach 2'000 Jahren und nach 10'000 Jahren angesetzt. Bei der Extrapolation auf spätere Zeiten

können Gasvolumina berechnet werden, die größer als die Gesamtgasmenge $V_{g,STP,tot}$ sind, welche maximal gebildet werden kann. Dies wird konservativ abdeckend nicht korrigiert.

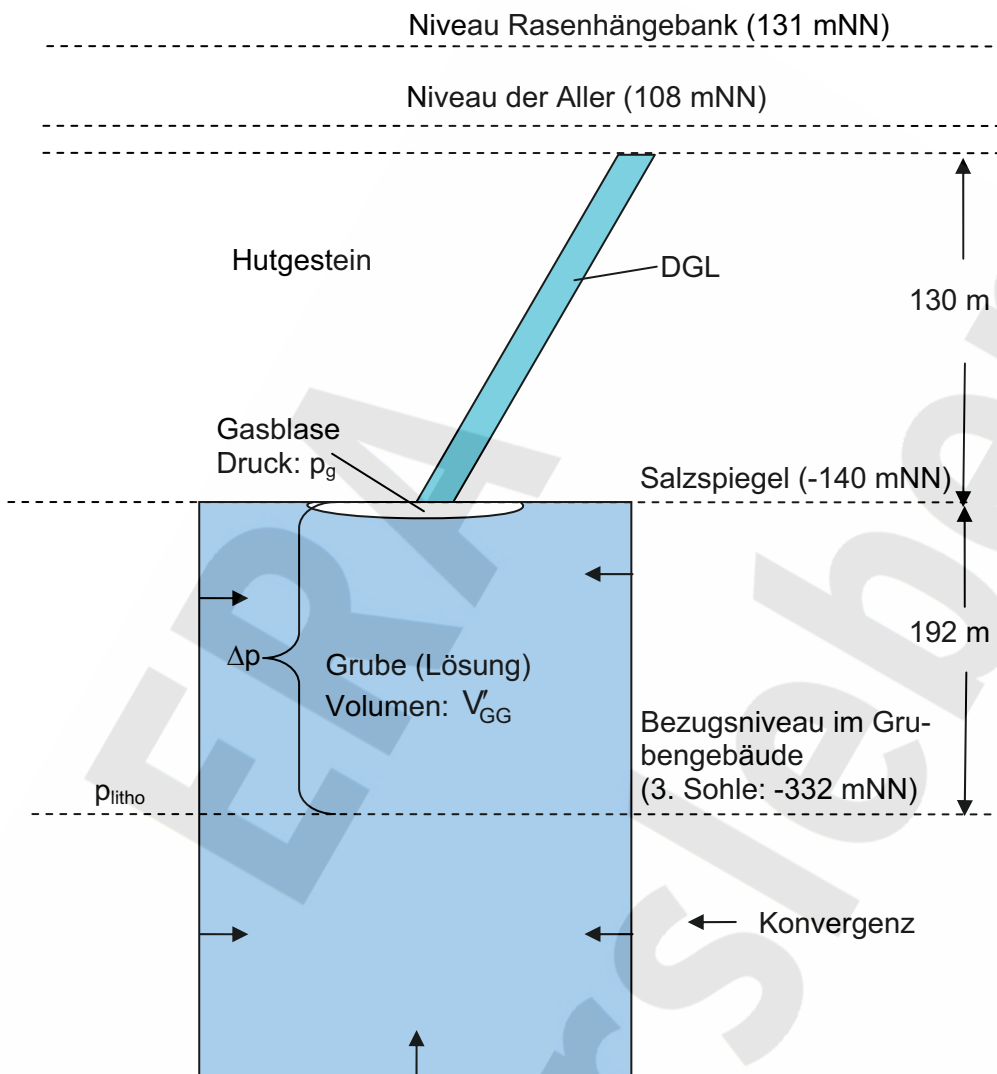


Abbildung P-2 Schematische Darstellung der Restgrube und der Berechnung der für die Konvergenz maßgeblichen Drücke

Der Lösungszutritt aus der Restgrube in das Modellvolumen $V_{g,0}$ wird durch die Konvergenz der Grubenbaue verursacht, die vom Fluiddruck abhängt. Der für die Konvergenz maßgebliche Stützdruck im Grubengebäude ist um Δp größer als der Druck in der Gasblase, wobei Δp der Differenz zwischen dem hydrostatischen Druck am Salzspiegel und am Bezugsniveau im Grubengebäude entspricht (Abbildung P-2):

$$\Delta p = (z_S - z_G) \cdot \rho_{IP21} \cdot g \quad (P-1)$$

mit:

- Δp Differenz des hydrostatischen Druckes zwischen dem Salzspiegel und dem Bezugsniveau im Grubengebäude (2,43 MPa)
- z_G Bezugsniveau im Grubengebäude, entspricht dem Niveau der 3. Sohle (-332 mNN)
- z_S Niveau des Salzspiegels (-140 mNN)

ρ_{IP21} Dichte der Lösung im Grubengebäude unterhalb des Salzspiegels (1292 kg/m³)
 g Erdbeschleunigung (9,81 m/s²)

Die Rate, mit der sich das Volumen des Grubengebäudes ändert, kann in Anlehnung an den Ansatz gemäß [PSE 1985] daher durch folgenden Ausdruck beschrieben werden:

$$\frac{dV'_{GG}(t)}{dt} = -c_{GG} \cdot V'_{GG}(t) \cdot \left(1 - \frac{p_g + \Delta p}{p_{litho}}\right)^5 \quad (P-2)$$

mit:

V'_{GG} Summe aus unverfülltem und mit kompaktierbarem Versatz verfülltem Volumen nach Ende der Umlöseprozesse
 c_{GG} Konvergenzrate des Grubengebäudes [1/s]
 t Zeit [s]
 p_g Gasdruck in der Gasblase (Niveau Salzspiegel) [Pa]
 p_{litho} Lithostatischer Druck am Bezugsniveau des Grubengebäudes (10 MPa)

In dem betrachteten Zeitintervall hat der Salzgrusversatz im Grubengebäude noch keine Stützwirkung. Die mit Salzgrus verfüllten Hohlräume werden daher in Bezug auf die Konvergenz wie unverfüllte Hohlräume behandelt.

Nimmt man weiter vereinfachend an, dass das Volumen V'_{GG} über den betrachteten Zeitraum annähernd konstant bleibt, folgt mit

$$\chi = c_{GG} \cdot V'_{GG}(t = 0) \quad (P-3)$$

aus Gl. (P-2):

$$\frac{dV'_{GG}(t)}{dt} \approx -\chi \cdot \left(1 - \frac{p_g + \Delta p}{p_{litho}}\right)^5 \quad (P-4)$$

mit:

χ : Volumenkonvergenzrate [m³/s]

Nach dem Vollaufen des Grubengebäudes entspricht der Druck in der Gasblase dem hydrostatischen Druck am Salzspiegel (2,43 MPa). Mit diesem Druck nimmt das Volumen des Grubengebäudes jährlich um ca. 10 m³/a ab. Es sei betont, dass sich diese Rate mit zunehmendem Druck in der Gasblase infolge von Konvergenz und Gasbildung verringert.

Für die hier dargestellte Simulation der Konvergenz des Grubengebäudes durch einen Wasserzufluss in das Gasblasenelement wurde das verwendete Rechenprogramm TOUGH2 [Pruess 1999] um einen druckabhängigen Quellterm für Wasser erweitert:

$$r_w \approx -\chi \cdot \rho_w \left(1 - \frac{p_g + \Delta p}{p_{litho}}\right)^5 \quad (P-5)$$

mit

r_w Rate, mit der Wasser in das Modellvolumen „Gasblase“ strömt [kg/s]

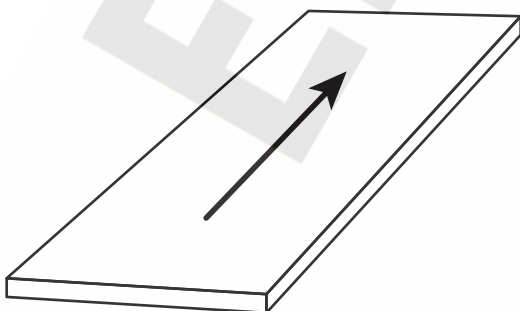


ρ_w Dichte des zutretenden Wassers ($1'000 \text{ kg/m}^3$)⁸⁰

P.3.3 2-Phasenfluss durch Geosphäre

Nur das Hutgestein wird als Barriere für den Gasfluss durch die Geosphäre betrachtet, nicht die darüber liegenden Schichten des Deckgebirges und der oberflächennahe Grundwasserträger. Für den Gasfluss vom Salzspiegel durch das Hutgestein gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die knapp 5 m mächtige Schichtenfolge Deckanhydrit – Grauer Salzton – Leinecarbonat (DGL) kommt wegen ihres relativ geringsten hydraulischen Widerstands grundsätzlich auch als Transportpfad für das Gas in Frage. Innerhalb der Schichtenfolge DGL sind die Gesteine Deckanhydrit und Leinecarbonat kleinräumig zerbrochen, in den Salzton eingebettet und sehr undurchlässig. Der Fluss innerhalb der Schichtenfolge erfolgt daher durch den tonig-schluffigen Salzton. Tone weisen allerdings häufig sehr hohe Gaseindringdrücke auf [Rodwell 1999, Nagra 2003], so dass die Schichtenfolge DGL möglicherweise nicht den präferentiellen Fließweg für den Gaspfad darstellt. Alternativ zur Schichtenfolge DGL kommen Wegsamkeiten durch das sogenannte „intakte“ Hutgestein als Transportweg in Frage. Das „intakte“ Hutgestein enthält dünne offene Risse und Klüfte, für welche angenommen werden kann, dass der Gaseindringdruck klein ist. Der Transport durch das intakte Hutgestein kann über einen großen Querschnitt mit vielen vernetzten Rissen und Klüften erfolgen. Das kompensiert die relativ geringe mittlere hydraulische Durchlässigkeit des intakten Hutgesteins.

P.3.3.1 Schichtenfolge DGL als präferentieller Transportweg (1D)



4651/daten/3_flows_a.eps/shu/22.05.03

Abbildung P-3: 1D-Modell für den Transport durch die Schichtenfolge DGL

Für den Transport durch die Schichtenfolge DGL wird angenommen, dass sich das Gas von der Austrittsstelle aus der Salzstruktur rasch horizontal entlang der Subrosionsrinne am Salzspiegel ausbreitet und von dort entlang der Schichtenfolge aufsteigt. Aufgrund von Channelingeffekten steht nur ein Teil der Schichtenfolge als Transportquerschnitt zur Verfügung. In Analogie zum Vorgehen beim Wasserpfad wird ein quaderförmiger, homogener Ausschnitt der Schichtenfolge betrachtet (Abbildung P-3). Auf diese Weise kann der 2-Phasenfluss mit einem 1D-Modell berechnet werden. Bei einer vertikalen Mächtigkeit des Hutgesteins an der Übertrittsstelle der Schichtenfolge DGL in den Keuper von etwa 130 m ergibt sich mit der Neigung von etwa 37° eine Transportlänge von 220 m in der Schichtenfolge. Der hydrostatische Druck am oberen Modellrand beträgt somit $(2,4 - 1,3 =) 1,1 \text{ MPa}$. Am oberen Modellrand wird eine Wassersättigung von 1 angenommen. Prozesse, die sich zwischen dem Austrittsort aus der Schichtenfolge und den oberen Bodenschichten

⁸⁰ Simuliert wird das System in der Näherung Süßwasser – Wasserstoffgas, wie in Kapitel P.3 begründet.

abspielen (z.B. Transport durch die darüber liegenden Schichten des Deckgebirges, Dispersion, Lösung von Gas im oberflächennahen Grundwasser), werden im Modell vernachlässigt.

Der hydraulische Widerstand der Schichtenfolge DGL gegenüber dem Gas- und Wassertransport ist durch die Permeabilität, die Porosität und die 2-Phasenparameter bestimmt. Die Permeabilität und Porosität der Schichtenfolge wurden aus hydraulischen Tests und Laboruntersuchungen bestimmt [BfS 2001]. Zu den 2-Phasenparametern liegen keine standortspezifischen Messdaten vor. Sie wurden aufgrund von Daten aus der Literatur festgelegt, die damit verbundene Ungewissheit wird mit Hilfe von Parametervariationen abgedeckt.

Im Referenzfall beträgt die Porosität der Schichtenfolge DGL 0,3, die Permeabilität $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$. Bei der hier getroffenen Festlegung der 2-Phasenparameter wird angenommen, dass sich die Schichtenfolge hinsichtlich des Zweiphasentransports wie ein äquivalent poröses Medium verhält. Als Ansatz für die Parametrisierung der relativen Permeabilität wird das Modell von Corey verwendet, welches sich für eine Vielzahl poröser Gesteine als geeignet erweist [Corey 1994]:

$$\begin{aligned} k_{rl} &= \hat{S}^4 \\ k_{rg} &= (1 - \hat{S})^2 \cdot (1 - \hat{S}^2) \\ \hat{S} &= \min \left[(S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr} - S_{gr}), 1 \right] \end{aligned} \quad (\text{P-6})$$

mit:

k_{rl}	Relative Permeabilität für Flüssigkeit [-]
k_{rg}	Relative Permeabilität für Gas [-]
S_l	Sättigung des Porenraums mit Flüssigkeit [-]
S_{lr}	Residuale Flüssigkeitssättigung [-]
S_{gr}	Residuale Gassättigung [-]

Im Referenzfall wird von einer residualen Gassättigung⁸¹ von 0,2 ausgegangen. Da als Anfangsbedingung für die Schichtenfolge DGL eine vollständige Wassersättigung angenommen wird, wird die residuale Gassättigung den Transport durch die Schichtenfolge maßgeblich beeinflussen.

Der Gaseindringdruck wird hier aus der Permeabilität abgeschätzt. Hierzu finden sich in der Literatur verschiedene Ansätze, die anhand von Potenzfunktionen den Gaseindringdruck als Funktion der Permeabilität beschreiben.

Im Referenzfall wird ein Gaseindringdruck von $1 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ verwendet. Dieser entspricht in etwa demjenigen, der sich unter Verwendung der Gaseindringdruck-Permeabilitätsbeziehung von [Ibrahim 1970] aus der Permeabilität des Referenzfalls ergibt:

$$p_0 [\text{Pa}] = 6,15 \cdot k^{-0,33} [\text{m}^2] \quad (\text{P-7})$$

Es sei an dieser Stelle betont, dass Gl. (P-7) nur eine Abschätzung darstellt, die aufgrund von Felduntersuchungen an verschiedenen Gesteinstypen gewonnen wurde. In Realität werden durch-

⁸¹ Die residuale Gassättigung gibt an, welcher Anteil des mit Flüssigkeit gesättigten Porenraumes verdrängt werden muss, damit die Gasphase mobil wird. Die residuale Flüssigkeitssättigung gibt an, welcher Anteil des Porenraums mindestens flüssigkeitsgefüllt bleibt.



aus Gaseindringdrücke beobachtet, die um mehr als eine Größenordnung in beide Richtungen von dem berechneten Wert abweichen.

Häufig wird auch ein Potenzgesetz von [Davies 1991] verwendet, das aus Messreihen an Carbonat-, Anhydrit-, Schiefergesteinen sowie Sandsteinen ermittelt wurde.

$$p_0[\text{Pa}] = 0,56 \cdot k^{-0,346} [\text{m}^2] \quad (\text{P-8})$$

Die Kapillardruck-Sättigungsbeziehung der Schichtenfolge DGL wird im Referenzfall mit dem Ansatz von Van Genuchten [Pruess 1999] beschrieben, wobei ein Porengrößenindex von 0,33 verwendet wird:

$$p_{\text{cap}} = -p_0 \left(\left[S^* \right]^{\frac{1}{\lambda}} - 1 \right)^{1-\lambda} \quad (\text{P-9})$$

$$S^* = (S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr})$$

mit:

p_{cap}	Kapillardruck [Pa]
p_0	Gaseindringdruck [Pa]
λ	Porengrößenindex [-]

In einer Parametervariation wird eine alternative Formulierung des Kapillardruckes verwendet, die auf einer Formulierung von Brooks-Corey [Corey 1994] beruht:

$$p_c = -p_0 \cdot \hat{S}^{-\frac{1}{\lambda}} \quad (\text{P-10})$$

Aus diesem Ansatz resultiert auch bei vollständiger Sättigung ein Kapillardruck p_0 . Bei vollständiger Sättigung, d.h. ohne Grenzflächen zwischen einer flüssigen und einer Gasphase, gibt es jedoch keinen Kapillardruck. Aus numerischen Gründen wird im Programm TOUGH2 daher Gl. (P-10) derart modifiziert, dass der Kapillardruck bei vollständiger Sättigung mit Flüssigkeit Null ist und mit abnehmender Flüssigkeitssättigung in einem kleinen Intervall auf den Kapillardruck gemäß Gl. (P-10) ansteigt.

$$p_c = \begin{cases} -p_0 \cdot \hat{S}^{-\frac{1}{\lambda}} & S_l \leq 0,999 \\ -p_0 \cdot \hat{S}^{-\frac{1}{\lambda}} \cdot (1 - S_l) / 0,001 & S_l > 0,999 \end{cases} \quad (\text{P-11})$$

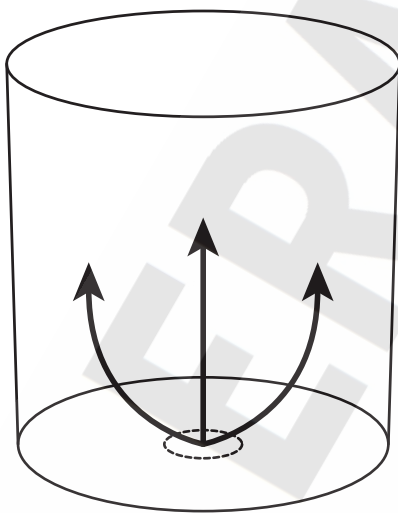
P.3.3.2 Ausbreitung durch intaktes Hutgestein (2D)

Eine Alternative zum kanalisierten Transport durch die Schichtenfolge DGL ist die flächenhafte Gasausbreitung durch das intakte Hutgestein. Dieses weist vernetzte, z.T. offene Risse und Klüfte auf. Im Bereich weniger Meter oberhalb des Salzspiegels haben sich horizontale Setzungsklüfte gebildet, durch welche sich das Gas von der Austrittsstelle aus der Salzstruktur leicht in horizontaler Richtung ausbreiten kann; danach erfolgt der Aufstieg durch das Hutgestein. Die Permeabilität des Hutgesteins ist zwar deutlich geringer als die der Schichtenfolge DGL, für das Gas ist jedoch



auch der Gaseindringdruck von Bedeutung. Dieser dürfte für die Schichtenfolge aufgrund ihres Tongehalts deutlich höher sein als für die offenen Risse und Klüfte im „intakten Hutgestein“.

Das konzeptuelle Modell zur Ausbreitung des Gases durch das Hutgestein ist in horizontaler Richtung „unbegrenzt“, seine Höhe beträgt 150 m. Das Gas dringt an einer lokalen Übertrittsstelle (Radius von 10 m) aus der Salzstruktur in das Hutgestein ein, beim Aufstieg dehnt es sich seitlich aus. Daher wird ein zylindersymmetrisches 2D-Modell verwendet (Abbildung P-4). Der äußere Radius beträgt 200 m, das entspricht im Bereich Nordfeld, Zentralteil und Südfeld annähernd den Ausmaßen des Hutgesteins [Abbildung 23 in Colenco 2001b, Schnitte 4 – 6]. Die Randbedingung für den Druck am seitlichen und am oberen Modellrand wird als hydrostatisch angesetzt. Durch die Modellrechnungen wurde verifiziert, dass der seitliche Modellrand keinen Einfluss hat (siehe Abbildung P-10). Am oberen Modellrand wird wieder eine Sättigung von 1 vorgegeben.



4651/daten/3_flows_c.eps/shu/22.05.03

Abbildung P-4: 2D-Modell für den Transport durch das intakte Hutgestein

Im Referenzfall beträgt die Permeabilität des intakten Hutgesteins 10^{-18} m^2 bei einer Porosität von 0,25 % [BGR 1998b] (siehe auch Tabelle P-6). Würde man eine Beziehung von [Davies 1991] oder [Ibrahim 1970] zugrunde legen, so ergäbe sich aus der Permeabilität von 10^{-18} m^2 für beide Modelle ein Gaseindringdruck von mehr als 1 MPa. Da entlang der durchgehenden Risse und Klüfte im Hutgestein jedoch von wesentlich höheren Permeabilitäten ausgegangen werden kann, wurde im Referenzfall ein deutlich niedrigerer Wert von $1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ festgelegt.

Als Ansatz für die Parametrisierung der relativen Permeabilität wird das Modell von Corey verwendet, mit einer residualen Gassättigung von 0,1. Der Kapillardruck des intakten Hutgesteins wird auch hier mit dem Ansatz von Van Genuchten beschrieben, wobei ein Porengrößenindex von 0,33 verwendet wird.

P.3.4 Radionuklidfreisetzung

Die Freisetzungsrates F für ^{14}C in die Biosphäre ergibt sich als Produkt aus dem Volumenstrom des Gases aus dem Deckgebirge in die Biosphäre und der ^{14}C -Konzentration des Gases. Vernachlässigt man konservativ abdeckend die Reduktion der ^{14}C -Konzentration in der Gasblase durch die

fortschreitende Gasbildung⁸², so gilt unter der Annahme einer homogenen Verteilung des ¹⁴C-Inventars in der Gasblase für die Freisetzungsrates:

$$F(t) = \frac{I_0 \cdot e^{-\lambda(t+t_0)}}{V_{gb}} \cdot F_g(t) \quad (\text{P-12})$$

mit

$F(t)$	Freisetzungsrates von ¹⁴ C auf dem Gaspfad (chemische Form ¹⁴ CO ₂); [Bq/a]
I_0	Anfangsinventar des ¹⁴ C in der Gasblase (chemische Form ¹⁴ CH ₄); [Bq]
λ	Zerfallskonstante von ¹⁴ C; [a ⁻¹]
t	Zeit ab Volllaufen der Grube; [a]
t_0	Dauer bis Volllaufen der Grube; [a] (2000 a)
V_{gb}	Volumen der Gasblase bei Standardbedingungen am Ende des Volllaufens der Restgrube; [m ³ _{STP}]
$F_g(t)$	Gasfluss aus dem Grubengebäude in die Biosphäre; [m ³ _{STP} /a]

P.3.5 Exposition in Biosphäre

Es wird angenommen, dass das ¹⁴CH₄ in den ungesättigten Bodenschichten instantan in ¹⁴CO₂ umgewandelt wird, bevor es in die Atmosphäre freigesetzt wird. Für die Freisetzung aus dem Boden werden zwei extreme Szenarien betrachtet: eine flächenhafte Freisetzung über 1 ha landwirtschaftlicher Nutzfläche und eine punktförmige Freisetzung, die im ungünstigsten Fall direkt in ein Wohnhaus führt. Erfolgt die Freisetzung direkt in ein Wohnhaus, dann ist nur der Inhalationspfad für die Strahlenexposition zu betrachten, andernfalls führt die Ingestion von Nahrungsmitteln, in welche das ¹⁴C aufgrund der Photosynthese zu Beginn der Nahrungskette aufgenommen wurde, zum Hauptbeitrag der Strahlenexposition.

P.3.5.1 Landwirtschaft

Nachdem das ¹⁴CO₂ aus dem Boden ausgetreten ist, verteilt es sich durch die Luftbewegungen in der Atmosphäre. Solange es sich in den bodennahen Luftschichten befindet, kann es von Pflanzen assimiliert werden, die entweder direkt verzehrt werden oder aber über Vieh weiter in die Nahrungskette gelangen und so zu einer Strahlenexposition des Menschen führen. Die Inhalation von Luft im Freien führt ebenfalls zu einer, allerdings deutlich geringeren, Strahlenexposition. Die Annahmen, welche im Biosphärenmodell über die Verdünnung in der Atmosphäre getroffen werden, können zu großen Unterschieden in den resultierenden Strahlenexpositionen führen. Im Folgenden wird das Modell von [Pröhl & Gering 2002] für die flächenhafte Freisetzung angewandt. Es berechnet Personenjahresdosen aus normierten Freisetzungsrates. Daraus ergibt sich ein Dosiskonversionsfaktor für ¹⁴CO₂ von $2,8 \cdot 10^{-15}$ Sv/Bq.

⁸² Wie ein Vorgriff auf die Resultate zeigt, ist die gebildete Gasmenge im Zeitraum nach dem Volllaufen der Restgrube bis zum Eintreten des Gases in die Schichtenfolge DGL klein im Vergleich zur Gasmenge in der Gasblase.



P.3.5.2 Extremfall: Gasfreisetzung in Wohnhaus

In diesem sehr unwahrscheinlichen Fall tritt das gesamte $^{14}\text{CO}_2$ über einen punktförmigen Freisetzungsort in den Keller eines Wohnhauses aus. Im Modell zur Berechnung der Strahlenexposition durch Inhalation wird angenommen, dass die Luft im Haus ständig gleichmäßig durchmischt wird und dass durch kontinuierliche Lüftung⁸³ mehrmals pro Tag ein kompletter Austausch erfolgt. Daraus ergibt sich eine mittlere Konzentration von $^{14}\text{CO}_2$ in der Atemluft. Durch Multiplikation mit der mittleren Atemrate, der täglichen Verweildauer und dem Dosiskoeffizienten für Inhalation von $^{14}\text{CO}_2$ wird die jährliche Strahlenexposition berechnet:

$$D = F \cdot \frac{t_A \cdot I}{V_L \cdot \beta} \cdot \frac{1 \text{ a}}{8766 \text{ h}} \cdot DF_{\text{Inh}} = F \cdot 6,9 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Sv}}{\text{Bq}} \quad (\text{P-13})$$

mit:

D	Personendosis; [Sv/a]
F	Freisetzungsrate von ^{14}C (chemische Form: $^{14}\text{CO}_2$) in ein Wohnhaus; [Bq/a]
V_L	Anrechenbares Luftvolumen des Hauses (250 m^3)
β	Luftwechselzahl ⁸⁴ (8 d^{-1})
t_A	Aufenthaltsdauer (24 h/d)
I	Atemrate ⁸⁵ ($8 \cdot 100 \text{ m}^3/\text{a}$)
DF_{Inh}	Dosisfaktor für Inhalation von ^{14}C ($6,2 \cdot 10^{-12} \text{ Sv/Bq}$) ⁸⁶

P.4 Modellparameter

Im Folgenden werden die Modellparameter dargestellt, die zur Berechnung der Dosis infolge einer Freisetzung von $^{14}\text{CH}_4$ auf dem Gaspfad verwendet werden. Neben dem Parameterwert für den Referenzfall werden auch die Werte für Parametervariationen angegeben. Letztere wurden so gewählt, dass Ungewissheiten, die mit der Festlegung eines Referenzwertes einhergehen, abgedeckt sind. Die so definierte Bandbreite der einzelnen Parameter erlaubt eine Analyse der Sensitivität der Ergebnisse bezüglich der verwendeten Parameter.

Zum Teil wurden die Parameterwerte für den Referenzfall bereits zusammen mit dem konzeptuellen Modell angegeben, anderenfalls werden sie im Folgenden kurz begründet, ebenso wie die Parametervariationen. Zur Identifikation der Rechenfälle wird folgende Nomenklatur festgelegt: Die Berechnungen für den Transportpfad „Schichtenfolge DGL“ werden mit „D_xx“ abgekürzt, wobei „xx“ für die Nummer des Rechenfalls steht. Die Nummer 01 ist der Referenzfall, die Parametervariationen sind fortlaufend nummeriert. Die Berechnungen für den Transportpfad „intaktes Hutgestein“ sind analog mit „H_xx“ gekennzeichnet.

⁸³ Dies ist das unökonomischste Lüftungsregime, aber es wurde gewählt, weil es zu den höchsten Radionuklidkonzentrationen führt.

⁸⁴ Die Wärmeschutzverordnung [WSchVO 1995] sieht z.B. eine Luftwechselzahl von $0,8 \text{ h}^{-1}$ vor; der hier verwendete kleinere Wert von $0,33 \text{ h}^{-1}$ (8 Luftwechsel pro Tag) berücksichtigt einen Sicherheitszuschlag für die Lüftungsgewohnheiten von Privatpersonen.

⁸⁵ gemäß Festlegung in [BMU 2001]

⁸⁶ [BMU 2001]



Die Berechnung der Gasfreisetzung aus dem Grubengebäude in die Biosphäre wird mit dem Programm TOUGH2 unter Verwendung des Moduls EOS5 durchgeführt. Dieses Modul simuliert das Verhalten der Komponenten Süßwasser und Wasserstoff, wobei letzteres den Hauptanteil des gebildeten Gases im ERAM darstellt.

P.4.1 Parameter für das Grubengebäude

Tabelle P-2: Basisparameter der verschiedenen Grubenbereiche zur Berechnung der Anfangsbedingungen

Grubenteil	Verfüllung	Volumen [m ³ _{STP}]	Porosität	Eingeschlossene Luft [m ³ _{STP}]	Gesamtgasmenge ⁸⁷ [m ³ _{STP}]	Radionuklidinventar (¹⁴ CH ₄) [Bq]
übrige Grube Bar- tensleben	Unverfüllt	8,9·10 ⁵	1	1,0·10 ⁶	1,4·10 ⁶	(-)
	Salzgrus	3,9·10 ⁵	0,4			
übrige Grube Ma- rie	Unverfüllt	5,2·10 ⁵	1	1,1·10 ⁶		
	Salzgrus	1,5·10 ⁶	0,4			
ELB Nord- feld	unverfüllt	4,3·10 ²	1	1,5·10 ³	3,0·10 ⁵	4,2·10 ¹⁰
	Salzgrus ⁸⁸	1,7·10 ³	0,65			
ELB Zen- tralteil	unverfüllt	3,3·10 ³	1	1,6·10 ⁴	6,1·10 ⁴	1,0·10 ⁹
	Salzgrus	3,3·10 ⁴	0,4			
ELB West- Südfeld ⁸⁹	Unverfüllt	3,4·10 ⁵	1	5,5·10 ⁵	1,4·10 ⁷	2,3·10 ¹²
	Salzgrus	5,0·10 ⁵	0,4			
ELB Ost- feld ⁹⁰	Unverfüllt	3,3·10 ⁴	1	5,6·10 ⁴	3,0·10 ⁶	1,2·10 ⁹
	Salzgrus	5,6·10 ⁴	0,41			

Die folgenden Eigenschaften des Grubengebäudes gehen in die Modellierung ein:

- die Dichtigkeit von verfüllten Strecken zwischen Grubenbereichen gegenüber Gas
- die Luftmenge, welche nach dem Verschließen des Endlagers in den unverfüllten Hohlräumen und in den Poren des Salzgrusversatzes eingeschlossen ist
- die Größe des unverfüllten und des kompaktierbar verfüllten Volumens nach Ende der Aufsättigungs- und Umlösungsprozesse (maßgeblich für die Konvergenz)
- die Gasmenge, die sich bis zum Ende des Volllaufens gebildet hat
- die Gasbildungsrate nach Ende des Volllaufens

⁸⁷ Gesamtgasmenge bei vollständigem Umsatz aller Gas bildenden Stoffe, Referenzfall aus [Colenco 2002c]

⁸⁸ In den Einlagerungsbereichen: genau genommen: „kompaktierbarer Versatz“, als Summe aus Salzgrus, Braunkohlefilterasche (BFA) und Abfall. Der Wert für die Porosität ist der Mittelwert für diese Summe.

⁸⁹ In Parametervariation berücksichtigt

⁹⁰ Wird in den Modellrechnungen zum Gaspfad nicht berücksichtigt



- das beteiligte Radionuklidinventar

Die Umsetzung dieser Eigenschaften in Modellparameter wird anhand von Tabelle P-2 erläutert: Im Referenzfall sind die Einlagerungsbereiche WSF und OF gegenüber der Restgrube abgedichtet. Zugleich wird davon ausgegangen, dass die Gruben Bartensleben und Marie hydraulisch miteinander verbunden sind. Zum Modell gehören dann neben den „übrigen Gruben“ von Bartensleben und Marie die nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche Nordfeld und Zentralteil – mit ihrer eingeschlossenen Luft, der Gasbildung, dem Volumen für die Konvergenz und dem zugehörigen Radionuklidinventar. Die Gasbildungsrate wurden bereits in Anhang G, Tabelle G-1 dargestellt. Die Berechnung der unverfüllten und der kompaktierbar verfüllten Volumina nach Aufsättigung der zutretenden Wässer am Steinsalz und Umlösung an den Kalilagern erfolgt wie in Anhang E beschrieben. Die entsprechend abgeleiteten Modellparameter sind in Tabelle P-3 dargestellt.

Tabelle P-3 Modellparameter für das Grubengebäude (Referenzfall)

Parameter	Beschreibung	Wert
V'_{GG}	Volumen der übrigen Grube (nach Aufsättigung und Umlösungen, ohne Salzbeton)	$7,2 \cdot 10^6$ m ³
c_{GG}	Konvergenzrate der übrigen Grube	$4,0 \cdot 10^{-5}$ 1/a
$V_{g,0}$	Größe des Modellvolumens (der Gasblase nach Ende des Volllaufens)	$1,3 \cdot 10^5$ m ³
Q_g	Gasbildungsrate (gemittelt zwischen 2'000 und 10'000 Jahren)	16,3 m ³ _{STP/a}
$I_0(^{14}\text{CH}_4)$	Anfangsinventar	$4,3 \cdot 10^{12}$ Bq

In einer Parametervariation werden die Gruben Bartensleben und Marie als hydraulisch voneinander getrennt betrachtet, das Modell besteht dann nur aus der „übrigen Grube“ Bartensleben sowie den Einlagerungsbereichen Nordfeld und Zentralteil. Ein Teil des gasbildenden Inventars befindet sich in der übrigen Grube Marie; konservativerweise wird in diesem Rechenfall die gesamte Gasbildung der übrigen Grube (d.h. inkl. Marie) berücksichtigt. In der Grube Marie sind keine radioaktiven Abfälle eingelagert, daher ist in diesem Rechenfall das ¹⁴CH₄-Inventar unverändert.

In einer zweiten Parametervariation wird angenommen, dass der ELB WSF für Gas mit der übrigen Grube verbunden ist. Hier addieren sich also die eingeschlossene Luft, die Gasbildung und das Radionuklidinventar des ELB WSF zu den Werten des Referenzfalls. Durch diese Variation ist auch eine weitere Möglichkeit – eine Verbindung des ELB OF mit der übrigen Grube – konservativ abgedeckt, weil das Volumen der eingeschlossenen Luft, die Gesamtgasmenge und das ¹⁴CH₄-Inventar im ELB OF geringer sind als im ELB WSF.

Die Parameterwerte für diese beiden Variationen werden zusammen mit den Transportparametern für das Hutgestein in den beiden folgenden Kapiteln dargestellt.



P.4.2 Parameter für den Gaspfad durch die Schichtenfolge DGL

Die meisten Modellparameter, die sich auf den Transport durch die Schichtenfolge DGL beziehen, wurden für den Referenzfall bereits in Kapitel P.3.3.1 dargestellt. In Tabelle P-4 sind alle Modellparameter zusammengefasst:

Tabelle P-4 Parameter für den Gaspfad durch die Schichtenfolge DGL (Referenzfall):

Parameter	Beschreibung	Wert
A_{DGL}	Querschnittsfläche	250 m ²
k_{DGL}	Permeabilität	$1,0 \cdot 10^{-16}$ m ²
ϵ_{DGL}	Porosität	0,3 -
p_{ae}	Gaseindringdruck	$1,0 \cdot 10^6$ Pa
S_{gr}	Residuale Gassättigung	0,2 -
S_{lr}	Residuale Flüssigkeitssättigung	0,1 -
λ	Porengrößenindex	0,33 -

Zusammen mit den Parametern für das Grubengebäude (Tabelle P-3) ergibt sich die Parametrisierung für den Referenzfall (D_01). Dabei wird die Kapillardruck-Sättigungsbeziehung der Schichtenfolge DGL mit dem Ansatz von Van Genuchten [Pruess 1999] beschrieben.

Die Parametervariationen für die Rechenfälle D_02 bis D_17 sind in Tabelle P-5 zusammengestellt. Sie werden im Folgenden kurz erläutert:

Der Einfluss einer höheren (Faktor 30) bzw. niedrigeren (Faktor 1/10) Permeabilität der Schichtenfolge DGL wird in den Rechenfällen D_02 und D_03 untersucht. Im Rechenfall D_04 ist der Gaseindringdruck doppelt so hoch wie im Referenzfall, im Rechenfall D_05 auf ein 1/10 erniedrigt. Fall D_17 stellt eine Kombination der Fälle D_02 und D_05 dar: Hier ist die Permeabilität hoch und der Gaseindringdruck niedrig, so dass dem Gas sowohl beim Eindringen in die Schichtenfolge als auch beim weiteren Transport nur ein sehr geringer Widerstand entgegengestellt wird.

In den Rechenfällen D_06 bis D_09 wird der Einfluss spezieller 2-Phasenparameter untersucht: eine Erniedrigung der residualen Gassättigung in den Fällen D_06 und D_07, eine Erhöhung des Porengrößenindex im Rechenfall D_08 und der Wechsel von der Van Genuchten- auf die Brooks-Corey-Parametrisierung [Corey 1994] im Rechenfall D_09.

Die Rechenfälle D_10 bis D_15 betreffen die Parameter für das Grubengebäude. Im hypothetischen Fall D_10 wird angenommen, dass überhaupt keine Gasbildung stattfindet. Die Größe des Modellhohlraums $V_{g,0}$ berechnet sich dann aus dem Volumen der eingeschlossenen Luft, komprimiert auf den hydrostatischen Druck am Salzspiegel, und die Gasbildungsrate ist Null. Im Fall D_11 ist der zeitliche Verlauf der Gasbildung „ungünstig“: Bei der Berechnung von $V_{g,0}$ und Q_g wurden hier für die Gasbildungsraten zur repräsentativ frühen Zeit $t = 100$ Jahre, $Q_{g,1e2,tot}$, die Minimalwerte der Bandbreite verwendet, für die Gasbildungsraten zur repräsentativ späten Zeit $t = 10'000$ Jahre, $Q_{g,1e4,tot}$, die Maximalwerte (vgl. Anhang G, Tabelle G-1). Daraus resultiert ein relativ kleiner Wert für $V_{g,0}$ und ein relativ großer für Q_g . Dies wirkt sich in einem kleinen Verdün-



nungsvolumen für das $^{14}\text{CH}_4$, einem raschen Anstieg des Gasdrucks gleich nach Ende des Volllaufens und einer hohen Auspressrate nach Entsättigung der Schichtenfolge DGL aus, daher „ungünstig“.

Im Fall D_12 ist das West-Südfeld für Gas nicht gegenüber der übrigen Grube abgedichtet. Also addieren sich seine Beiträge von eingeschlossenem Gas, Gasbildungsrate und $^{14}\text{CH}_4$ -Inventar zu den Werten des Referenzfalls.

Tabelle P-5 Parametervariationen für den Gaspfad durch die Schichtenfolge DGL:

Kategorie	Beschreibung	Fall #	Besonderheit	Parameter	Referenzwert	Variation	Einheit
Grubengebäude	Gasbildung	D_10	keine Gasbildung	$V_{g,0}$	$1,3 \cdot 10^5$	$9,0 \cdot 10^4$	m^3
				Q_g	16,3	0	$\text{m}^3_{\text{STP/a}}$
		D_11	ungünstige Rate	$V_{g,0}$	$1,3 \cdot 10^5$	$9,5 \cdot 10^4$	m^3
				Q_g	16,3	56,4	$\text{m}^3_{\text{STP/a}}$
	Abdichtsystem WSF	D_12	nicht gasdicht	$V_{g,0}$	$1,3 \cdot 10^5$	$2,9 \cdot 10^5$	m^3
				Q_g	16,3	167	$\text{m}^3_{\text{STP/a}}$
				$I_0(^{14}\text{CH}_4)$	$4,3 \cdot 10^{10}$	$2,3 \cdot 10^{12}$	Bq
	Konvergenzrate	D_13	niedrig	C_{GG}	$4 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$	$1 \cdot 10^{-5}$	a^{-1}
		D_14	hoch			$1 \cdot 10^{-4}$	
	Größe der übrigen Grube	D_15	nur Bartensleben	V'_{GG}	$7,2 \cdot 10^6$	$3,1 \cdot 10^6$	m^3
$V_{g,0}$				$1,3 \cdot 10^5$	$8,7 \cdot 10^4$	m^3	
Schichtenfolge DGL	Querschnittsfläche	D_16	erhöht	A_2	250	2000	m^2
	Permeabilität	D_02	erhöht	k_{DGL}	$1 \cdot 10^{-16}$	$3 \cdot 10^{-15}$	m^2
		D_03	erniedrigt			$5 \cdot 10^{-17}$	
	Gaseindringdruck	D_04	erhöht	p_{ae}	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	Pa
		D_05	erniedrigt			$1 \cdot 10^5$	
	Eindringen von Gas	D_17	erleichtert	k_{DGL}	$1 \cdot 10^{-16}$	$3 \cdot 10^{-15}$	m^2
p_{ae}				$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^5$	Pa	
spezielle 2-Phasenparameter	residuale Gas-sättigung	D_06	erniedrigt	S_{gr}	0,2	0,1	-
		D_07	Null			0	
	Porengrößenindex	D_08	erhöht	λ	0,33	0,5	-
	Parametrisierung	D_09	Variation	2-Phasenmodell	van Genuchten	Brooks-Corey	
				λ	0,33	2	-

Die Rechenfälle D_13 und D_14 variieren die Konvergenzrate der übrigen Grube innerhalb der vorgegebenen Bandbreite (Anhang C, Tabelle C-6). Im Fall D_15 schließlich wird angenommen, dass die Grube Marie hydraulisch abgetrennt ist; ihre Beiträge zum Volumen der eingeschlossenen Luft und zur Hohlraumkonvergenz werden daher nicht berücksichtigt. Weil die Gasbildungsrate aber nur für die Summe von Bartensleben und Marie modelliert wurde (Anhang G), wird der Beitrag von Marie zur Gasbildungsrate auch hier mit berücksichtigt. Das ist konservativ, weil Druckanstieg und Freisetzungsraten dadurch größer sind.



P.4.3 Parameter für den Gaspfad durch intaktes Hutgestein

Die meisten Modellparameter, die sich auf den Transport durch das intakte Hutgestein beziehen, wurden für den Referenzfall bereits in Kapitel P.3.3.2 dargestellt. In Tabelle P-6 sind alle Modellparameter zusammengefasst:

Tabelle P-6 Parameter für den Gaspfad durch intaktes Hutgestein (Referenzfall):

Parameter	Beschreibung	Wert
r_{GG}	Radius der Eintrittsfläche aus der Grube	10 m
k_H	Permeabilität	$1,0 \cdot 10^{-18}$ m ²
ϵ_H	Porosität	0,0025 -
p_{ae}	Gaseindringdruck	$1,0 \cdot 10^5$ Pa
S_{gr}	Residuale Gassättigung	0,1 -
S_{lr}	Residuale Flüssigkeitssättigung	0,1 -
λ	Porengrößenindex	0,33 -

Zusammen mit den Parametern für das Grubengebäude (Tabelle P-3) ergibt sich die Parametrisierung für den Referenzfall (H_01). Dabei wird die Kapillardruck-Sättigungsbeziehung des Hutgesteins wiederum mit dem Ansatz von Van Genuchten beschrieben.

Tabelle P-7 Parametervariationen für den Gaspfad durch das intakte Hutgestein:

Kategorie	Beschreibung	Fall #	Besonderheit	Parameter	Referenzwert	Variation	Einheit
Grubengebäude	Gasbildung	H_10	keine Gasbildung	$V_{g,0}$	$1,3 \cdot 10^5$	$9,0 \cdot 10^4$	m ³
				Q_g	16,3	0	m ³ _{STP/a}
		H_11	ungünstige Rate	$V_{g,0}$	$1,3 \cdot 10^5$	$9,5 \cdot 10^4$	m ³
				Q_g	16,3	56,4	m ³ _{STP/a}
	Abdichtsystem WSF	H_12	nicht gasdicht	$V_{g,0}$	$1,3 \cdot 10^5$	$2,9 \cdot 10^5$	m ³
				Q_g	16,3	167	m ³ _{STP/a}
				$I_0(^{14}\text{CH}_4)$	$4,3 \cdot 10^{10}$	$2,3 \cdot 10^{12}$	Bq
Konvergenzrate	H_13	niedrig	C_{GG}	$4 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$	$1 \cdot 10^{-5}$	a ⁻¹	
	H_14	hoch			$1 \cdot 10^{-4}$		
Hutgestein	Radius der Eintrittsfläche in Hutgestein	H_15	erhöht	r_{GG}	10	30	m
	Permeabilität Hutgestein	H_02	erhöht	k_H	$1 \cdot 10^{-18}$	$1 \cdot 10^{-17}$	m ²
		H_03	erniedrigt			$5 \cdot 10^{-20}$	
	Gaseindringdruck	H_04	erhöht	p_{ae}	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	Pa
H_05		erniedrigt	$1 \cdot 10^4$				
spezielle 2-Phasenparameter	residuale Gassättigung	H_06	Null	S_{gr}	0,1	0	-
		H_07	erhöht			0,2	
	Porengrößenindex	H_08	erhöht	λ	0,33	0,5	-
	Parametrisierung	H_09	Variation	2-Phasenmodell	van Genuchten	Brooks-Corey	-
				λ	0,33	2	-



Die Parametervariationen für die Rechenfälle H_02 bis H_15 sind in Tabelle P-7 zusammengestellt. Sie werden im Folgenden kurz erläutert:

Der Einfluss einer höheren (Faktor 10) bzw. niedrigeren (Faktor 1/20) Permeabilität des Hutgesteins wird in den Rechenfällen H_02 und H_03 untersucht. Im Rechenfall H_04 ist der Gaseindringdruck zehnmal so hoch wie im Referenzfall, im Rechenfall H_05 auf ein 1/10 erniedrigt.

In den Rechenfällen H_06 bis H_09 wird der Einfluss spezieller 2-Phasenparameter untersucht: eine Erniedrigung bzw. Erhöhung der residualen Gassättigung in den Fällen H_06 und H_07, eine Erhöhung des Porengrößenindex im Rechenfall H_08 und der Wechsel von der Van Genuchten- auf die Brooks-Corey-Parametrisierung im Rechenfall H_09.

Die Rechenfälle H_10 bis H_14 betreffen Parameter des Grubengebäudes und sind analog zu den Fällen D_10 bis D_14, die im Kapitel P.4.2 erläutert wurden. Im Fall H_15 wird untersucht, welchen Einfluss die Größe der Fläche hat, über die das Gas aus der Grube in das Hutgestein übergehen kann. Die Erhöhung des Radius von 10 m auf 30 m bewirkt eine Vergrößerung dieser Fläche um eine knappe Größenordnung.

P.4.4 Biosphäre

Die Dosiskonversionsfaktoren für die Berechnung der Strahlenexposition sind in Tabelle P-8 zusammengefasst (Diskussion siehe Kapitel P.3.5).

Tabelle P-8 Dosiskonversionsfaktoren für die Biosphärenszenarien

Biosphärenszenario	Dosiskonversionsfaktor
	[Sv/Bq]
Flächenhafte Freisetzung, Landwirtschaft [Pröhl & Gering 2002]	$2,8 \cdot 10^{-15}$
Punktförmige Freisetzung; Wohnhaus	$6,9 \cdot 10^{-14}$

P.5 Resultate

Im Folgenden werden zunächst die Resultate für den Gaspfad durch die Schichtenfolge DGL bzw. das intakte Hutgestein dargestellt, die sich mit den Referenzparametern ergeben. Der Einfluss der Parametervariationen auf die Ergebnisse wird in Kapitel P.5.2 diskutiert. Zum Zwecke des Systemverständnisses werden in Kapitel P.5.3 Zwischenergebnisse der Modellierung (z.B. der zeitliche Verlauf von Gasdruck und Gasfluss) in detaillierter Form erläutert.

P.5.1 Ergebnisse für die Referenzfälle

In Abbildung P-5 sind für die beiden Referenzfälle die gemäß Gl. (P-12) bestimmten Freisetzungsraten von ^{14}C in die Biosphäre als Funktion der Zeit dargestellt. Erfolgt der Gasfluss durch das intakte Hutgestein, dann beginnt die Freisetzung erheblich früher, und das Maximum ist um etwa eine Größenordnung höher als beim Transport entlang der Schichtenfolge DGL. Dies ist auf den im Vergleich mit der Schichtenfolge erheblich geringeren Gaseindringdruck aufgrund der Risse



und Klüfte im „intakten“ Hutgestein zurückzuführen, wie anhand der Parametervariationen deutlich wird (Kapitel P.5.2).

Für den Gaspfad durch das intakte Hutgestein wird die maximale Freisetzungsrates von $1,3 \cdot 10^6$ Bq/a ungefähr 3'500 Jahre nach dem Volllaufen der Grube erreicht, die rasche Abnahme im Anschluss daran ist Folge des radioaktiven Zerfalls (Halbwertszeit von ^{14}C : 5'730 a). Die entsprechende Strahlenexposition beträgt für die Referenzbiosphäre „Flächenhafte Freisetzung über eine landwirtschaftliche Nutzfläche von 1 ha“ $4 \cdot 10^{-6}$ mSv/a. Selbst im pessimistischen Szenario „Punktförmige Freisetzung, Wohnhaus“, das wegen des flächenhaften Gasanstiegs durch das Hutgestein (vgl. Kapitel P.5.3, Abbildung P-10) äußerst unwahrscheinlich ist, ergibt sich mit $9 \cdot 10^{-5}$ mSv/a eine Dosis, die deutlich unterhalb des Schutzzieles liegt.

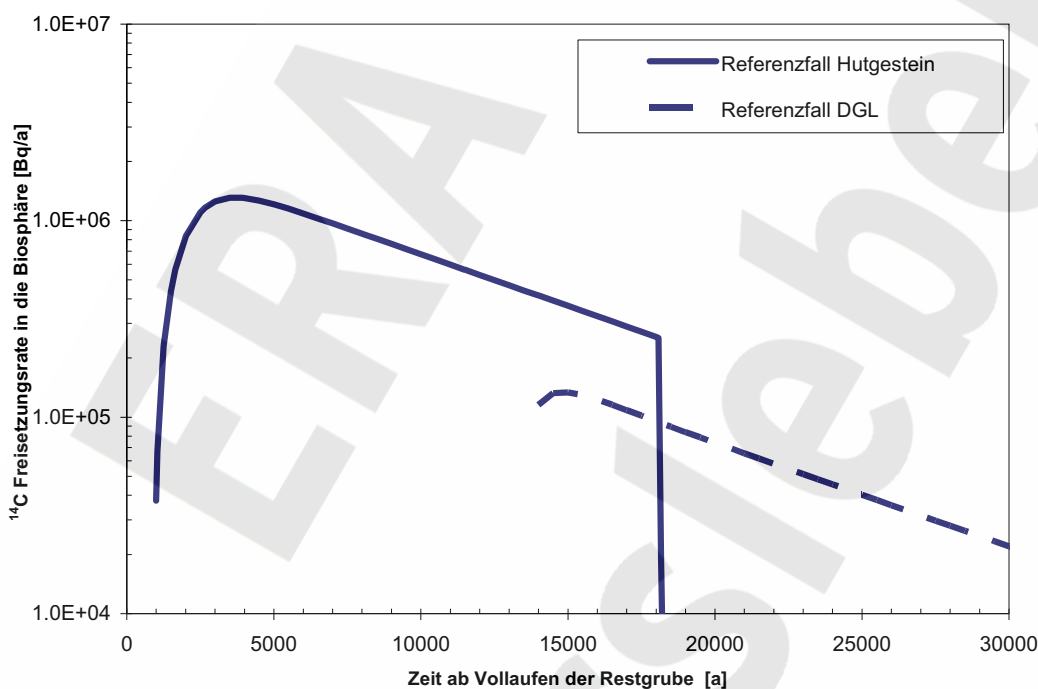


Abbildung P-5 ^{14}C Freisetzungsrates für die Referenzfälle Gaspfad Schichtenfolge DGL und Gaspfad Hutgestein.

Erfolgt der Gasfluss nicht durch das intakte Hutgestein sondern entlang der Schichtenfolge DGL, dann beträgt der maximale Nuklidfluss $1,3 \cdot 10^5$ Bq/a und wird nach rund 15'000 Jahren erreicht. Daraus errechnet sich für die flächenhafte Freisetzung aus einer landwirtschaftlich genutzten Fläche eine maximale Strahlenexposition von $4 \cdot 10^{-7}$ mSv/a, für das unwahrscheinliche Szenario einer Freisetzung in den Keller eines Wohnhauses von $9 \cdot 10^{-6}$ mSv/a.

P.5.2 Ergebnisse der Parametervariationen

Die Modellrechnungen wurden für alle in den Kapiteln P.4.2 und P.4.3 definierten Rechenfälle durchgeführt. Dabei ergab sich, dass bei vergleichbaren Rechenfällen der Gasfluss durch das intakte Hutgestein stets früher einsetzte als der Gasfluss entlang der Schichtenfolge DGL, bei geringeren Gasdrücken und mit höheren Freisetzungsrates. Dies ist in erster Linie auf den geringeren Gaseindringdruck in dem geklüfteten Medium des „intakten“ Hutgesteins zurückzuführen und wird

verstärkt durch seine geringeren Werte für die Porosität und die residuale Gassättigung, weil dadurch für den Durchbruch des Gases weniger Wasser verdrängt werden muss als beim Transport entlang der Schichtenfolge. Es ist daher unwahrscheinlich, dass der Gasfluss entlang der Schichtenfolge DGL erfolgt. Aus diesem Grund beschränkt sich im Folgenden die Darstellung der Ergebnisse auf den Transportpfad „intaktes Hutgestein“.

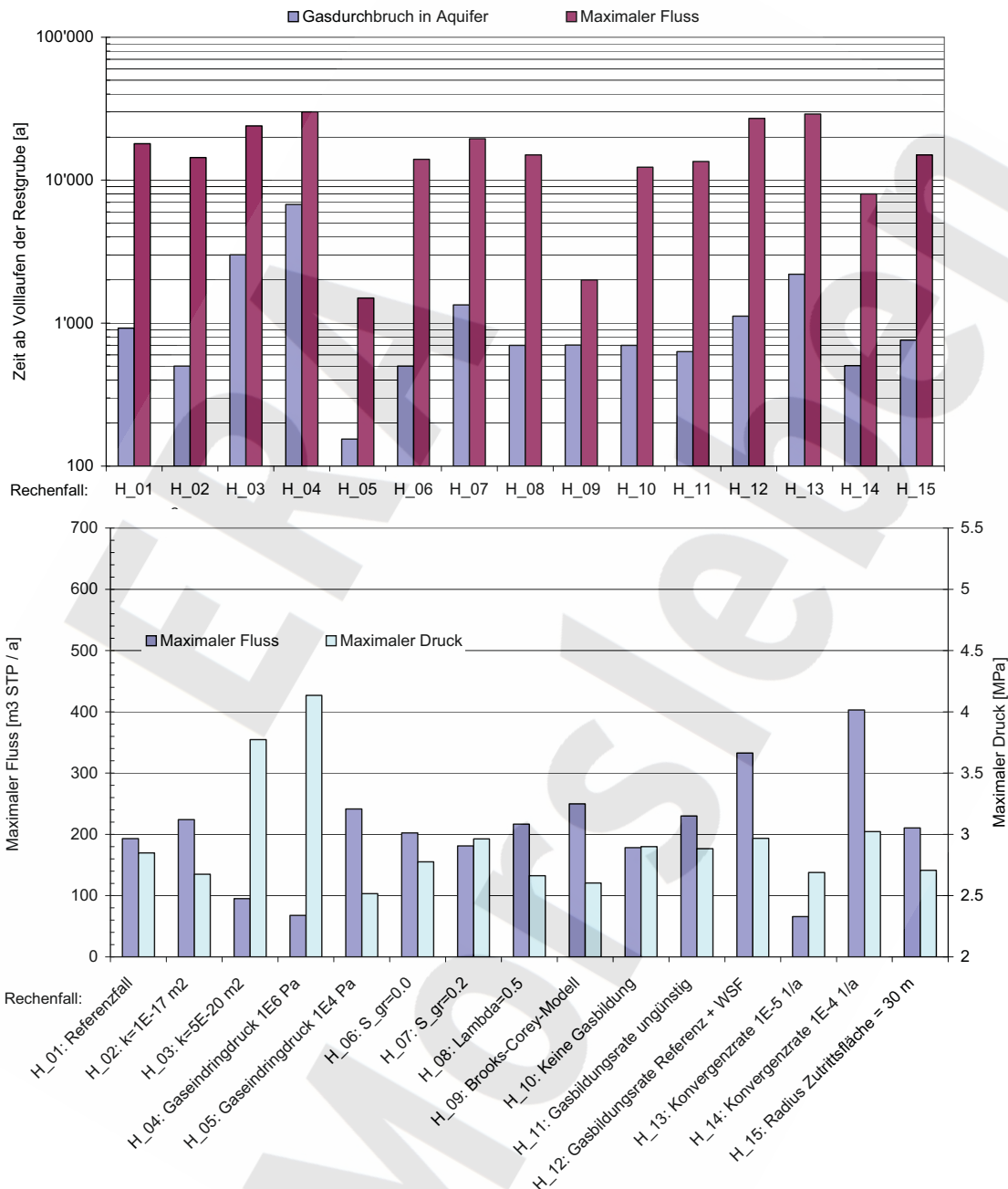


Abbildung P-6 Zusammenfassung aller Rechenfälle des Szenarios „Gasfreisetzung durch intaktes Hutgestein“.

Oben: Zeitpunkte des Gasdurchbruchs und des maximalen Flusses
Unten: Maximaler Fluss und maximaler Druck in der Gasblase

Die zeitabhängigen Resultate für den Gasdruck und die Gasfreisetzungsrates aus dem Hutgestein (Beispiele siehe in Kapitel P.5.3.2, Abbildung P-9) können im Wesentlichen durch vier Kenngrößen charakterisiert werden:



- den Zeitpunkt, zu dem die Gasfreisetzung aus dem Hutgestein beginnt (Gasdurchbruch),
- den Zeitpunkt, zu dem der Gasfluss maximal wird
- den Wert des maximalen Gasflusses und
- den Wert des maximalen Drucks in der Gasblase.

Für den Referenzfall und alle Parametervariationen sind diese Kenngrößen in Abbildung P-6 zusammengestellt. Der Gasdurchbruch, der im Referenzfall nach knapp 1'000 Jahren erfolgt, wird am stärksten vom Wert des Gaseindringdrucks beeinflusst und variiert rechnerisch von 155 Jahre für $p_{ae} = 10^4$ Pa bis 6'750 Jahre für $p_{ae} = 10^6$ Pa. Das Maximum der Gasfreisetzung wird für den Referenzfall und die meisten Parametervariationen (bei einem flachen, lang anhaltenden hohen Wert) nach etwa 15'000 Jahren erreicht und tritt nur in wenigen Fällen deutlich früher (1'500 Jahre) oder später (30'000 Jahre) ein.

Im Referenzfall beträgt der maximale Gasfluss $193 \text{ m}^3/\text{a}$; das Minimum (für den Fall mit hohem Gaseindringdruck) beträgt $68 \text{ m}^3/\text{a}$, das Maximum (für eine hohe Konvergenzrate in der Restgrube) rund $400 \text{ m}^3/\text{a}$. Der maximale Druck in der Gasblase im Grubengebäude liegt im Referenzfall bei ca. 2,8 MPa, er variiert von 2,5 MPa für $p_{ae} = 0,01$ MPa bis 4,1 MPa für $p_{ae} = 1$ MPa. Die Variation des Gasflusses ist damit trotz deutlich unterschiedlicher Parameter sehr beschränkt.

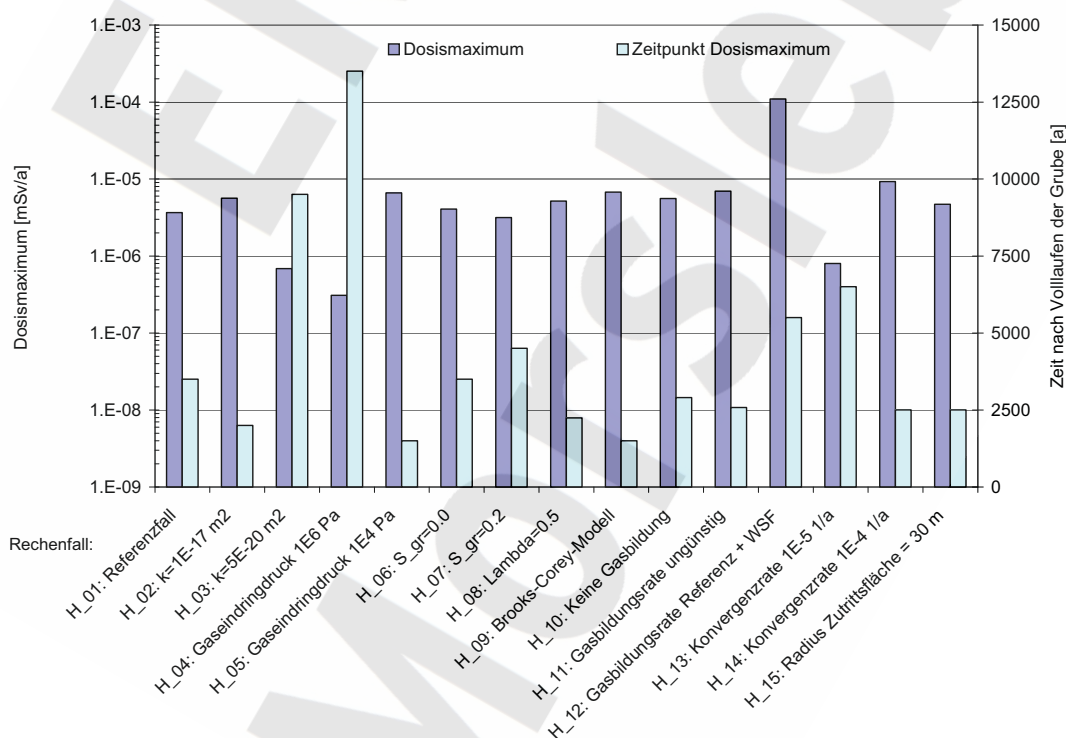


Abbildung P-7 Referenzbiosphäre: Dosismaximum und dessen Zeitpunkt für alle Rechenfälle des Szenarios „Gasfreisetzung durch Hutgestein“.

Für die Höhe der ^{14}C -Freisetzung ist nicht nur die Höhe des Gasflusses ausschlaggebend, sondern auch das Anfangsinventar (ohne oder mit ELB WSF) und der Zeitpunkt (wegen des radioaktiven Zerfalls). Das Maximum der Strahlenexposition und der Zeitpunkt seines Eintretens sind für

den Referenzfall und die Parametervariationen in Abbildung P-7 zusammengestellt (Biosphäre: Flächenhafte Freisetzung aus einer landwirtschaftlich genutzten Fläche).

Für die meisten Rechenfälle liegt die maximale Strahlenexposition zwischen 10^{-6} und 10^{-5} mSv/a. Ein höherer Wert, aber immer noch weit unter dem Wert von 0,3 mSv/a gemäß §47 Abs. 1 der StrlSchV, wird nur im Fall H_12 erreicht (0,00011 mSv/a), wo der ELB WSF mit seiner hohen Gasbildungsrate und seinem $^{14}\text{CH}_4$ -Inventar nicht abgedichtet ist. Die tiefsten Werte treten in den Fällen auf, wo das Hutgestein dem Gas einen hohen Widerstand entgegensetzt: mit einer niedrigen Permeabilität (H_03, $7 \cdot 10^{-7}$ mSv/a) oder mit einem hohen Gaseindringdruck (H_04, $3 \cdot 10^{-7}$ mSv/a). Auch im Fall H_13 mit niedriger Konvergenzrate für die Restgrube ist die Strahlenexposition gering ($8 \cdot 10^{-7}$ mSv/a). Die eigentlichen 2-Phasenparameter haben dagegen nur einen geringen Einfluss auf das Ergebnis.

Tabelle P-9 Zusammenfassung der Ergebnisse der Parametervariationen für den Gaspfad intaktes Hutgestein

Kategorie	Parameter	Parameter Bandbreite bzw. Rechenfälle	Ergebnisbandbreite der Maxima		
			Gasfluss in die Biosphäre [m^3/a]	Druck in der Gasblase [MPa]	Dosis [log (max/min)]
Grubengebäude	Konvergenzrate	$1 \cdot 10^{-5}$ bis $1 \cdot 10^{-4}$ 1/a	337	0,3	1,1
	Gasbildungsrate	keine bis ungünstiger Verlauf	52	0,0	0,1
	Zustand der Abdichtungen	Referenzfall, ungenügende Abdichtung	140	0,1	1,5
	Eintrittsfläche in Hutgestein	Radius =10 m bis 30 m	18	0,1	0,1
Transportparameter Hutgestein	Permeabilität	$5 \cdot 10^{-20}$ bis $1 \cdot 10^{-17}$ m^2	129	1,1	0,9
	Gaseindringdruck	$1 \cdot 10^4$ bis $1 \cdot 10^6$ Pa	174	1,6	1,3
	Residuale Gassättigung	0,0 bis 0,2	12	0,1	0,1
	Zweiphasen-Parametrisierung	Van Genuchten, Brooks-Corey, Porengrößenindex	57	0,2	0,3
Biosphäre	Biosphärenszenario		-	-	1,4

Das wird auch aus der Zusammenstellung in Tabelle P-9 deutlich. Hier wird für jede variierte Eingangsgröße die Bandbreite der wesentlichen Ergebnisse angegeben. Für den maximalen Gasfluss in die Biosphäre sowie für den maximalen Gasdruck in der Gasblase wurde als Bandbreite die



Differenz zwischen höchstem und niedrigstem Wert gebildet. Im Fall der radiologischen Auswirkungen wurde die Differenz der Größenordnungen der Dosis⁹¹ ermittelt, da die Ergebnisse der Dosis über mehrere Größenordnungen variieren. Es folgt z.B. aus der Bandbreite der Permeabilität von $5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ bis $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ (nach Tabelle P-7) eine Variation des maximalen Gasflusses um $129 \text{ m}^3_{\text{STP}}/\text{a}$ und eine Variation der maximalen Dosis von 0,9 Größenordnungen.

Abgesehen von der Wahl des Biosphärenmodells (wobei das sehr pessimistische Szenario „Punktförmige Freisetzung, Wohnhaus“ wegen des flächenhaften Gasanstiegs durch das Hutgestein äußerst unwahrscheinlich ist) haben insbesondere der Zustand der Abdichtungen des West-Südfelds und der Gaseindringdruck in das Hutgestein einen signifikanten Einfluss auf die Bandbreite der zu erwartenden Dosis. In etwas geringerem Maße gilt dies auch für die Konvergenzrate der Grube und die Permeabilität des Hutgesteins. Demgegenüber spielen die Ungewissheiten der anderen Transportparameter (Residuale Gassättigung und weitere 2-Phasenparametrisierung) eine untergeordnete Rolle. Da der Gasfluss – neben dem dichtebedingten Auftrieb – hauptsächlich durch die Konvergenz bestimmt ist (siehe Kapitel P.5.3.1, Abbildung P-8), wirken sich auch die Ungewissheiten zur Gasbildung kaum auf die Resultate aus.

P.5.3 Detaillierte Auswertung der 2-Phasenrechnungen

Zur Förderung des Systemverständnisses werden im Folgenden einige Resultate der Modellierung detaillierter betrachtet. Dabei geht es um Konvergenz und Gasbildung als Antriebskräfte für den Gasfluss aus dem Hutgestein, um den zeitlichen Verlauf des Gasflusses und um die laterale Ausbreitung der entsättigten Zone beim Aufstieg des Gases durch das Hutgestein.

P.5.3.1 Beiträge von Konvergenz und Gasbildung zum Gasfluss

Für den Gasfluss durch das Hutgestein sind folgende „treibende Kräfte“ verantwortlich:

- Auftrieb des Gases: Sofern der Druck in der Gasblase die Summe aus Gaseindringdruck des Hutgesteins und hydrostatischem Druck am Salzspiegel überschreitet, steigt das Gas infolge der geringeren Dichte im Hutgestein nach oben.
- Konvergenz des Grubengebäudes: Sie führt im Referenzfall nach Erreichen eines quasistationären Zustandes mit einem Druck von 2,85 MPa in der Gasblase zu einem Gasfluss von $190 \text{ m}^3_{\text{STP}}/\text{a}$ und liefert den Hauptteil des Gasflusses aus dem Hutgestein (siehe auch Abbildung P-9 unten).
- Gasbildung im Grubengebäude: Im Referenzfall beträgt sie $16,3 \text{ m}^3_{\text{STP}}/\text{a}$ und spielt im Vergleich zur Konvergenz eine untergeordnete Rolle. Selbst im Rechenfall H_12, in dem die Gasbildungsrate aus dem ELB WSF dazukommt, ist sie mit $167 \text{ m}^3/\text{a}$ nur etwa gleich groß wie der durch die Konvergenz ausgepresste Volumenstrom.

Die Konvergenz des Grubengebäudes nimmt mit zunehmendem Druck in der Gasblase aufgrund des Konvergenzgesetzes (siehe Gl. (P-4)) überproportional ab. Diesen Zusammenhang zeigt Abbildung P-8 für das Referenzvolumen des Grubengebäudes mit drei verschiedenen Konvergenzra-

⁹¹ d.h. 10er-Logarithmus des Verhältnisses



ten. Weiter zeigt die Abbildung den zur Konvergenz des Grubengebäudes äquivalenten Gasfluss aus dem Hutgestein in $\text{m}^3_{\text{STP}}/\text{a}$.

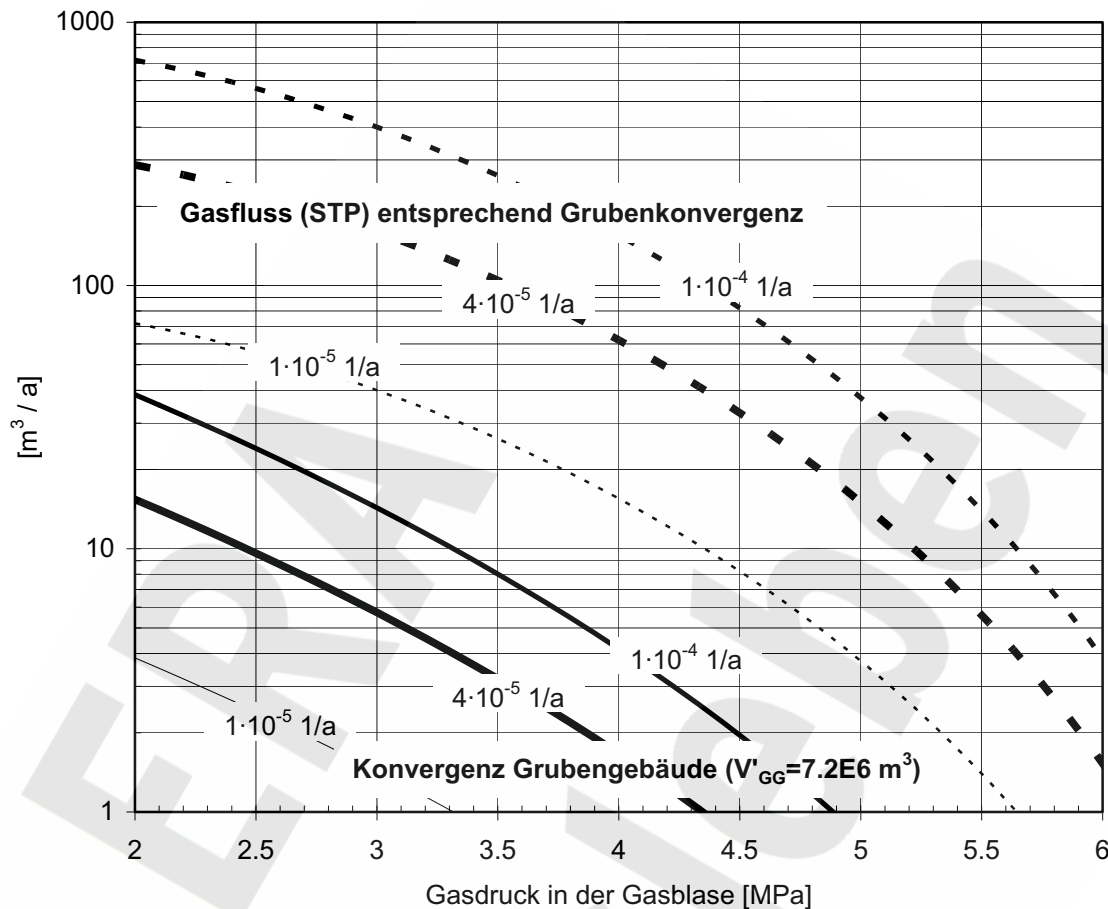


Abbildung P-8 Volumenströme infolge Konvergenz des Grubengebäudes als Funktion des Drucks in der Gasblase für drei unterschiedliche Konvergenzraten. Die durchgezogenen Linien zeigen Raten, mit denen das Volumen des Grubengebäudes als Funktion des Druckes in der Gasblase abnimmt. Die gestrichelten Linien zeigen die entsprechenden Gasflüsse aus dem Hutgestein in $\text{m}^3_{\text{STP}}/\text{a}$.

P.5.3.2 Zeitlicher Verlauf von Druck und Gasfluss

Vom Volllaufen der Grube bis zum vollständigen Auspressen des eingeschlossenen Gases können verschiedene Phasen unterschieden werden:

Zunächst steigt der Gasdruck aufgrund von Konvergenz und Gasbildung weiter an. Bevor der Druck am Salzspiegel die Summe aus hydrostatischem Druck und Gaseindringdruck in das Hutgestein bzw. die Schichtenfolge DGL überschreitet, wird noch kein Gas aus der Grube ausgepresst (Phase 1).

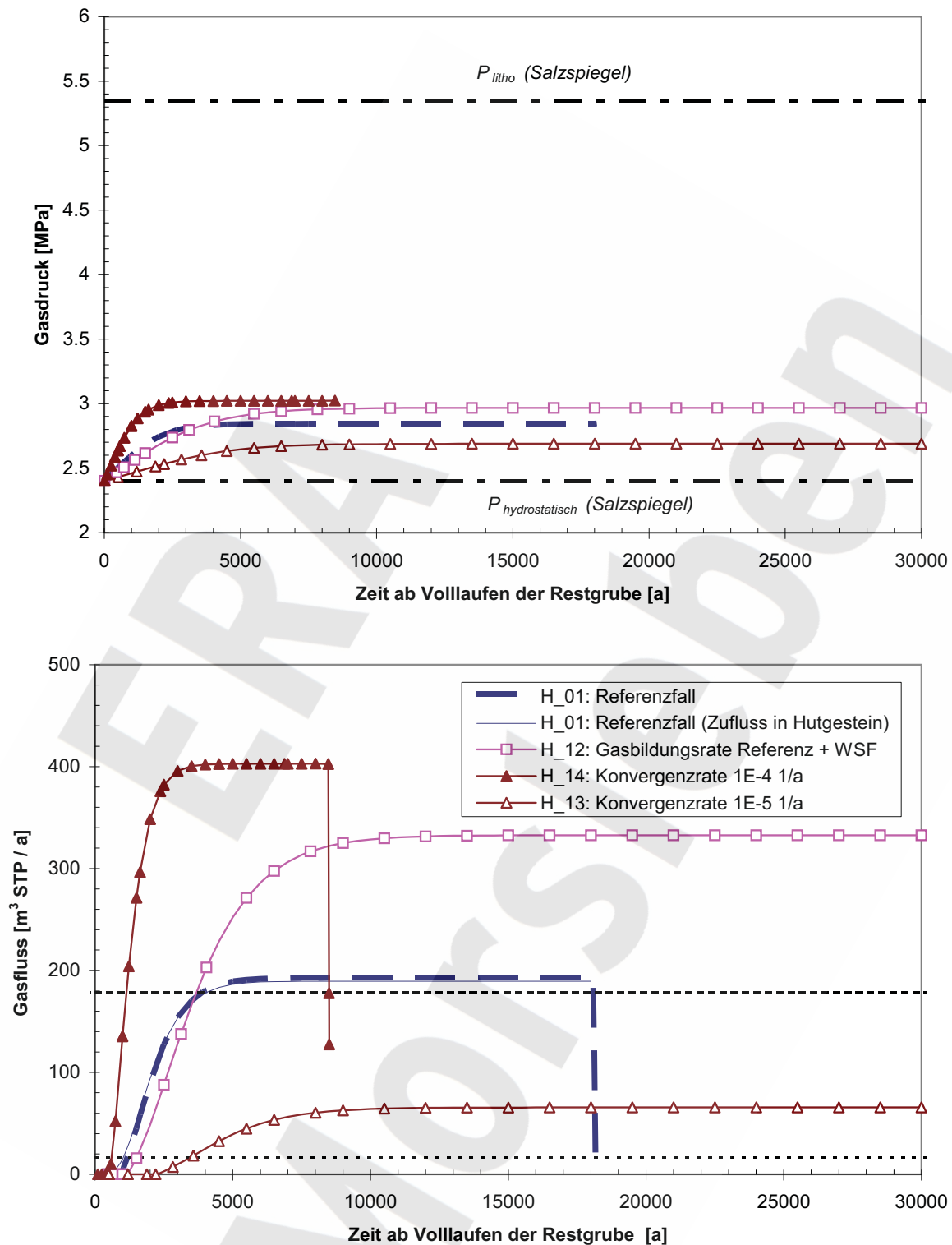


Abbildung P-9 Referenzfall und Parametervariationen zur Konvergenzrate des Grubengebäudes sowie Rechenfall „ungenügender Abdichtung des ELB WSF“ gegenüber der Restgrube.

oben: Gasdruck in der Gasblase als Funktion der Zeit
 unten: Gasfluss aus dem Hutgestein als Funktion der Zeit

Anschließend beginnt das Gas, in die Wegsamkeiten des Hutgesteins einzudringen. Dabei werden die offenen Risse und Klüfte des intakten Hutgesteins wegen ihres (wahrscheinlich) geringeren Gaseindringdrucks gegenüber der tonhaltigen Schichtenfolge DGL bevorzugt. Dazu muss der entsprechende Teil der anfänglich vorhandenen Flüssigkeit verdrängt werden – nach oben, im zwei-dimensionalen Modell des intakten Hutgesteins auch zur Seite (Phase 2). Dabei tritt in die Poren mindestens so viel Gas ein, bis die residuale Gassättigung erreicht ist. Erst danach kann sich das Gas bewegen (im Modell: in das nächste Volumenelement eindringen). In dieser Phase steigt der Gasdruck in der Grube weiter an.

Wenn die Zone der mobilen Gasphase (Zone mit ausreichender Gassättigung) die Obergrenze des Modells erreicht, beginnt die Gasfreisetzung in die Biosphäre (Phase 3). Ist die Barrierenwirkung des Hutgesteins (gegeben durch Gaseindringdruck und Permeabilität) hoch, dann steigt der Druck in der Gasblase zunächst weiter an, und die Gassättigung entlang des Transportwegs nimmt zu. Dadurch nimmt der Widerstand für Gas ab (Gl. (P-6)), und der Gasfluss vergrößert sich, bis sich Druck und Fluss langsam ihrem Maximalwert annähern. Ist der Gaseindringdruck gering, dann nimmt die Gassättigung bereits während Phase 2 im unteren Teil des Transportwegs hohe Werte an. Als Folge ist die relative Permeabilität für Gas bereits zu Beginn von Phase 3 hoch, was dazu führen kann, dass das Gas so schnell ausströmt, dass der Druck in der Gasblase zunächst wieder abfällt und sich anschließend Druck und Gasfluss auf die Werte des stationären Zustands einpendeln. Solch ein „Überschwingen“ ist für die Schichtenfolge DGL als Transportpfad stärker ausgeprägt als für das intakte Hutgestein. In den betrachteten Rechenfällen liegt das dabei erreichte Maximum für den Fluss im Fall des intakten Hutgesteins höchstens um 2% über dem stationären Zustand, im Fall der Schichtenfolge DGL ist es höchstens etwa doppelt so hoch wie der stationäre Zustand.

Durch die Konvergenz der Grube verkleinert sich die Gasblase stetig (in das Modellvolumen $V_{g,0}$ wird ständig Flüssigkeit aus der Restgrube eingepresst). Nach endlicher Zeit ist sie verschwunden (das Modellvolumen ist ganz mit Flüssigkeit gefüllt). Dies ist der Zeitpunkt für das Ende der Modellrechnungen.

Für den Referenzfall und einige Parametervariationen ist der zeitliche Verlauf von Gasdruck und Gasfluss in Abbildung P-9 dargestellt.

P.5.3.3 Laterale Ausdehnung der entsättigten Zone im intakten Hutgestein

Im Modell wurde angenommen, dass das Gas über eine kreisförmige Zutrittsfläche mit einem Durchmesser von 20 m in das Hutgestein eindringt. Die Simulation zeigt, dass sich das Gas auf dem Weg nach dem Eintritt in das Hutgestein lateral ausdehnt und über eine viel größere Fläche aus dem Hutgestein austritt (siehe Abbildung P-10). Im Referenzfall tritt das Gas über eine kreisförmige Fläche mit einem Radius von über 100 m aus dem intakten Hutgestein in die darüber liegenden Schichten (im Modell in die Biosphäre) ein. Diese Tatsache ist insbesondere im Zusammenhang mit der Bewertung der Biosphärenszenarien hinsichtlich Plausibilität von Bedeutung, da eine punktförmige Freisetzung des Gases in die Biosphäre somit praktisch ausgeschlossen werden kann.

Mit zunehmender Eintrittsfläche des Gases in das Hutgestein nimmt der maximale Fluss aus dem Hutgestein zu, er beträgt bei einer Verdreifachung des Durchmessers auf 60 m (zehnfache Fläche,



Rechenfall H_15) etwa 10 % mehr als im Referenzfall. Dabei erfolgt der Durchbruch des Gases nur wenig früher. Der Einfluss der Eintrittsfläche ist so gering, weil sich das Gas nach dem Eintritt in das Hutgestein lateral ausbreitet.

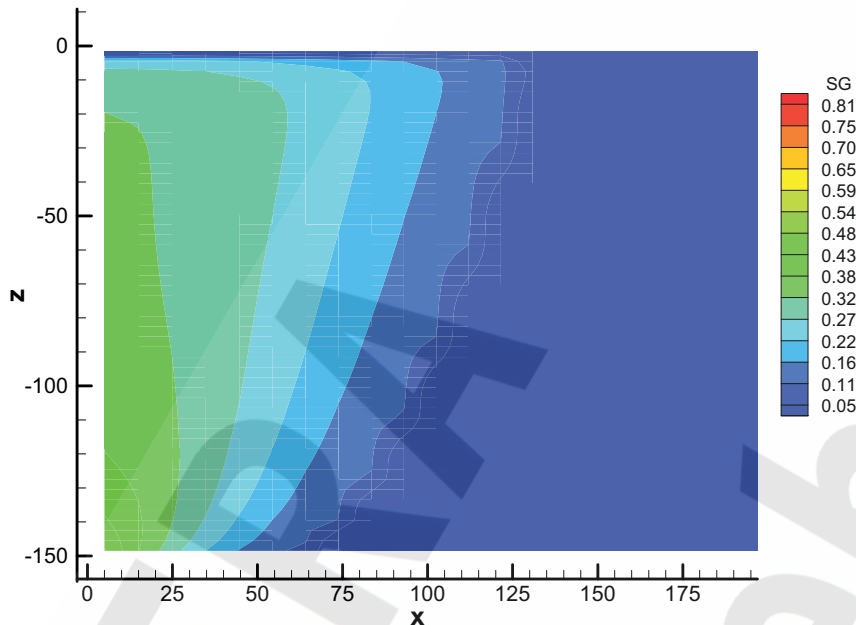


Abbildung P-10 Verteilung der Gassättigung im intakten Hutgestein 5'000 Jahre nach dem Volllaufen der Restgrube.

P.6 Schlussfolgerungen

Die betrachteten Rechenfälle lassen den Schluss zu, dass das intakte Hutgestein den wahrscheinlicheren Gaspfad für die Freisetzung von ^{14}C aus dem Grubengebäude darstellt. Betrachtet man z.B. die Referenzfälle für die Freisetzungspfade Schichtenfolge DGL und intaktes Hutgestein, so ist der Gasfluss durch das intakte Hutgestein größer als der entlang der Schichtenfolge DGL, bei gleichzeitig niedrigerem Gasdruck in der Gasblase. Dies gilt auch für die meisten Parametervariationen. Der Pfad entlang der Schichtenfolge DGL wird nur dann wirksam werden, wenn der Gaseindringdruck des intakten Hutgesteins höher ist als derjenige der Schichtenfolge. Da für das Hutgestein wegen der Klüftung ein im Vergleich zur Schichtenfolge DGL niedrigerer Gaseindringdruck erwartet wird, ist dies jedoch als eher unwahrscheinlich einzustufen.

Unabhängig vom Gaspfad – Schichtenfolge DGL oder intaktes Hutgestein – stellen die radiologischen Auswirkungen der Freisetzung von gasförmigem ^{14}C zu keinem Zeitpunkt eine Gefährdung der Bevölkerung dar. Dadurch, dass die Freisetzung mit hoher Wahrscheinlichkeit durch das intakte Hutgestein erfolgt, kann von einer flächenhaften Freisetzung in die Biosphäre ausgegangen werden. Die hieraus ermittelten maximalen jährlichen Dosisbeiträge belaufen sich auf $4 \cdot 10^{-6}$ mSv/a und liegen somit um beinahe fünf Größenordnungen unterhalb des Schutzziels von 0,3 mSv/a.

Als maßgebliche treibende Kraft für die Gasfreisetzung aus dem Grubengebäude hat sich – neben dem dichtebedingten Auftrieb – die Konvergenz des Grubengebäudes herausgestellt. Die vom Abfallinventar hervorgerufene Gasbildung ist nach dem Volllaufen der Restgrube bereits weitgehend abgeklungen und daher von untergeordneter Bedeutung.

Der Nachweis der Langzeitsicherheit bezüglich der Freisetzung gasförmigen ^{14}C ist erbracht, auch wenn noch gewisse Ungewissheiten bzgl. der verwendeter Parameter und Annahmen bestehen. Die dargestellten Rechenfälle decken ein breites Spektrum an Szenarien ab und berücksichtigen Ungewissheiten, die sich aus vereinfachenden Annahmen und Festlegungen einzelner Modellparameter ergeben. Für den wahrscheinlichen Freisetzungspfad durch das intakte Hutgestein zeigt die Analyse, dass sich die Bandbreite der konzeptionellen Annahmen über den Zustand der technischen Barrieren in der Grube, die Ungewissheiten bezüglich der Konvergenzrate des Grubengebäudes sowie des Gaseindringdrucks der potentiellen Wegsamkeiten im Hutgestein am stärksten auf die maximale zu erwartende Dosis auswirken. Demgegenüber fallen die Ungewissheiten bzgl. der übrigen Transportparameter des intakten Hutgesteins und der Schichtenfolge DGL weniger ins Gewicht. Es besteht daher kein weiterer Untersuchungsbedarf, diese Parameter genauer zu bestimmen.

ERT
Morsleben



Anhang Q Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens

Durch die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen sollen die radioaktiven Stoffe über große Zeiträume von der Biosphäre ferngehalten werden. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass durch zukünftige menschliche Aktivitäten unabsichtlich die Barrierewirkung der geologischen Formation beeinträchtigt wird. Dies ist vor allem im Rahmen von Erkundungs- oder Bergbautätigkeiten zukünftiger Generationen möglich. Dabei ist es unvermeidlich, dass gerade ein sehr wirksamer Einschluss dazu führt, dass die Radionuklidkonzentrationen im Endlager zum Zeitpunkt des Eindringens noch relativ hoch sind.

Es darf davon ausgegangen werden, dass die Kenntnis über die Existenz des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben über einen langen Zeitraum erhalten bleibt. Während dieser Zeit ist ein unbeabsichtigtes Eindringen ausgeschlossen. Ein beabsichtigtes Eindringen dagegen stünde in der vollen Verantwortung der planenden und ausführenden Institutionen und ist daher nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. In Übereinstimmung mit dem Vorgehen in anderen Ländern (z.B. [ASN 1991]) wird angenommen, dass ein unbeabsichtigtes Eindringen in das Endlager frühestens 500 Jahre nach Verschluss erfolgt.

Q.1 Szenarientwicklung

Es ist grundsätzlich unmöglich, Prognosen über den Stand von Wissenschaft und Technik in ferner Zukunft (Jahrhunderte bis viele Jahrtausende ab heute) zu machen. Das betrifft die Motivation, aber auch die Technik des Eindringens, die Möglichkeit der Erkenntnis, dass eine Gefährdung durch eine Altlast vorliegt, bis hin zum eventuellen Ergreifen von Gegenmaßnahmen. Um wenig hilfreiche Spekulationen zu vermeiden, ist es international üblich, dass für die Bewertung unbeabsichtigter menschlicher Einwirkungen auf ein Endlager für radioaktive Abfälle auch für die Zukunft ein Vorgehen entsprechend dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik vorausgesetzt wird. Im vorliegenden Sicherheitsnachweis wird in gleicher Weise vorgegangen. Konservativerweise wird aber durch die Parameterwahl berücksichtigt, dass der Kenntnisstand in der Zukunft niedriger sein kann.

Aus den angeführten Gründen kann für ein unbeabsichtigtes menschliches Einwirken auf ein Endlager keine vollständige Szenarienanalyse erstellt werden. Stattdessen werden im Folgenden ausgewählte Szenarien für menschliches Eindringen in das ERAM entwickelt, die aus gegenwärtiger Sicht plausibel und abdeckend erscheinen.



Q.1.1 Art der Einwirkung

Für die geographischen und geologischen Verhältnisse am Standort Morsleben erscheinen drei Arten von menschlichen Einwirkungen auf das Endlager möglich:

- Das Abteufen einer Explorationsbohrung
- Die Solung einer Kaverne (zur Gewinnung von Salz oder zur Speicherung von Rohstoffen)
- Die Errichtung eines Bergwerks zur Salzgewinnung

Mit dem Abteufen einer **Explorationsbohrung** muss gerechnet werden, nachdem die Kenntnis von der Existenz des ERAM verloren gegangen ist und der Standort z.B. wegen seiner Geologie interessant erscheint (Salzwasserquellen an der Erdoberfläche weisen auf das Salz hin, denkbar wäre auch eine neuerliche Erkundung auf fossile Energieträger). Es ist anzunehmen, dass vor der Durchführung aufwändigerer Maßnahmen (z.B. der Errichtung eines Bergwerks) eine oder mehrere Explorationsbohrungen durchgeführt werden. Somit handelt es sich um das wahrscheinlichste Szenario. Falls das Endlager angebohrt wird, kann davon ausgegangen werden, dass zumindest an dieser Stelle kein neues Bergwerk errichtet wird. Nach heutigem Kenntnisstand ist im Liegenden der Salzstruktur nicht mit dem Vorkommen von Rohstoffen zu rechnen. Daher wird vorausgesetzt, dass die Bohrung nach dem Abschluss der Erkundung verfüllt und dann sich selbst überlassen wird.

Die **Solung einer Kaverne** kann die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Salz beeinträchtigen. Ausgehend von einer Bohrung, die neben einem Einlagerungsbereich abgeteuft wird und dadurch keinen Hinweis auf die Existenz des Endlagers gibt, kann die Salzbarriere weggelöst und die Sole mit Radionukliden kontaminiert werden. Mit der Sole würden letztere zur Erdoberfläche transportiert. Am Standort Morsleben mit seiner stark heterogenen Salzstruktur ist eine Kavernensolung jedoch auszuschließen: Eine **Solung zur Salzgewinnung** mit Einfluss auf das Endlager wird am Standort Morsleben mit seiner stark heterogenen Salzstruktur ausgeschlossen. Zuvor würde die Salzstruktur erkundet und das bestehende Altbergwerk erkannt. Für eine **Solung zur Errichtung einer Speicherkaverne** (zur Speicherung flüssiger oder gasförmiger Rohstoffe) ist der Standort aus geologischen Gründen denkbar ungeeignet. Der Aufbau dieser Salzstruktur ist durch tektonische Ereignisse stark gefaltet und sehr inhomogen. Häufig wechselnde, steil einfallende Schichten und das abwechselnde Vorkommen von Kalisalzen und Anhydrit erlauben keinen kontrollierten Solprozess und würden die Dichtigkeit der entstandenen Kaverne beeinträchtigen.

Die **Errichtung eines neuen Bergwerks** neben den Schachtanlagen Bartensleben und Marie ist nicht völlig undenkbar – die Existenz dieser Doppelschachtanlage beweist ja, dass der Abbau an dieser Stelle einmal rentabel war. Das Wissen um die Existenz des ERAM müsste zunächst verloren gehen, bevor man wieder auf die Idee kommen könnte, in der Region des ERAM ein Salzbergwerk zu errichten. Dann wäre es aber sehr wahrscheinlich, dass zuvor ausreichend viele Explorationsbohrungen abgeteuft werden, wodurch die Existenz eines alten Bergwerks erkannt und die weitere Tätigkeit eingestellt wird.

Somit gibt es unter den Möglichkeiten für menschliche Einwirkungen nach dem Verlust der Kenntnis über die Existenz des ERAM nur für die Durchführung einer Explorationsbohrung eine gewisse Wahrscheinlichkeit, die groß genug ist, dass sich eine Untersuchung der Auswirkungen dieses Szenarios empfiehlt. Es wird im Folgenden weiter untersucht.



Q.1.2 Grad der Einwirkung

Je nach der Lokation und der erreichten Tiefe kann die Explorationsbohrung eine oder mehrere Barrieren des ERAM beeinträchtigen:

- (i) Die Bohrung bleibt innerhalb des Hutgesteins, ohne das Salzgebirge zu erreichen
- (ii) Die Bohrung durchörtert das Salzgebirge, bewahrt aber einen ausreichenden Abstand zu den Grubenbauen des ERAM, so dass dessen Barrieren intakt bleiben
- (iii) Die Bohrung stößt in die Restgrube, d.h. in Grubenbaue außerhalb der abgedichteten Einlagerungsbereiche
- (iv) Die Bohrung stößt in einen abgedichteten Einlagerungsbereich

Fall (i) hätte vermutlich keine zusätzliche Strahlenexposition zur Folge. Während des Abteufens der Bohrung sind die Auswirkungen sicher geringer als im Fall (iv). Auch zu späteren Zeiten wäre höchstens dann ein gewisser Einfluss auf die Strahlenexposition denkbar, falls eine hydraulische Verbindung zwischen der Bohrung und dem Referenz-Freisetzungspfad durch Hutgestein und Deckgebirge bestünde. Es hinge dann von den hydraulischen und chemischen (Sorptions-)Eigenschaften der Bohrlochverfüllung ab, ob sich dieser zusätzliche Fließpfad günstig oder ungünstig auf die Langzeitsicherheit auswirken würde.

Im Fall (ii) stellt die Bohrung in jedem Fall eine alternative Wegsamkeit durch Hutgestein und Deckgebirge dar. Ob die Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit positiv oder negativ wären, hinge dann wiederum von den Eigenschaften der Bohrlochverfüllung ab.

Im Referenzszenario des Sicherheitsnachweises (Kapitel 3.2) wird von eventuellen hydraulischen Barrieren zwischen der Restgrube und dem Salzspiegel kein Kredit genommen. Für Fall (iii), bei dem die Bohrung die Restgrube trifft, besteht also im Hinblick auf die Langzeitsicherheit kein Unterschied zu Fall (ii), weil der hydraulische „Kurzschluss“ zwischen der Grube und der Bohrung über den Salzspiegel in beiden Fällen vorausgesetzt wird. Zum Zeitpunkt der Bohrung ist aber eine zusätzliche Strahlenexposition möglich, wenn radionuklidhaltige Feststoffe und Flüssigkeiten an die Tagesoberfläche gelangen.

Im Fall (iv) wird ein Bereich der Grube angebohrt, welcher einen großen Teil des Radionuklidinventars enthält. Falls während der Bohrtätigkeit Feststoffe oder Flüssigkeiten aus diesem Bereich an die Tagesoberfläche gelangen, sind die radiologischen Konsequenzen sicher höher als bei einer Bohrung in die Restgrube. Auch für die Langzeitsicherheit (nach dem Verfüllen der Bohrung) sind die möglichen Auswirkungen größer als im Fall (iii), weil die radionuklidhaltige Flüssigkeit aus dem Einlagerungsbereich direkt in die Bohrung gelangen kann, ohne zuvor mit Flüssigkeit aus der Restgrube verdünnt zu werden.

Damit ist gezeigt, dass Fall (iv) die größten möglichen radiologischen Konsequenzen hätte. Er deckt die Fälle (i) – (iii) ab. Im Folgenden wird daher die Bohrung in einen abgedichteten Einlagerungsbereich weiter betrachtet.



Q.2 Szenario für menschliches Einwirken

Gestützt auf die Ausführungen in Kapitel Q.1.2 wird folgendes Szenario untersucht:

Eine Bohrung erfolgt zu einem frühen Zeitpunkt, für den der Verlust der Kenntnis über die Existenz des ERAM unterstellt werden kann, d.h. 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers. Zu diesem Zeitpunkt sind die Abdichtungen zwischen übriger Grube und Einlagerungsbereich noch intakt, der Druck im Einlagerungsbereich (durch Gasbildung und Konvergenz) ist deutlich unter dem hydrostatischen Druck der entsprechenden Tiefe und somit auch unter dem Druck der Bohrspülung⁹². Es wird ein kleinerer Grubenbau angebohrt, der hydraulisch schlecht mit den anderen Grubenbauen des Einlagerungsbereichs verbunden ist⁹³. Nach dem Ende der Exploration wird die Verrohrung der Bohrung ausgebaut und das Bohrloch verfüllt. Der Einlagerungsbereich läuft danach langsam voll – z.T. über die Bohrung, nach Korrosion der Abdichtungen auch aus der Restgrube. Wenn der Druck im Einlagerungsbereich den hydrostatischen Druck überschritten hat, wird durch die Bohrung radionuklidhaltige Lösung ausgepresst, welche schließlich in den oberflächennahen Aquifer austritt. Dessen Nutzung führt zu einer Strahlenexposition.

Q.3 Konzeptuelles Modell

Von der Erdoberfläche wird eine Bohrung abgeteuft. Diese erreicht einen Grubenbau eines abgedichteten Einlagerungsbereichs. Dessen Abdichtungen sind noch intakt, daher ist der Einlagerungsbereich praktisch trocken, der Gasdruck liegt unterhalb des Drucks der Bohrspülung, und es wird keine Flüssigkeit ausgepresst.

Mit dem Bohrklein und evtl. durch die Bohrspülung gelangen kleine Mengen an Radioaktivität an die Tagesoberfläche. Die Strahlenexposition, die sich nach Deposition dieses Materials, anschließender Auswaschung und Eintrag ins Grundwasser ergeben könnte, ist vermutlich sehr gering. Die Verrohrung der Bohrung wird ausgebaut und das Bohrloch mit einem porösen Material geringer hydraulischer Leitfähigkeit verfüllt.

Somit resultiert während der Phase der Einwirkung keine nennenswerte Strahlenexposition. Zu untersuchen ist lediglich, ob in den Zeiten danach durch das Vorhandensein eines verfüllten Bohrlochs eine zusätzliche Strahlenexposition verursacht werden kann.

Nach dem Verfüllen des Bohrlochs läuft der Einlagerungsbereich weiter voll – aus der Restgrube durch die Abdichtungen sowie aus dem Deckgebirge durch das verfüllte Bohrloch. Es wird angenommen, dass der Lösungszutritt aus der Restgrube durch die Bohrung nicht beeinflusst wird. Damit ist die maximale Dauer für die Füllung des Einlagerungsbereichs durch die Korrosion der kürzesten Abdichtung gegeben.

⁹² Durch Spülungszugaben ist die Dichte der Bohrspülung größer als 1

⁹³ Diese Annahme ist konservativ. Würde ein großer Grubenbau getroffen, dann wäre durch den Verlust von Bohrspülung die Wahrscheinlichkeit groß, dass die Existenz eines Endlagers erkannt wird und die Bohrung qualitativ hochwertig verfüllt wird. Das gleiche gilt für die hydraulische Anbindung des Grubenbaus an die übrigen Grubenbaue des Einlagerungsbereichs. Wäre der angebohrte Grubenbau dagegen vollständig isoliert, dann könnten die Radionuklide aus den anderen Grubenbauen nicht über die Bohrung freigesetzt werden.



Parallel dazu treten durch das Bohrloch Wässer aus dem Deckgebirge zu. Da ausgeschlossen werden kann, dass diese Wässer nennenswerte Mengen an Magnesiumsalzen enthalten, wird angenommen, dass die Bohrlochverfüllung ihnen gegenüber chemisch stabil ist. Die Zutrittsrate durch das Bohrloch ist dann durch den Druckgradienten und den hydraulischen Widerstand gegeben. Direkt nach dem Verfüllen der Bohrung ist der Druck im Einlagerungsbereich minimal (später steigt er durch Gasbildung und Konvergenz) und somit der Druckgradient und die Zutrittsrate maximal. Die Zutrittsrate in m^3/s berechnet sich nach

$$Q_B = \frac{k_B \cdot A_B}{\mu_w} \cdot \frac{\Delta p}{L_B} \quad (\text{Q-1})$$

mit

k_B Permeabilität der Bohrlochverfüllung; [m^2]

A_B Querschnittsfläche der Bohrung; [m^2]

μ_w Viskosität der flüssigen Phase; [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]

Δp Über- bzw. Unterdruck im Einlagerungsbereich gegenüber dem hydrostatischen Druck; [Pa]

L_B Länge des verfüllten Bereichs der Bohrung [m]

Hydraulische Widerstände innerhalb des Einlagerungsbereichs sind dabei konservativ vernachlässigt.

Nach dem Volllaufen des Einlagerungsbereichs beginnt die Auspressphase. Es wird angenommen, dass bis dahin die Radionuklide aus den Abfällen des Einlagerungsbereichs vollständig mobilisiert sind und sich im Flüssigkeitsvolumen innerhalb des Einlagerungsbereichs gleichmäßig verteilt haben.

Eine Auspressung radionuklidhaltiger Lösung aus dem Bohrloch kann nur erfolgen, falls der Druck im Einlagerungsbereich den hydrostatischen Druck überschreitet. Im Referenzfall für die Radionuklidfreisetzung auf dem Grundwasserpfad kann die Lösung aus dem Einlagerungsbereich ohne nennenswerten hydraulischen Widerstand durch die korrodierte Abdichtung und den Transportweg durch Hutgestein und Deckgebirge in das Grundwasser übertreten (vgl. z.B. Anhang A.6 sowie die Resultate für den ELB WSF in Kapitel 5.1.1). Unter dieser Voraussetzung gibt es keine treibende Kraft für eine Auspressung durch das Bohrloch und somit auch keine ungünstige Auswirkung auf die Langzeitsicherheit.

Daher wäre eine Auspressung durch das Bohrloch nur möglich, wenn das Abdichtsystem noch einen gewissen hydraulischen Widerstand aufweisen würde oder wenn besondere 2-Phasenverhältnisse ein unmittelbares Auspressen von Flüssigkeit durch das Deckgebirge behindern (z.B. durch eine große Gasblase direkt unterhalb der Zutrittsstelle vom Deckgebirge in die Restgrube, vgl. Anhang P, Kapitel P.3.2). Wenn der angebohrte Grubenbau bis zur Firste mit Flüssigkeit gefüllt ist, würden solche Umstände das Auspressen von Flüssigkeit aus dem Einlagerungsbereich durch die Bohrung erlauben. In diesem Fall berechnet sich die Auspressrate durch die Bohrung wiederum gemäß Gleichung (Q-1), wobei sich das Vorzeichen (die Strömungsrichtung)



tung) aufgrund der Druckverhältnisse umkehrt. Die über die Bohrung pro Jahr freigesetzte Kollektivdosis (in Sv/a) berechnet sich dann gemäß

$$RT = \frac{\sum_i (I_{i,t_1} \cdot DF_{\text{Ing},i})}{V_{L,t_1}} \cdot Q'_B \quad (\text{Q-2})$$

mit

Q'_B	Flüssigkeitsstrom durch das Bohrloch während der Auspressphase; [m^3/a]
t_1	Beginn der Auspressphase; [a]
I_{i,t_1}	Inventar des Radionuklids i im angebohrten Einlagerungsbereich zum Zeitpunkt t_1 ; [Bq]
$DF_{\text{Ing},i}$	Dosisfaktor für Ingestion des Radionuklids i ; [Sv/Bq]
V_{L,t_1}	Flüssigkeitsvolumen im angebohrten Einlagerungsbereich zum Zeitpunkt t_1 ; [m^3]

Eine Erniedrigung der Radionuklidkonzentration im Einlagerungsbereich durch Löslichkeit und Sorption wird konservativ vernachlässigt, ebenso eine Verzögerung der Freisetzung durch Sorption an der Bohrlochverfüllung.

Q.4 Modellparameter

Die Modellparameter für das BohrlochszENARIO sind in Tabelle Q-1 zusammengestellt. Der Zeitpunkt der Bohrung wurde mit 500 Jahren so früh wie möglich gewählt; das ist konservativ in Hinblick auf das Radionuklidinventar. Der Durchmesser der Bohrung von 8½ " entspricht der heutigen Technik bei einer Erkundungsbohrung ins Salinar oder nach Erdöl. Es wird angenommen, dass die Bohrung einen Grubenbau auf dem Niveau der 3. Sohle trifft. Der hydrostatische Druck beträgt in dieser Teufe 4,9 MPa.

Die wirksame Länge der Bohrlochverfüllung (nach Abschluss der Explorationstätigkeiten) ist durch den minimalen Abstand vom Salzspiegel zur 3. Sohle gegeben. Dabei wird angenommen, dass die Bohrung oberhalb des Salzspiegels über Fließsysteme höherer Permeabilität mit dem oberflächennahen Aquifer verbunden ist. Die Permeabilität der Bohrlochverfüllung wurde verhältnismäßig hoch gewählt. Der Wert von 10^{-15} m^2 entspricht einem gering quellenden bentonithaltigen Tonprodukt. Hochwertige Tonprodukte weisen je nach Salinität Permeabilitäten von $10^{-17} - 10^{-18} \text{ m}^2$ auf. Diese niedrigeren Werte werden auch von Salzzementen erreicht oder sogar unterschritten. Es wird angenommen, dass während der Zutrittsphase nur NaCl-Lösung durch die Bohrlochverfüllung zutritt. Dagegen kann der Einlagerungsbereich aus der Restgrube mit IP21-Lösung volllaufen; diese Zusammensetzung wurde als repräsentativ für die Auspressphase gewählt.

Tabelle Q-1: Modellparameter für das BohrlochszENARIO

Parameter	Beschreibung	Wert
T_B	Zeitpunkt der Bohrung	500 a
A_B	Querschnittsfläche der Bohrung ($\varnothing = 8\frac{1}{2}$ ")	$3,7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$
k_B	Permeabilität der Bohrlochverfüllung	10^{-15} m^2
μ_{NaCl}	Viskosität von NaCl-Lösung (Zutrittsphase)	$2,04 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
μ_{IP21}	Viskosität von IP21-Lösung (Auspressphase)	$5,6 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
L_B	Wirksame Länge der Bohrlochverfüllung	192 m
$p_{w,Z}$	Hydrostatischer Druck am Ende der Bohrung	$4,9 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
Δp	Überdruck in der Grube	$2,5 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
$V_{L,t1}(\text{WSF})$	Flüssigkeitsvolumen im ELB WSF zum Beginn der Auspressphase	$1 \cdot 10^5 \text{ m}^3$

Von den beiden abgedichteten Einlagerungsbereichen, ELB WSF und ELB OF, braucht für das BohrlochszENARIO nur der ELB WSF betrachtet zu werden. Eine Bohrung in den ELB OF führt aus den folgenden Gründen nicht zu einer nennenswerten Strahlenexposition:

Im ELB OF dauert die Phase des Zutritts von Lösung aus der übrigen Grube durch das Abdichtsystem in den Einlagerungsbereich ca. 88'000 Jahre (Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“, Kapitel 5.1.1.2). Nach dieser Zeit ist das Abdichtsystem noch intakt, aber der Lösungszutritt endet, weil der Innendruck im Einlagerungsbereich aufgrund von Gasbildung und Hohlraumkonvergenz den Wert des hydrostatischen Drucks überschreitet. Insgesamt treten über die beiden Abdichtungen ca. 4'700 m³ Flüssigkeit zu. Der Flüssigkeitszutritt aus der Bohrung ist noch kleiner. Zwar ist die Permeabilität der Bohrlochverfüllung um drei Größenordnungen höher als die des Abdichtsystems, dafür ist die Querschnittsfläche aber um drei Größenordnungen geringer. Die Viskositäten der Lösungen sind vergleichbar, die wirksame Länge der Abdichtung des Ostfelds auf der 4. Sohle ist aber nur gut halb so groß wie diejenige der Bohrlochverfüllung. Durch die Bohrung erhöht sich die zutretende Flüssigkeitsmenge also nur unwesentlich. Zusammen mit der Anfangsflüssigkeit befinden sich zu Beginn der Auspressphase ca. 5'000 m³ Flüssigkeit im Einlagerungsbereich. Darüber stehen dann etwa 50'000 m³ gasgefüllter Porenraum (mehrere Mio m³_{STP} Gas bei 4,9 MPa Innendruck). An den Firsten der Grubenbaue wird also nur Gas sein – folglich kann keine radionuklidhaltige Lösung über die Bohrung austreten.

Im ELB WSF dauert die Zutrittsphase im Referenzfall („mit Gaspolster, mit Gasfluss“) 35'000 Jahre; dann sind über das inzwischen korrodierte Abdichtsystem knapp 100'000 m³ Lösung zugetreten.



Nachdem der Einlagerungsbereich mit Lösung gefüllt ist, vergehen wiederum einige tausend Jahre, bis sich durch Gasbildung und Konvergenz ein signifikanter Überdruck in der Grube aufgebaut hat. Dieser kann Werte von 2 – 3 MPa annehmen, falls für die Lösung in der Grube der Weg in das Hutgestein durch eine große Gasblase versperrt ist und keine durchgehenden offenen Klüfte durch das Hutgestein führen, durch welche das Gas wesentlich leichter entweichen würde (Anhang P). In den Modellrechnungen wird von mittleren Verhältnissen (2,5 MPa) ausgegangen.

Die radionuklidspezifischen Daten (Halbwertszeiten, Anfangsinventare in den Einlagerungsbereichen und Dosisfaktoren) sind in Anhang C, Tabelle C-25 und C-26 zusammengestellt.

Q.5 Resultate

Es wird eine Bohrung in den ELB WSF betrachtet, nachdem in Kapitel Q.4 bereits gezeigt wurde, dass nicht damit zu rechnen ist, dass durch eine Bohrung in den ELB OF radionuklidhaltige Lösung freigesetzt wird. Über die Gleichung (Q-1) errechnet sich aus den Parametern in Tabelle Q-1 eine Auspressrate über das verfüllte Bohrloch von 2,7 Litern pro Jahr. Setzt man voraus, dass die ausgepresste Lösung in einem Grundwasserfluss von 10'000 m³/a (untere Grenze der Bandbreite des Parameters Q_{GW} , vgl. Tabelle 4-1 im Haupttext sowie Anhang T) verdünnt wird, dann errechnet sich aus der resultierenden Radionuklidkonzentration im oberflächennahen Grundwasser unter Einbezug aller Expositionspfade mit Hilfe der Dosiskonversionsfaktoren gemäß [Pröhl & Gehring 2002] eine Strahlenexposition von 0,0002 mSv/a.

Zur weiteren Veranschaulichung ist in Abbildung Q-1 der zeitliche Verlauf der jährlich aus dem Bohrloch freigesetzten Radioaktivität als Kollektivdosis dargestellt. Unter vergleichbaren Voraussetzungen wie im Referenzszenario hat sich im Einlagerungsbereich nach 37'000 Jahren ein Druck aufgebaut, der zur Auspressung radionuklidhaltiger Lösung durch das verfüllte Bohrloch führen kann. Die freigesetzte Kollektivdosis beträgt zu dieser Zeit ca. 0,0002 Sv/a und nimmt dann weiter ab. Diese Kollektivdosis ist eine fiktive Größe und setzt voraus, dass alle aus der Bohrung freigesetzten Radionuklide gesammelt und von menschlichen Individuen mit der Nahrung aufgenommen werden. In diesem Szenario ist der Wert so geringfügig, dass er bereits in dem hypothetischen Fall, dass eine einzige Person die gesamte aus der Bohrung freigesetzte Radioaktivität mit der Nahrung aufnimmt, unterhalb des Werts von 0,3 mSv/a nach § 47, Abs. 1 StrlSchV liegen würde. Bei realistischen Annahmen zur Verdünnung der freigesetzten Aktivität im oberflächennahen Grundwasser ist die resultierende Strahlenexposition, wie oben angegeben, um drei Größenordnungen kleiner.

Aus der Darstellung in Abbildung Q-1 ist auch ersichtlich, dass die Radionuklidfreisetzung durch eine verfüllte Bohrung selbst bei einer erheblich früheren Lösungsfüllung des ELB WSF – in den probabilistischen Modellrechnungen liegt in den Fällen mit Gaspolster der Medianwert für die Dauer der Zutrittsphase in den ELB WSF bei etwa 25'000 Jahren, in 90% der Realisierungen dauert die Zutrittsphase mehr als 8'000 Jahre – nicht wesentlich höher ausfallen würde. Angesichts der sehr pessimistischen Modellannahmen ist somit gezeigt, dass dieses Szenario nicht zu einer relevanten Strahlenexposition führt.



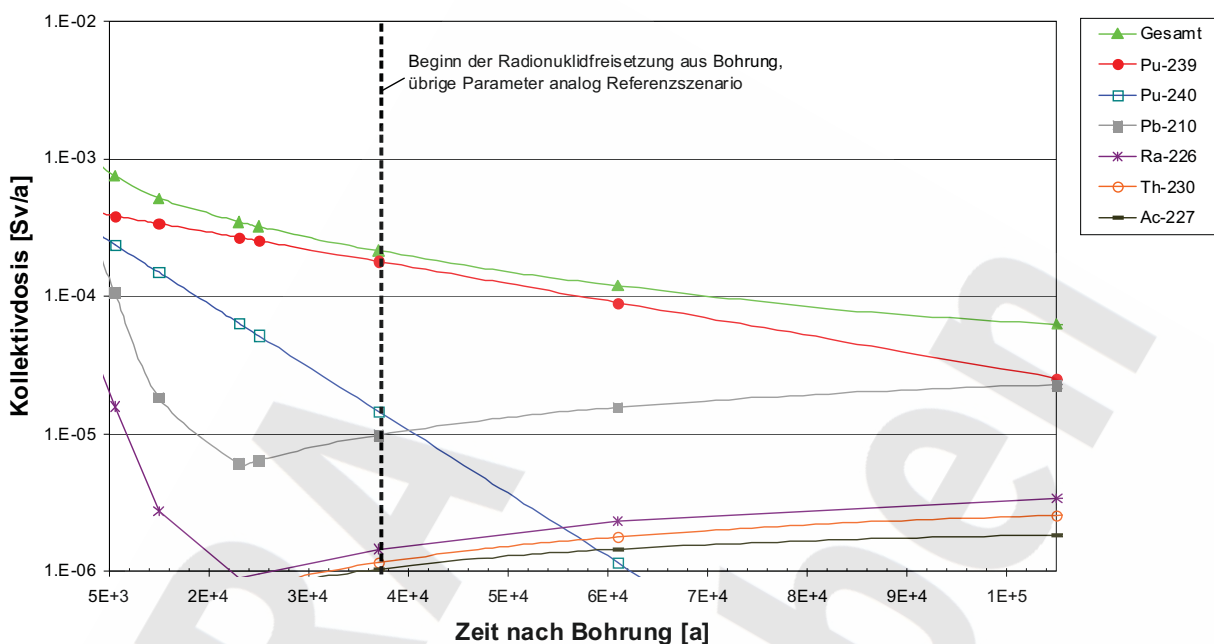


Abbildung Q-1: Durch Bohrung in den ELB WSF verursachte Kollektivdosis; die Freisetzung aus dem Bohrloch beginnt erst, nachdem der Einlagerungsbereich über die Restgrube und das Abdichtsystem mit Lösung gefüllt ist und sich ein ausreichender Überdruck aufgebaut hat – mit den Referenzparametern nach 37'000 Jahren

Q.6 Schlussfolgerungen

Für das ERAM darf nicht unterstellt werden, dass das Wissen um die Existenz des ERAM für alle Zeiten erhalten bleibt. Nach dem eventuellen Verlust dieser Kenntnis ist ein unbeabsichtigtes Eindringen in das ERAM nicht auszuschließen. Aus verschiedenen Gründen kann aber angenommen werden, dass das Eindringen zunächst über eine Bohrung in das Endlager erfolgt, dieses dabei entdeckt wird und deshalb weitere Beeinträchtigungen seiner Integrität unterbleiben.

Eine Bohrung in einen abgedichteten Einlagerungsbereich 500 Jahre nach Endlagerverschluss hat keine nennenswerten radiologischen Konsequenzen. Die Zutrittsraten durch das verfüllte Bohrloch sind unerheblich. Zu einer Auspressung radionuklidhaltiger Lösung aus der Bohrung kann es nur kommen, falls der Einlagerungsbereich auf anderem Wege – z.B. aus der übrigen Grube durch eine korrodierte Abdichtung – vollläuft und sich anschließend in der Grube ein Überdruck in Höhe von mehreren MPa aufbaut, was vermutlich nur bei besonderen 2-Phasenverhältnissen der Fall sein wird. Aber selbst dann ist die Strahlenexposition, die aus der Radionuklidfreisetzung über das verfüllte Bohrloch resultieren kann, irrelevant.

Anhang R Diffusive Mobilisierung von ^{226}Ra aus dem verfüllten Streckenstummel im Einlagerungsbereich Ostfeld

R.1 Einleitung

Im vorliegenden Anhang wird mit einem einfachen konzeptuellen Modell die mögliche Mobilisierung von ^{226}Ra aus der Radium-VBA abgeschätzt. Diese befindet sich in einem ca. 2,3 m tiefen Sohlenbohrloch, das von einem speziell aufgefahrenen, vom Ostquerschlag auf der 4. Sohle abzweigenden Streckenstummel aus abgeteuft wurde. Der Ausbau des Sohlenbohrlochs besteht aus einer verlorenen Schalung aus Betonringen und einer Hinterfüllung von rund 40 cm Salzbeton. Er ist gegen den Gebirgsdruck ausgelegt. Das Sohlenbohrloch ist mit einem Betondeckel abgedeckt. Der Streckenstummel wird im Zuge der Verfüllung des Ostfeldes bis auf Firstniveau des Ostquerschlags mit Salzbeton verfüllt. Der Streckenstummel befindet sich in intaktem Steinsalz.

Bei einem Lösungszutritt in das Ostfeld – und damit auch in den Streckenstummel – können Radionuklide aus der Radium-VBA in Lösung gehen. Gleichzeitig ist auch mit dem Einsetzen von korrosiver Gasbildung im Sohlenbohrloch zu rechnen.

Kumuliert können durch Korrosion der Radium-VBA und ihres Inhalts etwa $750 \text{ m}^3_{\text{STP}}$ Gas entstehen [Colenco 2002c], welches beim hydrostatischen Druck auf der 4. Sohle von 5,5 MPa rund 14 m^3 einnimmt. Durch den unverfüllten Ringraum zwischen der Radium-VBA und der Auskleidung des Sohlenbohrlochs wird sich das Gas ohne relevantes Verdrängen von Lösung einen Weg aus dem Sohlenbohrloch in den darüber liegenden verfüllten Streckenstummel bahnen und sich entweder unter dessen überhöhter Firste sammeln oder kanalisiert in den Ostquerschlag entweichen. Sofern die überhöhte Firste des Streckenstummels unverfüllt bleibt, ist das dort vorhandene Hohlraumvolumen während langer Zeit groß genug, um das gesamte Gasvolumen aufzunehmen. Sinkt dieses Hohlraumvolumen durch Konvergenz zu späten Zeiten unter das Volumen des sich dort angesammelten, komprimierten Gases ab, dann entweicht das Gas entlang firstnaher Wegsamkeiten in den Ostquerschlag. Gasbildung in der Radium-VBA verursacht somit keine nennenswerte Lösungsbewegung von der Radium-VBA zum Ostquerschlag.

Der Ausbau des Sohlenbohrlochs und die Verfüllung des Streckenstummels mit Salzbeton widerstehen dem Gebirgsdruck, Lösungsbewegung durch Hohlraumkonvergenz findet – außer eventuell im Firstbereich des Streckenstummels als Folge der Konvergenz von dessen unverfüllter überhöhter Firste – nicht statt. Eine erhebliche Korrosion des Salzbetons in diesem Bereich des Ostfeldes kann ausgeschlossen werden, da im Ostfeld keine Kalilager aufgeschlossen sind und da volumemäßig kaum Lösung in den mit Salzbeton weitgehend verfüllten Streckenstummel eindringen kann.

Radionuklide, die bei Lösungszutritt zur Radium-VBA in Lösung gehen, können somit nur durch Diffusion in den Ostquerschlag gelangen.

Der mögliche Übertritt von ^{226}Ra aus der Radium-VBA in den Ostquerschlag durch diffusiven Transport wird nachfolgend unter folgenden Annahmen berechnet:



- Bei einem Lösungszutritt in das Sohlenbohrloch stelle sich dort durch Mobilisierung von ^{226}Ra instantan die Konzentration in Lösung c_1 ein. Im weiteren Verlauf der Zeit verändere sich die ^{226}Ra -Konzentration in Lösung im Sohlenbohrloch nur noch durch radioaktiven Zerfall des ^{226}Ra .
- Der diffusive Transport erfolge entlang einer 1-dimensionalen Strecke der Länge L mit konstantem Querschnitt A . Die Länge L beträgt etwa 4 m, dem Abstand des Sohlenbohrlochs vom Ostquerschlag. Der Querschnitt A liegt zwischen rund 1 m^2 (dem Querschnitt des Sohlenbohrlochs) und 12 m^2 , dem Querschnitt des Streckenstummels.
- Die ^{226}Ra -Konzentration am Ende der 1-dimensionalen Transportstrecke, dem Kontakt mit dem Ostquerschlag, sei immer 0. Diese Randbedingung führt – im Vergleich mit anderen möglichen Randbedingungen – zum höchsten diffusiven ^{226}Ra -Fluss in den Ostquerschlag.
- ^{226}Ra sorbiere am Salzbeton, der K_d -Wert betrage $0,01 \text{ m}^3/\text{kg}$ (bezogen auf die Masse des Salzbetons)⁹⁴. Bei einer Dichte des Salzbetons von $2'000 \text{ kg}/\text{m}^3$ und einer Porosität von 20 % entspricht dies einem Retentionsfaktor von $R = 100$.

R.2 Resultierende Differentialgleichung und deren Lösung

Der diffusive Transport von ^{226}Ra durch den Salzbeton-Versatz des Streckenstummels unter den genannten vereinfachenden Bedingungen wird durch folgende Differentialgleichung beschrieben:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_a \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \lambda \cdot c \quad (\text{R-1})$$

mit den Anfangs- und Randbedingungen

$$c(x, t = 0) = 0 \quad \text{Anfangsbedingung} \quad (\text{R-2})$$

$$c(x = 0, t) = c_1 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \text{Randbedingung Seite Sohlenbohrloch} \quad (\text{R-3})$$

$$c(x = L, t) = 0 \quad \text{Randbedingung Seite Ostquerschlag} \quad (\text{R-4})$$

mit

c ^{226}Ra -Konzentration in Lösung im Salzbeton-Versatz [Bq/m^3]

$D_a = \frac{D_p}{R}$ apparente Diffusivität von ^{226}Ra im Salzbeton [m^2/s]

D_p Porendiffusivität im Salzbeton [m^2/s]

R Retentionsfaktor von ^{226}Ra im Salzbeton

λ Zerfallskonstante des ^{226}Ra [s^{-1}]

⁹⁴ pessimistische Schätzung für die Sorption an korrodiertem Salzbeton auf Basis von [FZK INE 2000], wo für die Sorption von Radium an zementhaltigen Feststoffen eine Bandbreite von $0,037 - 4,1 \text{ m}^3/\text{kg}$ angegeben wird. Zum Vergleich: In [Nagra 2002] wird für die Sorption von Radium an Zement ein Wert von $0,05 \text{ m}^3/\text{kg}$ (realistisch) und von $0,03 \text{ m}^3/\text{kg}$ (pessimistisch) angegeben.



Mit dem Ansatz

$$c(x, t) = \tilde{c}(x, t) \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (\text{R-5})$$

ergeben sich aus den Gleichungen (R-1) bis (R-4) folgende Differentialgleichung, Anfangs- und Randbedingungen für $\tilde{c}(x, t)$

$$\frac{\partial \tilde{c}}{\partial t} = D_a \cdot \frac{\partial^2 \tilde{c}}{\partial x^2} \quad (\text{R-6})$$

$$\tilde{c}(x, t = 0) = 0 \quad (\text{R-7})$$

$$\tilde{c}(x = 0, t) = c_1 \quad (\text{R-8})$$

$$\tilde{c}(x = L, t) = 0 \quad (\text{R-9})$$

Die Lösung dieses Gleichungssystems erfolgt nach [Carslaw & Jaeger 1959], Seiten 99ff, durch die Zerlegung von $\tilde{c}(x, t)$ in die stationäre Lösung $\tilde{c}_u(x)$ mit inhomogenen Randbedingungen und einen instationären Teil $\tilde{c}_w(x, t)$ mit homogenen Randbedingungen:

$$\tilde{c}(x, t) = \tilde{c}_u(x) + \tilde{c}_w(x, t) \quad (\text{R-10})$$

Die stationäre Lösung lautet

$$\tilde{c}_u(x) = c_1 \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad (\text{R-11})$$

und der instationäre Teil ist durch folgendes Gleichungssystem gegeben:

$$\frac{\partial \tilde{c}_w}{\partial t} = D_a \cdot \frac{\partial^2 \tilde{c}_w}{\partial x^2} \quad (\text{R-12})$$

$$\tilde{c}_w(x, t = 0) = -c_1 \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad (\text{R-13})$$

$$\tilde{c}_w(x = 0, t) = 0 \quad (\text{R-14})$$

$$\tilde{c}_w(x = L, t) = 0 \quad (\text{R-15})$$

Die Lösung des Gleichungssystems (R-12) – (R-15) lautet, wiederum nach [Carslaw & Jaeger 1959],

$$\tilde{c}_w(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \sin\left(\frac{n \pi x}{L}\right) \cdot \exp\left(-\frac{D_a n^2 \pi^2 t}{L^2}\right) \quad (\text{R-16})$$

$$\text{mit } a_n = -\frac{2 c_1}{L} \cdot \int_0^L \left(1 - \frac{x'}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{n \pi x'}{L}\right) dx' \quad (\text{R-17})$$



Die Auswertung ergibt

$$a_n = -\frac{2 c_1}{n \pi} \quad (\text{R-18})$$

und damit als Lösung der Gleichungen (R-6) bis (R-9)

$$\tilde{c}(x,t) = c_1 \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) - 2 \cdot c_1 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \pi} \cdot \sin\left(\frac{n \pi x}{L}\right) \cdot \exp\left(-\frac{D_a n^2 \pi^2 t}{L^2}\right) \quad (\text{R-19})$$

Der diffusive ^{226}Ra -Fluss J am Ende der Strecke $x=L$ über den Querschnitt A beträgt

$$J(t) = -A \cdot \varepsilon \cdot D_p \cdot \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=L} = -A \cdot \varepsilon \cdot D_p \cdot e^{-\lambda \cdot t} \cdot \left. \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} \right|_{x=L} \quad (\text{R-20})$$

und mit Gl. (R-19) sowie der oben angeführten Beziehung zwischen D_a , D_p und R

$$J(t) = \frac{A \cdot \varepsilon \cdot D_p}{L} \cdot c_1 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \cdot \left[1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left(\exp\left(-\frac{D_p (2m)^2 \pi^2 t}{R \cdot L^2}\right) - \exp\left(-\frac{D_p (2m-1)^2 \pi^2 t}{R \cdot L^2}\right) \right) \right] \quad (\text{R-21})$$

Dabei ist ε die Porosität des Salzbetons.

R.3 Auswertung

Das ^{226}Ra -Inventar in der Radium-VBA beträgt

$$I_0 = 3,7 \cdot 10^{11} \text{ Bq} \quad ^{226}\text{Ra}\text{-Inventar zur Zeit } t = 0$$

Die Abmessungen des ausgekleideten Sohlenbohrlochs sind: Durchmesser 1,2 m, Höhe 1,7 m. Bei einem Anteil des fluidzugänglichen Volumens von 20 % steht für die Mobilisierung des ^{226}Ra bei einem Lösungszutritt in das Sohlenbohrloch damit die Lösungsmenge

$$V_L = 0,4 \text{ m}^3 \quad \text{Lösungsmenge im Sohlenbohrloch}$$

zur Verfügung. Bei vollständiger Mobilisierung und mit Sorption am Gebinde beträgt die ^{226}Ra -Konzentration in Lösung im Sohlenbohrloch somit

$$c_1 = 9,25 \cdot 10^9 \text{ Bq/m}^3 \quad ^{226}\text{Ra}\text{-Konzentration in Lösung im Sohlenbohrloch bei vollständiger Mobilisierung, mit Sorption am Gebinde⁹⁵ (R = 100) und ohne Löslichkeitsbegrenzung$$

Die weiteren Parameterwerte betragen (Werte für Parametervariation in Klammern):

$$\begin{aligned} L &= 4 \text{ m (3 m)} && \text{Diffusionsdistanz} \\ n &= 0,2 && \text{Porosität des Versatzes aus Salzbeton} \end{aligned}$$

⁹⁵ Schätzung des Retentionsfaktors R aufgrund des Volumenverhältnisses von Beton/Lösung im Sohlenbohrloch unter Annahme eines K_d -Werts von $0,04 \text{ m}^3/\text{kg}$ für Radium am Beton (keine Zementkorrosion im Sohlenbohrloch)



$A = 6 \text{ m}^2$	Transportquerschnitt ⁹⁶
$D_p = 1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ($3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$)	Porendiffusivität
$R = 100$ (30)	Retentionsfaktor
$\lambda = 1,373 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$	Zerfallskonstante von ^{226}Ra

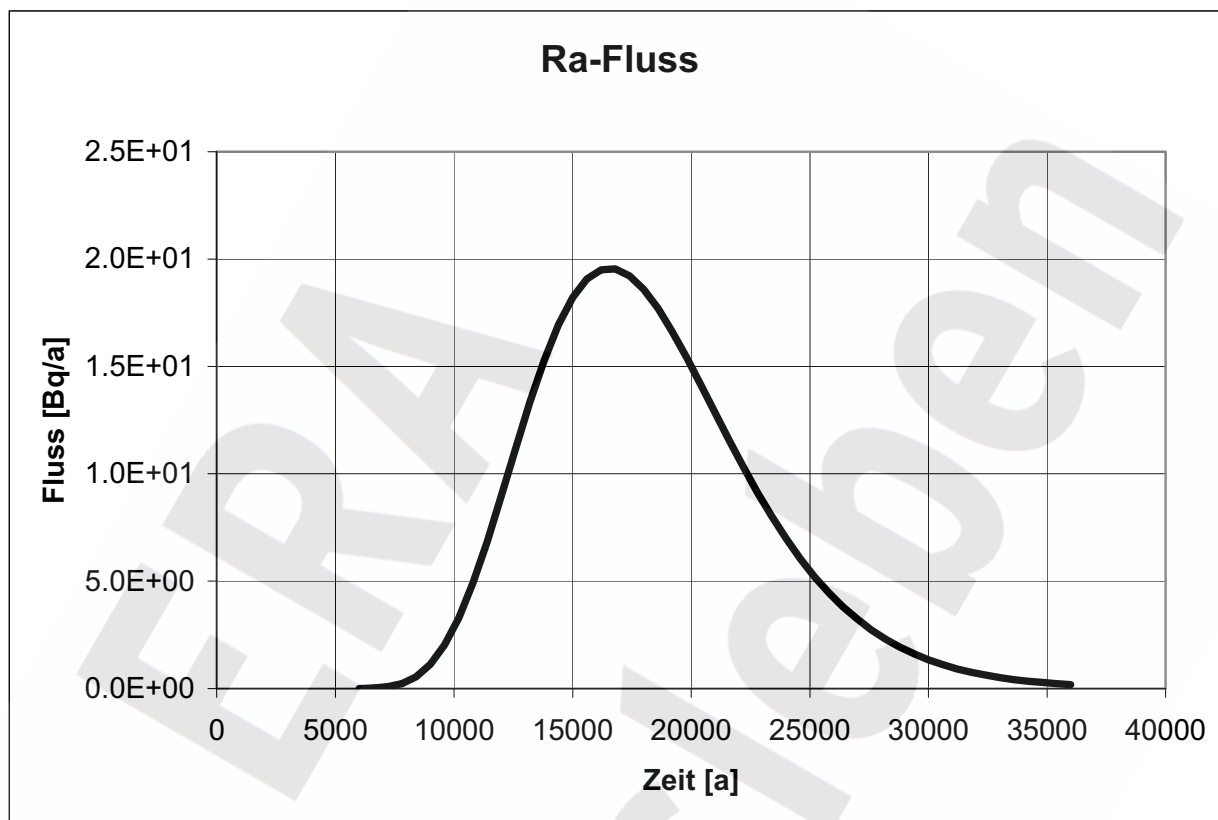


Abbildung R-1 Zeitliche Entwicklung des diffusiven ^{226}Ra -Flusses aus der Transportstrecke in den Ostquerschlag für die oben aufgeführten „Referenzwerte“ der Parameter

Die zeitliche Entwicklung des ^{226}Ra -Flusses aus der Transportstrecke ist in Abbildung R-1 dargestellt. Der Fluss steigt ab etwa 7'000 Jahren an und erreicht nach etwa 17'000 Jahren den Maximalwert von knapp 20 Bq/a. Mit weiter zunehmender Zeit sinkt er aufgrund des nun dominierenden radioaktiven Zerfalls wieder ab. Kumuliert über die Zeit treten knapp 0,6 ppm des eingelagerten Inventars aus der Diffusionsstrecke in den Ostquerschlag aus. Das Konzentrationsprofil entlang der Diffusionsstrecke zum Zeitpunkt 17'000 Jahre, dem Zeitpunkt des maximalen Flusses in den Ostquerschlag, zeigt Abbildung R-2.

In Tabelle R-1 sind die Ergebnisse der Parametervariationen zusammengestellt. Angeführt sind Zeitpunkt und Wert des maximalen ^{226}Ra -Flusses aus der Diffusionsstrecke sowie der Anteil des eingelagerten ^{226}Ra -Inventars, der zeitlich kumuliert aus der Diffusionsstrecke in den Ostquerschlag austritt. Untersucht wurden gezielt ungünstige Variationen, um die Relevanz der entsprechenden Parameter aufzuzeigen.

⁹⁶ Der diffusive ^{226}Ra -Fluss aus der Strecke ist proportional zum Querschnitt A. Eine explizite Variation dieser Eingangsgröße ist deshalb nicht erforderlich.

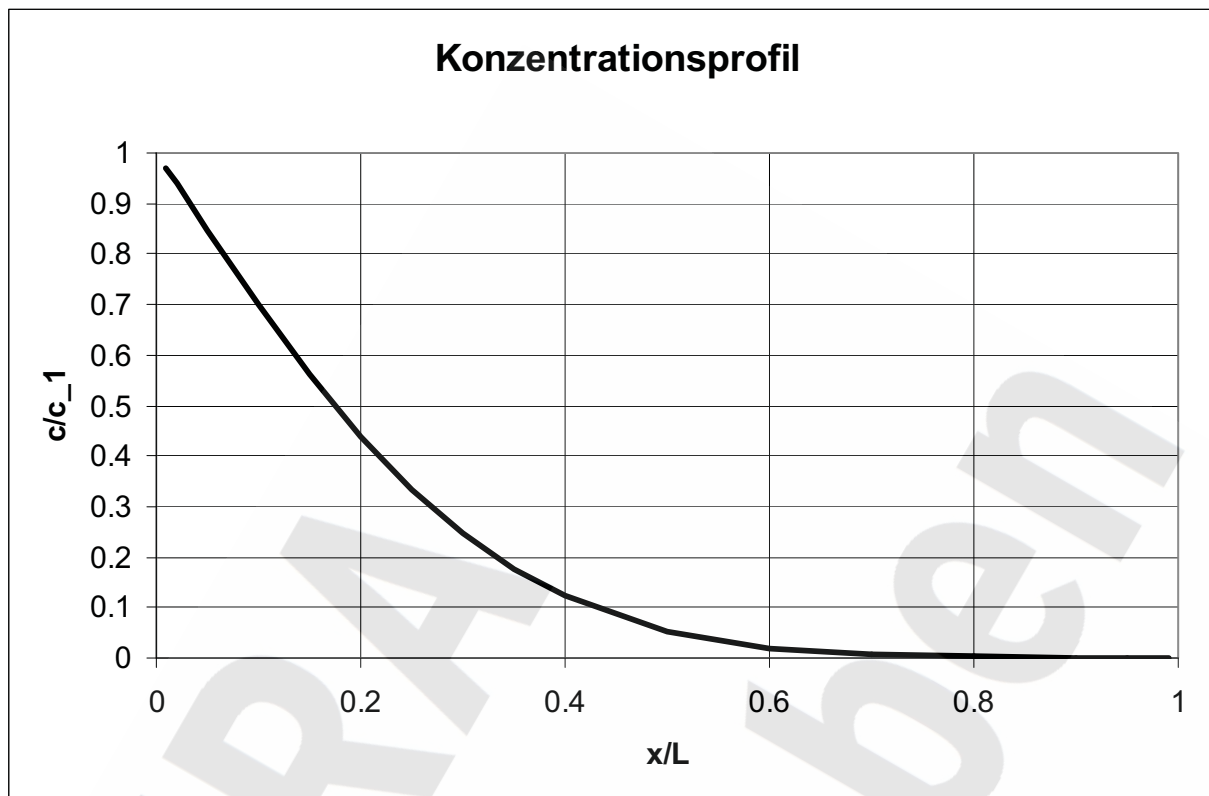


Abbildung R-2 Konzentrationsprofil entlang der Diffusionsstrecke nach 17'000 Jahren im Rechenfall „Referenzwerte“ bezogen auf die aktuelle Konzentration im Sohlenbohrloch (aufgetragen ist $\tilde{c}(x, t = 17'000 \text{ a})/c_1$)

Tabelle R-1 Diffusiver Austritt von ^{226}Ra aus dem Streckenstummel für verschiedene Parameterwerte

Rechenfall ⁽¹⁾	Zeitpunkt [a]	Wert [Bq/a]	kumuliert austretender Anteil des eingelagerten Inventars [-]
	des maximalen ^{226}Ra -Flusses aus der Diffusionsstrecke		
„Referenzwerte“	17'000	$2,0 \cdot 10^1$	$5,8 \cdot 10^{-7}$
L = 3 m	12'000	$9,2 \cdot 10^2$	$2,4 \cdot 10^{-5}$
$D_p = 3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$	9'300	$2,4 \cdot 10^4$	$5,3 \cdot 10^{-4}$
R = 30	8'900	$4,0 \cdot 10^4$	$8,7 \cdot 10^{-4}$

⁽¹⁾ Es wird jeweils nur 1 Parameter variiert, angegeben sind die Abweichungen von den Referenzwerten.

Wegen der erheblichen Transportverzögerung im Fall der „Referenzwerte“ – die Entwicklung des Konzentrationsprofils entlang der Diffusionsstrecke erfolgt so langsam, dass der maximale ^{226}Ra -Fluss erst nach mehr als 10 Halbwertszeiten auftritt – führt jede Parametervariation, die einen früheren Radionuklidübertritt aus der Diffusionsstrecke bewirkt, zu deutlich höheren Austrittsraten. So ist der maximale Radionuklidfluss bei einer um 25% kürzeren Transportstrecke um fast den Faktor 50, der kumuliert austretende Anteil des Inventars um rund den Faktor 40 höher als im Fall der „Referenzwerte“. Bei einer 3-fach höheren Porendiffusivität erhöht sich der austretende Anteil des

Inventars um annähernd 3 Größenordnungen. Noch etwas stärker ist der Einfluss der Sorptionskonstanten von ^{226}Ra .

Die Transportdistanz L ist durch die Geometrie des Streckenstummels gegeben, der „Referenzwert“ ist deshalb ein gesicherter Wert. Die Sorptionskonstante R ist pessimistisch abgeschätzt, der „Referenzwert“ liegt somit eher auf der ungünstigen Seite. Der „Referenzwert“ der Porendiffusivität ist mit $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ nur um etwas mehr als ein Faktor 10 niedriger als die Diffusionskonstante in freier gesättigter NaCl-Lösung. Zum Vergleich: Für die Diffusion von Chlorid in Zement wird in der Literatur eine apparente Diffusionskonstante um 10^{-11} m^2 angegeben, d.h. eine Größenordnung geringer [Erdogdu et al. 2004]. Dabei ist die Sorption von Chlorid an Zement vermutlich 0 oder sehr gering, womit die apparente Diffusionskonstante und die Porendiffusionskonstante gleich oder sehr ähnlich sind.

Aus diesen Gründen kann berechtigter Weise angenommen werden, dass der kumuliert aus dem Streckenstummel in den übrigen ELB OF austretende Anteil des mit der Radium-VBA eingelagerten Radiuminventars selbst mit den Referenzwerten der Parameter noch überschätzt wird. Beim Anfangsinventar in der Radium-VBA von $3,7 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$ ist der geschätzte austretende Anteil absolut $2,2 \cdot 10^5 \text{ Bq}$. Diese Aktivitätsmenge ist mit dem im Abbau 2 des ELB OF eingelagerten ^{226}Ra -Inventar zu vergleichen. Dieses Inventar beträgt zu Beginn der Nachbetriebsphase 10^7 Bq , nimmt dann durch radioaktiven Zerfall zunächst leicht ab und steigt anschließend – ab etwa 5'000 Jahre – durch Zerfall seiner Vorläufernuklide ^{234}U und ^{230}Th wieder über das Anfangsinventar an. Im Vergleich mit dem ^{226}Ra -Inventar im Abbau 2 des ELB OF ist damit die aus der Radium-VBA in den übrigen ELB OF austretende ^{226}Ra -Aktivität vernachlässigbar gering. Bei den Modellrechnungen zur Radionuklidfreisetzung und zur potentiellen Strahlenexposition mit dem Programm PROSA kann das Inventar der Radium-VBA vernachlässigt werden.



Anhang S Austrag von Grubenlösung entlang Schacht Bartensleben bei mangelhafter Abdichtung

Der Verschluss des Schachtes Bartensleben besteht aus drei hintereinander geschalteten Dichtelementen und hat als Bemessungsziel, den Lösungszutritt entlang des Schachtes nach Verschluss des Endlagers auf $0,1 \text{ m}^3/\text{a}$ zu beschränken. Zu Beginn der Nachbetriebsphase ist die hydraulische Druckdifferenz zwischen der Ober- und der Unterseite des Verschlussbauwerks am größten und beträgt etwa 2 MPa. Die Möglichkeit einer mangelhaften Schachtabdichtung ist angesichts der redundanten Auslegung und der formulierten Anforderung äußerst gering, das Szenario „Mangelhafte Abdichtung in Schacht Bartensleben“ stellt deshalb ein „what-if“-Szenario dar.

Eine mangelhafte Abdichtung im Schacht Bartensleben würde zunächst zu einem relevanten Lösungszutritt in den Einlagerungsbereich WSF führen. Die in einem solchen Fall wahrscheinlichen und möglichen Prozesse werden in Kapitel 3.5.9 diskutiert.

Nachdem der ELB WSF vollgelaufen ist, kann durch Konvergenz der Grubenbaue potentiell radionuklidhaltige Lösung aus dem Grubengebäude entlang des Schachtes direkt in das Deckgebirge hochgepresst werden. Nachfolgend wird untersucht, ob diese Lösung entlang des Schachtes und damit kanalisiert in das oberflächennahe Grundwasser gelangen kann. Der vorliegende Anhang S beschreibt und quantifiziert die hydraulischen Auswirkungen eines Auspressens von Grubenlösung (Lösungsdichte 1200 g/m^3 oder mehr) entlang des Schachtes Bartensleben in das Deckgebirge. Die potentiellen radiologischen Folgen eines hypothetischen Austrags von radionuklidhaltiger Lösung entlang des Schachtes bis in das oberflächennahe Grundwasser in diesem „what-if“-Szenario sind Gegenstand von Kapitel 5.1.2.6.

S.1 Beschreibung der Situation und vereinfachende Annahmen

Die Geländeoberfläche am Ort von Schacht Bartensleben (Rasenhängebank) liegt bei 133,8 mNN. Der Grundwasserspiegel, definiert durch die Süßwasserdruckspiegelhöhe in den obersten Testintervallen von schachtnahen Bohrungen, befindet sich etwa bei 124 mNN, d.h. etwa 10 m unter GOK.

In den obersten 69 m durchteuft der Schacht Schluffe, Tone und – mehrheitlich – tonige Schluffsteine des Quartär, des Unterrhät und des Steinmergelkeuper. Darunter folgen bis 177 m Teufe die Tonsteine des Oberen Gipskeuper. Zwischen 177 m und 237 m schließt der Schilfsandstein (kmS) an, der insbesondere in den obersten 9 m, zwischen 177 m und 186 m, sandig ausgebildet und damit erhöht durchlässig ist. Für die Transmissivität des Schilfsandstein wurde in [Präger 1999] aus hydraulischen Tests in schachtnahen Bohrungen ein Wert von rund $6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ entsprechend einer Transmissibilität⁹⁷ von rund $6 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3$ abgeleitet. In den Modellrechnungen zum

⁹⁷ Für die Umrechnung werden Süßwasserverhältnisse angenommen. Im vorliegenden Anhang S wird unabhängig vom Salzgehalt der betrachteten Lösung für die dynamische Viskosität der Wert von $0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ verwendet. Die Folge dieser vereinfachenden Näherung, welche hier für Lösungsflüsse einen Faktor 2 ausmachen kann, wird über die Parametervariation der Transmissibilität des Schilfsandstein abgedeckt.



Grundwasserfluss im Hutgestein und Deckgebirge wird ein deutlich höherer Wert angesetzt, was für die hier diskutierte Fragestellung aber nicht immer konservativ ist.

Das vertikale Profil der Lösungsdichte in Schachtnähe zeigt bis etwa 40 m Teufe Süßwasserverhältnisse ($\rho < 1014 \text{ kg/m}^3$) und darunter bis in den Schilfsandstein leicht erhöhte Dichten im Bereich von 1025 kg/m^3 bis 1071 kg/m^3 ohne Trend mit der Teufe [Präger 1999]. Für die Analyse zum Einfluss einer mangelhaften Schachtabdichtung wird folgendes Profil der Lösungsdichte angesetzt:

Teufe 10 m – 40 m	1000 kg/m^3
Teufe 40 m – 200 m	$1040 \text{ kg/m}^3 \pm 20 \text{ kg/m}^3$

Die Süßwasserdruckspiegelhöhen im Schilfsandstein in einiger Entfernung vom Schacht betragen etwa 130 mNN ($\pm 10 \text{ m}$). Mit dem oben angegebenen vereinfachten Dichteprofil liegen im erhöht durchlässigen Bereich des Schilfsandstein (Bezugsteufe 180 m) hydrostatische Verhältnisse vor, wenn die Süßwasserdruckspiegelhöhe dort folgenden Wert aufweist:

$$H_{\text{FW}} = H_{\text{RHB}} - z_{\text{B}} + \frac{(z_0 - z_{\text{GWSp}}) \cdot \rho_0 + (z_{\text{B}} - z_0) \cdot \rho_{\text{DG}}}{\rho_0} \quad (\text{S-1})$$

wobei

H_{FW} hydrostatische Süßwasserdruckspiegelhöhe in mNN

H_{RHB} Höhe der Rasenhängebank in mNN

z_{B} Bezugsteufe ($z_{\text{B}} = 180 \text{ m}$)

z_0 Teufe der Süß-/Salzwassergrenze ($z_0 = 40 \text{ m}$)

z_{GWSp} Teufe des Grundwasserspiegels ($z_{\text{GWSp}} = 10 \text{ m}$)

ρ_0 Dichte von Süßwasser ($\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$)

ρ_{DG} Dichte der Deckgebirgslösung unterhalb der Süß-/Salzwassergrenze
($\rho_{\text{DG}} = 1040 \text{ kg/m}^3 \pm 20 \text{ kg/m}^3$)

Gleichung (S-1) ergibt als hydrostatische Verhältnisse im Schilfsandstein eine Süßwasserdruckspiegelhöhe von $129,4 \text{ mNN} \pm 2,8 \text{ m}$. Der ungestörte Porenwasserdruck im Schilfsandstein ist somit hydrostatisch, artesische Verhältnisse bis etwa $\Delta H_{\text{FW}} = 10 \text{ m}$ ($\Delta p_{\text{nat}} = 100 \text{ kPa}$) sind möglich.

Das oberste Dichtelement im Schacht reicht bis in 200 m Teufe und besteht aus einem Bentonitkörper. Darüber wird der Schacht mit einem Mineralgemisch verfüllt. Die querschnittgemittelte Permeabilität der Schachtröhre (einschließlich der Auflockerungszone) wird mit k_s bezeichnet und entspricht einem k_f -Wert (Referenzwert) von 10^{-8} m/s [ERCOSPLAN 2003], als Bandbreite wird 10^{-9} m/s bis 10^{-7} m/s angesetzt.

Sofern Lösung entlang des Schachtes aus der Grube ausgepresst wird, dürfte der Fluss beim obersten Dichtelement im Randbereich des Bentonitkörpers, in der Kontaktzone zwischen Bentonitkörper und Deckgebirge sowie in der verbliebenen Auflockerungszone um das Dichtelement erfolgen. Bis zum oberen Ende des Dichtelements, in 200 m Teufe, kann keine nennenswerte Verdünnung mit ungesättigten Lösungen stattfinden, so dass die Dichte der ausgepressten Lösung immer noch jener von gesättigter Salzlösung entspricht ($\rho_{\text{G}} = 1200 \text{ kg/m}^3$).



Ab dem oberen Ende des Dichtelements stehen der ausgepressten, schweren Lösung für die weitere Ausbreitung grundsätzlich zwei Pfade zur Verfügung: Der eine Pfad führt weiter entlang des Schachtes nach oben, der zweite radial aus dem Schacht in den Schilfsandstein. Der Ausbreitung entlang des erstgenannten Pfads wirken Dichteeffekte entgegen, der Ausbreitung entlang des zweitgenannten Pfads die beschränkte Leitfähigkeit des Schilfsandstein und möglicherweise ein artesischer Überdruck im Schilfsandstein.

Für die Analyse werden zunächst stationäre Zustände berechnet, die sich wie folgt auszeichnen (Abbildung S-1):

- Die Lösungsdichten sind an jedem Ort, insbesondere auch in der Schachtröhre, zeitlich konstant. Ob diese Stationarität mit den sich daraus ergebenden Lösungsflüssen kompatibel ist, wird nachträglich geprüft. Ist dies nicht der Fall, wird der Zustand nachträglich als unrealistisch bezeichnet.
- Die einzigen hydraulischen Kontakte zwischen der Schachtröhre und dem umgebenden Deckgebirge bestehen (i) mit dem Schilfsandstein und (ii) oberflächennah im Bereich des Grundwasserspiegels. Es wird vereinfachend angenommen, dass dazwischen kein Lösungsaustausch zwischen der Schachtröhre und dem Deckgebirge stattfinden kann. Dies ist eine pessimistische Annahme. Der Kontakt mit dem Schilfsandstein sei in der Teufe auf einen engen Bereich konzentriert. Diese Teufe definiert die oben bereits erwähnte Bezugsteufe z_B .
- Bei einem hydrostatischen oder unterhydrostatischen natürlichen Lösungsdruck im Schilfsandstein erfolgt kein Zufluss in die Schachtröhre oberhalb des Dichtelements. In der Schachtröhre sammelt sich somit unverdünnte Grubenlösung. Im stationären Zustand befindet sich deren Obergrenze in der Teufe z_{SU} . Die Größe z_{SU} wird zunächst als frei wählbare Eingangsgröße für die Analyse der stationären Zustände betrachtet.

Bei artesischem natürlichem Lösungsdruck im Schilfsandstein erfolgt – auch ohne Auspressen von Lösung entlang des Schachtes aus dem Grubengebäude – ein Lösungsfluss aus dem Schilfsandstein in die Schachtröhre und entlang dieser nach oben. Bei einem Auspressen von Lösung aus der Grube vermischt sich diese mit dem Lösungsfluss aus dem Schilfsandstein, so dass in der Schachtröhre eine Mischlösung mit einer Dichte zwischen jener von Grubenlösung ρ_G und jener der Deckgebirgslösung ρ_{DG} aufsteigt. Da die Dichte dieser Mischlösung größer ist als die Dichte der Deckgebirgslösung, steigt der Lösungsdruck in der Bezugsteufe im Schacht an und der Lösungszutritt aus dem Schilfsandstein nimmt ab. Dadurch steigt auch die Dichte der in der Schachtröhre aufsteigenden Lösung an. Sofern ein stationärer Zustand mit stagnierender Lösung im Schacht existiert, entspricht die Dichte der Lösung in der Schachtröhre unmittelbar oberhalb des Dichtelements der Dichte der Grubenlösung. Für die Analyse wird bei artesischem Lösungsdruck im Schilfsandstein für den stationären Zustand angenommen:

- (i) Die Obergrenze der Mischlösung befindet sich in der Teufe z_{SU} .
- (ii) Die über die Teufe gemittelte Dichte der Mischlösung zwischen z_{SU} und der Obergrenze des Dichtelements in der Schachtröhre entspricht dem gewichteten Mittel der Dichte der Mischlösung zu Beginn des Lösungsaustritts in die Schachtröhre (vor Einsetzen der Dichteeffekte durch das Aufsteigen der relativ schweren Mischlösung) und unverdünnter Grubenlösung mit der Gewichtung 2:1.



Die (teufengemittelte) Dichte der Lösung in der Schachtröhre unterhalb der Teufe z_{SU} wird sowohl für hydrostatische als auch für artesische Verhältnisse mit ρ_{SU} bezeichnet.

- Oberhalb der Teufe z_{SU} liegen in der Schachtröhre über eine vertikale Ausdehnung von Δz_{SU} Lösungen vor, die sich aus Mischprozessen der Lösung unterhalb der Teufe z_{SU} mit Deckgebirgslösung ergibt. Die Lösungsdichte nimmt zwischen den Teufen z_{SU} und $z_{SU}-\Delta z_{SU}$ linear von ρ_{SU} auf ρ_{DG} ab.
- In geringeren Teufen als $z_{SU}-\Delta z_{SU}$ ist die Lösungsdichte in der Schachtröhre gleich wie im Deckgebirge in der gleichen Teufe.

Damit zeichnet sich der stationäre Zustand durch folgendes Profil der Lösungsdichte in der Schachtröhre aus:

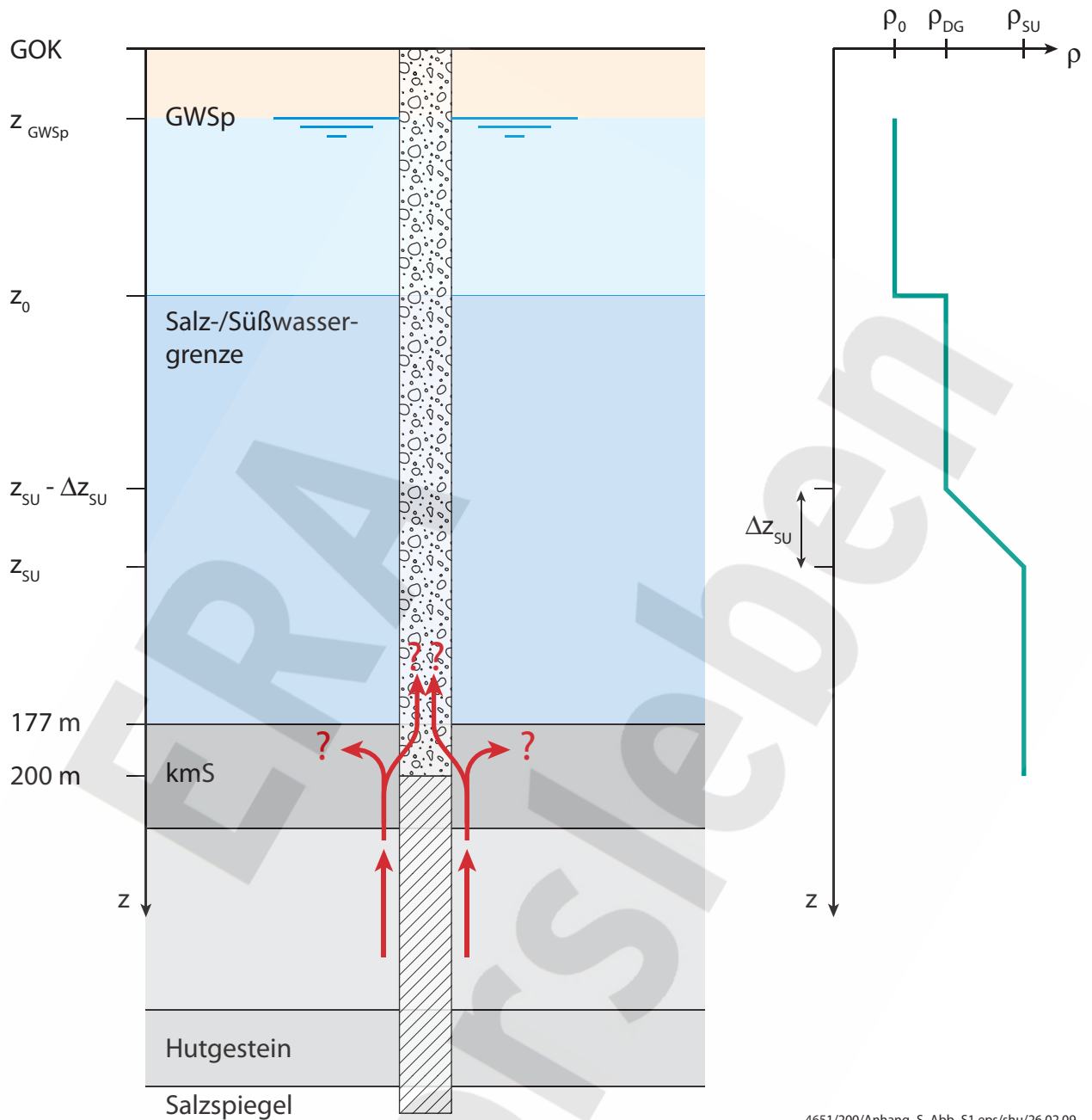
Teufe	Lösungsdichte	Bemerkung
z_{GWSp} bis z_0	ρ_0	Süßwasser
z_0 bis $z_{SU}-\Delta z_{SU}$	ρ_{DG}	Deckgebirgslösung
$z_{SU}-\Delta z_{SU}$ bis z_{SU}	$\rho_{DG} \rightarrow \rho_{SU}$	linear ansteigende Dichte
$> z_{SU}$	ρ_{SU}	gemittelt über die Teufe, unten Grubenlösung, im oberen Bereich ggf. verdünnt mit anfänglichem Zufluss aus dem Schilfsandstein

Sofern im stationären Zustand Lösung aus der Schachtröhre in den Schilfsandstein abfließt, weist diese

- die Dichte von Grubenlösung ρ_G auf, sofern die Obergrenze der Zone mit erhöhter Lösungsdichte oberhalb der Bezugsteufe liegt, d.h. sofern $z_{SU} < z_B$,
- die Dichte einer Lösung mit den Anteilen η an Grubenlösung (ρ_G) und $1-\eta$ an Deckgebirgslösung (ρ_{DG}) auf, sofern die Bezugsteufe z_B im Intervall $(z_{SU}-\Delta z_{SU}, z_{SU})$ liegt.

Der Anteil η an Grubenlösung im Abfluss in den Schilfsandstein berechnet sich unter den getroffenen Annahmen wie folgt:

$$\eta = \begin{cases} 1 & z_{SU} \leq z_B \\ \frac{z_B - z_{SU} + \Delta z_{SU}}{\Delta z_{SU}} & z_{SU} - \Delta z_{SU} < z_B < z_{SU} \end{cases} \quad (S-2)$$



4651/200/Anhang_S_Abb_S1.eps/shu/26.02.09

Abbildung S-1: Schematische Darstellung der analysierten Verhältnisse

Ein stationärer Zustand ist somit realistisch, falls unter den (stationären) Druckbedingungen und Dichteverteilungen ebensoviel Grubenlösung in den Schilfsandstein abfließt wie von unten entlang des Schachtes aus der Grube ausgepresst wird. Falls weniger Grubenlösung in den Schilfsandstein abfließt, steigt die Lösungsdichte in der Schachtröhre weiter an; bei einem größeren Abfluss fällt die Lösungsdichte ab. Dies ist eine negative Rückkopplung, die zu einer Stabilisierung des Systems führt. Sofern also ein realistischer stationärer Zustand gefunden werden kann, bei dem zudem die Grubenlösung deutlich unter dem Bereich des oberflächennahen Grundwassers verbleibt, dann ist ein Austrag von Grubenlösung entlang des Schachtes bis in das oberflächennahe Grundwasser ausgeschlossen:

Es gibt einen realistischen stationären Zustand mit $z_{\text{SU}} - \Delta z_{\text{SU}} > z_0 \Rightarrow$

Der Austrag von Grubenlösung und damit die Radionuklidfreisetzung in das oberflächennahe Grundwasser entlang des Schachtes sind ausgeschlossen.

Sofern allerdings das Kriterium der Stationarität mit Gleichheit von Grubenabfluss in den Schilfsandstein und Zufluss aus der Grube nur mit einem Ansteigen von Grubenlösung bis zur Salz-/ Süßwassergrenze (oder darüber, $z_{\text{SU}} - \Delta z_{\text{SU}} \leq z_0$) erfüllt wird, dann gibt es keinen realistischen stationären Zustand (gemäß oben genannter Definition) und der Austrag von Grubenlösung bis in das oberflächennahe Grundwasser kann nicht ausgeschlossen werden. Solche Verhältnisse sind Gegenstand von Kapitel S.4.

Im nachfolgenden Kapitel S.2 werden zunächst die Gleichungen angeführt, die den oben definierten stationären Zustand (ohne Kriterium der Gleichheit von Zu- und Abfluss von Grubenlösung) beschreiben. Im übernächsten Kapitel (Kapitel S.3) werden dann die Lösungsflüsse für verschiedene stationäre Zustände mit unterschiedlichen Parametern ermittelt und aus diesen die realistischen stationären Zustände ausgewählt. Die Auswertung der Ergebnisse ermöglicht dann eine erste Aussage zur möglichen Radionuklidfreisetzung entlang des Schachtes.

Im Szenario „Mangelhafte Abdichtung in Schacht Bartensleben“ ist nach dem Volllaufen des ELB WSF in einer ersten Phase mit einem Auspressen von Grubenlösung entlang des Schachtes mit Raten Q_0 von höchstens $1 \text{ m}^3/\text{a}$ zu rechnen; in einer eventuellen zweiten Phase kann die Auspressrate bis $8 \text{ m}^3/\text{a}$ ansteigen (vgl. Kapitel 5.1.2.6).

S.2 Gleichungssystem für den stationären Zustand

Der Abfluss von Lösung aus dem Schacht in den Schilfsandstein im stationären Zustand, Q_1 , berechnet sich wie folgt

$$Q_1 = 2\pi \cdot \frac{T}{\mu} \cdot \frac{p_s - p_0}{\ln(P/R)} \quad (\text{S-3})$$

wobei

Q_1	Abfluss aus dem Schacht in den Schilfsandstein im stationären Zustand (für $p_s > p_0$), ansonsten Zufluss aus dem Schilfsandstein in den Schacht [m^3/s]
T	Transmissibilität des Schilfsandstein [m^3]
μ	dynamische Viskosität [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
p_s	Lösungsdruck im Schacht in der Bezugsteufe [Pa]
p_0	ungestörter Lösungsdruck im Schilfsandstein [Pa]
P	Radius der Druckbeeinflussung im Schilfsandstein [m]
R	Radius der Auflockerungszone um den Schacht ($R = 4 \text{ m}$)

Wird in einen unendlich ausgedehnten, zweidimensionalen Grundwasserleiter mit konstanter Rate Lösung eingepresst, dann dehnt sich der druckbeeinflusste Bereich stetig und unbegrenzt aus. In den dreidimensionalen Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung im Hutgestein und Deckge-



birge wurden für den Schilfsandstein im Umfeld des Schachtes Bartensleben ungestörte Wasserflüsse mit Filtergeschwindigkeiten im Bereich von 10^{-11} m/s bis 10^{-12} m/s ermittelt, wobei der Schilfsandstein in diesem Modell als 60 m mächtiger Homogenbereich dargestellt wurde. Bei einer Filtergeschwindigkeit von $3 \cdot 10^{-12}$ m/s fließen in einer 500 m breiten Zone rund $3 \text{ m}^3/\text{a}$. Dieser Wasserfluss liegt zwischen der maximalen Auspressrate aus der Grube während der ersten Phase und jener während der eventuellen zweiten Phase. Für den Radius der Druckbeeinflussung wird deshalb der Wert $P = 250 \text{ m}$ angesetzt. Die Abhängigkeit der Ergebnisse von dieser Größe ist schwach.

Bei artesischen Verhältnissen im Schilfsandstein fließt zu Beginn des Lösungsaustritts aus der Grube entlang des Schachtes auch Lösung oberhalb des obersten Dichtelements aus dem Schilfsandstein in den Schacht zu. Um den Abfluss von dieser Schilfsandsteinlösung und der nun zutretenden Grubenlösung entlang des Schachtes nach oben zu ermöglichen, muss der Lösungsdruck im Schacht in der Bezugsteufe den hydrostatischen Druck ebenfalls übersteigen. Es seien

Δp_{nat} natürlicher Überdruck im Schilfsandstein gegenüber den hydrostatischen Verhältnissen
 $\alpha \cdot \Delta p_{\text{nat}}$ Überdruck im Schacht in der Bezugsteufe gegenüber dem natürlichen hydrostatischen Wert

Damit beträgt der Zufluss aus dem Schilfsandstein in den Schacht

$$Q_{\text{kmS}} = 2\pi \cdot \frac{T}{\mu} \cdot \frac{(1-\alpha) \cdot \Delta p_{\text{nat}}}{\ln(P/R)} \quad (\text{S-4})$$

und der anfängliche⁹⁸ Abfluss entlang des Schachtes nach oben

$$Q_{\text{kmS}} + Q_0 = \pi R^2 \cdot \frac{k_S}{\mu} \cdot \frac{\alpha \cdot \Delta p_{\text{nat}}}{z_B - z_{\text{GWSp}}} \quad (\text{S-5})$$

wobei

Q_0 Rate der Lösungsauspressung aus der Grube
 k_S querschnittsgemittelte Permeabilität der Schachtröhre [m^2]

Auflösen nach α ergibt

$$\alpha = \min \left(\frac{2\pi \cdot \frac{T}{\mu} \cdot \frac{\Delta p_{\text{nat}}}{\ln(P/R)} + Q_0}{2\pi \cdot \frac{T}{\mu} \cdot \frac{\Delta p_{\text{nat}}}{\ln(P/R)} + \pi R^2 \cdot \frac{k_S}{\mu} \cdot \frac{\Delta p_{\text{nat}}}{z_B - z_{\text{GWSp}}}}, 1 \right) \quad (\text{S-6})$$

und dann Q_{kmS} durch Einsetzen von α in Gl. (S-4).

Mit der in Kapitel S.1 beschriebenen Annahme für die Berechnung der Lösungsdichte ρ_{SU} im Schachtbereich $z > z_{\text{SU}}$ ergibt sich diese gemäß

⁹⁸ vor dem Einsetzen der Wirksamkeit von Dichteeffekten



$$\rho_{\text{SU}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{Q_{\text{kms}} \cdot \rho_{\text{DG}} + Q_0 \cdot \rho_{\text{G}}}{Q_{\text{kms}} + Q_0} + \frac{1}{3} \cdot \rho_{\text{G}} \quad (\text{S-7})$$

Es ist zu betonen, dass die Permeabilität der Schachtröhre und die Rate der Lösungsauspressung für die Analyse der stationären Zustände gemäß Definition in Kapitel S.1 nur beim Vorliegen von artesischen Bedingungen im Schilfsandstein und dann bei der Berechnung von ρ_{SU} eingehen. Die Rate der Lösungsauspressung aus der Grube ist sonst erst bei der Auswahl der realistischen stationären Zustände aus allen stationären Zuständen von Bedeutung. Es ist zudem daran zu erinnern, dass als plausibelster Wert Δp_{nat} ein Wert im Bereich von 0 kPa, d.h. ein Wert deutlich unter 100 kPa anzusetzen ist.

Mit den getroffenen Annahmen und Bezeichnungen ergibt sich der natürliche Lösungsdruck im Schilfsandstein zu

$$p_0 = g \cdot [(z_0 - z_{\text{GWSp}}) \cdot \rho_0 + (z_{\text{B}} - z_0) \cdot \rho_{\text{DG}}] + \Delta p_{\text{nat}} \quad (\text{S-8})$$

Für $z_{\text{SU}} < z_{\text{B}}$ ist der Lösungsdruck im Schacht in der Bezugsteufe im stationären Zustand

$$p_{\text{S}} = g \cdot [(z_0 - z_{\text{GWSp}}) \cdot \rho_0 + (z_{\text{SU}} - z_0) \cdot \rho_{\text{DG}} + \frac{1}{2} \Delta z_{\text{SU}} \cdot (\rho_{\text{SU}} - \rho_{\text{DG}}) + (z_{\text{B}} - z_{\text{SU}}) \cdot \rho_{\text{SU}}] \quad (\text{S-9})$$

und für $z_{\text{SU}} > z_{\text{B}}$

$$p_{\text{S}} = g \cdot [(z_0 - z_{\text{GWSp}}) \cdot \rho_0 + (z_{\text{B}} - z_0) \cdot \rho_{\text{DG}} + \frac{1}{2} \cdot (z_{\text{B}} - z_{\text{SU}} + \Delta z_{\text{SU}}) \cdot \eta \cdot (\rho_{\text{SU}} - \rho_{\text{DG}})] \quad (\text{S-10})$$

mit η gemäß Gl. (S-2).

Damit ist das Gleichungssystem vollständig, um den Abfluss von Lösung aus dem Schacht in den Schilfsandstein (oder, bei negativem Ergebnis für Q_1 , den Zufluss in den Schacht aus dem Schilfsandstein) im stationären Zustand gemäß Definition in Kapitel S.1 mit Hilfe von Gl. (S-3) zu ermitteln.

Sofern sich ein Abfluss in den Schilfsandstein ergibt ($Q_1 > 0$), beträgt der Abfluss von Grubenlösung Q_{G}

$$Q_{\text{G}} = \begin{cases} \eta \cdot Q_1 & Q_1 > 0 \\ 0 & Q_1 \leq 0 \end{cases} \quad (\text{S-11})$$

Realistische stationäre Zustände sind solche mit $Q_{\text{G}} = Q_0$.

S.3 Berechnung des Abflusses in den Schilfsandstein

Die berechneten Abflüsse in den Schilfsandstein werden in zweidimensionalen Grafiken dargestellt, in denen die Transmissibilität T des Schilfsandstein und die Teufe der Obergrenze der Mischlösung z_{SU} die Koordinaten bilden und die Bereiche mit ähnlichem Abfluss farblich gekenn-



zeichnet sind. In der Regel wird nur die Abflussrate von Grubenlösung Q_G gezeigt. Für einen Fall mit artesischen Verhältnissen ist auch eine Darstellung des Gesamtabflusses Q_1 angeführt.

Die Rate der Lösungsauspressung aus der Grube wird vorerst nicht variiert. Sie beträgt zunächst in allen Rechnungen $Q_0 = 1 \text{ m}^3/\text{a}$. Als realistische stationäre Zustände sind somit jene zu bewerten, bei denen der Abfluss von Grubenlösung in den Grafiken $1 \text{ m}^3/\text{a}$ beträgt. Dies sind die Zustände, welche die Grenze der beiden Intervalle $[0 \text{ m}^3/\text{a}, 1 \text{ m}^3/\text{a}]$ und $[1 \text{ m}^3/\text{a}, 2 \text{ m}^3/\text{a}]$ bilden.

Variiert werden folgende Parameter:

Parameter	Referenzwert	Variationen
ρ_{DG}	1040 kg/m^3	1060 kg/m^3
Δp_{nat}	0	50 kPa, 100 kPa
Δz_{SU}	20 m	50 m
k_S	10^{-15} m^2	10^{-14} m^2

Wie im Kapitel S.1 ausgeführt, beträgt die Transmissibilität des Schilfsandstein rund $6 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3$, als Variationsbereich wird $6 \cdot 10^{-16} \text{ m}^3$ bis 10^{-13} m^3 angesetzt.

Die Rate Q_G des Abflusses von Grubenlösung beim stationären Zustand gemäß Definition in Kapitel S.1, der durch die Referenzwerte der Parameter (außer T und z_{SU}) charakterisiert ist, zeigt Abbildung S-2.

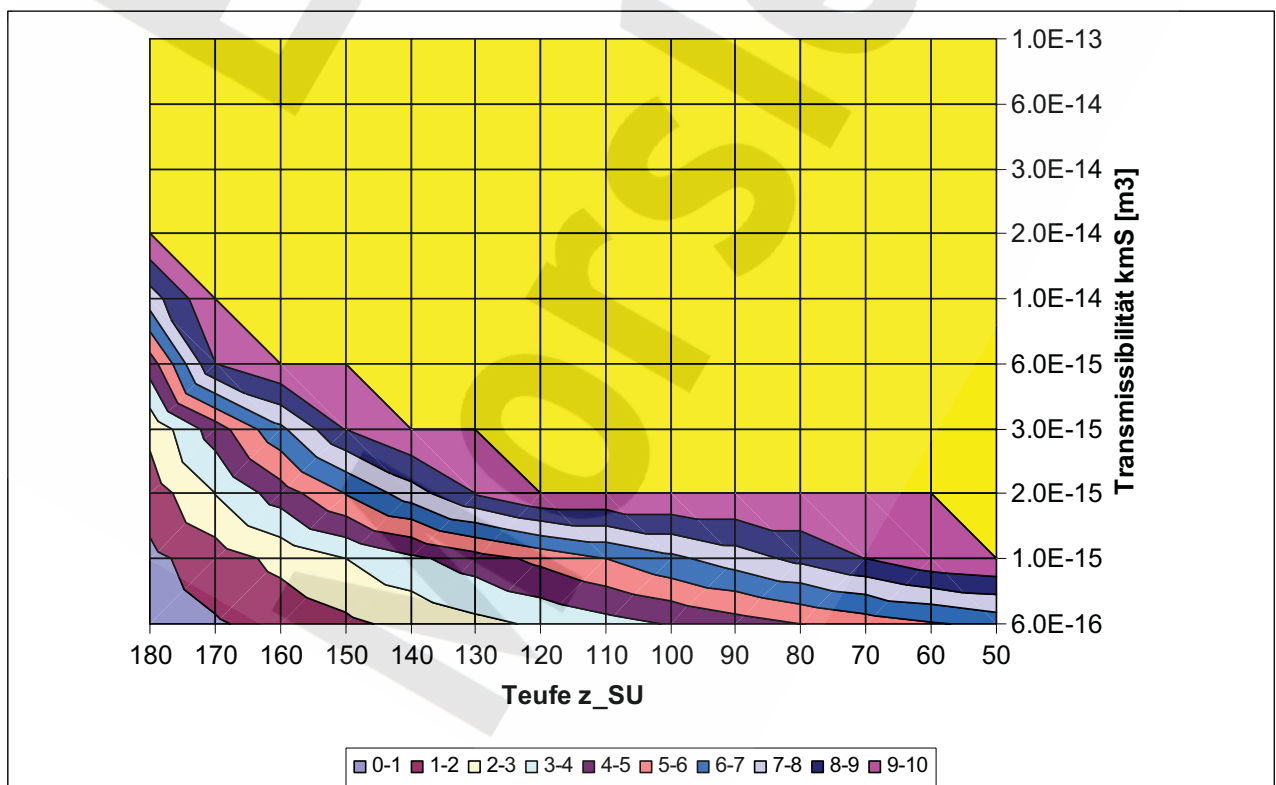


Abbildung S-2: Abflussrate Q_G von Grubenlösung in m^3/a in den Schilfsandstein bei Referenzwerten der übrigen Parameter

Die realistischen stationären Zustände liegen auf einer Linie, die in der Grafik auf der linken Seite bei den Koordinaten um ($z_{\text{SU}} = 180 \text{ m}$, $T = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3$) beginnt und nach rechts unten zu den Koordinaten um ($z_{\text{SU}} = 170 \text{ m}$, $T = 6 \cdot 10^{-16} \text{ m}^3$) führt. Bei einer plausiblen Transmissibilität des Schilfsandstein von $6 \cdot 10^{-15}$ steigt die Grubenlösung kaum über die Teufe von 180 m. Selbst bei einem sehr gering durchlässigen Schilfsandstein übersteigt die Grubenlösung die Teufe von rund 170 m, unter Berücksichtigung der Übergangszone Δz_{SU} die Teufe von 150 m, nicht.

Unter artesischen Bedingungen sehen die Verhältnisse anders aus. Abbildung S-3 und Abbildung S-4 zeigen den Gesamtabfluss Q_1 und den Abfluss von Grubenlösung Q_G in den Schilfsandstein bei mäßig artesischen Bedingungen ($\Delta p_{\text{nat}} = 50 \text{ kPa}$) und Referenzwerten der übrigen Parameter.

So lange die Obergrenze der Mischlösung z_{SU} noch tief liegt, erfolgt noch ein Zustrom aus dem Schilfsandstein in den Schacht (negative Werte von Q_1 in Abbildung S-3). Der Bereich der Zuflüsse ist durch Teufen z_{SU} unterhalb von etwa 160 m definiert (Abbildung S-3). Die realistischen stationären Zustände sind für wahrscheinliche und hohe Werte der Schilfsandstein-Transmissibilität T durch $z_{\text{SU}} \approx 160 \text{ m}$ charakterisiert (Abbildung S-4). Mit abnehmender Schilfsandstein-Transmissibilität steigt die Grubenlösung höher auf. Bei sehr geringen Werten erreicht die Grubenlösung Teufen von etwa 140 m unter GOK (Abbildung S-4) und unter Einbezug der Übergangszone damit Teufen von rund 120 m. Auch in diesem Fall kann somit die Freisetzung von Grubenlösung entlang des Schachtes in das oberflächennahe Grundwasser ausgeschlossen werden.

Bei artesischen Verhältnissen an der oberen Grenze des plausiblen Bereichs ($\Delta p_{\text{nat}} = 100 \text{ kPa}$, entsprechend einer Druckwassersäule von 10 m über Grundwasserspiegel) steigt die Grubenlösung bei plausibler und hoher Transmissibilität des Schilfsandstein in eine Teufe zwischen 130 m und 120 m an (bemessen durch z_{SU} , Abbildung S-5). Selbst bei der Kombination von hoch artesischen Verhältnissen und sehr undurchlässigem Schilfsandstein liegt die Obergrenze des Übergangsbereichs $z_{\text{SU}} - \Delta z_{\text{SU}}$ etwa bei 90 m (d.h. z_{SU} bei etwa 110 m, Abbildung S-5) und damit deutlich unterhalb der Süß-/Salzwassergrenze in 40 m Teufe.

Eine veränderte Dichte der Deckgebirgslösung ρ_{DG} ändert an den Verhältnissen nur wenig. Abbildung S-6 zeigt die Abflussrate Q_G für $\rho_{\text{DG}} = 1060 \text{ kg/m}^3$ bei mäßig artesischen Bedingungen ($\Delta p_{\text{nat}} = 50 \text{ kPa}$) und Referenzwerten der übrigen Parameter. Der Vergleich mit Abbildung S-4 ergibt Unterschiede im Anstieg der Grubenlösung in der Schachtröhre von etwa 5 m oder weniger.

Sofern der Versatz in der Schachtröhre um den Faktor 10 durchlässiger ist ($k_s = 10^{-14} \text{ m}^2$), steigt die Grubenlösung bei mäßig artesischen Verhältnissen im Schilfsandstein für alle Werte der Schilfsandstein-Transmissibilität etwa um 20 m bis 30 m höher als beim Referenzwert von $k_s = 10^{-15} \text{ m}^2$ (Abbildung S-7 im Vergleich mit Abbildung S-4). Ursache ist der anfänglich höhere Lösungsfluss aus dem Schilfsandstein in die Schachtröhre und dadurch eine geringere Lösungsdichte ρ_{SU} in der Schachtröhre unterhalb der Teufe z_{SU} entsprechend den Gleichungen (S-4) bis (S-7).



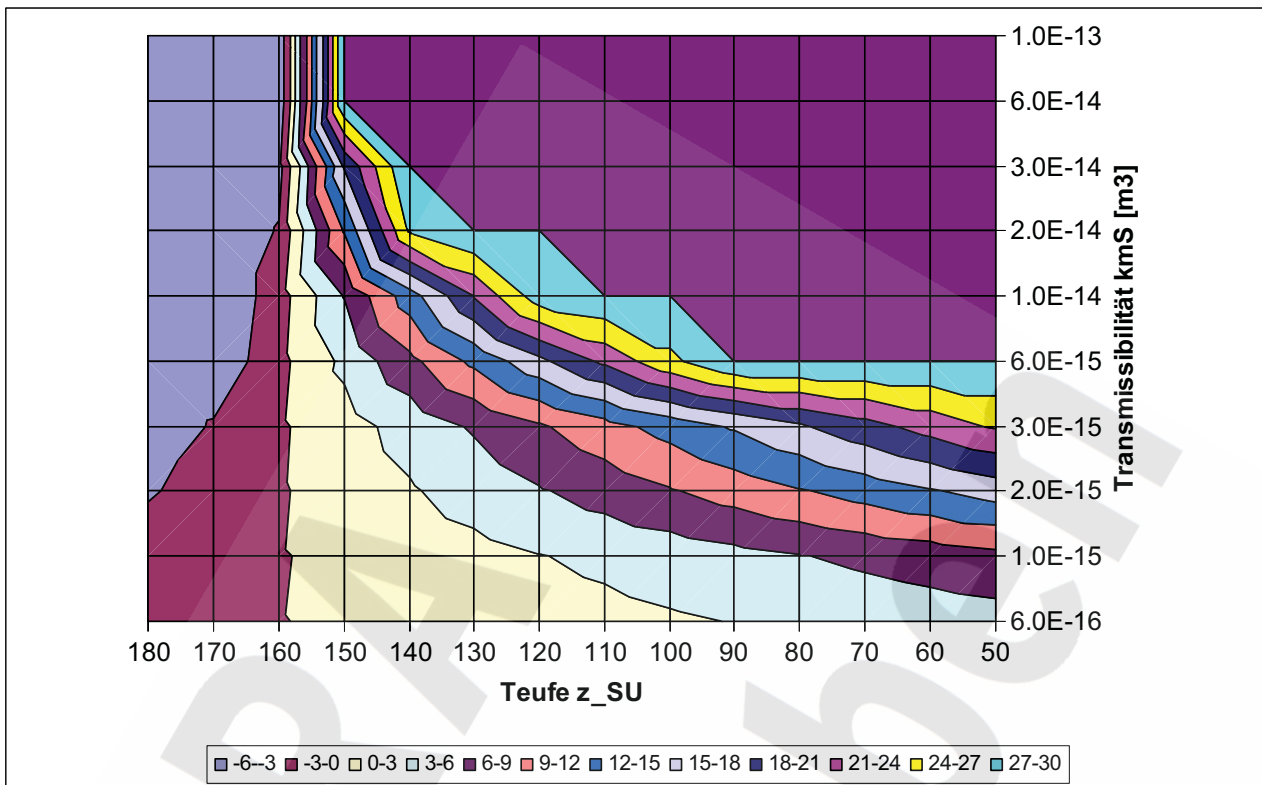


Abbildung S-3: Gesamtfluss Q_1 in m^3/a in den Schilfsandstein unter mäßig artesischen Bedingungen ($\Delta p_{nat} = 50$ kPa) und bei Referenzwerten der übrigen Parameter

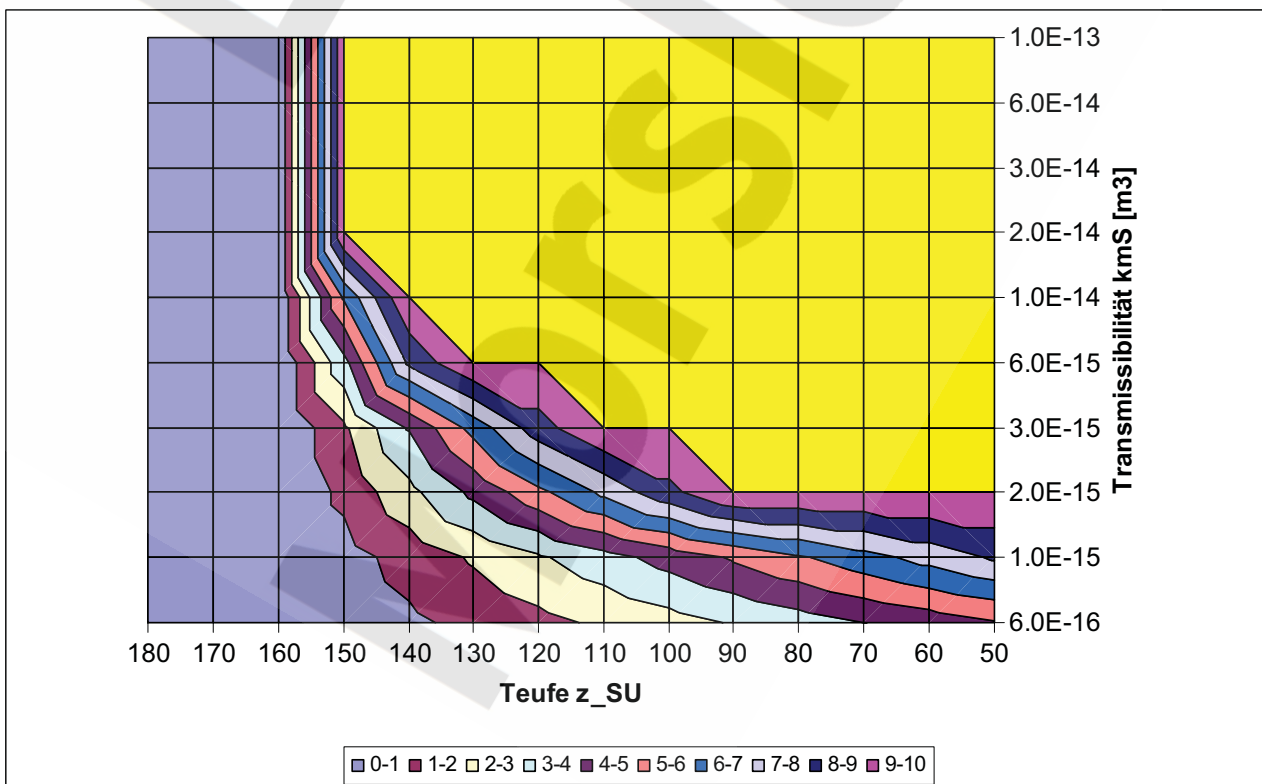


Abbildung S-4: Abflussrate Q_G von Grubenlösung in m^3/a unter mäßig artesischen Bedingungen ($\Delta p_{nat} = 50$ kPa) und bei Referenzwerten der übrigen Parameter

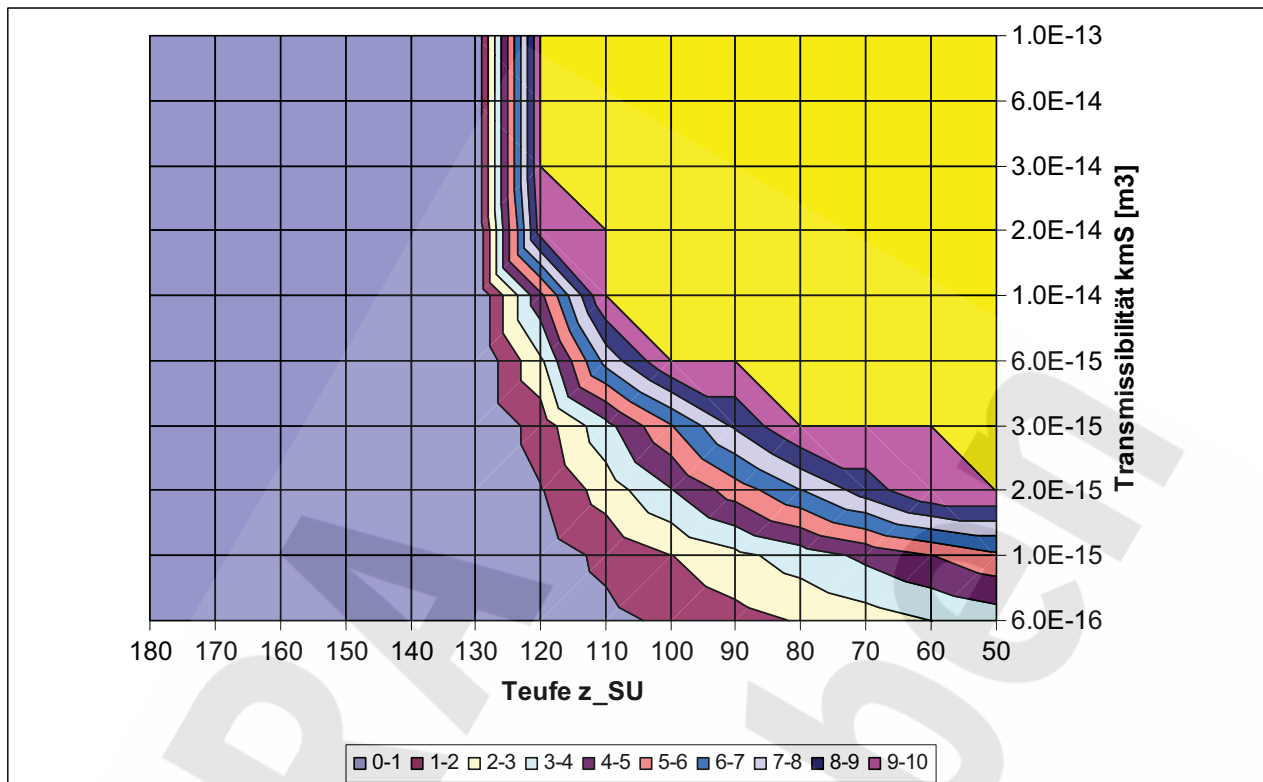


Abbildung S-5: Abflussrate Q_G von Grubenlösung in m^3/a unter artesischen Verhältnissen mit $\Delta p_{\text{nat}} = 100 \text{ kPa}$ und bei Referenzwerten der übrigen Parameter

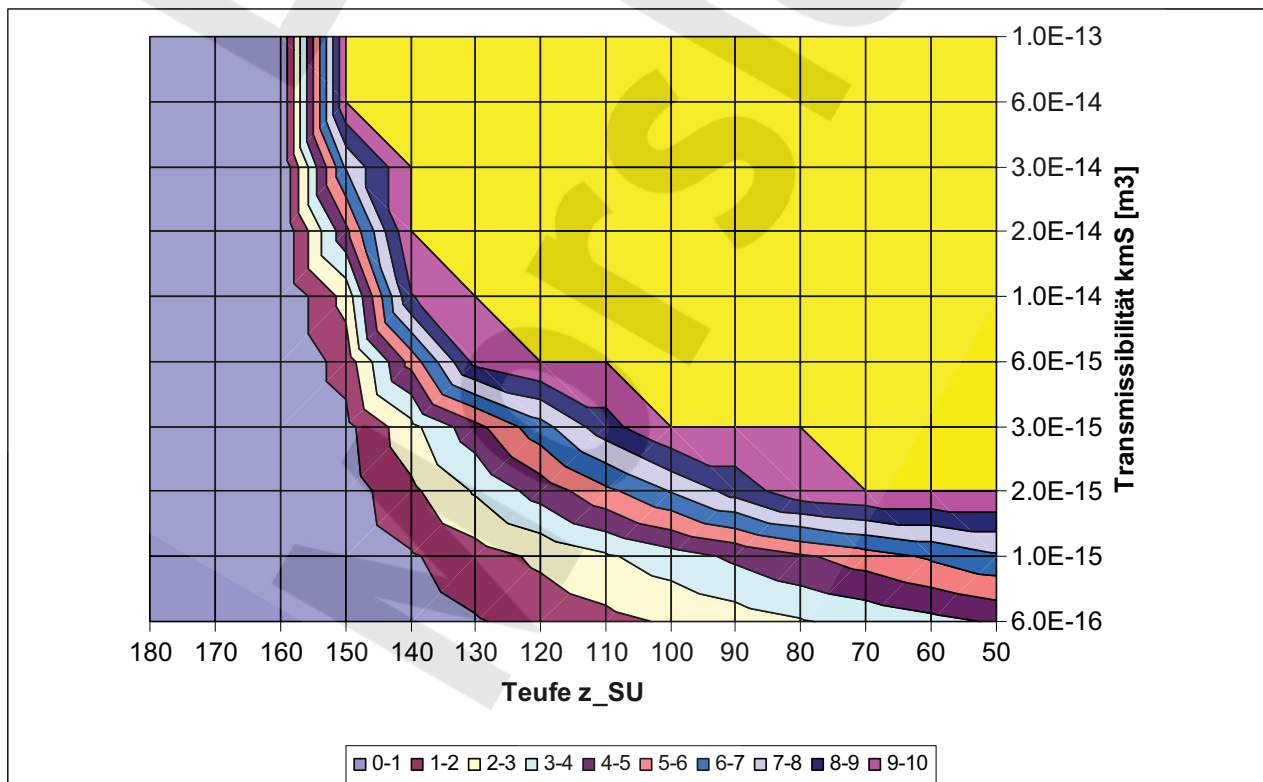


Abbildung S-6: Abflussrate Q_G von Grubenlösung in m^3/a unter artesischen Verhältnissen mit $\Delta p_{\text{nat}} = 50 \text{ kPa}$, einer Dichte der Deckgebirgslösung von $\rho_{\text{DG}} = 1060 \text{ kg/m}^3$ und bei Referenzwerten der übrigen Parameter

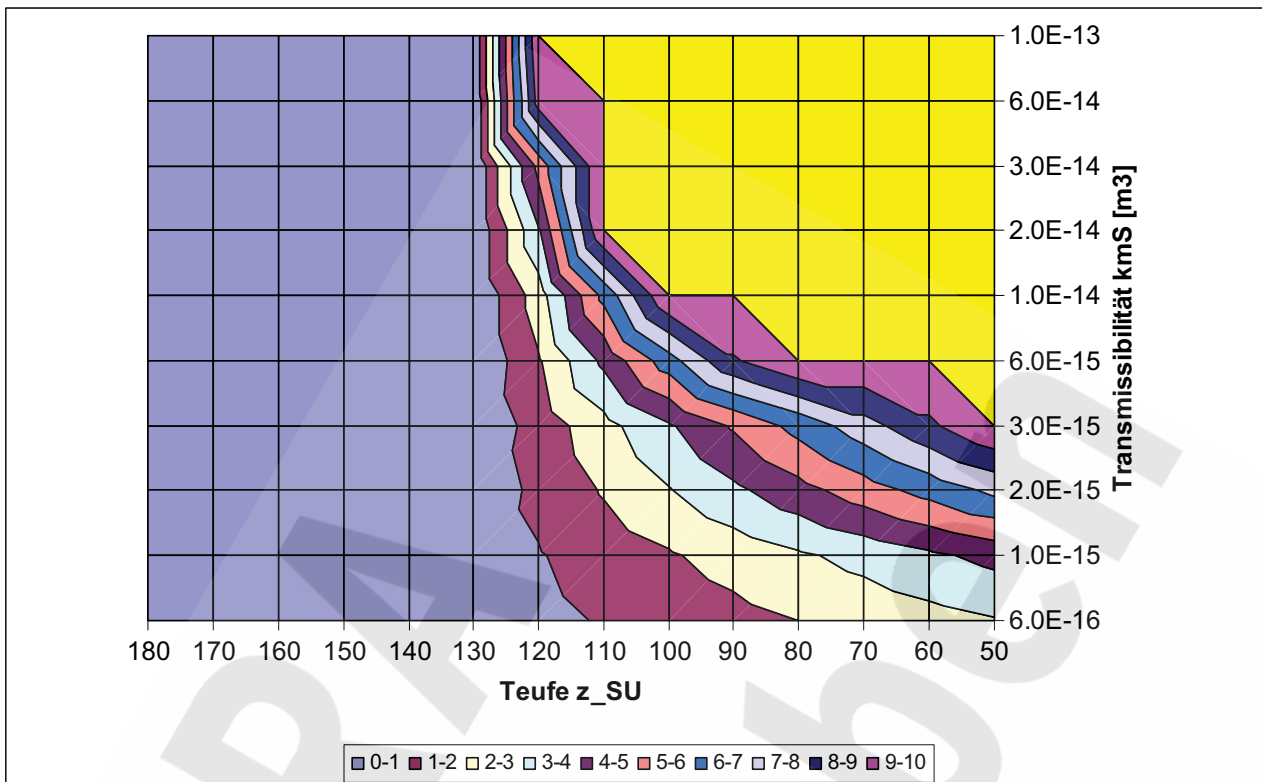


Abbildung S-7: Abflussrate Q_G von Grubenlösung in m^3/a unter artesischen Verhältnissen mit $\Delta p_{nat} = 50 \text{ kPa}$, einer Schachtverfüllung mit $k_S = 10^{-14} \text{ m}^2$ und bei Referenzwerten der übrigen Parameter

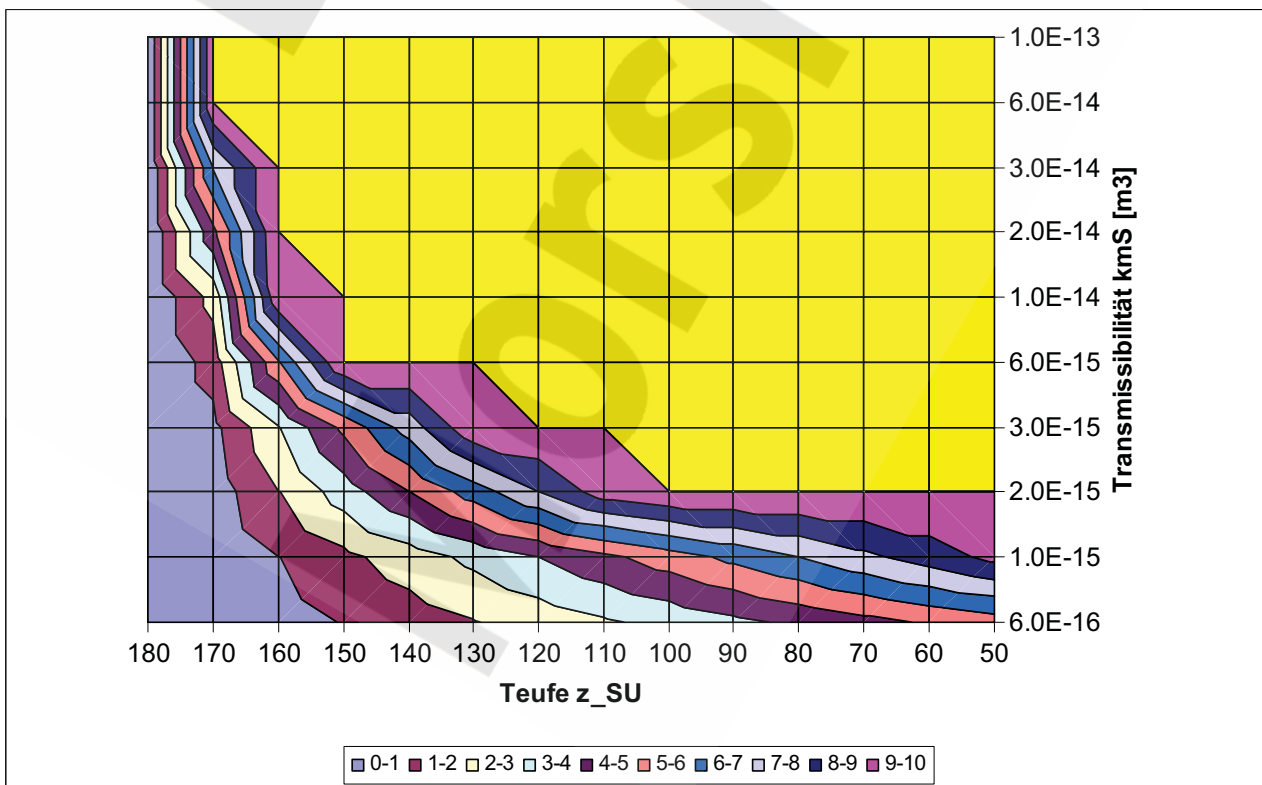


Abbildung S-8: Abflussrate Q_G von Grubenlösung in m^3/a bei $\Delta p_{nat} = 50 \text{ kPa}$, $\Delta z_{SU} = 50 \text{ m}$ und Referenzwerten der übrigen Parameter



Als letzte Parametervariation für $Q_0 = 1 \text{ m}^3/\text{a}$ wird in Abbildung S-8 der Einfluss der Ausdehnung der Übergangszone Δz_{SU} dargestellt. Zum Vergleich wurden die übrigen Parameter wie in Abbildung S-4, also unter anderem entsprechend mäßig artesischen Verhältnissen, gewählt. Bei einer deutlich mächtigeren Übergangszone von $\Delta z_{\text{SU}} = 50 \text{ m}$ steigt die Grubenlösung in relativ hoher Konzentration, gemessen mit z_{SU} , weniger hoch als im Vergleichsfall: Beim plausiblen Wert der Schilfsandstein-Transmissibilität von $T = 6 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3$ liegt die Obergrenze um etwa 15 m tiefer als im Vergleichsfall. Bei anderen Werten von T sind die Unterschiede ähnlich. Betrachtet man allerdings die Obergrenze der Übergangszone, $z_{\text{SU}} - \Delta z_{\text{SU}}$, dann reichen geringe Anteile Grubenlösung bei breitem Übergangsbereich um etwa 10 m bis 20 m höher als beim Referenzwert von Δz_{SU} . Insgesamt ist die Ausdehnung der Übergangszone Δz_{SU} nicht von großem Einfluss.

Die Verhältnisse bei einer höheren Lösungsauspressrate aus der Grube von $Q_0 = 8 \text{ m}^3/\text{a}$ zeigen Abbildung S-9 bis Abbildung S-11. Es ist zu beachten, dass in diesen Darstellungen die realistischen stationären Zustände durch die Grenzlinien zwischen den Zonen $6-8 \text{ m}^3/\text{a}$ und $8-10 \text{ m}^3/\text{a}$ beschrieben werden. Die Abbildungen zeigen, dass bei einer hohen Auspressrate aus der Grube die Aufstiegshöhe der Grubenlösung in der Schachtröhre stärker von der Transmissibilität des Schilfsandstein abhängt als in den bisher betrachteten Fällen mit $Q_0 = 1 \text{ m}^3/\text{a}$.

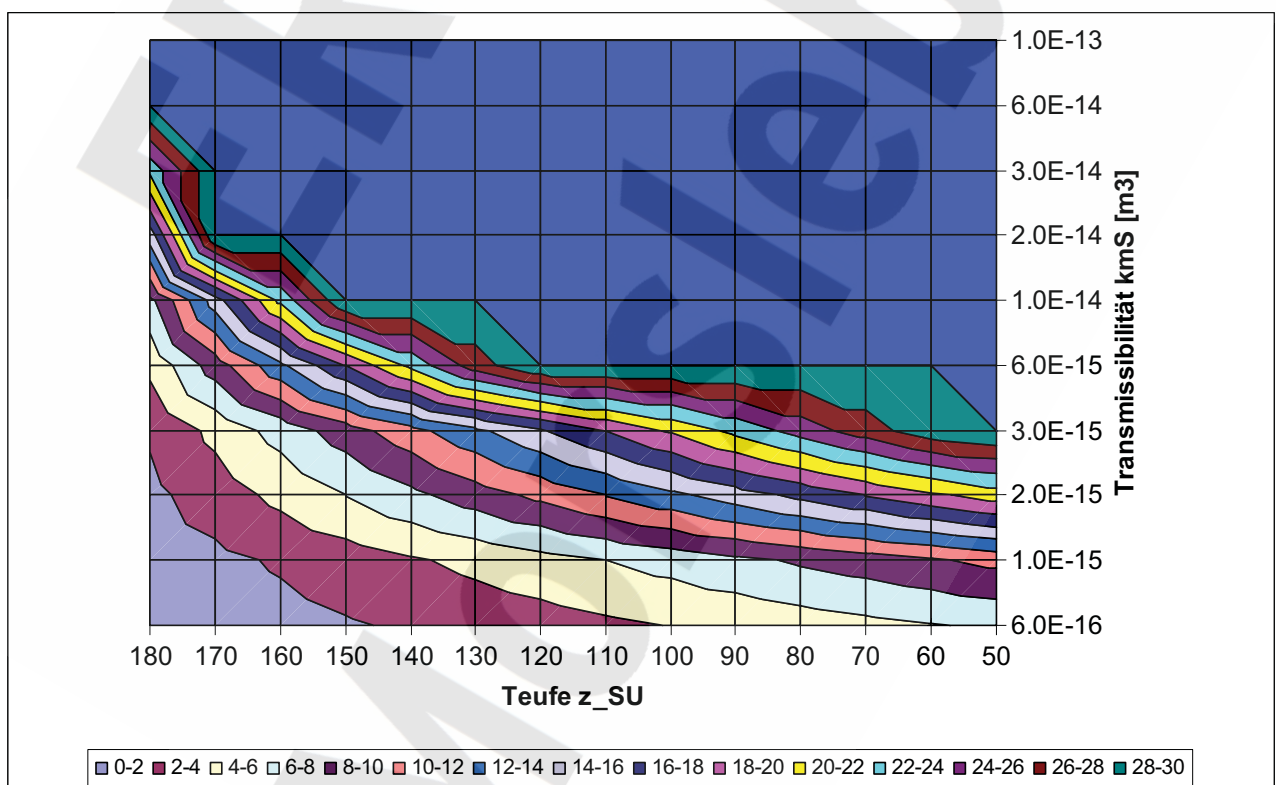


Abbildung S-9: Abflussrate Q_G von Grubenlösung in m^3/a bei einer Auspressrate aus der Grube von $Q_0 = 8 \text{ m}^3/\text{a}$, hydrostatischen Verhältnissen im Schilfsandstein und Referenzwerten der übrigen Parameter

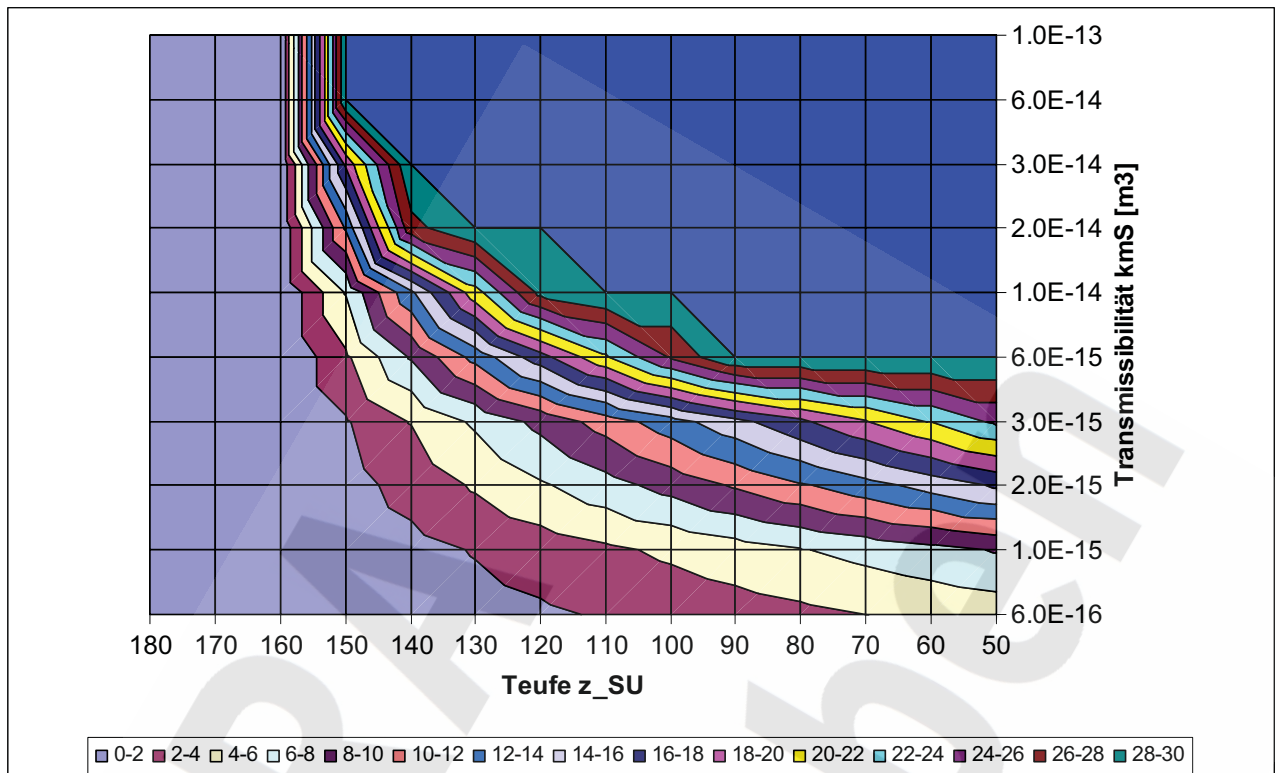


Abbildung S-10: Abflussrate Q_G von Grubenlösung in m^3/a bei einer Auspressrate aus der Grube von $Q_0 = 8 \text{ m}^3/\text{a}$ unter mäßig artesischen Verhältnissen ($\Delta p_{\text{nat}} = 50 \text{ kPa}$) und Referenzwerten der übrigen Parameter

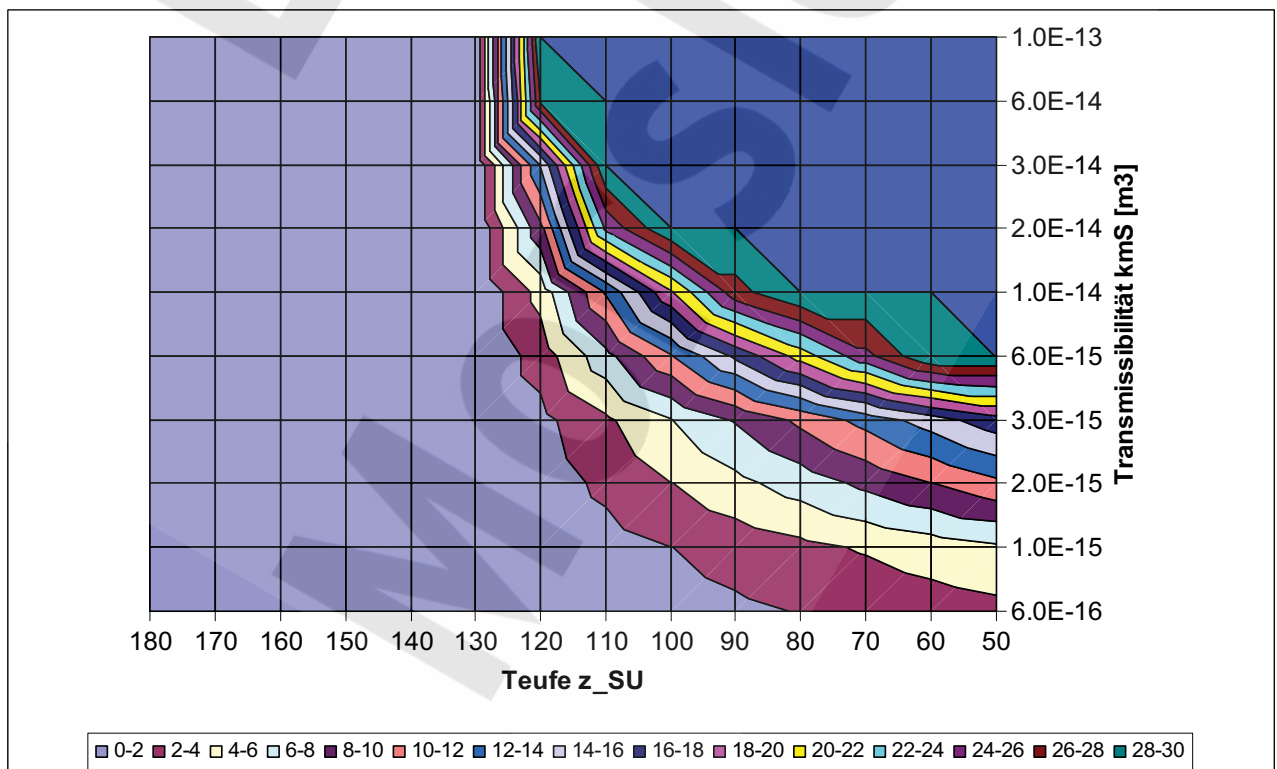


Abbildung S-11: Abflussrate Q_G von Grubenlösung in m^3/a bei einer Auspressrate aus der Grube von $Q_0 = 8 \text{ m}^3/\text{a}$ unter artesischen Verhältnissen ($\Delta p_{\text{nat}} = 100 \text{ kPa}$) und Referenzwerten der übrigen Parameter

Bei hydrostatischen Verhältnissen und beim Referenzwert der Schilfsandstein-Transmissibilität bleibt die Zone mit relativ hohen Anteilen an Grubenlösung (bemessen durch z_{SU}) unterhalb der Teufe von 170 m (Abbildung S-9). Bei einer um den Faktor 3 kleineren Schilfsandstein-Transmissibilität steigt die Zone knapp über die Teufe von 140 m. Ein Austrag von Grubenlösung in das oberflächennahe Grundwasser kann ausgeschlossen werden, sofern die Schilfsandstein-Transmissibilität den Wert von 10^{-15} m^3 übersteigt.

Bei mäßig artesischen Verhältnissen ($\Delta p_{\text{nat}} = 50 \text{ kPa}$) und beim Referenzwert der Schilfsandstein-Transmissibilität steigt die Zone mit relativ hohen Anteilen an Grubenlösung (bemessen durch z_{SU}) bis in eine Teufe von 140 m, bei einem um den Faktor 3 geringer durchlässigen Schilfsandstein bis in eine Teufe zwischen 110 m und 100 m (Abbildung S-10). Die Bedingung für den Ausschluss eines Austrags von Grubenlösung entlang der Schachtröhre (unter Einbezug der Übergangzone) lautet, dass die Schilfsandstein-Transmissibilität größer als $2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3$ sein muss.

Bei artesischen Verhältnissen ($\Delta p_{\text{nat}} = 100 \text{ kPa}$) und beim Referenzwert der Schilfsandstein-Transmissibilität steigt die Zone mit relativ hohen Anteilen an Grubenlösung (bemessen durch z_{SU}) bis in eine Teufe von 110 m, bei einem um den Faktor 3 geringer durchlässigen Schilfsandstein bis in eine Teufe von etwa 75 m. Die berechnete Obergrenze der Übergangzone ($z_{\text{SU}} - \Delta z_{\text{SU}}$) liegt damit in einer Teufe von 55 m, knapp unterhalb der Süß-/Salzwassergrenze. Die Bedingung für den Ausschluss eines Austrags von Grubenlösung entlang der Schachtröhre (unter Einbezug der Übergangzone) lautet, dass die Schilfsandstein-Transmissibilität größer als $2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3$ sein muss.

Die Modellrechnungen können damit einen Austrag von Grubenlösung entlang der Schachtröhre bei hoher Auspressrate nur dann nicht ausschließen, falls in Verbindung mit der hypothetischen mangelhaften Abdichtung des Schachtverschlusses gleichzeitig folgende wenig wahrscheinliche Sachverhalte eintreten:

- Lösungsauspressrate aus der Grube entlang des Schachtes an der oberen Grenze des Plausiblen (u.a. durchkorrodiertes Abdichtsystem zwischen ELB WSF und Restgrube, keine weitere hydraulische Wegsamkeit zwischen Grube und Hutgestein/Deckgebirge, vgl. Kapitel 5.1.2.6),
- artesischer Überdruck im Schilfsandstein an der oberen Grenze des Plausiblen,
- Transmissibilität des Schilfsandstein um mehr als ein Faktor 3 unterhalb des Werts nach [Präger 1999],

wobei zudem die Modellrechnungen den dichtebedingten Abfluss von Grubenlösung aus der Schachtröhre in das Deckgebirge oberhalb des Schilfsandstein vernachlässigen. In Anbetracht dieses Umstands wird bei Auspressraten aus der Grube zwischen etwa $1 \text{ m}^3/\text{a}$ und $8 \text{ m}^3/\text{a}$ ein Austrag von Grubenlösung entlang des Schachtes bis in das oberflächennahe Grundwasser als extrem unwahrscheinliche Variante eines „what-if“-Szenarios ausgeschlossen.

Bei artesischen Verhältnissen und sehr geringen Auspressraten aus der Grube, Q_0 , bildet sich kein realistischer stationärer Zustand, denn sehr geringe Auspressraten aus der Grube beeinflussen die Dichteverhältnisse und damit die Strömungsverhältnisse gegenüber dem Zustand ohne Lösungsauspressung aus der Grube nicht in signifikanter Weise. Bei artesischen Verhältnissen fließt Deckgebirgslösung aus dem Schilfsandstein in den Schacht und dann entlang der Schachtröhre zur Geländeoberfläche. Dieser Lösungsfluss kann geringe Mengen an Grubenlösung mittransportieren. Der Übergang von dichtemäßig unbeeinflussten Verhältnissen bei sehr geringen Auspressra-



ten aus der Grube in die oben beschriebenen und analysierten realistischen stationären Zustände (gemäß Definition in Kapitel S.1) wird im nachfolgenden Kapitel untersucht.

S.4 **Austrag von Grubenlösung in das oberflächennahe Grundwasser bei artesischen Verhältnissen und geringen Auspressraten aus der Grube**

In diesem Kapitel werden wiederum stationäre Zustände untersucht. Im Unterschied zu den in den Kapiteln S.2 und S.3 untersuchten und in Kapitel S.1 definierten stationären Zuständen betreffen die nachfolgend untersuchten stationären Zustände aber immer Fälle mit artesischem Lösungsdruck im Schilfsandstein und einem dadurch angetriebenen konstanten Lösungsfluss entlang der Schachtröhre zur Geländeoberfläche, d.h. in das oberflächennahe Grundwasser. Unter diesen Bedingungen fließt keine Grubenlösung in den Schilfsandstein. Die aus der Grube ausgepresste Grubenlösung muss entlang der Schachtröhre nach oben abfließen. Ziel der folgenden Analyse ist die Bestimmung der maximalen Rate an Grubenlösung, die unter gegebenen Verhältnissen in einem stationären Systemzustand entlang der Schachtröhre in das oberflächennahe Grundwasser gelangen kann. Übersteigt die Lösungsauspressrate aus der Grube diesen Maximalwert, dann kommt der nach oben gerichtete Fluss in der Schachtröhre zum Stillstand, die ausgepresste Grubenlösung beginnt, in den Schilfsandstein einzudringen, und es stellt sich ein stationärer Zustand ein, wie er in den Kapiteln S.2 und S.3 untersucht wurde.

Die Hydraulik des hier untersuchten stationären Zustands ergibt sich – in Anlehnung an die Gleichungen (S-4) und (S-5), jedoch mit Einbezug des Dichteinflusses – durch folgende drei gekoppelte Gleichungen:

Der Zufluss aus dem Schilfsandstein ist

$$Q'_{kmS} = 2\pi \cdot \frac{T}{\mu} \cdot \frac{\beta \cdot \Delta p_{nat}}{\ln(P/R)} \quad (S-12)$$

der Abfluss entlang des Schachtes nach oben

$$Q'_{kmS} + Q_0 = \pi R^2 \cdot \frac{k_S}{\mu} \cdot \left(\frac{(1-\beta) \cdot \Delta p_{nat}}{z_B - z_{GWSp}} - \Delta \rho \cdot g \right) \quad (S-13)$$

und der Dichteunterschied $\Delta \rho$ zwischen der Lösung im Schacht und jener außerhalb des Schachtes im Deckgebirge (mit Vernachlässigung der obersten 30 m Süßwasser)

$$\Delta \rho \cdot (Q'_{kmS} + Q_0) = Q_0 \cdot (\rho_G - \rho_{DG}) \quad (S-14)$$

Auflösung (für gegebenes Q_0) nach Q'_{kmS} und β ergibt mit den Definitionen

$$q_1 = 2\pi \cdot \frac{T}{\mu} \cdot \frac{\Delta p_{nat}}{\ln(P/R)}$$

$$q_S = \pi R^2 \cdot \frac{k_S}{\mu} \cdot \frac{\Delta p_{nat}}{z_B - z_{GWSp}}$$



$$q_D = \pi R^2 \cdot \frac{k_S}{\mu} \cdot g \cdot (\rho_G - \rho_{DG})$$

$$A = q_1 \cdot (q_1 + q_S)$$

$$B = 2 \cdot q_1 \cdot Q_0 - q_S \cdot q_1 + q_S \cdot Q_0$$

$$C = Q_0 \cdot (q_D - q_S + Q_0)$$

folgende quadratische Gleichung für β

$$A \cdot \beta^2 + B \cdot \beta + C = 0$$

$$\beta = \frac{1}{2 \cdot A} \cdot \left(-B \pm \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C} \right) \quad (\text{S-15})$$

Reelle Lösungen für β existieren nur für bestimmte Parameterkombinationen, welche die Größen A, B und C bestimmen. Bedingung dafür ist, dass das Argument der Wurzel in Gl. (S-15), die Determinante der quadratischen Gleichung, positiv oder null ist. Sofern die Determinante positiv ist, gibt es zwei stationäre Systemzustände. Der eine zeichnet sich dadurch aus, dass die ausgepresste Grubenlösung mit einem relativ großen Lösungsfluss aus dem Schilfsandstein und entsprechend geringer Dichte entlang der Schachtröhre transportiert wird. Die zweite Lösung der Gleichung entspricht der Situation, in der die Grubenlösung mit einem relativ geringen Lösungsfluss aus dem Schilfsandstein und entsprechend höherer Dichte, dafür aber auch mit höherer Druckdifferenz entlang des Schachtes, nach oben abfließt. Welche Situation sich einstellt, hängt davon ab, von welcher Seite das System in den stationären Zustand übergeht.

Sofern das Argument der Wurzel in Gl. (S-15), die Determinante, negativ ist, existiert keine reelle Lösung und damit kein stationärer Zustand des Systems mit anhaltendem Lösungsfluss entlang der Schachtröhre nach oben: Der durch die artesischen Verhältnisse angetriebene Lösungsfluss entlang der Schachtröhre vermag die mit der Rate Q_0 aus der Grube austretende Lösung nicht nach oben zu transportieren. Die maximale Auspressrate, $Q_{0,\max}$, welche unter den gegebenen Verhältnissen noch transportiert werden kann, ist durch die Lösung der Gleichung

$$B^2 - 4 \cdot A \cdot C = 0 \quad (\text{S-16})$$

(mit $Q_{0,\max}$ anstelle von Q_0 in den oben angeführten Definitionsgleichungen von A, B und C) gegeben. Dies führt auf eine quadratische Gleichung⁹⁹ für $Q_{0,\max}$

$$a \cdot Q_{0,\max}^2 + b \cdot Q_{0,\max} + c = 0$$

$$Q_{0,\max} = \frac{1}{2 \cdot a} \cdot \left(-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c} \right) \quad (\text{S-17})$$

mit

⁹⁹ Mit einer physikalisch sinnvollen und einer physikalisch nicht sinnvollen Lösung



$$a = q_s \cdot (q_s - 2 \cdot q_1)$$

$$b = 2 \cdot q_1 \cdot (q_1 + q_s) \cdot (q_s - 2 \cdot q_D)$$

$$c = q_s^2 \cdot q_1^2$$

Die Lösungen der Gl. (S-17) sind für verschiedene Werte des artesischen Überdrucks im Schilfsandstein in Abhängigkeit von dessen Transmissibilität dargestellt. Gezeigt werden die Ergebnisse für $\Delta p_{\text{nat}} = 20 \text{ kPa}$ (Abbildung S-12), 50 kPa (Abbildung S-13) und 100 kPa (Abbildung S-14), jeweils für den Referenzwert der querschnittgemittelten Permeabilität der Schachtröhre ($k_s = 10^{-15} \text{ m}^2$) und für zwei um den Faktor 10 nach unten und nach oben abweichende Varianten.

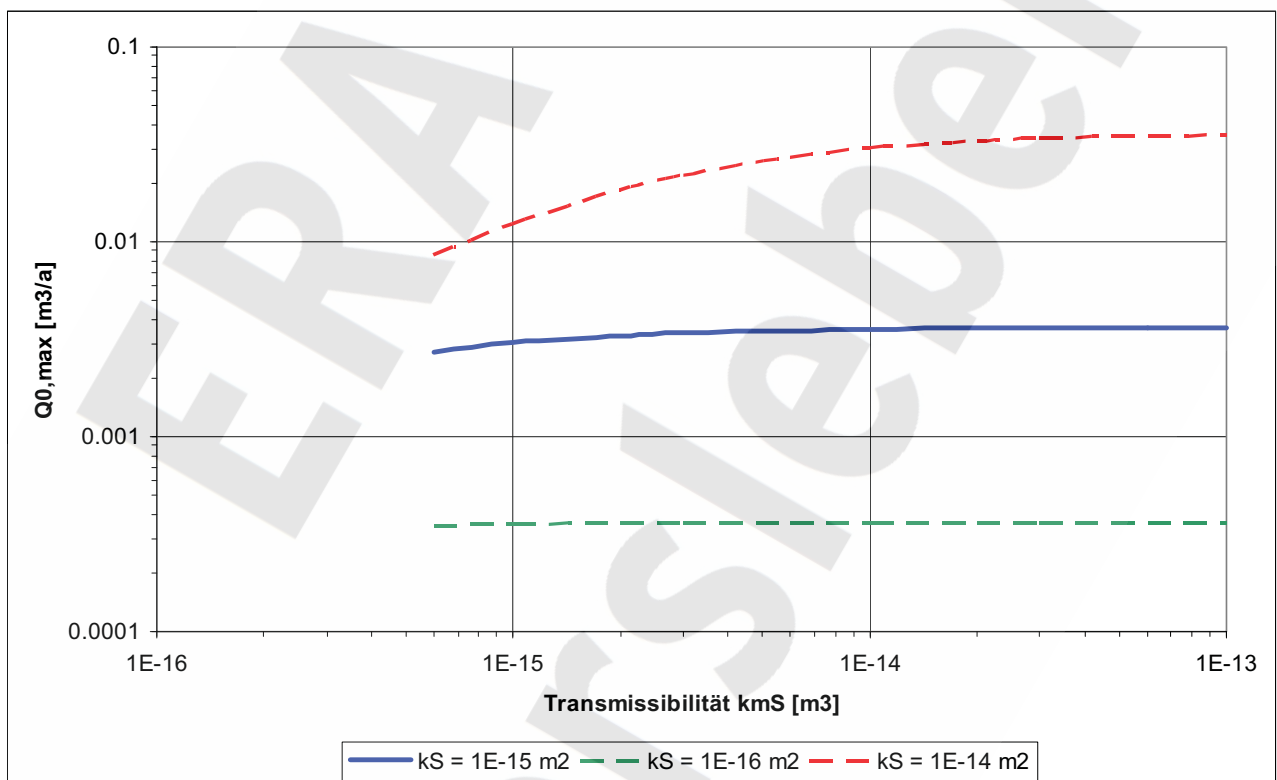


Abbildung S-12: Maximale Auspressrate von Grubenlösung $Q_{0,\text{max}}$ in m^3/a mit stationärem Austrag in das oberflächennahe Grundwasser bei $\Delta p_{\text{nat}} = 20 \text{ kPa}$

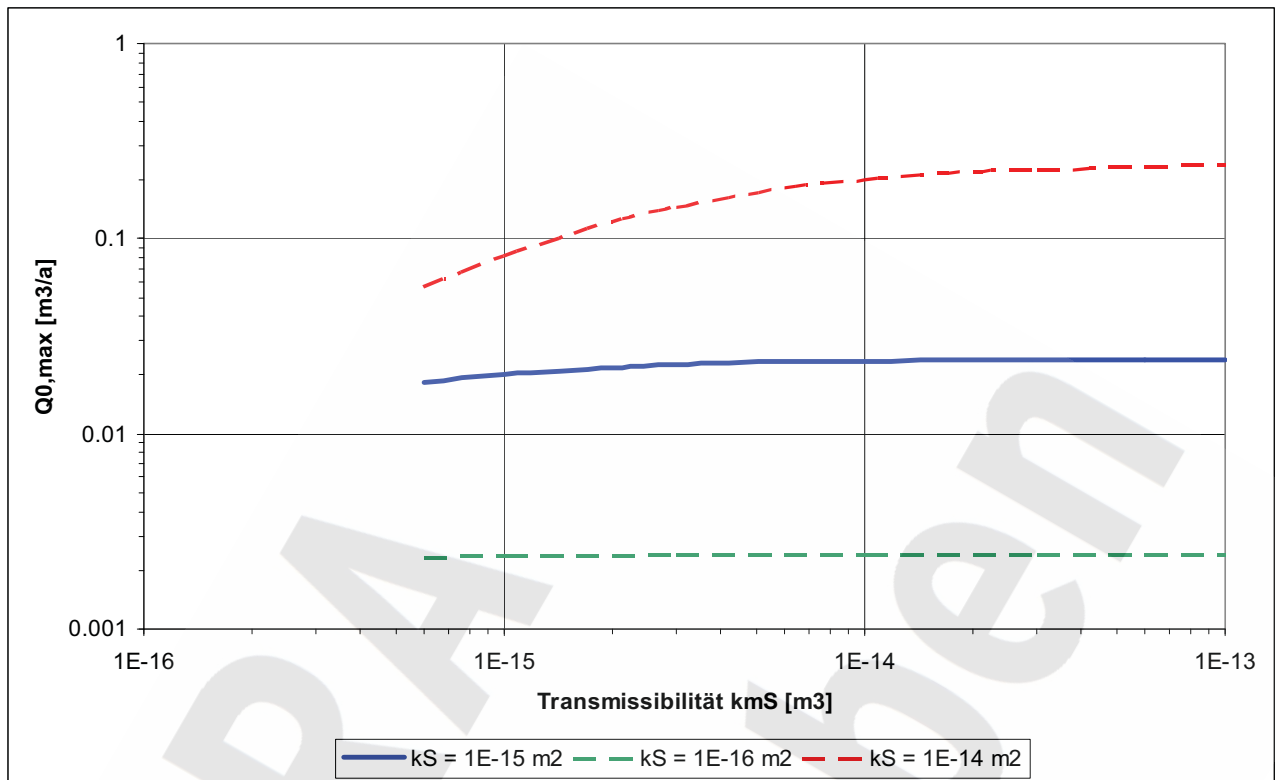


Abbildung S-13: Maximale Auspressrate von Grubenlösung $Q_{0,max}$ in m^3/a mit stationärem Austrag in das oberflächennahe Grundwasser bei $\Delta p_{nat} = 50$ kPa

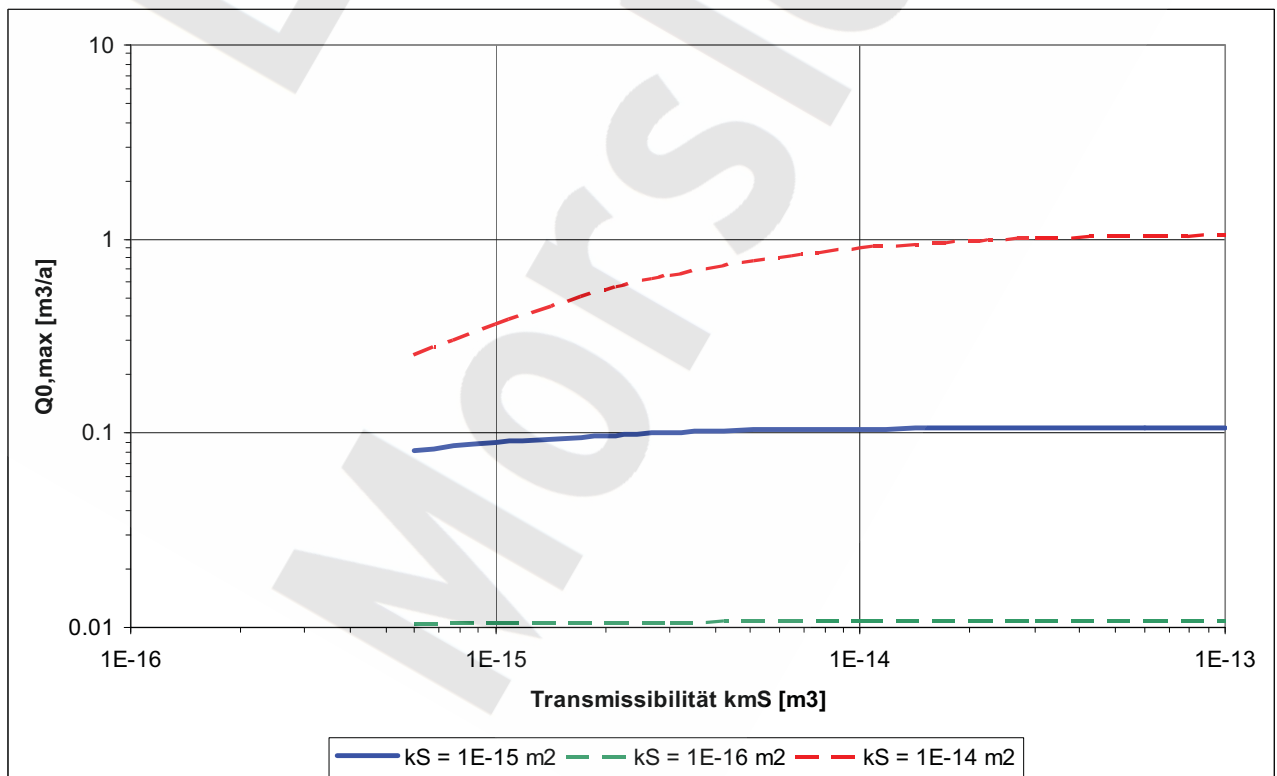


Abbildung S-14: Maximale Auspressrate von Grubenlösung $Q_{0,max}$ in m^3/a mit stationärem Austrag in das oberflächennahe Grundwasser bei $\Delta p_{nat} = 100$ kPa

Bei gering artesischen Verhältnissen ($\Delta p_{\text{nat}} = 20 \text{ kPa}$ entsprechend 2 m Wassersäule) und bei einer Permeabilität der Schachtröhre entsprechend dem Referenzwert beträgt die maximale Auspressrate aus der Grube, welche einen Transport der Grubenlösung ins oberflächennahe Grundwasser gestattet, lediglich rund 3 l/a (Abbildung S-12). Bei einer zehnfach weniger durchlässigen Schachtröhre ist auch $Q_{0,\text{max}}$ um etwa den Faktor 10 geringer. Für Permeabilitäten der Schachtröhre im Bereich des Referenzwertes und darunter zeigt die maximale Lösungsauspressrate aus der Grube, welche zu einem stationären Austrag in das oberflächennahe Grundwasser führt ($Q_{0,\text{max}}$) praktisch keine Abhängigkeit von der Schilfsandstein-Transmissibilität T . Nur bei einer sehr durchlässigen Schachtröhre ergibt sich eine schwache Abhängigkeit von T . Beim plausibelsten Wert von $T (=6 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3)$ und bei einer Permeabilität der Schachtröhre, welche den geplanten Wert um den Faktor 10 übersteigt ($k_S = 10^{-14} \text{ m}^2$), können pro Jahr rund 20 l Grubenlösung entlang des Schachtes in das oberflächennahe Grundwasser gelangen.

Bei mäßig artesischen Verhältnissen ($\Delta p_{\text{nat}} = 50 \text{ kPa}$ entsprechend 5 m Wassersäule) sind die Verhältnisse qualitativ gleich, nur die Zahlenwerte von $Q_{0,\text{max}}$ sind entsprechend höher: Bei einer Permeabilität der Schachtröhre entsprechend dem Referenzwert beträgt die maximale Auspressrate aus der Grube, welche zu einem stationären Transport der Grubenlösung ins oberflächennahe Grundwasser führt, rund 20 l pro Jahr, praktisch unabhängig von der Schilfsandstein-Transmissibilität (Abbildung S-13). Bei geringeren k_S -Werten ist $Q_{0,\text{max}}$ ungefähr proportional kleiner. Bei einer 10-fach höheren Permeabilität der Schachtröhre können bis etwa 200 l Grubenlösung pro Jahr in das oberflächennahe Grundwasser gelangen.

Bei artesischen Verhältnissen, welche nach den Beobachtungen in den schachtnahen Bohrungen dem oberen Rand der plausiblen Bandbreite entsprechen ($\Delta p_{\text{nat}} = 100 \text{ kPa}$ entsprechend 10 m Wassersäule), und einer Permeabilität der Schachtverfüllung von $k_S = 10^{-15} \text{ m}^2$ führen Auspressraten aus der Grube bis etwa 100 l/a zu einem stationären Austrag in das oberflächennahe Grundwasser (Abbildung S-14). Dies gilt wiederum praktisch unabhängig von der Schilfsandstein-Transmissibilität. Bei einer höheren Permeabilität des Versatzes in der Schachtröhre können bei solchen artesischen Verhältnissen Auspressraten aus der Grube bis etwa $1 \text{ m}^3/\text{a}$ noch zu einem Austrag in das oberflächennahe Grundwasser führen.

Um ein besseres Verständnis für die möglichen Verhältnisse mit Austrag von Grubenlösung bis in das oberflächennahe Grundwasser zu vermitteln, werden nachfolgend noch die charakteristischen Größen für folgenden Fall dargelegt:

- mäßig artesische Verhältnisse im Schilfsandstein: $\Delta p_{\text{nat}} = 50 \text{ kPa}$ entsprechend 5 m Wassersäule
- plausible Schilfsandstein-Transmissibilität $T = 6 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3$
- mittlere Permeabilität der Schachtröhre $k_S = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ entsprechend dem Referenzwert

Dies ergibt nach den oben angeführten Gleichungen

- eine maximale Lösungsauspressrate aus der Grube mit Radionuklidtransport entlang des Schachtes in das oberflächennahe Grundwasser von $Q_{0,\text{max}} = 23 \text{ l/a}$,
- einen Lösungszufluss aus dem Schilfsandstein in die Schachtröhre von rund 200 l/a bei dieser Auspressrate aus der Grube,
- damit einen nach oben gerichteten Lösungsfluss in der Schachtröhre von rund 230 l/a,



- entsprechend einer Transportgeschwindigkeit (bei 10% Porosität) von 4,6 cm/a,
- einer Transportdauer für nichtsorbierende Radionuklide entlang der Schachtröhre bis in den Süßwasserbereich (Transportdistanz von $z = 200$ m bis $z = z_0$) von rund 3 500 Jahren und
- bei einem verdünnungswirksamen Wasserfluss von $10\,000\text{ m}^3/\text{a}$ eine Verdünnung der freigesetzten Grubenlösung um mehr als den Faktor 400 000.

S.5 Schlussfolgerungen

Der Lösungsdruck im Schilfsandstein ist wahrscheinlich hydrostatisch (innerhalb weniger Meter Druckwassersäule, d.h. weniger 10 kPa). Bei exakt hydrostatischen und bei unterhydrostatischen Verhältnissen ist ein Austrag von Grubenlösung entlang der Schachtröhre bis in das oberflächennahe Grundwasser nicht möglich. In der Schachtröhre bildet sich oberhalb des obersten Dichtelements eine Zone mit mehr oder weniger unverdünnter Grubenlösung. Dadurch steigt der Druck in der Schachtröhre an und die Grubenlösung wird in den Schilfsandstein ausgepresst. Für den gesamten Bereich der möglichen hydraulischen Leitfähigkeiten des Schilfsandstein steigt dabei die Grubenlösung lediglich um einige 10 m über das Niveau des Schilfsandstein an.

Bei relativ hohen Raten der Lösungsauspressung aus der Grube trifft dies auch bei artesischen Überdrücken im Schilfsandstein zu. Dass das System bei Lösungsauspressung entlang des Schachtes auch bei artesischem Überdruck im Schilfsandstein in einen Zustand übergeht, in dem die Grubenlösung (dichtebedingt) in den Schilfsandstein abfließt und keine Freisetzung in das oberflächennahe Grundwasser erfolgt, hängt neben der Größe des artesischen Überdrucks und der Leitfähigkeit des Schilfsandstein auch von der querschnittgemittelten hydraulischen Leitfähigkeit der Schachtröhre (einschließlich Auflockerungszone) oberhalb des Schilfsandstein ab.

Sofern die querschnittgemittelte hydraulische Leitfähigkeit der Schachtröhre entsprechend der Planung einem k_f -Wert von $1 \cdot 10^{-8}$ m/s oder weniger entspricht, entwickelt sich bei mäßig artesischen Verhältnissen (entsprechend einer Druckspiegelhöhe von 5 m oder weniger über dem Grundwasserspiegel) lediglich für sehr geringe Auspressraten aus der Grube bis rund 20 l/a ein Systemzustand, bei dem die ausgepresste Grubenlösung entlang der Schachtröhre in das oberflächennahe Grundwasser transportiert wird. Selbst bei artesischen Verhältnissen, die dem oberen Rand des Plausiblen entsprechen, kann höchstens bis zu einer Lösungsauspressrate aus der Grube von etwa 100 l/a eine Freisetzung von Grubenlösung entlang der Schachtröhre erfolgen. Diese Aussagen gelten in guter Näherung unabhängig von der Transmissibilität des Schilfsandstein.

Bei artesischen Verhältnissen im Schilfsandstein führt nur eine geringe Rate der Lösungsauspressung zu einem Systemzustand, in dem die ausgepresste Grubenlösung entlang der Schachtröhre bis in das oberflächennahe Grundwasser transportiert wird. Da die hydraulische Leitfähigkeit der Schachtröhre (einschließlich deren Auflockerungszone) oberhalb des Schilfsandstein beschränkt ist, kann Grubenlösung höchstens mit einer sehr geringen Rate freigesetzt werden.



Anhang T Verdünnung von Grubenlösung im oberflächennahen Grundwasser

T.1 Einleitung

Für die mögliche Systementwicklung mit einem erheblichen Lösungszutritt in die Doppelschachtanlage in der Nachbetriebsphase ist in der Langzeitsicherheitsanalyse davon auszugehen, dass nach einiger Zeit Grubenlösung mit gelösten Radionukliden aus dem Grubengebäude in das Hutgestein ausgepresst wird. Mit den Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung im Hutgestein und Deckgebirge wurde dargelegt, dass sich diese Grubenlösung entlang drei qualitativ unterschiedlichen Typen von Transportpfaden ausbreiten wird ([Colenco 2002b]; vgl. auch Kapitel 3.3.10 im Hauptteil dieses Berichts). Diese Pfade führen durch unterschiedliche Bereiche von Hutgestein und Deckgebirge und mit unterschiedlichen Transportzeiten von der Übertrittsstelle am Salzspiegel bis in das oberflächennahe Grundwasser südwestlich und nordöstlich der Aller. Während des Transports wird sich die Grubenlösung durch Dispersion und Diffusion mit unkontaminiertem Grundwasser vermischen, was einer Verdünnung entspricht.

Unter der konservativen Annahme einer reversiblen Sorption (der sorbierenden Radionuklide in den sorbierenden Gebirgseinheiten) ist die Annahme von linearen Sorptionsisothermen in Anbetracht der niedrigen Radionuklidkonzentrationen im Hutgestein und Deckgebirge zulässig. Damit sind sämtliche Transportprozesse linear. Aufgrund dieser Linearität entspricht die kumulierte Verdünnung aller Dispersions- und Diffusionsprozesse entlang der Transportpfade dem Verhältnis des oberflächennahen Grundwasserflusses, in den Grubenlösung freigesetzt wird, und der Rate, mit der Grubenlösung in das Hutgestein ausgepresst wird. Mit anderen Worten: Die Radionuklidkonzentration im oberflächennahen genutzten Grundwasser ist gleich dem Quotienten des Radionuklidflusses in dieses Grundwasser (summiert über die Fläche der Freisetzung, in Bq/Jahr) und des Grundwasserflusses durch den betroffenen Bereich des oberflächennahen genutzten Grundwasserleiters.

Im Folgenden werden die in der Langzeitsicherheitsanalyse verwendeten Parameterwerte für den verdünnungswirksamen oberflächennahen Grundwasserfluss – Referenzwert sowie obere und unter Bandbreite – hergeleitet. Die Herleitung beruht auf einer nachträglichen detaillierteren Auswertung der in [Colenco 2001b] dokumentierten 3D Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasserverhältnissen, Rechenfall R 44.

T.2 Berechnung des verdünnungswirksamen Grundwasserflusses

Für die Langzeitsicherheitsanalyse wird angenommen, dass die Grubenlösung in ein Gebiet freigesetzt wird, das eine Ausdehnung entlang des Allertals von 200 m aufweist (Referenzwert). Eine größere Ausdehnung würde zu einer stärkeren Verdünnung führen. Eine signifikant geringere Ausdehnung ist aufgrund von hydraulischen Effekten und von Dichteeffekten nicht plausibel. Zudem wird vereinfachend angenommen, dass die Freisetzung der Grubenlösung ausschließlich südwestlich der Aller erfolgt. Der verdünnungswirksame oberflächennahe Grundwasserfluss ist somit jener durch einen 200 m breiten Streifen von Quartär sowie Walbecker Schichten und Obere



Alleringerslebener Schichten der Oberkreide, der sich quer zum Allertal südwestlich der Aller erstreckt. Da der Ort der Freisetzung von Grubenlösung, d.h. deren Übertritt ins oberflächennahe genutzte Grundwasser, nicht genau prognostiziert werden kann, wird der Mittelwert für verschiedene örtliche Lagen dieses 200 m breiten Streifens angesetzt. Für die quantitative Festlegung wird angenommen, dass dies in ausreichend guter Näherung dem Wasserumsatz im Modellgebiet südwestlich der Aller, dividiert durch die Modellausdehnung entlang der Aller und multipliziert mit der Breite des betrachteten Streifens von 200 m, entspricht.

Zur Berechnung des für die Langzeitsicherheitsanalyse relevanten verdünnenden Grundwasserflusses wurde der Grundwasserumsatz im Modellgebiet im Rechenfall R44 neu und detaillierter ausgewertet. Dazu wurde das Modellgebiet in fünf Teilgebiete aufgeteilt (Abbildung T-1) und für diese – gestützt auf die Ergebnisse des Rechenfalls R44 – die gebietsspezifischen Infiltrations- und Exfiltrationsraten ermittelt (Tabelle T-1). Als Teilgebiet 3 wurde die Menge der Knoten mit Festpotential entlang der Aller definiert. Da die Wasserflüsse, die im Modell für diese Knoten ermittelt werden, bei der Ermittlung der Infiltrations- und Exfiltrationsraten in den beiden benachbarten Teilgebieten 2 und 4 voll berücksichtigt werden, ist eine gesonderte Aufnahme der Wasserflüsse des Teilgebiets 3 (Aller) in die Bilanz unnötig. In Tabelle T-1 sind deshalb keine Infiltrations- und Exfiltrationsraten für das Teilgebiet 3 angeführt.

Tabelle T-1: 3D-Süßwassermodell ERAM, Referenzfall R44. Bilanzierung der In- und Exfiltrationsraten in den Teilgebieten 1, 2, 4 und 5

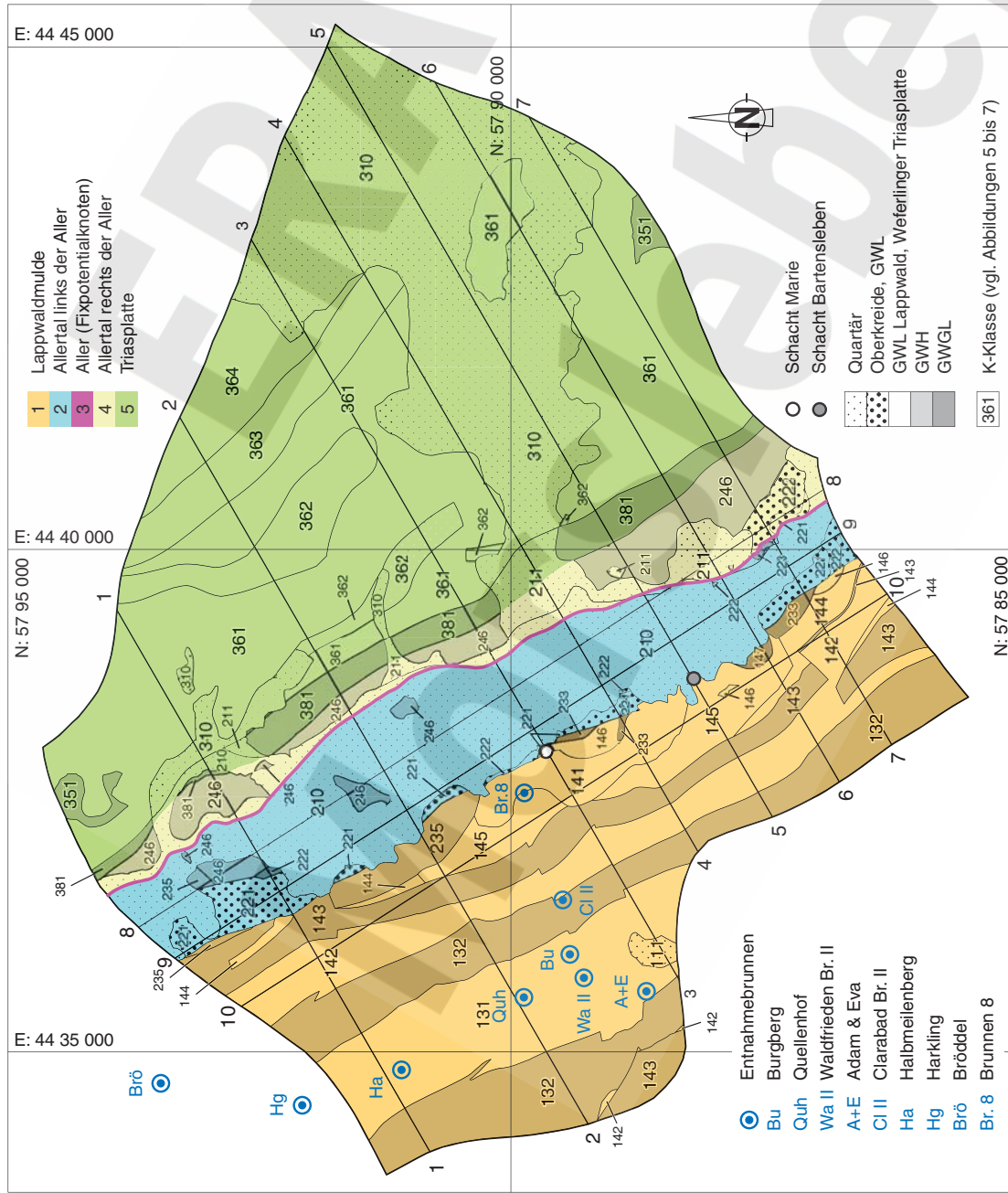
Infiltration		
Teilgebiet	m ³ /a	l/s
1 – Lappwaldmulde	890'273	28,23
2 – Allertal westlich der Aller	263'433	8,35
3 – Aller	--	--
4 – Allertal östlich der Aller	54'610	1,73
5 – Triasplatte	1'048'123	33,24
Total	2'256'439	71,55
Exfiltration		
Teilgebiet	m ³ /a	l/s
1 – Lappwaldmulde	-387'993	-12,30
2 – Allertal westlich der Aller	-610'308	-19,35
3 – Aller	--	--
4 – Allertal östlich der Aller	-108'373	-3,44
5 – Triasplatte	-1'103'079	-34,98
Total	-2'209'754	-70,07
Differenz Infiltration/Exfiltration	46'685	1,48
Fehlermaß	1,05 %	

Konvention: + Infiltration, - Exfiltration

Fehlermaß (%): Differenz Infiltration/Exfiltration geteilt durch die Summe der beiden Werte

Die numerische Zuverlässigkeit der Auswertung zeigt sich im Fehlermaß, der Differenz aus der Gesamt-Infiltration und der Gesamt-Exfiltration, dividiert durch die Summe der beiden Werte. Es beträgt rund 1%. Für die Berechnung des verdünnungswirksamen Wasserflusses im oberflächennahen Grundwasserträger wird auf die Exfiltrationsraten zurückgegriffen.





4305/180/Teilgebiete_Exfiltrations/27.05.08

Abbildung T-1 3D-Süßwassermodell ERAM: Definition der Teilgebiete 1 – 5; vgl. [Colenco 2001b], Abb. 22



Vergleicht man die Teilgebiete 1 und 2 südwestlich der Aller (ungerundet $998'301 \text{ m}^3/\text{a}$ entsprechend $31,65 \text{ l/s}$) mit den Teilgebieten 4 und 5 nordöstlich der Aller (ungerundet $1'211'452 \text{ m}^3/\text{a}$ entsprechend $38,42 \text{ l/s}$), so weisen die beiden Seiten der Aller ähnliche Werte der Exfiltrationsraten auf.

Wie in Kapitel 3.3.10 dargelegt wurde, können die Transportpfade in drei Typen unterteilt werden. Die Transportpfade des Typs (i) führen durch das Hutgestein und den Oberkreidetrog in das oberflächennahe Grundwasser. Die Exfiltration erfolgt damit – abgesehen von nicht auszuschließenden Ausnahmefällen – in das Teilgebiet 2. Die Verdünnung entlang dieser Transportpfade entspricht somit dem Quotienten aus dem Fluss durch einen 200 m breiten Streifen des Teilgebiets 2 und dem Anteil der in das Hutgestein ausgepressten Lösung, die sich entlang der Transportpfade des Typs (i) ausbreitet.

Die Transportpfade des Typs (ii) führen durch das Hutgestein und die Deckschichten der Allertalzone, welche dem Keuper angehören, in das oberflächennahe Grundwasser. Die Exfiltration erfolgt in den nordöstlichen Teil des Teilgebiets 2 und in das Teilgebiet 4. Die Verdünnung entlang dieser Pfade entspricht somit dem Quotienten aus dem Fluss durch einen 200 m breiten Streifen der Teilgebiete 2 (nur nordöstlicher Teil) und 4 und dem Anteil der in das Hutgestein ausgepressten Lösung, die sich entlang der Transportpfade des Typs (ii) ausbreitet.

Die Transportpfade des Typs (iii) führen letztendlich in die Weferlinger Triasplatte und dort in oberflächennahes Grundwasser. Die Exfiltration erfolgt in das Teilgebiet 5. Die Exfiltration im Teilgebiet 5 ist inhomogen, und unmittelbar nördlich der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie befindet sich ein dominantes Exfiltrationsgebiet [Colenco 2001b, Abb. 76]. Aus diesen Gründen würde die Berechnung des Verdünnungsfaktors als Quotient des gemittelten Grundwasserflusses durch einen 200 m breiten Streifen der Weferlinger Triasplatte und dem Anteil der in das Hutgestein ausgepressten Lösung, die sich entlang der Transportpfade des Typs (iii) ausbreitet, einen Wert ergeben, der zwar relativ hoch ist, die tatsächliche Verdünnung aber dennoch unterschätzen würde.

Die Aufteilung der in das Hutgestein ausgepressten Lösung auf die drei Transportpfadtypen, eine wesentliche Voraussetzung für die typenspezifische Berechnung des Verdünnungsfaktors, ist keine robuste Größe und soll deshalb für die Analyse der Langzeitsicherheit nicht belastet werden. Für die Analyse der Langzeitsicherheit wird deshalb die Verdünnung mit der vereinfachenden Annahme berechnet, dass die gesamte in das Hutgestein ausgepresste Lösung in den oberflächennahen Grundwasserfluss gelangt, der im Mittel in einem 200 m breiten Streifen des Teilgebiets 2 exfiltriert.

Basierend auf dieser Annahme und der in Tabelle T-1 aufgeführten Exfiltrationsrate ergibt sich folgender verdünnender Grundwasserfluss für die aus dem Grubengebäude in das Hutgestein ausgepresste Lösung:

Exfiltrationsrate im Teilgebiet 2:	610'308 m^3/a
Länge des Teilgebiets 2 im Modell:	8'100 m
Mittlere Exfiltrationsrate pro Meter Länge:	75,3 $\text{m}^3(\text{a}\cdot\text{m})$
Mittlere Exfiltrationsrate in einem 200 m breiten Streifen:	15'069 m^3/a



Die gebietsspezifische Auswertung der mit dem hydrogeologischen Deckgebirgsmodell (Rechenfall R44) ermittelten Exfiltrationsraten ergibt damit einen Referenzwert für den verdünnenden Grundwasserfluss am Standort ERAM von 15'000 m³/a.

Die obere Bandbreite für den verdünnenden Grundwasserfluss von 100'000 m³/a ergibt sich unter Verwendung der folgenden Größen:

- mittlere Niederschlagsmenge bei Morsleben: etwa 600 mm/a
- Anteil des Grundwasserabflusses einschließlich Zwischenabfluss¹⁰⁰: generell in der Größenordnung von $\frac{1}{3}$
- maßgebendes Einzugsgebiet: 2,5 km x 200 m = 500'000 m²

Die untere Bandbreite des verdünnenden Grundwasserflusses von 10'000 m³/a wird unabhängig von den heutigen hydrologischen Verhältnissen im Modellgebiet entsprechend dem Wasserbedarf von kleinen, sich selbst versorgenden Dorfgemeinschaften unter eher ungünstigen klimatischen Verhältnissen [GRS 2003b] angesetzt. Dabei wurden extreme klimatische Verhältnisse, welche mit den in der AVV zu § 47 StrlSchV unterstellten Beregnungs- und Verzehrgewohnheiten unvereinbar wären, außer Acht gelassen.

¹⁰⁰ Gemäß [BGR 1998b, Kap. 4.1.3] erreicht nicht alles in die ungesättigte Zone infiltrierende Niederschlagswasser den Grundwasserleiter. Falls wasserstauende Horizonte über dem obersten Grundwasserleiter vorhanden sind, wird ein Teil nach mehr oder weniger kurzer Aufenthaltsdauer wieder zum Oberflächenabfluss. Dieser Beitrag wird Zwischenabfluss genannt. Er kann nur schwer quantifiziert werden.

