

Projekt Langzeitsicherheit Asse


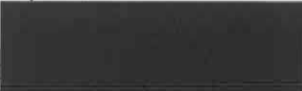

Transportmodellierung

Fluid- und Radionuklidtransport am Standort Asse Ergänzungsbericht

Dokumentenkenzeichen ALSA-C-10.4B-NR227

Petten, 12.12.2006

Version	Datum	Dokumentennummer	Beschreibung
0	31.10.2006		Entwurf des Ergänzungsberichtes
1	12.12.2006	21889/06.77241/I	Ergänzungsbericht

Autor(en): D. Buhmann, J. Mönig, A.D. Poley, J. Poppei, G. Resele 	Geprüft: J. Prij, G. Resele 
380 Seiten NRG Bericht 21889/06.77241/I	Genehmigt: P. O'Sullivan 
ergänzungsbericht_1.doc	

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Aktualisierte Modellannahmen	1
1.2	Betrachtete Varianten.....	3
2	Aktualisierte Modellannahmen	5
2.1	Veränderte Modellparameter.....	5
2.1.1	Viskosität des Schutzfluids.....	5
2.1.2	Porendiffusivität D_p	5
2.1.3	Schadstoffaustrag aus ELB durch konvektive Lösungsbewegung	6
2.2	Schnittstelle Deckgebirge	11
2.2.1	Parametrisierung der Schnittstelle	12
2.2.2	Umsetzung in KAFKA	16
2.2.3	Umsetzung in LOPOS.....	17
2.3	Ausbreitung ins Deckgebirge: Transferfunktionen.....	18
2.3.1	Verdünnungsfaktor - Transferfunktionen.....	18
2.3.2	Ergebnisse der Deckgebirgsmodellierung	19
2.3.3	Anwendung in den Modellrechnungen mit KAFKA	23
2.3.4	Anwendung in den Modellrechnungen mit LOPOS.....	24
2.4	Dosiskonversionsfaktoren	24
3	Modellergebnisse für den Vergleichsfall	27
3.1	Modellergebnisse KAFKA (RX.1-K)	27
3.1.1	Auswirkung der veränderten Modellierung im Grubengebäude.....	27
3.1.2	Auswirkung der Transferfunktionen	54
3.2	Modellergebnisse LOPOS (RX.1-L)	59
3.2.1	Auswirkung der veränderten Modellierung im Grubengebäude.....	59
3.2.2	Auswirkung der Transferfunktionen für das Deckgebirge und der geänderten Dosiskonversionsfaktoren.....	78
3.3	Schlussfolgerungen für den Vergleichsfall	86
4	Potenzielle Strahlenexposition der bisher betrachteten Szenarien und Varianten unter Verwendung von Transferfunktionen	91
4.1	Referenzfall	91
4.2	Varianten zur Radionuklidmobilisierung	95
4.2.1	Variante mit schnellerer Radionuklidmobilisierung in den ELB (SchnMob).....	96
4.2.2	Variante mit langsamer Radionuklidmobilisierung in den ELB (LangsMob).....	98
4.2.3	Variante mit früherem Milieuwechsel in den ELB (FrühMilW).....	99
4.3	Szenario zum veränderten Milieu	103
4.4	Varianten zur Kanalisierung des Baufeldes in der Südflanke.....	106

4.4.1	Variante mit geringer Kanalisierung im Baufeld in der Südflanke (SFKan80%).....	106
4.4.2	Variante mit erhöhter Kanalisierung im Baufeld in der Südflanke (SFKan20%).....	111
4.5	Szenario und Variante zur Schnittstelle Deckgebirge	117
4.5.1	Szenario mit einzelner Austrittsstelle im Grubenhöchsten (OhneDG574)	118
4.5.2	Variante mit über der Austrittsfläche gleichverteiltem Austritt (GIAustritt).....	122
4.6	Szenarien und Varianten der Unsicherheitsbetrachtung	127
4.6.1	Einfluss der Gasbildung und Gasspeicherung	127
4.6.2	Einfluss der Permeabilität bzw. Transmissivität	131
4.6.3	Einfluss der Austrittsfläche ins Deckgebirge	137
4.6.4	Einfluss der Konvergenz	139
4.7	Schlussfolgerungen	147

5 Modellrechnungen und Ergebnisse für weitere Varianten und Szenarien 155

5.1	Erhöhte Desintegration des Salzgesteins im Firstbereich von Abbau 6/725(Na2) (LAW1B) und der Einlagerungskammer 12/750 (LAW4).....	155
5.1.1	Beschreibung und Definition	155
5.1.2	Modellergebnisse KAFKA (RX.2-K)	157
5.1.3	Modellergebnisse LOPOS (RX.2-L)	165
5.1.4	Schlussfolgerungen zur Variante mit erhöhter Desintegration des Salzgesteins im Firstbereich von Abbau 6/725(Na2) (LAW1B) und ELK 12/750 (LAW4)	170
5.2	Sorelbetonverfüllung im Grubenhöchsten	171
5.2.1	Beschreibung der Anpassungen	171
5.2.2	Modellergebnisse KAFKA (RX.3-K)	172
5.2.3	Modellergebnisse LOPOS (RX.3-L)	176
5.2.4	Schlussfolgerungen für den Rechenfall mit Sorelbetonverfüllung im Grubenhöchsten.....	177
5.3	Aktualisierte Radionuklid-Quellterme	178
5.3.1	Beschreibung und Definition	178
5.3.2	Modellparameter	179
5.3.3	Modellergebnisse LOPOS (RX.4-L)	183
5.3.4	Schlussfolgerungen für aktualisierte Radionuklid-Quellterme.....	189
5.4	Kombinierte Variante	190
5.4.1	Beschreibung und Definition	190
5.4.2	Modellergebnisse KAFKA (RX.5-K)	191
5.4.3	Modellergebnisse LOPOS (RX.5-L)	212
5.4.4	Schlussfolgerungen zur kombinierten Variante.....	234
5.5	Variation des konzeptuellen Modells für das Deckgebirge.....	235
5.5.1	Beschreibung und Definition	235
5.5.2	Modellergebnisse KAFKA (RX.7-K)	235
5.5.3	Modellergebnisse LOPOS (RX.7-L)	246
5.5.4	Schlussfolgerungen zur Variation des konzeptuellen Modells für das Deckgebirge	249

5.6	Gasbildung bei maximaler CO ₂ -Bildung	251
5.6.1	Beschreibung und Definition	251
5.6.2	Modellergebnisse KAFKA (RX.13-K)	254
5.6.3	Modellergebnisse LOPOS (RX.13-L)	267
5.6.4	Schlussfolgerungen zum Einfluss der Gasbildung bei maximaler CO ₂ - Bildung	275
5.7	Variation der Radionuklid-Quellterme	277
5.7.1	Beschreibung und Definition	277
5.7.2	Modellergebnisse LOPOS (RX.9-oB)	278
5.7.3	Modellergebnisse LOPOS (RX.9-uB)	283
5.7.4	Schlussfolgerungen für Variation der Radionuklid-Quellterme	289
5.8	Szenario LsgMAW	290
5.8.1	Beschreibung und Definition des Szenarios	290
5.8.2	Konzeptuelles Modell für die Modellrechnungen zum Szenario LsgMAW ...	291
5.8.3	Anpassung bzw. Erweiterungen des Strukturmodells	294
5.8.4	Beschreibung der Varianten	296
5.8.5	Modellergebnisse KAFKA (RIX.1-K)	298
5.8.6	Modellergebnisse LOPOS (RIX.1-L)	309
5.8.7	Varianten des LsgMAW-Szenarios (RIX.2-K)	327
5.8.8	Modellergebnisse LOPOS (RIX.2-L)	338
5.8.9	Schlussfolgerungen für das Szenario LsgMAW	346
6	Schlussfolgerungen	347
6.1	Ergebnisse der Untersuchungen	348
6.1.1	Auswirkung der Berücksichtigung des Transports im Deckgebirge	349
6.1.2	Auswirkung des aktualisierten Quellterms	350
6.2	Zusätzliche Betrachtungen	351
6.2.1	Einfluss der Bandbreiten des Radionuklid-Quellterms	351
6.2.2	Alternative Modellvorstellung für das Deckgebirge	351
6.2.3	Einfluss einer hohen Gasbildung	352
6.2.4	Lösungszutritt in den MAW-Fasskegel	352
6.3	Zusammenfassende Ergebnisdarstellung	353
6.4	Gesamtschlussfolgerungen	354
	Literaturverzeichnis	357
	Anhang A Modellspezifische Umsetzung des alternativen Szenarios	
	LsgMAW	359
A.1	Modelltechnische Besonderheiten der Umsetzung in KAFKA	359
A.2	Modelltechnische Besonderheiten der Umsetzung in LOPOS	359

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Zeitliche Entwicklung von DpE (LAW2).....	9
Abb. 2.2	Zeitliche Entwicklung von DpE (LAW3).....	10
Abb. 2.3	Zeitliche Entwicklung von DpE (LAW4).....	11
Abb. 2.4	Schematische Darstellung der zeitlichen Entwicklung von $p_0(t)$	13
Abb. 2.5	Zusammenhang zwischen ausgepresster Lösungsmenge und Widerstand im Deckgebirge in DR13 und Parametrisierung in ALSA-C.....	14
Abb. 2.6	Zusammenhang zwischen ausgepresster Lösungsmenge und Widerstand im Deckgebirge in DR12 und Parametrisierung in ALSA-C.....	15
Abb. 2.7	Kafka-spezifische Modellsegmente des Strukturmodells des Deckgebirges	16
Abb. 2.8	Transferfunktionen für den Rechenfall DR13 und das Exfiltrationsgebiet im Taleinschnitt der Ammerbeek im verstürzten Deckgebirge.....	20
Abb. 2.9	Transferfunktionen für den Rechenfall DR13 und das Exfiltrationsgebiet im Taleinschnitt der Ammerbeek im Muschelkalk	20
Abb. 2.10	Transferfunktionen für den Rechenfall DR13 und das Exfiltrationsgebiet im Taleinschnitt des Rothebachs bei Wittmar.....	21
Abb. 2.11	Transferfunktionen für den Rechenfall DR12 und das Exfiltrationsgebiet im Taleinschnitt der Ammerbeek im verstürzten Deckgebirge.....	21
Abb. 2.12	Transferfunktionen für den Rechenfall DR12 und das Exfiltrationsgebiet im Taleinschnitt der Ammerbeek im Muschelkalk.....	22
Abb. 2.13	Transferfunktionen für den Rechenfall DR12 und das Exfiltrationsgebiet im Taleinschnitt des Rothebachs bei Wittmar.....	22
Abb. 3.1	Druckentwicklung in ausgewählten Bereichen des Grubengebäudes (Vergleichsfall)	28
Abb. 3.2	Lösungsflüsse aus dem Grubengebäude (Vergleichsfall).....	29
Abb. 3.3	Gasflüsse aus dem Grubengebäude (Vergleichsfall).....	30
Abb. 3.4	Lösungssättigung und –pegel in den LAW-ELB (Vergleichsfall).....	31
Abb. 3.5	Lösungsfluss aus dem ELB LAW1A bezogen auf das anfängliche Porenvolumen (Vergleichsfall)	32
Abb. 3.6	Lösungsfluss aus dem ELB LAW1B bezogen auf das anfängliche Porenvolumen (Vergleichsfall)	33
Abb. 3.7	Lösungsfluss aus dem ELB LAW2 bezogen auf das anfängliche Porenvolumen (Vergleichsfall)	33
Abb. 3.8	Lösungsfluss aus dem ELB LAW3 bezogen auf das anfängliche Porenvolumen (Vergleichsfall)	34
Abb. 3.9	Lösungsfluss aus dem ELB LAW4 bezogen auf das anfängliche Porenvolumen (Vergleichsfall)	34
Abb. 3.10	Lösungsabfluss aus und Zufluss zu LAW1A (Vergleichsfall).....	36
Abb. 3.11	Fluss der Tracer X und Y aus dem ELB LAW1A (Vergleichsfall).....	37
Abb. 3.12	Lösungsabfluss aus und Zufluss zu LAW1B (Vergleichsfall).....	38
Abb. 3.13	Fluss der Tracer X und Y aus dem ELB LAW1B (Vergleichsfall).....	39
Abb. 3.14	Lösungsabfluss aus und Zufluss zu LAW2 (Vergleichsfall)	40
Abb. 3.15	Fluss der Tracer X und Y aus dem ELB LAW2 (Vergleichsfall).....	41
Abb. 3.16	Lösungsabfluss aus und Zufluss zu LAW3 (Vergleichsfall)	42
Abb. 3.17	Fluss der Tracer X und Y aus dem ELB LAW3 (Vergleichsfall).....	43
Abb. 3.18	Lösungsabfluss aus und Zufluss zu LAW4 (Vergleichsfall)	44
Abb. 3.19	Fluss der Tracer X und Y aus dem ELB LAW4 (Vergleichsfall).....	45
Abb. 3.20	Tracerkonzentrationen XLAW1A und YLAW1A in der Südflanke (Vergleichsfall)	46
Abb. 3.21	Tracerkonzentrationen XLAW1B und YLAW1B in der Südflanke (Vergleichsfall)	47

Abb. 3.22	Tracerkonzentrationen XLAW2 und YLAW2 in der Südflanke (Vergleichsfall)	48
Abb. 3.23	Tracerkonzentrationen XLAW3 und YLAW3 in der Südflanke (Vergleichsfall)	49
Abb. 3.24	Tracerkonzentrationen XLAW4 und YLAW4 in der Südflanke (Vergleichsfall)	50
Abb. 3.25	Fluss der Tracer XELB und YELB über die DG500 und DG574 (Vergleichsfall)	51
Abb. 3.26	Fluss der Tracer XELB und YELB über die Schnittstelle zum Deckgebirge (Vergleichsfall)	52
Abb. 3.27	Konzentration der Tracer XELB und YELB im Rötanhydrit (Vergleichsfall)	53
Abb. 3.28	Konzentrationen der Tracer aus LAW1A nach dem Übertritt in das Deckgebirge (RA2) und in den drei Expositionsgebieten (Rechenfall RX.1-K)	55
Abb. 3.29	Konzentrationen der Tracer aus LAW1B nach dem Übertritt in das Deckgebirge (RA2) und in den drei Exfiltrationsgebieten (Rechenfall RX.1-K)	55
Abb. 3.30	Konzentrationen der Tracer aus LAW2 nach dem Übertritt in das Deckgebirge (RA2) und in den drei Exfiltrationsgebieten (Rechenfall RX.1-K)	56
Abb. 3.31	Konzentrationen der Tracer aus LAW3 nach dem Übertritt in das Deckgebirge (RA2) und in den drei Exfiltrationsgebieten (Rechenfall RX.1-K)	56
Abb. 3.32	Konzentrationen der Tracer aus LAW4 nach dem Übertritt in das Deckgebirge (RA2) und in den drei Exfiltrationsgebieten (Rechenfall RX.1-K)	57
Abb. 3.33	Gesamtverdünnung der Tracer im Gruben- und im Deckgebirge bis in das Exfiltrationsgebiet m-Witt (Rechenfall RX.1-K).....	58
Abb. 3.34	Lösungsströme aus der Grube (Vergleichsfall).....	60
Abb. 3.35	Kumulierte Lösungsströme aus der Grube (Vergleichsfall).....	60
Abb. 3.36	Radionuklidströme von Ra-226 aus LAW1A (Vergleichsfall)	62
Abb. 3.37	Radionuklidströme von Ra-226 zu LAW1A (Vergleichsfall)	63
Abb. 3.38	Radionuklidströme von Ra-226 aus LAW1B (Vergleichsfall)	63
Abb. 3.39	Radionuklidströme von Ra-226 zu LAW1B (Vergleichsfall)	64
Abb. 3.40	Radionuklidströme von Ra-226 aus LAW2 (Vergleichsfall)	64
Abb. 3.41	Radionuklidströme von Ra-226 zu LAW2 (Vergleichsfall)	65
Abb. 3.42	Radionuklidströme von Ra-226 aus LAW3 (Vergleichsfall)	65
Abb. 3.43	Radionuklidströme von Ra-226 zu LAW3 (Vergleichsfall)	66
Abb. 3.44	Radionuklidströme von Ra-226 aus LAW4 (Vergleichsfall)	66
Abb. 3.45	Radionuklidströme von Ra-226 zu LAW4 (Vergleichsfall)	67
Abb. 3.46	Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW1A (Vergleichsfall)	67
Abb. 3.47	Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW1A (Vergleichsfall)	68
Abb. 3.48	Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW1B (Vergleichsfall)	68
Abb. 3.49	Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW1B (Vergleichsfall)	69
Abb. 3.50	Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW2 (Vergleichsfall).....	69
Abb. 3.51	Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW2 (Vergleichsfall).....	70
Abb. 3.52	Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW3 (Vergleichsfall).....	70
Abb. 3.53	Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW3 (Vergleichsfall vs)	71
Abb. 3.54	Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW4 (Vergleichsfall).....	71
Abb. 3.55	Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW4 (Vergleichsfall).....	72
Abb. 3.56	Konzentration von Am-241 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (Vergleichsfall)	73
Abb. 3.57	Konzentration von Am-241 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (Vergleichsfall)	73

Abb. 3.58	Konzentration von Ra-226 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (Vergleichsfall)	74
Abb. 3.59	Konzentration von Ra-226 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (Vergleichsfall)	74
Abb. 3.60	Konzentration von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (Vergleichsfall)	75
Abb. 3.61	Konzentration von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (Vergleichsfall)	75
Abb. 3.62	Radionuklidkonzentrationen an der Austrittsstelle in 500 m Teufe (Vergleichsfall)	76
Abb. 3.63	Radionuklidkonzentrationen an der Austrittsstelle in 574 m Teufe (Vergleichsfall)	77
Abb. 3.64	Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube (Vergleichsfall).....	77
Abb. 3.65	Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells.....	79
Abb. 3.66	Potenzielle Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete im Vergleich zum früheren ‚Verdünnungsmodell‘ (lineare Darstellung).....	79
Abb. 3.67	Radionuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘	80
Abb. 3.68	Radionuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘	81
Abb. 3.69	Radionuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘	81
Abb. 3.70	ELB-Beiträge Am-241 zur Strahlenexposition im Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘	83
Abb. 3.71	ELB-Beiträge Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘	84
Abb. 3.72	ELB-Beiträge Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘	85
Abb. 3.73	Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für das ‚Verdünnungsmodell‘ und für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells mit den Transferfunktionen zum Deckgebirgsrechenfall DR13 (Vergleichsfall RX.1-L)	88
Abb. 4.1	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Referenzfall)	92
Abb. 4.2	Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (Referenzfall)	93
Abb. 4.3	ELB-Beiträge eingelagertes Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (Referenzfall)	94
Abb. 4.4	ELB-Beiträge eingelagertes Ra-226 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (Referenzfall)	94
Abb. 4.5	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (SchnMob)	97
Abb. 4.6	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (LangsMob)	98
Abb. 4.7	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (FrühMilw).....	100
Abb. 4.8	Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (FrühMilw)	101
Abb. 4.9	ELB-Beiträge des eingelagerten Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (FrühMilw)	102
Abb. 4.10	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Am-opt).....	104
Abb. 4.11	Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (Am-opt)	105
Abb. 4.12	Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (Am-opt)	105
Abb. 4.13	Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (Am-opt)	106

Abb. 4.14	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (SFKan80%)	107
Abb. 4.15	Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (SFKan80%) ...	108
Abb. 4.16	Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (SFKan80%)	109
Abb. 4.17	Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (SFKan80%)	109
Abb. 4.18	ELB-Beiträge eingelagertes Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (SFKan80%)	110
Abb. 4.19	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (SFKan20%)	112
Abb. 4.20	Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (SFKan20%) ...	112
Abb. 4.21	Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (SFKan20%)	113
Abb. 4.22	Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (SFKan20%)	113
Abb. 4.23	ELB-Beiträge eingelagertes Am-241 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (SFKan20%) ...	115
Abb. 4.24	ELB-Beiträge eingelagertes Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (SFKan20%)	116
Abb. 4.25	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (OhneDG574) ...	118
Abb. 4.26	Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (OhneDG574).....	119
Abb. 4.27	Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (OhneDG574)	120
Abb. 4.28	Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (OhneDG574)	120
Abb. 4.29	ELB-Beiträge eingelagertes Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (OhneDG574)	121
Abb. 4.30	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (GIAustritt)	123
Abb. 4.31	Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (GIAustritt).....	124
Abb. 4.32	Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (GIAustritt).....	124
Abb. 4.33	Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (GIAustritt).....	125
Abb. 4.34	ELB-Beiträge eingelagertes Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (GIAustritt).....	126
Abb. 4.35	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Höhere Gasbildung).....	128
Abb. 4.36	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Stärkere Gasspeicherung).....	130
Abb. 4.37	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (höhere Schwebeporositäten).....	131
Abb. 4.38	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (höhere Schwebeporositäten).....	133
Abb. 4.39	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (erhöhte Versatzporosität)	135
Abb. 4.40	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (erhöhte Transmissivität der Auflockerungszone am Südstoß des Baufeldes in der Südflanke).....	136
Abb. 4.41	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (vergrößerte Austrittsfläche ins Deckgebirge).....	138

Abb. 4.42	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (asymmetrische Konvergenz des Baufeldes in der Südflanke).....	140
Abb. 4.43	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (geringer ausgedehnte Feuchtezone im Salinar)	141
Abb. 4.44	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (geringerer Strömungswiderstand im Deckgebirge)	143
Abb. 4.45	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (erhöhter effektiver Gesteinsdruck)	144
Abb. 4.46	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (maximal ausgedehnte Feuchtezone im Salinar)	146
Abb. 4.47	Übersicht der berechneten globalen Maxima der Strahlenexposition vs. frühere Ergebnisse.....	150
Abb. 5.1	Lösungssättigung und –pegel in den LAW-ELB (RX.2-K).....	158
Abb. 5.2	Lösungsfluss aus dem ELB LAW1A bezogen auf das anfängliche Porenvolumen (RX.2-K).....	159
Abb. 5.3	Lösungsfluss aus dem ELB LAW1B bezogen auf das anfängliche Porenvolumen (RX.2-K).....	159
Abb. 5.4	Lösungsfluss aus dem ELB LAW4 bezogen auf das anfängliche Porenvolumen (RX.2-K).....	160
Abb. 5.5	Tracerflüsse beim Übertritt in das Deckgebirge (RX.2-K).....	161
Abb. 5.6	Tracerkonzentration im Rötanhydrit (RX.2-K).....	162
Abb. 5.7	X-Tracerkonzentration für die Exfiltrationsgebiete des Deckgebirges (RX.2-K)	164
Abb. 5.8	Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW1A (RX.2).....	165
Abb. 5.9	Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW1B (RX.2).....	166
Abb. 5.10	Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW4 (RX.2)	166
Abb. 5.11	Konzentration von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (RX.2).....	167
Abb. 5.12	Konzentration von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (RX.2).....	168
Abb. 5.13	Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube (RX.2)	169
Abb. 5.14	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (RX.2)	170
Abb. 5.15	Lösungspegel in den oberen Bereichen des Baufeldes in der Südflanke in RX.3-K.....	172
Abb. 5.16	Gas- und Lösungsflüsse aus dem Grubengebäude und im Deckgebirge in RX.3-K.....	173
Abb. 5.17	X-Tracerkonzentrationen für die Exfiltrationsgebiete im Deckgebirge in RX.3-K.....	175
Abb. 5.18	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (RX.3)	177
Abb. 5.19	Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (RX.4).....	185
Abb. 5.20	Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (RX.4).....	186
Abb. 5.21	Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube (RX.4)	187
Abb. 5.22	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (RX.4)	188
Abb. 5.23	Lösungssättigung und –pegel in den LAW-ELB (RX.5-K).....	192
Abb. 5.24	Lösungs- und Gasflüsse aus dem Grubengebäude in RX.5-K im Vergleich zu RX.1-K und zum Referenzfall.....	193
Abb. 5.25	Lösungsfluss aus dem ELB LAW1A bezogen auf das anfängliche Porenvolumen in RX.5-K.....	194
Abb. 5.26	Lösungsfluss aus dem ELB LAW1B bezogen auf das anfängliche Porenvolumen in RX.5-K.....	195
Abb. 5.27	Lösungsfluss aus dem ELB LAW4 bezogen auf das anfängliche Porenvolumen in RX.5-K.....	195
Abb. 5.28	Lösungsabfluss aus und Zufluss zu LAW1A in RX.5-K	196

Abb. 5.29	Tracerabfluss aus dem ELB LAW1A in RX.5-K	197
Abb. 5.30	Lösungsabfluss aus und Zufluss zu LAW1B in RX.5-K	198
Abb. 5.31	Tracerabfluss aus dem ELB LAW1B in RX.5-K	199
Abb. 5.32	Lösungsabfluss aus und Zufluss zu LAW4 in RX.5-K.....	200
Abb. 5.33	Tracerabfluss aus dem ELB LAW4 in RX.5-K.....	201
Abb. 5.34	Tracerkonzentrationen XLAW1A und YLAW1A in der Südflanke in RX.5-K.....	202
Abb. 5.35	Tracerkonzentrationen XLAW1B und YLAW1B in der Südflanke in RX.5-K.....	203
Abb. 5.36	Tracerkonzentrationen XLAW4 und YLAW4 in der Südflanke in RX.5-K	204
Abb. 5.37	Tracerübertritt in das Deckgebirge an den beiden Modell-Schnittstellen in RX.5-K.....	205
Abb. 5.38	Konzentrationsänderung der Tracer im Rötanhydrit in RX.5-K.....	206
Abb. 5.39	X-Tracerkonzentrationen in den drei Exfiltrationsgebieten in RX.5-K.....	208
Abb. 5.40	Y-Tracerkonzentrationen in den drei Exfiltrationsgebieten in RX.5-K.....	209
Abb. 5.41	Gesamtverdünnung der Tracer im Gruben- und im Deckgebirge bis zum Exfiltrationsgebiet m-Witt (Variante RX.5-K)	211
Abb. 5.42	Elementkonzentrationen in LAW1A (RX.5)	213
Abb. 5.43	Elementkonzentrationen in LAW1B (RX.5)	213
Abb. 5.44	Elementkonzentrationen in LAW2 (RX.5)	214
Abb. 5.45	Elementkonzentrationen in LAW3-O (RX.5)	214
Abb. 5.46	Elementkonzentrationen in LAW3-W (RX.5).....	215
Abb. 5.47	Elementkonzentrationen in LAW4-O (RX.5)	215
Abb. 5.48	Elementkonzentrationen in LAW4-W (RX.5).....	216
Abb. 5.49	Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW1A (RX.5).....	218
Abb. 5.50	Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW1A (RX.5).....	218
Abb. 5.51	Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW1B (RX.5).....	219
Abb. 5.52	Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW1B (RX.5).....	219
Abb. 5.53	Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW2 (RX.5)	220
Abb. 5.54	Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW2 (RX.5)	220
Abb. 5.55	Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW3 (RX.5)	221
Abb. 5.56	Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW3 (RX.5)	221
Abb. 5.57	Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW4 (RX.5)	222
Abb. 5.58	Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW4 (RX.5)	222
Abb. 5.59	Konzentrationen von Am-241 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (RX.5).....	223
Abb. 5.60	Konzentrationen von Am-241 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (RX.5).....	223
Abb. 5.61	Konzentrationen von Ra-226 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (RX.5).....	224
Abb. 5.62	Konzentrationen von Ra-226 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (RX.5).....	224
Abb. 5.63	Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (RX.5).....	225
Abb. 5.64	Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (RX.5).....	225
Abb. 5.65	Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube (RX.5)	226
Abb. 5.66	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (RX.5)	227
Abb. 5.67	Radionuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (RX.5).....	228
Abb. 5.68	Radionuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (RX.5).....	229
Abb. 5.69	Radionuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (RX.5).....	229

Abb. 5.70	ELB-Beiträge Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ,verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek’	231
Abb. 5.71	ELB-Beiträge Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ,Muschelkalk – Ammerbeek’	232
Abb. 5.72	ELB-Beiträge Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ,Muschelkalk – Wittmar’	233
Abb. 5.73	Lösungsabfluss ins Deckgebirge in RX.7-K.....	236
Abb. 5.74	Gasabfluss ins Deckgebirge in RX.7-K.....	237
Abb. 5.75	Druckentwicklung in ausgewählten Modellbereichen, Variante RX.7-K.....	238
Abb. 5.76	Tracerübertritt in das Deckgebirge an den beiden Modell-Schnittstellen in RX.7-K.....	240
Abb. 5.77	Konzentrationsänderung der Tracer im Rötanhydrit in RX.7-K.....	241
Abb. 5.78	X-Tracerkonzentrationen für die drei Exfiltrationsgebiete in RX.7-K.....	244
Abb. 5.79	Gesamtverdünnung der Tracer im Grubengebäude und im Deckgebirge für die Exfiltrationsgebiete m-Witt und vD-Amm: Variante RX.7-K	245
Abb. 5.80	Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube (RX.7)	247
Abb. 5.81	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (RX.7)	248
Abb. 5.82	Gasbildung ISTec 2005 und Parametrisierung in KAFKA für RX.13-K.....	252
Abb. 5.83	Beste Annäherung der für den Rechenfall RX.13 vorgegebenen Gasbildung	253
Abb. 5.84	Lösungssättigung und –pegel in den LAW-ELB (RX.13-K).....	255
Abb. 5.85	Druckentwicklung in ausgewählten Modellbereichen, Variante RX.13-K.....	257
Abb. 5.86	Lösungsabfluss ins Deckgebirge und Gasabfluss ins Deckgebirge in RX.13-K.....	258
Abb. 5.87	Lösungsfluss aus dem ELB LAW1A bezogen auf das anfängliche Porenvolumen in RX.13-K.....	259
Abb. 5.88	Lösungsfluss aus dem ELB LAW1B bezogen auf das anfängliche Porenvolumen in RX.13-K.....	260
Abb. 5.89	Lösungsfluss aus dem ELB LAW2 bezogen auf das anfängliche Porenvolumen in RX.13-K.....	260
Abb. 5.90	Lösungsfluss aus dem ELB LAW3 bezogen auf das anfängliche Porenvolumen in RX.13-K.....	261
Abb. 5.91	Lösungsfluss aus dem ELB LAW4 bezogen auf das anfängliche Porenvolumen in RX.13-K.....	261
Abb. 5.92	Tracerübertritt in das Deckgebirge an den beiden Modell-Schnittstellen: RX.13-K.....	263
Abb. 5.93	Konzentrationsänderung der Tracer im Rötanhydrit: RX.13-K.....	264
Abb. 5.94	X-Tracerkonzentrationen für die drei Exfiltrationsgebiete: RX.13-K.....	266
Abb. 5.95	Gesamtverdünnung der Tracer im Grubengebäude und im Deckgebirge für die Exfiltrationsgebiete m-Witt, Variante RX.13-K	267
Abb. 5.96	Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW1A (RX.13).....	269
Abb. 5.97	Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW1A (RX.13).....	269
Abb. 5.98	Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW1B (RX.13).....	270
Abb. 5.99	Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (RX.13).....	271
Abb. 5.100	Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (RX.13).....	271
Abb. 5.101	Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube (RX.13)	272
Abb. 5.102	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (RX.13)	273
Abb. 5.103	Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (RX.9-oB)	279
Abb. 5.104	Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (RX.9-oB)	280
Abb. 5.105	Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube (RX.9-oB).....	281
Abb. 5.106	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (RX.9-oB).....	281

Abb. 5.107	Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (RX.9-uB)	285
Abb. 5.108	Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (RX.9-uB)	285
Abb. 5.109	Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube aus der Grube (RX.9-uB).....	286
Abb. 5.110	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (RX.9-uB).....	287
Abb. 5.111	Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (RX.9-oB, kombinierte Variante RX.5 und RX.9-uB)	290
Abb. 5.112	Unterteilung der Modellkammer UMAW (Abbau 8a/ und 8b/532) und Anschlüsse für die Modellierung der Ausbreitung von Tracern und Radionukliden aus dem MAW-Fasskegel bei Lösungszutritt	293
Abb. 5.113	Gasbildung in der MAW in den beiden betrachteten Varianten (RIX.1, RIX.2)	297
Abb. 5.114	Relative Lösungsspiegelhöhe in ausgewählten Modellkammern der Abbaue 8a/532 und 8b/532 sowie der MAW-Kammer: Rechenfall RIX.1-K.....	299
Abb. 5.115	Gasfluss aus der MAW-Modellkammer, sowie kumulierter Gasfluss: Rechenfall RIX.1-K.....	300
Abb. 5.116	Lösungsfluss aus der MAW-Modellkammer, sowie kumulierter Lösungsfluss: Rechenfall RIX.1-K.....	300
Abb. 5.117	Fluss des Tracers XMAW im Nahbereich der MAW, im Baufeld in der Südflanke und im Deckgebirge; sowie kumulierter Tracerfluss: Rechenfall RIX.1-K.....	302
Abb. 5.118	Fluss des Tracers YMAW im Nahbereich der MAW, im Baufeld in der Südflanke und im Deckgebirge; sowie kumulierter Tracerfluss: Rechenfall RIX.1-K.....	303
Abb. 5.119	Konzentration des Tracers XMAW im Nahbereich der MAW, im Baufeld in der Südflanke und im Deckgebirge, normiert auf die anfängliche, maximale Konzentration in der MAW: Rechenfall RIX.1-K	305
Abb. 5.120	Konzentration des Tracers YMAW im Nahbereich der MAW, im Baufeld in der Südflanke und im Deckgebirge: Rechenfall RIX.1-K.....	305
Abb. 5.121	XMAW-Tracerkonzentration für die drei Exfiltrationsgebiete: Rechenfall RIX.1-K.....	307
Abb. 5.122	YMAW-Tracerkonzentration für die drei Exfiltrationsgebiete: Rechenfall RIX.1-K.....	307
Abb. 5.123	Gesamtverdünnung der Tracer aus MAW im Grubengebäude und im Deckgebirge für das Exfiltrationsgebiet m-Witt: Rechenfall RIX.1-K.....	308
Abb. 5.124	Volumina in MAW-Z, RIX.1-L (Variante 115 m3)	310
Abb. 5.125	Zeitliche Entwicklung der Gasvolumina, RIX.1-L (Variante 115 m3)	311
Abb. 5.126	Lösungsfluss aus der MAW-Kammer. RIX.1-L (Variante 115 m3).....	312
Abb. 5.127	Am-241-Fluss im MAW-Nahbereich, RIX.1-L (Variante 115 m3).....	313
Abb. 5.128	Am-241-Konzentrationen im MAW-Nahbereich, RIX.1-L (Variante 115 m3)	314
Abb. 5.129	Pu-239-Konzentrationen im MAW-Nahbereich, RIX.1-L (Variante 115 m3)	314
Abb. 5.130	Am-241-Inventare im MAW-Nahbereich, RIX.1-L (Variante 115 m3)	315
Abb. 5.131	Summen der jährlichen Strahlenexpositionen: RIX.1-L (Variante 115 m3)...	316
Abb. 5.132	Jährliche Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet vD-Amm, RIX.1-L (Variante 115 m3)	316
Abb. 5.133	Jährliche Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet m-Witt, RIX.1-L (Variante 115 m3)	317
Abb. 5.134	Jährliche Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet m-Amm, RIX.1-L (Variante 115 m3)	317
Abb. 5.135	Jährliche Strahlenexpositionen gemäß dem Verdünnungsmodell im Vergleich zum Referenzfall aus dem Schlussbericht 2005	318

Abb. 5.136	Volumina in MAW-Z, RIX.1-L (Variante 30 m3)	320
Abb. 5.137	Zeitliche Entwicklung der gebildeten Gasvolumina, RIX.1-L (Variante 30 m3)	321
Abb. 5.138	Lösungsfluss aus der MAW-Kammer, RIX.1-L (Variante 30 m3).....	321
Abb. 5.139	Sr-90-Fluss. Durchgezogen: Variante mit 115 m3 Lösung: RIX.1-L	322
Abb. 5.140	Th-230-Fluss. Durchgezogen: Variante mit 115 m3 Lösung: RIX.1-L	323
Abb. 5.141	Am-241-Konzentration im MAW-Nahbereich. Variante mit 115 m3 Lösung: RIX.1-L	324
Abb. 5.142	Am-241-Konzentration im Baufeld in der Südflanke. Variante mit 115 m3 Lösung: RIX.1-L	324
Abb. 5.143	Th-230-Konzentration im MAW-Nahbereich. Variante mit 115 m3 Lösung: RIX.1-L	325
Abb. 5.144	Th-230-Konzentration im Baufeld in der Südflanke. Variante mit 115 m3 Lösung: RIX.1-L	325
Abb. 5.145	Summen der jährlichen Strahlenexpositionen: RIX.1-L (Variante 30 m3).....	326
Abb. 5.146	Relative Lösungsspiegelhöhe in ausgewählten Modellkammern der Abbaue 8a/532 und 8b/532 sowie der MAW-Kammer: Variante RIX.2-K.....	328
Abb. 5.147	Gasabfluss aus der MAW-Modellkammer, sowie kumulierter Gasabfluss: Variante RIX.2-K	328
Abb. 5.148	Lösungsfluss aus der MAW-Modellkammer, sowie kumulierter Lösungsfluss: Variante RIX.2-K	329
Abb. 5.149	Fluss des Tracers XMAW im Nahbereich der MAW, im Baufeld in der Südflanke und im Deckgebirge; sowie kumulierter Tracerfluss: Variante RIX.2-K.....	330
Abb. 5.150	Fluss des Tracers YMAW im Nahbereich der MAW, im Baufeld in der Südflanke und im Deckgebirge; sowie kumulierter Tracerfluss: Variante RIX.2-K.....	331
Abb. 5.151	Fluss der Tracer aus der MAW in das Deckgebirge: Variante RIX.2-K	333
Abb. 5.152	Auf die jeweilige maximale Konzentration in der MAW normierte Konzentration der Tracer im Deckgebirge (Modellsegment RA2): Variante RIX.2-K	333
Abb. 5.153	XMAW-Tracerkonzentration für die drei Exfiltrationsgebiete: Variante RIX.2-K.....	335
Abb. 5.154	YMAW-Tracerkonzentration für die drei Exfiltrationsgebiete: Variante RIX.2-K.....	336
Abb. 5.155	Gesamtverdünnung der Tracer aus MAW im Gruben- und im Deckgebirge für die Exfiltrationsgebiete m-Witt und vD-Amm: Variante RIX.2-K.....	337
Abb. 5.156	Volumina in MAW-Z: RIX.2-L	339
Abb. 5.157	Zeitliche Entwicklung der gebildeten Gasspeichervolumina: RIX.2-L	340
Abb. 5.158	Lösungsfluss aus der MAW-Kammer, RIX.2-L	340
Abb. 5.159	Sr-90-Fluss in RIX.2-L.....	341
Abb. 5.160	Th-230-Fluss in RIX.2-L	342
Abb. 5.161	Am-241-Konzentration in RIX.2-L. MAW-Nahbereich	343
Abb. 5.162	Am-241-Konzentration in RIX.2-L. Baufeld in der Südflanke	343
Abb. 5.163	Th-230-Konzentration in RIX.2-L. MAW-Nahbereich	344
Abb. 5.164	Th-230-Konzentration in RIX.2-L. Baufeld in der Südflanke	344
Abb. 5.165	Vergleich der jährlichen Strahlenexpositionen für drei Exfiltrationsgebiete: RIX.2-L.....	345
Abb. 6.1	Übersicht der berechneten globalen Maxima der Strahlenexposition.....	353
Abb. A.1	Gasbildung in MAW gemäß anaerob-feuchten Bedingungen. Bandbreite nach [ISTec 2005]	360
Abb. A.2	Mobilisierungsmodell.....	361
Abb. A.3	Anteil des mobilisierten Inventars gemäß Rechenfall RIX.1-L	362

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1	Aktualisierte Modellannahmen	2
Tab. 1.2	Betrachtete Varianten	4
Tab. 2.1	Parameter des Deckgebirgswiderstandes entsprechend DR13	16
Tab. 2.2	Parameter des Deckgebirgswiderstandes entsprechend DR12	16
Tab. 2.3	Normierte Dosiskonversionsfaktoren für Erwachsene bei Nutzung von radionuklidhaltigem Oberflächenwasser	25
Tab. 3.1	Vergleich der Maxima der Flüsse und der Konzentrationen der X-Tracer: zum Referenzfall	54
Tab. 3.2	Erreichen und Unterschreiten der maximal möglichen Konzentrationen	61
Tab. 3.3	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete	82
Tab. 3.4	Beiträge zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ am Zeitpunkt des vom jeweiligen Radionuklid verursachten Maximums (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)	83
Tab. 3.5	Beiträge zur Strahlenexposition im Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ am Zeitpunkt des vom jeweiligen Radionuklid verursachten Maximums (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)	84
Tab. 3.6	Beiträge zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ am Zeitpunkt des vom jeweiligen Radionuklid verursachten Maximums (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)	85
Tab. 4.1	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Referenzfall)	92
Tab. 4.2	ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘	95
Tab. 4.3	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante SchnMob)	97
Tab. 4.4	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante LangsMob)	99
Tab. 4.5	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante FrühMilw)	100
Tab. 4.6	ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘	102
Tab. 4.7	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Szenario Am-opt)	104
Tab. 4.8	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante SFKan80%)	108
Tab. 4.9	ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘	111
Tab. 4.10	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante SFKan20%)	114
Tab. 4.11	ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘	115
Tab. 4.12	ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘	117
Tab. 4.13	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Szenario OhneDG574)	119

Tab. 4.14	ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘	122
Tab. 4.15	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante GIAustritt).....	123
Tab. 4.16	ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘	126
Tab. 4.17	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit höherer Gasbildung).....	129
Tab. 4.18	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit stärkerer Gasspeicherung).....	130
Tab. 4.19	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit erhöhten Permeabilitäten der Schweben und der aufgelockerten Pfeiler im Nahbereich).....	132
Tab. 4.20	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit geringeren Permeabilitäten der Schweben und der aufgelockerten Pfeiler im Nahbereich).....	134
Tab. 4.21	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit erhöhter Versatzpermeabilität)	135
Tab. 4.22	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit erhöhter Transmissivität der Auflockerungszone am Südstoß des Baufeldes in der Südflanke).....	137
Tab. 4.23	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit vergrößerter Austrittsfläche ins Deckgebirge).....	138
Tab. 4.24	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit asymmetrischer Konvergenz des Baufeldes in der Südflanke).....	140
Tab. 4.25	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit geringer ausgedehnter Feuchtezone im Salinar)	142
Tab. 4.26	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit geringerem Strömungswiderstand im Deckgebirge)	143
Tab. 4.27	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit erhöhtem effektiven Gesteinsdruck).....	145
Tab. 4.28	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit maximal ausgedehnter Feuchtezone im Salinar)	146
Tab. 4.29	Übersicht und Vergleich der globalen Maxima der Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete (Deckgebirgsrechenfall DR13) für LOPOS-Modellrechnungen im Schlussbericht 2005 sowie ausgewählten Rechenfällen aus [ALSA-C 2005b]	147
Tab. 4.30	Revidierte Übersicht der Ergebnisse der Unsicherheitsbetrachtungen im Schlussbericht 2005.....	151

Tab. 5.1	Vergleich der Konzentrationsänderungen und der Maxima der Flüsse der X-Tracer zum Vergleichsfall	163
Tab. 5.2	Größen und Zeitpunkte der Strahlenexpositionsmaxima für den Rechenfall RX.2 im Vergleich zum Vergleichsfall	169
Tab. 5.3	Vergleich der Konzentrationsänderungen und der Maxima der Flüsse der X-Tracer zum Vergleichsfall	174
Tab. 5.4	Größen und Zeitpunkte der Strahlenexpositionsmaxima für den Rechenfall RX.3 im Vergleich zum Vergleichsfall	177
Tab. 5.5	Aktualisierte maximal mögliche Elementkonzentrationen [mol/(kg H ₂ O)] in den Einlagerungsbereichen nach [ALSA-C 2005b]	182
Tab. 5.6	Erreichen und Unterschreiten der maximal möglichen Konzentrationen	184
Tab. 5.7	Größen und Zeitpunkte der Strahlenexpositionsmaxima für den Rechenfall RX.4 im Vergleich zum Vergleichsfall	187
Tab. 5.8	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete	189
Tab. 5.9	Vergleich der Konzentrationsänderungen und der Maxima der Flüsse der X-Tracer zum Vergleichsfall	207
Tab. 5.10	Vergleich der maximalen Konzentrationen der X-Tracer für die Exfiltrationsgebiete vD-Amm, m-Amm und m-Witt: Variante RX.5-K und Vergleichsfall RX.1-K (deutliche Unterschiede hervorgehoben)	210
Tab. 5.11	Erreichen und Unterschreiten der maximal möglichen Konzentrationen	217
Tab. 5.12	Größen und Zeitpunkte der Strahlenexpositionsmaxima für den Rechenfall RX.5 im Vergleich zum Vergleichsfall	228
Tab. 5.13	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete	230
Tab. 5.14	ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)	231
Tab. 5.15	ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)	232
Tab. 5.16	ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)	233
Tab. 5.17	Vergleich der Konzentrationsänderungen und der Maxima der Flüsse der X-Tracer zur kombinierten Variante	242
Tab. 5.18	Vergleich der maximalen Konzentrationen der X-Tracer für die Exfiltrationsgebiete vD-Amm, m-Amm und m-Witt: Variante RX.7-K und kombinierte Variante RX.5-K	243
Tab. 5.19	Vergleich der minimalen Gesamtverdünnung im Grubengebäude und Deckgebirge: Variante RX.7-K und kombinierte Variante RX.5-K für das Exfiltrationsgebiet m-Witt (Gebiet mit der größten Tracerkonzentration)	246
Tab. 5.20	Größen und Zeitpunkte der Strahlenexpositionsmaxima für den Rechenfall RX.7 im Vergleich zur kombinierten Variante	248
Tab. 5.21	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete	249
Tab. 5.22	Parameter der Gasbildung in KAFKA in der Variante RX.13-K	252
Tab. 5.23	Modellstoffmengen, -Gasbildungs – und -Stoffumsetzungsraten in LOPOS in der Variante RX.13-L	254
Tab. 5.24	Parametrisierung der erhöhten effektiven residualen Gassättigung in den ELB und großen Kammern: Variante RX.13-K	256

Tab. 5.25	Gasfließpfade aus den LAW-ELB und Zeitpunkte ihrer Aktivierung: Variante RX.13-K	256
Tab. 5.26	Vergleich der Konzentrationsänderungen und der Maxima der Flüsse der X-Tracer zur kombinierten Variante	265
Tab. 5.27	Erreichen und Unterschreiten der maximal möglichen Konzentrationen	268
Tab. 5.28	Größen und Zeitpunkte der Strahlenexpositionsmaxima für den Rechenfall RX.13 im Vergleich zur kombinierten Variante	273
Tab. 5.29	Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete	274
Tab. 5.30	ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für die Exfiltrationsgebiete	275
Tab. 5.31	Bandbreite der maximal möglichen Elementkonzentrationen in den LAW-Einlagerungsbereichen nach [ALSA-C 2005b]	277
Tab. 5.32	Erreichen und Unterschreiten der maximal möglichen Konzentrationen	278
Tab. 5.33	Größen und Zeitpunkte der Strahlenexpositionsmaxima für den Rechengang RX.9-oB im Vergleich zur kombinierten Variante	282
Tab. 5.34	ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Pu-239 für die Exfiltrationsgebiete	283
Tab. 5.35	Erreichen und Unterschreiten der maximal möglichen Konzentrationen	284
Tab. 5.36	Größen und Zeitpunkte der Strahlenexpositionsmaxima für den Rechengang RX.9-uB im Vergleich zur kombinierten Variante	287
Tab. 5.37	ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Pu-239 für die Exfiltrationsgebiete	289
Tab. 5.38	Strukturelemente des Nahbereiches der MAW	295
Tab. 5.39	Permeabilität, Konvergenzparameter und Gaseindringdrücke der abgebildeten Modell-Strecken	296
Tab. 5.40	Parametrisierung der effektiven residualen Gasspeicher in den Modellkammern, welche die Abbau 8a/532 und 8b/532 abbilden: Rechenfall RIX.1-K	298
Tab. 5.41	Vergleich der Maxima der Flüsse der X- und Y-Tracer: Aus dem MAW- Nahbereich in das Baufeld in der Südflanke und im Übertritt in das Deckgebirge, Rechenfall RIX.1-K	303
Tab. 5.42	Vergleich der Maxima der Konzentrationen des Tracers XMAW im Nahbereich der MAW und im Baufeld in der Südflanke (normiert auf die anfängliche, maximale Konzentration in der MAW): Rechenfall RIX.1-K	306
Tab. 5.43	Vergleich der minimalen Gesamtverdünnung der Tracer aus der MAW im Grubengebäude und Deckgebirge: Rechenfall RIX.1-K	308
Tab. 5.44	Vergleich der Maxima der Flüsse der X- und Y-Tracer: Aus dem MAW- Nahbereich in das Baufeld in der Südflanke und im Übertritt in das Deckgebirge, Variante RIX.2-K (zum Vergleich: Werte aus RIX.1-K)	332
Tab. 5.45	Vergleich der Maxima der Konzentrationen des Tracers XMAW im Nahbereich der MAW und im Baufeld in der Südflanke (normiert auf die anfängliche, maximale Konzentration in der MAW): Variante RIX.2-K	334
Tab. 5.46	Vergleich der minimalen Gesamtverdünnung der Tracer aus der MAW im Grubengebäude und Deckgebirge: Variante RIX.2-K	336
Tab. 6.1:	Berechnete Maxima der potenziellen Strahlenexpositionen für die drei Exfiltrationsgebiete in Sv/a	349
Tab. A.1	Massen Gas bildender Stoffe in der MAW-Kammer (LOPOS)	360
Tab. A.2	Maximale Elementkonzentrationen in der MAW-Kammer [ALSA-C 2006b]	362

1 Einleitung

Der Nachweis der Langzeitsicherheit der Schachanlage Asse bezüglich der potenziellen Freisetzung von Radionukliden auf dem Lösungspfad wird mit Hilfe von Transport- und Ausbreitungsrechnungen durchgeführt. Der Abschlussbericht [ALSA-C 2005a] zu diesen Untersuchungen des Fluid- und Radionuklidtransports, im Folgenden „Schlussbericht 2005“ genannt, beruht auf dem Kenntnisstand von Mitte 2005 und basiert in Bezug auf die Konzepte, Modelle und Daten zum Teil auf Experteneinschätzungen und nicht verifizierten Annahmen. Es wurde ein Referenzfall aus der Szenariengruppe des Referenzszenarios definiert und als Basis der im Schlussbericht 2005 dargestellten Transportrechnungen verwendet.

Nach Beendigung des Schlussberichts 2005 konnten einige Annahmen verifiziert, belastbare Werte für Parameter ermittelt und Experteneinschätzungen aktualisiert werden. Dies führte zur Definition einer „*kombinierten Variante*“, die nach derzeitigem Kenntnisstand eine als sehr wahrscheinlich eingeschätzte Entwicklung des Gesamtsystems in der Szenariengruppe des Referenzszenarios repräsentiert. Im vorliegenden Bericht wird der Übergang vom Referenzfall zu der kombinierten Variante dargestellt. Die dabei aktualisierten Modellannahmen werden ausführlich erläutert (Kapitel 2).

Für die systematische Untersuchung der Auswirkungen der verschiedenen Modelländerungen wird zunächst ein Vergleichsfall definiert (Kapitel 3), der an den Referenzfall angelehnt ist. Neben einigen modelltechnischen Aktualisierungen wird im Vergleichsfall im Wesentlichen das neue Konzept der Transferfunktionen umgesetzt, das einer realistischeren modellhaften Abbildung und Berücksichtigung des Transports im Deckgebirge dient. Die Ergebnisse der Modellrechnungen mit KAFKA und LOPOS zum Fluid- und Radionuklidtransport in der Grube sowie zur potenziellen Strahlenexposition in der Biosphäre werden für den Vergleichsfall ausführlich dargestellt. Ergänzend werden die Ergebnisse der aus heutiger Sicht weiterhin belastbaren Rechnungen aus dem Schlussbericht 2005 mit Hilfe der Transferfunktionen neu ausgewertet. Dies ermöglicht, die Auswirkungen der dort betrachteten, potenziell sensitiven Größen bei realistischerer Abbildung des Transports im Deckgebirge neu zu bewerten (Kapitel 4).

Ausgehend vom Vergleichsfall werden die Auswirkungen von aktualisierten Modellparametern sowie Annahmen zu hydraulischen Verhältnissen im Grubengebäude untersucht, sowie die kombinierte Variante entwickelt, die anhand von Varianten abgesichert wird (Kapitel 5). Untersuchungen zum Einfluss des Radionuklid-Quellterms und zur Bedeutung des MAW-Bereichs (Szenariengruppe LsgMAW) anhand eines detaillierten Strukturmodells nehmen dabei einen großen Raum ein.

1.1 Aktualisierte Modellannahmen

In Tab. 1.1 sind die in diesem Bericht berücksichtigten aktualisierten Modellannahmen zusammengestellt. In der ersten Spalte wird angegeben, bei welchem Rechenfall diese berücksichtigt werden. Belastbare Parameterwerte für die Viskosität des Schutzfluids, den Diffusionskoeffizienten, den erhöhten Diffusionskoeffizienten im Umfeld der LAW-

Einlagerungsbereiche und den Radionuklid-Quellterm wurden neu ermittelt. Die Werte der Dosiskonversionsfaktoren haben sich geringfügig geändert, da der Expositionspfad über den Süßwasserfisch zum Menschen neu berücksichtigt wird. Der Transport im Deckgebirge wird anhand von Transferfunktionen berechnet. Dieses neue, vom Verfahren in [ALSA-C 2005] abweichende Vorgehen ist durch die spezielle Auswertung von Deckgebirgsrechenfällen möglich [Colenco/GRS 2006]. Dazu wurden auch neuere Deckgebirgsrechenfälle zugrunde gelegt, die aktualisierte Modellvorstellungen für das Deckgebirge berücksichtigen [Colenco 2006a]. Gleichzeitig wurden auch die Schnittstelle Grube/Deckgebirge, d.h. der vom Deckgebirge ausgeübte hydraulische Widerstand gegen das Auspressen von Lösung aus der Grube und seine zeitliche Entwicklung, realitätsnäher parametrisiert und die Rechenprogramme KAFKA und LOPOS entsprechend angepasst.

Tab. 1.1 Aktualisierte Modellannahmen

Rechenfall	Modellannahme	alt	neu
VF	Viskosität des Schutzfluids	10 mPa·s	8 mPa·s
VF	Diffusionskoeffizient D_p	$1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	$3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$
VF	Effektiver Diffusionskoeffizient zur Abbildung von Konvektionsvorgängen $D_{pE,LAW}$	LAW2: $9 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ LAW3: $5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ LAW4: -	$1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ $7 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ $1,3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
VF	Dosiskonversionsfaktoren	Siehe Schlussbericht 2005	Zusätzliche Berücksichtigung des Expositionspfads „Süßwasserfisch“
VF	Transport im Deckgebirge	Verdünnungsfaktoren	Transferfunktionen
VF	Schnittstelle zum Deckgebirge	Strömungswiderstand hängt von der Viskosität des Schutzfluids ab	Strömungswiderstand hängt von hydrogeologischen Modellvorstellungen im Deckgebirge und vom kumuliert ausgepressten Lösungsvolumen ab
KV	Desintegriertes Salzgestein in der Firste von Abbau 6/725 (LAW1B) und ELK 12/750 (LAW4)	-	Berücksichtigt
KV	Verfüllung im Grubenhöchstes mit Sorelbeton [GSF 2006b]	-	Berücksichtigt
KV	Radionuklid-Quellterm	Siehe Schlussbericht 2005	Siehe Kapitel 5.3
Variante der KV	Detailmodell MAW	-	Siehe Kapitel 5.8

VF: Vergleichsfall; KV: kombinierte Variante

Die aktualisierten Modellannahmen in Bezug auf das desintegrierte Steinsalz in den Firstbereichen von Abbau 6/725 (LAW1B) und ELK 12/750 (LAW4) tragen dem neuen Erkundungsstand in diesen Grubenbereichen Rechnung. Die Verfüllung im Grubenhöchsten mit Sorelbeton wird auf Grund der Aktualisierung des Schließungskonzepts [GSF 2006b] berücksichtigt und die zugehörigen Segmente entsprechend parametrisiert.

Für die Modellrechnungen zur Szenariengruppe LsgMAW wird der Nahbereich der MAW-Kammer mit den Abbauen 8a/532 und 8b/532 detailliert abgebildet. Es handelt sich hierbei um eine Neumodellierung zum Abbau von Konservativitäten, die in den früheren Rechnungen zu unrealistischen potenziellen Strahlenexpositionen geführt hatten (siehe Schlussbericht 2005).

1.2 Betrachtete Varianten

Eine Übersicht über die im vorliegenden Bericht untersuchten Rechenfälle, Varianten und Szenarien enthält Tab. 1.2. Im Vergleichsfall (VF) werden die in den ersten sechs Zeilen von Tab. 1.1 angegebenen, aktualisierten Modellannahmen berücksichtigt. Beim Übergang zur kombinierten Variante (KV) werden, ausgehend vom Vergleichsfall, schrittweise weitere aktualisierte Modellannahmen berücksichtigt. Varianten im eigentlichen Sinn werden dann auf der Basis der kombinierten Variante durchgeführt. Alle Ergebnisse dieser Rechnungen sind in Kapitel 5 dokumentiert.

Bei dem Vergleichsfall handelt es sich um den Rechenfall, der den Übergang vom Referenzfall des Schlussberichts 2005 zu den Rechnungen im vorliegenden Bericht herstellt. Für diesen Vergleichsfall wird im Folgenden detailliert gezeigt, dass die Aktualisierung der in Tab. 1.1 genannten Modellannahmen zu keinen nennenswerten Unterschieden der Vorgänge im Grubengebäude im Vergleich zum Referenzfall führen. Die anhand der neuen Transferfunktionen berechneten Konsequenzen in der Biosphäre, d.h. die potenziellen Strahlenexpositionen, unterscheiden sich aber wegen der realitätsnäheren Berücksichtigung der Transportvorgänge im Deckgebirge. Die Ergebnisse für den Vergleichsfall zeigen, dass die wesentlichen Aussagen aus dem Schlussbericht 2005 erhalten bleiben. Um die Vergleichbarkeit mit den übrigen Ergebnissen in diesem Bericht zu ermöglichen, wurden die relevanten Ergebnisse aus dem Schlussbericht 2005 auch mit Transferfunktionen ausgewertet. Dies ist in Kapitel 4 dokumentiert.

Die kombinierte Variante basiert auf dem Vergleichsfall und berücksichtigt eine Kombination der Aktualisierungen (1) bis (3) in der Tab. 1.2. Wie bereits einleitend erwähnt, stellt die kombinierte Variante die als sehr wahrscheinlich eingeschätzte Entwicklung des Gesamtsystems in der Szenariengruppe des Referenzszenarios dar. Daher wurde diese Variante als Basis für einige Parametervariationen verwendet, deren Betrachtung hauptsächlich dazu dient, den Einfluss von Unsicherheiten bezüglich der aktualisierten Modellannahmen zu untersuchen. Die kombinierte Variante diente auch als Basis für die Modellrechnungen zur Szenariengruppe LsgMAW. Damit werden die Ergebnisse aus dem Schlussbericht 2005 in Bezug auf die möglichen Entwicklungen des Gesamtsystems sinnvoll ergänzt.

Eine wesentliche Aufgabe dieses Berichtes ist die Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen, die sich zusammenfassend aus den Rechnungen im Schlussbericht 2005 und im vorliegenden Bericht ergeben. In Kapitel 6 wird diese Synthese dargestellt.

Tab. 1.2 Betrachtete Varianten

Variante	Beschreibung
Vergleichsfall (VF)	Basis: Referenzfall R8 (Schlussbericht 2005) + Änderungen gemäß Tab. 1.1; MAW-Bereich trocken
Aktualisierung (1): Desintegrierte Steinsalzbereiche im Firstbereich einiger Einlagerungsbereiche	Basis: Vergleichsfall + erhöhte Durchlässigkeit im Firstbereich von LAW1B und LAW4
Aktualisierung (2): Schließungskonzept	Basis: Vergleichsfall + Verfüllung mit Sorelbeton im Grubenhöchsten
Aktualisierung (3): Radionuklid-Quellterme	Basis: Vergleichsfall + aktualisierter Quellterm für alle LAW-Einlagerungsbereiche
Kombinierte Variante (KV)	Basis: Vergleichsfall + alle Aktualisierungen (1), (2) und (3)
Alternatives Deckgebirgsmodell	Basis: kombinierte Variante + Berücksichtigung der Ergebnisse des Deckgebirgs-Rechenfalls DR12 → modifizierte Transferfunktionen → modifizierte Schnittstellenparameter Grube/Deckgebirge
Gasbildung bei maximaler CO ₂ -Bildung	Basis: kombinierte Variante + starke Gasbildung
Variation der Radionuklid-Quellterme	Basis: kombinierte Variante + Obere und untere Bandbreite der Radionuklid-Quellterme für LAW
Szenario LsgMAW: Basisfall	Basis: kombinierte Variante + Lösungszutritt in den MAW-Fasskegel; detailliertes Strukturmodell für den MAW-Bereich; Gasbildung anaerob-feucht
Szenario LsgMAW: Variante	wie LsgMAW Basisfall, aber unter Annahme einer zu späten Zeiten undurchlässigen Verbindung zwischen der MAW-Kammer und dem Baufeld in der SF; Gasbildung anaerob-feucht mit geringerer Rate; mit Gastransport in die Abbaue 8a/532 und 8b/532

2 Aktualisierte Modellannahmen

2.1 Veränderte Modellparameter

In den nachfolgenden Kapiteln 2.1.1 bis 2.1.3 werden Modellparameter beschrieben, deren Wert sich gegenüber jenen im Schlussbericht 2005 geändert hat, sowie die Begründung bzw. Herleitung der neuen Parameterwerte gegeben.

2.1.1 Viskosität des Schutzfluids

Die Viskosität des Schutzfluids ist innerhalb einer Bandbreite bekannt [GSF 2004]. Die bisherigen Modellrechnungen zu den Prozessen im Grubengebäude (Schlussbericht 2005) wurden mit einer Viskosität von 10 mPa·s ausgeführt. Eine Parametervariation mit einem Viskositätswert von 8 mPa·s zeigte gegenüber diesen keine signifikanten Auswirkungen auf das Systemverhalten im Nahfeld, auf die Austrittsraten ins Deckgebirge und auf die potenzielle Strahlenexposition in der Biosphäre (Schlussbericht 2005, Kap. 9.4). Da neue Messungen für technische Lösungen, welche als Schutzfluid zum Einsatz gelangen, auf Werte deutlich unterhalb 10 mPa·s hindeuten [ERCOSPLAN 2005], wird für die Viskosität des Schutzfluids neu der Wert von 8 mPa·s angesetzt. Dieser Wert stimmt zudem mit dem Wert überein, der auch in den hydrogeologischen Modellrechnungen zum Deckgebirge verwendet wurde [Colenco 2006a].

2.1.2 Porendiffusivität D_p

Die Porendiffusionskonstante D_p , d. h. die molekulare Diffusionskonstante in porösen Feststoffen kann als Produkt der molekularen Diffusionskonstante in freiem Wasser D_w und der Größe τ definiert werden:

$$D_p = \tau \cdot D_w \quad (2.1)$$

τ quantifiziert darin die Behinderung der Diffusion durch den nicht-geraden Verlauf der Poren und durch die lokalen Engstellen des Porenraums und wird nachfolgend als Tortuosität bezeichnet¹.

In den Transportrechnungen zum Schlussbericht 2005 wurde für die Porendiffusivität D_p in Salzversatz und aufgelockertem Salzgestein der mittlere Wert für freie Diffusion in Süßwasser D_w von $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ unter Annahme einer vernachlässigbar geringen Behinderung der Diffusion durch die Porengeometrie ($\tau = 1$) angesetzt.

Experimentellen Daten zur Diffusion in hoch konzentrierten, „einfachen“ Elektrolyten, d. h. Lösungen mit nur einer Art Kationen und nur einer Art Anionen, bestätigen Diffusionswerte D_w in freier Lösung im Bereich von $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ([Lobo 1993], [Voigt 2005]). Ein niedrigerer

¹ In dieser Größe ist der vergeringerte wirksame Transportquerschnitt in Abhängigkeit von der Porosität ϕ in porösen Medien noch nicht berücksichtigt. Diese Abhängigkeit wird in den Programmen KAFKA und LOPOS durch die Verwendung der effektiven Diffusionskonstante $D_e = D_p \cdot \phi$ berücksichtigt.

Wert für D_w , der aufgrund der geringen beobachteten Mobilität von Mg bei hohen Konzentrationen zwar zu vermuten ist, ließe sich nur mit Hilfe eines komplexen Algorithmus (z. B. durch ionische Diffusionskoeffizienten in mehrkomponentigen Elektrolyten [Felmy & Weare 1991]) auf der Basis phänomenologischer Koeffizienten mit verbleibenden hohen Unsicherheiten begründen und ist daher nicht vertretbar. In den hoch salinen Lösungen im Grubengebäude Asse bleibt somit als plausibelster Wert für die Diffusionskonstante in freier Lösung, d. h. ohne Einfluss der Feststoffe $D_w = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ anzusetzen.

Angaben zur Größe τ in Salzversatz bzw. Schweben liegen nicht vor. Um eine realistischere Berücksichtigung der Porengeometrie auf die Diffusion zu erhalten, wurden Ergebnisse aus Untersuchungen zur Diffusion in Sedimenten ausgewertet ([Boudreau 1996], [Maerki et al. 2004]). Demnach lassen sich für τ in Salzversatz Werte zwischen 0,4 (wenig kompaktiert) und 0,2 (kompaktiert) abschätzen. Als mittlerer Wert in gebirgsmechanisch beanspruchten Schweben kann $\tau = 0,3$ angenommen werden. In der Anwendung im Grubengebäude der Schachanlage Asse ist insgesamt für die gemäß Gl. (2.1) beschriebene Tortuosität τ von Salzversatz und gebirgsmechanisch beanspruchten Schweben ein Wert von 0,3 als plausibel einzustufen.

Mit $D_w = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ und $\tau = 0,3$ ergibt sich für die Porendiffusivität $D_p = 3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, wobei diese Diffusion im wenig kompaktierten Salzversatz vergleichsweise etwas höher, im stark kompaktierten Salzversatz etwas niedriger sein dürfte.

2.1.3 Schadstoffaustrag aus ELB durch konvektive Lösungsbewegung

Grundlage für die einlagerungsbereichsspezifische Herleitung einer erhöhten Diffusivität D_{pE} , mittels derer die Auswirkung von dichtebedingten konvektiven Lösungsbewegungen in den Programmen KAFKA und LOPOS abgebildet werden, stellen die Ergebnisse von KAFKA-Rechnungen mit detaillierter Abbildung des jeweils betrachteten LAW-Einlagerungsbereichs dar (Detailmodelle, vgl. [ALSA-C 2005a]). In diesen wurden die Strömungsmuster zwischen den Kammern eines Einlagerungsbereichs (ELB) einerseits sowie die Lösungsflüsse zwischen diesen Kammern und deren Nahbereich andererseits berechnet. Die zeitliche Entwicklung der Lösungsdichten in den Modellsegmenten, speziell in den Einlagerungskammern (ELK) sowie in den anderen, nicht detailliert abgebildeten LAW-ELB wurde dabei berücksichtigt und damit der Einfluss unterschiedlicher Lösungsdichten auf den Lösungsfluss und Transport zwischen zwei Modellsegmenten erfasst².

Die Bestimmung eines Wertes für die erhöhte Diffusivität D_{pE} erfolgt analog der in Kapitel 6.3.8.4 im Schlussbericht 2005 beschriebenen Vorgehensweise. Im Unterschied zur dort entwickelten Ableitung von D_{pE} über die Abschätzung konvektiver Flüsse mit Hilfe so genannter W-Werte können diese Größen direkt aus den Ergebnissen der Detailmodelle abgeleitet werden. Die in den Detailmodellen berechneten Lösungsflüsse zwischen den Kammern des betrachteten Einlagerungsbereichs und den angrenzenden Grubenbauen

² Diese detaillierten Modellrechnungen wurden nicht für die ELB LAW1A und LAW1B durchgeführt: für diese ELB besteht auch kein Konvektionspotential.

außerhalb des Einlagerungsbereichs schließen auch die konvektiven Komponenten der Lösungsbewegung zwischen dem Einlagerungsbereich und dem Nahbereich mit ein.

Die Ableitung der Werte von D_{pE} , mit denen die Auswirkung von konvektiven Lösungsbewegungen auf den Schadstofftransport aus den Einlagerungsbereichen näherungsweise durch erhöhten diffusiven Transport berücksichtigt wird (vgl. Kapitel 6.3.8.4 im Schlussbericht 2005), erfolgt mit dem nachfolgend dargelegten Algorithmus.

Bei einem Fluss Q_{tot} von der Kammer mit Konzentration C_1 in die Kammer mit Konzentration C_2 (ohne Konvektion) lässt sich der Schadstofffluss F durch Advektion, Dispersion und Diffusion im stationären Zustand wie folgt ausdrücken

$$F = C_1 \cdot Q_{tot} - (C_2 - C_1) \cdot \frac{Q_{tot}}{e^{Pe} - 1} \quad (2.2)$$

mit $Pe = v \cdot L / D'$ Peclet-Zahl

$v = Q_{tot} / (n \cdot A)$ Abstandsgeschwindigkeit

$D' = a \cdot |v| + D_p$ Dispersions-/Diffusionskonstante

L Transportdistanz

A Transportquerschnitt

n über den Transportquerschnitt gemittelte Porosität

a Dispersionslänge

D_p Porendiffusivität

Bei einem konvektiven Lösungsaustausch zwischen den Kammern mit gleichem Netto-Lösungsfluss Q_{tot} ist der Schadstofftransport (ohne dispersive und diffusive Beiträge)

$$F = C_1 \cdot Q_{1 \rightarrow 2} + C_2 \cdot Q_{2 \rightarrow 1} = C_1 \cdot Q_{tot} + (C_2 - C_1) \cdot Q_{2 \rightarrow 1} \quad (2.3)$$

mit $Q_{tot} = Q_{1 \rightarrow 2} + Q_{2 \rightarrow 1}$

Gleichsetzen der Ausdrücke auf den rechten Seiten von Gl. (2.2) und (2.3) mit gleichzeitigem Ersetzen der physikalischen Diffusivität D_p in Gl. (2.2) durch D_{pE} , Verallgemeinern auf beide möglichen Richtungen des Netto-Lösungsflusses zwischen den beiden Kammern und abschließendes Wiedereinfügen der physikalischen Diffusivität D_p ergibt

$$D_{pE} = D_p + \frac{Q_{tot} \cdot L}{n \cdot A \cdot \ln \left(1 + \frac{Q_{tot}}{Q_{min}} \right)} \quad (2.4)$$

und für $Q_{\text{tot}} \ll Q_{\text{min}}$: $D_{\text{pE}} = D_{\text{p}} + \frac{Q_{\text{min}} \cdot L}{n \cdot A}$

Darin ist:

D_{p} Porendiffusivität [$3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$; vgl. Kap. 2.1.2]

L Distanz, über die konvektiver Austausch stattfindet

Q_{tot} Netto-Lösungsfluss, summiert über alle Verbindungen zwischen betrachteten benachbarten Modellkammern

Q_{min} bei konvektivem Austausch: kleinerer der beiden – über alle Verbindungen zwischen benachbarten Modellkammern summierten – gegenläufigen Flüsse

A Transportquerschnitt der Verbindung(en), auf die D_{pE} anzuwenden ist

n Porosität der Verbindung(en), auf die D_{pE} anzuwenden ist.

Als Ergebnis der Berechnung der Detailmodelle [ALSA-C 2005a] wird die zeitliche Entwicklung der richtungsspezifisch summierten Lösungsflüsse zwischen den Kammern des betrachteten LAW-ELB und dessen Nahbereich und insbesondere das Einsetzen und die Dauer von konvektiven Strömungen verwendet. Damit lässt sich ein zunächst zeitabhängiges D_{pE} bestimmen, welches den konvektiven Austausch zwischen dem ganzen Einlagerungsbereich als Einheit und dessen Nahbereich ohne explizite Modellierung der konvektiven Lösungsbewegungen näherungsweise abbildet.

Ein zeitlich variabler Wert für die Diffusivität ist in KAFKA und LOPOS aber programmtechnisch nicht vorgesehen. Auf der Basis des ermittelten zeitabhängigen D_{pE} wird deshalb abschließend, unter Berücksichtigung des relativen Einflusses von Netto-Advektion und D_{pE} -bestimmter Diffusion anhand der entsprechenden Peclet-Zahl ein angemessener, zeitlich konstanter Wert für D_{pE} als Eingangsgröße für die Modellrechnungen mit LOPOS und KAFKA angesetzt. Diese Ableitung aus den Ergebnissen der Detailmodelle wird nachfolgend für die Nahbereiche der ELB LAW2, LAW3 und LAW4 aufgezeigt.

2.1.3.1 Erhöhte Diffusivität D_{pE} für den ELB LAW2

Die zeitliche Entwicklung des nach Gl. (2.4) bestimmten D_{pE} (LAW2) ist in Abb. 2.1 dargestellt (rote Linie). Bereits nach rund 30 Jahren treten im Detailmodell konvektive Austauschprozesse über die Schweben der Kammern des LAW2 auf und bleiben bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes bestehen.

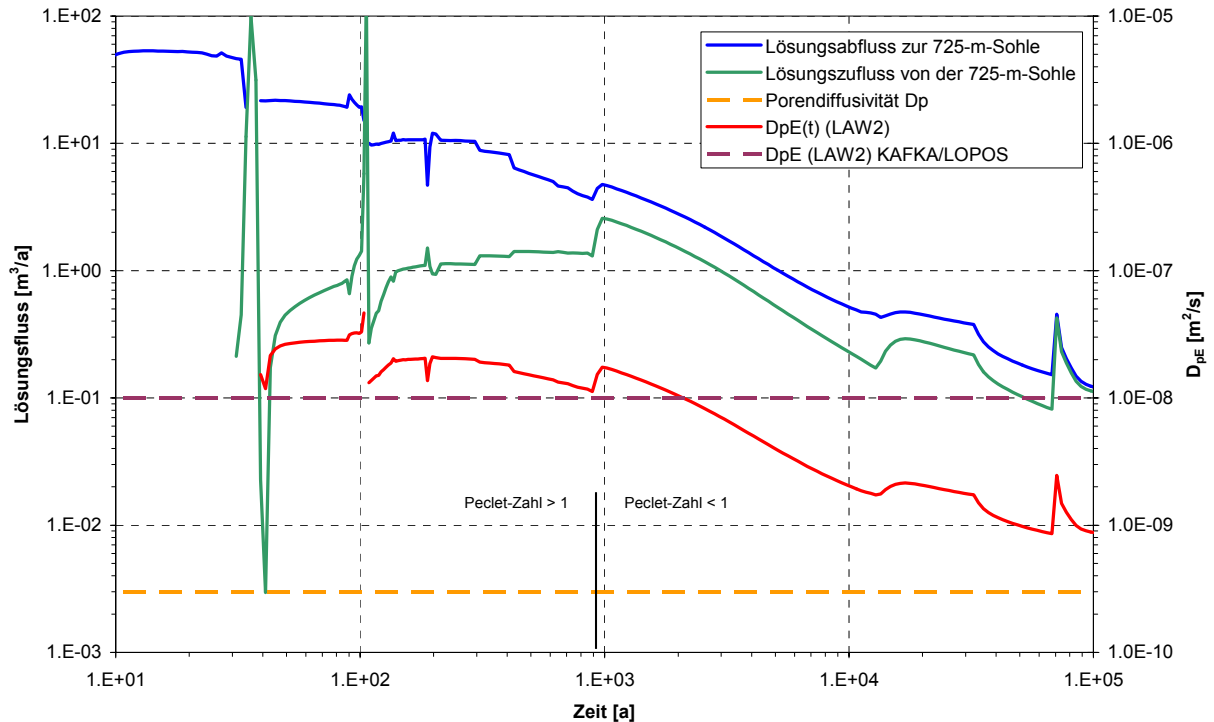


Abb. 2.1 Zeitliche Entwicklung von D_{pE} (LAW2)

Die höchsten Werte für D_{pE} (LAW2) werden in der Phase bis 2 000 Jahre erreicht. In dieser Phase mit relativ großen Lösungsflüssen wird der Transport zunächst allerdings noch durch die Advektion bestimmt. Erst nach 900 Jahren ist damit zu rechnen, dass Konvektion den Transport aus LAW2 zur 725-m-Sohle in relevantem Maße beeinflusst. Die berechneten Werte von D_{pE} (LAW2) liegen ab 900 Jahren zunächst im Bereich von $1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ bis knapp $2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Zwar wird mit einem D_{pE} (LAW2) von $1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ die Bedeutung des konvektiven Austausches zu späteren Zeiten deutlich überschätzt, im Sinne einer konservativen Betrachtung wird dieser Wert aber als repräsentativ für die Abbildung der Effekte von konvektiven Lösungsbewegungen zwischen den Kammern des LAW2 und den darüber liegenden Abbauen auf der 725-m-Sohle angesehen. Für die Abbildung der Effekte von konvektiven Lösungsbewegungen im Nahbereich von LAW2 mit KAFKA und LOPOS wurde daher eine erhöhte Diffusivität D_{pE} (LAW2) von $1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ angenommen, die den Modell-elementen S-LAW2 und V-LAW2 zugewiesen wurde. Dieser Wert wurde in konservativer Näherung für den gesamten Modellierungszeitraum angesetzt.

2.1.3.2 Erhöhte Diffusivität D_{pE} für den ELB LAW3

Die zeitliche Entwicklung des nach Gl. (2.4) bestimmten D_{pE} (LAW3) ist in Abb. 2.2 dargestellt (rote Linie). Erst nach rund 2 000 Jahren treten im Detailmodell konvektive Austauschprozesse auf – zunächst auf sehr niedrigem Niveau, und ab 3 000 Jahren verstärkt (hervorgerufen durch Einsetzen eines Zuflusses von der 725-m-Sohle über die Schweben von ELK 7/750 bei gleichzeitigem Lösungsabfluss über die Schweben der anderen ELK, vgl. [ALSA-C 2006a]). Diese konvektiven Austauschprozesse dauern bis zum Ende des Betrachtungszeitraums an.

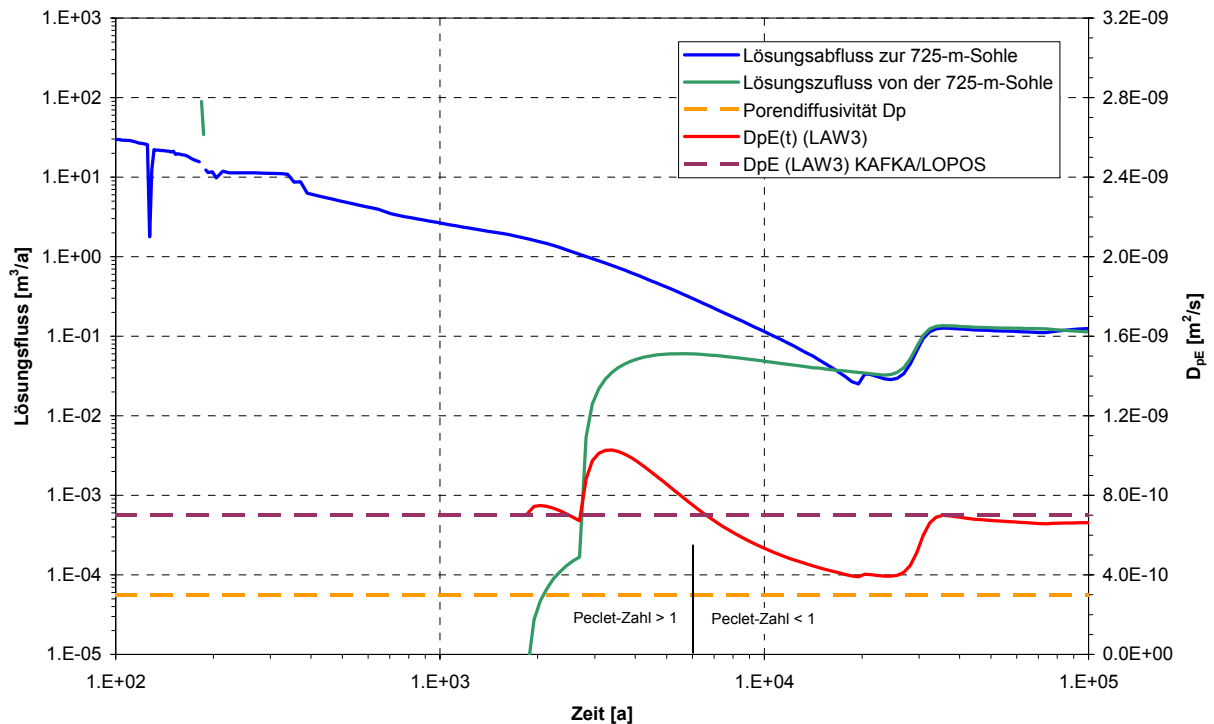


Abb. 2.2 Zeitliche Entwicklung von D_{pE} (LAW3)

Die Variabilität von D_{pE} (LAW3) im Betrachtungszeitraum ist vergleichsweise gering (Minimalwert: $4 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, Maximalwert: $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$). Die höchsten Werte für D_{pE} (LAW3) werden in der Phase zwischen ca. 2 000 bis 5000 Jahre erreicht. In dieser Phase mit relativ großen Lösungsflüssen wird der Transport allerdings noch durch die Advektion bestimmt. Basierend auf der vorliegenden Abschätzung wurde für die Abbildung der Effekte von konvektiven Lösungsbewegungen im Nahbereich von LAW3 mit KAFKA und LOPOS daher eine erhöhte Diffusivität D_{pE} (LAW3) von $7 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ angenommen, die den Modellsegmenten S-LAW3 und V-LAW3 zugewiesen wurde. Dieser Wert wurde in konservativer Näherung für den gesamten Modellierungszeitraum angesetzt.

2.1.3.3 Erhöhte Diffusivität D_{pE} für den ELB LAW4

Die zeitliche Entwicklung des nach Gl. (2.4) bestimmten D_{pE} (LAW4) ist in Abb. 2.3 dargestellt (rote Linie). Nach 250 Jahren setzen konvektive Austauschprozesse zwischen den ELK des LAW4 und dem östlichen Carnallititbaufeld (Modellsegment Carn_s.o) ein und bleiben bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes bestehen.

Die Variabilität von D_{pE} (LAW4) im Betrachtungszeitraum ist vergleichsweise gering (Minimalwert: $4 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, Maximalwert: $2,3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$). Die höchsten Werte für D_{pE} (LAW4) werden in der Phase bis etwa 5 000 Jahre erreicht. Bereits unmittelbar nach dem ersten Auftreten von konvektiven Lösungsbewegungen ist damit zu rechnen, dass der Transport aus LAW4 in das östliche Carnallititbaufeld in relevantem Maße dadurch beeinflusst wird. Mit dem vorgeschlagenen Wert für die erhöhte Diffusivität D_{pE} (LAW4) von $1,3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ wird zwar die Bedeutung des konvektiven Austausches zu späten Zeiten überschätzt, im Sinne einer konservativen Betrachtung kann dieser Wert aber als repräsentativ für die Abbildung

der Effekte von konvektiven Lösungsbewegungen zwischen den ELK des LAW4 und dem östlichen Carnallititbaufeld angesehen werden.

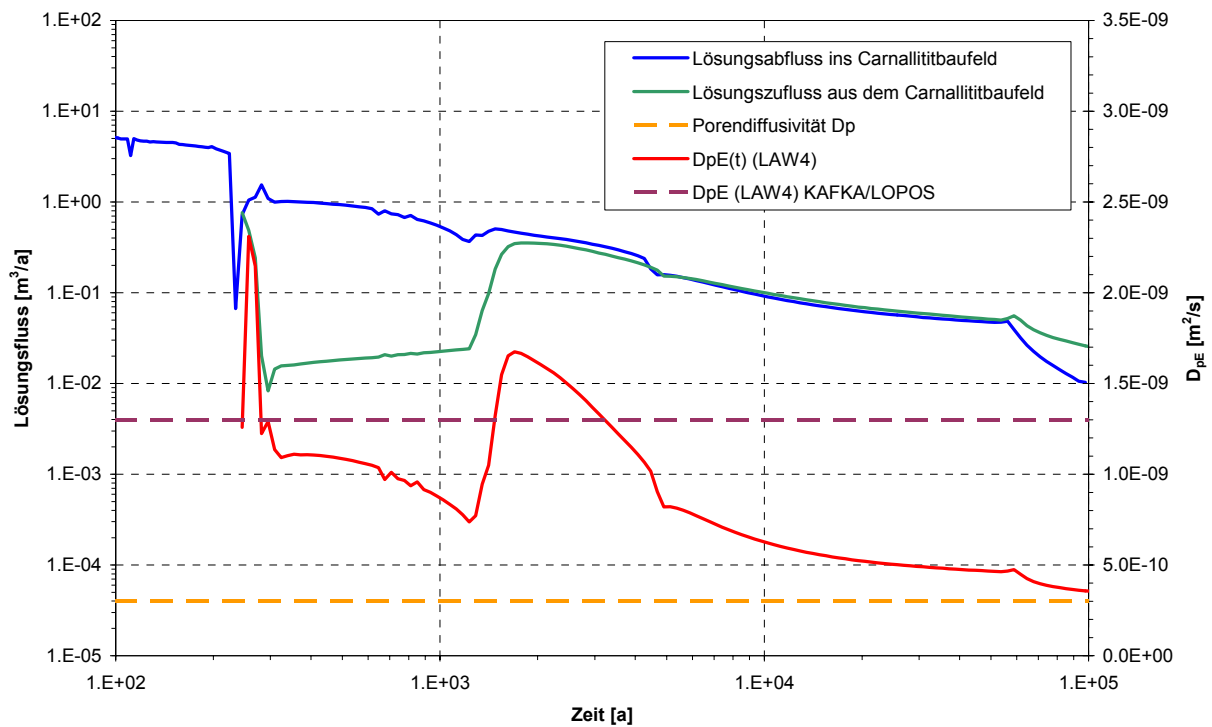


Abb. 2.3 Zeitliche Entwicklung von D_{pE} (LAW4)

Für die Abbildung der Effekte von konvektiven Lösungsbewegungen im Nahbereich von LAW4 mit KAFKA und LOPOS wurde daher eine erhöhte Diffusivität D_{pE} (LAW4) von $1,3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ angenommen, die den Modellelementen H-4.Ca und A-4.Ca zugewiesen wurde. Dieser Wert wurde in konservativer Näherung für den gesamten Modellierungszeitraum angesetzt.

2.2 Schnittstelle Deckgebirge

Im Schlussbericht 2005 (Kap. 5.3.4) ist dargestellt worden, dass das Deckgebirge dem Auspressen von Lösung aus dem Grubengebäude einen Widerstand entgegensetzt. Dieser Widerstand hängt in erster Linie vom Hauptausbreitungspfad für ausgepresste Lösung zum nächstgelegenen Deckgebirgsbereich mit wenig beeinflusstem Lösungsdruck ab. In den Modellrechnungen zum Schlussbericht 2005 war dieser Widerstand als konstant angenommen worden, lediglich die zunehmende Verdrängung von Deckgebirgslösung im Rötanhydrit durch höher viskoses Schutzfluid war näherungsweise abgebildet worden (vgl. Schlussbericht 2005 Kap. 5.3.4 und 6.3.9).

Im Anschluss an die Berechnungen zum Schlussbericht 2005 sind weitere Modellrechnungen zum Transport im Deckgebirge durchgeführt worden [Colenco 2006a]. Eine Randbedingung für diese Modellrechnungen ist die Auspressrate von Grubenlösung in das Deckgebirge. Mit Hilfe dieser Modellrechnungen sind aktualisierte konzeptuelle

Modellansätze der hydraulischen Verhältnisse im Deckgebirge modelltechnisch umgesetzt, überprüft und bewertet worden.

Der Widerstand, den das Deckgebirge den auspressten Lösungsströmen entgegensetzt, wirkt auf die Entwicklung in der Grube zurück: Er beeinflusst den Fluiddruck im Grubengebäude und dadurch u. a. die Konvergenz der Grubenbaue. Zusammen mit der Lage der hydraulischen Wegsamkeiten zwischen Grubengebäude und Deckgebirge definiert somit der hydraulische Widerstand des Deckgebirges gegen das Auspressen von Grubenlösung die hydraulische Schnittstelle. Im Ergebnis der Deckgebirgsrechnungen unter Berücksichtigung plausibler Annahmen zu den hydraulischen Verhältnissen im Deckgebirge und der zeitabhängigen Verdrängung von Deckgebirgslösung auf den Haupttransportpfaden lässt sich der hydraulische Widerstand nun genauer durch eine funktionale Abhängigkeit zwischen Lösungsdruck an der Übertrittsstelle und Auspressrate beschreiben.

Aus den Modellrechnungen zum Deckgebirge wird diese funktionale Abhängigkeit derart abgeleitet, dass sie als Eingangsgröße für die Modellrechnungen zum Grubengebäude verwendet werden kann. Grundlage hierfür ist ein iteratives Vorgehen der Bestimmung von Lösungsauspressraten in das Deckgebirge (mit dem Programm LOPOS) und der Modellierung der Strömung und des Transportes im Deckgebirge (mit dem Programm NAMMU, [Colenco 2006a]), bei der eine hinreichend geringe Abweichung zwischen der mit diesen beiden Programmen berechneten Druckentwicklung an der Übertrittsstelle zu erreichen ist. Nachfolgend werden die abschließenden Ergebnisse dieses Vorgehens für die Deckgebirgsrechenfälle DR13 (Rechenfall des konzeptuellen Deckgebirgsmodells mit durchlässigen Wegsamkeiten vom Rötanhydrit durch den Rötakitard in den Muschelkalk (hydraulisch wirksamer Scherdeformationsbereich S3/D9)) und DR12 (Rechenfall des konzeptuellen Deckgebirgsmodells mit wenig durchlässigen Wegsamkeiten vom Rötanhydrit durch den Rötakitard in den Muschelkalk (hydraulisch unwirksamer Scherdeformationsbereich S3/D9)) benannt. Für ausführliche Ergebnisse dieser Deckgebirgsrechenfälle sei auf [Colenco 2006a] verwiesen.

2.2.1 Parametrisierung der Schnittstelle

Die funktionale Abhängigkeit zwischen dem Druck an der Übertrittsstelle p und der Auspressrate Q ändert sich mit fortschreitendem Auspressen von Grubenlösung: Mit dem Auspressen dringt zunehmend höher viskose Grubenlösung in Deckgebirgsbereiche ein, die den hydraulischen Widerstand bestimmen. Dadurch steigt der hydraulische Widerstand an. Diese Entwicklung wird nachfolgend für den Deckgebirgsrechenfall DR13 beschrieben; sie ist hinsichtlich der Näherung und Rückwirkung auf das Grubengebäude auch auf den Rechenfall DR12 übertragbar. Solange die Auspressrate hoch ist, wird Grubenlösung entlang des Rötanhydrit oder entlang der Anhydritmittel gegen das verstürzte Deckgebirge hochgepresst, wodurch der „hydrostatische“ Druck an der Übertrittsstelle, d.h. der Beitrag der Lösungsdichte im darüber liegenden Rötanhydrit, ansteigt. Wenn zu späten Zeiten die Auspressrate absinkt, fließt wieder Deckgebirgslösung in den Rötanhydrit nach und der „hydrostatische“ Druck an der Übertrittsstelle nimmt wieder ab. Die funktionale Abhängigkeit von p und Q hängt somit von der aktuellen Verteilung der Grubenlösung im Deckgebirge ab.

Für die Parametrisierung dieser komplexen Zusammenhänge muss von gewissen Näherungen Gebrauch gemacht werden:

1. Näherung: Es wird angenommen, dass die Verteilung der Grubenlösung im Deckgebirge in ausreichend guter Näherung durch die bis dahin kumuliert ausgepresste Menge Grubenlösung (V) beschrieben werden kann.

Diese Näherung ist zulässig, sofern sich der zeitliche Verlauf der ausgepressten Menge gegenüber dem zur Parametrisierung verwendeten Deckgebirgsrechenfall nicht stark ändert. Sie wird im Ergebnis der Berechnungen überprüft.

Mit der 1. Näherung ist die hydraulische Schnittstelle, d.h. die funktionale Abhängigkeit von p und Q , durch die Funktion $Q = Q(p, V)$ gegeben.

Bei gegebener Verteilung der Grubenlösung im Deckgebirge hängt Q linear von p ab:

$$2. \text{ Ansatz: } \quad Q(p, V) = \frac{1}{R(V)} \cdot (p - p_0(V)) \quad (2.5)$$

Der Druck $p_0(V)$ beschreibt den Druck an der Übertrittsstelle, bei dem im Zustand V weder Lösung aus der Grube in das Deckgebirge ausgepresst wird, noch Lösung aus dem Deckgebirge in die Grube zufließt. Durch das Hochpressen von Grubenlösung entlang des Rötanhydrit gegen das verstürzte Deckgebirge steigt der Druck $p_0(V)$ zunächst an und sinkt dann wieder auf den Anfangswert ab (vgl. Abb. 2.4). Der Anstieg wird auf maximal etwa 0,5 MPa geschätzt.

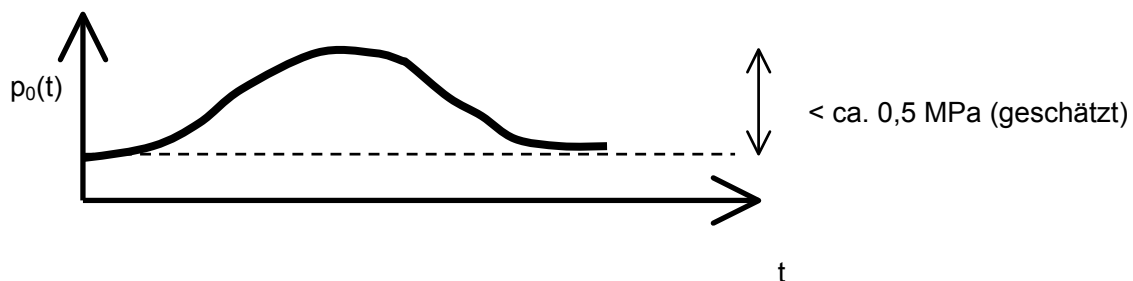


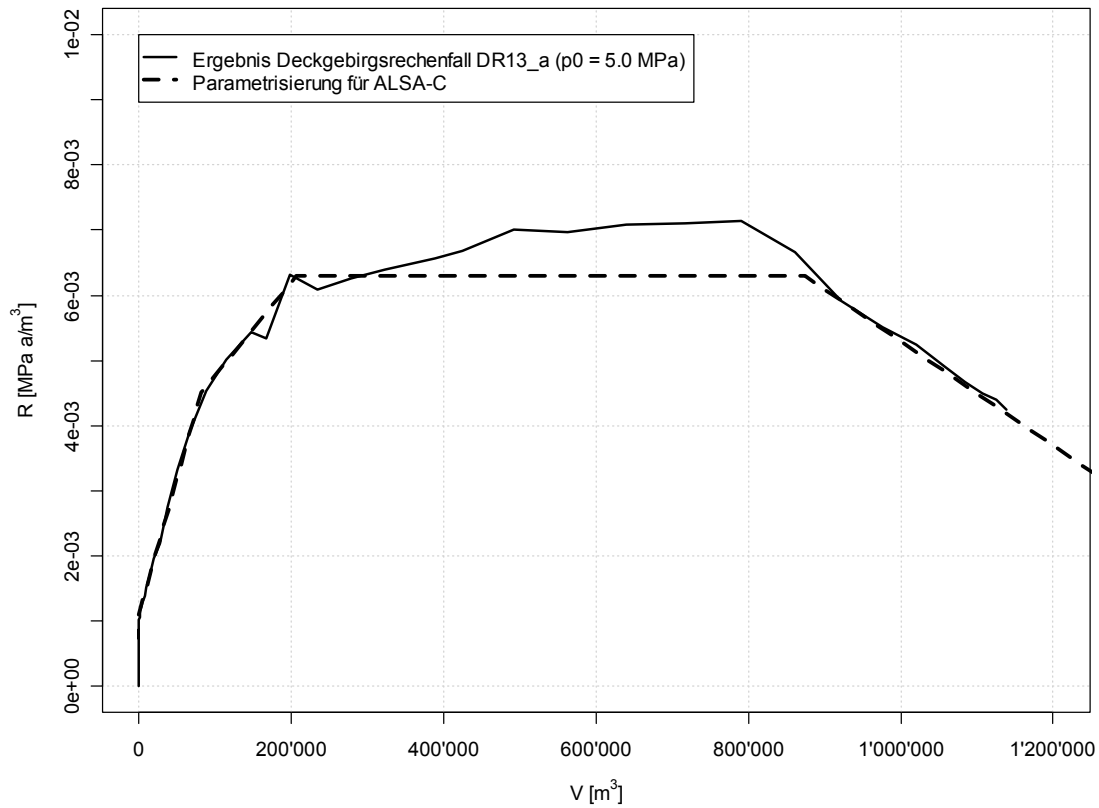
Abb. 2.4 Schematische Darstellung der zeitlichen Entwicklung von $p_0(t)$

3. Näherung: Die zeitliche Entwicklung von $p_0(t)$ und damit die Abhängigkeit von p_0 vom Zustand V wird vernachlässigt: $p_0(V) = p_0 = \text{const.}$

Mit dieser Näherung vereinfacht sich die funktionale Abhängigkeit wie folgt:

$$4. \text{ Ansatz: } \quad Q(p, V) = \frac{1}{R(V)} \cdot (p - p_0) \quad (2.6)$$

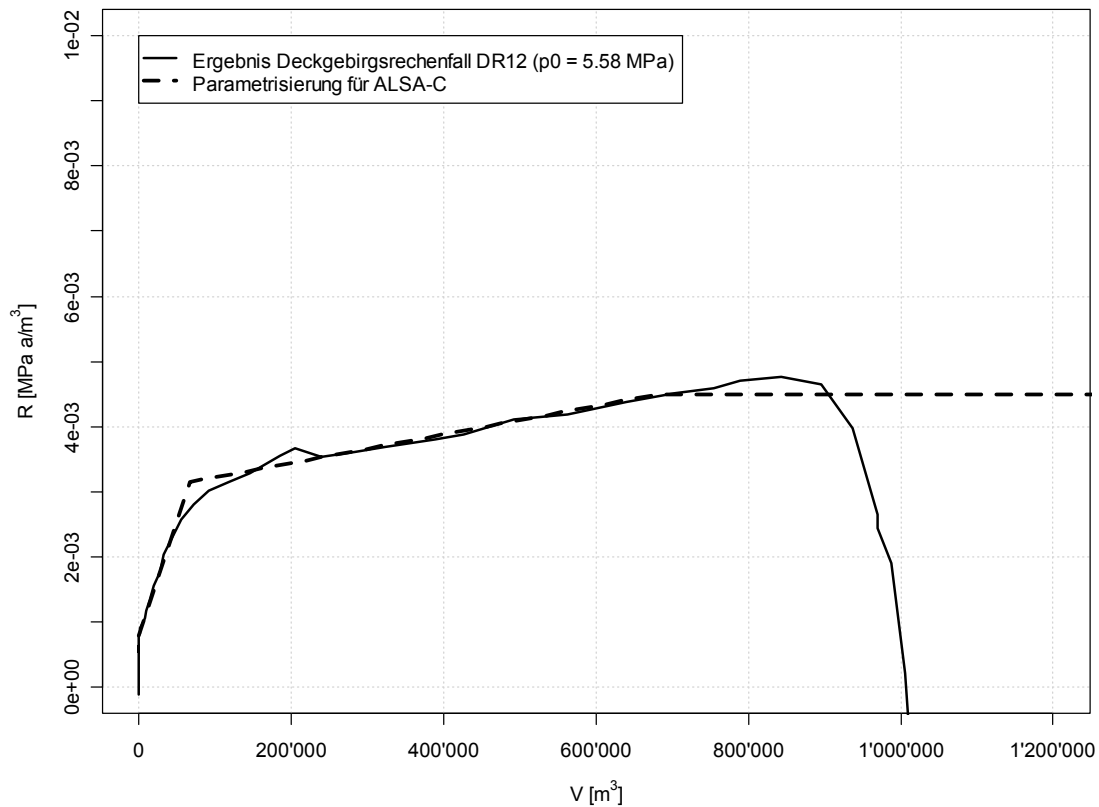
Mit Gl. (2.6) und einem Ansatz für p_0 lässt sich nun $R(V)$ aus den Ergebnissen der Deckgebirgsmodellierung ermitteln (Abb. 2.5 für DR13 und Abb. 2.6 für DR12³).



L:\asse_dms\IV\R13\R13_N_postprocessing.RThu Jul 27 13:38:30 2006

Abb. 2.5 Zusammenhang zwischen ausgepresster Lösungsmenge und Widerstand im Deckgebirge in DR13 und Parametrisierung in ALSA-C

³ Die in den beiden Abbildungen gestrichelten Kurven geben idealisiert den Widerstand wieder, wie er für die Modellrechnungen in ALSA-C parametrisiert wurde. Die Abweichungen vom ermittelten Verlauf der Deckgebirgsrechenfälle (durchgezogene Linien) aufgrund der verwendeten Näherungen sind ausreichend gering. Sie treten insbesondere zu späten Zeiten (hohem kumuliert ausgetragenen Volumen) auf, wenn die Druckdifferenzen klein sind und der hydraulische Widerstand R keinen Einfluss mehr auf das Systemverhalten hat.



L:\asse_dms\IVR13\IVR13_N_postprocessing_RTHu Jul 27 13:38:31 2006

Abb. 2.6 Zusammenhang zwischen ausgepresster Lösungsmenge und Widerstand im Deckgebirge in DR12 und Parametrisierung in ALSA-C

Die fortlaufende Veränderung des Widerstandes $R(V)$ erfolgt dabei gemäß der nachfolgend dargestellten Parametrisierung:

$$Q(p, V) = \frac{1}{R(V)} \cdot (p - p_0) \quad (2.7)$$

$$R(V) = \begin{cases} a_1 + b_1 \cdot V & V < V_1 \\ a_2 + b_2 \cdot (V - V_1) & V_1 \leq V < V_2 \\ a_3 & V_2 \leq V < V_3 \\ a_4 + b_4 \cdot (V - V_3) & V \geq V_3 \end{cases} \quad (2.8)$$

mit V : kumulierte aus dem Grubengebäude ausgepresste Lösungsmenge

p : Lösungsdruck in 500 m Teufe

Für den Rechenfall DR13 ergeben sich gemäß Gl. (2.7) bzw. (2.8) die folgenden Parameter:

Tab. 2.1 Parameter des Deckgebirgs widerstandes entsprechend DR13

$V_1 = 81\,400\text{ m}^3$	$a_1 = 1,10 \cdot 10^{-3}\text{ MPa} \cdot \text{a}/\text{m}^3$	$b_1 = 4,20 \cdot 10^{-8}\text{ MPa} \cdot \text{a}/\text{m}^6$
$V_2 = 206\,000\text{ m}^3$	$a_2 = 4,52 \cdot 10^{-3}\text{ MPa} \cdot \text{a}/\text{m}^3$	$b_2 = 1,43 \cdot 10^{-8}\text{ MPa} \cdot \text{a}/\text{m}^6$
$V_3 = 875\,000\text{ m}^3$	$a_3 = 6,30 \cdot 10^{-3}\text{ MPa} \cdot \text{a}/\text{m}^3$	
	$a_4 = a_3$	$b_4 = -8,00 \cdot 10^{-9}\text{ MPa} \cdot \text{a}/\text{m}^6$
$p_0 = 5,0\text{ MPa}$		

Der Rechenfall DR12 weist folgende Parametrisierung auf:

Tab. 2.2 Parameter des Deckgebirgs widerstandes entsprechend DR12

$V_1 = 67\,100\text{ m}^3$	$a_1 = 8,00 \cdot 10^{-4}\text{ MPa} \cdot \text{a}/\text{m}^3$	$b_1 = 3,50 \cdot 10^{-8}\text{ MPa} \cdot \text{a}/\text{m}^6$
$V_2 = 681\,000\text{ m}^3$	$a_2 = 3,15 \cdot 10^{-3}\text{ MPa} \cdot \text{a}/\text{m}^3$	$b_2 = 2,20 \cdot 10^{-9}\text{ MPa} \cdot \text{a}/\text{m}^6$
$V_3 = \infty$	$a_3 = 4,50 \cdot 10^{-3}\text{ MPa} \cdot \text{a}/\text{m}^3$	
$p_0 = 5,58\text{ MPa}$		

2.2.2 Umsetzung in KAFKA

Die Umsetzung der Parametrisierung des Deckgebirgs widerstandes in KAFKA geschieht durch

- eine Modifikation des Strukturmodells (der Modellsegmente, die Bereiche des Rötanhydrits beschreiben) und
- Anpassungen des Programmcodes von KAFKA.

Die Modifikation der Modellsegmente des Deckgebirges ist in Abb. 2.7 wiedergegeben.

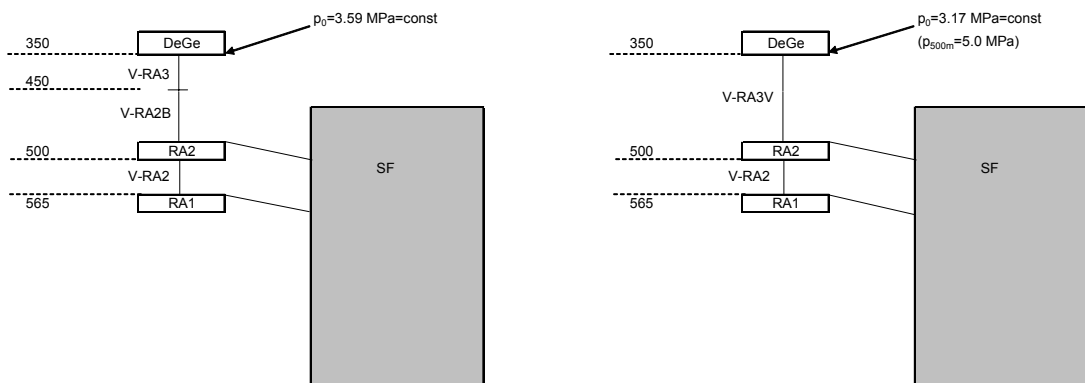


Abb. 2.7 Kafka-spezifische Modellsegmente des Strukturmodells des Deckgebirges (links: bisher, beschrieben in Schlussbericht 2005 Kap. 7.1.2.4; rechts: neu)

In der bisherigen Abbildung der Schnittstelle, beschrieben im Schlussbericht 2005 in Kap. 6.3.9 und 7.1.2.4, wurde zur Berücksichtigung der zeitlich variablen Viskosität der Lösung im Deckgebirge (Schutzfluid verdrängt Deckgebirgslösung) der Widerstand der Modellstrecken V-RA3 und V-RA2B verändert, d. h. zu einem festgelegten Zeitpunkt „geschaltet“. Im neuen Strukturmodell wird der Widerstand des Modellsegmentes V-RA3V (genauer der Fluss über die Verbindungen RA2 – V-RA3V und V-RA3V – DeGe) entsprechend der Parametrisierung (vgl. Kapitel 2.2.1) zeitlich stetig in Abhängigkeit vom Integral über den Ausfluss aus dem Grubengebäude verändert.

Der konstante Druck im Modellsegment DeGe wird so eingestellt, dass als Anfangsbedingung der hydrostatische Druck auf 500m Teufe (p_0) der Parametrisierung entspricht (5,0 MPa für DR13 bzw. 5,58 MPa für DR12). Der anfängliche Widerstand des Modellsegments wird so gewählt, dass bei atmosphärischem Druck an der Zutrittsstelle DG500 (1 at) 12,5 m³ Deckgebirgslösung pro Tag dem Grubengebäude zufließen.

Für die Umsetzung der Parametrisierung gemäß Kapitel 2.2.1 wird der kumulierte Lösungsaustritt aus dem Grubengebäude durch KAFKA fortlaufend bestimmt und der Widerstand $R(V)$ (genauer die beiden Teilwiderstände des Streckensegments über die anschließenden Modellkammern RA2 und DeGe) dem entsprechend angepasst.

2.2.3 Umsetzung in LOPOS

Die Umsetzung der Parametrisierung des Deckgebirgswiderstandes in LOPOS geschieht im Segmentmodell, das die Schnittstelle zwischen dem Grubengebäude und dem Deckgebirge repräsentiert. Die Details der gegenüber der bisherigen Vorgehensweise geänderten Modellierung inklusive der Parameterwerte für die Deckgebirgsrechenfälle DR12 und DR13 sind in [GRS 2006a] angegeben.

In der bisherigen Abbildung der Schnittstelle, beschrieben im Schlussbericht 2005, Kap. 6.3.9 und 7.2.2.5, wurde bis zur vollständigen Verdrängung der Deckgebirgslösung in LOPOS ein linearer Anstieg der Viskosität der (Misch-) Lösung im Deckgebirge angenommen. Aus diesem Anstieg der Viskosität ergab sich im Lauf der Zeit ein Anstieg des Strömungswiderstands um etwa einen Faktor 5. Eine Änderung des hydrostatischen Drucks durch Änderung der Dichte der Lösung im Deckgebirge wurde nicht berücksichtigt.

In der neuen Modellierung wird der hydraulische Widerstand des Deckgebirges durch Ersatzwiderstände der Austrittsstellen-Segmente des Grubengebäudes abgebildet. Das Verhältnis der Strömungswiderstände der beiden Austrittsstellen-Segmente, die die Übertrittsstelle in das Deckgebirge repräsentieren, ist ein Eingabeparameter, dessen Wert in den hier vorgestellten Rechnungen dem in den bisherigen Rechnungen zum Referenzfall (Schlussbericht 2005) entspricht. Aus den Ersatzwiderständen wird der hydrostatische Druck an den Austrittsstellen-Segmenten außerhalb der Grube berechnet. Ersatzwiderstand und hydrostatischer Druck bilden die Modellrandbedingung. Das in LOPOS implementierte Modell bildet den Strömungswiderstand im Deckgebirge mit den in Kapitel 2.2.1 angegebenen Parameterwerten exakt ab. Es wurde anhand von Testrechnungen verifiziert [GRS 2006a].

2.3 Ausbreitung ins Deckgebirge: Transferfunktionen

Im Schlussbericht 2005 zur Langzeitsicherheit des Standorts Asse wird die Wirkung der Ausbreitung von Radionukliden im Deckgebirge als zeitlich konstanter Verdünnungsfaktor bzw. als Verdünnung in einem gegebenen oberflächennahen Grundwasserfluss berücksichtigt. Zum Abbau der mit dem zeitlich konstanten Verdünnungsfaktor verbundenen Konservativität werden die Rückhaltung und die Verdünnung im Deckgebirge hier realitätsnäher durch zeitabhängige Transferfunktionen abgebildet.

2.3.1 Verdünnungsfaktor - Transferfunktionen

Eine der einfachsten Möglichkeiten, die Ausbreitung der Radionuklide im Deckgebirge zu berücksichtigen, besteht darin, die Verweilzeit der Radionuklide im Deckgebirge zu vernachlässigen und die aus dem Grubengebäude austretenden Radionuklidkonzentrationen durch den so genannten „Verdünnungsfaktor“ abzumindern. Dieses Konzept des Verdünnungsfaktors ist in Bezug auf die Modellierung und die Begründung der Deckgebirgs-Modellparameter einfach, aber sehr konservativ.

Die Umsetzung dieses Konzepts hat dazu geführt, dass (1) der ungünstigste Verdünnungsfaktor für den Transportpfad ins Tal von Wittmar ermittelt wird, (2) die erforderliche Transportzeit bei relativ kurzlebigen Radionukliden (z.B. Am-241) bis in dieses Exfiltrationsgebiet nicht berücksichtigt wird und (3) die markant gesunkene Auspressrate von Grubenlösung in das Deckgebirge zu späten Zeiten, wenn die Konzentrationen der langlebigen Radionuklide, wie Pu-239, an der Übertrittsstelle in das Deckgebirge relativ hohe Werte erreichen, nicht gewürdigt wird.

Mit dem Verfahren des Verdünnungsfaktors kann zudem die unterschiedliche Bedeutung von Radionuklidübertritten zu frühen und zu späten Zeiten in das Deckgebirge in Bezug auf die resultierenden Radionuklidkonzentrationen in den Exfiltrationsgebieten nicht berücksichtigt werden.

Mit Hilfe der Transferfunktionen werden hingegen die Verweildauer der Radionuklide im Deckgebirge (allerdings ohne Berücksichtigung der Sorption), der damit einhergehende Zerfall und die Vermischung sowohl mit früher ausgetretener kontaminierter Grubenlösung als auch mit unkontaminiertem Grundwasser auf dem jeweiligen Ausbreitungspfad berücksichtigt.

Die Methode der Transferfunktionen stellt eine vereinfachte Form einer numerischen Berechnung der Radionuklidausbreitung im Deckgebirge dar. Der theoretische Hintergrund zu den Transferfunktionen und das Vorgehen bei deren Ermittlung sind im Bericht [Colenco/GRS 2006] dargestellt. Grundlage der Transferfunktionen sind die Zerlegung von Einströmfunktionen von Lösung oder Lösungsinhaltsstoffen in das Deckgebirge in diskrete Zeitintervalle, die Anwendung Greenscher Funktionen und abschließende Superposition der Systemantworten. Für die Grundlagen und Fehlerbetrachtungen dieses Vorgehens sei auf [Colenco/GRS 2006] verwiesen. Im Ergebnis dieser Verfahren werden für bestimmte Transportpfade Sätze dimensionsloser Transferfunktionen $f_{Ri}(t)$ gewonnen, die die Berechnung von Konzentrationsentwicklungen von Lösungsinhaltsstoffen am Exfiltrations-

gebiet des Transportpfades $c_R^{out}(t)$ auf der Basis von Konzentrationsverläufen im Zeitintervall $[t_i, t_{i+1}]$ beim Übertritt in das Deckgebirge, \bar{c}_i^{in} , gestatten:

$$c_R^{out}(t) = \sum_i \bar{c}_i^{in} \cdot f_{Ri}(t) \quad (2.9)$$

Die Transferfunktionen erlauben es, den hohen Zeit- und Rechenaufwand von wiederholten direkten Berechnungen der resultierenden Radionuklidkonzentrationen in den Exfiltrationsgebieten mit dem Programm NAMMU zu vermeiden, verursachen aber wegen der inhärenten Vereinfachungen zusätzliche Unsicherheiten in den berechneten Ergebnissen.

Zur Ermittlung des Radionuklidtransportes in der Biosphäre und zur Berechnung der daraus resultierenden potenziellen Strahlenexpositionen werden die entsprechenden Dosis-konversionsfaktoren auf die bestimmte Radionuklidkonzentration im Exfiltrationsgebiet angewandt (vergleiche Schlussbericht 2005 Kap. 5.4, 6.3.11 und hier Kap. 2.4).

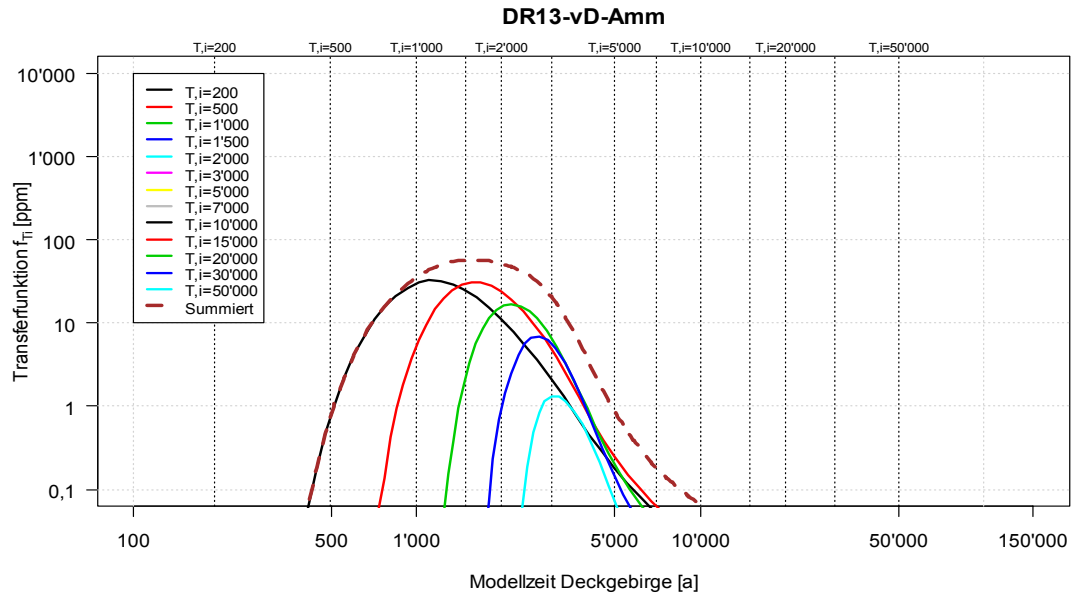
2.3.2 *Ergebnisse der Deckgebirgsmodellierung*

Die Methode der Transferfunktionen wurde für zwei Deckgebirgs-Rechenfälle (DR13 und DR12) umgesetzt, die in Bezug auf die hydraulischen Wegsamkeiten durch den Rötäquitard (so2-so4) in der Südflanke der Salzstruktur eine relativ große Bandbreite aufspannen.

In beiden Rechenfällen wurden die gleichen drei, räumlich begrenzten Exfiltrationsgebiete identifiziert, in denen je nach Rechenfall und Zeit seit Beginn der Lösungsauspressung die berechneten Konzentrationen von Schadstoffen, die aus der Grube ausgepresst wurden, mehr oder weniger ansteigen. Die Exfiltrationsgebiete sind:

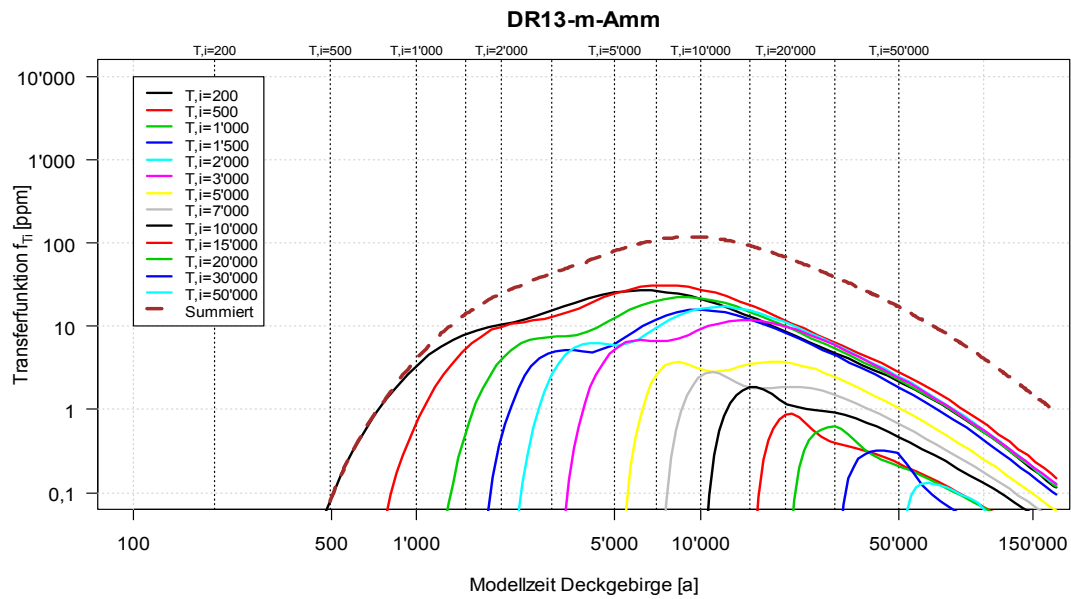
- vD-Amm der Taleinschnitt der Ammerbeek und der Diagonalstörung Groß Vahlberg im verstürzten Deckgebirge
- m-Amm der Taleinschnitt der Ammerbeek im Muschelkalk
- m-Witt der Taleinschnitt des Rothebachs bei Wittmar im Muschelkalk

Die mit den Deckgebirgs-Rechenfällen DR13 und DR12 für die drei Exfiltrationsgebiete ermittelten Transferfunktionen sind in den Abb. 2.8 bis Abb. 2.13 dargestellt. Die Transferfunktionen zeigen direkt die relative Bedeutung der verschiedenen Einstrom-Zeitintervalle für die Tracer- bzw. Schadstoffkonzentration in den drei Exfiltrationsgebieten und zu verschiedenen Zeiten. Beim Vergleich ist allerdings zu beachten, dass die Tracermengen, die in den Rechenfällen zur Berechnung der Transferfunktionen während der verschiedenen Einstrom-Zeitintervalle in das Deckgebirge übertreten, nicht gleich sind. Speziell für das Exfiltrationsgebiet vD-Amm ist von Bedeutung, dass eine nennenswerte Exfiltration dort im Deckgebirgsrechenfall DR13 nur aufgrund eines Schadstoffübertritts in das Deckgebirge erfolgen kann, der früher als ca. 3000 Jahre nach Einsetzen der Lösungsauspressung erfolgt (Abb. 2.8). Im Deckgebirgsrechenfall DR12 führen Schadstoffübertritte bis etwa 7000 Jahre zu einer nennenswerten Exfiltration im Exfiltrationsgebiet vD-Amm (Abb. 2.11).



L:\asse_dms\VR\13\Transferfkt.RMon Apr 24 14:14:52 2006

Abb. 2.8 Transferfunktionen für den Rechenfall DR13 und das Exfiltrationsgebiet im Taleinschnitt der Ammerbeek im verstärzten Deckgebirge (DR13-vD-Amm).



L:\asse_dms\VR\13\Transferfkt.RMon Apr 24 14:14:52 2006

Abb. 2.9 Transferfunktionen für den Rechenfall DR13 und das Exfiltrationsgebiet im Taleinschnitt der Ammerbeek im Muschelkalk (DR13-m-Amm).

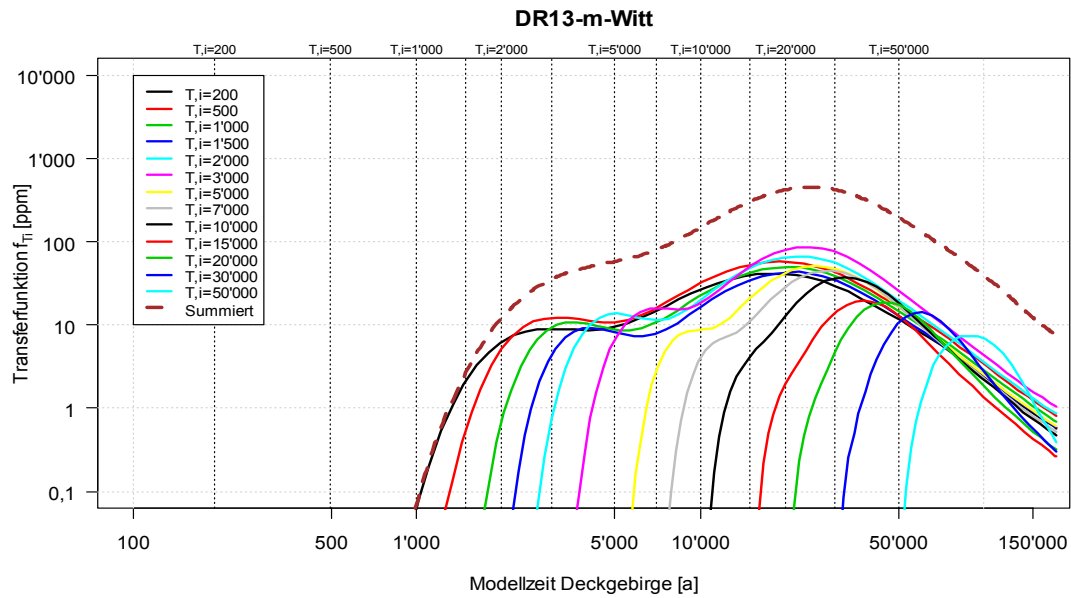


Abb. 2.10 Transferfunktionen für den Rechenfall DR13 und das Exfiltrationsgebiet im Taleinschnitt des Rothebachs bei Wittmar (DR13-m-Witt).

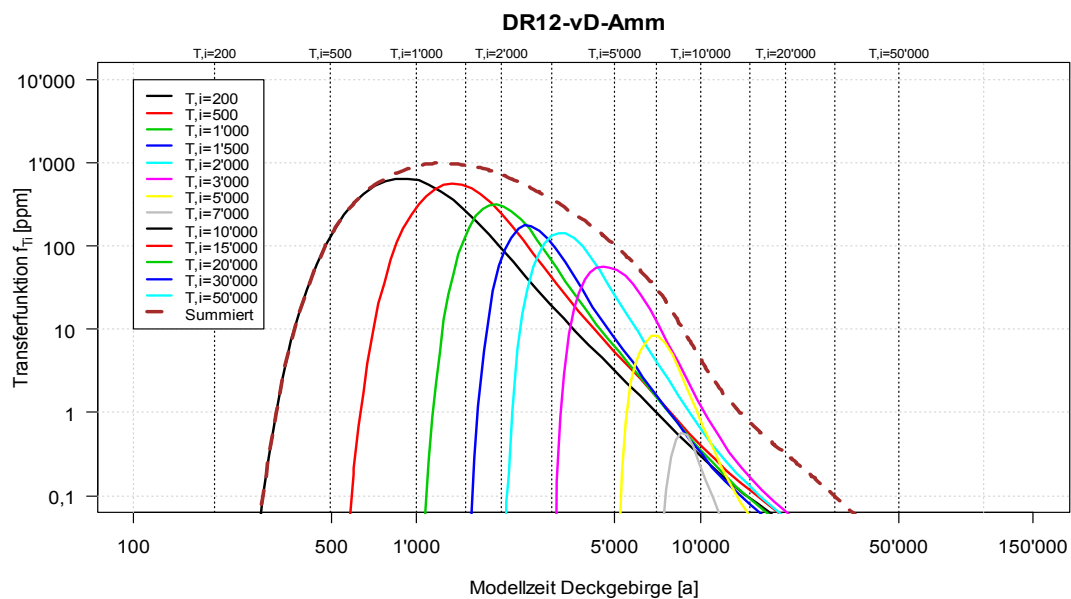


Abb. 2.11 Transferfunktionen für den Rechenfall DR12 und das Exfiltrationsgebiet im Taleinschnitt der Ammerbeek im verstärzten Deckgebirge (DR12-vD-Amm).

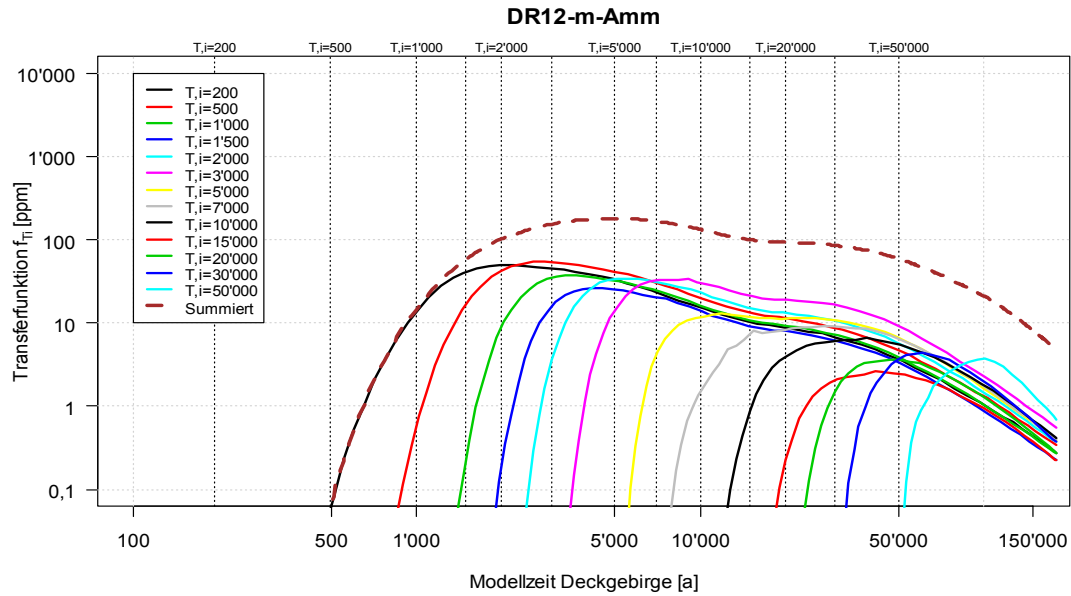


Abb. 2.12 Transferfunktionen für den Rechenfall DR12 und das Exfiltrationsgebiet im Taleinschnitt der Ammerbeek im Muschelkalk (DR12-m-Amm).

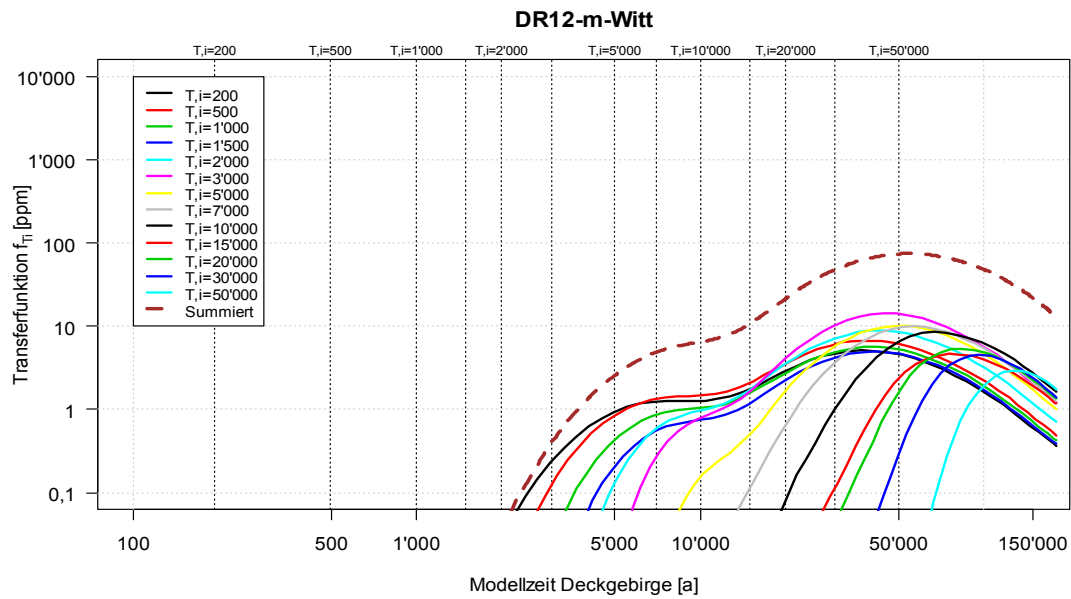


Abb. 2.13 Transferfunktionen für den Rechenfall DR12 und das Exfiltrationsgebiet im Taleinschnitt des Rothebachs bei Wittmar (DR12-m-Witt).

2.3.3 Anwendung in den Modellrechnungen mit KAFKA

Mit KAFKA wird der Transport von ELB-spezifischen Tracern im Grubengebäude berechnet (vgl. Schlussbericht 2005, Kap. 7.1.2.6). Dabei werden zwei Arten von ELB-spezifischen Tracern unterschieden:

- X-Tracer mit einem Anfangsinventar von 10^4 mol in jedem ELB und
- Y-Tracer mit einem Inventar von 10^8 mol in jedem ELB, aber einer Löslichkeitsbegrenzung auf 1 mol/m^3 Lösung.

Die Transferfunktionen lassen sich auf diese Tracer anwenden und dadurch die Verdünnung der ELB-spezifischen Tracer während des Transports bis in die drei betrachteten Expositionspfade bewerten und ggf. zwischen einzelnen Berechnungen vergleichen.

Für die Berechnung der Tracerkonzentration im Übertritt aus der Grube in das Deckgebirge, \bar{c}_i^{in} in Gl. (2.9), werden die mit KAFKA berechneten Tracerflüsse im Rötanhydrit zwischen den Modellsegmenten RA2-K und V-RA3V-K in einer Teufe von 491,6 m verwendet (vgl. Schlussbericht 2005, Kap. 7.1.2.4 und Abb. 2.7, hier).

Analog dem im Bericht [Colenco/GRS 2006] beschriebenen Vorgehen wird eine für die betrachteten Zeitintervalle i gemittelte Konzentration bestimmt:

$$\bar{c}_i^{\text{in}} = \frac{\int_{t_i}^{t_{i+1}} Q_T^{\text{in}}(\tau) d\tau}{\int_{t_i}^{t_{i+1}} Q_{\text{DG}}(\tau) d\tau} \approx \frac{\int_{t_i}^{t_{i+1}} c_i^{\text{in}}(\tau) Q(\tau) d\tau}{\int_{t_i}^{t_{i+1}} Q_{\text{DG}}(\tau) d\tau} \quad (2.10)$$

Diese gemittelte Konzentration ergibt unter der Benutzung der Transferfunktion für das Zeitintervall i die Tracerkonzentration im oberflächennahen Grundwasser und durch Superposition der Konzentrationen aller Zeitintervalle gemäß Gleichung (2.9) die Konzentration des Tracers im oberflächennahen Grundwasser.

Die Bestimmung der Konzentrationsentwicklung der Tracer im Exfiltrationsgebiet lassen auch Aussagen zur Gesamtverdünnung von langlebigen, instantan verfügbaren und nicht-sorbierten Wasserinhaltsstoffen im Grubengebäude und im Deckgebirge zu. Dazu wird die Anfangskonzentration des jeweiligen Tracers im ELB zur Konzentrationsentwicklung im Exfiltrationsgebiet ins Verhältnis gesetzt⁴.

⁴ Für die X-Tracer in LAW1B und MAW wird für die Anfangskonzentration die Konzentration bei maximaler Lösungssättigung (nach Beginn des Eindringens von Schutzfluid in den ELB) gewählt.

2.3.4 Anwendung in den Modellrechnungen mit LOPOS

Die mit dem Modul LOPOS berechneten Radionuklidkonzentrationen an den Austrittsstellen in das Deckgebirge werden mit Hilfe eines weiteren Moduls (Programmname: ACDEC) unter Verwendung der Transferfunktionen weiterverarbeitet. Das Programm ACDEC liefert Radionuklidkonzentrationen in den über die Transferfunktionen vorgegebenen Exfiltrationsgebieten. Die an den beiden Austrittsstellen berechneten Radionuklidkonzentrationen werden dabei entsprechend den jeweiligen Lösungsströmen aus der Grube gewichtet. Der Algorithmus und die Programmierung des Moduls ACDEC sind in [Colenco/GRS 2006] beschrieben.

Die Ausbreitung der Radionuklide im Deckgebirge wird analog zum Vorgehen mit Tracern berechnet, siehe Kapitel 2.3.3. Zusätzlich wird jedoch der radioaktive Zerfall berücksichtigt.

2.4 Dosiskonversionsfaktoren

Die Ableitung der Dosiskonversionsfaktoren wurde nach Fertigstellung des ALSA-C Schlussberichtes 2005 überarbeitet [GSF 2006a]. Ergebnis dieser Überarbeitung sind zwei Sätze Dosiskonversionsfaktoren für Erwachsene, einer für eine potenzielle Kontamination von Grundwasser und einer für eine potenzielle Kontamination von Oberflächenwässern. Obwohl die Werte der Dosiskonversionsfaktoren der beiden Sätze sich nur geringfügig voneinander unterscheiden, sind jene des letzteren vor allem wegen der Berücksichtigung des Verzehrs von Fisch aus Oberflächenwässern des Standorts etwas größer als jene des ersteren. Deshalb sind den im vorliegenden Bericht dargestellten Modellrechnungen die Dosiskonversionsfaktoren für eine Kontamination von Oberflächenwasser zugrunde gelegt worden.

Bei der Ableitung dieser Dosiskonversionsfaktoren wurden geringfügig abweichende Annahmen herangezogen als bei jenen, die dem Schlussbericht 2005 zugrunde lagen. So wird nun unter anderem eine potenzielle Fischzucht in der Gegend des Standortes betrachtet, sodass auch die Exposition durch Verzehr von Süßwasserfisch in Betracht gezogen wird. Dies führt zu einer deutlichen Erhöhung der Dosiskonversionsfaktoren von C-14 sowie von Cs-135 und Cs-137. Die Dosiskonversionsfaktoren der anderen Radionuklide sind gegenüber jenen im Schlussbericht 2005 meist nur geringfügig geändert. Die zur Berechnung der potenziellen Strahlenexposition angesetzten Dosiskonversionsfaktoren gemäß [GSF 2006a] sind in Tab. 2.3 aufgelistet.

Tab. 2.3 Normierte Dosiskonversionsfaktoren für Erwachsenen bei Nutzung von radionuklidhaltigem Oberflächenwasser

Radionuklid	(Sv/a) / (Bq/m ³)	Radionuklid	(Sv/a) / (Bq/m ³)
C-14	$7,7 \cdot 10^{-9}$	Pa-231	$8,7 \cdot 10^{-7}$
Ni-63	$1,9 \cdot 10^{-10}$	U-233	$5,3 \cdot 10^{-8}$
Se-79	$3,1 \cdot 10^{-8}$	U-234	$5,0 \cdot 10^{-8}$
Sr-90	$4,2 \cdot 10^{-8}$	U-235	$6,6 \cdot 10^{-8}$
Tc-99	$1,2 \cdot 10^{-9}$	U-236	$4,8 \cdot 10^{-8}$
Sn-126	$2,5 \cdot 10^{-7}$	U-238	$4,9 \cdot 10^{-8}$
I-129	$1,3 \cdot 10^{-7}$	Np-237	$1,7 \cdot 10^{-7}$
Cs-135	$8,1 \cdot 10^{-9}$	Pu-238	$2,2 \cdot 10^{-7}$
Cs-137	$5,0 \cdot 10^{-8}$	Pu-239	$2,5 \cdot 10^{-7}$
Pb-210	$7,9 \cdot 10^{-7}$	Pu-240	$2,4 \cdot 10^{-7}$
Ra-226	$7,1 \cdot 10^{-7}$	Pu-242	$2,4 \cdot 10^{-7}$
Ra-228	$6,9 \cdot 10^{-7}$	Am-241	$2,0 \cdot 10^{-7}$
Th-230	$2,7 \cdot 10^{-7}$	Am-242m	$1,9 \cdot 10^{-7}$
Th-232	$5,3 \cdot 10^{-7}$	Am-243	$2,2 \cdot 10^{-7}$

3 Modellergebnisse für den Vergleichsfall

Der Rechenfall RX.1 basiert auf dem Referenzfall R8 im Schlussbericht 2005 und enthält zusätzlich alle im Kapitel 2 beschriebenen Aktualisierungen und Verbesserungen. Dieser Rechenfall RX.1 wird im vorliegenden Bericht an einigen Stellen als Repräsentant des Referenzfalls zum Vergleich herangezogen und deshalb als ‚Vergleichsfall‘ bezeichnet. Wie für den Referenzfall werden dabei die Lösungs-, Gas- und Tracertransporte mit KAFKA (Kap. 3.1), und die Radionuklidmobilisierung und –transporte sowie die potenzielle Strahlenexposition mit LOPOS (Kap. 3.2) ausgewertet. Dabei wird im LOPOS-Unterkapitel gegebenenfalls auf Schnittstellen mit KAFKA eingegangen. Der Vergleichsfall bildet eine Schnittstelle zwischen den Rechnungen des Schlussberichtes 2005 und dem vorliegenden Ergänzungsbericht.

3.1 Modellergebnisse KAFKA (RX.1-K)

3.1.1 Auswirkung der veränderten Modellierung im Grubengebäude

3.1.1.1 Lösungsauspress- und Gasaustrittsrate aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge

Die Lösungs- und Gasflüsse über die beiden Modellverbindungen zum Deckgebirge und über die Modellverbindung im Deckgebirge (RA2-V-RA3V; vgl. Kap. 2.2.2) sind in Abb. 3.2 und Abb. 3.3 wiedergegeben. Die gestrichelten Linien sind die Kurven des Referenzfalles R8-K im Schlussbericht 2005, Kap. 9.2.1). Die Unterschiede zum Referenzfall sind in den folgenden zwei Änderungen begründet: eine neue Parametrisierung der Schnittstelle zum Deckgebirge und geänderte Viskosität des Schutzfluids, hier 8 mPa·s. Diese Änderungen haben zur Folge, dass sich die Druckentwicklung im Grubengebäude und in deren Folge die Auspressrate in das Deckgebirge ändern. Die Druckentwicklung in ausgewählten Bereichen des Grubengebäudes im Vergleich zum Referenzfall gibt Abb. 3.1 wieder. Konvergenzbedingt steigt der Druck bis etwa 95 Jahre im gesamten Grubengebäude an. Bedingt durch den Rückgang der Konvergenz (insbesondere im unteren und östlichen Teil des Baufeldes in der Südflanke) nimmt der Druck anschließend stetig ab. Beginnend mit der Freisetzung von Gas aus dem Grubengebäude nach 1 500 Jahren steigt der Druck wieder geringfügig und kurzzeitig (über ca. 200 Jahre) an⁵. Dieser Druckanstieg nach der Freisetzung von Gas ist im gleichzeitigen Fluss von Gas und Lösung im Rötanhydrit begründet.

⁵ Die verbleibende Druckdifferenz am Ende des Betrachtungszeitraumes von 0,5 MPa ist in der abweichenden Parametrisierung des Bezugsdruckes an der Übertrittsstelle in das Deckgebirge (hier $p_0 = 5,0$ MPa; vgl. Kap. 2.2.1; bzw. auf 350 m Teufe von 3,59 MPa in R8-K; Schlussbericht 2005, Kap. 6.3.9) begründet.

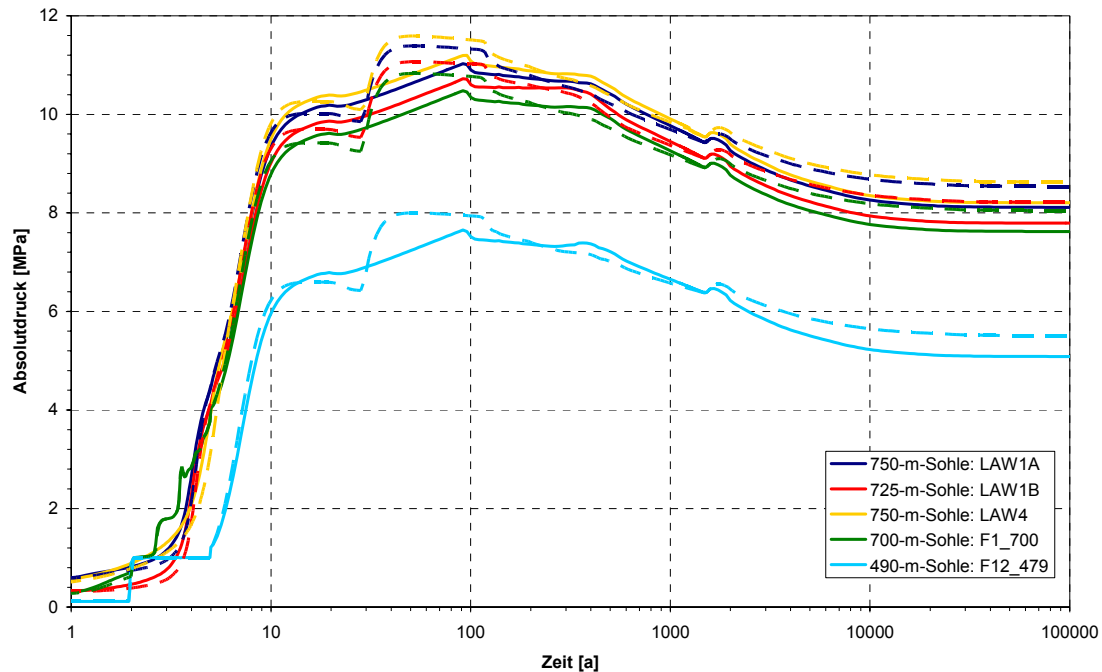


Abb. 3.1 Druckentwicklung in ausgewählten Bereichen des Grubengebäudes (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

Bis ca. 30 Jahre nach Beginn der Berechnungen (zu der Zeit, wo im Referenzfall der instantane Wechsel zum höheren Deckgebirgs widerstand auf die Viskosität der Grubenlösung erfolgte) ist der Lösungsfluss in das Deckgebirge etwas geringer als im Referenzfall R8-K und erreicht nunmehr ein Maximum von ca. $1\,250\text{ m}^3/\text{a}$ nach 14 Jahren. Der durch die Parametrisierung nach Kap. 2.2.1 implizit abgebildete allmähliche Übergang zum höheren Deckgebirgs widerstand begründet anschließend einen höheren Lösungsfluss als in R8-K (bis ca. 100 Jahre). Nach ca. 700 Jahren sind die Unterschiede nur noch gering und weichen von denen des Referenzfalles nur noch um maximal 12% (nach 100 000 Jahren) ab. Auch der Verlauf der kumulierten Lösungsauspressung stimmt recht gut in beiden Fällen überein.

Der kumulierte Lösungsfluss erreicht V_1 ($81\,400\text{ m}^3$) nach 110 Jahren, V_2 ($206\,000\text{ m}^3$) nach 390 Jahren und V_3 ($875\,000\text{ m}^3$) nach 6 300 Jahren. Bei diesen Volumina ändert sich die Parametrisierung des Widerstandes (Tab. 2.1 in Kap. 2.2.1), d.h. der Anstieg der Widerstandsänderung mit fortschreitender Lösungsauspressung.

Auf den Gasfluss aus dem Grubengebäude – wie im Referenzfall nach ca. 1 500 Jahren einsetzend – haben die Änderungen keinen Einfluss⁶.

⁶ Die Oszillationen im Lösungs- und Gasfluss zu sehr späten Zeiten (ab ca. 50 000 Jahre) bei Lösungsflüssen von weniger als $1\text{ m}^3/\text{a}$ bzw. Gasflüssen $<10\text{ m}^3_{\text{STP}}/\text{a}$ sind bei kleinsten Druckdifferenzen an der Übertrittsstelle und gleichzeitigem Zweiphasenfluss numerisch begründet.

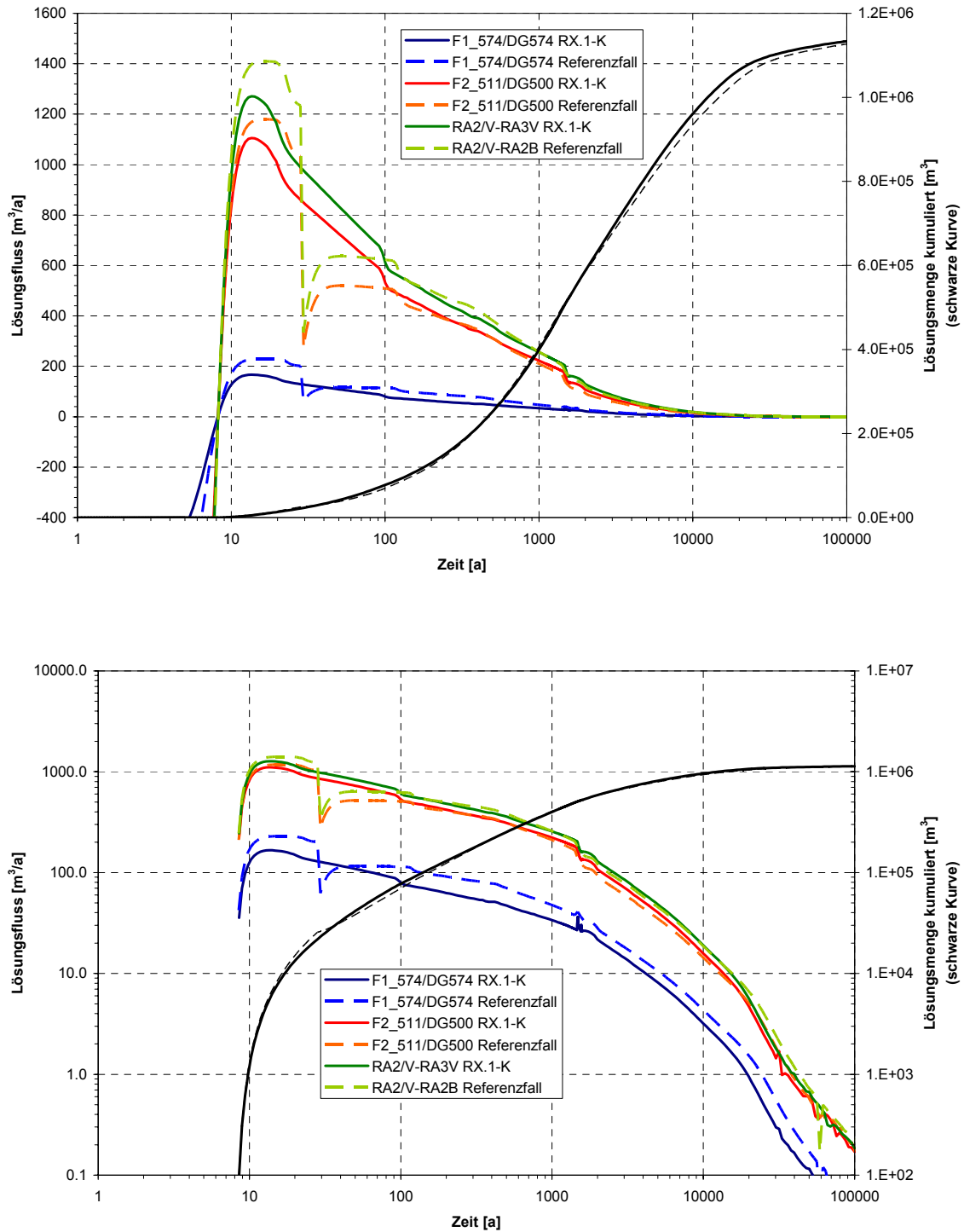


Abb. 3.2 Lösungsflüsse aus dem Grubengebäude (oben linear, unten logarithmisch) (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

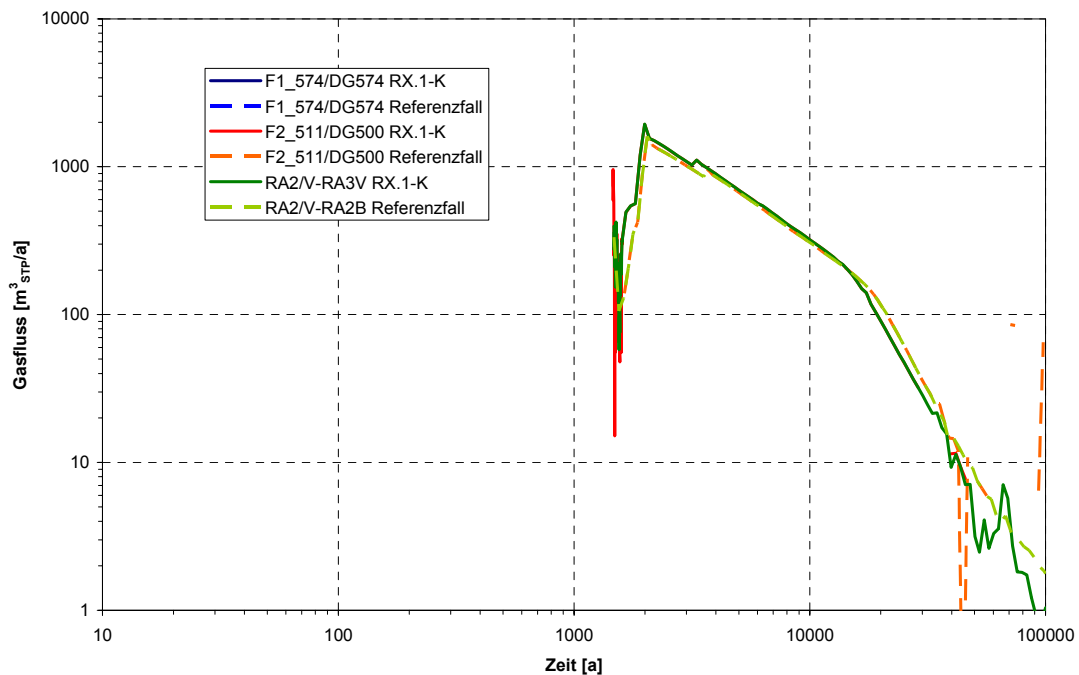
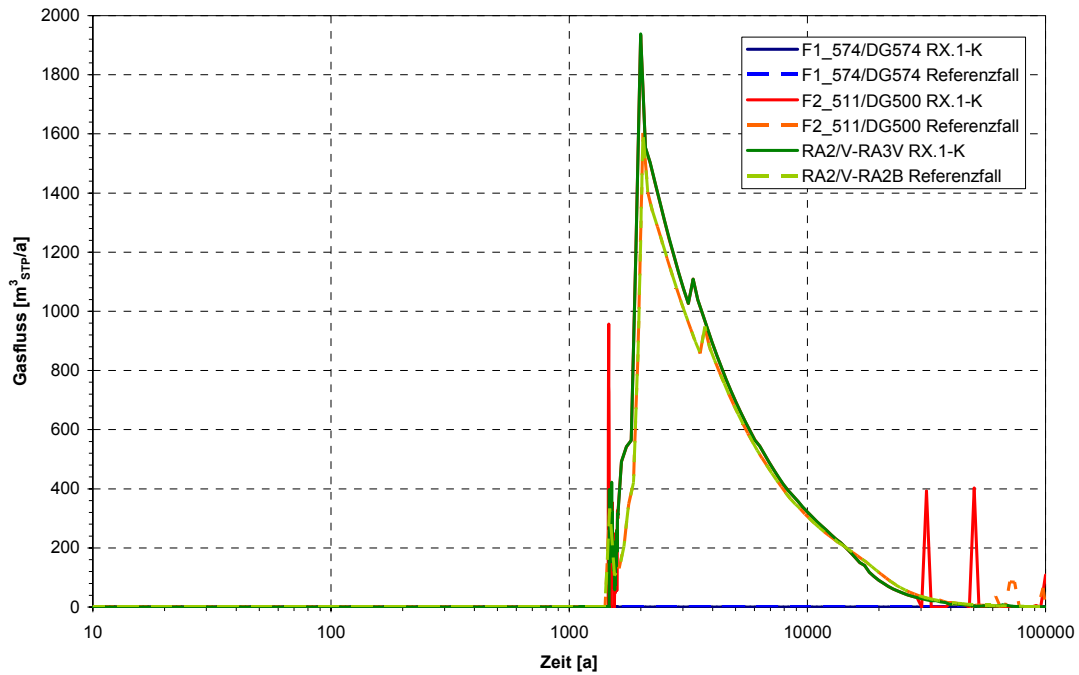


Abb. 3.3 Gasflüsse aus dem Grubengebäude (oben linear, unten logarithmisch) (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

3.1.1.2 Gasflüsse und Gasspeicherung im Grubengebäude

Die Lösungssättigung und –pegel in den LAW-Einlagerungsbereichen sind in Abb. 3.4 wiedergegeben. In LAW1B ist das Gaspolster geringfügig kleiner (0,79 statt 0,83) und in LAW3 geringfügig größer (0,24 statt 0,23) als im Referenzfall. Ursache für die Abweichungen sind die geringfügig veränderten Drücke im Grubengebäude in den ersten 100 Jahren.

Änderungen in allen anderen Grubenbereichen sind vernachlässigbar⁷. Auf die Gaspfade und die Zeitpunkte ihrer Aktivierung haben die Änderungen keinen Einfluss (vgl. Schlussbericht 2005 Kap. 9.2.3, Abb. 9.8 und 9.9).

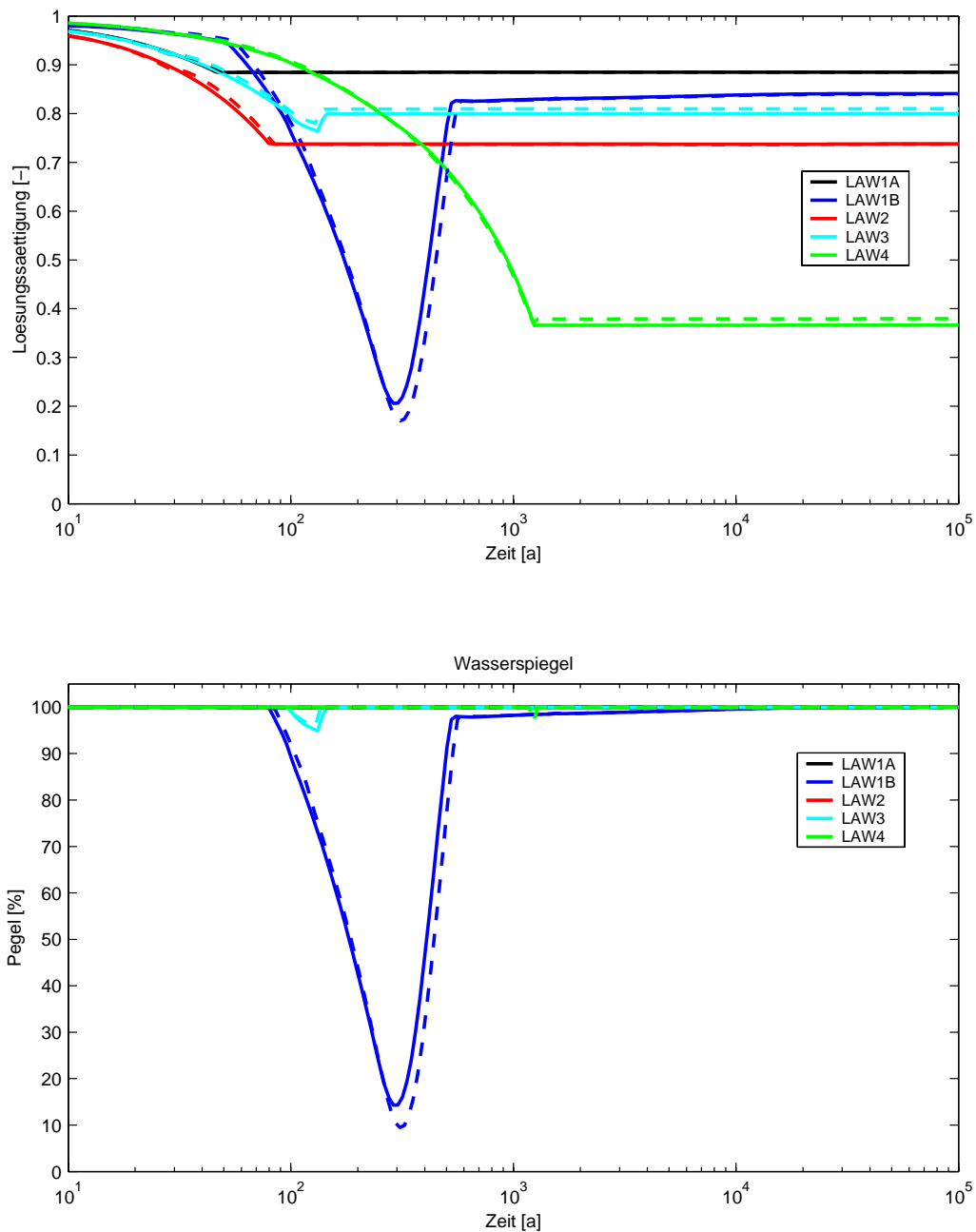


Abb. 3.4 Lösungssättigung und –pegel in den LAW-ELB (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

⁷ Lediglich im Modellbereich UMAW (Modellkammer für Abbaue 8a/ und 8b/532) wird mit 0,90 – d.h. trocken bis auf residuale Lösungssättigung – ein im Vergleich zum Referenzfall etwas höheres Gaspolster berechnet (dort: 0,88, vgl. Schlussbericht 2005, Kap. 9.2.1, Tab. 9.2)

3.1.1.3 Transportprozesse der Lösungsverdrängung aus den ELB

Die Gewichtung der an der Auspressung von Lösung aus den LAW ELB beteiligten Prozesse – Lösungsaustausch, Lösungsverdrängung durch Gasspeicherung und Konvergenz – ist in den Abb. 3.5 bis Abb. 3.9 wiedergegeben. Lediglich in LAW1B und LAW3 bewirken die veränderten Gasspeicher auch Änderungen in der Lösungsverdrängung durch Gasspeicherung bis zum Gasabfluss. In LAW1B wird durch den etwas kleineren Gasspeicher bis 110 Jahre weniger Lösung durch Gasspeicherung verdrängt, in LAW3 bis 105 Jahre geringfügig mehr. Alle anderen Prozesse, auch in anderen ELB, werden nicht oder nur vernachlässigbar beeinflusst.

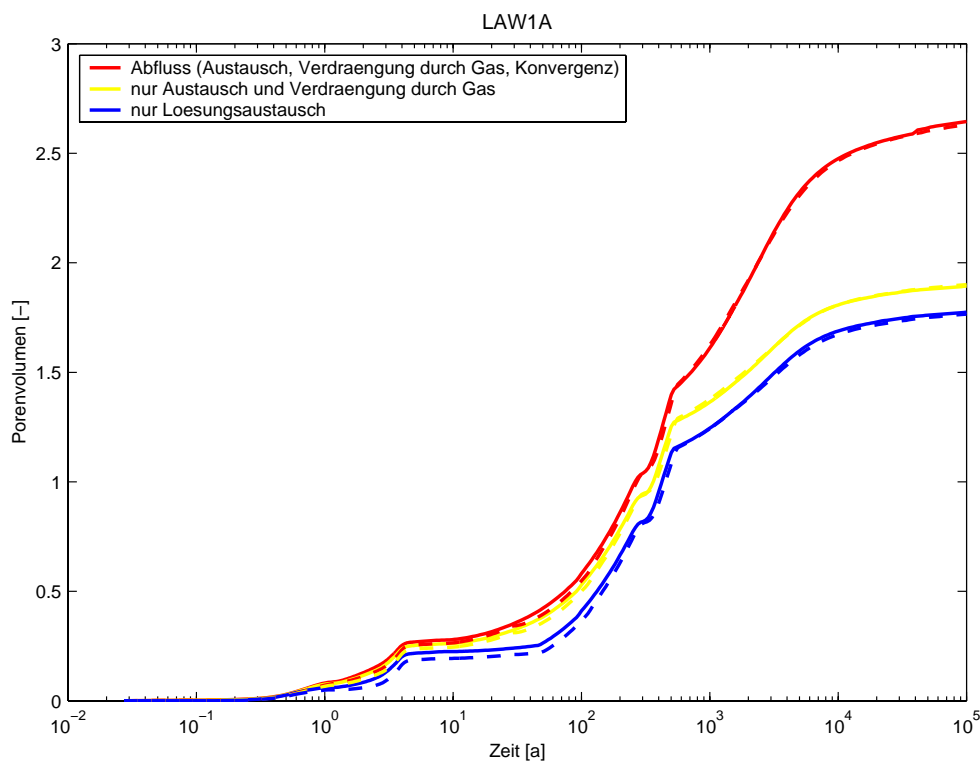


Abb. 3.5 Lösungsfluss aus dem ELB LAW1A bezogen auf das anfängliche Porenvolumen (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

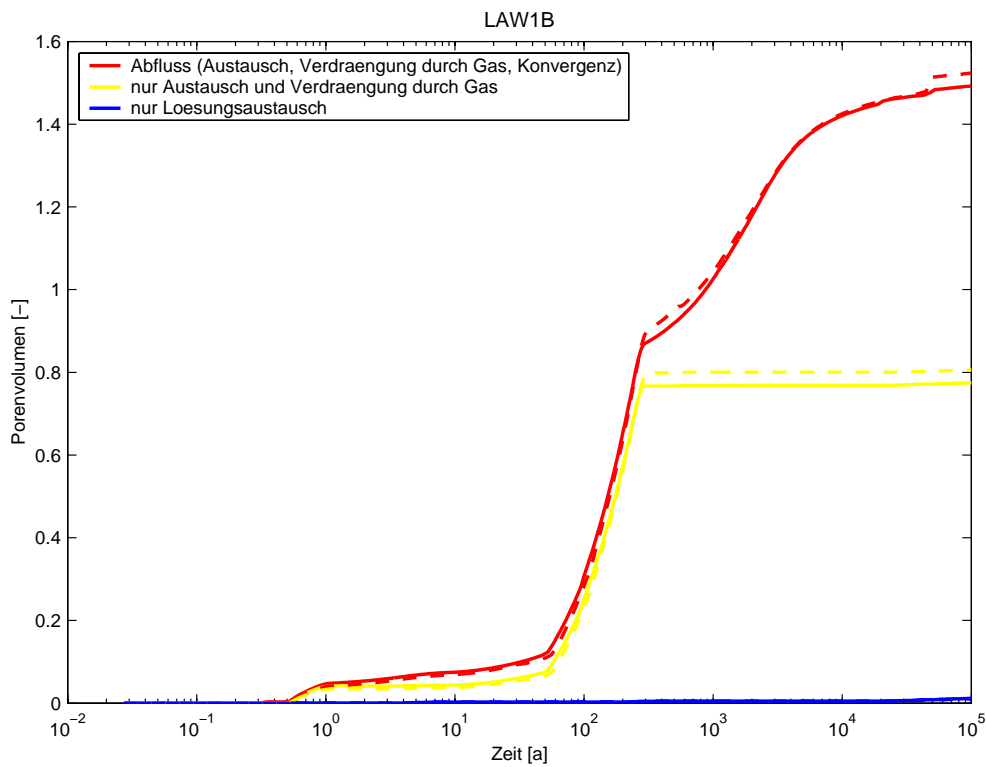


Abb. 3.6 Lösungsfluss aus dem ELB LAW1B bezogen auf das anfängliche Porenvolumen (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

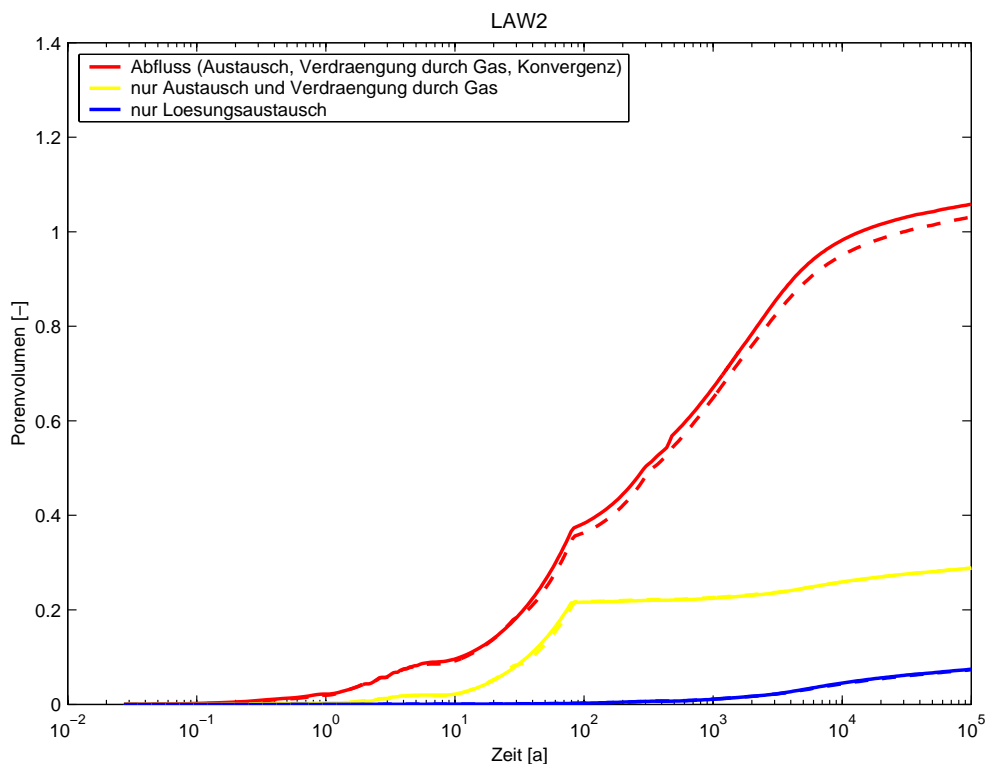


Abb. 3.7 Lösungsfluss aus dem ELB LAW2 bezogen auf das anfängliche Porenvolumen (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

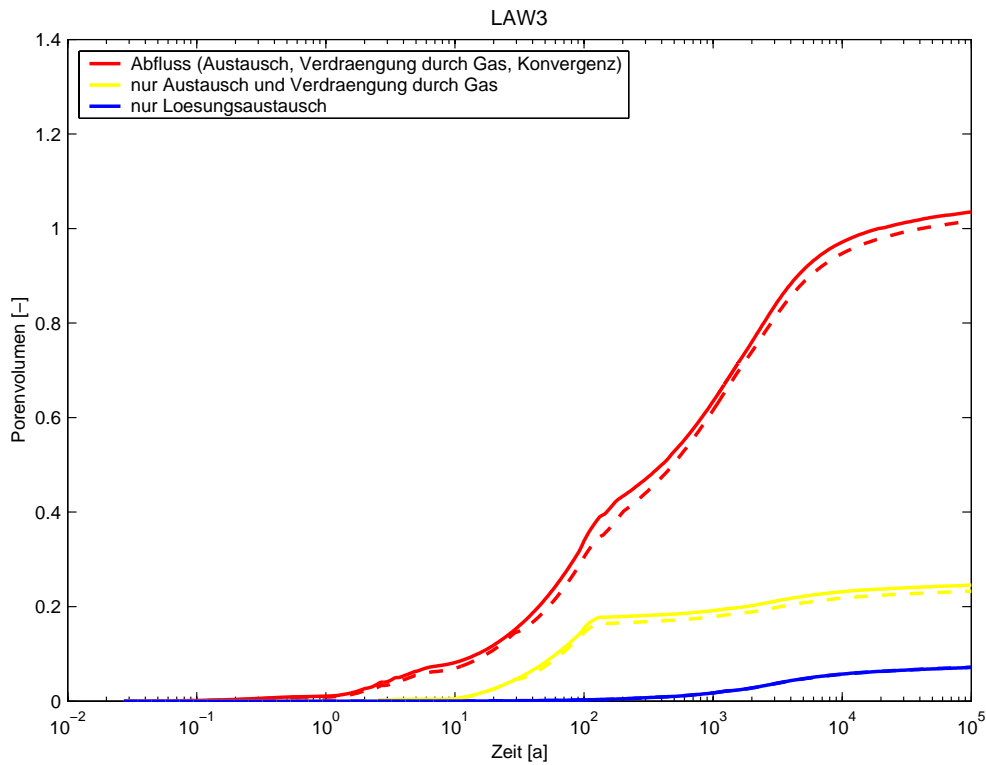


Abb. 3.8 Lösungsfluss aus dem ELB LAW3 bezogen auf das anfängliche Porenvolumen (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

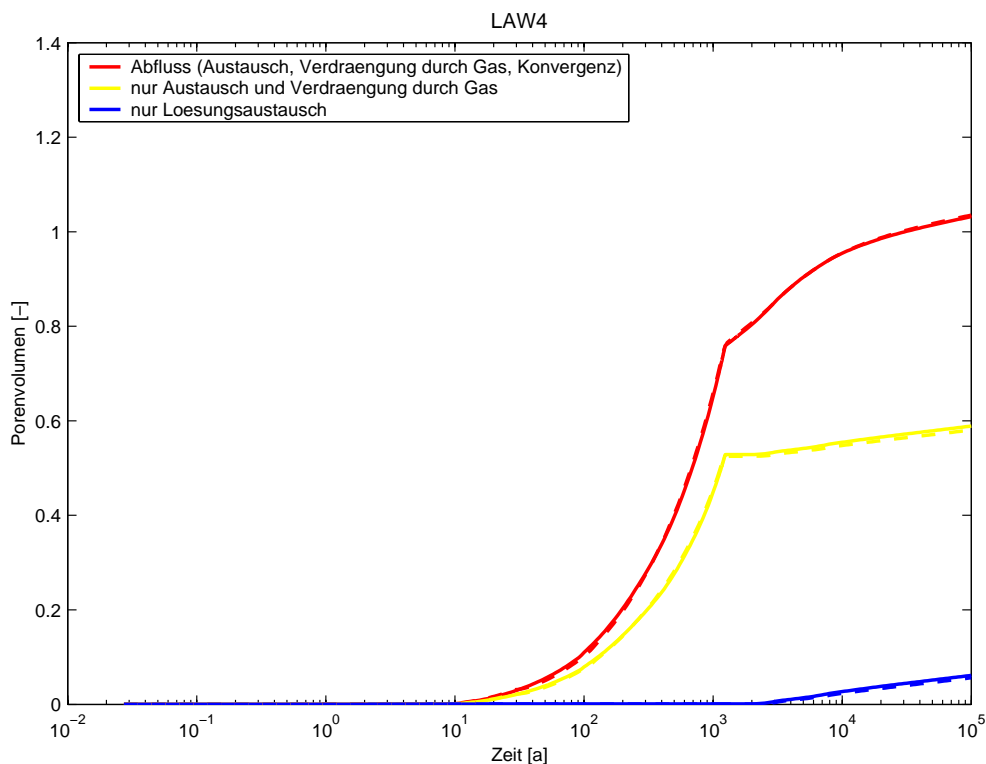


Abb. 3.9 Lösungsfluss aus dem ELB LAW4 bezogen auf das anfängliche Porenvolumen (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

3.1.1.4 *Lösungsfluss und Tracertransport zwischen den Einlagerungs- und Nahbereichen*

Die Lösungsflüsse aus den bzw. in die LAW-ELB, sowie die Tracerflüsse, getrennt für Tracer X (inventarbestimmt) und Y (löslichkeitsbegrenzt), sind in den Abb. 3.10 bis Abb. 3.19 wiedergegeben. Zu frühen Zeiten, bis etwa 30 Jahre, beeinflusst die geänderte Schnittstelle den Lösungsfluss auch im Nahbereich. Der Wegfall der „sprunghaften“ Widerstandsänderung führt zu einem kontinuierlichen Druckverlauf im Grubengebäude und damit zu kontinuierlichen Lösungsflüssen auch im Nahbereich. Dies hat jedoch weder auf die dominierenden Transportwege noch auf die Höhe der Zu- und Abflüsse relevante Auswirkungen. Zu späten Zeiten, wenn diffusive Transportprozesse wirksam werden, gibt es geringfügige Unterschiede zum Referenzfall, die durch geänderte Diffusionskoeffizienten begründet sind. So ist beispielsweise der diffusive Austausch zwischen LAW1A über die Schwebe(n) zu den Abbauen 1/, 2/, 3/ und 3a/775 (ULAW1) etwas stärker, der Austausch von LAW1B über die Strömungsbarrieren in der Wendelstrecke (V-LAW1B) und über die Schwebe zu LAW1A (S-LAW1A) geringer als im Referenzfall. Ebenfalls geringer ist der Austausch von LAW2 über die Strömungsbarrieren zu LAW1A (H-2.AS) bzw. zum Abbau 3/750Na3 (H-2.NK), der von LAW3 über die Strömungsbarriere zum Älteren Steinsalz (H-3.AS) und der von LAW4 zu LAW3 (über die Strömungsbarriere in der südlichen Richtstrecke nach Osten – Modellverbindung H-3.4).

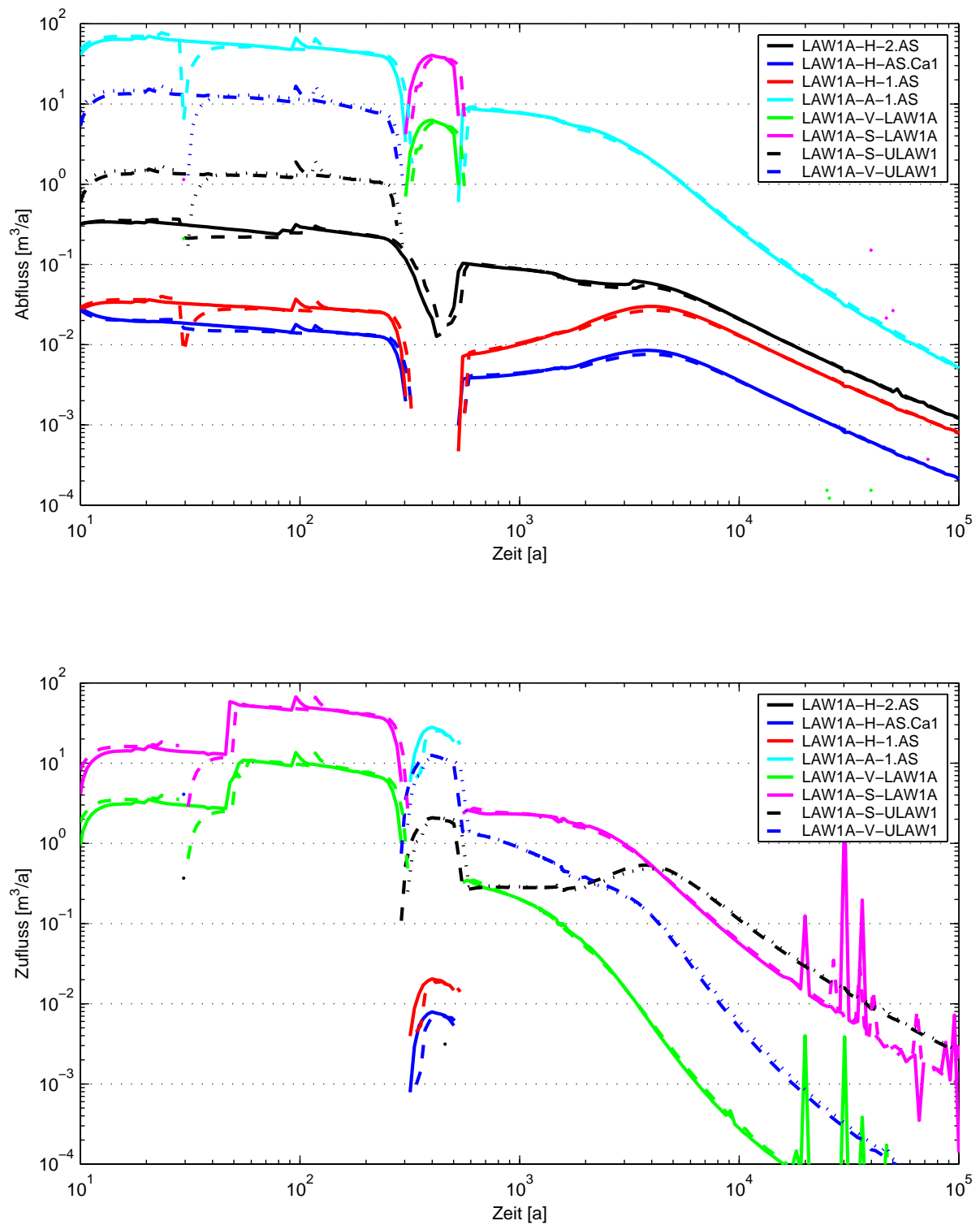


Abb. 3.10 Lösungsabfluss aus (oben) und Zufluss zu (unten) LAW1A (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

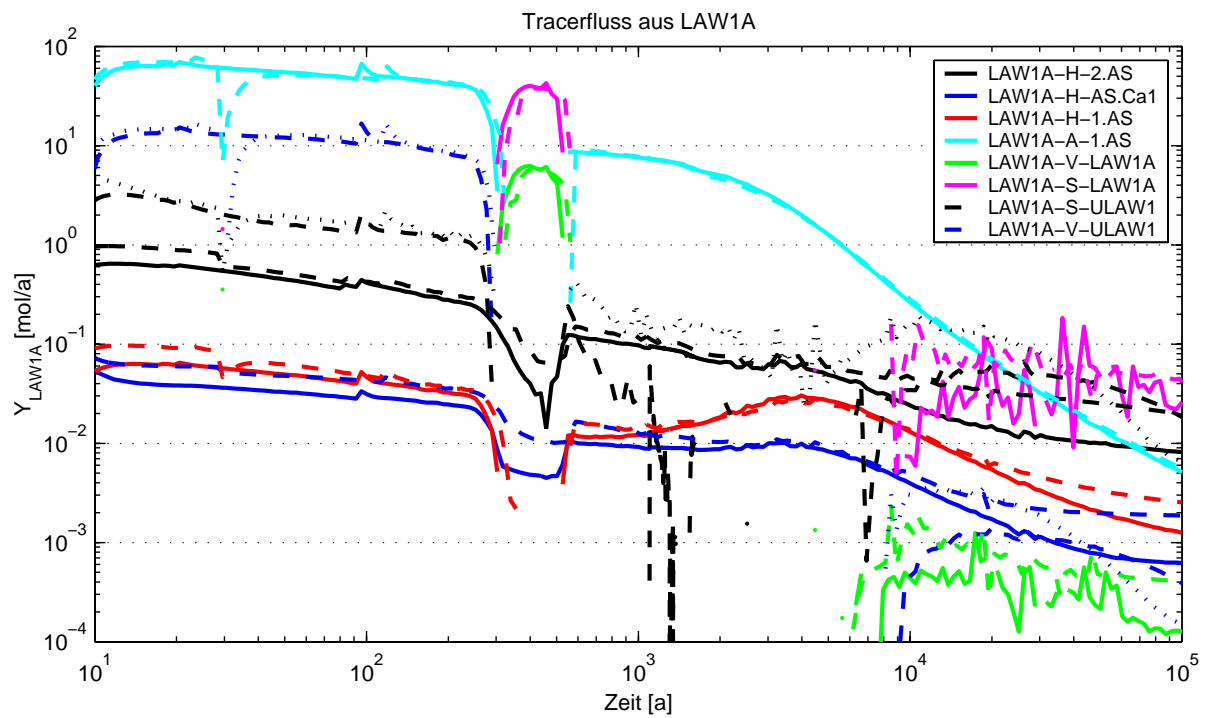
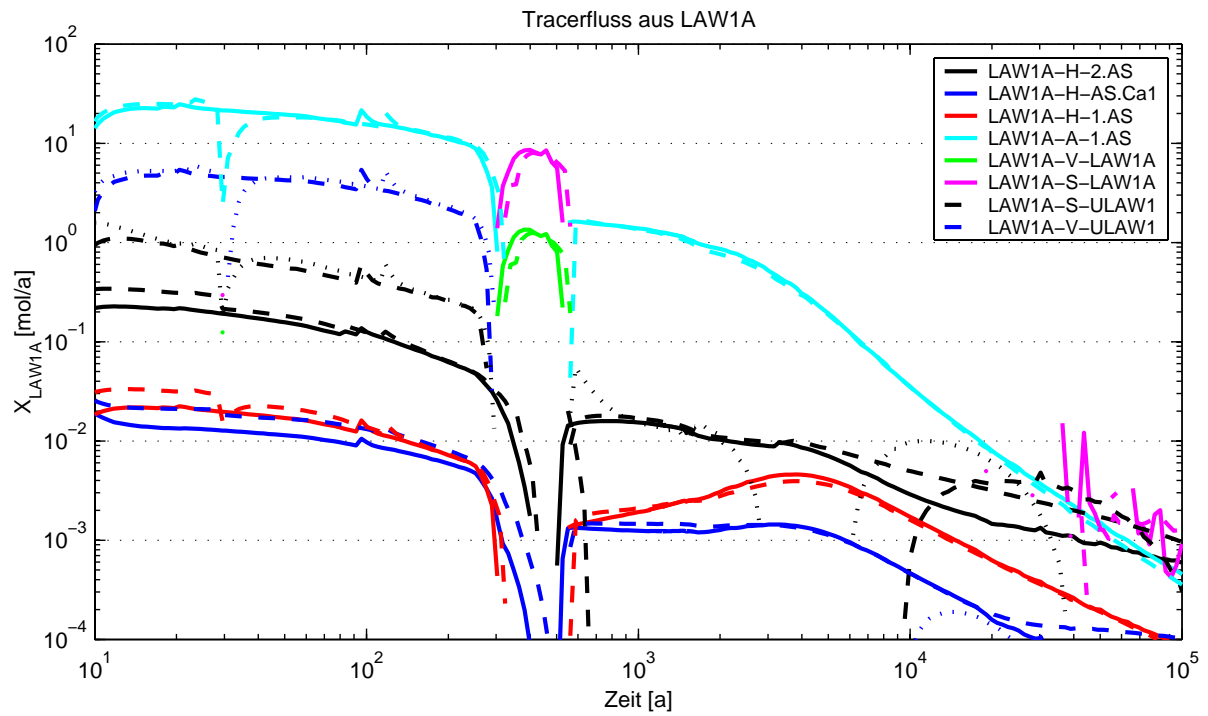


Abb. 3.11 Fluss der Tracer X und Y aus dem ELB LAW1A (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

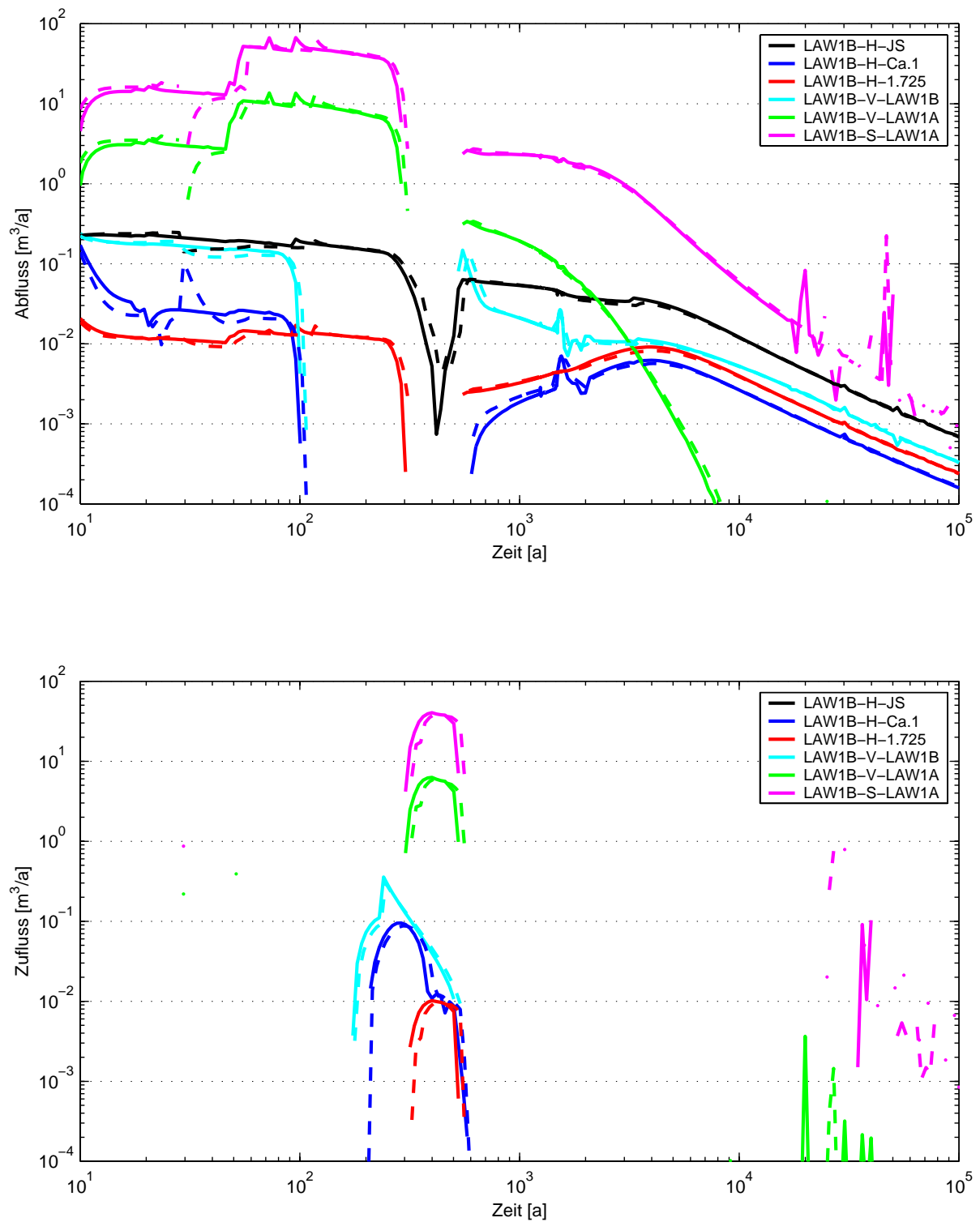


Abb. 3.12 Lösungsabfluss aus (oben) und Zufluss zu (unten) LAW1B (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

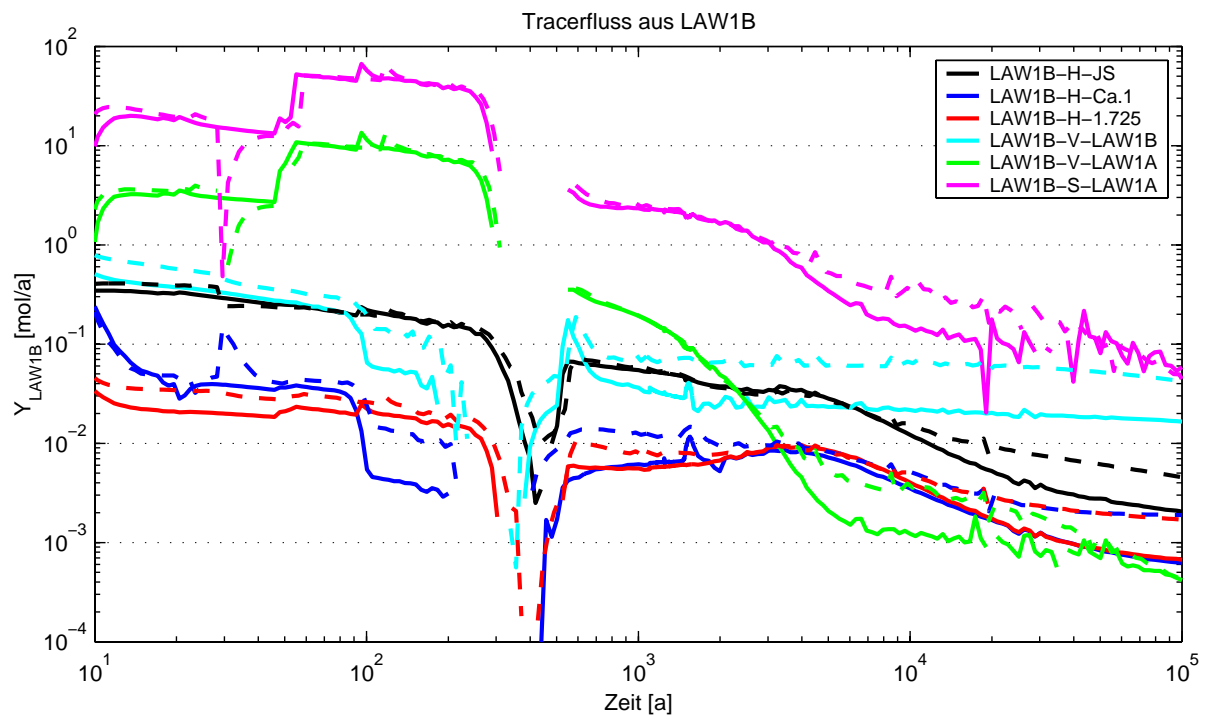
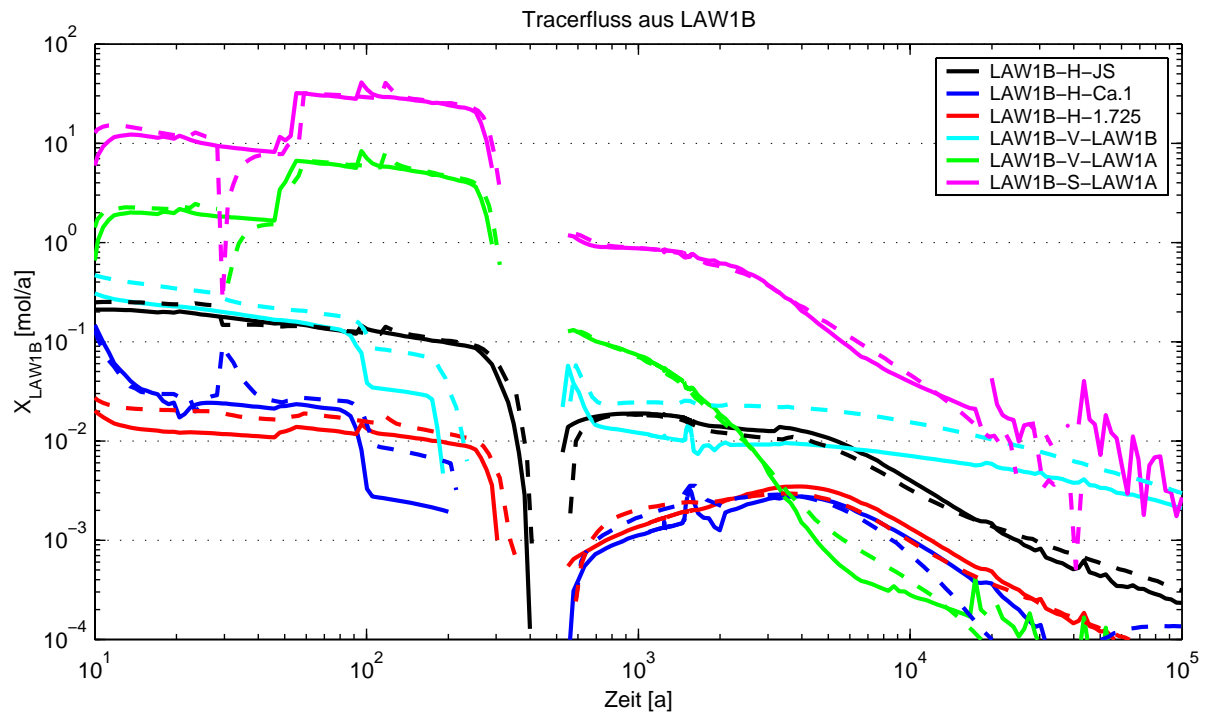


Abb. 3.13 Fluss der Tracer X und Y aus dem ELB LAW1B (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

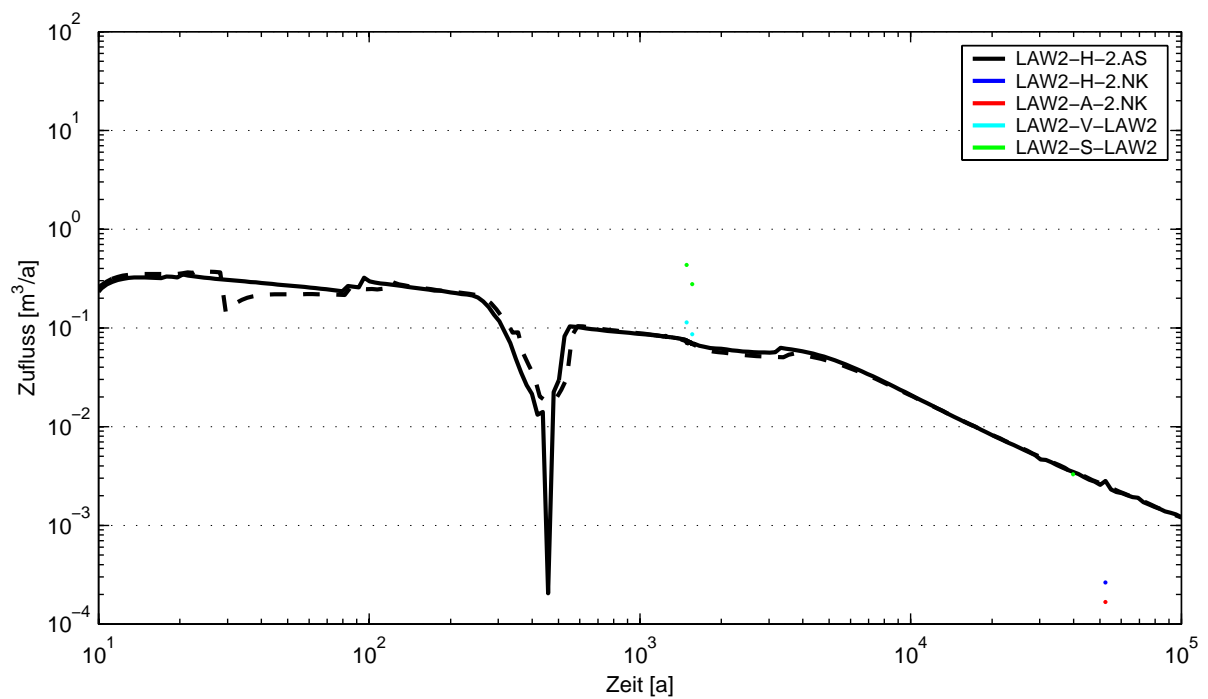
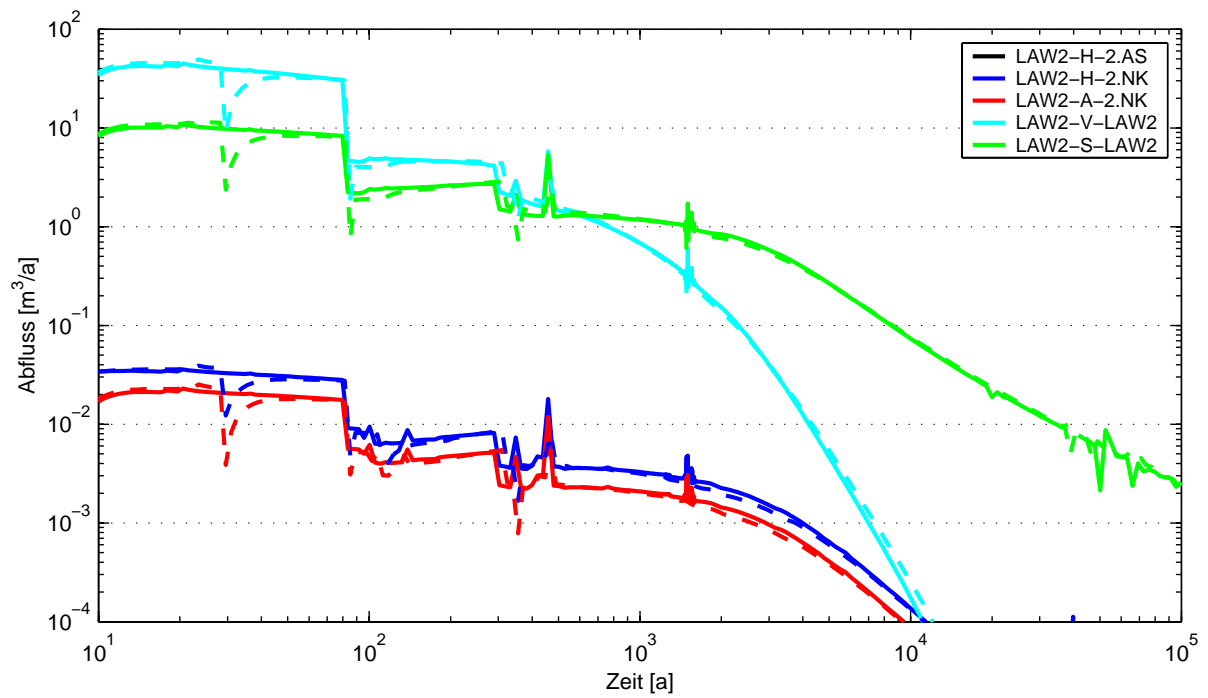


Abb. 3.14 Lösungsabfluss aus (oben) und Zufluss zu (unten) LAW2 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

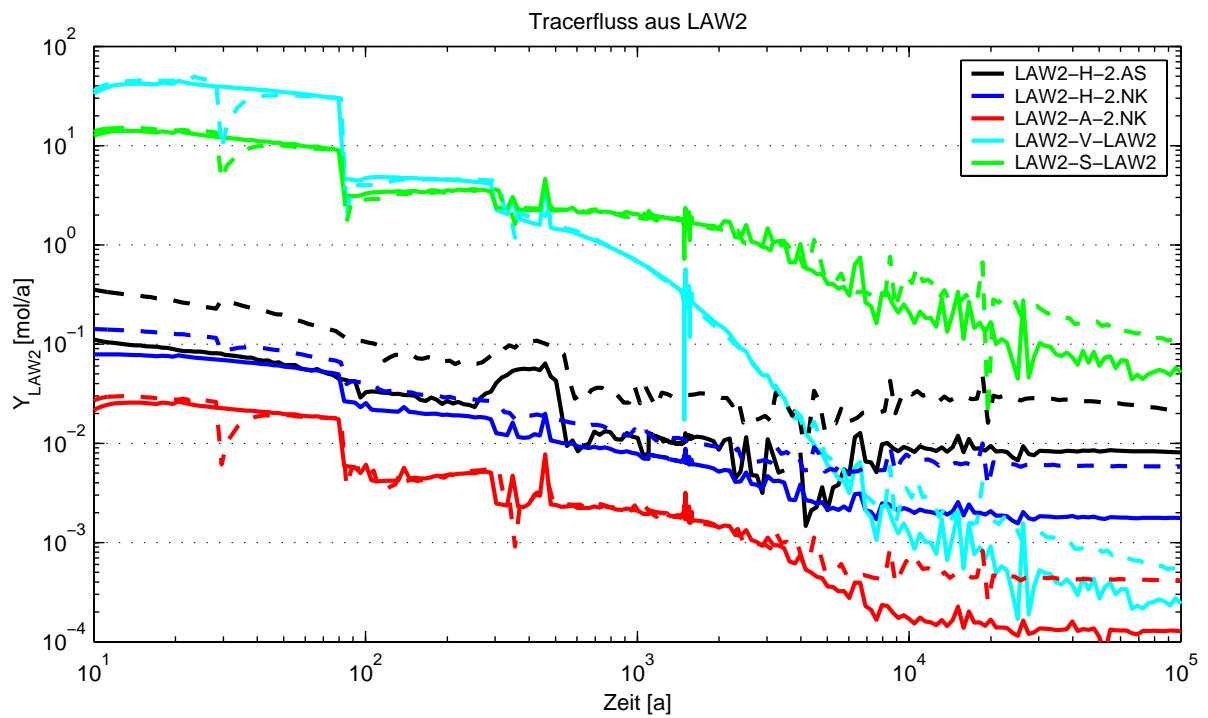
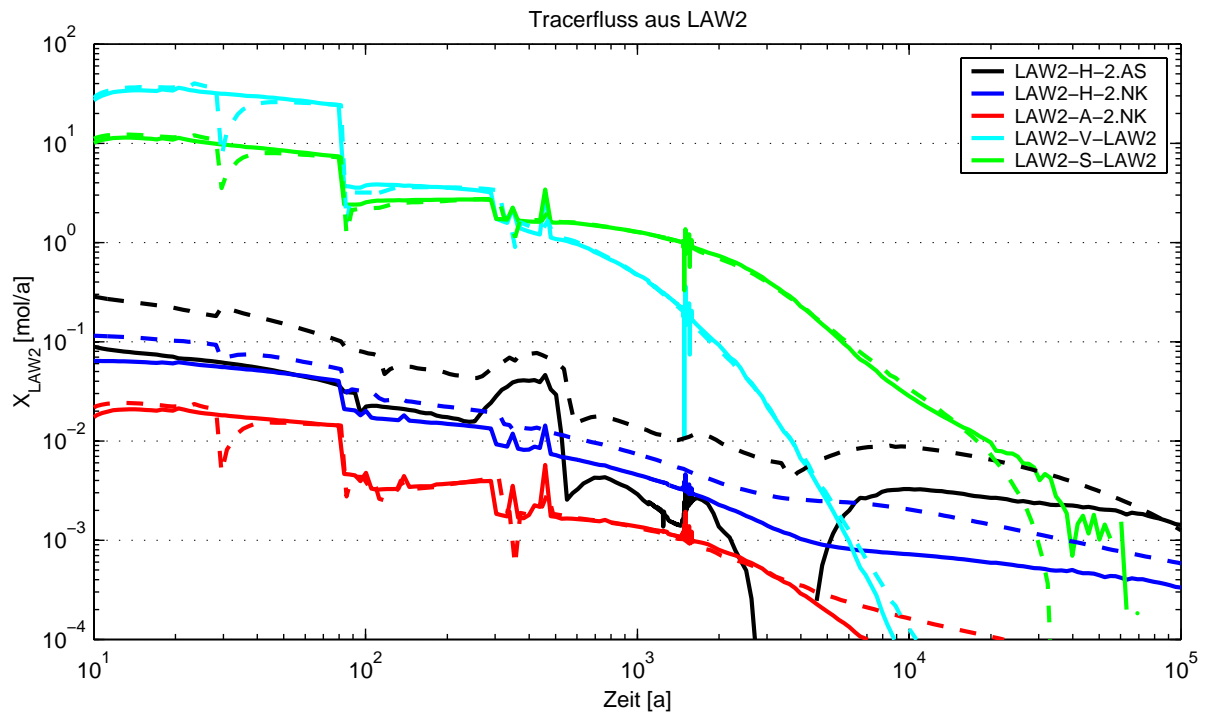


Abb. 3.15 Fluss der Tracer X und Y aus dem ELB LAW2 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

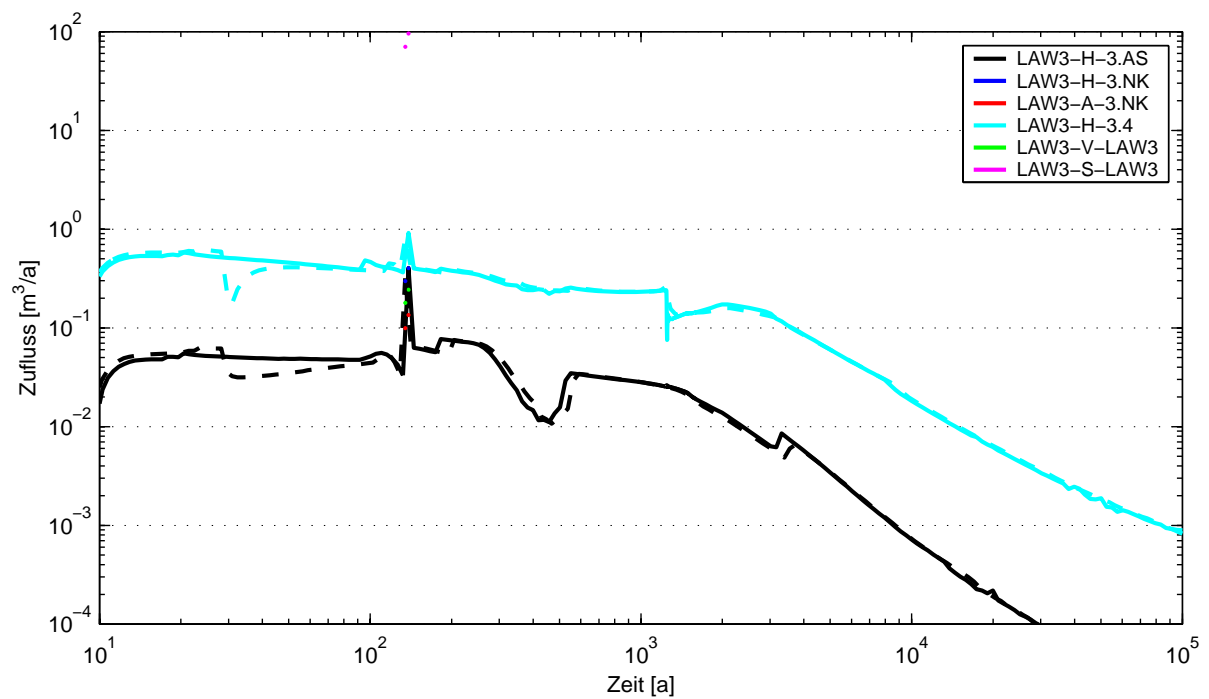
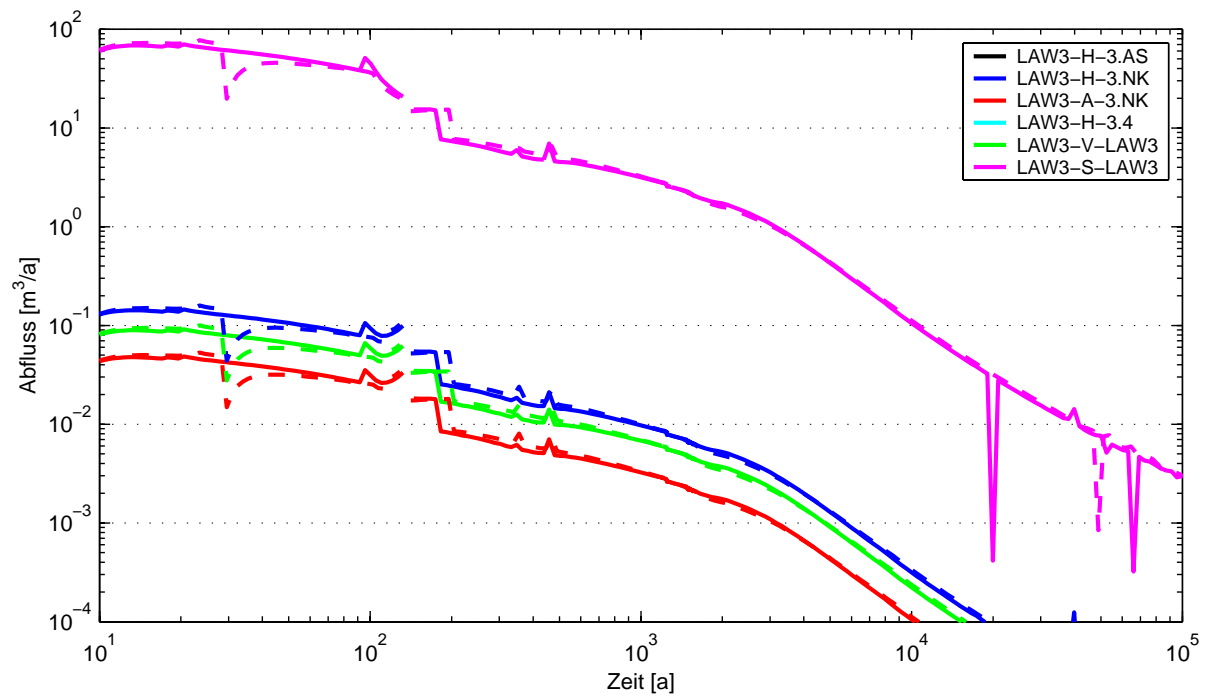


Abb. 3.16 Lösungsabfluss aus (oben) und Zufluss zu (unten) LAW3 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

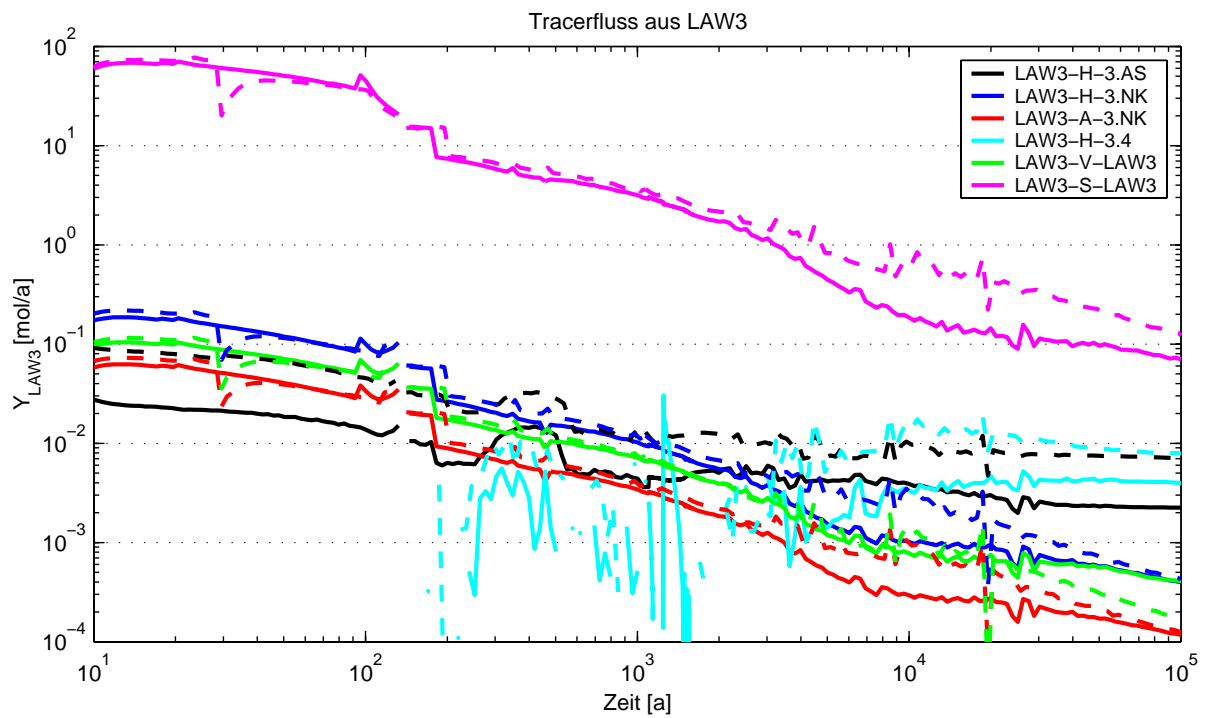
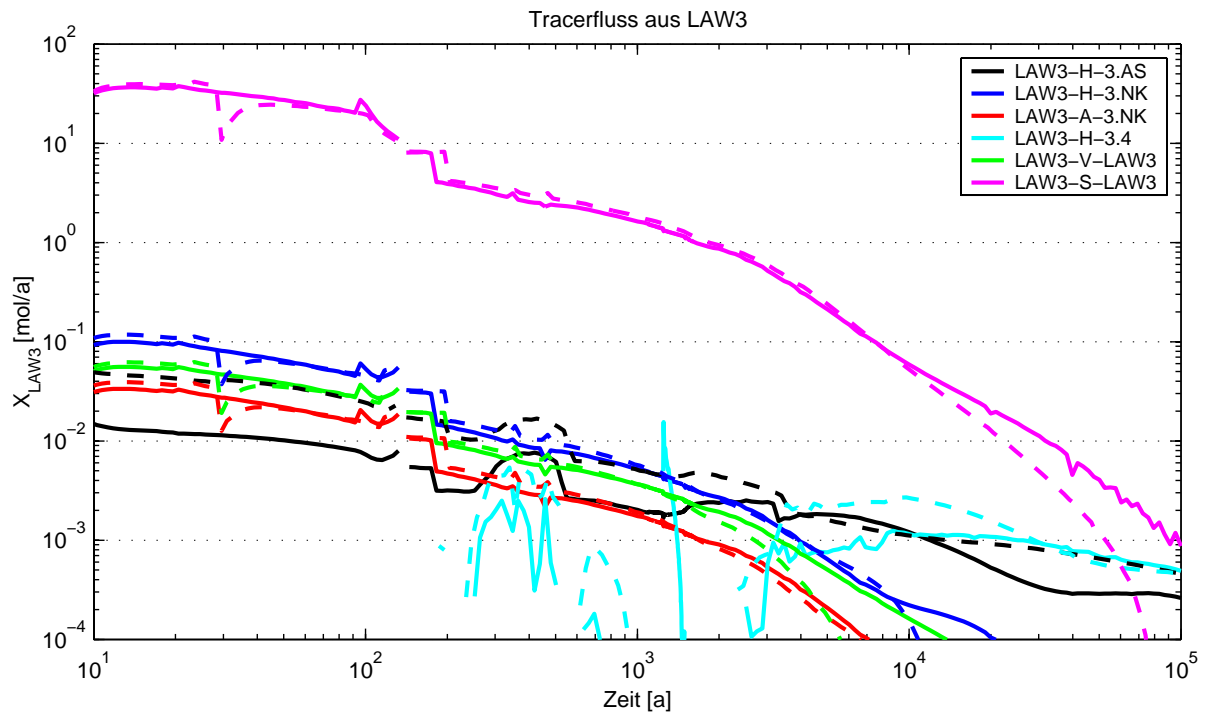


Abb. 3.17 Fluss der Tracer X und Y aus dem ELB LAW3 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

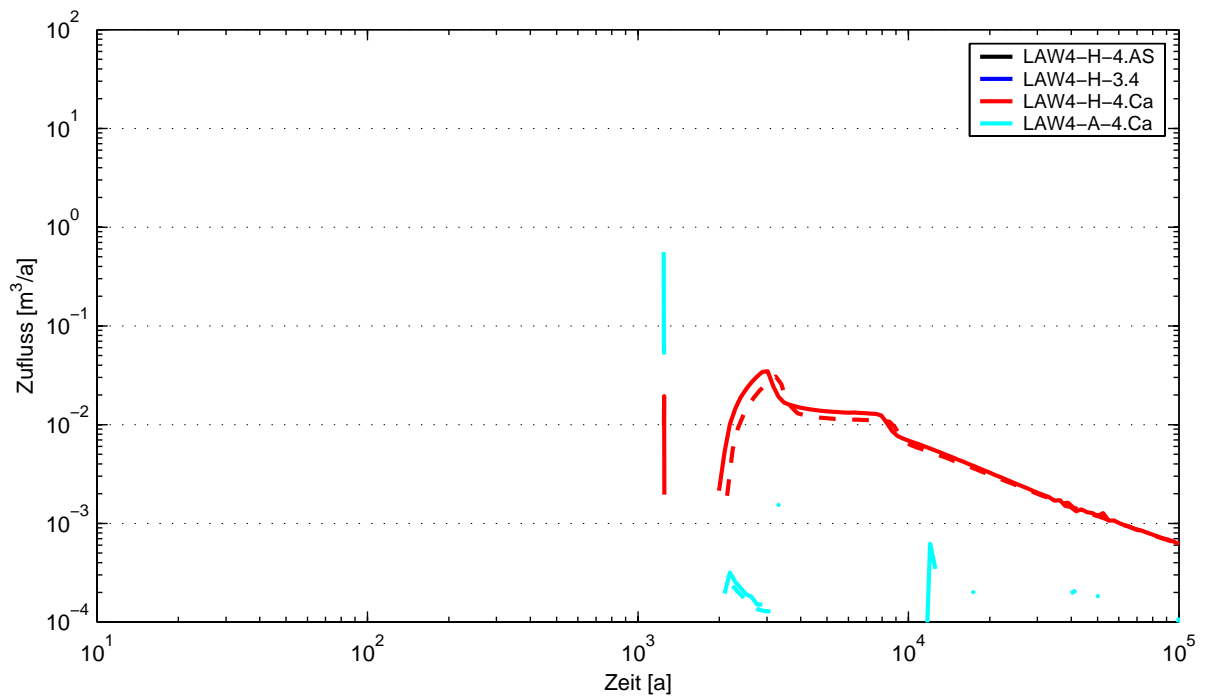
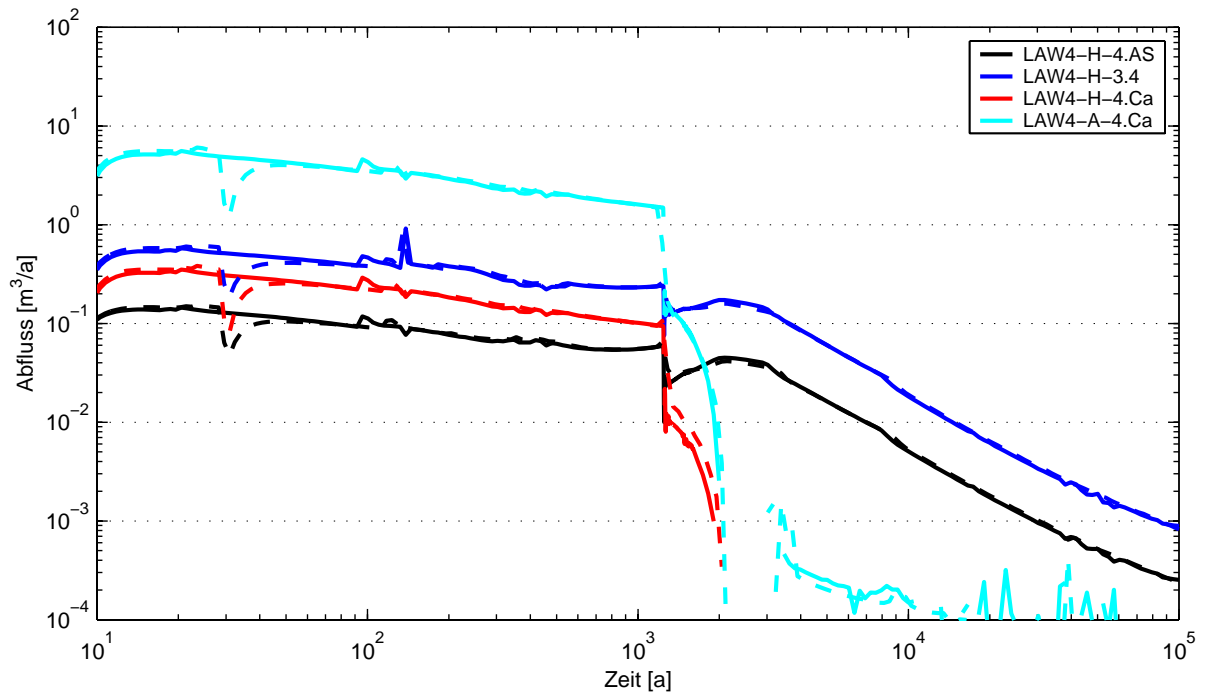


Abb. 3.18 Lösungsabfluss aus (oben) und Zufluss zu (unten) LAW4 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

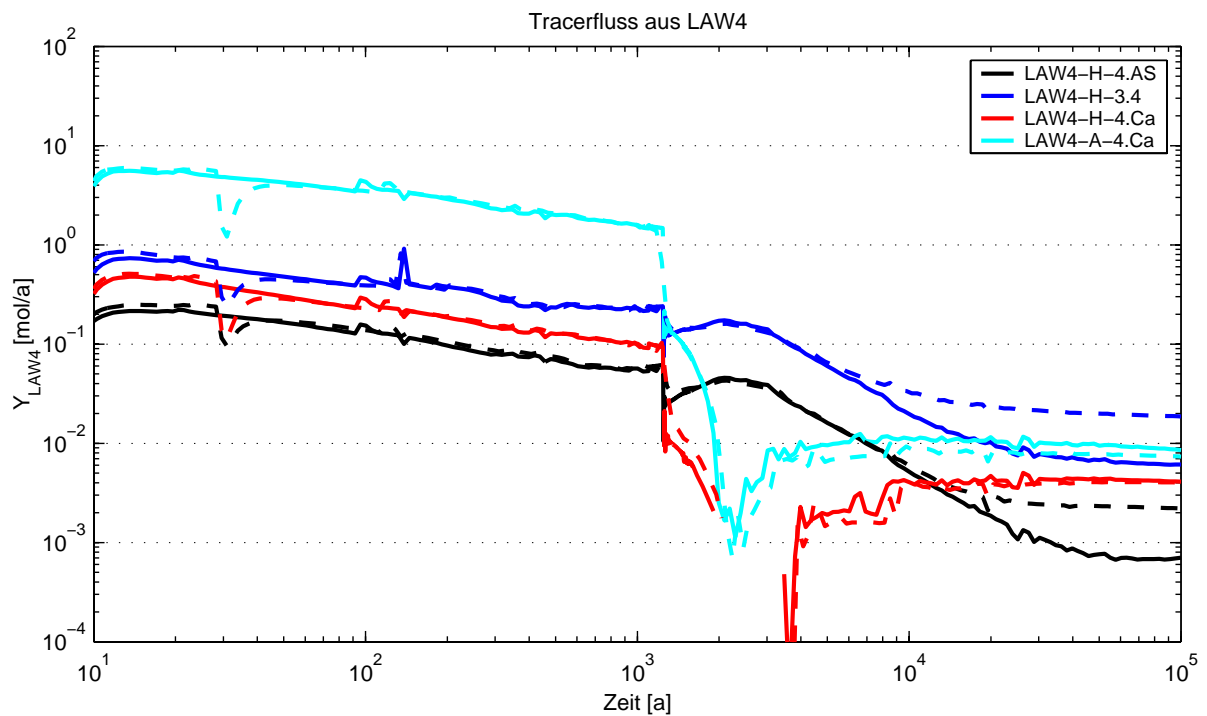
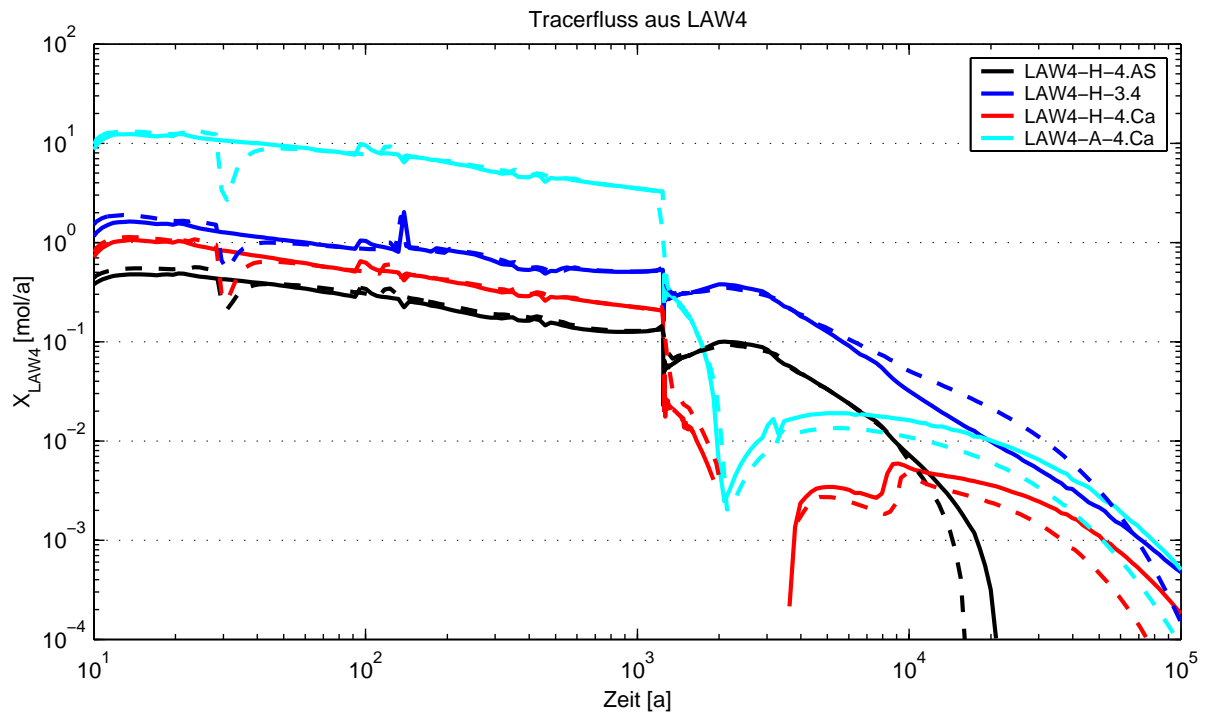


Abb. 3.19 Fluss der Tracer X und Y aus dem ELB LAW4 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

3.1.1.5 Tracertransport im Grubengebäude und –übertritt in das Deckgebirge

Der Transport der Tracer im Grubengebäude (dargestellt durch die Konzentration der Tracer in verschiedenen Teufen des Baufeldes in der Südflanke) ist in Abb. 3.20 bis Abb. 3.24

dargestellt. Der Transport im Oststrang des Baufeldes in der Südflanke wird von den im Vergleichsfall vorgenommenen Änderungen kaum beeinflusst, wohingegen der Transport im Weststrang mit abnehmender Teufe verzögert wird. Oberhalb von 532 m kommt es dann zu einer Vermischung der Lösung aus Ost- und Weststrang.

In Bezug auf den Übertritt in das Deckgebirge profitiert von dieser Verzögerung im Weststrang hauptsächlich der Tracer aus LAW2, für den dieser Transportpfad zum Übertritt auf 574 m den dominierenden Transportweg darstellt (Abb. 3.22).

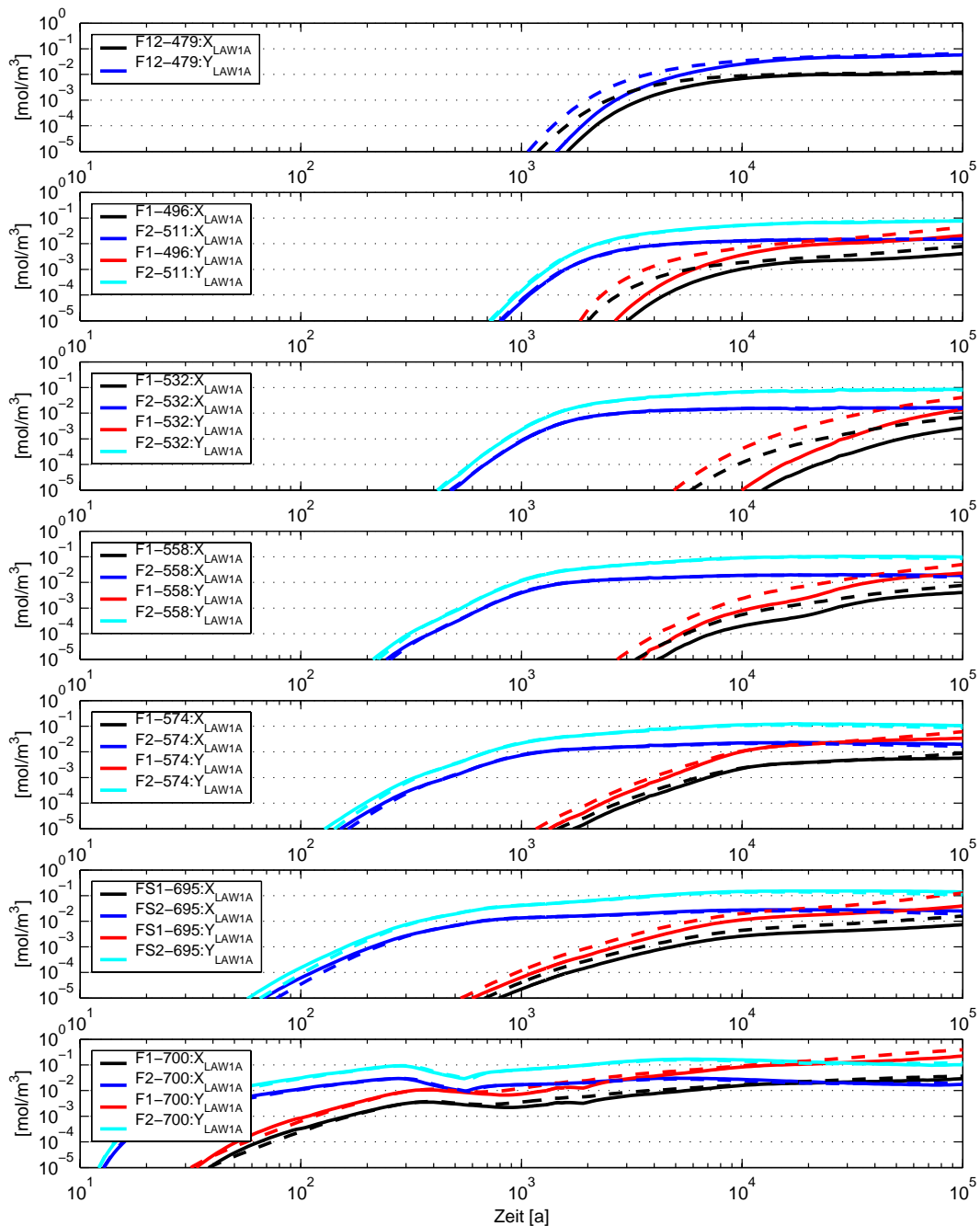


Abb. 3.20 Tracerkonzentrationen X_{LAW1A} und Y_{LAW1A} in der Südflanke (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

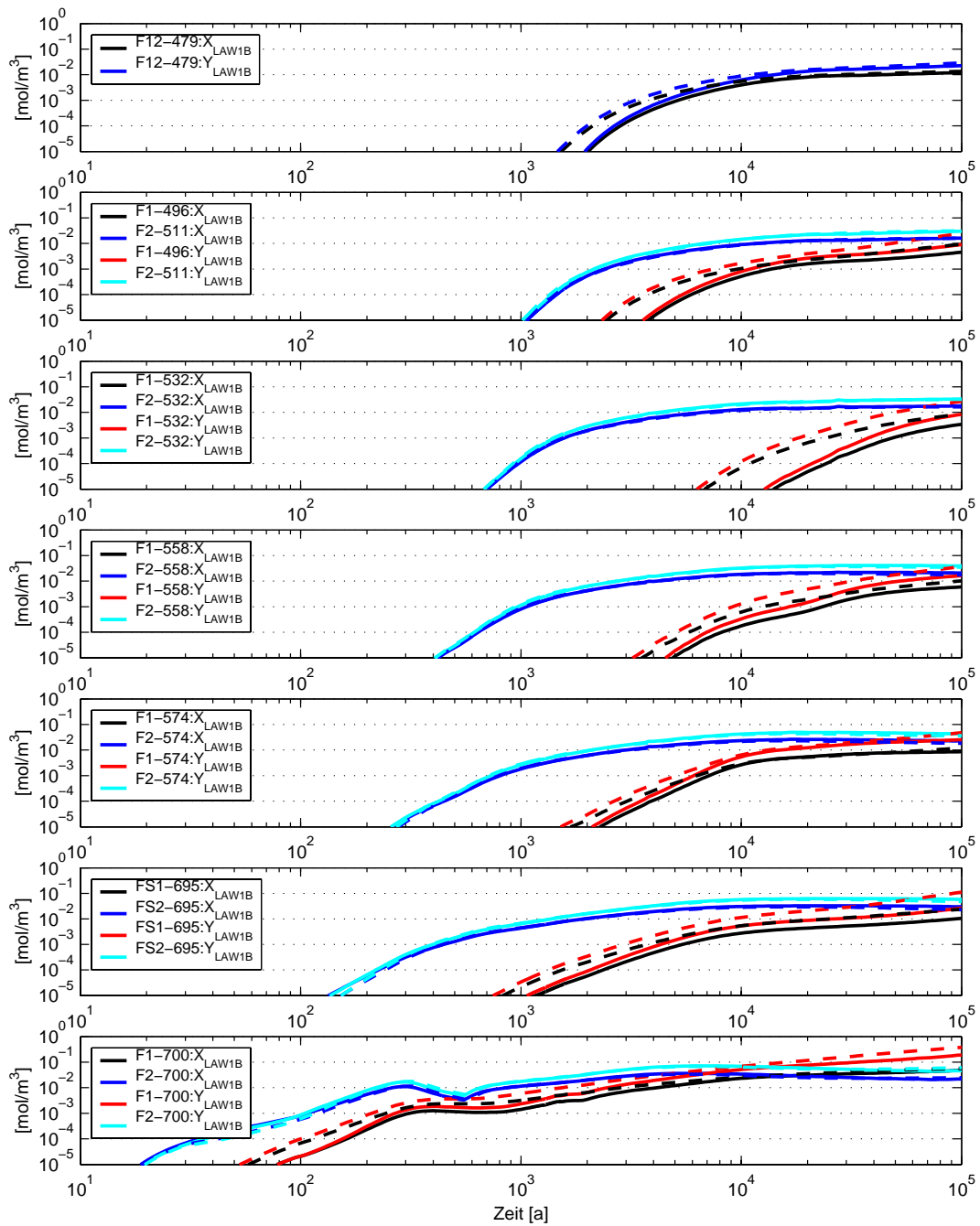


Abb. 3.21 Tracerkonzentrationen X_{LAW1B} und Y_{LAW1B} in der Südflanke (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

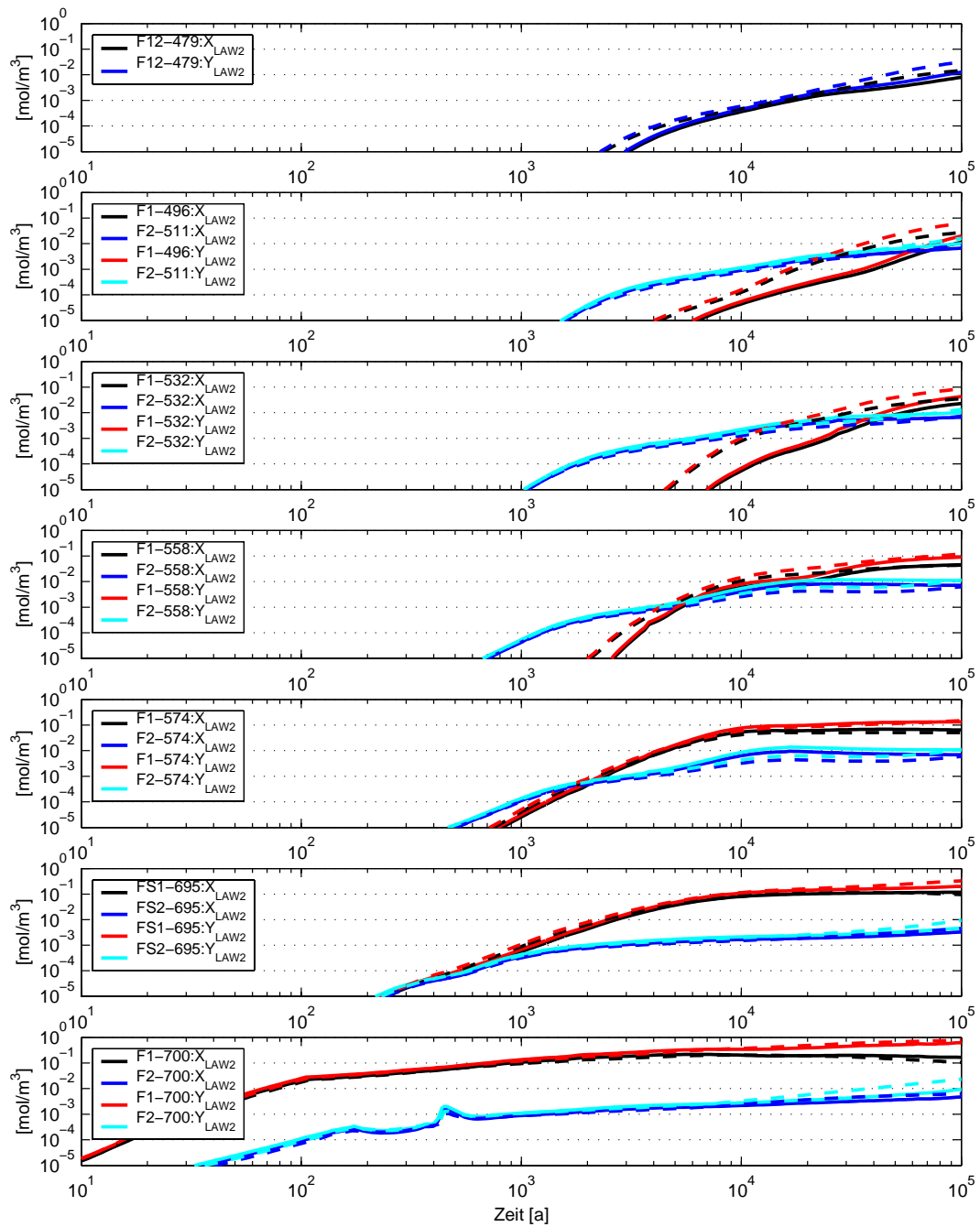


Abb. 3.22 Tracerkonzentrationen X_{LAW2} und Y_{LAW2} in der Südflanke (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

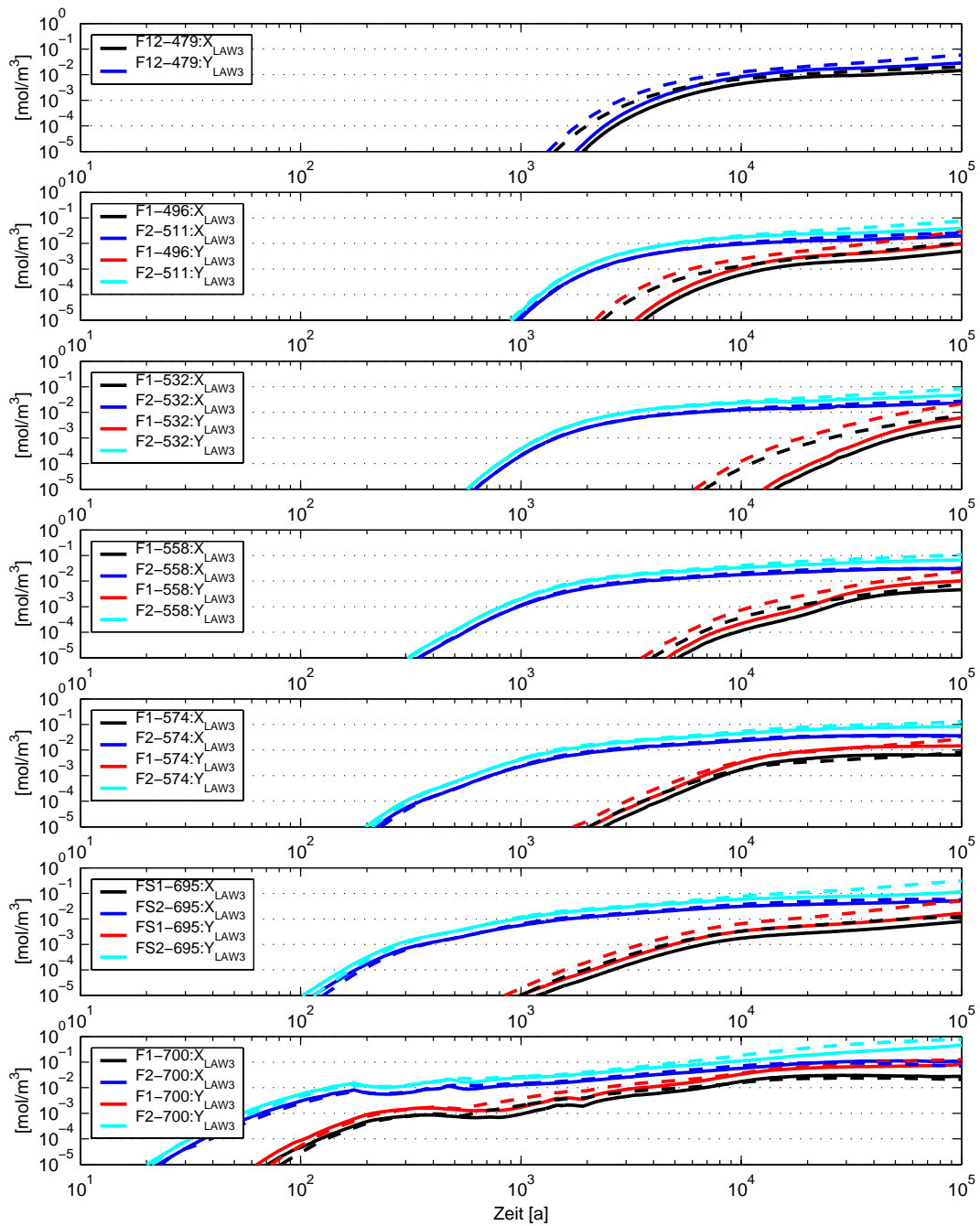


Abb. 3.23 Tracerkonzentrationen X_{LAW3} und Y_{LAW3} in der Südflanke (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

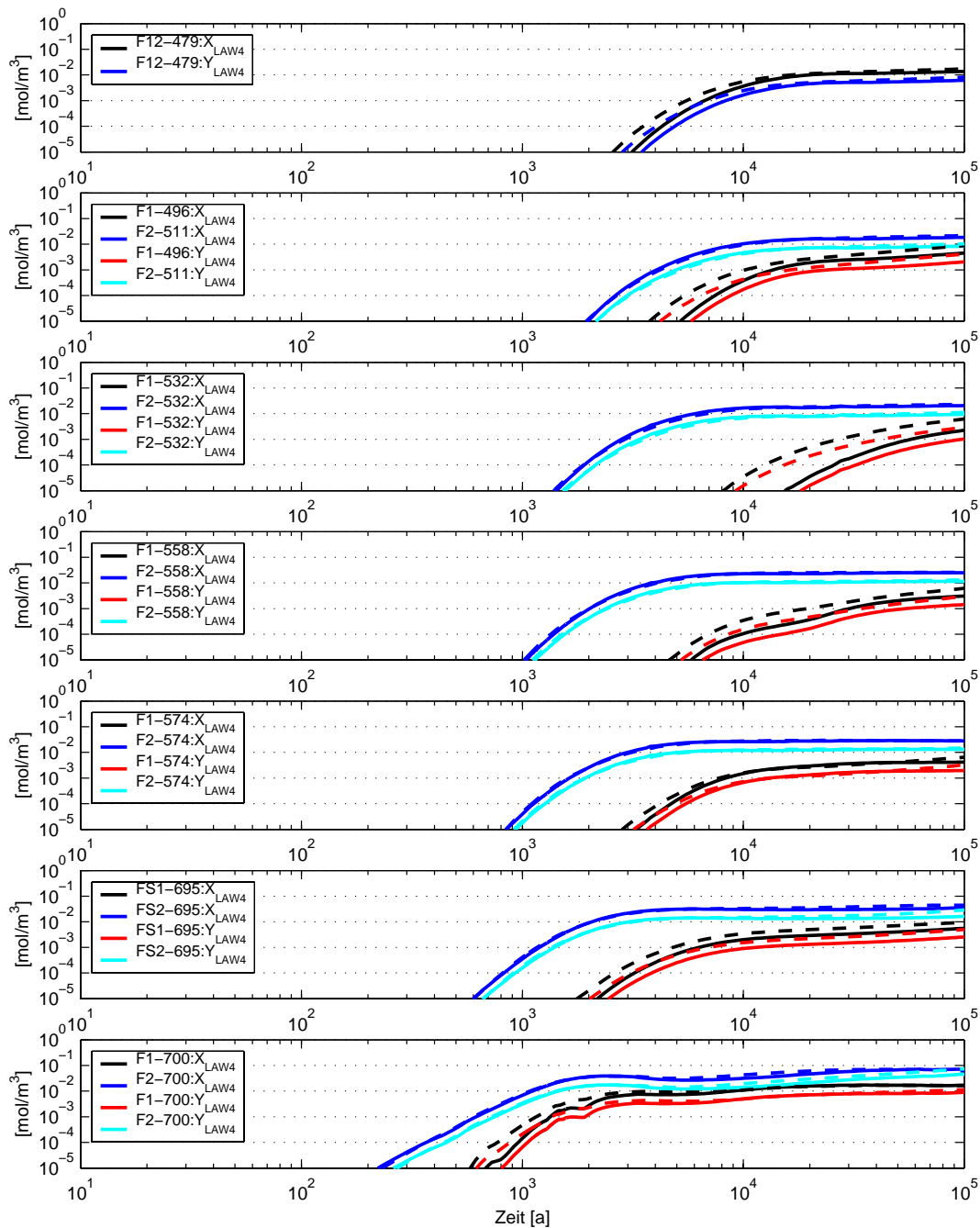


Abb. 3.24 Tracerkonzentrationen X_{LAW4} und Y_{LAW4} in der Südflanke (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

Die Verzögerung der Tracer aus LAW2 im Baufeld in der Südflanke führt auch zu geringeren Flüssen beim Übertritt in das Deckgebirge und im Rötanhydrit (Abb. 3.25 und Abb. 3.26). Bei allen anderen Tracern sind die Flüsse beim Übertritt in das Deckgebirge vergleichbar zum Referenzfall. Lediglich zu späten Zeiten führen geringere Flüsse von Tracern aus LAW3 auch zu geringeren Konzentrationen im Rötanhydrit (s. Abb. 3.27).

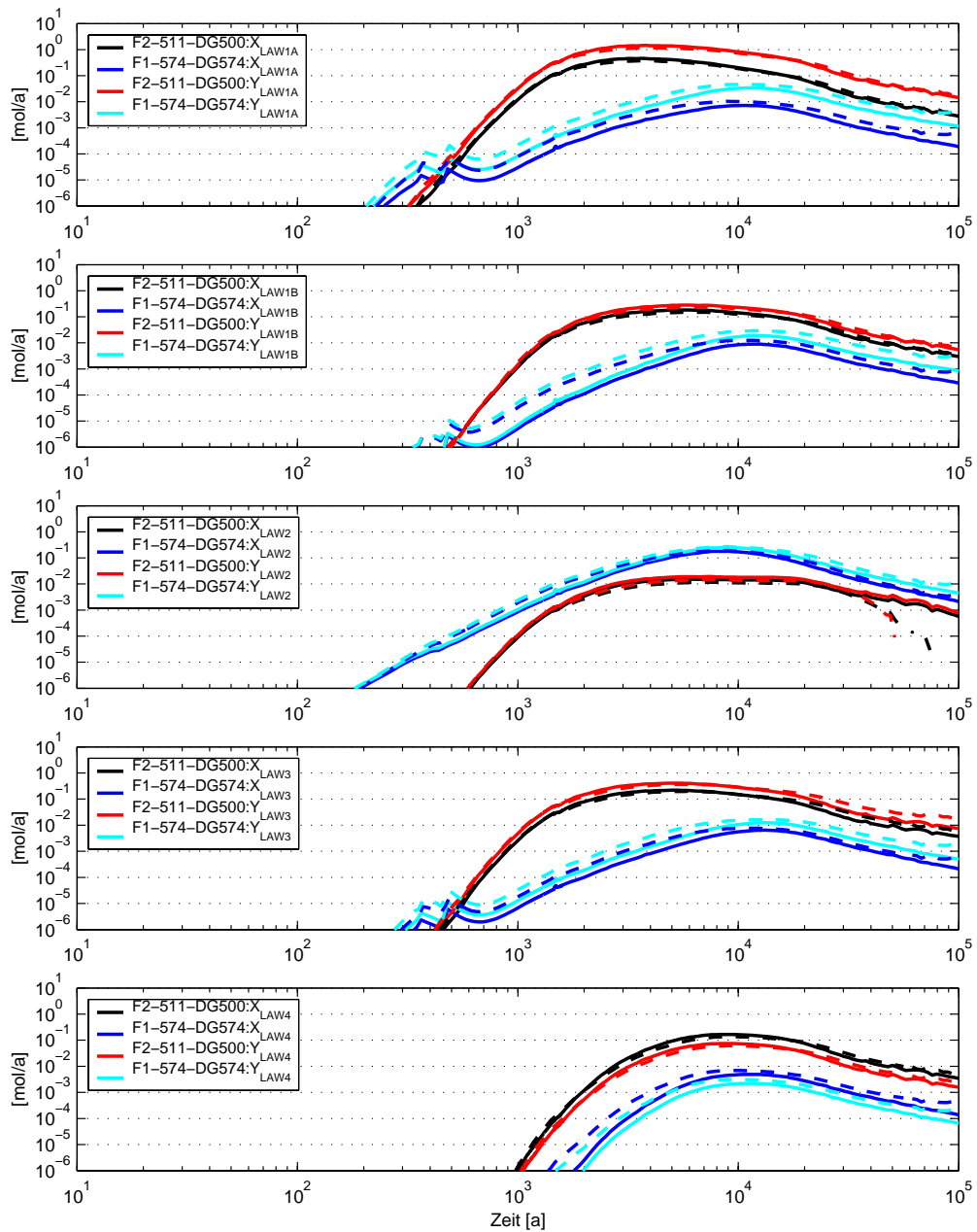


Abb. 3.25 Fluss der Tracer X_{ELB} und Y_{ELB} über die DG500 und DG574 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

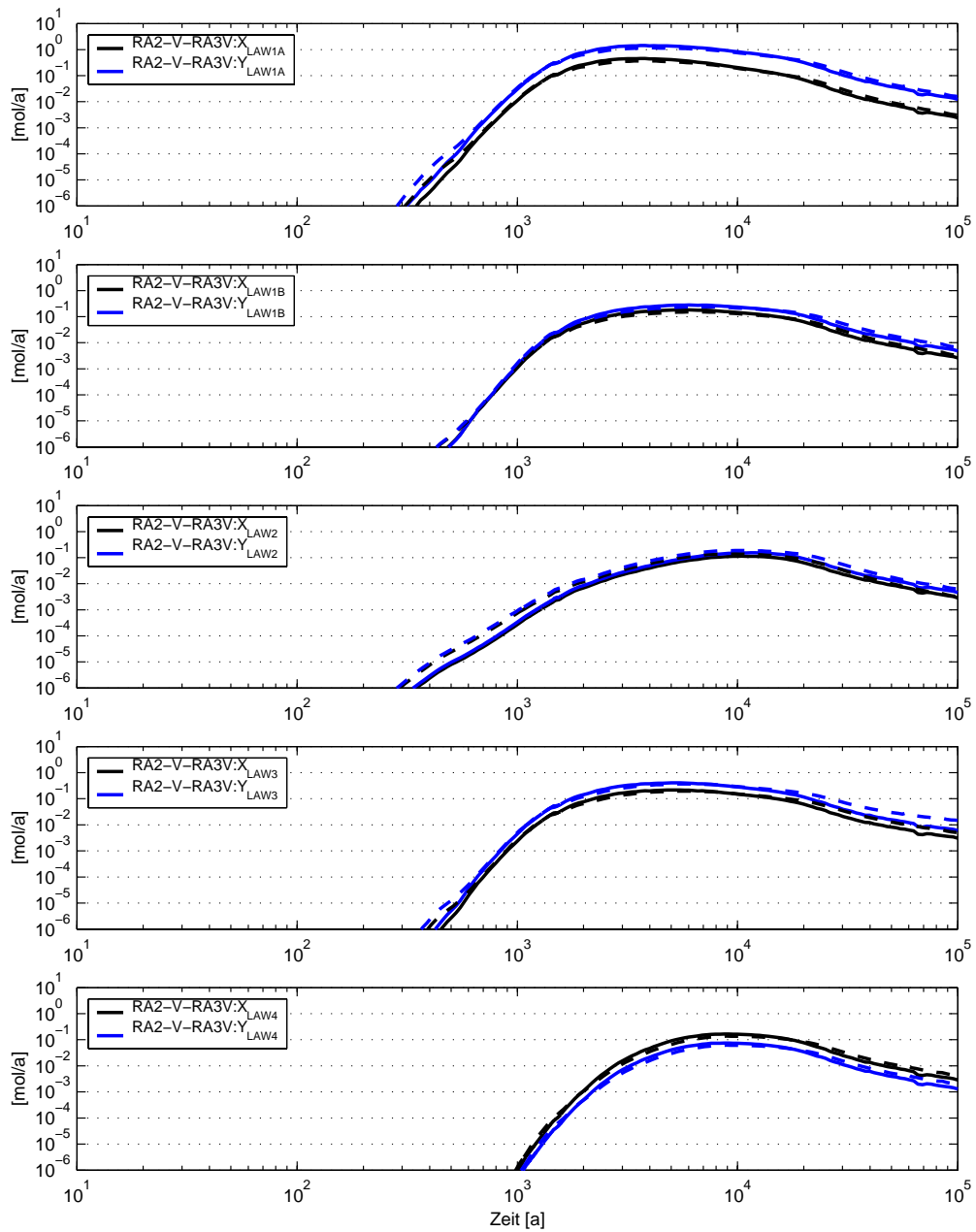


Abb. 3.26 Fluss der Tracer X_{ELB} und Y_{ELB} über die Schnittstelle zum Deckgebirge (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-K – gestrichelt)

Der Zeitpunkt des größten Konzentrationsanstieges im Modell-Rötanhydrit, der durch den größten Zustroms aus der Grube bewirkt wird und daher als ein Maß für die Transportverzögerung im Grubengebäude gelten kann⁸, erfolgt somit für Tracer aus LAW4 etwas eher (ca. 800 Jahre) und für Tracer aus LAW2 verzögert (ca. 600 ... 700 Jahre später). Dieser Zeitraum umfasst nach wie vor mehrere Tausend Jahre und wird insgesamt von den Änderungen nur wenig beeinflusst.

Die Zeitpunkte der maximalen Tracerflüsse im Modell-Rötanhydrit, die Abweichung des jeweiligen maximalen Tracerflusses vom Referenzfall sowie die Abweichungen in den Tracerkonzentrationen zu späten Zeiten, jeweils für die ELB-spezifischen X-Tracer, sind für den Vergleichsfall in Tab. 3.1 zusammengefasst.

Tab. 3.1 Vergleich der Maxima der Flüsse und der Konzentrationen der X-Tracer: zum Referenzfall

	Zeitpunkt der maximalen Tracerflüsse im Modell-Rötanhydrit [a]		Änderung der Tracerflüsse gegenüber dem Referenzfall im Maximum	Änderung der Konzentrationen nach 30 000 Jahren
	Vergleichsfall RX.1-K	Referenzfall		
LAW1A	3 600	4 000	+24 %	-2 %
LAW1B	5 500	6 500	+19 %	-2 %
LAW2	10 500	8 900	-20 %	-7 %
LAW3	5 000	6 200	+10 %	-20 %
LAW4	9 100	8 900	+19 %	-4 %

Die Tracerflüsse in der Nähe der Maxima sind lediglich für Tracer aus LAW2 deutlich gebremst und verringert, letztere wegen des verzögerten Transportes durch den Weststrang des Baufeldes in der Südflanke und des bevorzugten Übertritts in das Deckgebirge in 574 m Teufe (Modellverbindung DG574 am Weststrang). Alle anderen Tracerflüsse werden eher leicht beschleunigt (bei LAW4 ist der Unterschied zwischen 8 900 und 9 100 Jahren lediglich ein Ausgabezeitpunkt).

3.1.2 Auswirkung der Transferfunktionen

Bei Anwendung der in Kap. 2.3 beschriebenen Transferfunktionen auf die jeweiligen Tracer X und Y der fünf LAW-ELB ergeben sich für die drei Expositionspfade insgesamt 30 Kurven der zeitabhängigen Konzentration in den Exfiltrationsgebieten. Abb. 3.28 bis Abb. 3.32 geben für die ELB-spezifischen Tracer aus dem Rechenfall RX.1-K jeweils die Konzentrationen in den drei Exfiltrationsgebieten wieder – gestrichelt die Tracer X und mit durchgezogenen Linien die Tracer Y⁹.

⁸ ohne Berücksichtigung von Kanalisierung im Baufeld in der Südflanke

⁹ Bezieht man das Anfangsinventar des X-Tracers von 10⁴ mol auf das anfängliche Lösungsvolumen des ELB, sind die Anfangskonzentrationen der X-Tracer in der Größenordnung von 0,4 ... 0,8 mol/m³ und damit

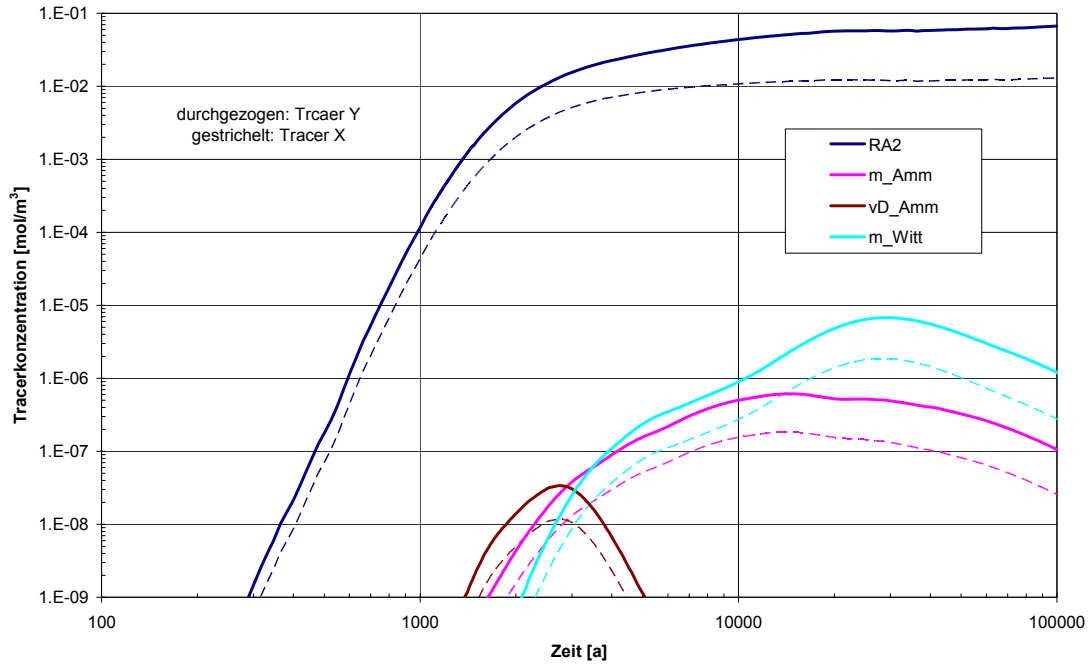


Abb. 3.28 Konzentrationen der Tracer aus LAW1A nach dem Übertritt in das Deckgebirge (RA2) und in den drei Expositionsgebieten (Rechenfall RX.1-K)

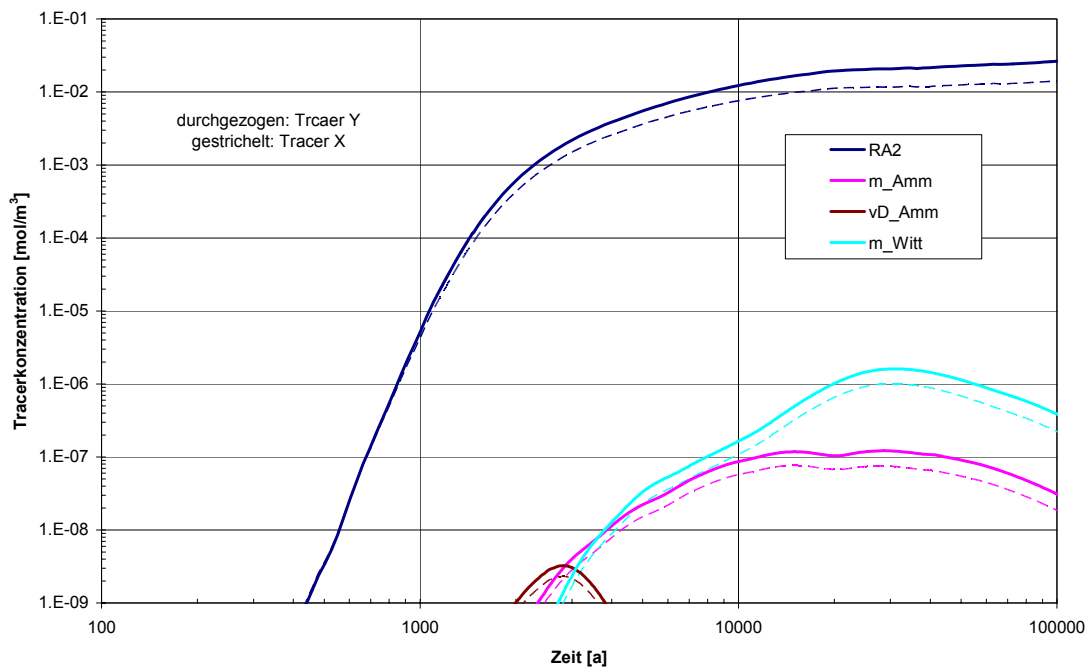


Abb. 3.29 Konzentrationen der Tracer aus LAW1B nach dem Übertritt in das Deckgebirge (RA2) und in den drei Exfiltrationsgebieten (Rechenfall RX.1-K)

etwas kleiner als die (konstante) Konzentration des Y-Tracers (1 mol/m^3); nur in LAW4 ist die Konzentration des X-Tracers mit $2,3 \text{ mol/m}^3$ größer als jene des Y-Tracers.

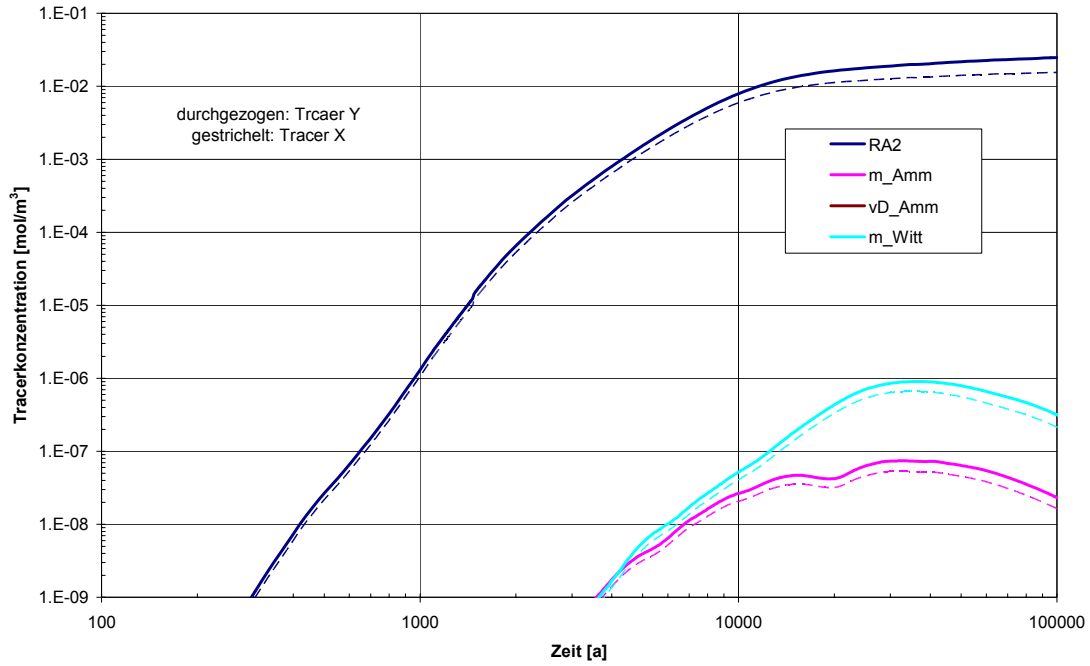


Abb. 3.30 Konzentrationen der Tracer aus LAW2 nach dem Übertritt in das Deckgebirge (RA2) und in den drei Exfiltrationsgebieten (Rechenfall RX.1-K, Tracerkonzentration in vD-Amm $< 1 \cdot 10^{-9} \text{ mol/m}^3$)

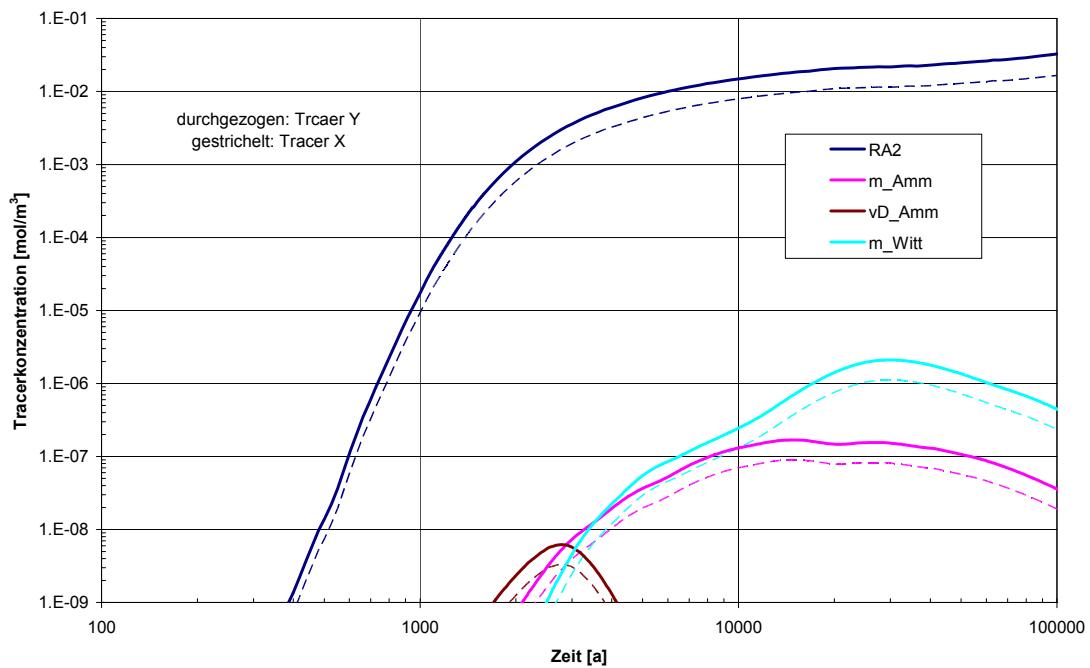


Abb. 3.31 Konzentrationen der Tracer aus LAW3 nach dem Übertritt in das Deckgebirge (RA2) und in den drei Exfiltrationsgebieten (Rechenfall RX.1-K)

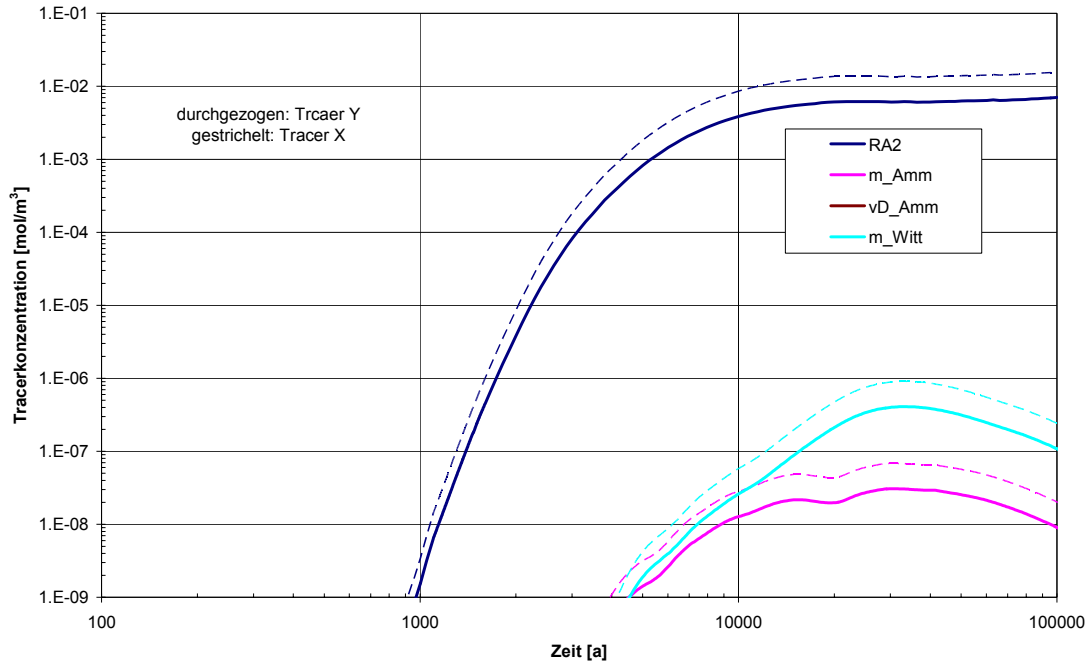


Abb. 3.32 Konzentrationen der Tracer aus LAW4 nach dem Übertritt in das Deckgebirge (RA2) und in den drei Exfiltrationsgebieten (Rechenfall RX.1-K, Tracerkonzentration in vD-Amm $< 1 \cdot 10^{-9} \text{ mol/m}^3$)

Aus den Abbildungen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Während die Tracerkonzentrationen beim Übertritt vom Grubengebäude in das Deckgebirge im Betrachtungszeitraum noch zunehmen, erreichen diese in den Exfiltrationsgebieten Maxima, die mehrere Größenordnungen geringer sind als der höchste Wert beim Übertritt in das Deckgebirge.
- Die Tracerkonzentrationen erreichen die Maxima beim Transportpfad „verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek“ (vD-Amm) bereits nach 2 300 bis 3 000 Jahren. Die absoluten Beträge sind jedoch um 1.5 bis 4 Größenordnungen geringer als die – später auftretenden – Maxima der Transportpfade „Muschelkalk – Ammerbeek“ (m-Amm) und „Muschelkalk – Wittmar“ (m-Witt).
- Im Exfiltrationsgebiet „Muschelkalk – Ammerbeek“ (m-Amm) haben die Konzentrationen der Tracer aus LAW1A und LAW3 ein Maximum nach ca. 15 000 Jahren, die aus LAW2 und LAW4 nach 30 000 Jahren und die aus LAW1B zwei flache Maxima zu den beiden genannten Zeitpunkten. Die Maxima sind um ca. eine Größenordnung geringer als die späteren im Muschelkalk von Wittmar (m-Witt)
- Im Exfiltrationsgebiet „Muschelkalk – Wittmar“ (m-Witt) erreichen die Tracer die höchsten Maxima der drei Expositionspfade, hier jedoch erst nach ca. 28 000 bis 35 000 Jahren.

Bezieht man das anfängliche Inventar der X-Tracer auf die anfänglichen Lösungsvolumina in den ELB, sind die Verhältnisse der Konzentrationen in den Exfiltrationsgebieten zur anfänglichen Konzentration im ELB für die beiden Tracer vergleichbar. Das Reziproke dieser Konzentrationsverhältnisse beschreibt die Gesamtverdünnung im Grubengebäude und im

Deckgebirge für instantan verfügbare, nicht-zerfallende, konservative¹⁰ Schadstoffe. Für diesen Rechenfall gibt Abb. 3.33 die Gesamtverdünnung der Tracer im Transportpfad des Muschelkalks im Tal von Wittmar (m-Witt) gemäß Kap. 2.3.3 wieder¹¹.

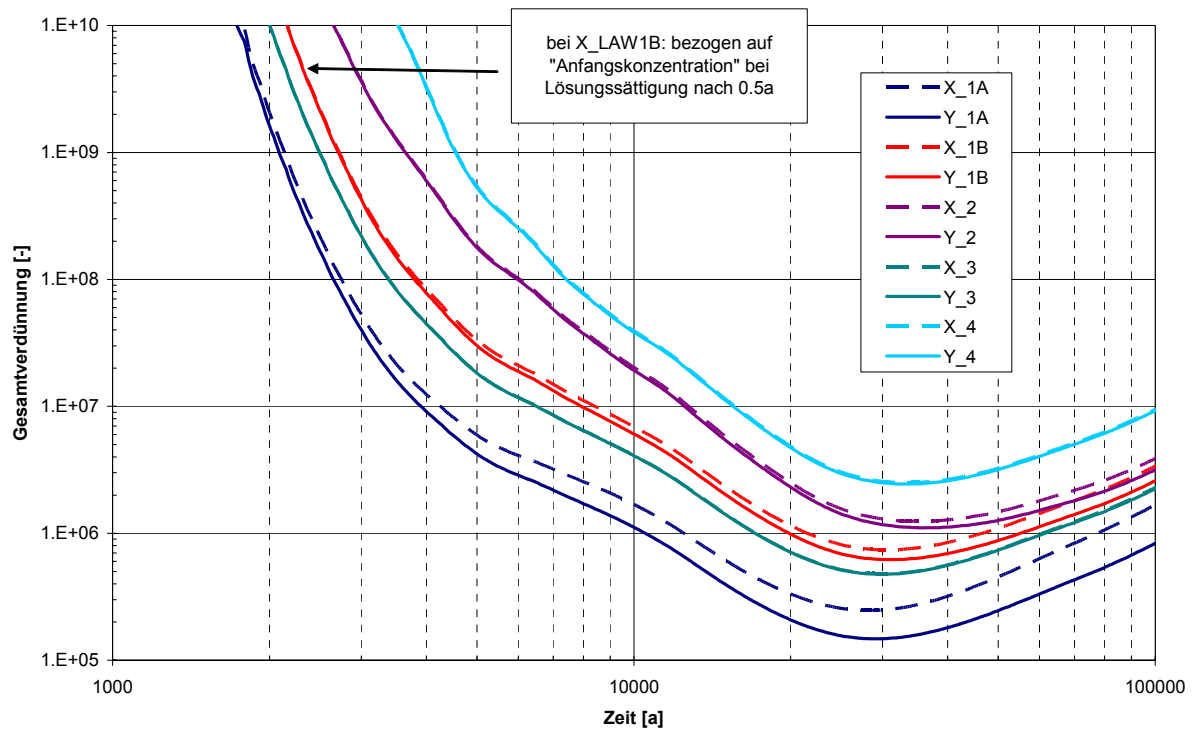


Abb. 3.33 Gesamtverdünnung der Tracer im Gruben- und im Deckgebirge bis in das Exfiltrationsgebiet m-Witt (Rechenfall RX.1-K)

- Die Minima der Gesamtverdünnung betragen für Tracer aus:

- LAW1A: 150 000 (Y) ... 250 000 (X)
- LAW3: 480 000
- LAW1B: 620 000
- LAW2: 1 Mio.
- LAW4: 2 Mio.

und sind für alle Tracer am geringsten im Exfiltrationsgebiet im Tal von Wittmar (m-Witt)¹².

¹⁰ Hier: nicht-sorbiert und nicht löslichkeitslimitiert

¹¹ Für den Tracer X in LAW1B, der definitionsgemäß bereits zu Beginn mit dem Inventar von 10^4 mol vorliegt, wurde als Bezugswert die Konzentration in Lösung nach 0,5 Jahren zugrunde gelegt, bei der der Lösungspegel auf 0,75 der Kammerhöhe angestiegen ist.

3.2 Modellergebnisse LOPOS (RX.1-L)

Mit dem Programm KAFKA werden – wie in den einleitenden Kapiteln dargestellt – im wesentlichen die Drücke und Ströme der Flüssigkeiten und Gase und der Transport von Tracern im Grubengebäude berechnet, mit dem Programm LOPOS die Mobilisierung und Rückhaltung der Radionuklide sowie deren Ausbreitung in der Grube. Im Folgenden werden unter diesem Gesichtspunkt die Ergebnisse der Rechnungen mit LOPOS dargestellt. Dabei wird gegebenenfalls auf Schnittstellen mit KAFKA eingegangen.

3.2.1 Auswirkung der veränderten Modellierung im Grubengebäude

Die gegenüber dem Referenzfall R8-L geänderte Entwicklung des Strömungswiderstandes des Deckgebirges wirkt sich über die Rückkopplung des Fluiddrucks mit der Konvergenzrate auch auf die Entwicklung der Ströme im Grubengebäude aus. Die geänderte Fluidviskosität wirkt sich in gleicher Weise auf alle Strömungswiderstände im Grubengebäude aus und wird sich also nur sekundär über die Rückkopplung des Fluiddrucks mit der Konvergenzrate auch auf die Entwicklung der Ströme im Grubengebäude auswirken.

3.2.1.1 Flüssigkeitsströme

Die mit LOPOS berechneten Flüssigkeitsströme im Nahbereich der Einlagerungskammern unterscheiden sich im Vergleichsfall in ähnlich geringem Maße von jenen im Referenzfall wie bei KAFKA (vgl. Kap. 3.1.1.3 und 3.1.1.4). Deshalb wird hier auf die Darstellung der LOPOS-spezifischen Ergebnisse verzichtet.

Obwohl diese Beobachtung qualitativ genau so gut für die Lösungsflüsse aus der Grube in das Deckgebirge gilt, ist hier zu betonen, dass die Unterschiede in diesen Lösungsflüssen zwischen KAFKA und LOPOS wegen dem neuen Schnittstellenmodell im Maximum deutlich geringer geworden sind. Abb. 3.34 zeigt für den Vergleichsfall die mit LOPOS berechneten Volumenströme der Lösung aus der Grube im Vergleich zu jenen des Referenzfalls. Gegenüber dem Referenzfall ist der maximale Gesamtlösungsaustritt für den Vergleichsfall bei etwa 11 Jahren mit $1\,010\text{ m}^3/\text{a}$ leicht höher.

¹² Bei den Berechnungen zur Verdünnung der Tracer wurden Effekte der Kanalisierung im Grubengebäude nicht berücksichtigt. Vergleichsrechnungen mit LOPOS unter Berücksichtigung dieser Effekte (Kanalisierung auf 40% der Grundfläche im Baufeld in der SF) zeigen, dass das Minimum der Gesamtverdünnung dadurch nochmals um einen Faktor 2 (LAW1A und LAW3) bis Faktor 5 (LAW1B, LAW2) verringert sein kann.

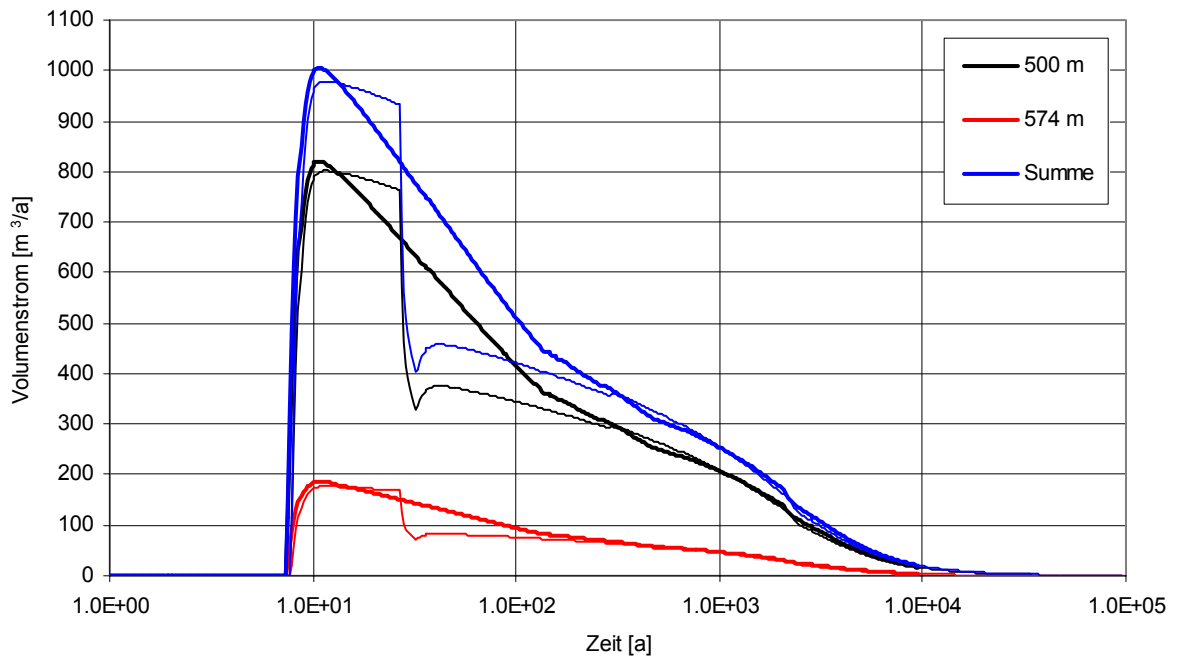


Abb. 3.34 Lösungsströme aus der Grube (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

Abb. 3.35 zeigt die kumulierten Lösungsaustrittsströme der beiden Rechenfälle. Im Vergleich zum KAFKA-Ergebnis (Abb. 3.2) haben ab etwa 3 000 Jahren für den Vergleichsfall RX.1-L die Mengen gegenüber dem Referenzfall R8-L etwas mehr zugenommen.

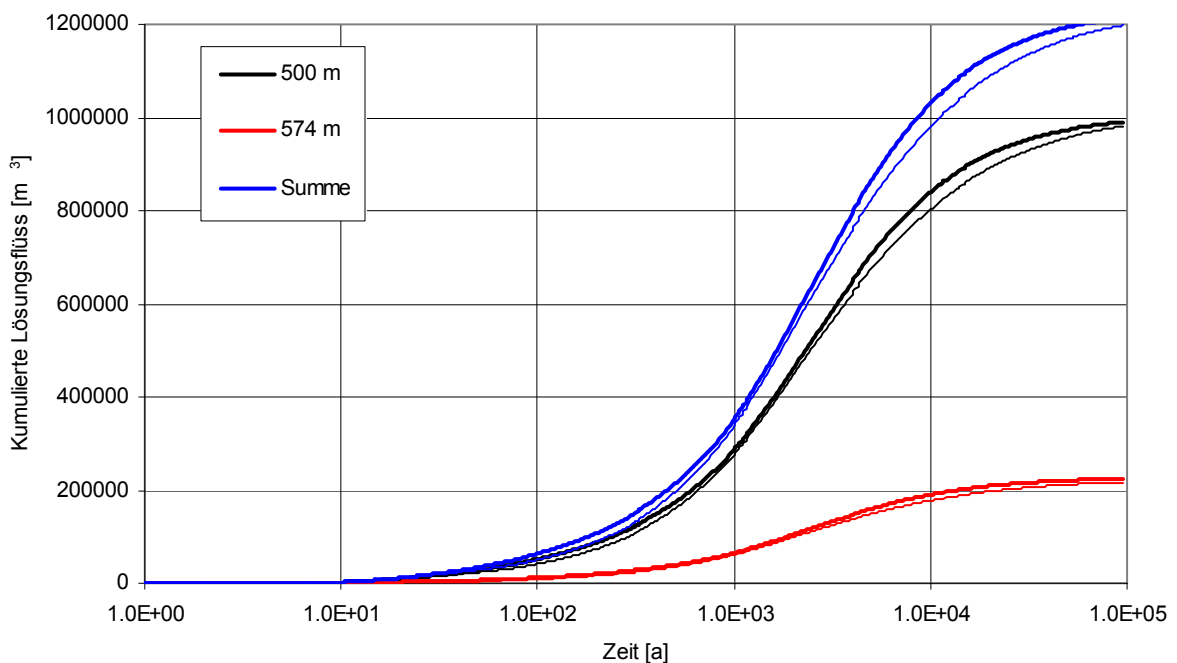


Abb. 3.35 Kumulierte Lösungsströme aus der Grube (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

3.2.1.2 Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen

Die im Vergleichsfall RX.1 gegenüber dem Referenzfall geringfügig geänderten Strömungen im Umfeld der Einlagerungsbereiche wirken sich nur sehr beschränkt auf die Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen aus.

Dies zeigt sich auch in der gering geänderten Auswirkung des Einflusses der maximal möglichen Elementkonzentrationen. In Tab. 3.2 sind die Zeitpunkte des Erreichens und ggf. wieder Unterschreitens der maximal möglichen Elementkonzentrationen für den Vergleichsfall RX.1 aufgelistet. In dieser Tabelle sind die Änderungen gegenüber dem Referenzfall R8-L fett hervorgehoben:

- In LAW3 werden die maximal möglichen Elementkonzentrationen von Neptunium und Americium geringfügig früher erreicht.
- In allen zutreffenden Fällen sind die Zeitpunkte, an denen die maximal mögliche Elementkonzentration wieder unterschritten wird, verzögert.

Tab. 3.2 Erreichen und Unterschreiten der maximal möglichen Konzentrationen [a]

RX.1	U		Pu		Th		Np		Am	
	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis
LAW1A	0,0	> 10 ⁵	0,0	676 (295)	0,0	> 10 ⁵				
LAW1B	0,0	> 10 ⁵	3,9	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵				
LAW2	0,0	> 10 ⁵	3,9	57 500 (44 700)	0,0	> 10 ⁵				
LAW3-O	0,4	> 10 ⁵	0,9	> 10 ⁵	1,4	> 10 ⁵	155 (162)	> 10 ⁵	43	407 (380)
LAW3-W	0,1	> 10 ⁵	0,9	> 10 ⁵	0,2	> 10 ⁵	155 (162)	> 10 ⁵	43	407 (380)
LAW4-O	0,0	> 10 ⁵	0,1	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵				
LAW4-W	0,0	> 10 ⁵	0,1	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵				

Änderungen gegenüber dem Referenzfall R8-L (*kursiv* dargestellt) sind fett hervorgehoben

3.2.1.3 Radionuklidströme aus und zu den Einlagerungsbereichen

In Abb. 3.36 ff. bzw. Abb. 3.46 ff. sind für den Vergleichsfall die Radionuklidströme über die jeweiligen Modellverbindungen im Umfeld der Einlagerungsbereiche für Ra-226 bzw. Pu-239 dargestellt und jenen des Referenzfalls R8-L – dünne Linien – (siehe Schlussbericht 2005, Kap. 9.3.2.2) gegenübergestellt.

Die zeitlichen Entwicklungen der Radionuklidströme folgen im Allgemeinen jenen der Flüssigkeitsströme. Meist wird erst zu späten Zeiten auch Diffusion relevant. Als Ausnahme ist dabei insbesondere der größtenteils diffusionsbedingte, teilweise der Strömungsrichtung

entgegen gerichtete Austausch zwischen LAW1A und LAW1B über S-LAW1A¹³, zwischen LAW1A und ULAW1 über S-ULAW1 sowie auch zwischen LAW1B und F1-700 über V-LAW1B zu beachten. Für die Radionuklidströme sind die Unterschiede gegenüber dem Referenzfall, nebst den geringen Änderungen der Flüssigkeitsströme, vor allem der im Vergleichsfall um den Faktor 3 geringeren Porendiffusivität D_p zuzuordnen.

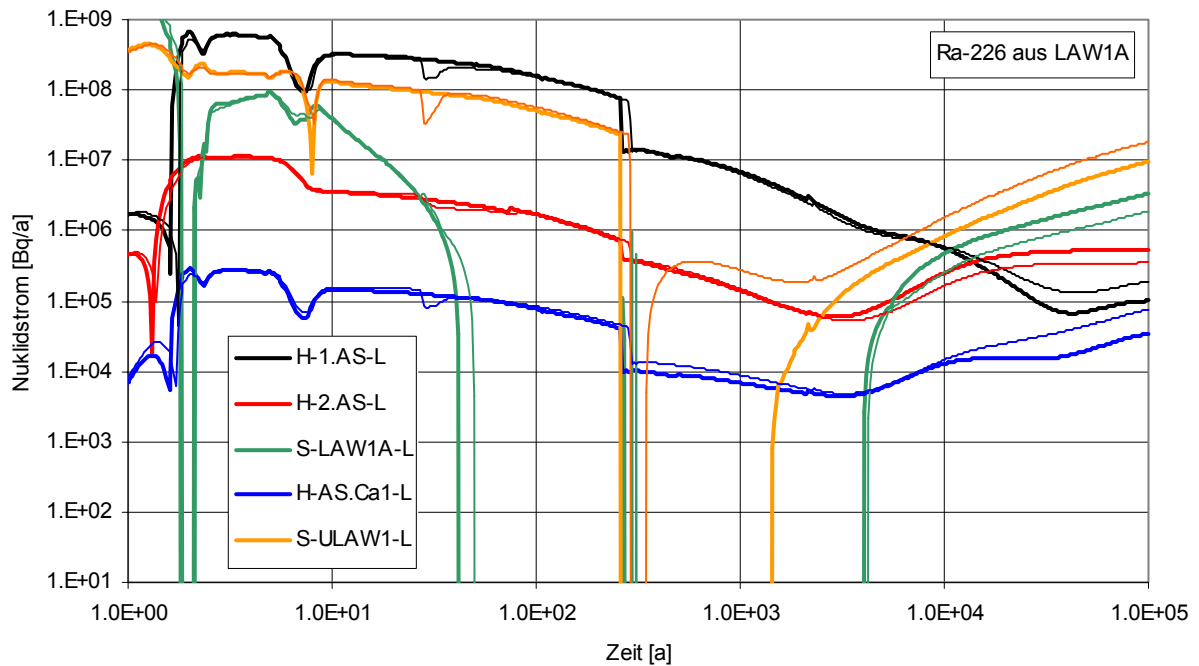


Abb. 3.36 Radionuklidströme von Ra-226 aus LAW1A (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

¹³ Im LOPOS Modell sind parallele Verbindungen zwischen Segmenten zusammengefasst. Dies trifft hier insbesondere zu für S-LAW1A (S-LAW1A und V-LAW1A), H-1.AS-L (H-1.AS und A-1.AS), S-LAW2-L (S-LAW2 und V-LAW2), S-LAW3-L (S-LAW3 und V-LAW3) und H-4.Ca-L (H-4.Ca und A-4.Ca)

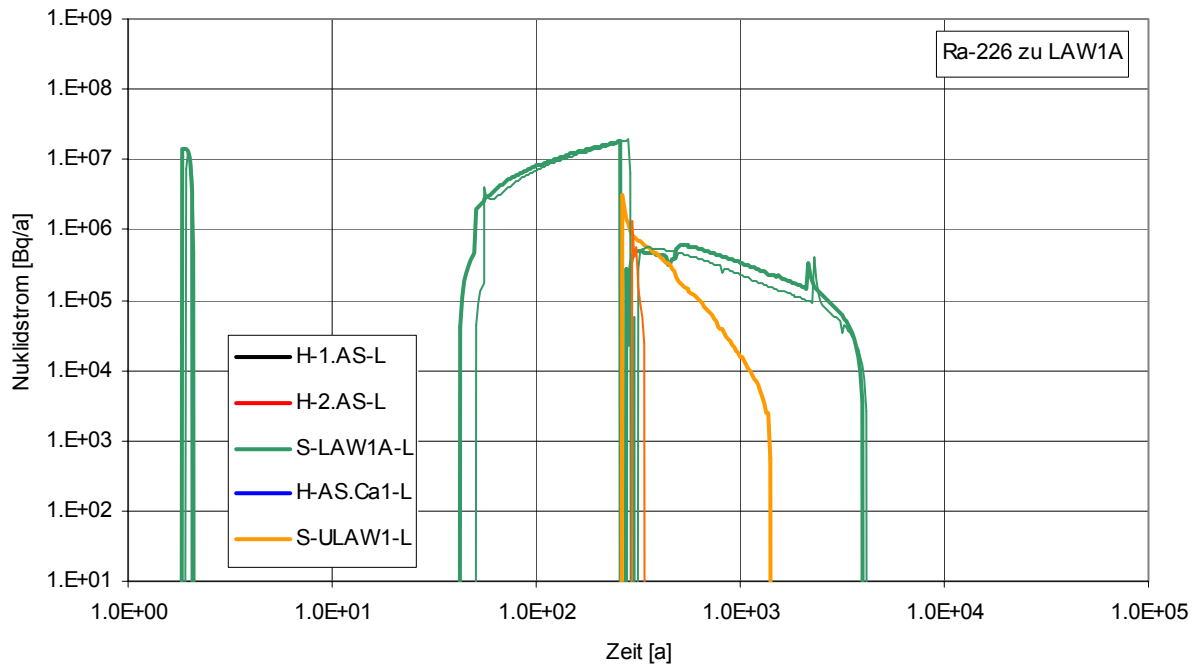


Abb. 3.37 Radionuklidströme von Ra-226 zu LAW1A (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

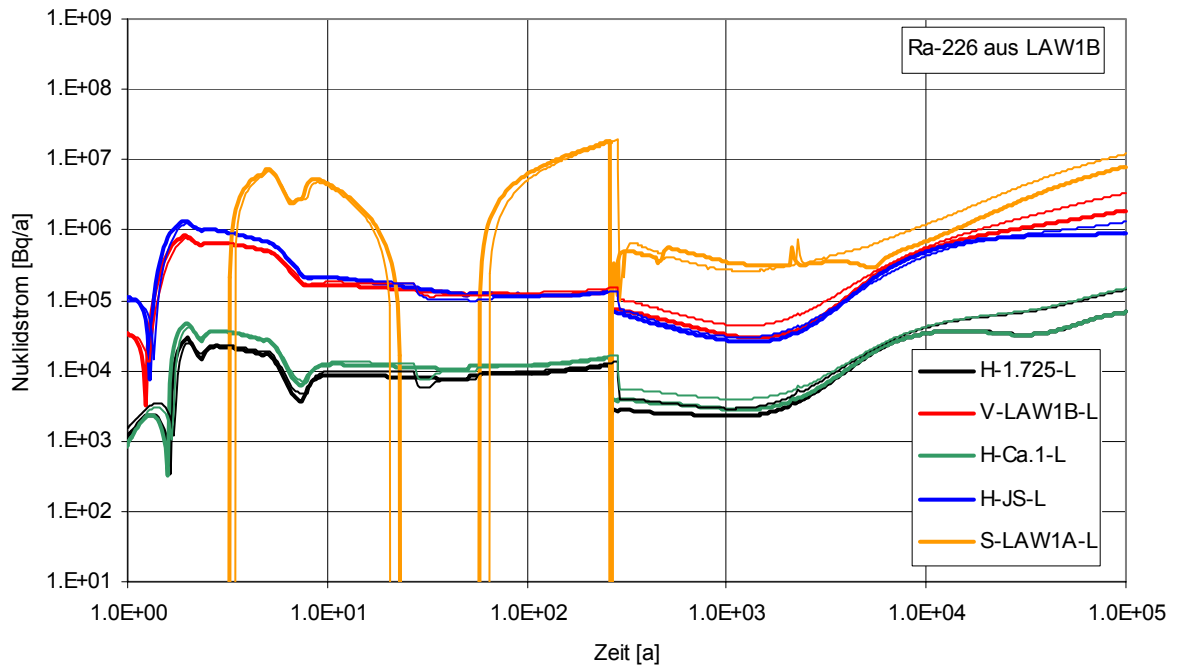


Abb. 3.38 Radionuklidströme von Ra-226 aus LAW1B (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

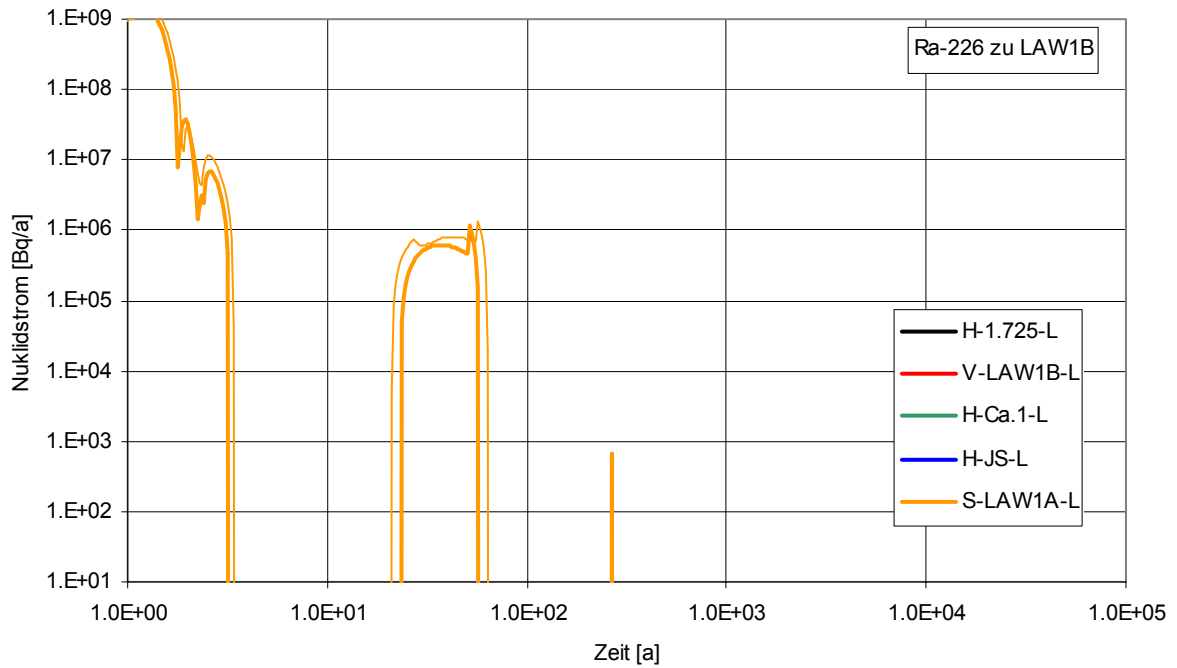


Abb. 3.39 Radionuklidströme von Ra-226 zu LAW1B (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

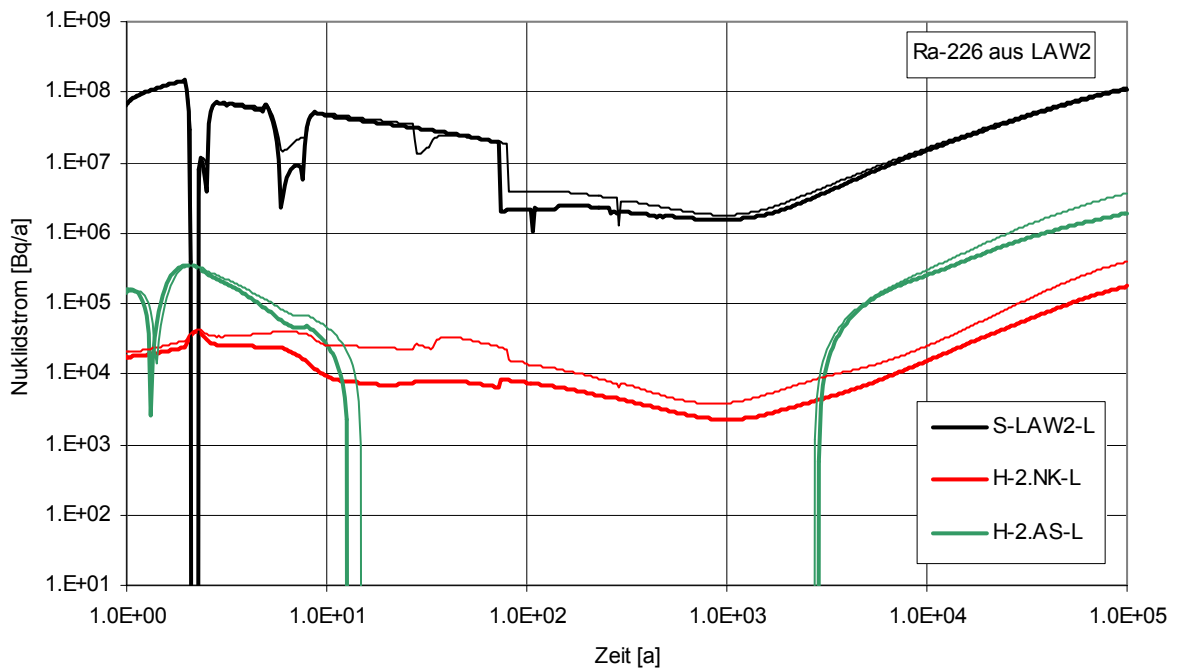


Abb. 3.40 Radionuklidströme von Ra-226 aus LAW2 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

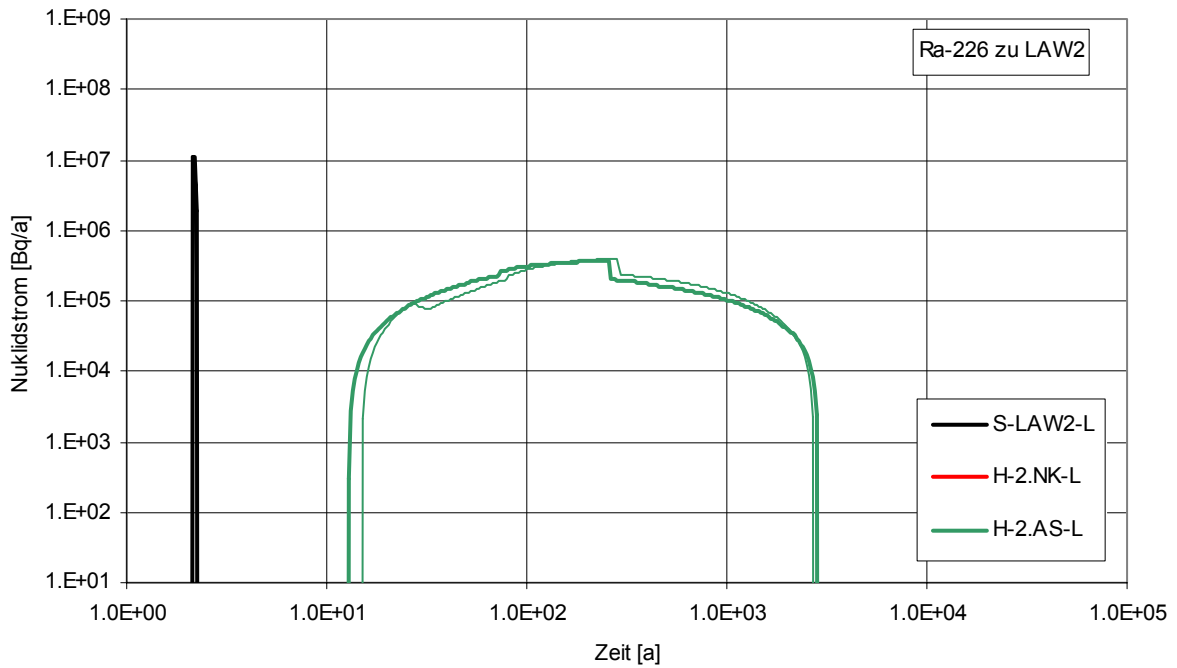


Abb. 3.41 Radionuklidströme von Ra-226 zu LAW2 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

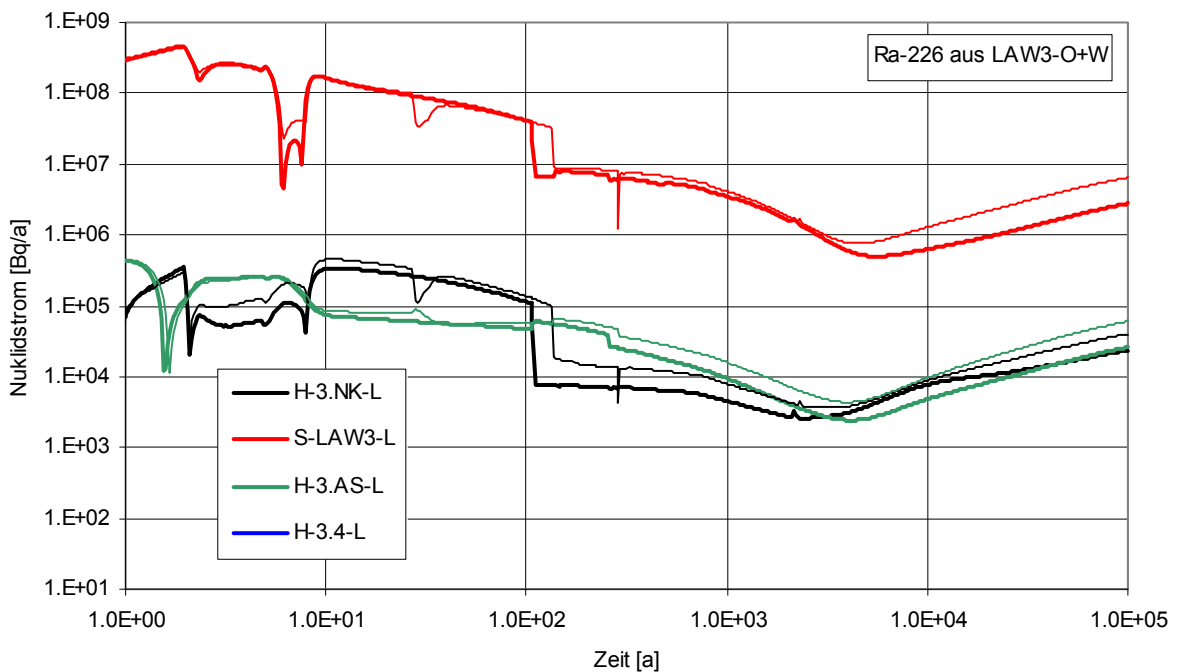


Abb. 3.42 Radionuklidströme von Ra-226 aus LAW3 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

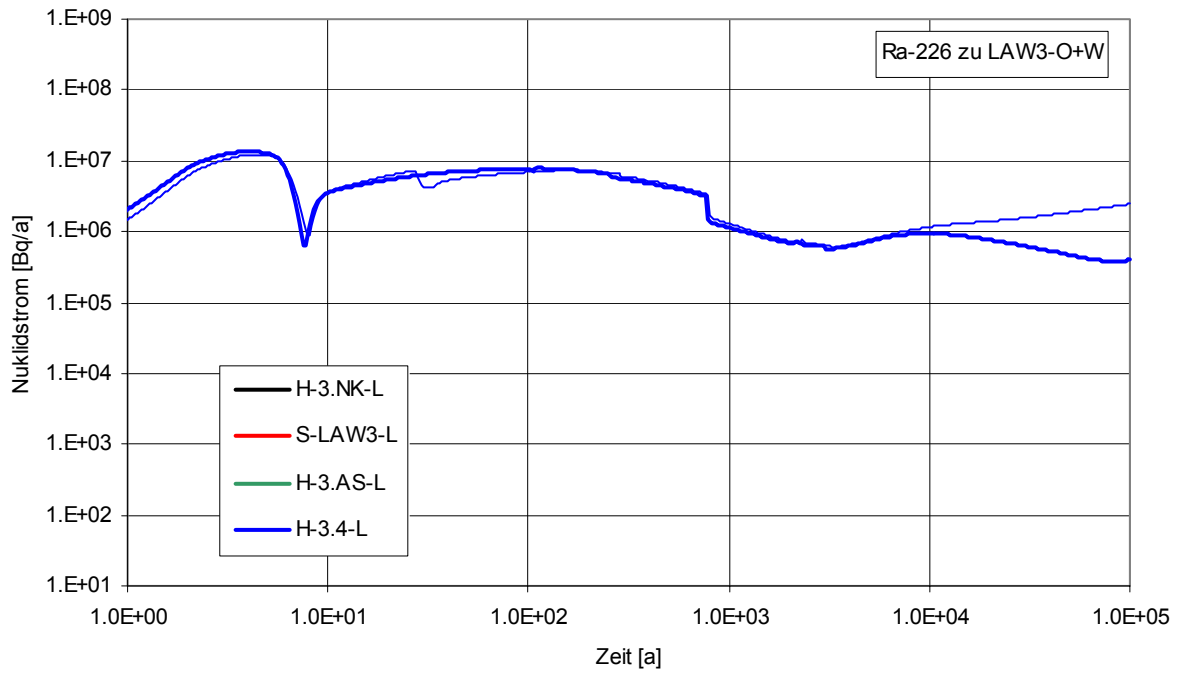


Abb. 3.43 Radionuklidströme von Ra-226 zu LAW3 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

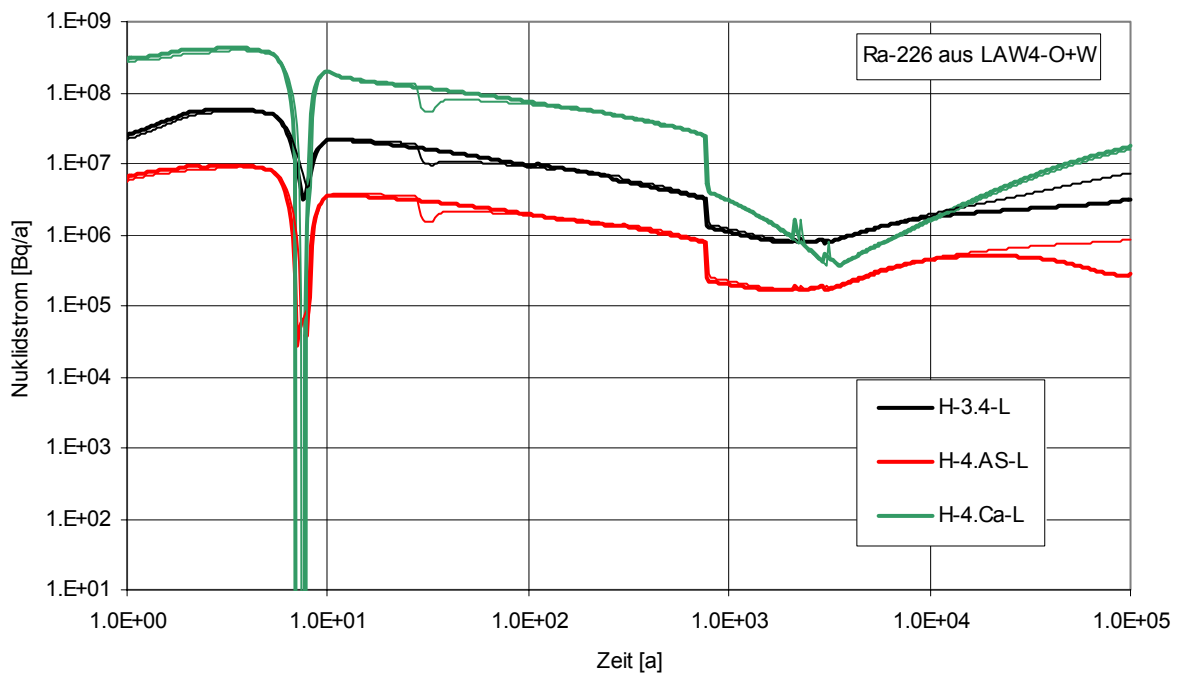


Abb. 3.44 Radionuklidströme von Ra-226 aus LAW4 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

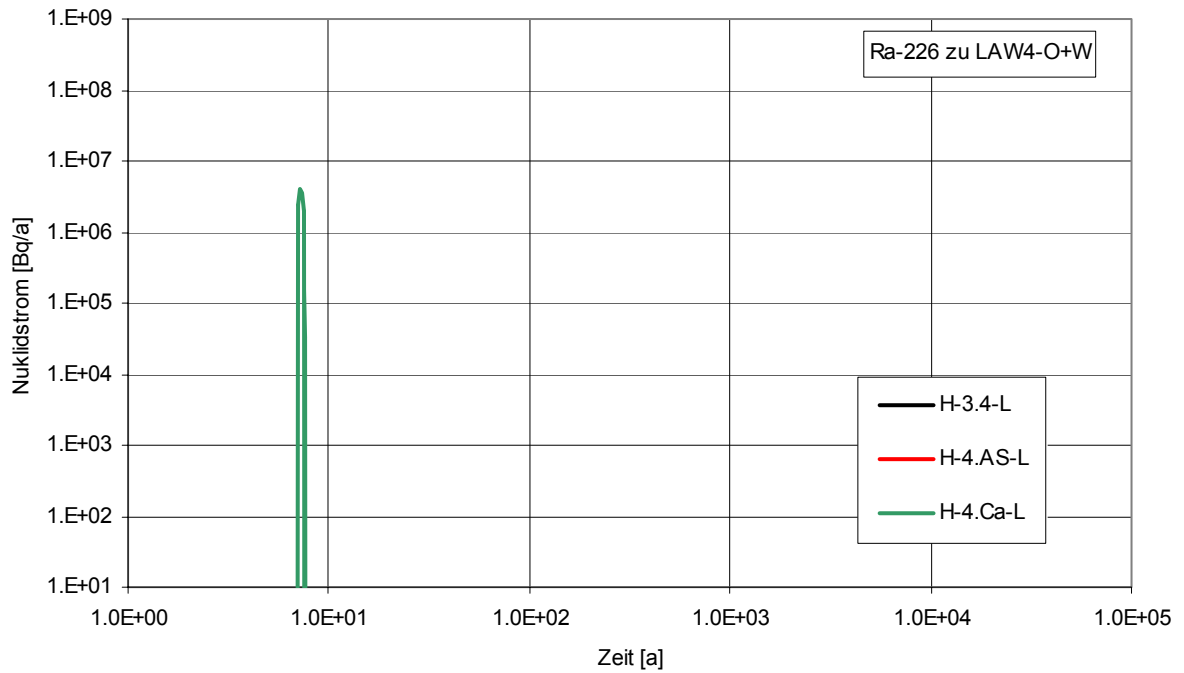


Abb. 3.45 Radionuklidströme von Ra-226 zu LAW4 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

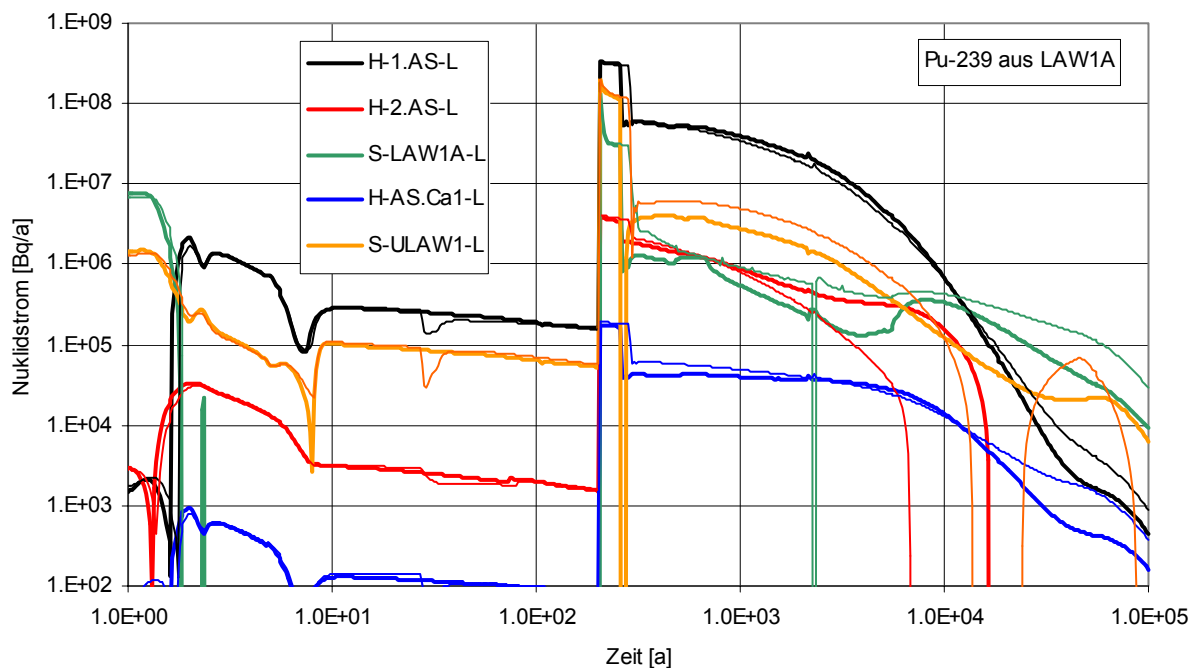


Abb. 3.46 Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW1A (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

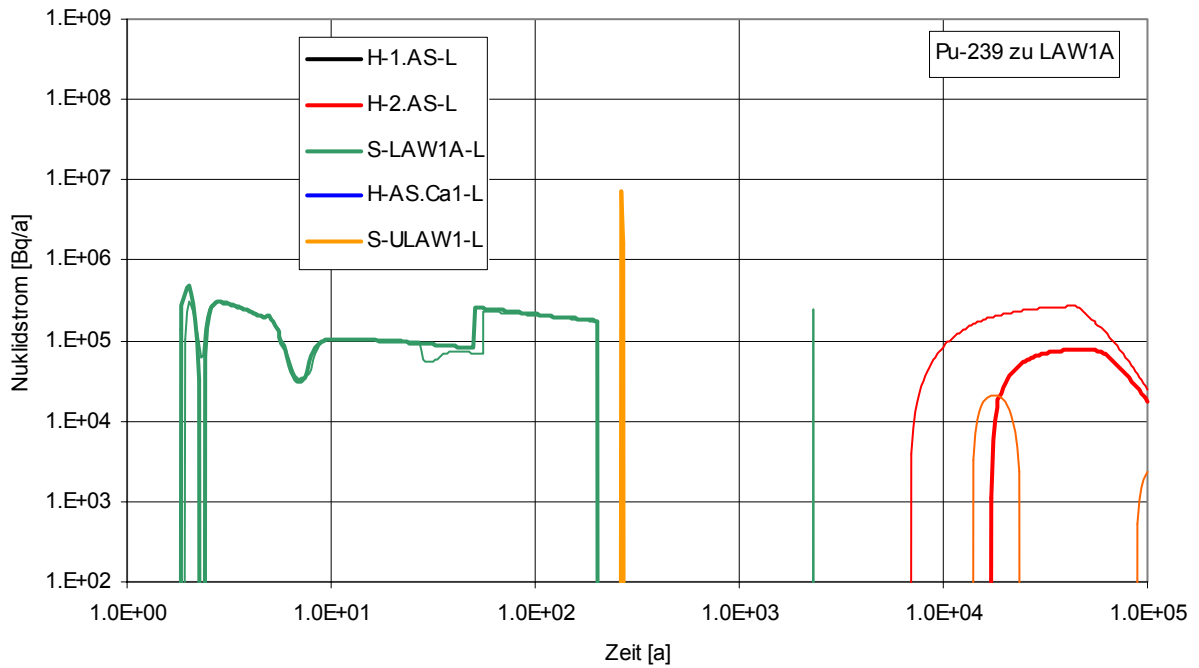


Abb. 3.47 Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW1A (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

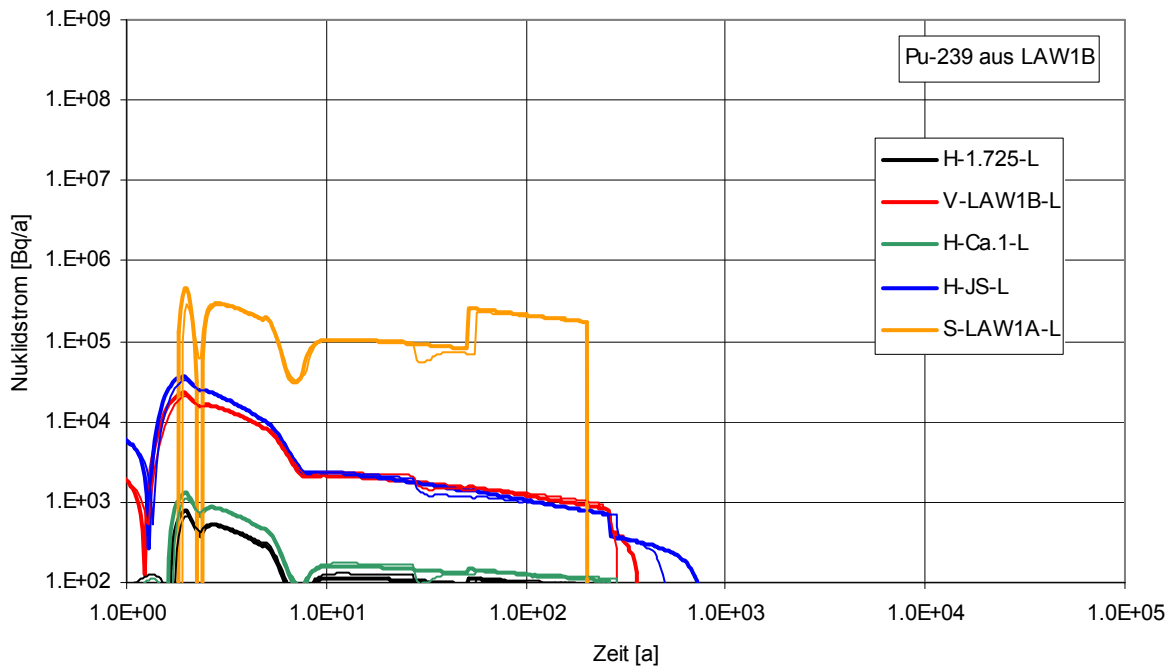


Abb. 3.48 Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW1B (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

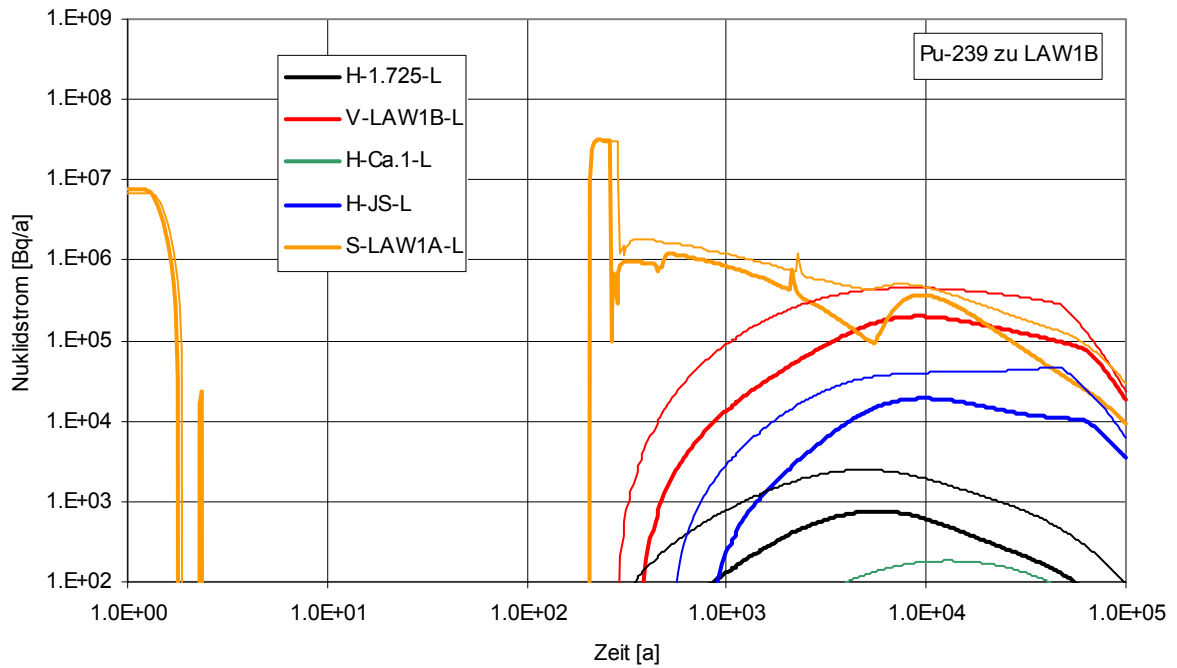


Abb. 3.49 Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW1B (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

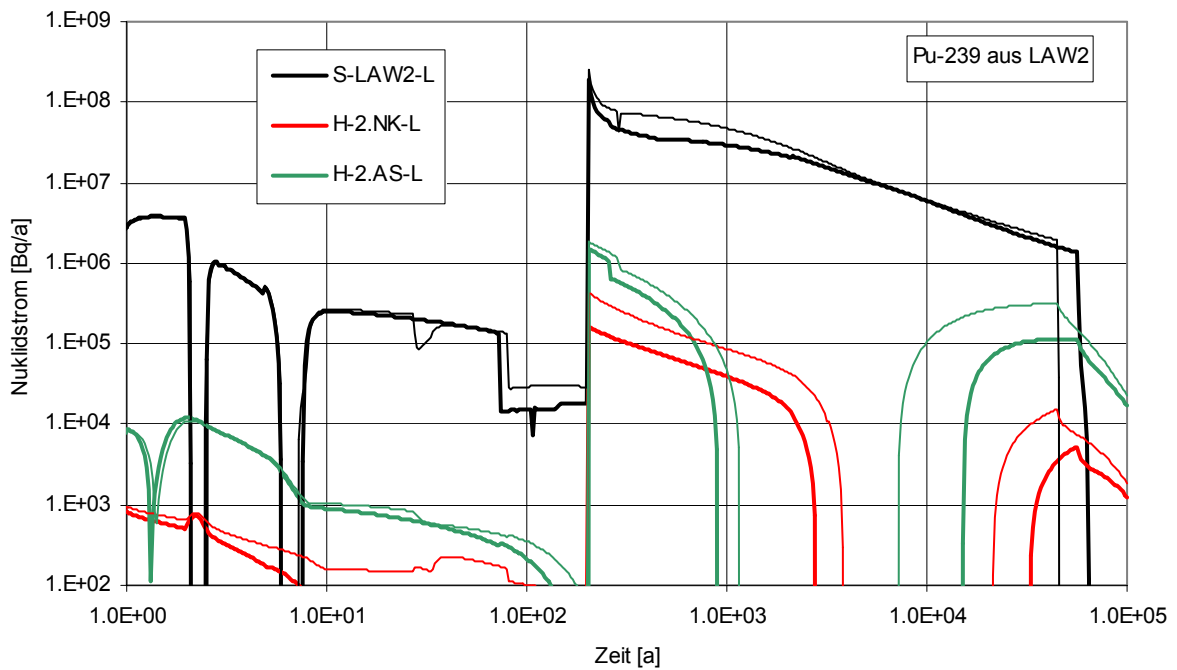


Abb. 3.50 Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW2 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

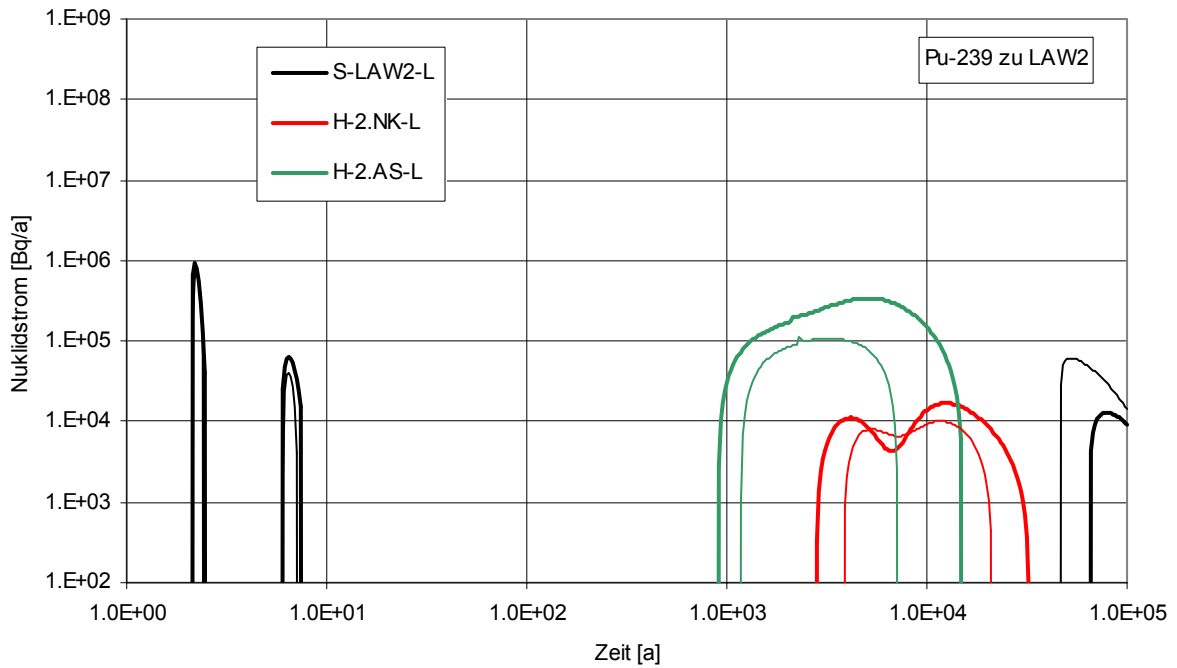


Abb. 3.51 Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW2 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

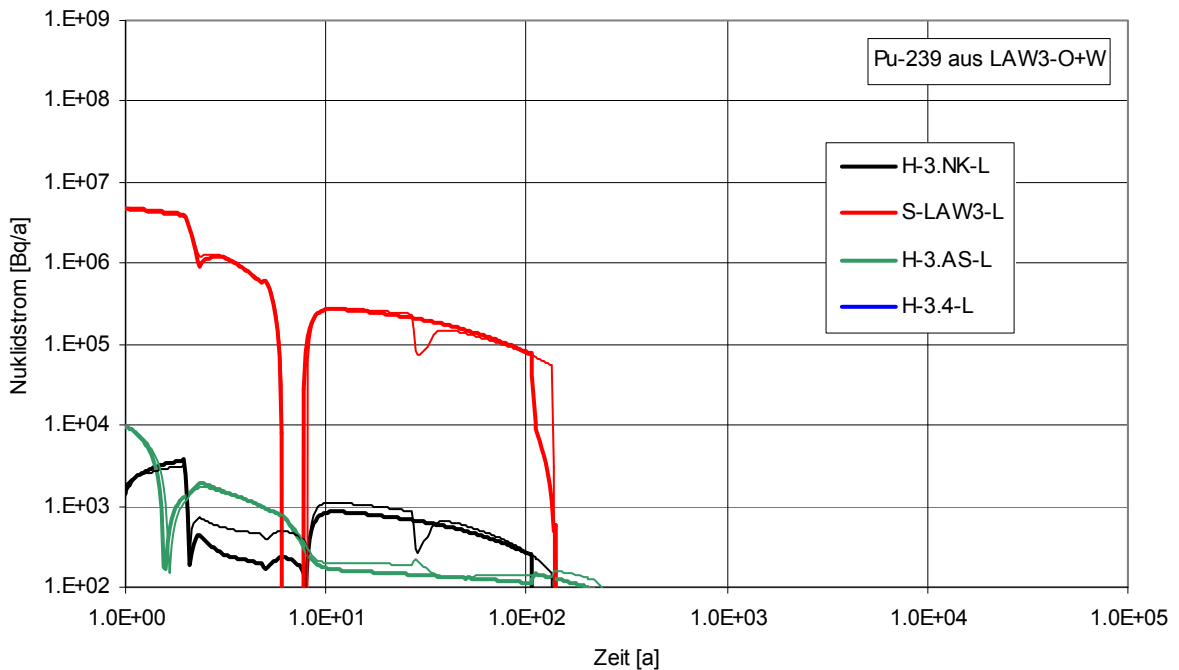


Abb. 3.52 Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW3 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

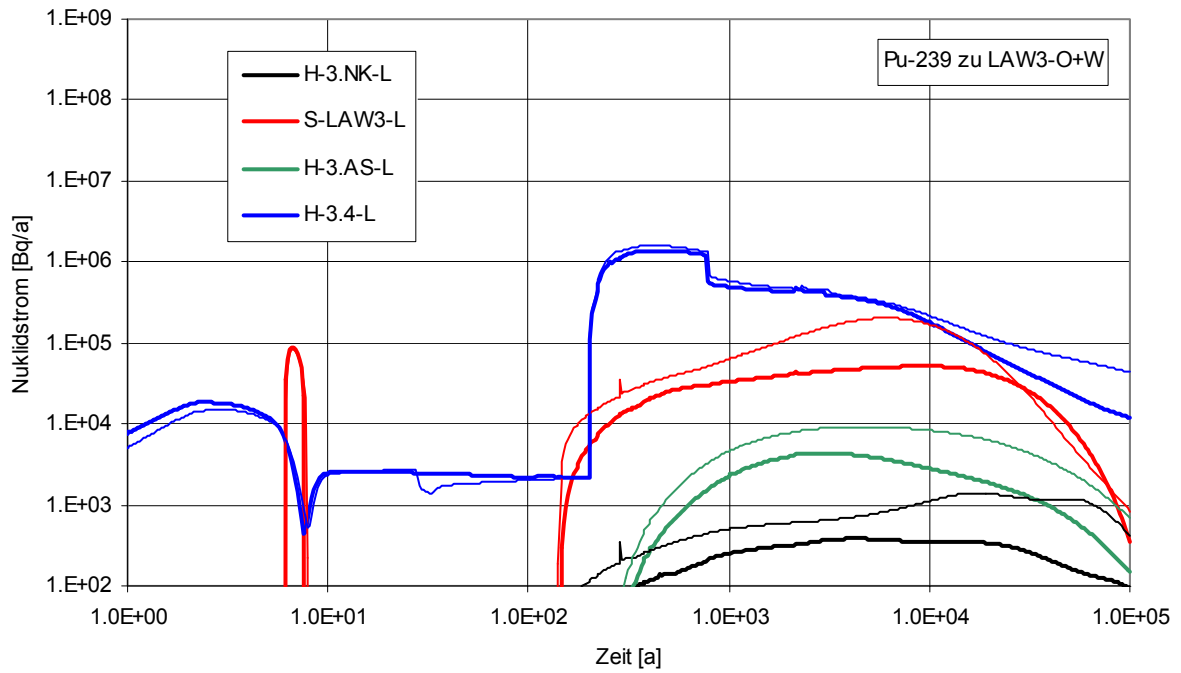


Abb. 3.53 Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW3 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

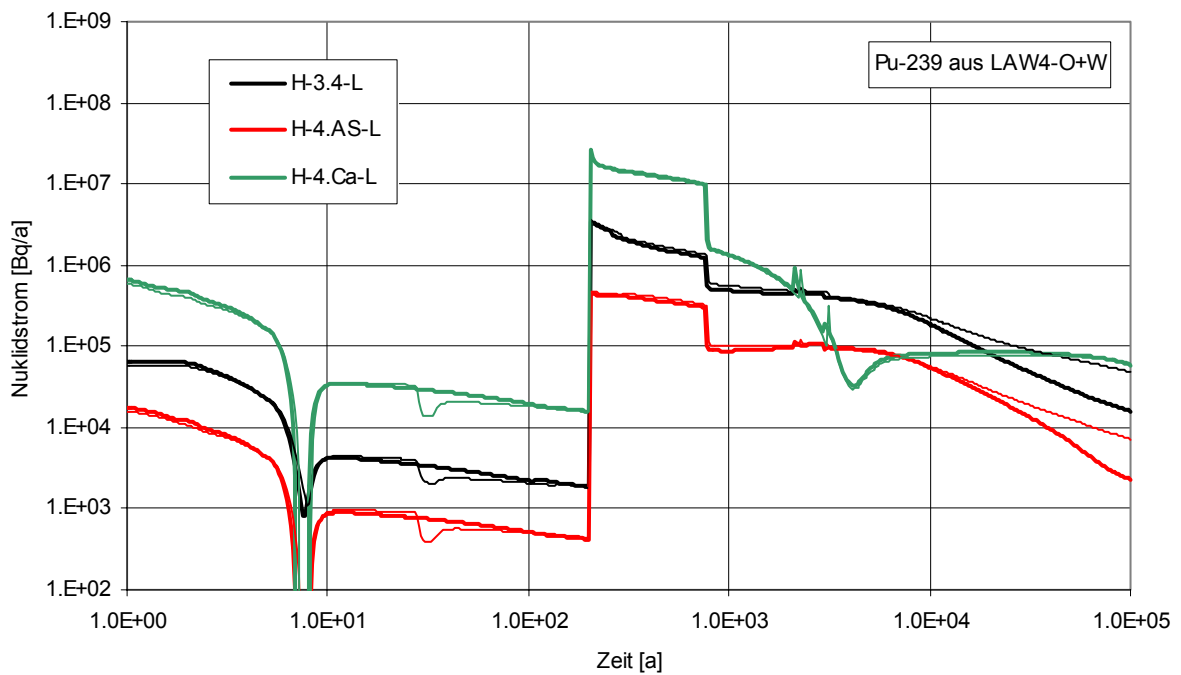


Abb. 3.54 Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW4 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

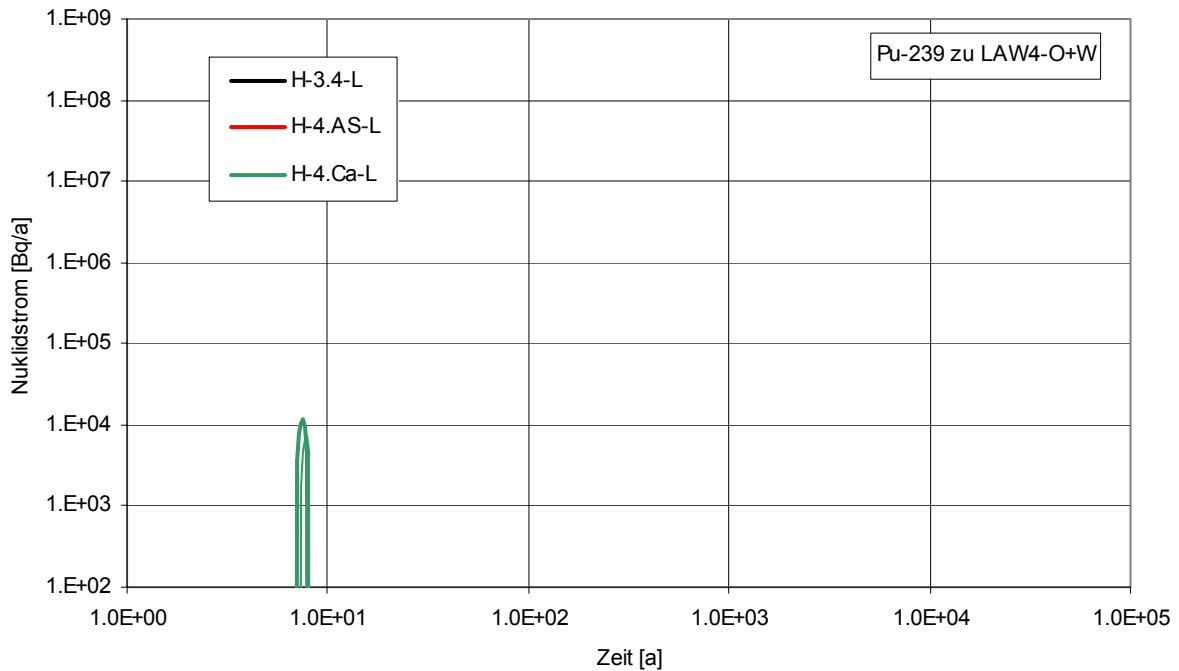


Abb. 3.55 Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW4 (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

3.2.1.4 Radionuklidkonzentrationen im Baufeld in der Südflanke

In Abb. 3.56 bis Abb. 3.61 sind für den Vergleichsfall die Konzentrationen von Am-241, Ra-226 und Pu-239 in ausgewählten Segmenten des Baufeldes der Südflanke zusammengefasst und jenen des Referenzfalls – dünne Linien – gegenübergestellt. Der Konzentrationsausgleich ist wegen des geringen Einflusses der Diffusion im Baufeld in der Südflanke vernachlässigbar gering. Die Abbildungen lassen fast ausschließlich die Einflüsse des gegenüber dem Referenzfall im Baufeld geringfügig beschleunigten advektiven Transports sowie – wie zuvor – des radioaktiven Zerfalls erkennen.

In den Abbildungen sind zwei Zeitbereiche zu erkennen, in denen relevante Änderungen zum Referenzfall zu sehen sind: ab ca. 1000 Jahren für alle Radionuklide und ab ca. 15 000 Jahren nur für Ra-226. Die Änderungen ab ca. 1000 Jahren treten im Wesentlichen nur im westlichen Strang oberhalb von 574 m Teufe auf. Sie stehen in Zusammenhang mit einem etwas geringeren diffusiven Transport im oberen, kaum durchströmten Bereich dieses Teiles des Baufeldes.

Die Änderungen für Ra-226 treten in beiden Teilen des Baufeldes auf und sind ebenfalls durch die um den Faktor 3 geringere Porendiffusivität verursacht. Diese führt dazu, dass zu späten Zeiten, wenn die Diffusion in den tieferen Bereichen des Grubengebäudes dominiert, der Nachschub der Mütter von Ra-226 langsamer abläuft.

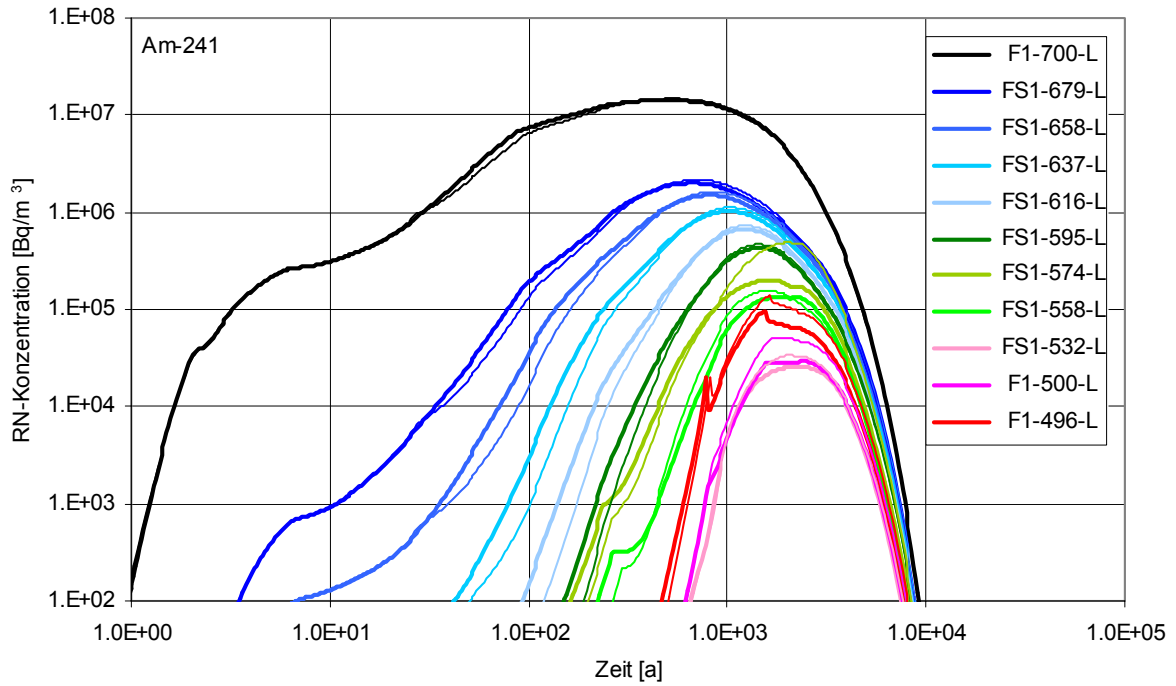


Abb. 3.56 Konzentration von Am-241 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

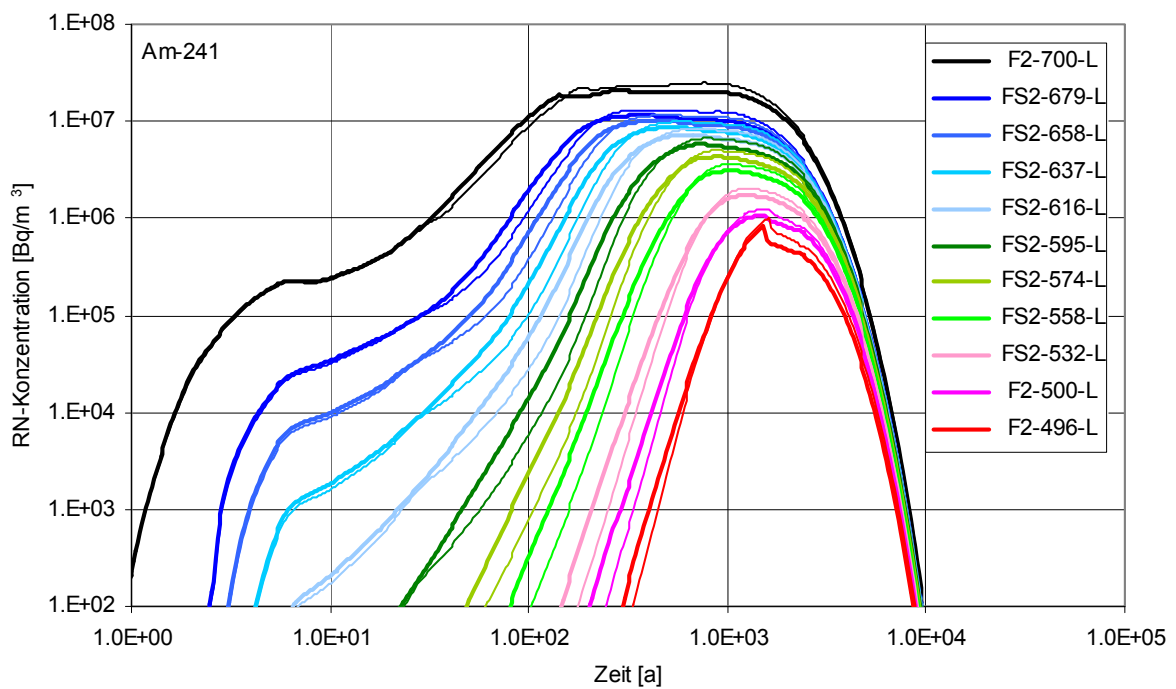


Abb. 3.57 Konzentration von Am-241 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

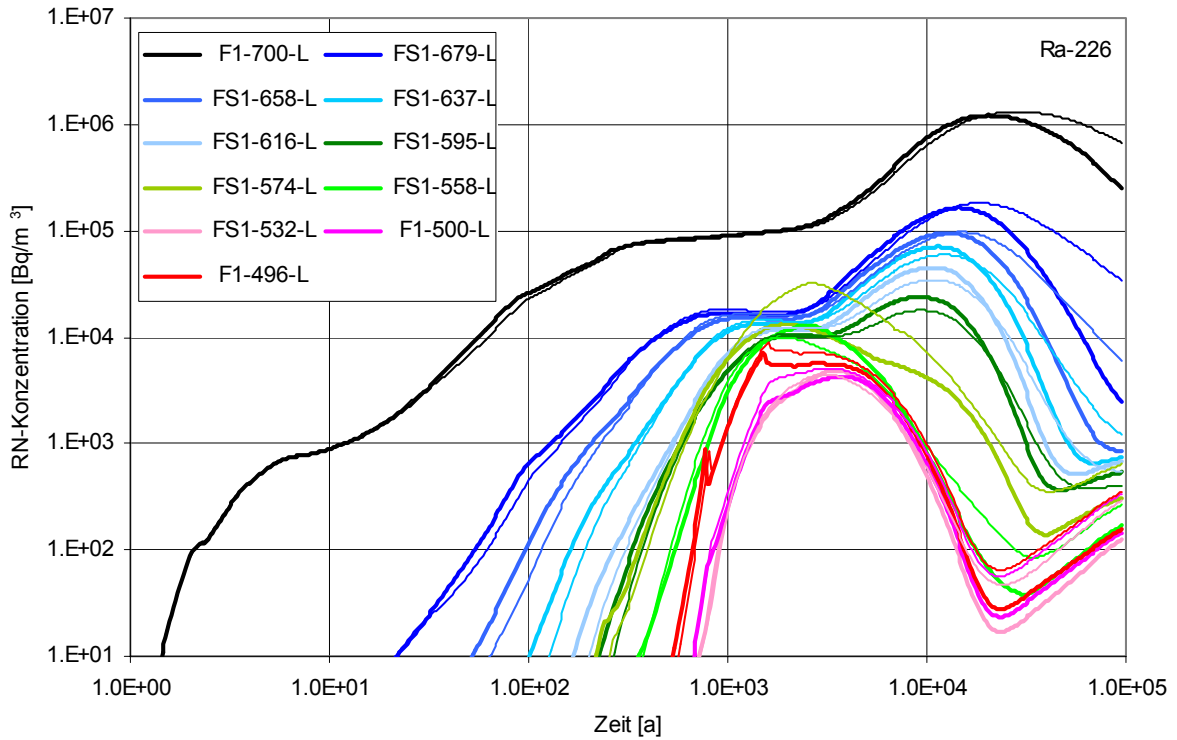


Abb. 3.58 Konzentration von Ra-226 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

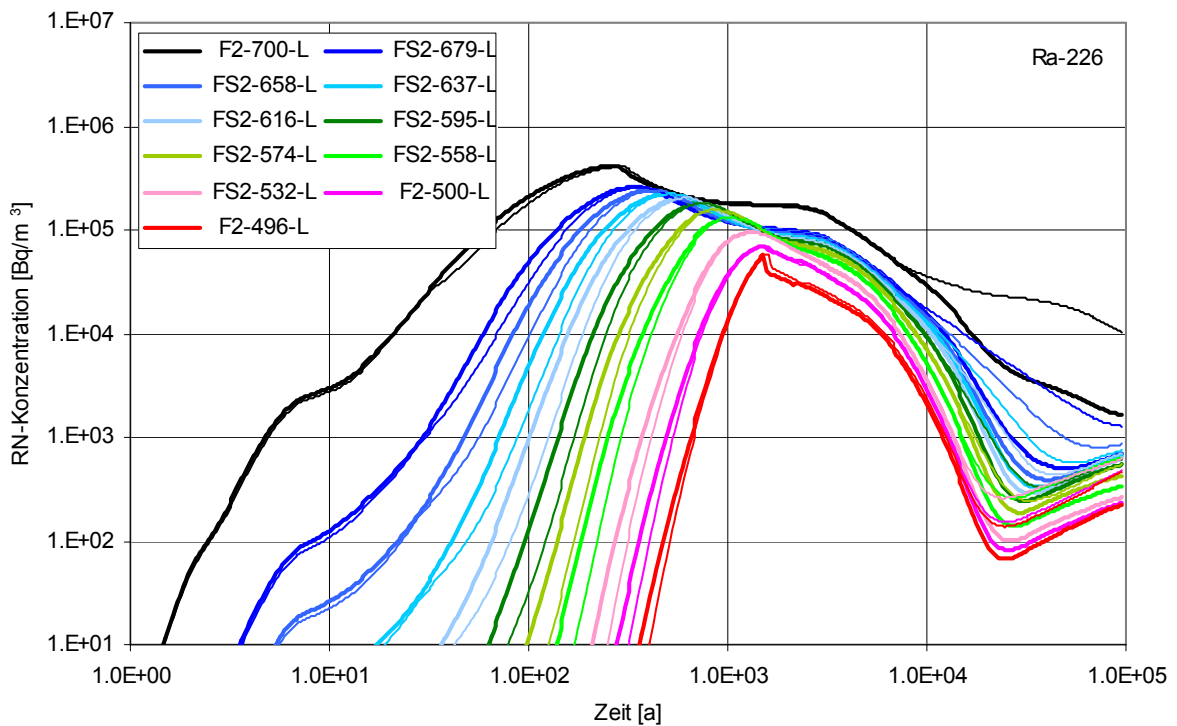


Abb. 3.59 Konzentration von Ra-226 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

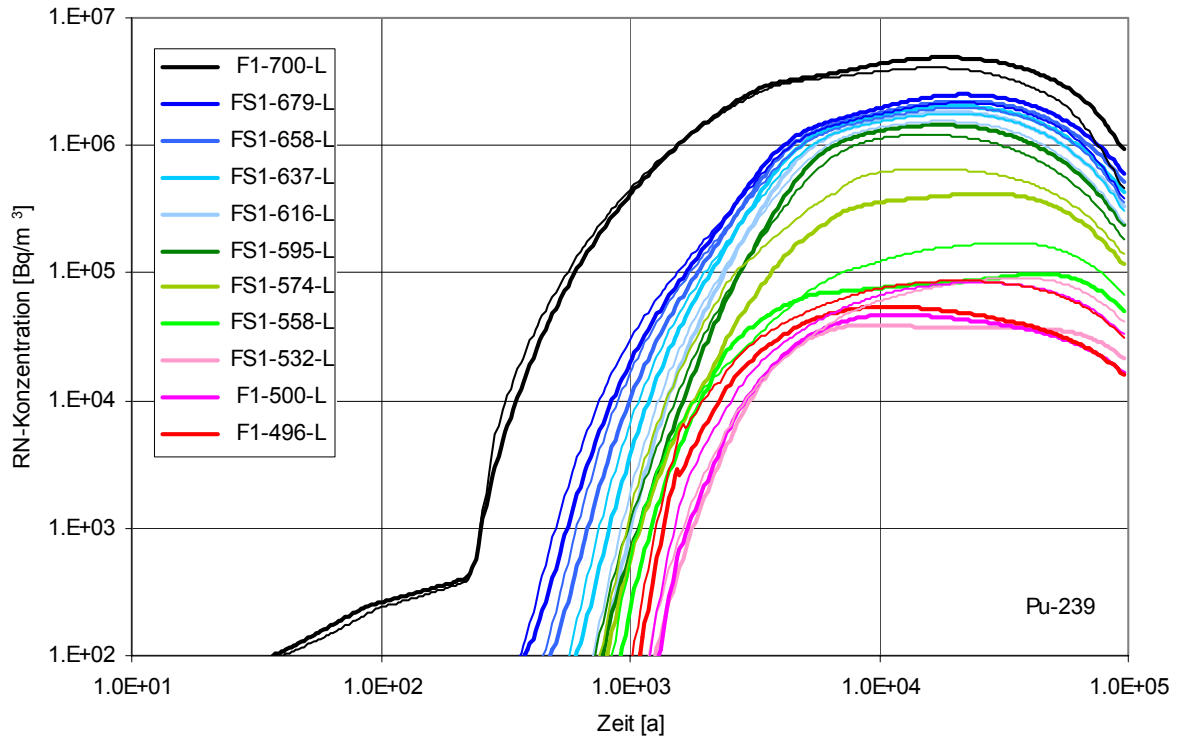


Abb. 3.60 Konzentration von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

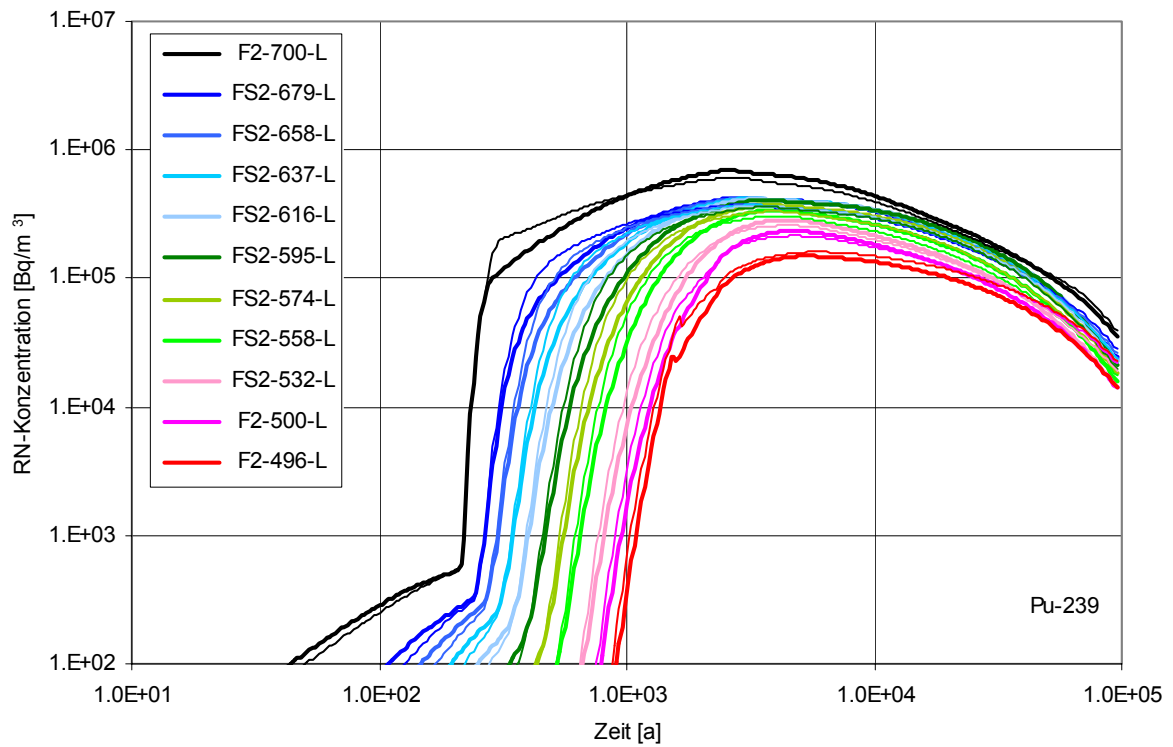


Abb. 3.61 Konzentration von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

3.2.1.5 Radionuklidfreisetzung aus der Grube

In Abb. 3.62 und Abb. 3.63 sind für den Vergleichsfall und für ausgewählte Radionuklide, die möglicherweise relevant zur potenziellen Strahlenexposition beitragen, die Radionuklidkonzentrationen im Lösungsaustritt an den Austrittsstellen sowohl in 500 m als auch in 574 m Teufe dargestellt. Diese Konzentrationsentwicklungen sind jenen für den Referenzfall – dünne Linien – gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass im Vergleichsfall, beispielsweise im Baufeld in der Südflanke, die Entwicklung der Radionuklidkonzentrationen im Bereich ihrer Maxima sehr ähnlich zu jener im Referenzfall ist. Lediglich das Ansteigen der Konzentrationen ist gegenüber dem Referenzfall anfänglich leicht beschleunigt.

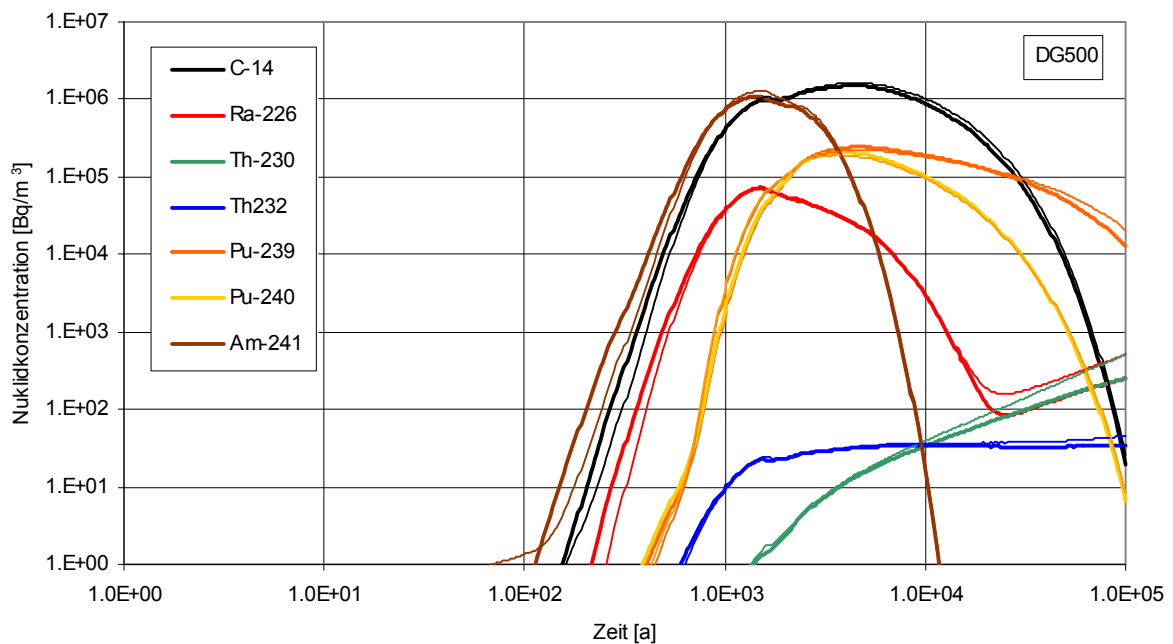


Abb. 3.62 Radionuklidkonzentrationen an der Austrittsstelle in 500 m Teufe (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

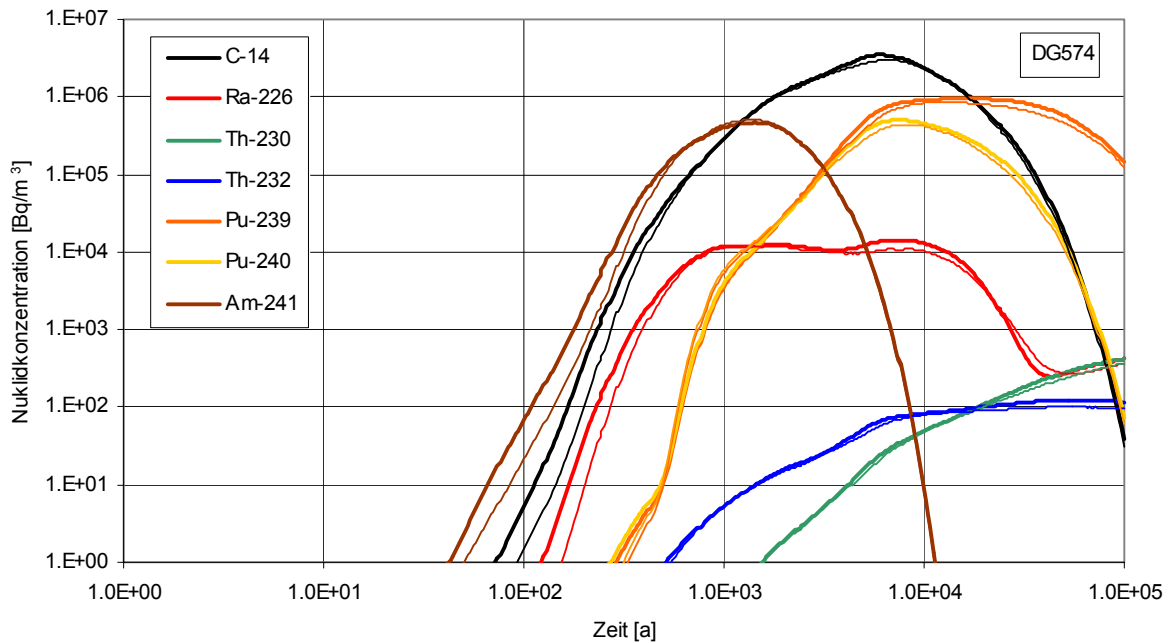


Abb. 3.63 Radionuklidkonzentrationen an der Austrittsstelle in 574 m Teufe (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

Abb. 3.64 zeigt die Gesamt-Radionuklidströme, welche der Abbildung des Transports im Deckgebirge zu den Exfiltrationsgebieten über Transferfunktionen zu Grunde gelegt werden. Dieses Ergebnis ist völlig im Einklang mit dem Verhalten der mit KAFKA berechneten Tracerflüsse über die Schnittstelle zum Deckgebirge (Abb. 3.26).

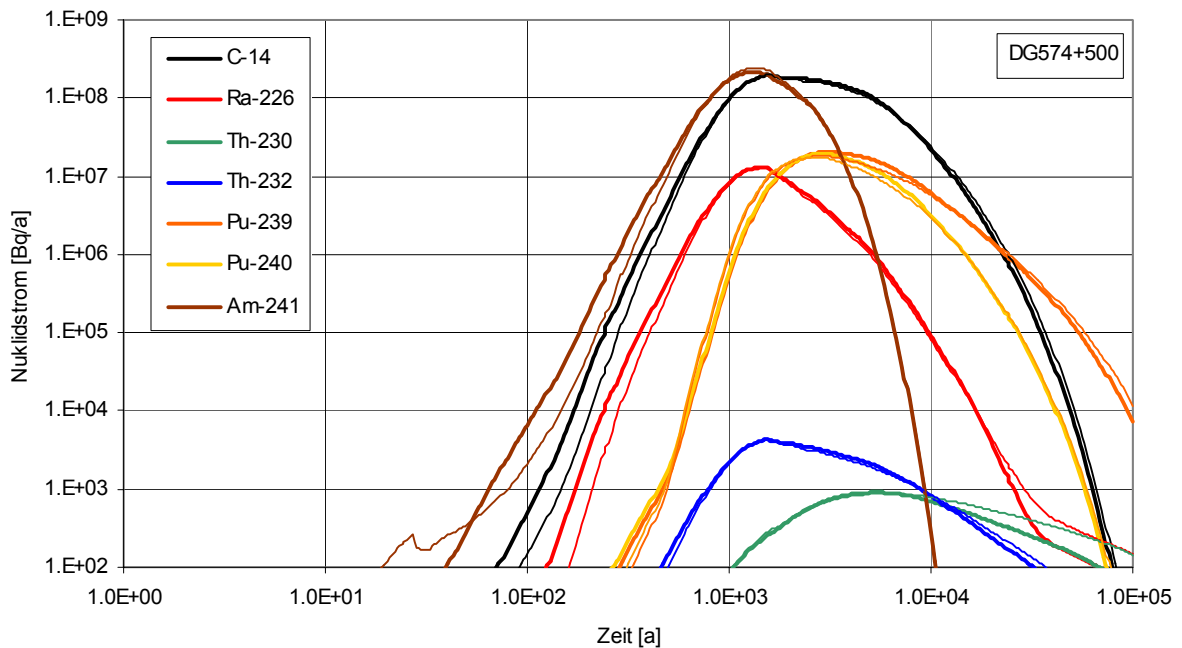


Abb. 3.64 Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube (Vergleichsfall vs. Referenzfall R8-L, dünn)

3.2.2 Auswirkung der Transferfunktionen für das Deckgebirge und der geänderten Dosiskonversionsfaktoren

3.2.2.1 Auswirkung der geänderten Dosiskonversionsfaktoren

Die in Tab. 3.2 aufgelisteten Dosiskonversionsfaktoren unterscheiden sich i.A. um weniger als 5 % von denjenigen, die im Schlussbericht 2005 verwendet wurden. Lediglich für Ra-226 ist der Dosiskonversionsfaktor um etwa 25 % geringer und für C-14 um den Faktor 4 höher. Da diese Radionuklide nur unwesentlich zur Summe der Strahlenexpositionen beitragen, sind auch die Änderungen ihrer Dosiskonversionsfaktoren bezüglich der potenziellen Strahlenexposition nicht relevant (in der Summe weniger als 10 %).

3.2.2.2 Auswirkung der Transferfunktionen für das Deckgebirge

Abb. 3.65 zeigt für den Vergleichsfall einen Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodell, die mit Hilfe der zugehörigen Transferfunktionen für den Deckgebirgsrechenfall DR13 berechnet sind. Es zeigt sich, dass das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (m-Witt) mit $1,5 \cdot 10^{-5}$ Sv/a bei etwa 23 000 Jahren die beiden anderen Maxima deutlich dominiert. Zu früheren Zeiten dominiert jedoch die potenzielle Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (vD-Amm) mit einem Maximum von $3,3 \cdot 10^{-6}$ Sv/a bei etwa 2 100 Jahren die beiden anderen Strahlenexpositionsentwicklungen. Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (m-Amm) ist mit $3,2 \cdot 10^{-6}$ Sv/a bei etwa 10 000 Jahren fast gleich groß. Zu jener Zeit dominiert jedoch die potenzielle Strahlenexposition im Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ schon längst.

Zum besseren Vergleich, sowohl unter einander als auch mit der früher für den Referenzfall berechneten potenziellen Strahlenexposition, zeigt Abb. 3.66 die verschiedenen berechneten potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen in linearer Darstellung. Das Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ ist etwa einen Faktor 2,5 niedriger als das früher mit dem ‚Verdünnungsmodell‘ für den Referenzfall gerechnete Maximum.

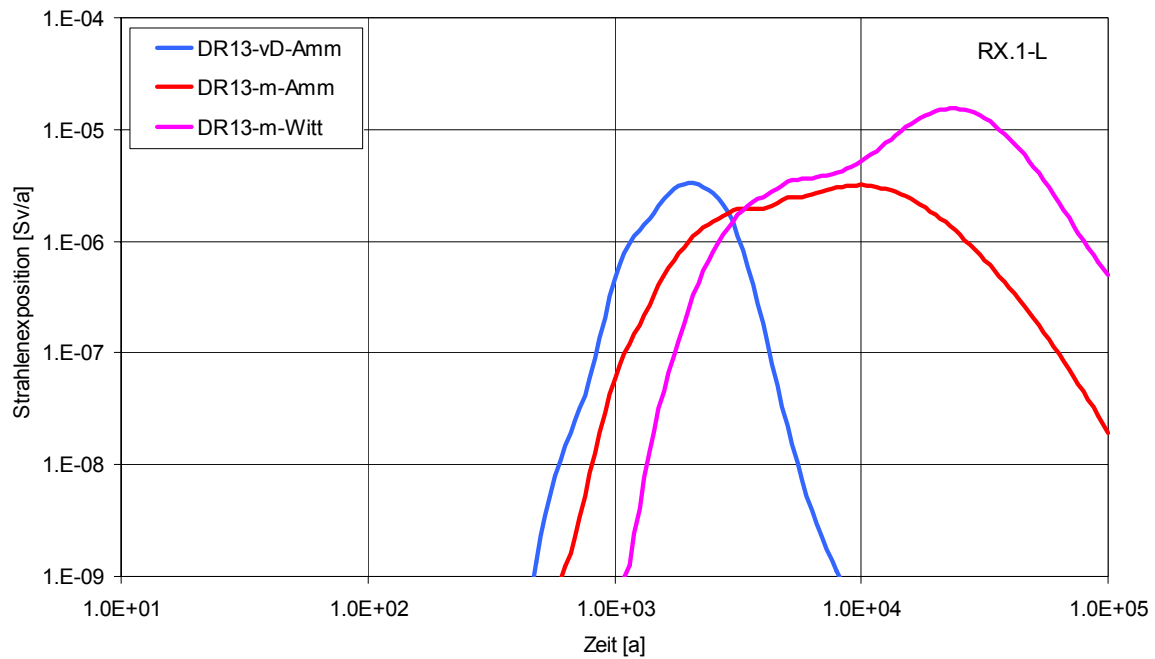


Abb. 3.65 Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells

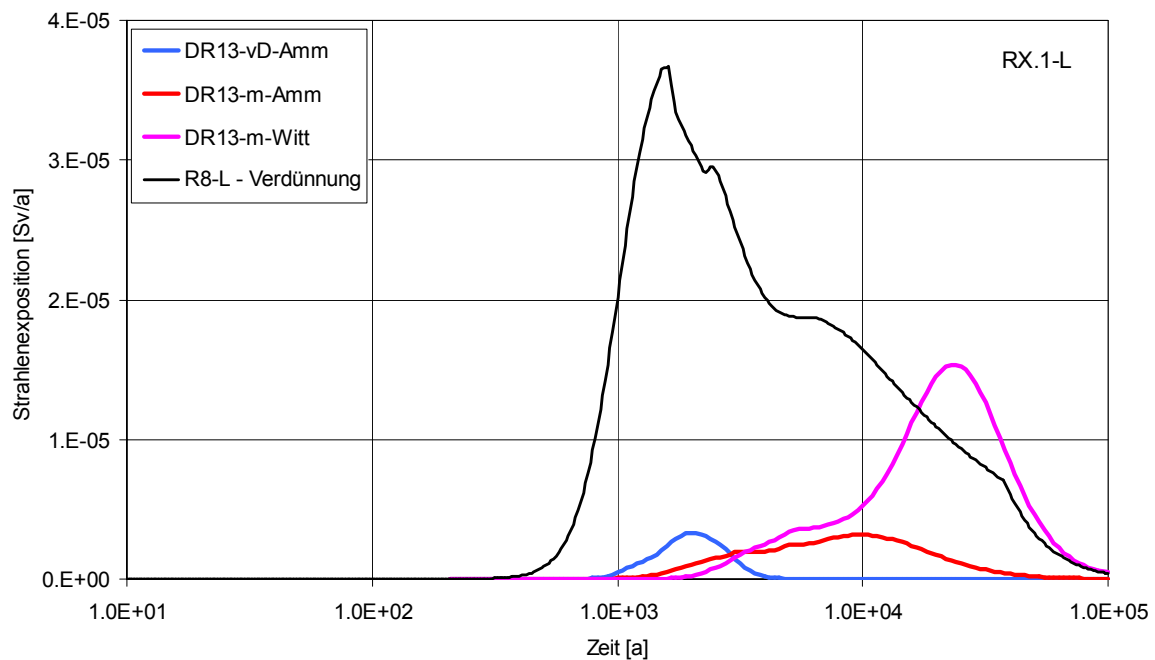


Abb. 3.66 Potenzielle Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete im Vergleich zum früheren ‚Verdünnungsmodell‘ (lineare Darstellung)

3.2.2.3 Radionuklidbeiträge zu den potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen

In Abb. 3.67 bis Abb. 3.69 sind für den Vergleichsfall die radionuklidspezifischen Strahlenexpositionsbeiträge für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells dargestellt. Die wichtigsten Radionuklidbeiträge zur Zeit der jeweiligen Maxima sind in Tab. 3.3 zusammengetragen. Für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ wird das Maximum bei etwa 2 100 Jahren vor allem durch Am-241 und Ra-226/Pb-210 (im Zerfallsgleichgewicht) bestimmt. Für die beiden anderen Exfiltrationsgebiete werden die Maxima – bei 10 000 bzw. 23 000 Jahren – vor allem durch Pu-239 und Pu-240 bestimmt, wobei zudem C-14 und Pa-231 noch nennenswert beitragen. Dieses Verhalten ist vergleichbar mit den relevanten Radionuklidbeiträgen zur Gesamtstrahlenexposition gemäß dem früheren ‚Verdünnungsmodell‘ im Schlussbericht 2005, wo zur Zeit des damaligen Maximums bei 1 650 Jahren ebenfalls der Beitrag von Am-241 dominiert und wo das nach dem Maximum bis etwa 30 000 Jahre langsam absinkende Plateau ebenfalls durch Pu-239 und Pu-240 dominiert wird.

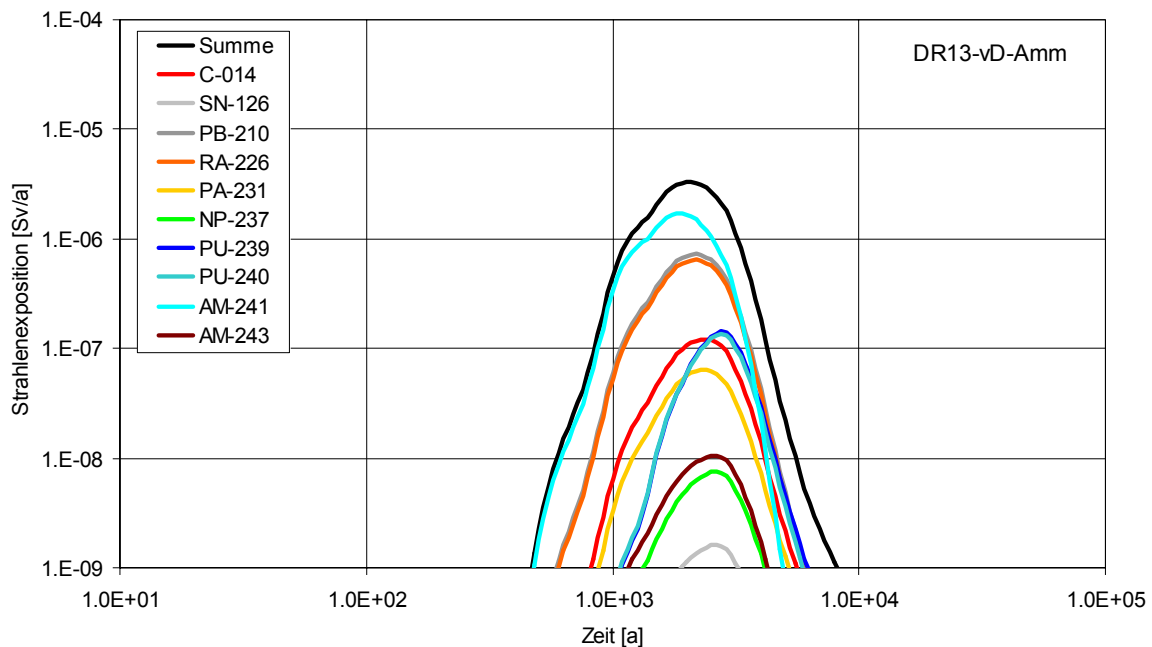


Abb. 3.67 Radionuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärztes Deckgebirge – Ammerbeek‘

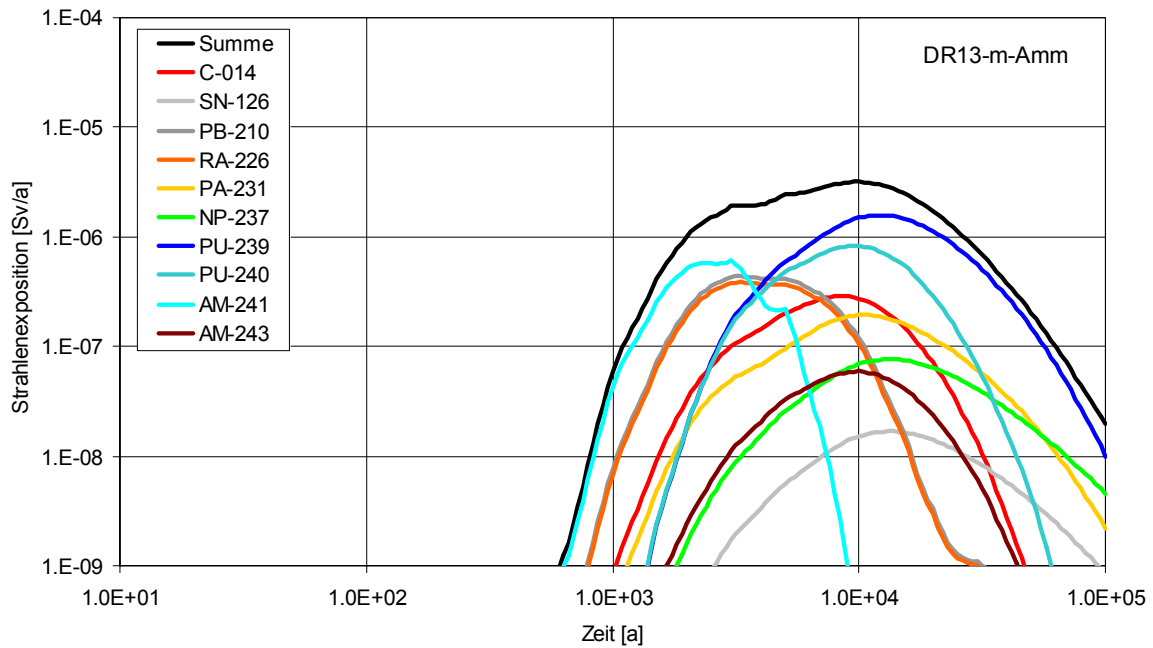


Abb. 3.68 Radionuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘

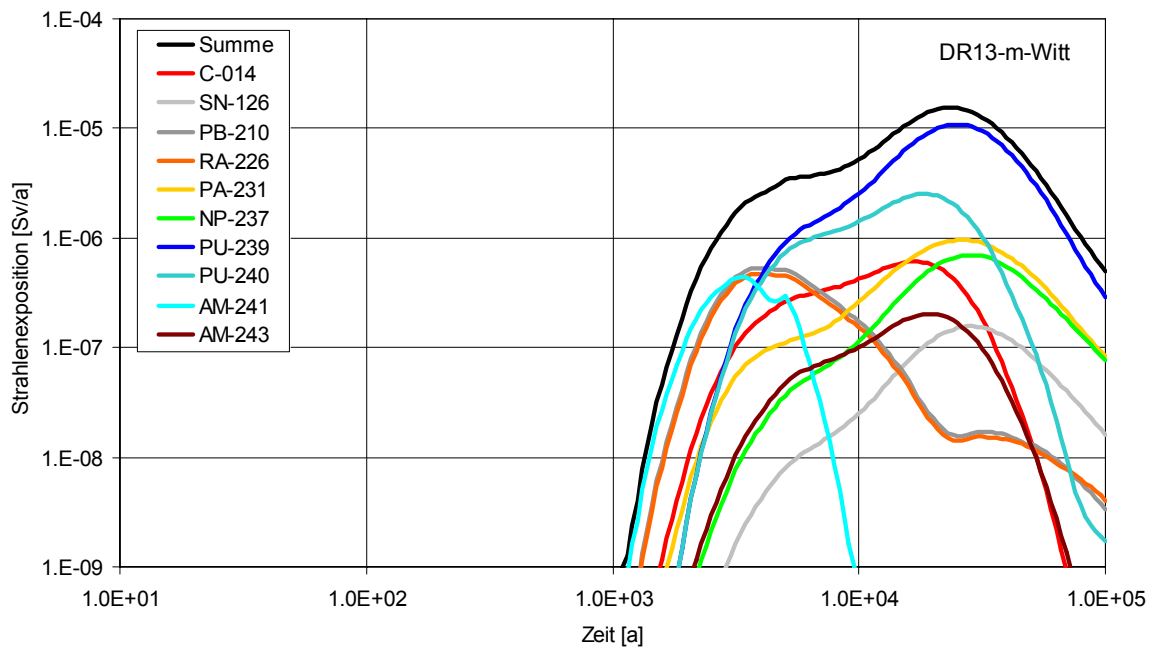


Abb. 3.69 Radionuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘

Tab. 3.3 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete

RX.1 – DR13 Radionuklid	vD-Amm bei 2 100 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 23 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$2,8 \cdot 10^{-7}$	9 %	$4,7 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$1,3 \cdot 10^{-9}$	-	$1,5 \cdot 10^{-8}$	-	$1,4 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$7,1 \cdot 10^{-8}$	2 %	$8,3 \cdot 10^{-7}$	26 %	$2,2 \cdot 10^{-6}$	14 %
Am-241	$1,6 \cdot 10^{-6}$	49 %	$3,8 \cdot 10^{-10}$	-	$2,9 \cdot 10^{-17}$	-
Np-237	$5,7 \cdot 10^{-9}$	-	$6,9 \cdot 10^{-8}$	2 %	$6,3 \cdot 10^{-7}$	4 %
Ra-226	$6,4 \cdot 10^{-7}$	19 %	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,5 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$7,2 \cdot 10^{-7}$	22 %	$1,2 \cdot 10^{-7}$	4 %	$1,7 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$8,5 \cdot 10^{-9}$	-	$5,9 \cdot 10^{-8}$	2 %	$1,9 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-239	$7,1 \cdot 10^{-8}$	2 %	$1,5 \cdot 10^{-6}$	47 %	$1,1 \cdot 10^{-5}$	69 %
Pa-231	$6,0 \cdot 10^{-8}$	2 %	$1,9 \cdot 10^{-7}$	6 %	$9,3 \cdot 10^{-7}$	6 %
übrige RN	$1,5 \cdot 10^{-9}$	-	$1,5 \cdot 10^{-8}$	-	$1,4 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$3,3 \cdot 10^{-6}$	100 %	$3,2 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,5 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

Da die Dosiskonversionsfaktoren (DKF) für Grundwasser- und Oberflächenwasser-Nutzung (inkl. Fischzucht) sich nur für C-14 relevant unterscheiden (vgl. Kap. 2.4), wirkt sich eine Verwendung der DKF für Grundwassernutzung nicht relevant auf die Maxima der potenziellen Strahlenexpositionen aus: Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ würde etwa 7 %, die beiden anderen Maxima etwa 2,5 % abnehmen.

3.2.2.4 Herkunft des die Strahlenexposition dominierenden Nuklids

Die Strahlenexpositionsbeiträge für die Exfiltrationsgebiete (Tab. 3.3) zeigen, dass Am-241 das Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ und Pu-239 die Maxima für die beiden anderen Exfiltrationsgebiete bestimmt. In der Folge wird verdeutlicht, in welchem Ausmaß das Inventar der einzelnen Einlagerungsbereiche bzw. das der beiden Abfalltypen (mit oder ohne VBA) zur Strahlenexposition beiträgt, siehe Abb. 3.70 ff.

Das für das Exfiltrationsgebiet ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ die Strahlenexposition dominierende Am-241 stammt vor allem aus den VBA-Gebinden des Einlagerungsbereiches LAW3. Die zweitgrößten Beiträge zum Zeitpunkt des Maximums stammen etwa zu gleichen Teilen aus LAW1A und LAW1B. In Tab. 3.4 ist sowohl für das dominierende Am-241 als auch für Ra-226 und Pu-239 die Herkunft der Radionuklide zur Zeit des jeweiligen Beitragsmaximums zusammengetragen.

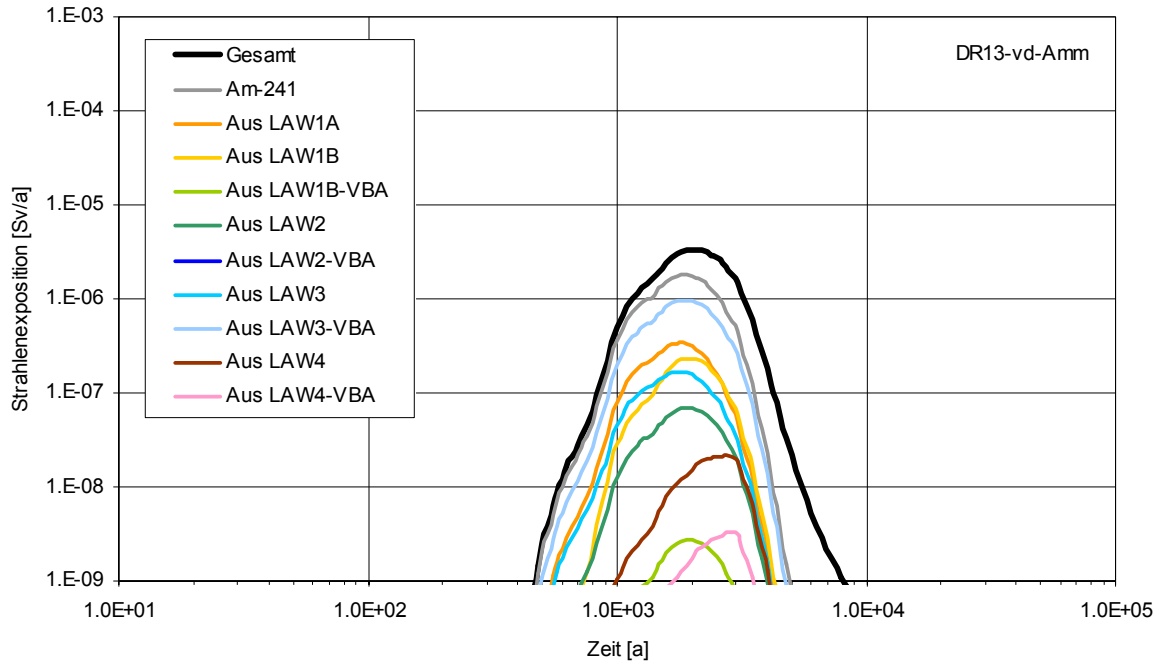


Abb. 3.70 ELB-Beiträge Am-241 zur Strahlenexposition im Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘

Tab. 3.4 Beiträge zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ am Zeitpunkt des vom jeweiligen Radionuklid verursachten Maximums (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)

RX.1 DR13 – vD-Amm	Am-241 bei 1 750 a		Pu-239 bei 2 650 a		Ra-226 bei 2 100 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
Aus LAW1A	3,4·10⁻⁷	19 %	1,3·10⁻⁷	97 %	6,0·10⁻⁷	94 %
Aus LAW1B	2,2·10⁻⁷	12 %	3,3·10 ⁻¹¹	-	4,7·10 ⁻⁹	1 %
Aus LAW1B-VBA	2,5·10 ⁻⁹	-	3,3·10 ⁻¹³	-	-	-
Aus LAW2	6,6·10 ⁻⁸	4 %	3,5·10 ⁻⁹	3 %	4,8·10 ⁻⁹	1 %
Aus LAW2-VBA	5,7·10 ⁻¹¹	-	1,6·10 ⁻¹²	-	-	-
Aus LAW3	1,7·10 ⁻⁷	10 %	2,2·10 ⁻¹³	-	2,4·10 ⁻⁸	4 %
Aus LAW3-VBA	9,5·10⁻⁷	54 %	9,6·10 ⁻¹¹	-	-	-
Aus LAW4	1,1·10 ⁻⁸	1 %	7,6·10 ⁻¹¹	-	1,5·10 ⁻⁹	-
Aus LAW4-VBA	1,1·10 ⁻⁹	-	1,8·10 ⁻¹¹	-	-	-
Summe	1,8·10 ⁻⁶	100 %	1,4·10 ⁻⁷	100 %	6,4·10 ⁻⁷	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

Das für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ die Strahlenexposition dominierende Pu-239 stammt vor allem aus LAW1A. Der zweitgrößte Beitrag zum Zeitpunkt des Maximums stammt aus LAW2. In Tab. 3.5 ist sowohl für das dominierende Pu-239 als

auch für Am-241 und Ra-226 die Herkunft der Radionuklide zur Zeit des jeweiligen Beitragsmaximums zusammengetragen.

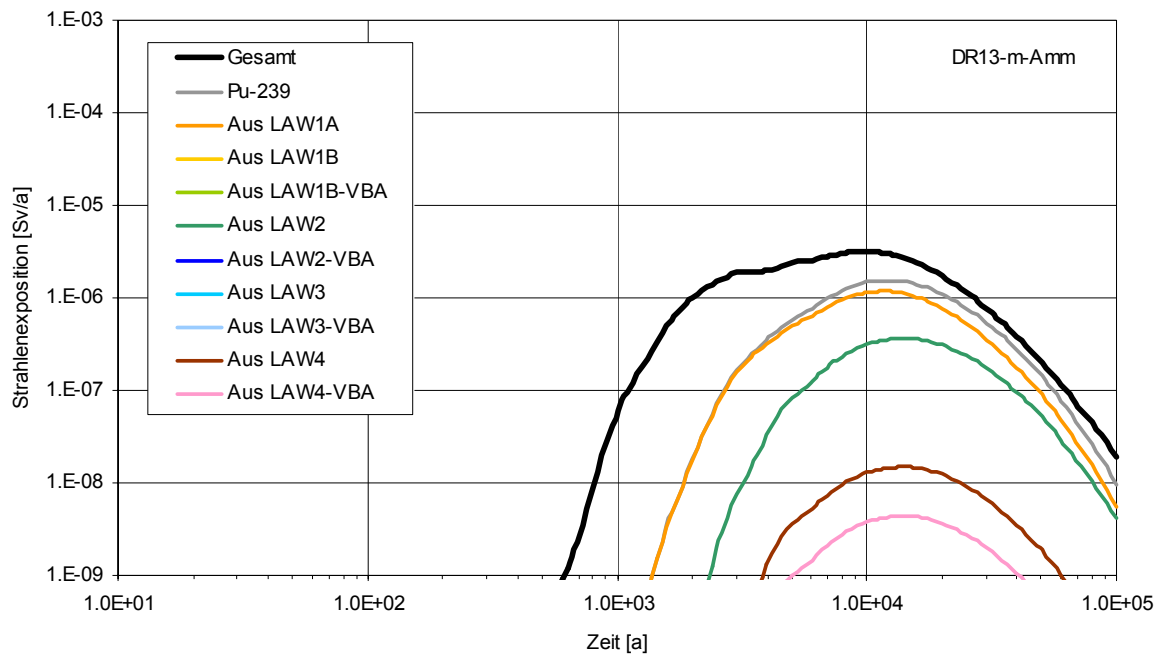


Abb. 3.71 ELB-Beiträge Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘

Tab. 3.5 Beiträge zur Strahlenexposition im Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ am Zeitpunkt des vom jeweiligen Radionuklid verursachten Maximums (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)

RX.1 DR13 – m-Amm	Am-241 bei 2 900 a		Pu-239 bei 11 500 a		Ra-226 bei 3 150 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
Aus LAW1A	6,8·10⁻⁸	11 %	1,2·10⁻⁶	76 %	3,5·10⁻⁷	90 %
Aus LAW1B	7,8·10⁻⁸	13 %	3,3·10 ⁻¹⁰	-	4,2·10 ⁻⁹	1 %
Aus LAW1B-VBA	9,0·10 ⁻¹⁰	-	3,3·10 ⁻¹²	-	-	-
Aus LAW2	2,5·10 ⁻⁸	4 %	3,4·10⁻⁷	22 %	5,0·10 ⁻⁹	1 %
Aus LAW2-VBA	2,1·10 ⁻¹¹	-	1,6·10 ⁻¹⁰	-	-	-
Aus LAW3	4,4·10 ⁻⁸	7 %	2,2·10 ⁻¹²	-	2,0·10 ⁻⁸	5 %
Aus LAW3-VBA	3,5·10⁻⁷	59 %	4,4·10 ⁻¹⁰	-	-	-
Aus LAW4	2,6·10 ⁻⁸	4 %	1,4·10 ⁻⁸	1 %	7,6·10 ⁻⁹	2 %
Aus LAW4-VBA	4,3·10 ⁻⁹	1 %	4,1·10 ⁻⁹	-	-	-
Summe	6,0·10 ⁻⁷	100 %	1,5·10 ⁻⁶	100 %	3,8·10 ⁻⁷	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

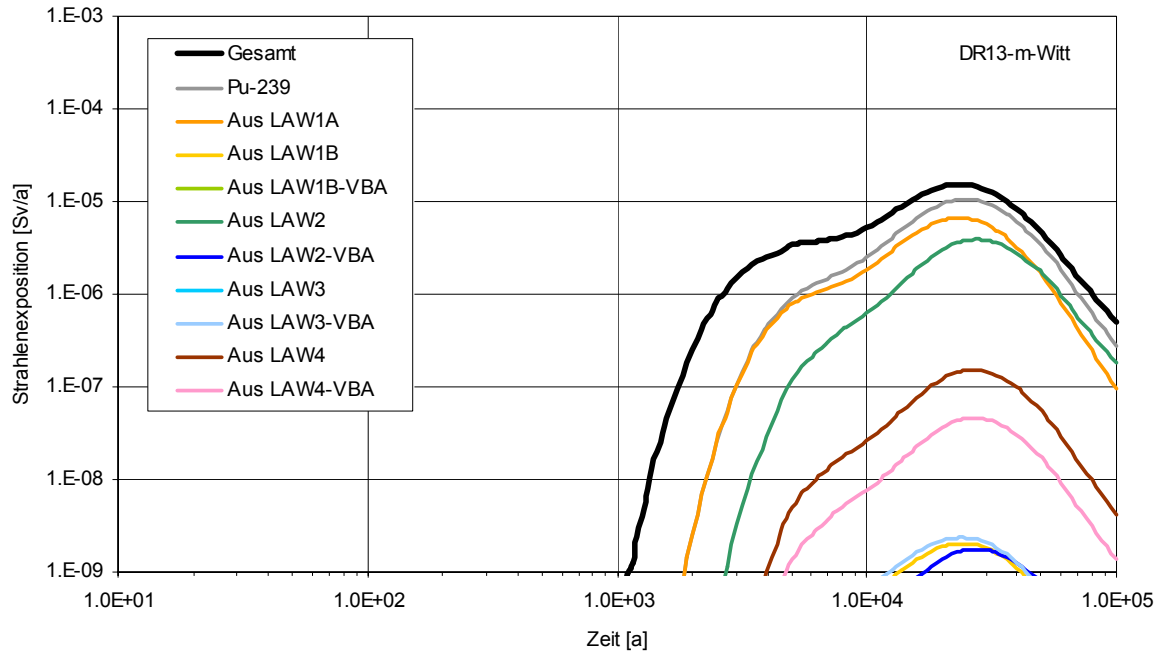


Abb. 3.72 ELB-Beiträge Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘

Tab. 3.6 Beiträge zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ am Zeitpunkt des vom jeweiligen Radionuklid verursachten Maximums (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)

RX.1 DR13 – m-Witt	Am-241 bei 3 150 a		Pu-239 bei 24 000 a		Ra-226 bei 3 800 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
Aus LAW1A	5,3·10⁻⁸	12 %	6,6·10⁻⁶	63 %	4,2·10⁻⁷	89 %
Aus LAW1B	5,9·10⁻⁸	13 %	2,0·10 ⁻⁹	-	5,7·10 ⁻⁹	1 %
Aus LAW1B-VBA	6,8·10 ⁻¹⁰	-	2,0·10 ⁻¹¹	-	-	-
Aus LAW2	1,8·10 ⁻⁸	4 %	3,7·10⁻⁶	35 %	7,0·10 ⁻⁹	1 %
Aus LAW2-VBA	1,6·10 ⁻¹¹	-	1,7·10 ⁻⁹	-	-	-
Aus LAW3	3,3·10 ⁻⁸	7 %	1,9·10 ⁻¹¹	-	2,7·10 ⁻⁸	6 %
Aus LAW3-VBA	2,6·10⁻⁷	59 %	2,3·10 ⁻⁹	-	-	-
Aus LAW4	1,8·10 ⁻⁸	4 %	1,5·10 ⁻⁷	1 %	1,2·10 ⁻⁸	3 %
Aus LAW4-VBA	2,9·10 ⁻⁹	1 %	4,4·10 ⁻⁸	-	-	-
Summe	4,4·10 ⁻⁷	100 %	1,0·10 ⁻⁵	100 %	4,7·10 ⁻⁷	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

Das für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ die Strahlenexposition dominierende Pu-239 stammt vor allem aus LAW1A. Der zweitgrößte Beitrag zum Zeitpunkt des Maximums stammt aus LAW2. In Tab. 3.6 ist sowohl für das dominierende Pu-239 als auch

für Am-241 und Ra-226 die Herkunft der Radionuklide zur Zeit des jeweiligen Beitragsmaximums zusammengetragen.

Für die drei Exfiltrationsgebiete wird der Ra-226-Beitrag zur Zeit des Maximums fast vollständig durch Radionuklide aus LAW1A dominiert.

Obwohl das Plutoniuminventar in LAW3 am größten ist, fällt der geringe Beitrag von LAW3 zum Pu-239-Maximum im Vergleich zu den Beiträgen aus LAW1A und LAW2 auf. Ursache des geringen Beitrags ist der beim Referenz-Radionuklidquellterm (vgl. Schlussbericht 2005, Tab. 6.19) im LAW3 langfristig wirksam unterstellte Sorptionseffekt am Zement bzw. an den Korrosionsprodukten des Zements, wodurch die maximal mögliche Plutoniumkonzentration relativ niedrig ist.

In LAW1A und LAW2 wird Pu-239 durch diesen Sorptionseffekt nur mittelfristig bis 200 Jahre zurückgehalten, langfristig begrenzt hier die Elementlöslichkeit die Konzentration, welche zu drei Größenordnungen höheren maximal möglichen Radionuklidkonzentrationen führt.

3.3 Schlussfolgerungen für den Vergleichsfall

In diesem Kapitel wurden die Ergebnisse des Vergleichsfalls dargestellt und wo sinnvoll jenen des Referenzfalls aus dem Schlussbericht 2005 gegenübergestellt. Der Vergleichsfall unterscheidet sich vom Referenzfall lediglich betreffend (vgl. Kap. 2):

- eines um 20 % niedrigeren Wertes für die Viskosität des eingebrachten Schutzfluids,
- einer um den Faktor 3 niedrigeren Porendiffusivität des eingebrachten Schutzfluids,
- einer realitätsnäheren Parametrisierung des hydraulischen Widerstandes, den das Deckgebirge dem Auspressen von Lösung aus der Grube entgegensetzt (Schnittstelle Grube/Deckgebirge), abgeleitet aus dem Deckgebirgsrechenfall R13 [Colenco 2006a],
- einer expliziten Abbildung des Radionuklidtransports im Deckgebirge zu den drei im Deckgebirgsmodell [Colenco 2006a] identifizierten Exfiltrationsgebieten,
- aktualisierten Dosiskonversionsfaktoren, unter Berücksichtigung der Fischzucht in Oberflächenwässern [GSF 2006a].

Die Ergebnisse des Vergleichsfalls führen zu den nachfolgenden Schlussfolgerungen:

- Die neue Parametrisierung der Schnittstelle Grube/Deckgebirge bewirkt im Vergleichsfall zwischen 30 und 300 Jahren gegenüber dem Referenzfall geringere Fluid- und Gasdrücke in der Grube (vgl. Kap. 3.1.1.1). Auch ab etwa 1 000 Jahren sind die Drücke im Vergleichsfall niedriger. Ersteres hat einen kontinuierlicheren Lösungsfluss in das Deckgebirge zur Folge. Die langfristigen und die kumulierten Lösungsflüsse in das Deckgebirge unterscheiden sich in den beiden Rechenfällen jedoch nur geringfügig (siehe auch Kap. 3.2.1.1).
- Die Einflüsse auf Gasspeicher und Gastransport im Grubengebäude sind vernachlässigbar (vgl. Kap. 3.1.1.2).

- Ebenso sind die Einflüsse der Änderungen auf den Tracertransport im Nahbereich der ELB vernachlässigbar bis gering (vgl. Kap. 3.1.1.4). Der Tracertransport im Grubengebäude wird gegenüber dem Referenzfall geringfügig beschleunigt, was – mit Ausnahme der Tracer aus LAW2 – ein um ca. 10 % bis 20 % höheres Maximum der Tracerkonzentrationen im Rötanhydrit zur Folge hat (vgl. Kap. 3.1.1.5).
- Die Tracer bewirken nach Transport im Deckgebirge ein erstes Konzentrationsmaximum im Exfiltrationsgebiet „verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek“ nach 2 000 bis 3 000 Jahren. Dieses ist jedoch um ca. 1,5 bis 4 Größenordnungen kleiner als die späteren Maxima für die anderen Exfiltrationsgebiete. Die höchsten Maxima weisen die Konzentrationen nach ca. 30 000 Jahren für das Exfiltrationsgebiet „Muschelkalk – Wittmar“ auf (vgl. Kap. 3.1.2).

Die Tracer aus den ELB erfahren im Grubengebäude und im Deckgebirge bis zur Exfiltration im Gebiet „Muschelkalk – Wittmar“ eine Verdünnung, die für Tracer aus LAW1A am geringsten ist und einen Faktor von ca. 150 000 bis 250 000 beträgt.

- Da im Vergleichsfall RX.1 die Radionuklid-Quellterme gegenüber dem Referenzfall unverändert sind, widerspiegeln die Radionuklidströme in den Einlagerungsbereichen (Kap. 3.2.1.3) vor allem die geringfügig geänderten Lösungsströme (vgl. Kap. 3.1.1.4). Da im Vergleichsfall zu frühen Zeiten die Lösungsströme zwischen 25 und etwa 50 Jahren höher sind als im Referenzfall und zu jener Zeit nur 10 bis 25 % des in den VBA-Behältern enthaltenen Inventars mobilisiert ist, wird in dieser Periode etwas mehr, jedoch – vor allem im Einlagerungsbereich LAW3 – weniger kontaminierte Lösung abtransportiert. Zu späteren Zeiten, sowie auch im Falle von sehr niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten, zeigt sich der Einfluss des im Vergleichsfall gegenüber dem Referenzfall geringeren diffusiven Transports (siehe auch Kap. 3.2.1.4). In Bezug auf die Konzentrationsentwicklungen der Strahlenexpositions-relevanten Radionuklide im Lösungsaustritt aus der Grube beschränkt sich, zur Zeit ihrer relevanten Freisetzung, der Einfluss aller Unterschiede zwischen Vergleichsfall und Referenzfall auf 15 % (vgl. Kap. 3.2.1.5).
- Der Einfluss der aktualisierten Dosiskonversionsfaktoren auf die Summe der potenziellen Strahlenexpositionen beträgt weniger als 10 % (vgl. Kap. 3.2.2.1).
- Da sich im Vergleichsfall sowohl die Radionuklidströme aus der Grube als auch die Dosiskonversionsfaktoren gegenüber dem Referenzfall nur wenig verändert haben, wären – bei unveränderter Berücksichtigung des Transports im Deckgebirge – auch die berechneten potenziellen Strahlenexpositionen ähnlich. Dies ist in Abb. 3.73 zu sehen: Für den Vergleichsfall sind dort die berechneten potenziellen Strahlenexpositionen nach den zwei Berechnungsverfahren – a) bisheriges ‚Verdünnungsmodell‘ wie im Schlussbericht 2005 und b) mittels Transferfunktionen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells [Colenco 2006a] – jenen des Referenzfalls (dünne Linien) gegenübergestellt sind (vgl. Kap. 3.2.2 sowie auch Kap. 4.1).

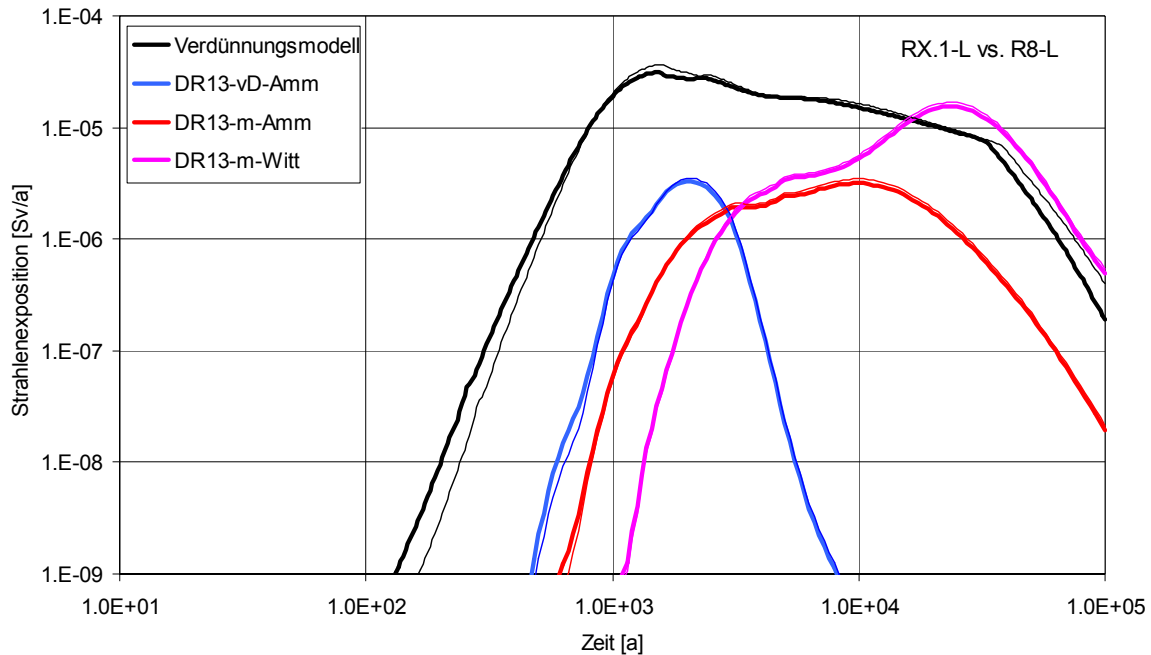


Abb. 3.73 Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für das ‚Verdünnungsmodell‘ und für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells mit den Transferfunktionen zum Deckgebirgsrechenfall DR13 (Vergleichsfall RX.1-L vs. Referenzfall R8-L, dünn)

- Bei Berücksichtigung des Transports und der Verdünnung im Deckgebirge, hier umgesetzt mit Hilfe der Transferfunktionen für den Deckgebirgsrechenfall DR13, zeigt sich, dass das im ‚Verdünnungsmodell‘ durch Am-241 sowie Ra-226 und Pb-210 (im Zerfallsgleichgewicht) bedingte Maximum der potenziellen Strahlenexposition bei etwa 1 650 Jahren nur noch – aber dann auf viel niedrigerem Niveau – für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (DR13-vD-Amm) als ein Maximum von $3,3 \cdot 10^{-6}$ Sv/a bei etwa 2 100 Jahren zum Ausdruck kommt (vgl. Kap. 3.2.2.3). Das im ‚Verdünnungsmodell‘ am Maximum anschließende, bis 30 000 Jahre langsam abklingende Plutonium-Plateau zeigt sich im Vergleichsfall in den Maxima für die beiden anderen Exfiltrationsgebiete, die erst spät erreicht werden. Das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition wird für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ bei etwa 23 000 Jahren erreicht und beträgt $1,5 \cdot 10^{-5}$ Sv/a. Es ist einen Faktor 2,5 niedriger als das Maximum im ‚Verdünnungsmodell‘.
- Der Umstand, dass die mit den Transferfunktionen für das Exfiltrationsgebiet „Muschelkalk – Wittmar“ berechnete potenzielle Strahlenexposition jene des Verdünnungsmodells nach rund 20 000 Jahren übersteigt, ist darin begründet, dass die Transferfunktionen und der Verdünnungsfaktor im Verdünnungsmodell nicht auf dem gleichen Deckgebirgsrechenfall beruhen.
- Das globale Maximum der Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ wird zu etwa 70 % durch Pu-239 und zu etwa 15 % durch Pu-240 bestimmt

(vgl. Kap. 3.2.2.3). Das in diesem Exfiltrationsgebiet dominierende Pu-239 stammt zu etwa 2/3 aus LAW1A und zu 1/3 aus LAW2 (vgl. Kap. 3.2.2.4).

Insgesamt sind die Unterschiede der Ergebnisse der beiden Rechenfälle für die Prozesse im Grubengebäude nur gering. Relevante Unterschiede gegenüber den Ergebnissen für den Referenzfall im Schlussbericht 2005 ergeben sich hauptsächlich aus der Berücksichtigung des Transportes im Deckgebirge mittels Transferfunktionen.

4 Potenzielle Strahlenexposition der bisher betrachteten Szenarien und Varianten unter Verwendung von Transferfunktionen

In Kapitel 3 wurde für den Vergleichsfall gezeigt, dass die Aktualisierung der Modellannahmen gemäß Kapitel 2.1 und 2.2 die Modellergebnisse für den Austritt von Lösung und Radionukliden aus dem Grubengebäude nur wenig ändert. Damit sind die im Schlussbericht 2005 dargestellten und diskutierten Modellrechnungen nach wie vor aussagekräftig. Da die Rechnungen des vorliegenden Berichts unter Verwendung von Transferfunktionen für den Transport im Deckgebirge durchgeführt wurden, werden nachfolgend für alle Rechnungen des Schlussberichts 2005¹⁴ – sofern sie nicht durch die vorgenommenen Aktualisierungen überholt sind – die Strahlenexpositionen mit den zum Deckgebirgsrechenfall DR13 gehörenden Transferfunktionen neu berechnet. Gleichzeitig wurden die aktualisierten Dosiskonversionsfaktoren berücksichtigt; diese beeinflussen die Ergebnisse aber nur marginal. Mit Hilfe dieser Nachrechnungen ist es möglich, den Einfluss der im Schlussbericht 2005 untersuchten Parametervariationen auf die Strahlenexpositionen neu zu bewerten und später mit den Ergebnissen der kombinierten Variante zu vergleichen, siehe Kapitel 5. Die Modellrechnungen zur Mobilisierung der Radionuklide und ihrer Ausbreitung im Grubengebäude wurden nicht wiederholt.

4.1 Referenzfall

Abb. 4.1 zeigt für den Referenzfall R8 – fette Linien – einen Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells. Diese Entwicklungen weichen nur leicht von jenen des Vergleichsfalls – dünne Linien – ab. Die bis etwa 2 000 Jahre höhere Radionuklidfreisetzung aus der Grube (vgl. Abb. 3.52) wirkt sich als ebenfalls höhere potenzielle Strahlenexposition für alle drei Exfiltrationsgebiete aus, was jedoch die Verhältnisse zwischen den Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete untereinander unberührt lässt. Das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition tritt für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (m-Witt) auf, beträgt im Referenzfall R8 $1,7 \cdot 10^{-5}$ Sv/a, ist ca. 10 % höher als im Vergleichsfall und wird etwas später bei etwa 24 000 Jahren erreicht. Zu früheren Zeiten dominiert wieder die potenzielle Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (vD-Amm), deren Maximum bei etwa 2 100 Jahren liegt und mit $3,5 \cdot 10^{-6}$ Sv/a etwa 5 % größer ist. Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (m-Amm) liegt bei etwa 10 000 Jahren, beträgt ebenfalls $3,5 \cdot 10^{-6}$ Sv/a und ist damit ca. 10 % höher.

Tab. 4.1 listet für den Referenzfall R8 die wichtigsten Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für jedes Exfiltrationsgebiet auf. Diese Beiträge sind vergleichbar mit jenen für den Vergleichsfall RX.1 (vgl. Tab. 3.2).

¹⁴ sowie auch einige ausgewählte Varianten zum Thema Konvergenz aus dem Bericht [ALSA 2005b]

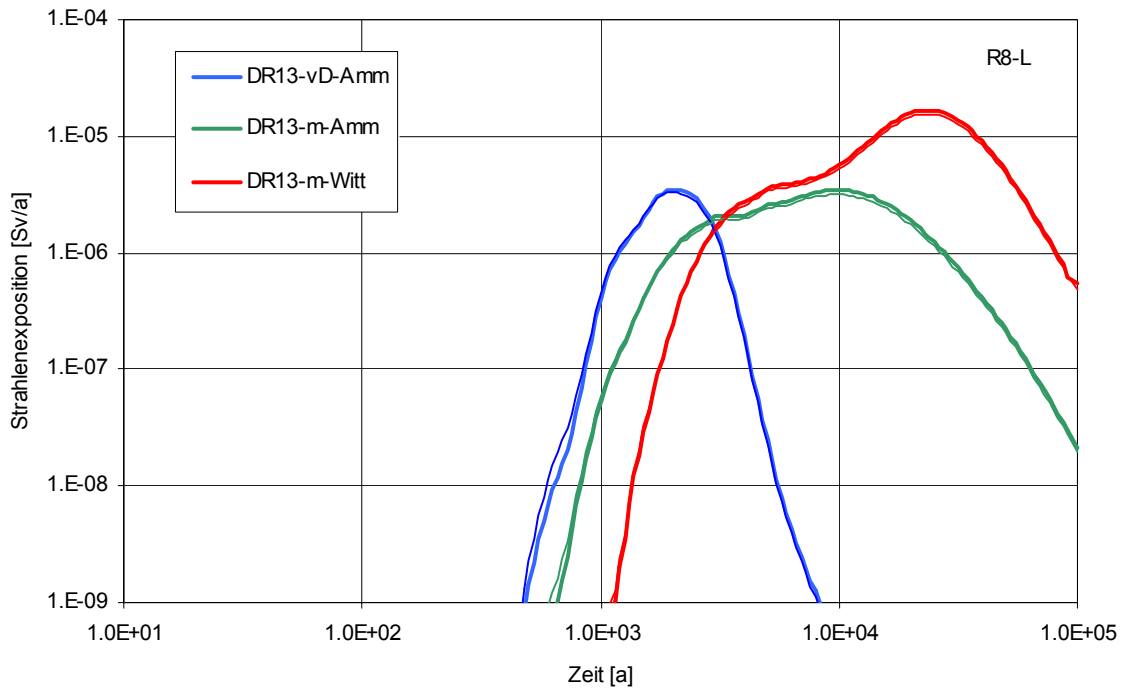


Abb. 4.1 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Referenzfall R8 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.1 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Referenzfall)

R8 – Referenzfall Radionuklid	vD-Amm bei 2 100 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 24 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$2,9 \cdot 10^{-7}$	8 %	$4,5 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$1,6 \cdot 10^{-9}$	-	$2,0 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,1 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$9,1 \cdot 10^{-7}$	26 %	$2,2 \cdot 10^{-6}$	13 %
Am-241	$1,8 \cdot 10^{-6}$	51 %	$4,2 \cdot 10^{-10}$	-	$6,6 \cdot 10^{-18}$	-
Np-237	$6,4 \cdot 10^{-9}$	-	$7,6 \cdot 10^{-8}$	2 %	$7,1 \cdot 10^{-7}$	4 %
Ra-226	$6,2 \cdot 10^{-7}$	18 %	$1,0 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,6 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$7,0 \cdot 10^{-7}$	20 %	$1,2 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,7 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$1,1 \cdot 10^{-8}$	-	$8,6 \cdot 10^{-8}$	2 %	$2,9 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,7 \cdot 10^{-6}$	48 %	$1,2 \cdot 10^{-5}$	70 %
Pa-231	$5,8 \cdot 10^{-8}$	2 %	$1,9 \cdot 10^{-7}$	5 %	$9,3 \cdot 10^{-7}$	6 %
übrige RN	$1,7 \cdot 10^{-9}$	-	$1,6 \cdot 10^{-8}$	-	$1,6 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$3,5 \cdot 10^{-6}$	100 %	$3,5 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,7 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

Abb. 4.2 zeigt die Entwicklung der Radionuklidbeiträge für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘, wo die höchste potenzielle Strahlenexposition der drei Exfiltrationsgebiete berechnet wird.

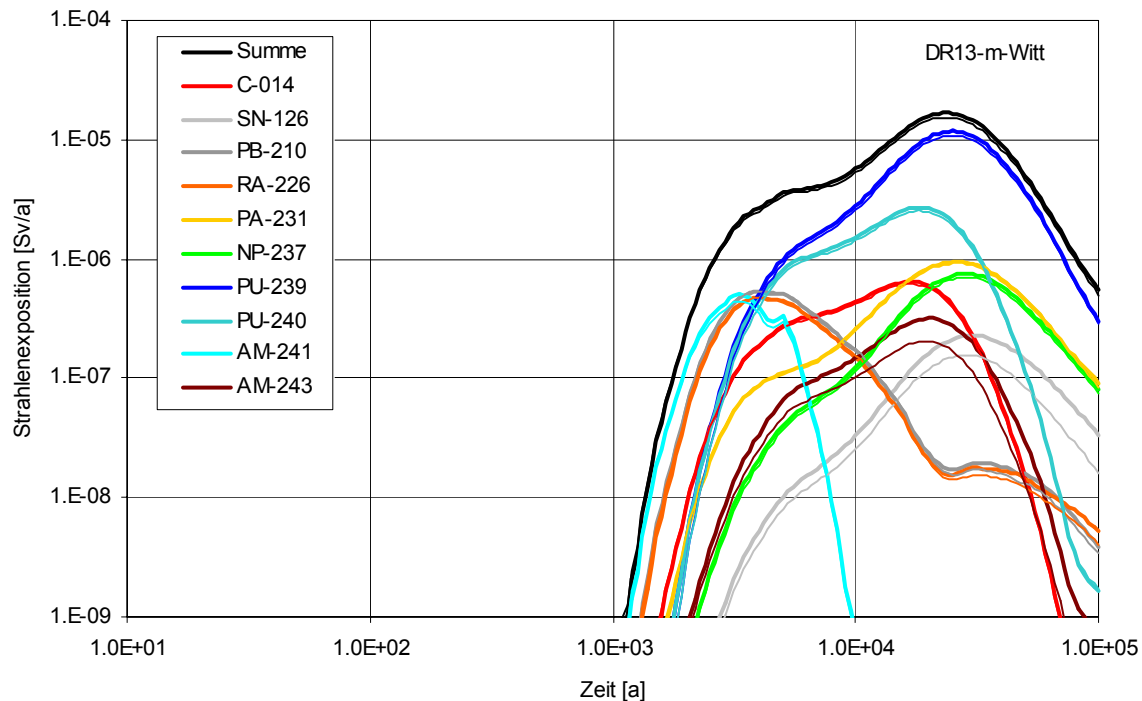


Abb. 4.2 Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (Referenzfall R8 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Die Unterschiede für Sn-126 und Am-243 sind vor allem der im Vergleichsfall und im Referenzfall unterschiedlichen Modellierung des trockenen MAW-Bereichs zuzuordnen und nicht relevant. Die übrigen, geringen Unterschiede erklären sich aus gering unterschiedlichen Radionuklidkonzentrationen im Austritt aus der Grube (vgl. Abb. 3.50 und Abb. 3.51).

Abb. 4.3 und Abb. 4.4 zeigen für die Radionuklide Pu-239 bzw. Ra-226 die Beiträge der Einlagerungsbereiche bzw. Gebindetypen zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘. In Abb. 4.3 ist zu sehen, dass der Beitrag des LAW2-Inventars höher (ca. 30 %) als im Vergleichsfall ist. Im Maximum stammt das Pu-239 zu etwa gleichen Teilen aus LAW1A und LAW2.

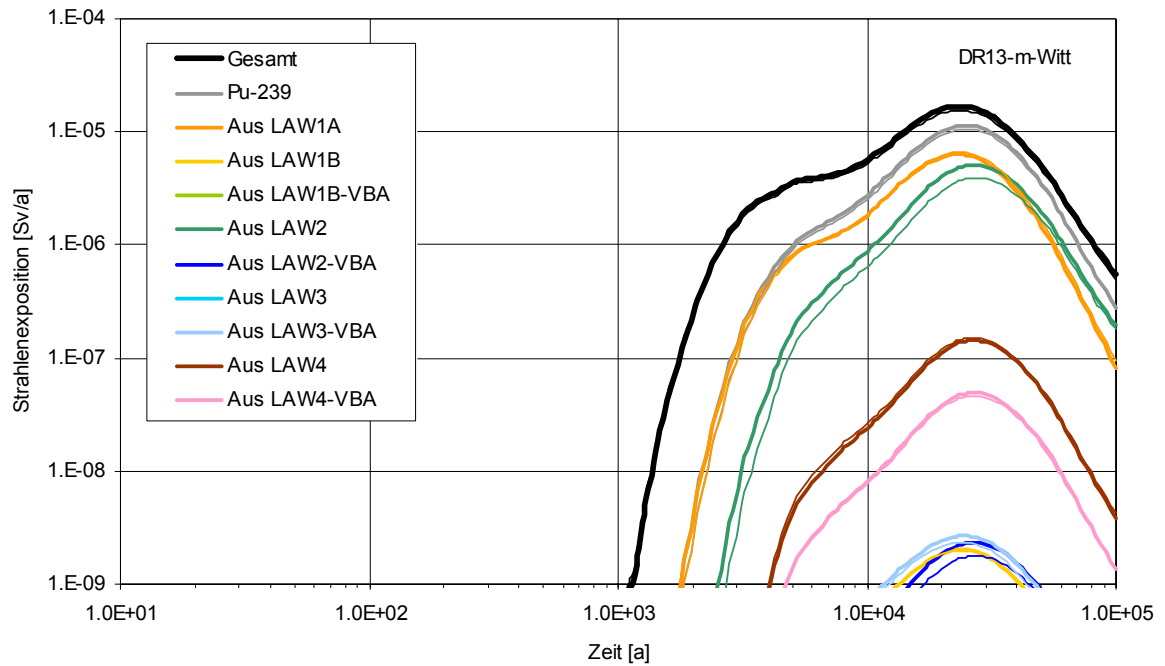


Abb. 4.3 ELB-Beiträge eingelagertes Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (Referenzfall R8 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

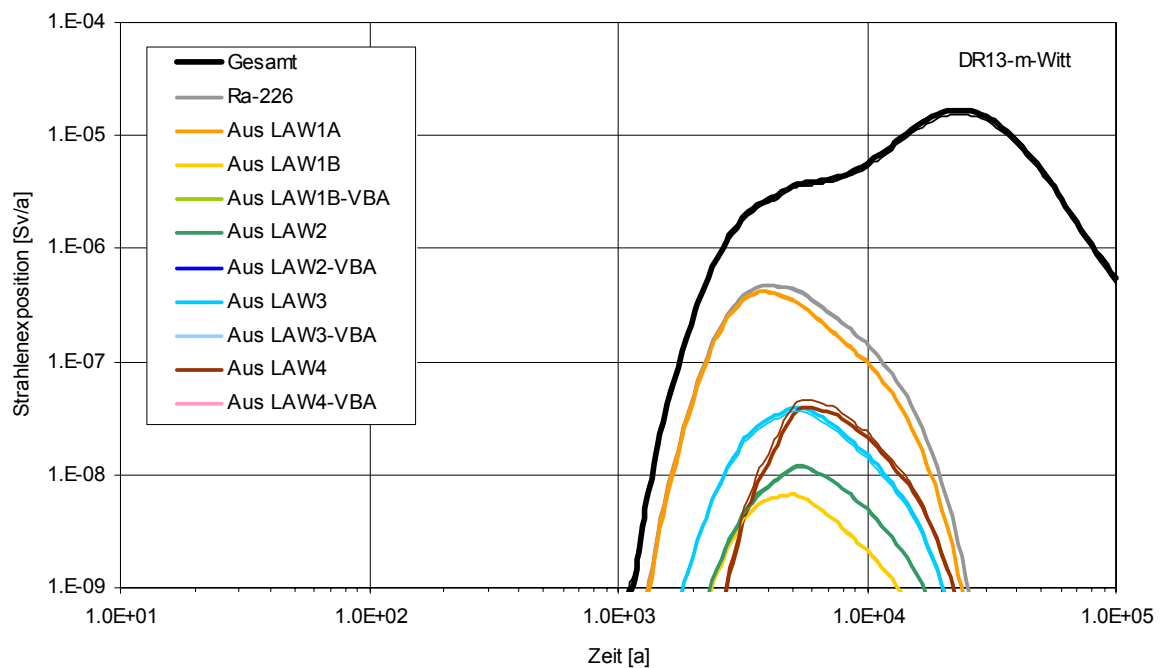


Abb. 4.4 ELB-Beiträge eingelagertes Ra-226 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (Referenzfall R8 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Abb. 4.4 zeigt für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ die Entwicklung der Beiträge der in den Einlagerungsbereichen eingelagerten Ra-226-Inventare zur potenziellen Strahlenexposition. Nur der Beitrag des LAW4-Inventars ist leicht niedriger als im Vergleichsfall. Ra-226 wird aus U-234 über das nicht eingelagerte Radionuklid Th-230 aufgebaut. Wegen der langen Halbwertszeit von Th-230, ca. 75 400 Jahre, dauert es etwa 20 000 Jahre, bis sich der Aufbau im Gesamt-Ra-226-Beitrag zur potenziellen Strahlenexposition bemerkbar macht (vgl. Abb. 4.4 mit Abb. 4.2). Das bedeutet, dass zur Zeit des Maximums des Ra-226-Beitrags der Anteil des aufgebauten Ra-226 vernachlässigbar gering ist.

In Tab. 4.2 sind die ELB-spezifischen Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 und Ra-226 zusammengetragen. Im Allgemeinen sind die Verschiebungen in den Anteilen im Vergleich zum Vergleichsfall marginal (vgl. Tab. 3.5). Nur der 30 % höhere Beitrag des Pu-239-Inventars aus LAW2 ist erwähnenswert.

Tab. 4.2 ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)

R8 – Referenzfall DR13 – m-Witt	Am-241 bei 3 300 a		Pu-239 bei 25 000 a		Ra-226 bei 4 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
Aus LAW1A	4,8·10⁻⁸	9 %	6,2·10⁻⁶	54 %	4,1·10⁻⁷	88 %
Aus LAW1B	6,0·10⁻⁸	12 %	2,0·10 ⁻⁹	-	6,0·10 ⁻⁹	1 %
Aus LAW1B-VBA	7,0·10 ⁻¹⁰	-	1,9·10 ⁻¹¹	-	-	-
Aus LAW2	2,0·10 ⁻⁸	4 %	5,0·10⁻⁶	44 %	7,9·10 ⁻⁹	2 %
Aus LAW2-VBA	1,7·10 ⁻¹¹	-	2,3·10 ⁻⁹	-	-	-
Aus LAW3	3,5·10 ⁻⁸	7 %	4,0·10 ⁻¹¹	-	3,1·10 ⁻⁸	7 %
Aus LAW3-VBA	3,3·10⁻⁷	64 %	2,7·10 ⁻⁹	-	-	-
Aus LAW4	1,8·10 ⁻⁸	3 %	1,4·10 ⁻⁷	1 %	1,2·10 ⁻⁸	3 %
Aus LAW4-VBA	3,0·10 ⁻⁹	1 %	4,8·10 ⁻⁸	-	-	-
Summe	5,2·10 ⁻⁷	100 %	1,1·10 ⁻⁵	100 %	4,7·10 ⁻⁷	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

4.2 Varianten zur Radionuklidmobilisierung

Die im Rechenfall R9-L untersuchten Varianten des Referenzfalls SchnMob, LangsMob und FrühMilw unterscheiden sich vom Referenzfall durch eine schnellere (SchnMob) bzw. langsamere (LangsMob) Mobilisierung der Radionuklide aus den eingelagerten Gebinden, bzw. einen früheren Zeitpunkt des Milieuwechsels (FrühMilw) in den Einlagerungsbereichen. Für diese Varianten unterscheiden sich ab 1 000 Jahre die mit dem Verdünnungsmodell gerechneten Gesamtstrahlenexpositionen kaum (vgl. Schlussbericht 2005, Abb. 10.101). Zu

früheren Zeiten zeigt sich lediglich der Einfluss einer schnelleren Mobilisierung (SchnMob) als ein deutlich beschleunigter Anstieg der potenziellen Strahlenexposition durch Am-241 und Ra-226/Pb-210, wobei der Beitrag von Pu-239 davon unberührt blieb (vgl. Schlussbericht 2005, Abb. 10.104, 10.106). Eine langsamere Mobilisierung (LangsMob) zeigte sich nicht relevant in den Beiträgen zur Gesamtstrahlenexposition (vgl. Schlussbericht 2005, Abb. 10.108 bis 10.111). Der Einfluss eines früheren Milieuwechsels zeigte sich lediglich im beschleunigten Anstieg der Plutoniumbeiträge (vgl. Schlussbericht 2005, Abb. 10.112, 10.114). Im Licht der geringen Sensitivität der Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete bezüglich der genauen Anstiegsrate der Radionuklidkonzentrationen im Austritt aus der Grube in den ersten 100-en Jahren, ist zu erwarten, dass sich nur die Variante FrühMilw deutlich vom Referenzfall unterscheidet.

4.2.1 Variante mit schnellerer Radionuklidmobilisierung in den ELB (SchnMob)

Abb. 4.5 zeigt für die Variante SchnMob – fette Linien – einen Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells. Diese Entwicklungen weichen nur leicht von jenen des Vergleichsfalls – dünne Linien – und nur bis etwa 3 000 Jahre von jenen des Referenzfalls ab. Die im Vergleich zum Referenzfall bis etwa 1 500 Jahre höheren Radionuklidkonzentrationen im Austritt aus der Grube wirken sich vor allem als höhere potenzielle Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ aus, was jedoch die Verhältnisse zwischen den Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete untereinander unberührt lässt. Das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition, das für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (m-Witt) auftritt, beträgt in der Variante SchnMob $1,7 \cdot 10^{-5}$ Sv/a, ist ca. 10 % höher als im Vergleichsfall und wird etwas später bei etwa 24 000 Jahren erreicht. Zu früheren Zeiten dominiert wieder die potenzielle Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (vD-Amm), deren Maximum bei etwa 2 000 Jahren liegt und mit $3,8 \cdot 10^{-6}$ Sv/a etwa 15 % größer ist. Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (m-Amm) liegt bei etwa 10 000 Jahren, beträgt $3,5 \cdot 10^{-6}$ Sv/a und ist damit ca. 10 % höher.

Tab. 4.3 listet für die Variante SchnMob die wichtigsten Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für jedes Exfiltrationsgebiet auf. Diese Beiträge sind vergleichbar mit jenen für den Vergleichsfall RX.1 (vgl. Tab. 3.2).

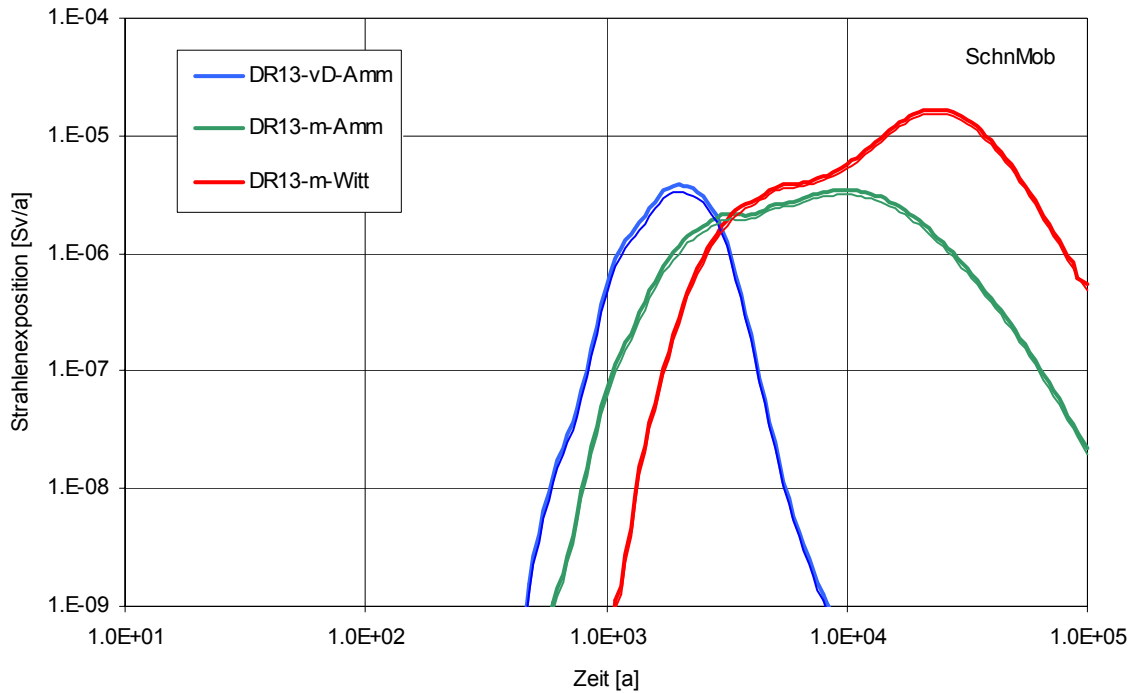


Abb. 4.5 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (SchnMob vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.3 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante SchnMob)

R9-L SchnMob Radionuklid	vD-Amm bei 2 000 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 24 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,2 \cdot 10^{-7}$	3 %	$3,0 \cdot 10^{-7}$	9 %	$4,6 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$1,7 \cdot 10^{-9}$	-	$2,1 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,1 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$8,9 \cdot 10^{-8}$	2 %	$9,1 \cdot 10^{-7}$	26 %	$2,2 \cdot 10^{-6}$	13 %
Am-241	$2,2 \cdot 10^{-6}$	57 %	$4,3 \cdot 10^{-10}$	-	$6,6 \cdot 10^{-18}$	-
Np-237	$6,7 \cdot 10^{-9}$	-	$8,1 \cdot 10^{-8}$	2 %	$7,4 \cdot 10^{-7}$	4 %
Ra-226	$6,0 \cdot 10^{-7}$	16 %	$1,0 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,6 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$6,7 \cdot 10^{-7}$	18 %	$1,2 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,8 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$1,1 \cdot 10^{-8}$	-	$8,8 \cdot 10^{-8}$	3 %	$2,9 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$8,9 \cdot 10^{-8}$	2 %	$1,7 \cdot 10^{-6}$	48 %	$1,2 \cdot 10^{-5}$	70 %
Pa-231	$5,2 \cdot 10^{-8}$	1 %	$1,9 \cdot 10^{-7}$	5 %	$9,2 \cdot 10^{-7}$	5 %
übrige RN	$1,6 \cdot 10^{-9}$	-	$1,7 \cdot 10^{-8}$	-	$1,7 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$3,8 \cdot 10^{-6}$	100 %	$3,5 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,7 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

4.2.2 Variante mit langsamer Radionuklidmobilisierung in den ELB (LangsMob)

Abb. 4.6 zeigt für die Variante LangsMob – fette Linien – einen Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells. Diese Entwicklungen weichen nur leicht von jenen des Vergleichsfalls – dünne Linien – und nur bis etwa 3 000 Jahre von jenen des Referenzfalls ab. Die im Vergleich zum Referenzfall bis etwa 1 500 Jahre niedrigeren Radionuklidkonzentrationen im Austritt aus der Grube wirken sich vor allem als niedrigere potenzielle Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ aus, was die Verhältnisse zwischen den Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete untereinander nur leicht ändert. Das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition tritt für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (m-Witt) auf, beträgt in der Variante LangsMob $1,7 \cdot 10^{-5}$ Sv/a, ist ca. 10 % höher als im Vergleichsfall und wird etwas später bei etwa 24 000 Jahren erreicht. Das frühe Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (vD-Amm) ist mit $3,3 \cdot 10^{-6}$ Sv/a bei etwa 2 100 Jahren unverändert. Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (m-Amm) liegt bei etwa 10 000 Jahren, ist mit $3,5 \cdot 10^{-6}$ Sv/a ca. 10 % höher als im Vergleichsfall und damit leicht größer als das Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (vD-Amm).

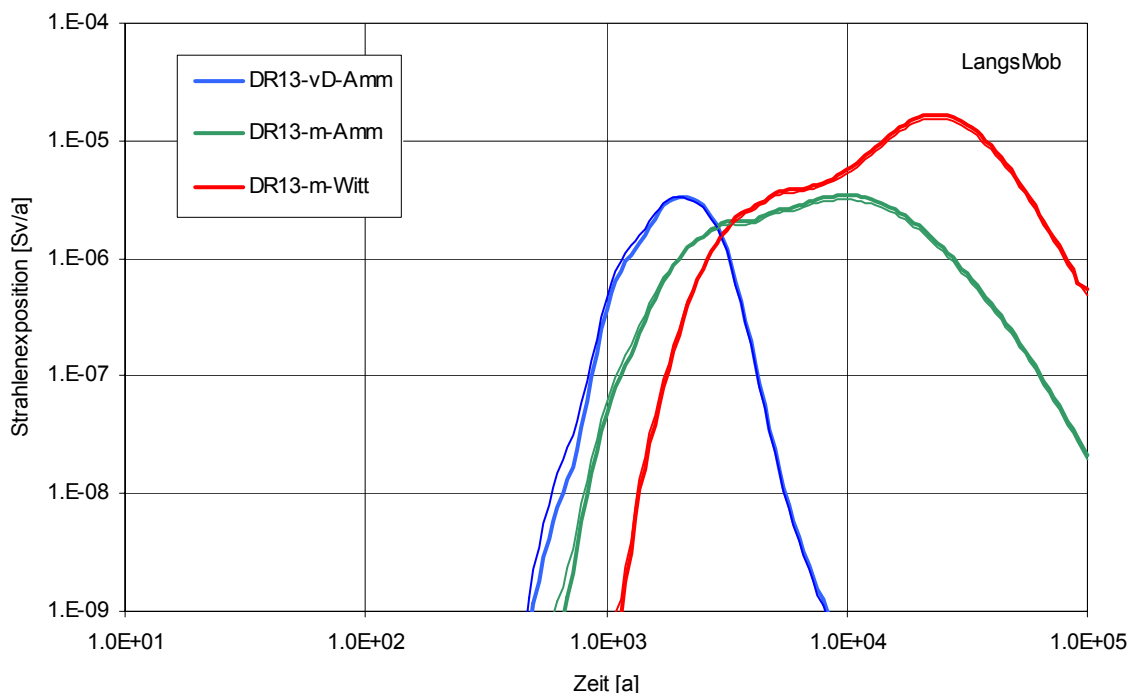


Abb. 4.6 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (LangsMob vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.4 listet für die Variante LangsMob die wichtigsten Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für jedes Exfiltrationsgebiet auf. Diese Beiträge sind vergleichbar mit jenen für den Vergleichsfall RX.1 (vgl. Tab. 3.2).

Tab. 4.4 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante LangsMob)

R9-L LangsMob Radionuklid	vD-Amm bei 2 100 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 24 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$2,8 \cdot 10^{-7}$	8 %	$4,5 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$1,3 \cdot 10^{-9}$	-	$1,9 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$9,1 \cdot 10^{-7}$	26 %	$2,2 \cdot 10^{-6}$	13 %
Am-241	$1,6 \cdot 10^{-6}$	49 %	$4,2 \cdot 10^{-10}$	-	$6,6 \cdot 10^{-18}$	-
Np-237	$5,8 \cdot 10^{-9}$	-	$7,2 \cdot 10^{-8}$	2 %	$6,9 \cdot 10^{-7}$	4 %
Ra-226	$6,1 \cdot 10^{-7}$	18 %	$1,0 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,6 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$6,8 \cdot 10^{-7}$	21 %	$1,2 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,7 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$9,4 \cdot 10^{-9}$	-	$8,3 \cdot 10^{-8}$	2 %	$2,9 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,7 \cdot 10^{-6}$	48 %	$1,2 \cdot 10^{-5}$	70 %
Pa-231	$5,7 \cdot 10^{-8}$	2 %	$1,9 \cdot 10^{-7}$	5 %	$9,3 \cdot 10^{-7}$	6 %
übrige RN	$1,6 \cdot 10^{-9}$	-	$1,6 \cdot 10^{-8}$	-	$1,6 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$3,3 \cdot 10^{-6}$	100 %	$3,5 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,7 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

4.2.3 Variante mit früherem Milieuwechsel in den ELB (FrühMilw)

Abb. 4.7 zeigt für die Variante FrühMilw – fette Linien – einen Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells. Diese Entwicklungen liegen ab 1 500 Jahre deutlich höher als jene des Vergleichsfall – dünne Linien – und jene des Referenzfalls. Die im Vergleich zum Referenzfall bis etwa 3 000 Jahre höheren Plutoniumkonzentrationen im Austritt aus der Grube wirken sich als höhere potenzielle Strahlenexposition für alle drei Exfiltrationsgebiete aus, was die Verhältnisse zwischen den Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete untereinander auch leicht ändert. Das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition tritt für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (m-Witt) bei etwa 23 000 Jahren auf, beträgt in der Variante FrühMilw $1,8 \cdot 10^{-5}$ Sv/a und ist ca. 15 % höher als im Vergleichsfall. Das frühe Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (vD-Amm) wird etwas später bei etwa 2 200 Jahren erreicht, und ist mit $4,0 \cdot 10^{-6}$ Sv/a mehr als 20 % höher. Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (m-Amm) beträgt $4,4 \cdot 10^{-6}$ Sv/a, wird nun leicht früher bei etwa 9 600 Jahren erreicht, ist ca. 35 % höher als im Vergleichsfall und nun 10 % größer als das frühe Maximum.

Tab. 4.5 listet für die Variante FrühMilw die wichtigsten Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für jedes Exfiltrationsgebiet auf. Mit Ausnahme der deutlich höheren Plutoniumbeiträge für die beiden Ammerbeek-Exfiltrationsgebiete sind diese Beiträge vergleichbar mit jenen für den Vergleichsfall RX.1 (vgl. Tab. 3.2).

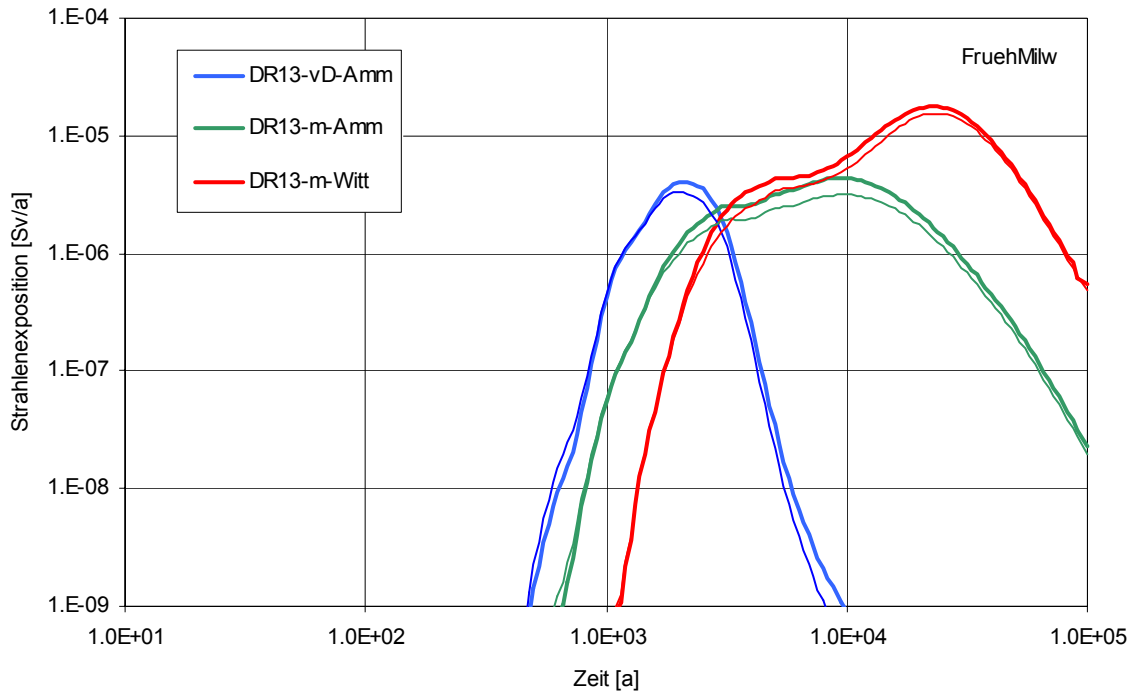


Abb. 4.7 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (FrühMilw vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.5 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante FrühMilw)

R9-L FrühMilw Radionuklid	vD-Amm bei 2 200 a		m-Amm bei 9 600 a		m-Witt bei 23 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,2 \cdot 10^{-7}$	3 %	$2,9 \cdot 10^{-7}$	7 %	$5,0 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$1,7 \cdot 10^{-9}$	-	$1,9 \cdot 10^{-8}$	-	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$4,0 \cdot 10^{-7}$	10 %	$1,2 \cdot 10^{-6}$	28 %	$2,5 \cdot 10^{-6}$	14 %
Am-241	$1,7 \cdot 10^{-6}$	42 %	$6,1 \cdot 10^{-10}$	-	$3,3 \cdot 10^{-17}$	-
Np-237	$7,1 \cdot 10^{-9}$	-	$7,3 \cdot 10^{-8}$	2 %	$6,8 \cdot 10^{-7}$	4 %
Ra-226	$6,3 \cdot 10^{-7}$	15 %	$1,2 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,7 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$7,1 \cdot 10^{-7}$	17 %	$1,4 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,9 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$1,2 \cdot 10^{-8}$	-	$8,6 \cdot 10^{-8}$	2 %	$3,1 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$4,1 \cdot 10^{-7}$	10 %	$2,2 \cdot 10^{-6}$	50 %	$1,2 \cdot 10^{-5}$	70 %
Pa-231	$6,1 \cdot 10^{-8}$	2 %	$1,9 \cdot 10^{-7}$	4 %	$9,1 \cdot 10^{-7}$	5 %
übrige RN	$2,8 \cdot 10^{-9}$	-	$1,8 \cdot 10^{-8}$	-	$1,6 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$4,0 \cdot 10^{-6}$	100 %	$4,4 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,8 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

Abb. 4.8 zeigt die Entwicklung der Radionuklidbeiträge für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘, wofür das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition erreicht wird.

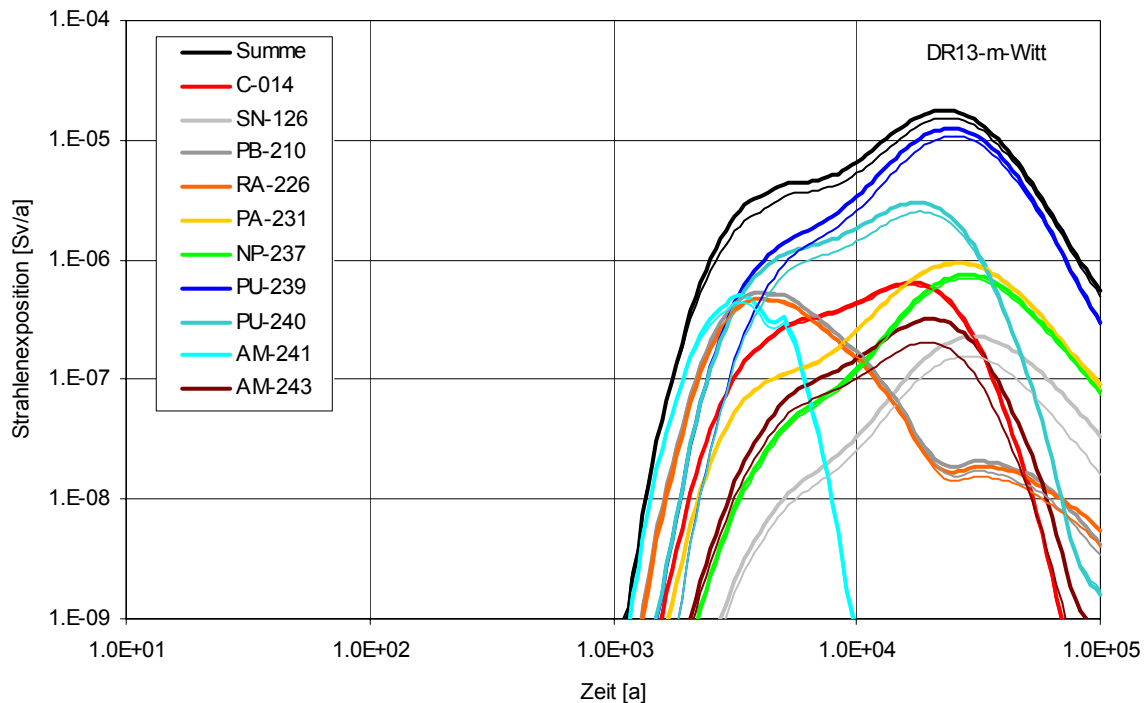


Abb. 4.8 Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (FrühMilw vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Die Unterschiede für Sn-126 und Am-243 sind wie im Referenzfall R8 vor allem der im Vergleichsfall und dem Referenzfall unterschiedlichen Modellierung des trockenen MAW-Bereichs zuzuordnen. Die übrigen Unterschiede erklären sich aus den mit Ausnahme der Plutonium-Isotope gering unterschiedlichen Radionuklidkonzentrationen im Austritt aus der Grube.

Abb. 4.9 zeigt für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ die Entwicklung der Beiträge der in den Einlagerungsbereichen eingelagerten Pu-239-Inventare zur potenziellen Strahlenexposition. Der Aufbau von Pu-239 aus eingelagertem Am-243, welcher zur Zeit des Maximums etwa 3 % beträgt, ist nicht in der Pu-239-Summenlinie in Abb. 4.9 enthalten. Wie im Referenzfall stammt der Pu-239-Beitrag zum Maximum zu etwa gleichen Teilen aus LAW1A und LAW2. Im Vergleich zum Referenzfall (vgl. Abb. 4.3) ist bis 24 000 Jahre vor allem der Beitrag des LAW1A-Inventars höher (beschleunigt) und – auf niedrigerem Niveau jedoch für alle Zeiten – der Beitrag des LAW4-Inventars ca. 30 % höher.

In Tab. 4.6 sind die ELB-spezifischen Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 und Ra-226 zusammengetragen. Im Allgemeinen sind die Verschiebungen in den Anteilen im Vergleich zum Vergleichsfall bzw. Referenzfall marginal (vgl. Tab. 3.5, Tab. 4.2). Nur die im Vergleich zum Referenzfall um 10 % bzw. 30 % höheren Beiträge des Pu-239-Inventars aus LAW1A bzw. LAW4 sind erwähnenswert.

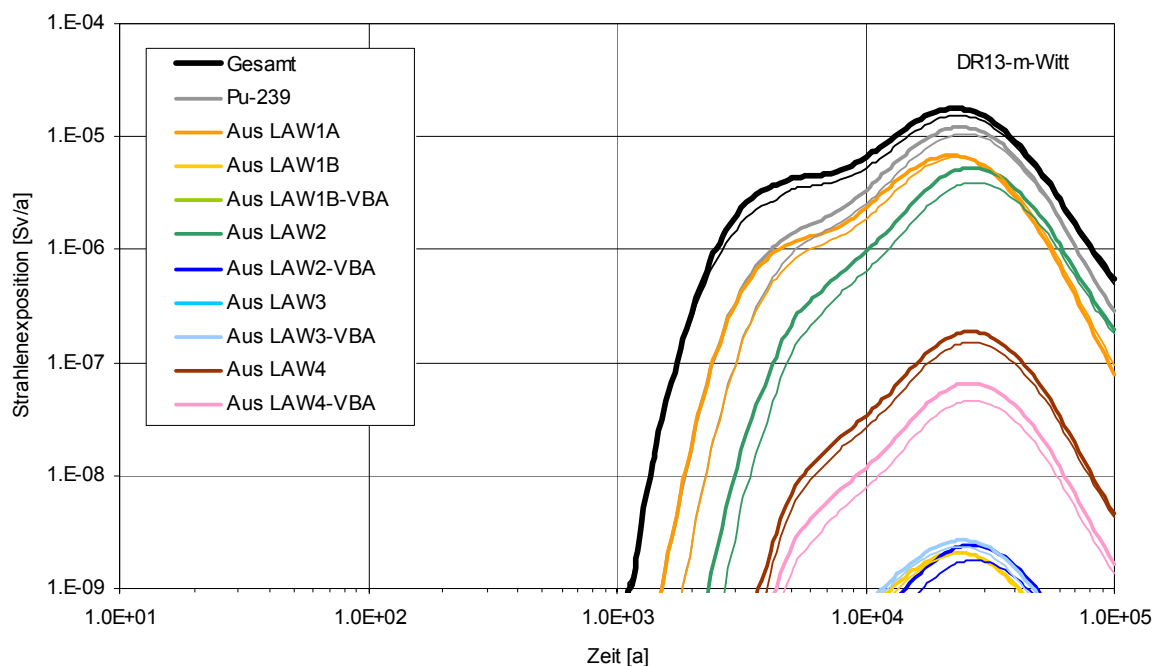


Abb. 4.9 ELB-Beiträge des eingelagerten Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (FrühMilw vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.6 ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)

R9-L FrühMilw DR13 – m-Witt	Am-241 bei 3 300 a		Pu-239 bei 24 000 a		Ra-226 bei 4 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
Aus LAW1A	4,8·10⁻⁸	9 %	6,7·10⁻⁶	55 %	4,1·10⁻⁷	88 %
Aus LAW1B	6,0·10⁻⁸	12 %	2,1·10 ⁻⁹	-	6,0·10 ⁻⁹	1 %
Aus LAW1B-VBA	7,0·10 ⁻¹⁰	-	2,0·10 ⁻¹¹	-	-	-
Aus LAW2	2,0·10 ⁻⁸	4 %	5,1·10⁻⁶	42 %	7,9·10 ⁻⁹	2 %
Aus LAW2-VBA	1,7·10 ⁻¹¹	-	2,3·10 ⁻⁹	-	-	-
Aus LAW3	3,5·10 ⁻⁸	7 %	3,8·10 ⁻¹¹	-	3,1·10 ⁻⁸	7 %
Aus LAW3-VBA	3,3·10⁻⁷	64 %	2,7·10 ⁻⁹	-	-	-
Aus LAW4	1,8·10 ⁻⁸	3 %	1,8·10 ⁻⁷	2 %	1,2·10 ⁻⁸	3 %
Aus LAW4-VBA	3,0·10 ⁻⁹	1 %	6,4·10 ⁻⁸	1 %	-	-
Summe	5,2·10 ⁻⁷	100 %	1,2·10 ⁻⁵	100 %	4,7·10 ⁻⁷	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorbehalten.

4.3 Szenario zum veränderten Milieu

Das im Rechenfall R9-L untersuchte alternative Szenario Am-opt – aus der Szenariengruppe des Referenzszenarios – unterscheidet sich vom Referenzfall durch die unterstellte langzeitige Wirksamkeit der konditionellen Radionuklidkonzentrationen von Americium in einigen Einlagerungsbereichen. Für dieses Szenario unterscheidet sich die mit dem Verdünnungsmodell gerechnete Gesamtstrahlenexposition nur in Bezug auf den Am-241-Beitrag (vgl. Schlussbericht 2005, Abb. 10.119), der ab etwa 5 000 Jahre vernachlässigbar ist. Dieses Verhalten wirkt sich in gleicher Weise auf die zugehörigen Entwicklungen der potenziellen Strahlenexpositionen für die Exfiltrationsgebiete aus.

Abb. 4.10 zeigt für das Szenario Am-opt – fette Linien – einen Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells. Diese Entwicklungen unterschreiten bis etwa 4 000 Jahre jene des Vergleichsfalls – dünne Linien – und des Referenzfalls. Die im Vergleich zum Referenzfall bis etwa 1 500 Jahre niedrigeren Americiumkonzentrationen im Austritt aus der Grube wirken sich vor allem als niedrigere potenzielle Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ aus, was die Verhältnisse zwischen den Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete untereinander ändert. Das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition tritt für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (m-Witt) auf, beträgt im Szenario Am-opt $1,6 \cdot 10^{-5}$ Sv/a, ist ca. 2,5 % höher als im Vergleichsfall und wird unverändert bei etwa 23 000 Jahren erreicht. Zu früheren Zeiten dominiert wieder die potenzielle Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (vD-Amm), wobei dessen nun etwas späteres Maximum bei etwa 2 200 Jahren liegt, mit $1,9 \cdot 10^{-6}$ Sv/a etwa 40 % geringer ist als im Vergleichsfall und insgesamt das kleinste Maximum der drei Exfiltrationsgebiete ist. Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (m-Amm) liegt bei bei etwa 10 000 Jahren, beträgt $3,3 \cdot 10^{-6}$ Sv/a und ist damit ca. 5 % höher als im Vergleichsfall.

Tab. 4.7 listet für das Szenario Am-opt die wichtigsten Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für jedes Exfiltrationsgebiet auf. Mit Ausnahme der Americiumisotope und des Am-241-Zerfallsprodukts Np-237 sind diese vergleichbar mit jenen für den Vergleichsfall RX.1 (vgl. Tab. 3.2).

Abb. 4.11 bis Abb. 4.13 zeigen die Entwicklungen der Radionuklidbeiträge für die Exfiltrationsgebiete im Vergleich zum Vergleichsfall. Die abweichenden Entwicklungen der Sn-126-Linien sind wieder der unterschiedlichen Abbildung der ‚trockenen MAW‘ zuzuordnen.

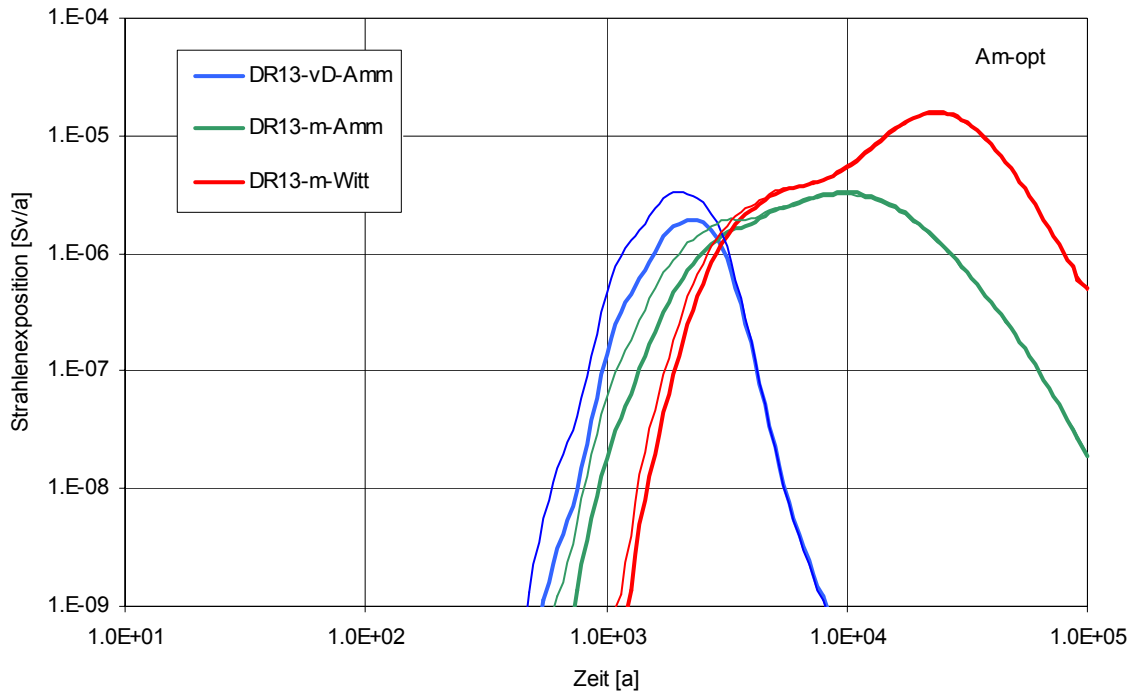


Abb. 4.10 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Am-opt vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.7 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Szenario Am-opt)

R9-L Am-opt Radionuklid	vD-Amm bei 2 200 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 23 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,2 \cdot 10^{-7}$	6 %	$2,9 \cdot 10^{-7}$	9 %	$5,0 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$1,7 \cdot 10^{-9}$	-	$2,0 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$1,2 \cdot 10^{-7}$	6 %	$9,1 \cdot 10^{-7}$	27 %	$2,4 \cdot 10^{-6}$	15 %
Am-241	$1,6 \cdot 10^{-7}$	9 %	$1,1 \cdot 10^{-10}$	-	$7,1 \cdot 10^{-18}$	-
Np-237	$2,0 \cdot 10^{-9}$	-	$3,7 \cdot 10^{-8}$	1 %	$4,2 \cdot 10^{-7}$	3 %
Ra-226	$6,3 \cdot 10^{-7}$	32 %	$1,0 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,6 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$7,1 \cdot 10^{-7}$	37 %	$1,2 \cdot 10^{-7}$	4 %	$1,8 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$3,0 \cdot 10^{-10}$	-	$2,7 \cdot 10^{-9}$	-	$1,9 \cdot 10^{-8}$	-
Pu-239	$1,2 \cdot 10^{-7}$	6 %	$1,6 \cdot 10^{-6}$	49 %	$1,1 \cdot 10^{-5}$	71 %
Pa-231	$6,1 \cdot 10^{-8}$	3 %	$1,9 \cdot 10^{-7}$	6 %	$9,1 \cdot 10^{-7}$	6 %
übrige RN	$1,8 \cdot 10^{-9}$	-	$1,6 \cdot 10^{-8}$	-	$1,5 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$1,9 \cdot 10^{-6}$	100 %	$3,3 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,6 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

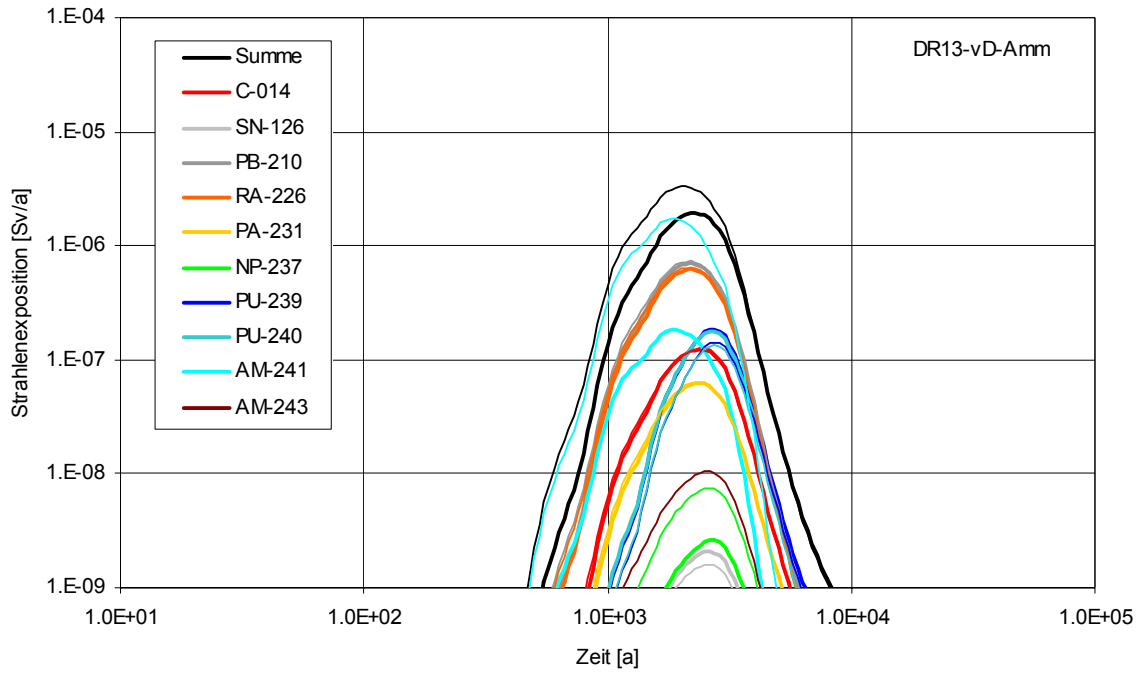


Abb. 4.11 Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (Am-opt vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

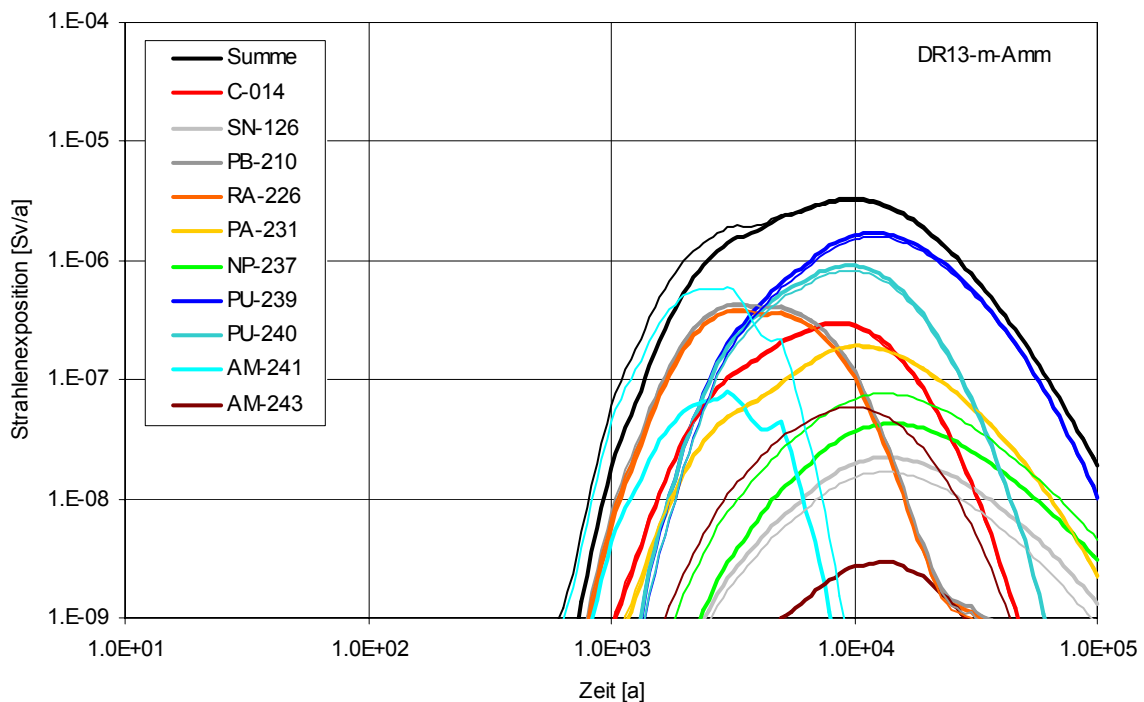


Abb. 4.12 Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (Am-opt vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

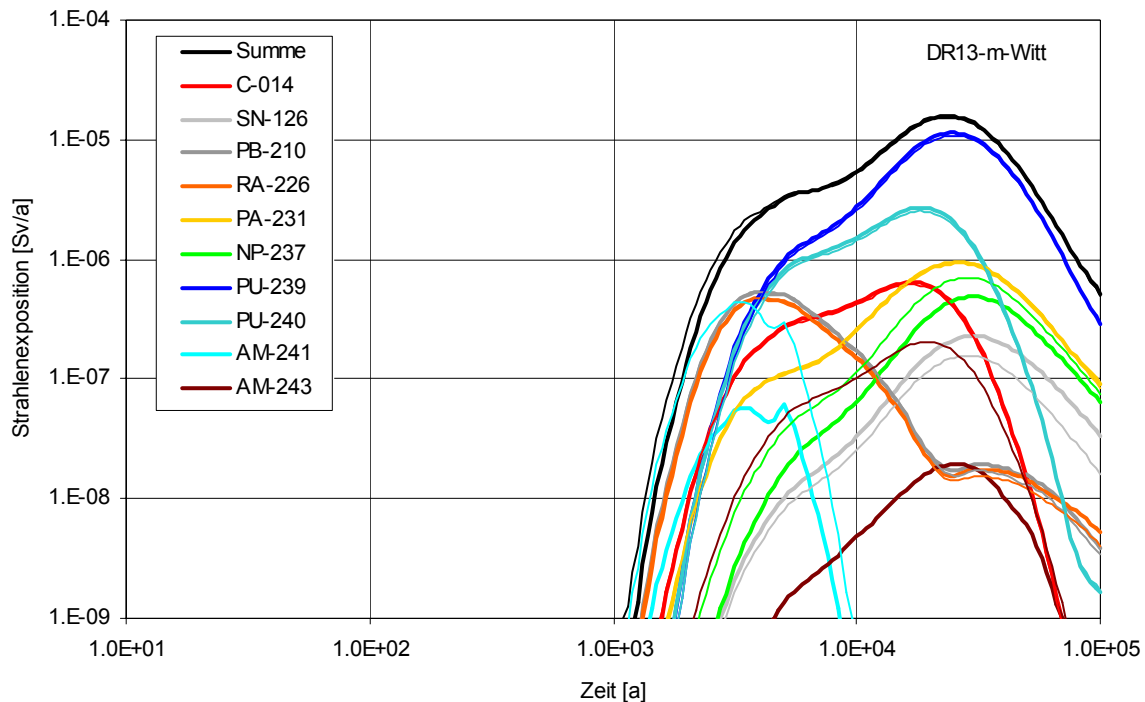


Abb. 4.13 Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (Am-opt vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

4.4 Varianten zur Kanalisierung des Baufeldes in der Südflanke

Die im Rechenfall R10-L untersuchten Varianten SFKan80% und SFKan20% unterscheiden sich vom Referenzfall durch die angenommene geringere (SFKan80%) bzw. stärkere (SFKan20%) Kanalisierung im Baufeld in der Südflanke. Sowohl im Referenzfall R8 als auch im Vergleichsfall RX.1 wird unterstellt, dass 40% der Grundfläche des Baufeldes durchströmt werden. In der Variante SFKan80% wurde eine doppelt so große (also 80%), in der Variante SFKan20% eine halb so große durchströmte Grundfläche (also 20%) unterstellt. Dies führte zu einem verzögerten bzw. beschleunigten Radionuklidtransport im Baufeld in der Südflanke (vgl. Schlussbericht 2005, Abb. 10.124 bis 10.129 bzw. Abb. 10.130 bis 10.135), was sich unmittelbar als Verzögerung bzw. Beschleunigung, sowie für die relativ kurzlebigen Radionuklide Am-241 und Ra-226/Pb-210 als höhere bzw. niedrigere Werte der Radionuklidkonzentrationen im Lösungsaustritt auswirkte (vgl. Schlussbericht 2005, Abb. 10.139 und 10.143). Nach etwa 10 000 Jahren waren die Unterschiede gegenüber dem Referenzfall nur noch gering.

4.4.1 Variante mit geringer Kanalisierung im Baufeld in der Südflanke (SFKan80%)

Abb. 4.14 zeigt für die Variante SFKan80% – fette Linien – einen Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells. Die im Vergleich zum Referenzfall bis etwa 10 000 Jahre niedrigeren Radionuklidkonzentrationen im Austritt aus der Grube führen zu andauernd niedrigeren potenziellen Strahlenexpositionen als im Vergleichsfall, wobei die Unterschiede allerdings mit der Zeit

abnehmen. Dies verändert auch die Verhältnisse zwischen den Strahlenexpositions-entwicklungen in den Exfiltrationsgebieten. Das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition tritt im Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (m-Witt) auf, beträgt für die Variante SFKan80% $8,8 \cdot 10^{-6}$ Sv/a, ist ca. halb so groß wie im Vergleichsfall und wird 4 500 Jahre später bei etwa 27 500 Jahren erreicht. Zu früheren Zeiten dominiert, jedoch auf viel niedrigerem Niveau, die potenzielle Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (vD-Amm), deren Maximum etwa 650 Jahre später bei etwa 2 750 Jahren auftritt, nun deutlich das kleinste Maximum der Strahlenexpositionen aller Exfiltrationsgebiete ist, und mit $1,3 \cdot 10^{-7}$ Sv/a einen Faktor 25 geringer als im Vergleichsfall ist. Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (m-Amm), das etwa 2 500 Jahre später bei etwa 12 600 Jahren erreicht wird, beträgt nun $1,0 \cdot 10^{-6}$ Sv/a und ist damit dreimal niedriger.

Tab. 4.8 listet für die Variante SFKan80% die wichtigsten Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für jedes Exfiltrationsgebiet auf. Gegenüber dem Vergleichsfall RX.1 (vgl. Tab. 3.2) ist vor allem der Beitrag von Am-241 an der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ hervorzuheben, der relativ abgenommen hat. Die relativen Radionuklidbeiträge für die beiden anderen Exfiltrationsgebiete haben sich im Vergleich zu RX.1 nur marginal verändert.

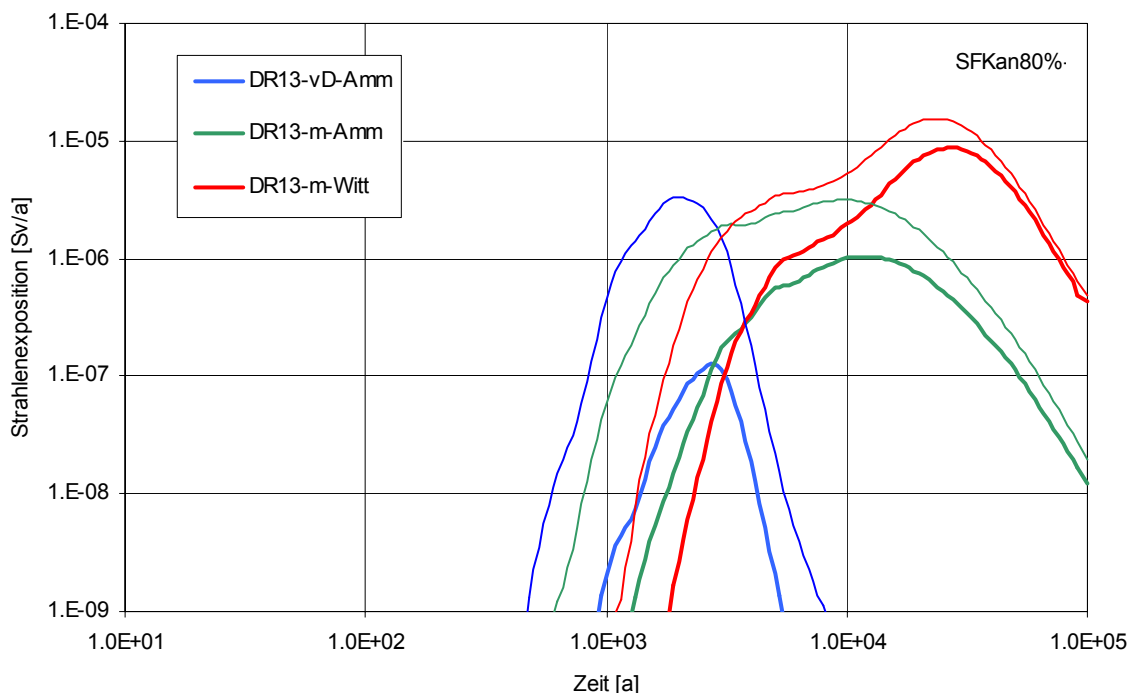


Abb. 4.14 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (SFKan80% vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Abb. 4.15 bis Abb. 4.17 zeigen die Entwicklungen der Radionuklidbeiträge für die Exfiltrationsgebiete im Vergleich zum Vergleichsfall.

Tab. 4.8 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante SFKan80%)

R10-L SFKan80% Radionuklid	vD-Amm bei 2 750 a		m-Amm bei 12 600 a		m-Witt bei 27 500 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$6,9 \cdot 10^{-9}$	5 %	$8,1 \cdot 10^{-8}$	8 %	$2,0 \cdot 10^{-7}$	2 %
Sn-126	$1,7 \cdot 10^{-10}$	-	$8,0 \cdot 10^{-9}$	1 %	$1,3 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-240	$4,5 \cdot 10^{-9}$	4 %	$2,4 \cdot 10^{-7}$	23 %	$9,2 \cdot 10^{-7}$	11 %
Am-241	$4,0 \cdot 10^{-8}$	31 %	$3,0 \cdot 10^{-12}$	-	$1,9 \cdot 10^{-20}$	-
Np-237	$4,2 \cdot 10^{-10}$	-	$2,6 \cdot 10^{-8}$	3 %	$4,3 \cdot 10^{-7}$	5 %
Ra-226	$3,1 \cdot 10^{-8}$	24 %	$1,5 \cdot 10^{-8}$	2 %	$8,9 \cdot 10^{-9}$	-
Pb-210	$3,5 \cdot 10^{-8}$	27 %	$1,7 \cdot 10^{-8}$	2 %	$9,6 \cdot 10^{-9}$	-
Am-243	$1,3 \cdot 10^{-9}$	1 %	$2,9 \cdot 10^{-8}$	3 %	$1,5 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$4,8 \cdot 10^{-9}$	4 %	$5,3 \cdot 10^{-7}$	52 %	$6,2 \cdot 10^{-6}$	71 %
Pa-231	$3,8 \cdot 10^{-9}$	3 %	$7,3 \cdot 10^{-8}$	7 %	$6,0 \cdot 10^{-7}$	7 %
übrige RN	$1,2 \cdot 10^{-10}$	-	$6,3 \cdot 10^{-9}$	-	$1,1 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$1,3 \cdot 10^{-7}$	100 %	$1,0 \cdot 10^{-6}$	100 %	$8,8 \cdot 10^{-6}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

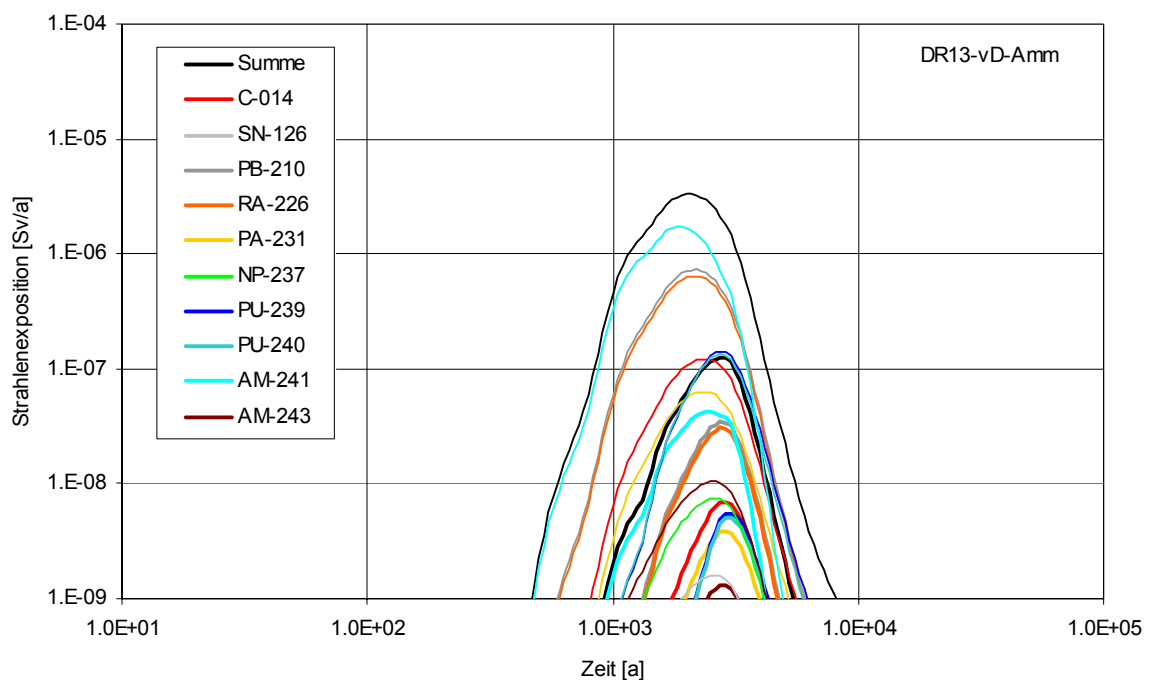


Abb. 4.15 Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (SFKan80% vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

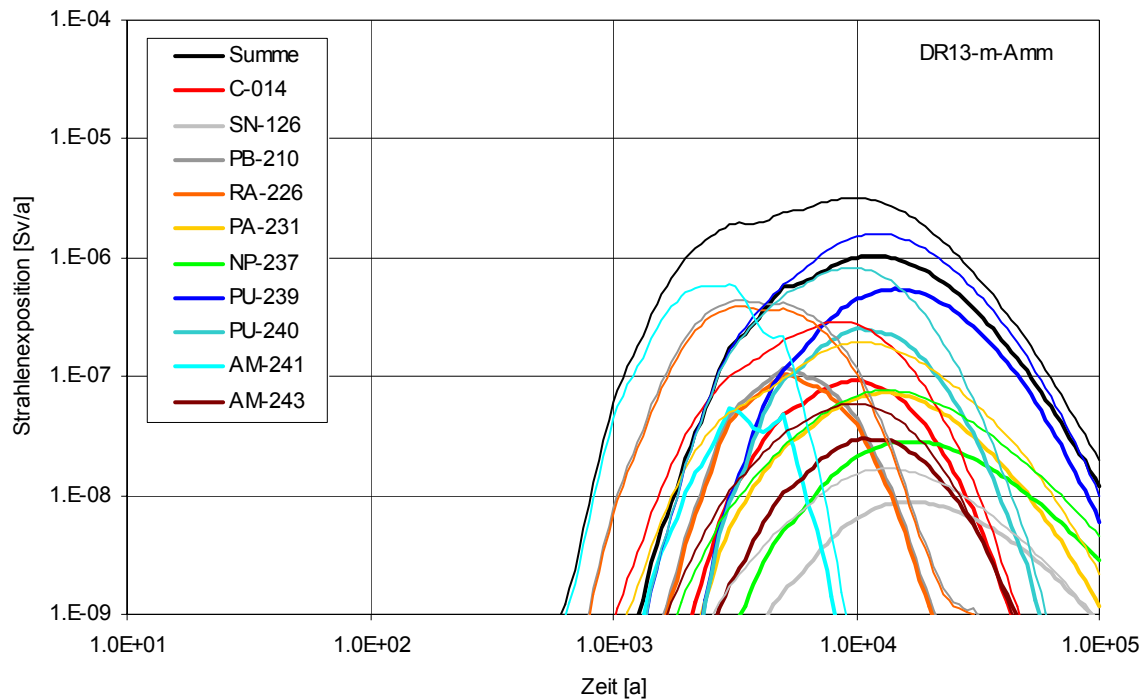


Abb. 4.16 Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (SFKan80% vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

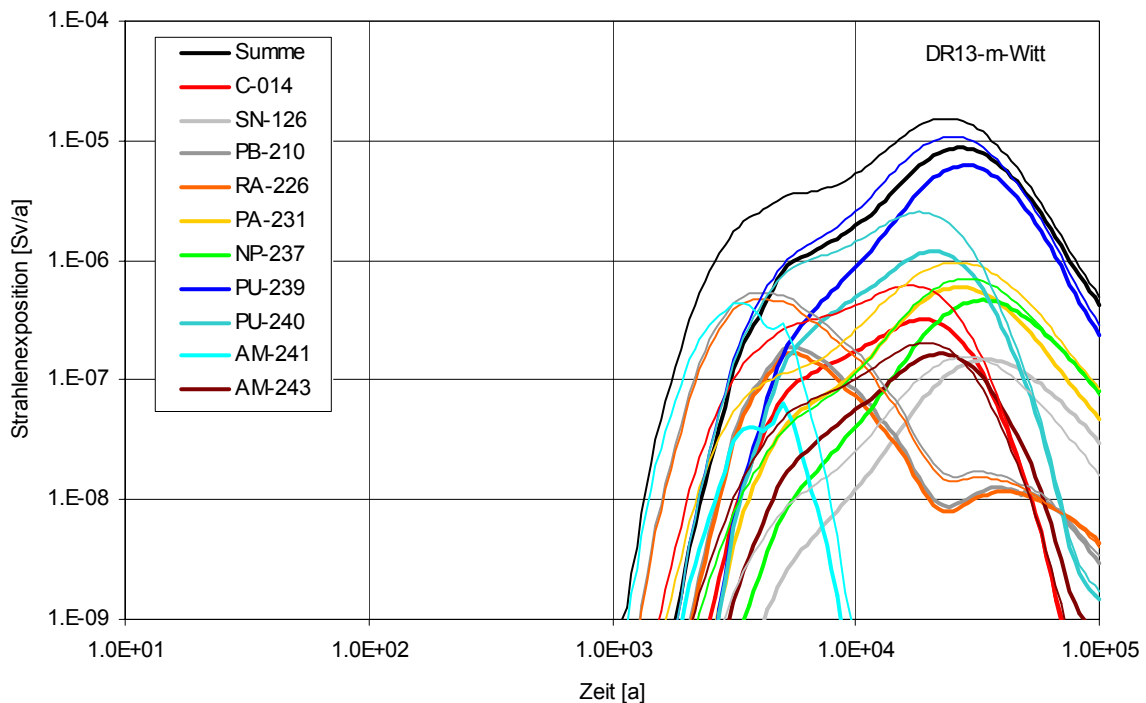


Abb. 4.17 Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (SFKan80% vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Abb. 4.18 zeigt für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ die Entwicklung der Beiträge der in den Einlagerungsbereichen eingelagerten Pu-239-Inventare zur potenziellen Strahlenexposition. Der Aufbau von Pu-239 aus eingelagertem Am-243, welcher zur Zeit des Maximums etwa 5 % beträgt, ist nicht in der Pu-239-Summenlinie in Abb. 4.18 enthalten. Im Maximum stammt das Pu-239 vorwiegend aus LAW1A und sekundär aus LAW2. Im Vergleich zum Referenzfall (vgl. Abb. 4.3) sind alle ELB-Beiträge verzögert und haben im Maximum um etwa den Faktor 2 abgenommen.

In Tab. 4.9 sind für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ die ELB-spezifischen Beiträge zum Maximum des potenziellen Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 und Ra-226 zusammengetragen. Im Allgemeinen sind die Verschiebungen in den Anteilen im Vergleich zum Vergleichsfall bzw. Referenzfall relativ gering (vgl. Tab. 3.5, Tab. 4.2).

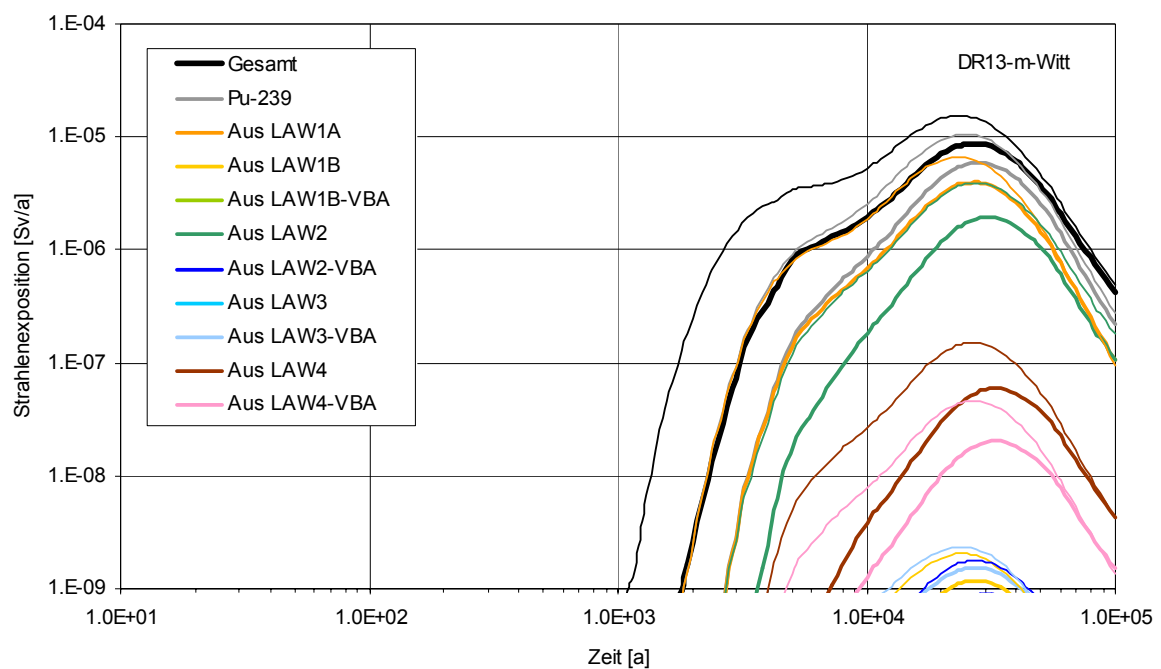


Abb. 4.18 ELB-Beiträge eingelagertes Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (SFKan80% vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.9 ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)

R10-L SFKan80% DR13 – m-Witt	Am-241 bei 5 000 a		Pu-239 bei 27 500 a		Ra-226 bei 5 500 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
Aus LAW1A	5,9·10⁻⁹	9 %	4,0·10⁻⁶	67 %	1,5·10⁻⁷	90 %
Aus LAW1B	7,2·10⁻⁹	11 %	1,2·10 ⁻⁹	-	1,9·10 ⁻⁹	1 %
Aus LAW1B-VBA	8,3·10 ⁻¹¹	-	1,1·10 ⁻¹¹	-	-	-
Aus LAW2	2,6·10 ⁻⁹	4 %	1,9·10⁻⁶	32 %	2,6·10 ⁻⁹	2 %
Aus LAW2-VBA	2,1·10 ⁻¹²	-	8,6·10 ⁻¹⁰	-	-	-
Aus LAW3	4,2·10 ⁻⁹	7 %	1,5·10 ⁻¹¹	-	9,8·10 ⁻⁹	6 %
Aus LAW3-VBA	4,0·10⁻⁸	61 %	1,6·10 ⁻⁹	-	-	-
Aus LAW4	2,2·10 ⁻⁹	3 %	5,4·10 ⁻⁸	1 %	2,9·10 ⁻⁹	2 %
Aus LAW4-VBA	3,7·10 ⁻¹⁰	1 %	1,9·10 ⁻⁸	-	-	-
Summe	6,5·10 ⁻⁸	100 %	5,9·10 ⁻⁶	100 %	1,7·10 ⁻⁷	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

4.4.2 Variante mit erhöhter Kanalisierung im Baufeld in der Südflanke (SFKan20%)

Abb. 4.19 zeigt für die Variante SFKan20% – fette Linien – einen Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells. Die im Vergleich zum Referenzfall bis etwa 10 000 Jahre höheren Radionuklidkonzentrationen im Austritt aus der Grube führen zu anhaltend höheren potenziellen Strahlenexpositionen als im Vergleichsfall, wobei die Unterschiede allerdings mit der Zeit abnehmen. Dies beeinflusst auch die Verhältnisse zwischen den Strahlenexpositionsentwicklungen in den Exfiltrationsgebieten untereinander. Das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition tritt im Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (m-Witt) auf, beträgt für die Variante SFKan20% $2,0 \cdot 10^{-5}$ Sv/a, ist ca. 30 % höher als im Vergleichsfall und wird ca. 1 000 Jahre früher bei etwa 22 000 Jahren erreicht. Zu früheren Zeiten dominiert, jedoch nun auf deutlich höherem Niveau, die potenzielle Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (vD-Amm), deren Maximum $1,4 \cdot 10^{-5}$ Sv/a beträgt, einen Faktor 4,5 höher ist und etwa 500 Jahre früher bei etwa 1 600 Jahren erreicht wird. Das nun deutlich kleinste Maximum der potenziellen Strahlenexpositionen für die drei Exfiltrationsgebiete tritt für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (m-Amm) auf, beträgt $5,6 \cdot 10^{-6}$ Sv/a, ist ca. 75 % höher als im Vergleichsfall und wird ca. 900 Jahre früher bei etwa 9 100 Jahren erreicht.

Abb. 4.20 bis Abb. 4.22 zeigen die Entwicklungen der Radionuklidbeiträge für die Exfiltrationsgebiete im Vergleich zum Vergleichsfall.

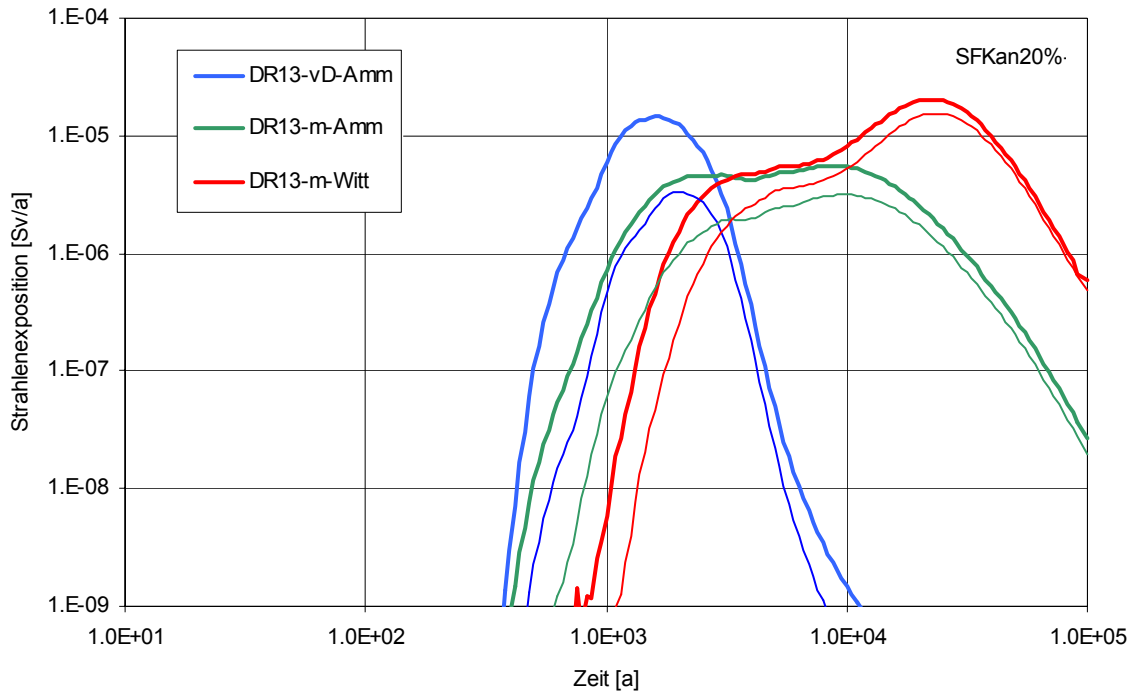


Abb. 4.19 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (SFKan20% vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

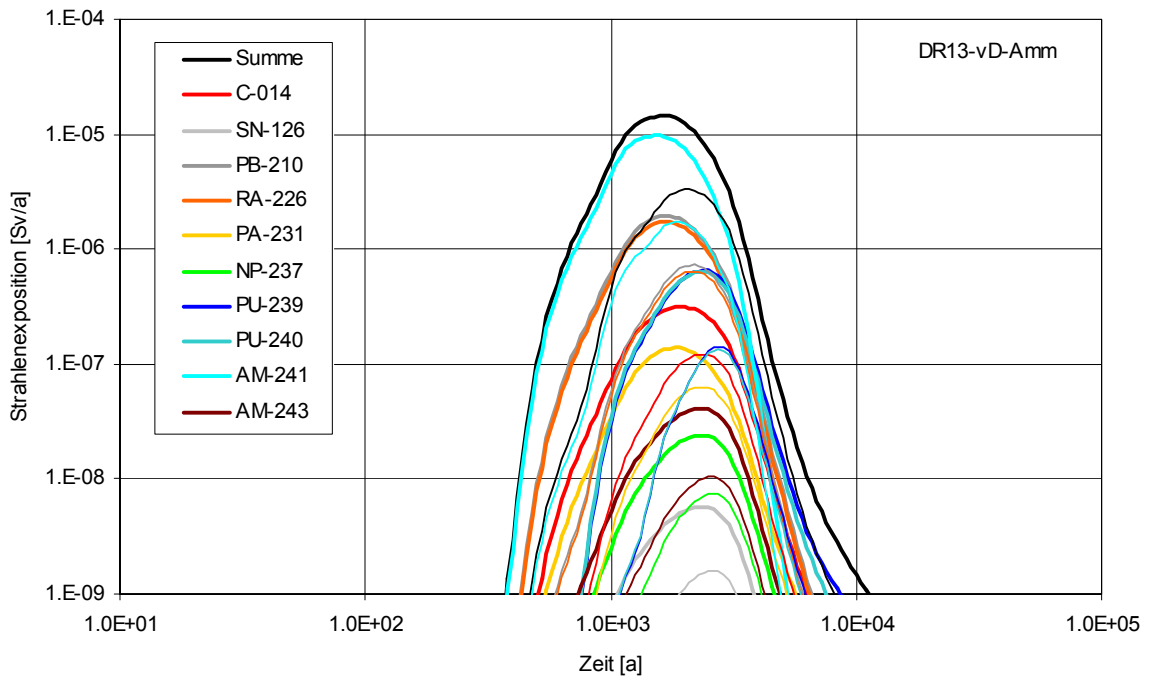


Abb. 4.20 Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (SFKan20% vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

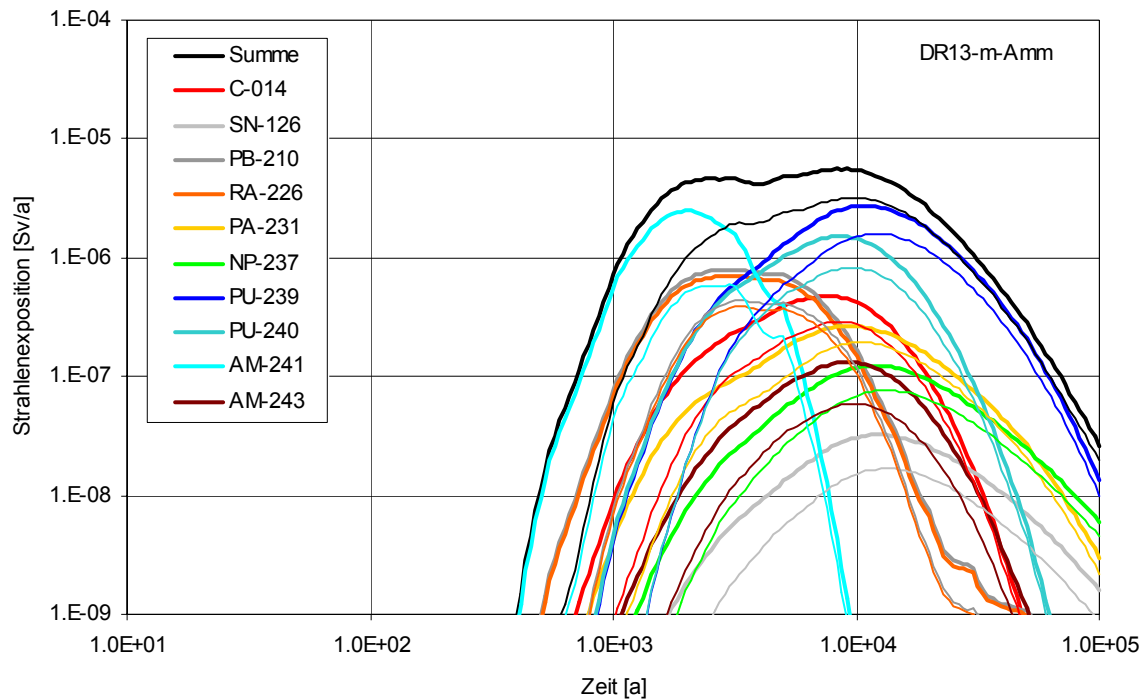


Abb. 4.21 Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (SFKan20% vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

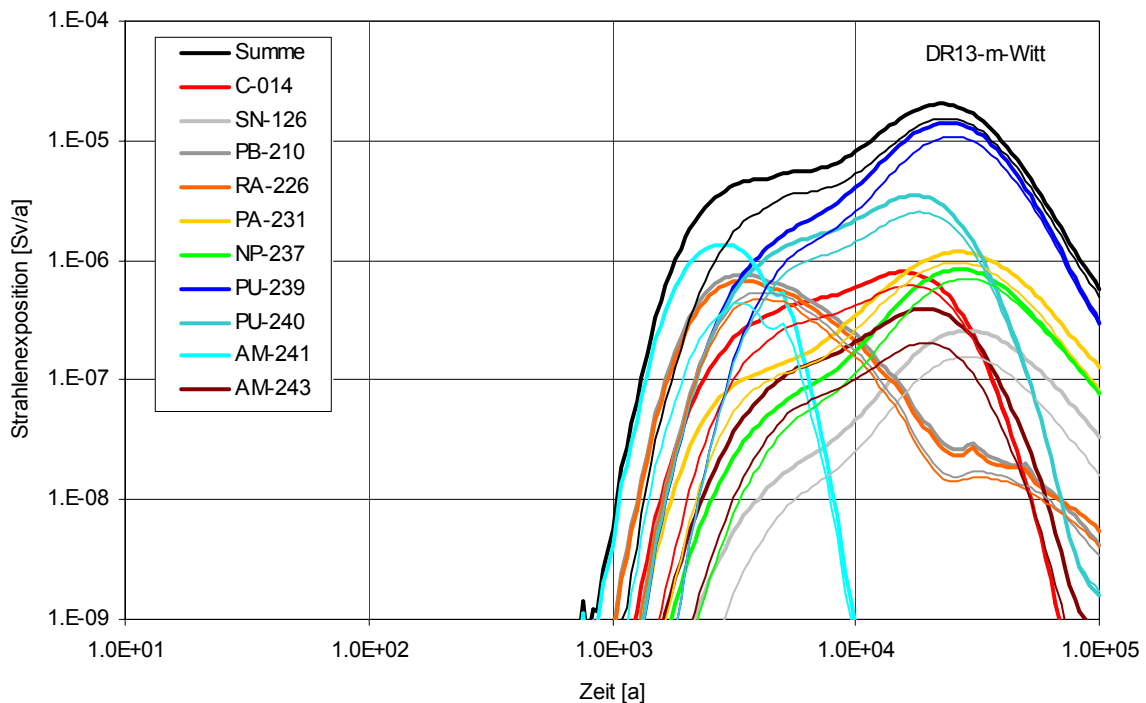


Abb. 4.22 Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (SFKan20% vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.10 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante SFKan20%)

R10-L SFKan20% Radionuklid	vD-Amm bei 1 600 a		m-Amm bei 9 100 a		m-Witt bei 22 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$2,8 \cdot 10^{-7}$	2 %	$4,6 \cdot 10^{-7}$	8 %	$6,1 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$3,6 \cdot 10^{-9}$	-	$2,9 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,2 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$3,2 \cdot 10^{-7}$	2 %	$1,5 \cdot 10^{-6}$	27 %	$3,0 \cdot 10^{-6}$	15 %
Am-241	$9,7 \cdot 10^{-6}$	67 %	$1,4 \cdot 10^{-9}$	-	$1,4 \cdot 10^{-16}$	-
Np-237	$1,5 \cdot 10^{-8}$	-	$1,1 \cdot 10^{-7}$	2 %	$7,7 \cdot 10^{-7}$	4 %
Ra-226	$1,7 \cdot 10^{-6}$	12 %	$2,0 \cdot 10^{-7}$	4 %	$2,9 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$1,9 \cdot 10^{-6}$	13 %	$2,3 \cdot 10^{-7}$	4 %	$3,2 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$2,6 \cdot 10^{-8}$	-	$1,3 \cdot 10^{-7}$	2 %	$3,8 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$3,1 \cdot 10^{-7}$	2 %	$2,6 \cdot 10^{-6}$	47 %	$1,4 \cdot 10^{-5}$	69 %
Pa-231	$1,3 \cdot 10^{-7}$	1 %	$2,7 \cdot 10^{-7}$	5 %	$1,1 \cdot 10^{-6}$	5 %
übrige RN	$4,1 \cdot 10^{-9}$	-	$2,4 \cdot 10^{-8}$	-	$1,8 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$1,4 \cdot 10^{-5}$	100 %	$5,6 \cdot 10^{-6}$	100 %	$2,0 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

Tab. 4.10 listet für die Variante SFKan20% die wichtigsten Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für jedes Exfiltrationsgebiet auf. Gegenüber dem Vergleichsfall RX.1 (vgl. Tab. 3.2) ist vor allem der relativ zugenommene Beitrag von Am-241 zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ hervorzuheben. Die relativen Radionuklidbeiträge für die beiden anderen Exfiltrationsgebiete haben sich im Vergleich zu RX.1 nur marginal verändert.

Abb. 4.23 zeigt für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ die Entwicklung der Beiträge der in den Einlagerungsbereichen eingelagerten Am-241-Inventare zur potenziellen Strahlenexposition.. Der Aufbau von Am-241 aus eingelagertem Pu-241 (Halbwertszeit nur ca. 15 Jahre) ist schon in den Am-241-Tracerinventaren berücksichtigt worden, sodass diese in den Linien in Abb. 4.23 mit enthalten sind. Im Maximum stammt das Am-241 vorwiegend aus LAW3 und sekundär aus LAW1A und LAW1B. Im Vergleich zum Vergleichsfall sind alle ELB-Beiträge beschleunigt und im Maximum haben sie um etwa den Faktor 4 bis 5 zugenommen.

In Tab. 4.11 sind für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ die ELB-spezifischen Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 und Ra-226 zusammengetragen. Im Allgemeinen sind die Verschiebungen in den Anteilen im Vergleich zum Vergleichsfall relativ gering (vgl. Tab. 3.3).

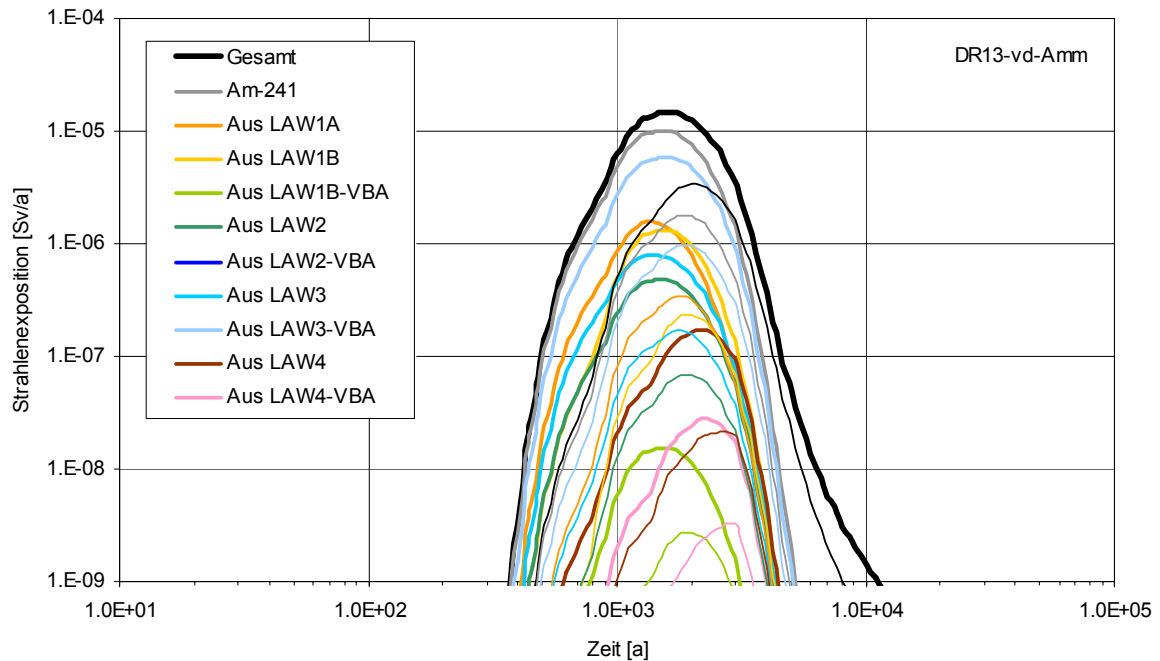


Abb. 4.23 ELB-Beiträge eingelagertes Am-241 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (SFKan20% vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.11 ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)

R10-L SFKan20% DR13 – vD-Amm	Am-241 bei 1 600 a		Pu-239 bei 2 500 a		Ra-226 bei 1 650 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
Aus LAW1A	1,4·10⁻⁶	14 %	6,0·10⁻⁷	92 %	1,6·10⁻⁶	93 %
Aus LAW1B	1,3·10⁻⁶	13 %	1,6·10 ⁻¹⁰	-	1,6·10 ⁻⁸	1 %
Aus LAW1B-VBA	1,5·10 ⁻⁸	-	1,6·10 ⁻¹²	-	-	-
Aus LAW2	4,7·10 ⁻⁷	5 %	5,1·10 ⁻⁸	8 %	2,0·10 ⁻⁸	1 %
Aus LAW2-VBA	4,1·10 ⁻¹⁰	-	2,3·10 ⁻¹¹	-	-	-
Aus LAW3	7,6·10 ⁻⁷	8 %	7,5·10 ⁻¹³	-	7,6·10 ⁻⁸	4 %
Aus LAW3-VBA	5,9·10⁻⁶	59 %	2,1·10 ⁻¹⁰	-	-	-
Aus LAW4	1,1·10 ⁻⁷	1 %	6,5·10 ⁻¹⁰	-	6,5·10 ⁻⁹	-
Aus LAW4-VBA	1,4·10 ⁻⁸	-	2,0·10 ⁻¹⁰	-	-	-
Summe	1,0·10⁻⁵	100 %	6,5·10⁻⁷	100 %	1,7·10⁻⁶	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorbehalten.

Abb. 4.24 zeigt für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ die Entwicklung der Beiträge der in den Einlagerungsbereichen eingelagerten Pu-239-Inventare zur potenziellen Strahlenexposition. Der Aufbau von Pu-239 aus eingelagertem Am-243, welcher zur Zeit des Maximums etwa 3 % beträgt, ist nicht in der Pu-239-Summenlinie in Abb. 4.24 enthalten. Im Maximum stammt das Pu-239 vorwiegend aus LAW1A und sekundär aus LAW2. Im Vergleich zum Referenzfall (vgl. Abb. 4.3) sind alle ELB-Beiträge beschleunigt, jedoch im Maximum sind vor allem die um etwa den Faktor 2 zugenommenen Beiträge aus LAW2 hervorzuheben.

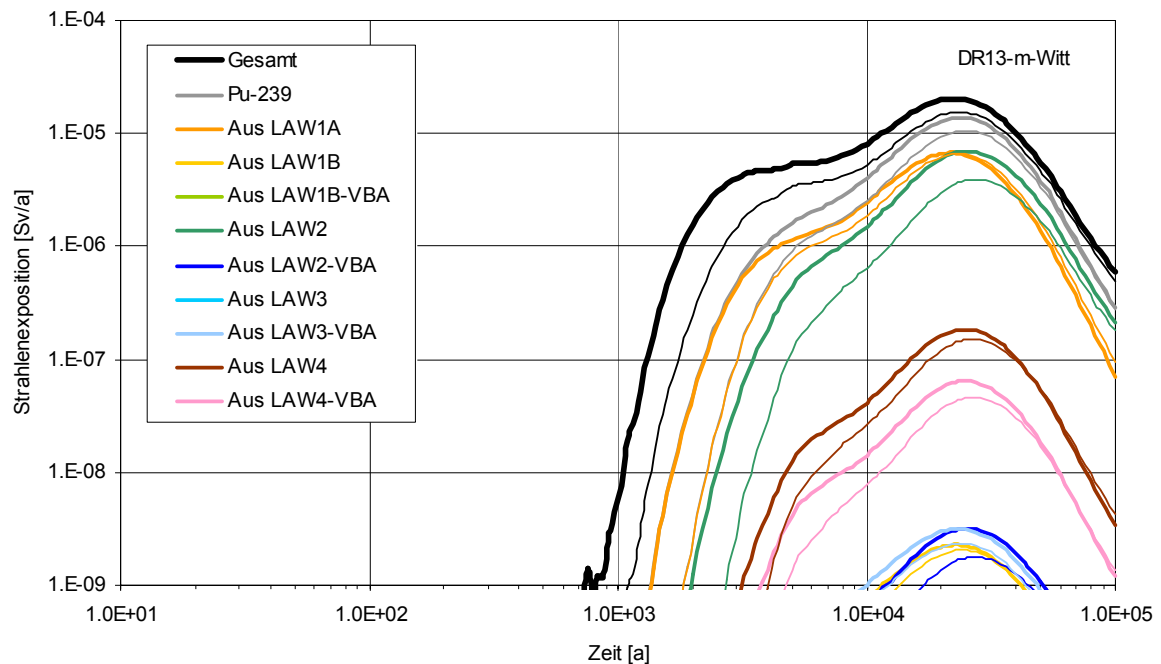


Abb. 4.24 ELB-Beiträge eingelagertes Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (SFKan20% vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

In Tab. 4.12 sind für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ die ELB-spezifischen Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 und Ra-226 zusammengetragen. Mit Ausnahme des zugenommenen Beitrags von Pu-239 aus LAW2 sind die Verschiebungen in den Anteilen im Vergleich zum Vergleichsfall bzw. Referenzfall relativ gering (vgl. Tab. 3.5, Tab. 4.2).

Tab. 4.12 ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)

R10-L SFKan20% DR13 – m-Witt	Am-241 bei 2 650 a		Pu-239 bei 24 000 a		Ra-226 bei 3 300 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
Aus LAW1A	1,3·10⁻⁷	10 %	6,6·10⁻⁶	48 %	5,8·10⁻⁷	86 %
Aus LAW1B	1,7·10⁻⁷	12 %	2,3·10 ⁻⁹	-	9,2·10 ⁻⁹	1 %
Aus LAW1B-VBA	1,9·10 ⁻⁹	-	2,3·10 ⁻¹¹	-	-	-
Aus LAW2	6,1·10 ⁻⁸	4 %	6,9·10⁻⁶	50 %	1,4·10 ⁻⁸	2 %
Aus LAW2-VBA	5,3·10 ⁻¹¹	-	3,1·10 ⁻⁹	-	-	-
Aus LAW3	9,4·10 ⁻⁸	7 %	5,8·10 ⁻¹¹	-	4,9·10 ⁻⁸	7 %
Aus LAW3-VBA	8,7·10⁻⁷	63 %	3,1·10 ⁻⁹	-	-	-
Aus LAW4	3,9·10 ⁻⁸	3 %	1,8·10 ⁻⁷	1 %	2,5·10 ⁻⁸	4 %
Aus LAW4-VBA	6,4·10 ⁻⁹	-	6,4·10 ⁻⁸	-	-	-
Summe	1,4·10 ⁻⁶	100 %	1,4·10 ⁻⁵	100 %	6,8·10 ⁻⁷	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

4.5 Szenario und Variante zur Schnittstelle Deckgebirge

Der Einfluss der Unsicherheit betreffend der Schnittstelle zum Deckgebirge wurde im Rechenfall R10-L über das Szenario OhneDG574 und die Variante GIAustritt analysiert. Im Referenzfall, sowie im Vergleichsfall, wird die Schnittstelle zum Deckgebirge über zwei Modell-Austrittsstellen abgebildet, wobei der Strömungswiderstand an der höchsten Modell-Austrittsstelle etwa sechs-mal geringer als an der unteren Modell-Austrittsstelle angesetzt wurde. Das Szenario OhneDG574 unterscheidet sich vom Referenzfall durch das unterstellte vollständige Fehlen von strömungswirksamen Verbindungen im unteren Teil der Austrittsfläche zum Deckgebirge, was als verschlossene untere Modell-Austrittsstelle – d.h. ohne Segment DG574 – abgebildet wurde. Die Variante GIAustritt unterscheidet sich vom Referenzfall durch den in dieser Variante unterstellten über die Austrittsfläche gleichverteilten Lösungsaustritt, wozu die Strömungswiderstände der beiden Modell-Austrittsstellen gleich angesetzt wurden.

Die Ergebnisse der beiden Rechnungen unterschieden sich nur relevant von jenen des Referenzfalls in Bezug auf die Radionuklidkonzentrationsentwicklungen im oberen Weststrang des Baufeldes in der Südflanke, d.h. oberhalb der Modell-Austrittsstelle in 574 m Tiefe, wegen der geänderten Strömungsverhältnisse (vgl. Schlussbericht 2005, Abb. 10.148 bis 10.161). Dies wirkte sich als leicht verzögerte (OhneDG574) bzw. leicht beschleunigte (GIAustritt) und teilweise geringfügig niedrigere Radionuklidkonzentrationen im Lösungsaustritt aus der Grube aus (vgl. Schlussbericht 2005, Abb. 10.163 und 10.168). Diese geringen Unterschiede spiegeln sich ebenfalls gering in den potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete wider.

4.5.1 Szenario mit einzelner Austrittsstelle im Grubenhöchsten (OhneDG574)

Abb. 4.25 zeigt für das Szenario OhneDG574 – fette Linien – einen Vergleich der Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells. Die im Vergleich zum Referenzfall bis etwa 800 Jahre leicht verzögerte Entwicklung der Radionuklidkonzentrationen im Austritt aus der Grube wirkt sich als eine kurzzeitige Verzögerung der potenziellen Strahlenexposition für alle Exfiltrationsgebiete aus. Dies lässt die Verhältnisse zwischen den Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete untereinander unberührt. Das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition tritt für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (m-Witt) auf, beträgt für das Szenario OhneDG574 unverändert $1,5 \cdot 10^{-5}$ Sv/a und wird wie im Referenzfall 1 000 Jahre später bei etwa 24 000 Jahren erreicht. Zu früheren Zeiten dominiert die potenzielle Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (vD-Amm), deren Maximum $3,7 \cdot 10^{-6}$ Sv/a beträgt, im Vergleich zum Vergleichsfall etwa 10% höher ist und unverändert bei etwa 2 100 Jahren erreicht wird. Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (m-Amm) beträgt nun $3,1 \cdot 10^{-6}$ Sv/a, ist 2 % niedriger als im Vergleichsfall und wird unverändert bei etwa 10 000 Jahren erreicht.

Tab. 4.13 listet für das Szenario OhneDG574 die wichtigsten Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für jedes Exfiltrationsgebiet auf. Abb. 4.26 bis Abb. 4.28 zeigen die Radionuklidbeiträge für die Exfiltrationsgebiete im Vergleich zum Vergleichsfall. Die Unterschiede zum Vergleichsfall RX.1 sind marginal.

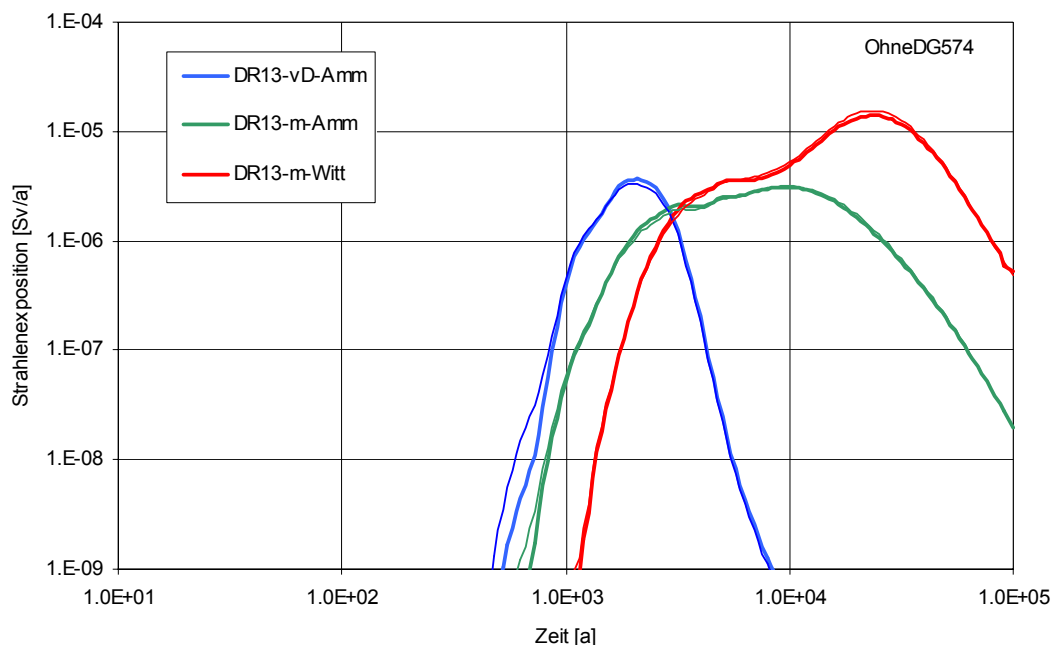


Abb. 4.25 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (OhneDG574 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.13 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Szenario OhneDG574)

R10-L OhneDG574 Radionuklid	vD-Amm bei 2 100 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 24 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$2,6 \cdot 10^{-7}$	8 %	$4,2 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$1,7 \cdot 10^{-9}$	-	$2,0 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,1 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$8,0 \cdot 10^{-7}$	26 %	$1,8 \cdot 10^{-6}$	13 %
Am-241	$1,8 \cdot 10^{-6}$	50 %	$4,2 \cdot 10^{-10}$	-	$7,0 \cdot 10^{-18}$	-
Np-237	$6,7 \cdot 10^{-9}$	-	$7,6 \cdot 10^{-8}$	2 %	$7,0 \cdot 10^{-7}$	5 %
Ra-226	$6,6 \cdot 10^{-7}$	18 %	$1,0 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,4 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$7,5 \cdot 10^{-7}$	20 %	$1,1 \cdot 10^{-7}$	4 %	$1,5 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$1,2 \cdot 10^{-8}$	-	$8,8 \cdot 10^{-8}$	3 %	$2,9 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,5 \cdot 10^{-6}$	47 %	$9,6 \cdot 10^{-6}$	69 %
Pa-231	$6,1 \cdot 10^{-8}$	2 %	$1,8 \cdot 10^{-7}$	6 %	$7,7 \cdot 10^{-7}$	6 %
übrige RN	$1,7 \cdot 10^{-9}$	-	$1,6 \cdot 10^{-8}$	1 %	$1,5 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$3,7 \cdot 10^{-6}$	100 %	$3,1 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,4 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

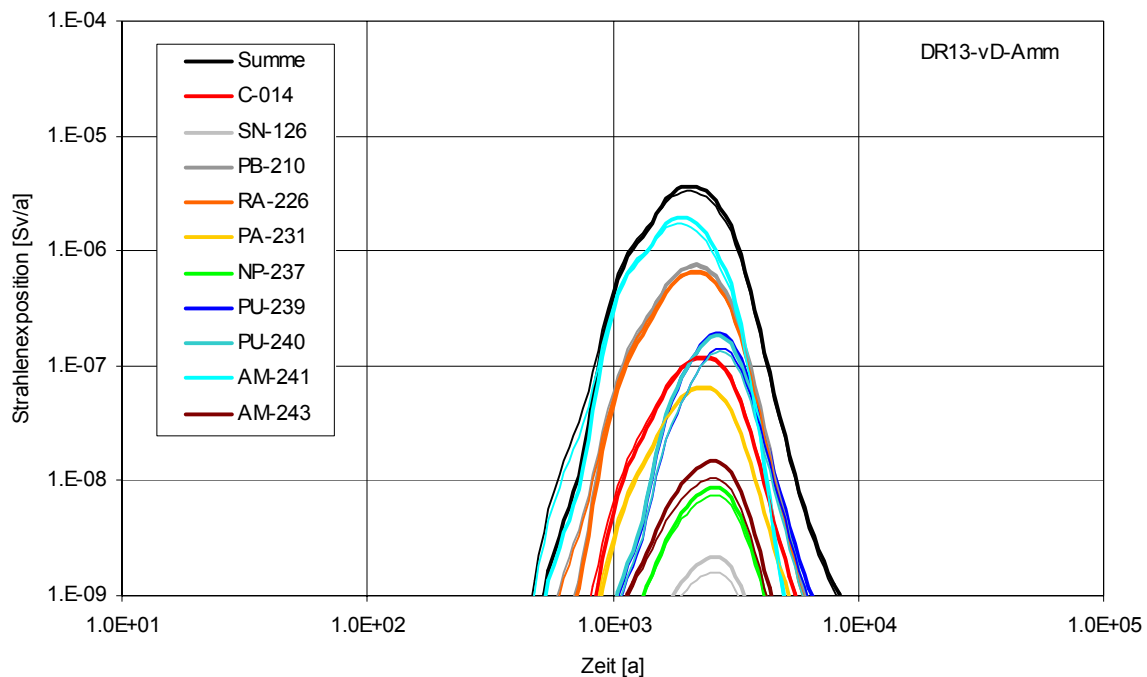


Abb. 4.26 Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (OhneDG574 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

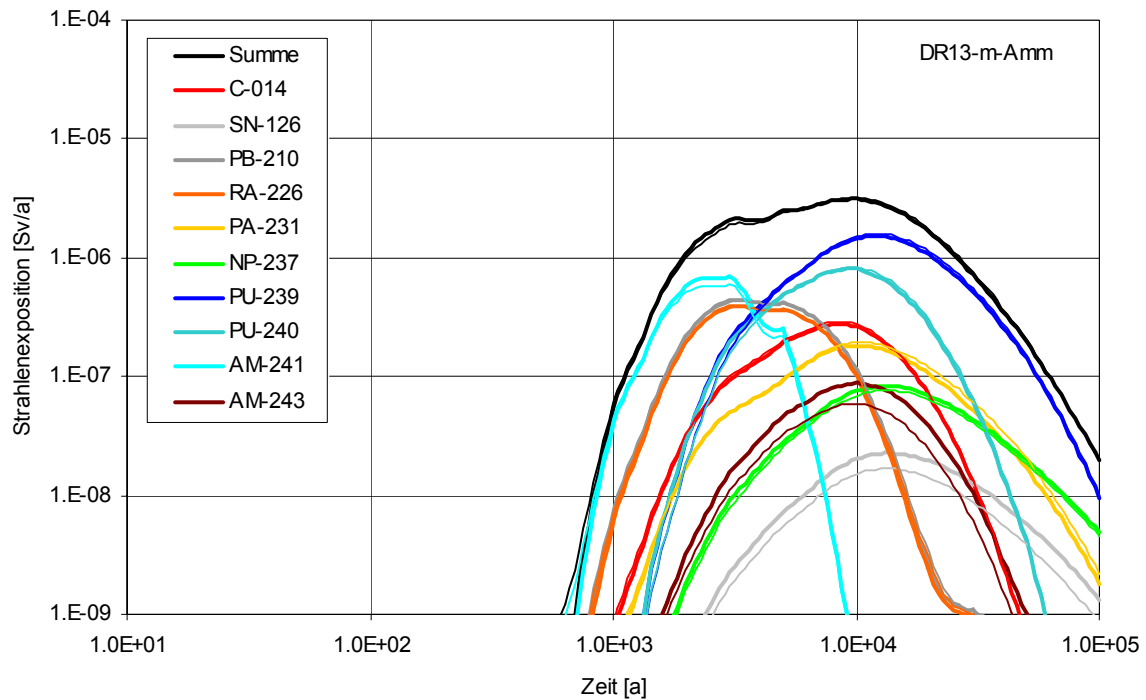


Abb. 4.27 Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (OhneDG574 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

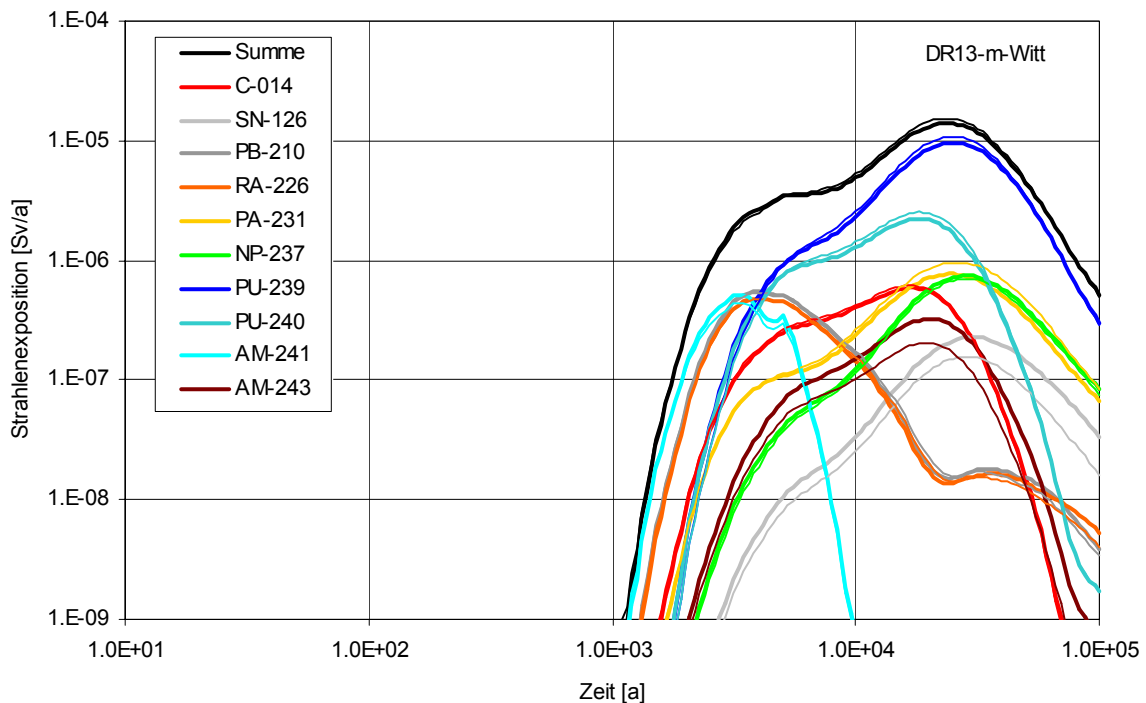


Abb. 4.28 Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (OhneDG574 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Abb. 4.29 zeigt für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ die Entwicklung der Beiträge der in den Einlagerungsbereichen eingelagerten Pu-239-Inventare zur potenziellen Strahlenexposition. Der Aufbau von Pu-239 aus eingelagertem Am-243, welcher zur Zeit des Maximums etwa 5 % beträgt, ist nicht in der Pu-239-Summenlinie in Abb. 4.29 mit enthalten. Im Maximum stammt das Pu-239 vorwiegend aus LAW1A und sekundär aus LAW2. Im Vergleich zum Referenzfall (vgl. Abb. 4.3) hat lediglich der Beitrag aus LAW2 um 25 % abgenommen.

In Tab. 4.14 sind für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ die ELB-spezifischen Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 und Ra-226 zusammengetragen. Mit Ausnahme der LAW2-Beiträge sind die Verschiebungen in den Anteilen im Vergleich zum Vergleichsfall bzw. Referenzfall relativ gering (vgl. Tab. 3.5, Tab. 4.2).

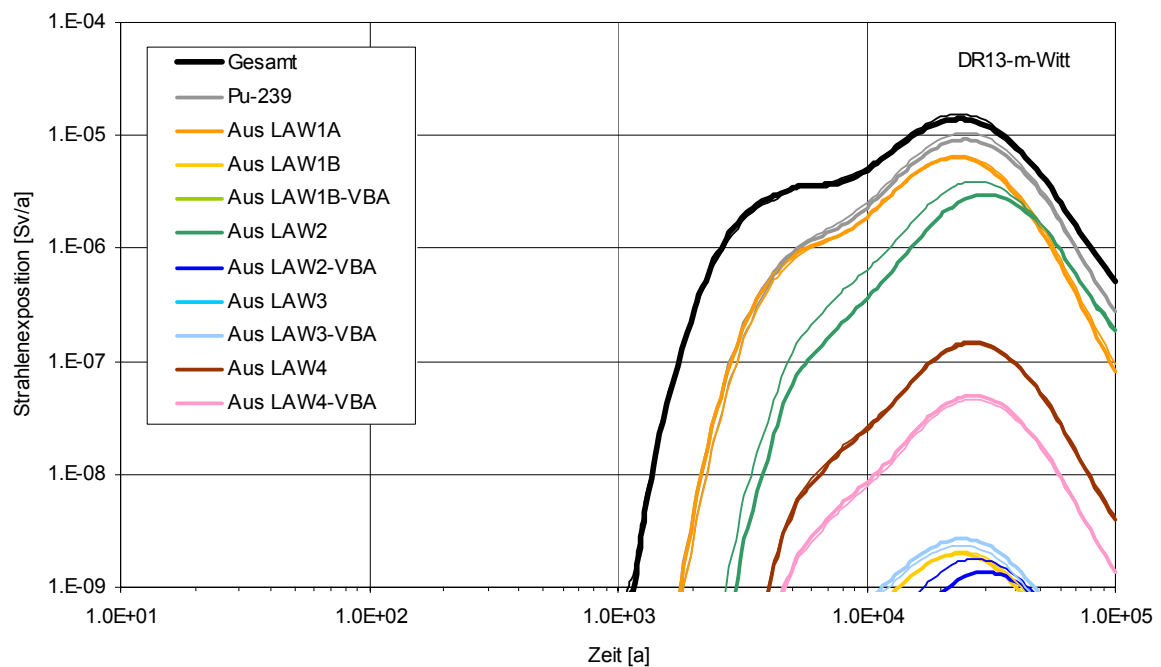


Abb. 4.29 ELB-Beiträge eingelagertes Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (OhneDG574 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.14 ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)

R10-L OhneDG574 DR13 – m-Witt	Am-241 bei 3 300 a		Pu-239 bei 25 000 a		Ra-226 bei 4 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
Aus LAW1A	5,0·10⁻⁸	10 %	6,3·10⁻⁶	68 %	4,3·10⁻⁷	89 %
Aus LAW1B	6,3·10⁻⁸	12 %	2,0·10 ⁻⁹	-	6,2·10 ⁻⁹	1 %
Aus LAW1B-VBA	7,3·10 ⁻¹⁰	-	2,0·10 ⁻¹¹	-	-	-
Aus LAW2	3,4·10 ⁻⁸	1 %	2,7·10⁻⁶	30 %	2,1·10 ⁻⁹	-
Aus LAW2-VBA	2,8·10 ⁻¹²	-	1,3·10 ⁻⁹	-	-	-
Aus LAW3	3,6·10 ⁻⁸	7 %	4,1·10 ⁻¹¹	-	3,2·10 ⁻⁸	7 %
Aus LAW3-VBA	3,5·10⁻⁷	66 %	2,7·10 ⁻⁹	-	-	-
Aus LAW4	1,9·10 ⁻⁸	4 %	1,4·10 ⁻⁷	2 %	1,3·10 ⁻⁸	3 %
Aus LAW4-VBA	3,2·10 ⁻⁹	1 %	4,9·10 ⁻⁸	1 %	-	-
Summe	5,3·10 ⁻⁷	100 %	9,2·10 ⁻⁶	100 %	4,8·10 ⁻⁷	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

4.5.2 Variante mit über der Austrittsfläche gleichverteiltem Austritt (GIAustritt)

Abb. 4.30 zeigt für die Variante GIAustritt – fette Linien – einen Vergleich der Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells. Die im Vergleich zum Referenzfall bis ca. 1000 Jahre leicht beschleunigte Entwicklung der Radionuklidkonzentrationen im Austritt aus der Grube wirkt sich als eine kurzzeitige Beschleunigung der potenziellen Strahlenexposition für alle Exfiltrationsgebiete aus. Dies lässt die Verhältnisse zwischen den Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete untereinander unberührt. Das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition tritt für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (m-Witt) auf, beträgt für die Variante GIAustritt $1,7 \cdot 10^{-5}$ Sv/a, ist ca. 10 % höher als im Vergleichsfall und wird 1 000 Jahre früher bei etwa 22 000 Jahren erreicht. Zu früheren Zeiten dominiert die potenzielle Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (vD-Amm), deren Maximum beträgt $3,2 \cdot 10^{-6}$ Sv/a, ist im Vergleich zum Vergleichsfall etwa 3 % kleiner und wird leicht früher bei etwa 2 100 Jahren erreicht. Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (m-Amm) beträgt nun $3,3 \cdot 10^{-6}$ Sv/a, ist 4 % höher als im Vergleichsfall und wird unverändert bei etwa 10 000 Jahren erreicht.

Tab. 4.15 listet für die Variante GIAustritt die wichtigsten Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für jedes Exfiltrationsgebiet auf. Abb. 4.31 bis Abb. 4.33 zeigen die Radionuklidbeiträge für die Exfiltrationsgebiete im Vergleich zum Vergleichsfall. Die Unterschiede zum Vergleichsfall RX.1 sind marginal.

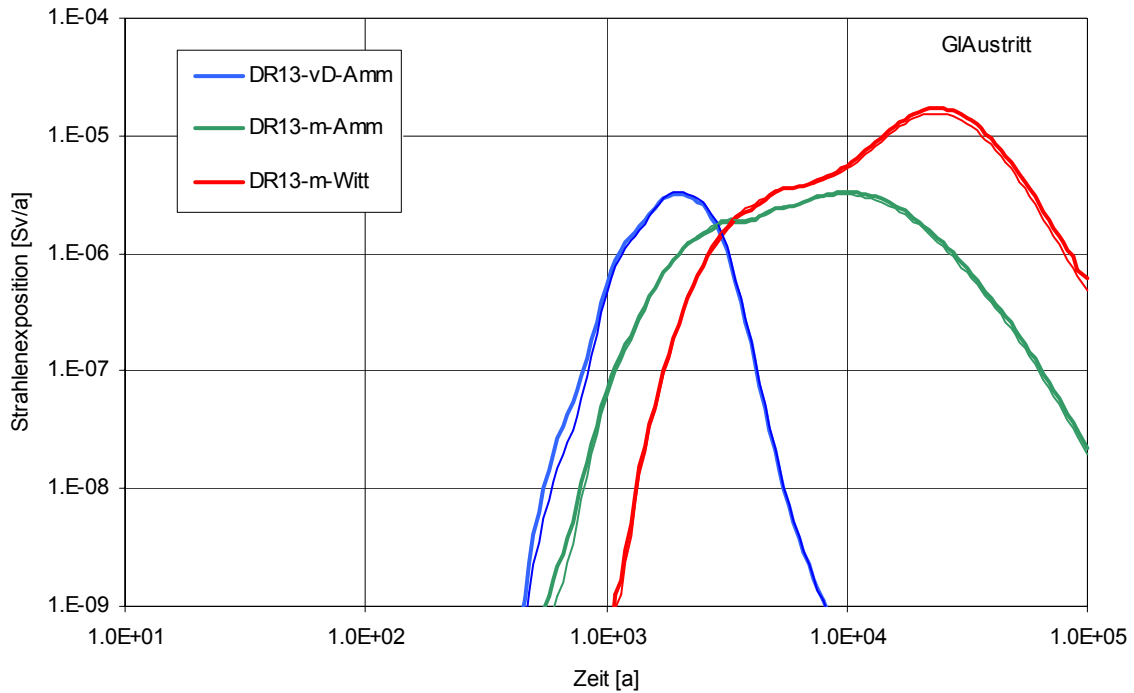


Abb. 4.30 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (GIAustritt vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.15 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante GIAustritt)

R1-L GIAustritt Radionuklid	vD-Amm bei 2 000 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 22 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,0 \cdot 10^{-7}$	3 %	$2,8 \cdot 10^{-7}$	8 %	$4,5 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$1,3 \cdot 10^{-9}$	-	$1,8 \cdot 10^{-8}$	1 %	$1,9 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$8,8 \cdot 10^{-8}$	3 %	$8,8 \cdot 10^{-7}$	26 %	$2,3 \cdot 10^{-6}$	13 %
Am-241	$1,8 \cdot 10^{-6}$	55 %	$3,9 \cdot 10^{-10}$	-	$6,2 \cdot 10^{-18}$	-
Np-237	$5,4 \cdot 10^{-9}$	-	$6,8 \cdot 10^{-8}$	2 %	$6,7 \cdot 10^{-7}$	4 %
Ra-226	$5,3 \cdot 10^{-7}$	16 %	$9,7 \cdot 10^{-8}$	3 %	$1,6 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$5,9 \cdot 10^{-7}$	18 %	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,8 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$8,9 \cdot 10^{-9}$	-	$7,5 \cdot 10^{-8}$	2 %	$2,6 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$8,8 \cdot 10^{-8}$	3 %	$1,6 \cdot 10^{-6}$	48 %	$1,2 \cdot 10^{-5}$	71 %
Pa-231	$4,7 \cdot 10^{-8}$	1 %	$1,8 \cdot 10^{-7}$	5 %	$9,7 \cdot 10^{-7}$	6 %
übrige RN	$1,4 \cdot 10^{-9}$	-	$1,5 \cdot 10^{-8}$	-	$1,6 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$3,2 \cdot 10^{-6}$	100 %	$3,3 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,7 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

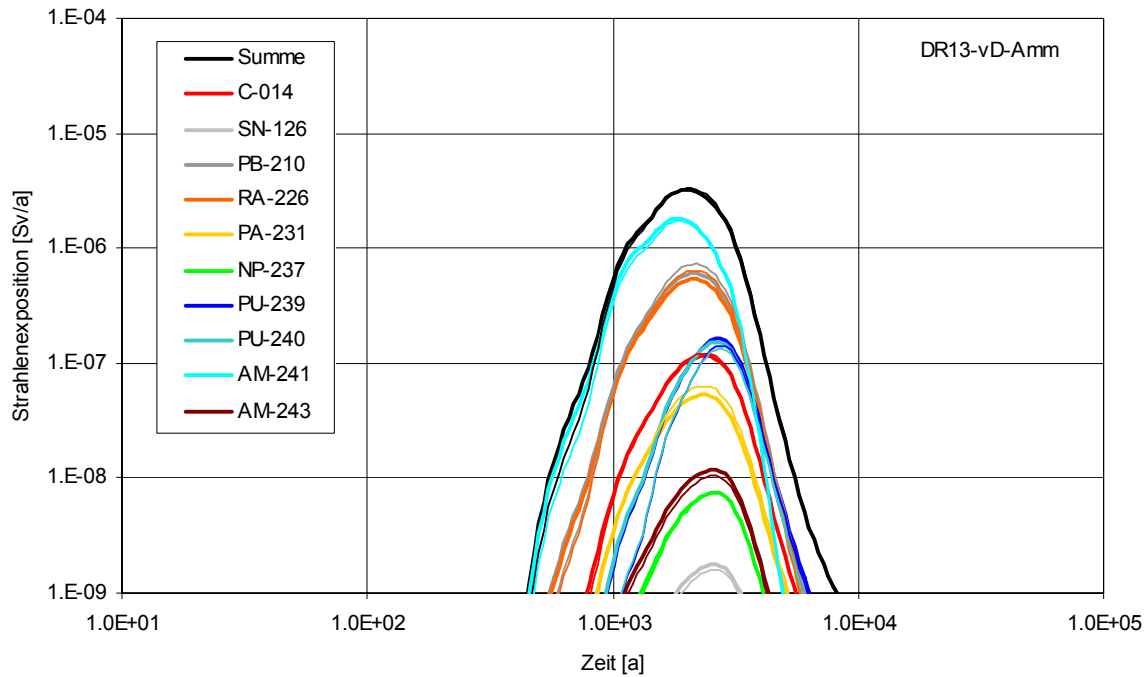


Abb. 4.31 Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (GIAustritt vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

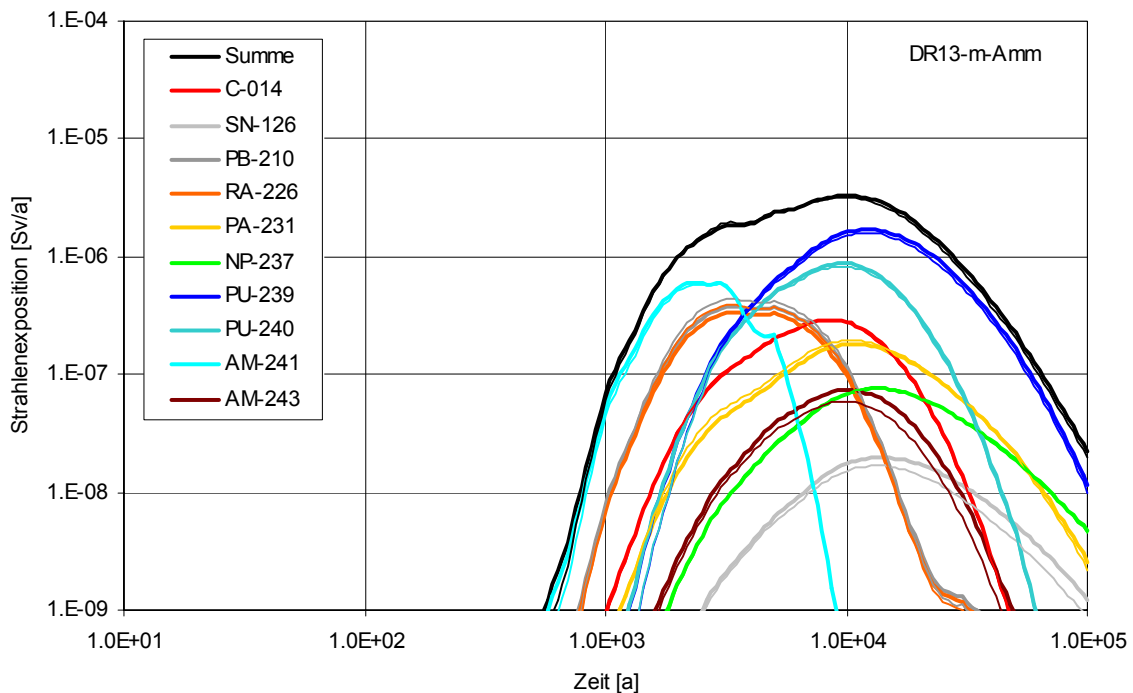


Abb. 4.32 Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (GIAustritt vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

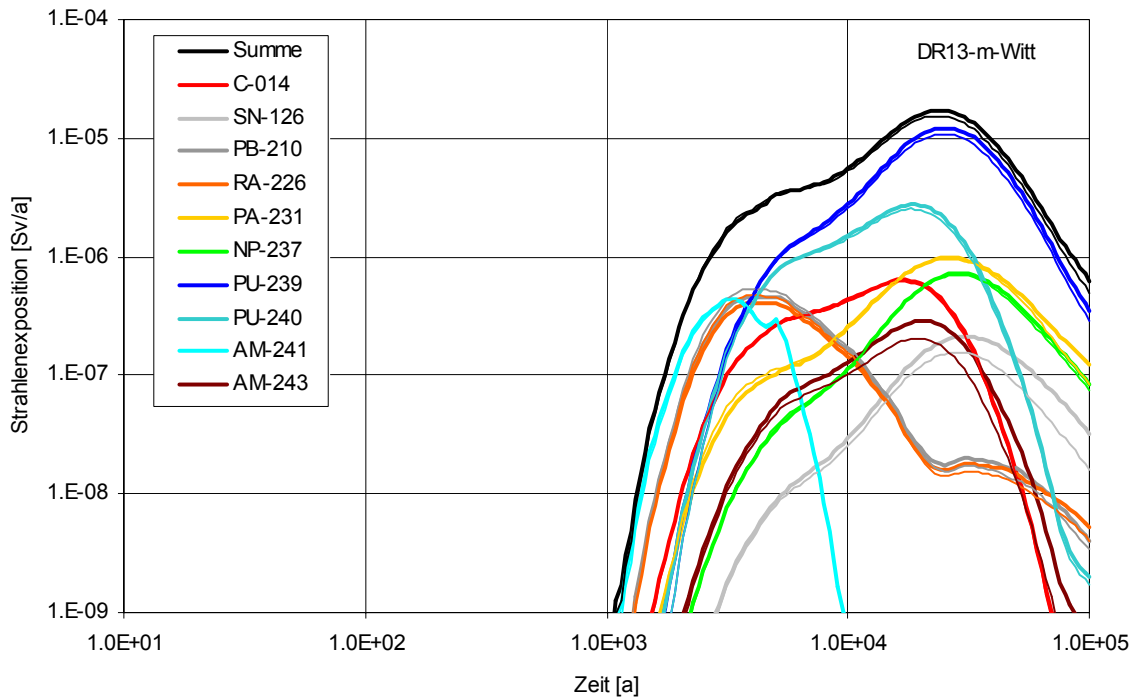


Abb. 4.33 Nuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (GIAustritt vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Abb. 4.34 zeigt für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ die Entwicklung der Beiträge der in den Einlagerungsbereichen eingelagerten Pu-239-Inventare zur potenziellen Strahlenexposition. Der Aufbau von Pu-239 aus eingelagertem Am-243, der zur Zeit des Maximums etwa 3 % beträgt, ist nicht in der Pu-239-Summenlinie in Abb. 4.34 mit enthalten. Im Maximum stammt das Pu-239 etwa zu gleichen Teilen aus LAW1A und LAW2. Während alle anderen Beiträge im Vergleich zum Referenzfall (vgl. Abb. 4.3) geringfügig abgenommen haben, ist hier vor allem der um 15 % zugenommene Beitrag aus LAW2 hervorzuheben.

In Tab. 4.16 sind für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ die ELB-spezifischen Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 und Ra-226 zusammengetragen. Mit Ausnahme der LAW2-Beiträge sind die Verschiebungen in den Anteilen im Vergleich zum Vergleichsfall bzw. Referenzfall relativ gering (vgl. Tab. 3.5, Tab. 4.2).

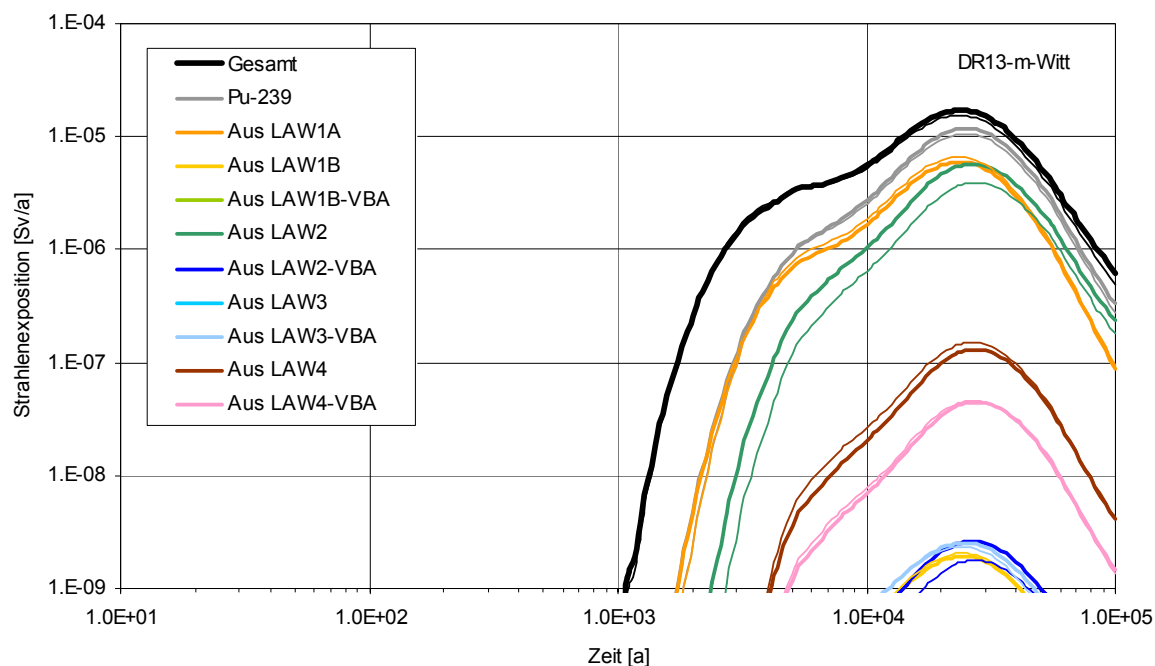


Abb. 4.34 ELB-Beiträge eingelagertes Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (GIAustritt vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.16 ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)

R10-L GIAustritt DR13 – m-Witt	Am-241 bei 3 300 a		Pu-239 bei 25 000 a		Ra-226 bei 4 200 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
Aus LAW1A	4,1·10⁻⁸	9 %	5,9·10⁻⁶	50 %	3,5·10⁻⁷	86 %
Aus LAW1B	5,1·10⁻⁸	11 %	1,9·10 ⁻⁹	-	5,2·10 ⁻⁹	1 %
Aus LAW1B-VBA	5,9·10 ⁻¹⁰	-	1,9·10 ⁻¹¹	-	-	-
Aus LAW2	2,9·10 ⁻⁸	6 %	5,7·10⁻⁶	48 %	1,1·10 ⁻⁸	3 %
Aus LAW2-VBA	2,5·10 ⁻¹¹	-	2,6·10 ⁻⁹	-	-	-
Aus LAW3	3,0·10 ⁻⁸	7 %	3,6·10 ⁻¹¹	-	2,8·10 ⁻⁸	7 %
Aus LAW3-VBA	2,8·10⁻⁷	62 %	2,5·10 ⁻⁹	-	-	-
Aus LAW4	1,6·10 ⁻⁸	3 %	1,3·10 ⁻⁷	1 %	1,3·10 ⁻⁸	3 %
Aus LAW4-VBA	2,7·10 ⁻⁹	1 %	4,4·10 ⁻⁸	-	-	-
Summe	4,5·10 ⁻⁷	100 %	1,2·10 ⁻⁵	100 %	4,1·10 ⁻⁷	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorbehalten.

4.6 Szenarien und Varianten der Unsicherheitsbetrachtung

In den Unsicherheitsbetrachtungen im Schlussbericht 2005 sind mit deterministischen Rechnungen die Auswirkungen einzelner Phänomene auf die für die Langzeitsicherheit wichtigen Prozesse untersucht worden. Die Auswertung der im Kapitel 11 jenes Berichtes beschriebenen Szenarien und Varianten ist weniger detailliert als die Szenarien und Varianten im Kapitel 10, wofür die Ergebnisse des Postprozessings in den vorhergehenden Unterkapiteln beschrieben sind. Deshalb werden auch hier die Ergebnisse des Postprozessings der Szenarien und Varianten im Kapitel 11 in geringerem Detail gezeigt.

In diesem Kapitel werden nacheinander die Postprocessing-Ergebnisse der Szenarien und Varianten zu den nachfolgenden Themen kurz zusammengefasst:

- Gasbildungsraten, Gasspeicherung und Gasabfluss
- Strömungswiderstände im Grubengebäude
- Schnittstelle zum Deckgebirge
- Konvergenz

Da die im Schlussbericht 2005 zum Thema Konvergenz betrachteten LOPOS-Varianten nur relativ geringe Abweichungen vom Konvergenzverhalten des Referenzfalls untersuchten, werden hier im Kapitel zur Konvergenz zudem einige ausgewählte Varianten aus [ALSA-C 2005b] mit deutlich höherer Konvergenz – vergleichbar mit der KAFKA-Variante mit höheren Vorfaktoren der Konvergenz im Schlussbericht 2005, Kap. 11.5.2 – neu ausgewertet.

4.6.1 Einfluss der Gasbildung und Gasspeicherung

Zum Thema „Gasbildung und Gasspeicherung“ sind im Schlussbericht 2005 zwei Varianten analysiert worden, für die sowohl KAFKA- als auch LOPOS-Rechnungen vorliegen:

- Größere Gasbildungsvolumina und –raten in den ELB sowie Berücksichtigung von Gasbildung außerhalb der ELB und
- größere Gasspeicherung in den ELB, im Nahbereich und im übrigen Grubengebäude.

4.6.1.1 Variante mit höherer Gasbildung

In Bezug auf die Tracerkonzentrationen im Lösungsaustritt wirkte sich die Variante mit erhöhter und schnellerer Gasbildung für LAW1A als leichte Herabsetzung, für LAW1B und LAW4 als leichte Beschleunigung bzw. für LAW2 und LAW3 als leichte Verzögerung des Anstiegs aus. Da bei den Modellrechnungen mit dem ‚Verdünnungsmodell‘ im Schlussbericht 2005 die potenzielle Strahlenexposition bis etwa 2 500 Jahre vorwiegend durch Am-241 – primär aus LAW3 und sekundär aus LAW1A und LAW1B – bedingt wird, zeigte sich der beschleunigte Tracer-Konzentrationsanstieg aus LAW1A bis etwa 300 Jahre als beschleunigter Anstieg der potenziellen Strahlenexposition auf niedrigem Niveau, und der verzögerte Konzentrationsanstieg für Tracer aus LAW3 als ein etwa 10 % geringeres Maximum. Dies wirkt sich auf die Strahlenexpositionsentwicklungen in den Exfiltrations-

gebieten (Abb. 4.35) als ebenfalls geringe Unterschiede aus. Die Strahlenexpositionsmaxima sind gegenüber dem Referenzfall¹⁵ leicht niedriger.

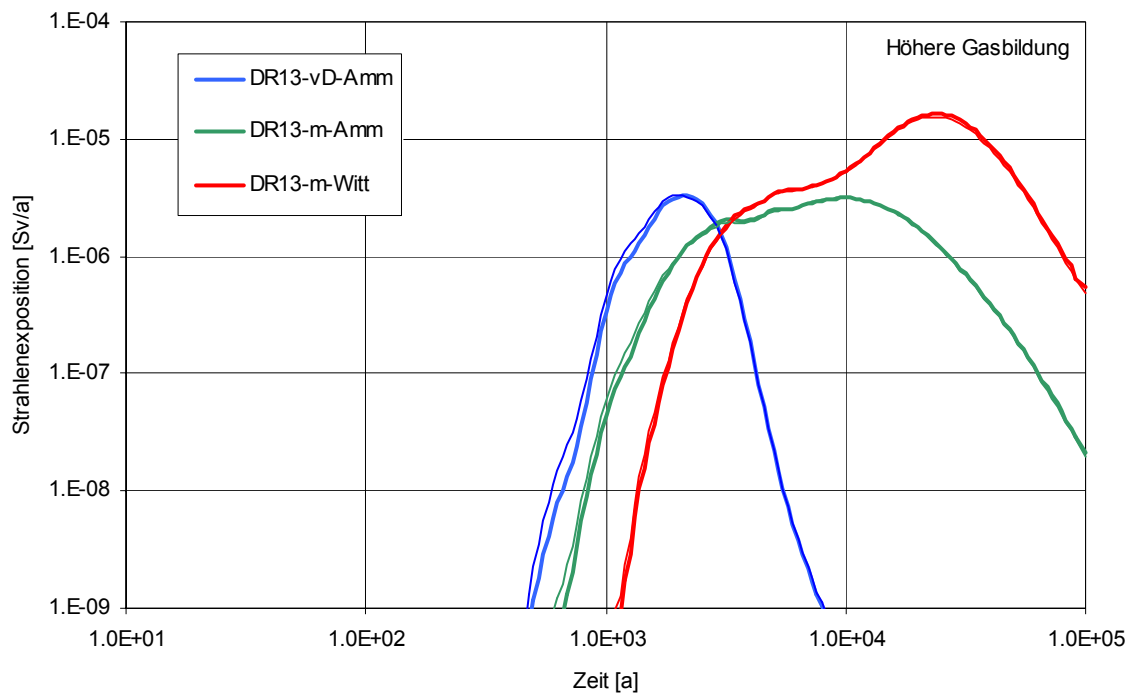


Abb. 4.35 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Höhere Gasbildung vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

¹⁵ Für die Vergleiche von potenziellen Strahlenexpositionen mit dem Referenzfall wird hier und im folgenden Kapitel der mittels Transferfunktionen neubewertete Referenzfall, gemäß Kap. 4.1, herangezogen.

Tab. 4.17 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit höherer Gasbildung)

Höhere Gasbildung Radionuklid	vD-Amm bei 2 200 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 24 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,3 \cdot 10^{-7}$	4 %	$2,9 \cdot 10^{-7}$	9 %	$4,5 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$1,0 \cdot 10^{-9}$	-	$1,8 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$4,1 \cdot 10^{-8}$	1 %	$7,8 \cdot 10^{-7}$	25 %	$2,2 \cdot 10^{-6}$	13 %
Am-241	$1,3 \cdot 10^{-6}$	40 %	$4,3 \cdot 10^{-10}$	-	$6,6 \cdot 10^{-18}$	-
Np-237	$5,3 \cdot 10^{-9}$	-	$7,1 \cdot 10^{-8}$	2 %	$6,8 \cdot 10^{-7}$	4 %
Ra-226	$7,8 \cdot 10^{-7}$	24 %	$1,2 \cdot 10^{-7}$	4 %	$1,5 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$8,8 \cdot 10^{-7}$	27 %	$1,3 \cdot 10^{-7}$	4 %	$1,7 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$6,7 \cdot 10^{-9}$	-	$7,9 \cdot 10^{-8}$	2 %	$2,9 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$4,2 \cdot 10^{-8}$	1 %	$1,4 \cdot 10^{-6}$	45 %	$1,1 \cdot 10^{-5}$	70 %
Pa-231	$7,7 \cdot 10^{-8}$	2 %	$2,1 \cdot 10^{-7}$	7 %	$9,5 \cdot 10^{-7}$	6 %
übrige RN	$1,6 \cdot 10^{-9}$	-	$1,5 \cdot 10^{-8}$	-	$1,6 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$3,3 \cdot 10^{-6}$	100 %	$3,2 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,6 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

4.6.1.2 Variante mit stärkerer Gasspeicherung

In Bezug auf die Tracerkonzentrationen im Lösungsaustritt wirkte sich die Variante mit stärkerer Gasspeicherung für LAW1A, LAW1B und LAW3 bis etwa 10 000 Jahre als leichte Erhöhung, für LAW2 zudem als leichte Beschleunigung des Anstiegs aus. Da mit dem ‚Verdünnungsmodell‘ im Schlussbericht 2005 die potenzielle Strahlenexposition bis etwa 2 500 Jahre vorwiegend durch Am-241 – primär aus LAW3 und sekundär aus LAW1A und LAW1B – bedingt wird, zeigte sich die Konzentrationserhöhung für Tracer aus diesen drei Einlagerungsbereichen als ein um etwa 30 % höheres Maximum. Bis etwa 2 000 Jahre waren auch die Konzentrationen der Plutoniumisotope im Austritt aus der Grube leicht beschleunigt bzw. höher. Dies wirkt sich auf die Strahlenexpositionsentwicklungen in den Exfiltrationsgebieten (Abb. 4.36) als ebenfalls geringfügige, jedoch über Zeit abklingende Erhöhung der Strahlenexposition aus. Die Maxima der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ und ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ sind gegenüber dem Referenzfall mit 25 % bzw. 5 % höher. Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ ist gegenüber dem Referenzfall unverändert.

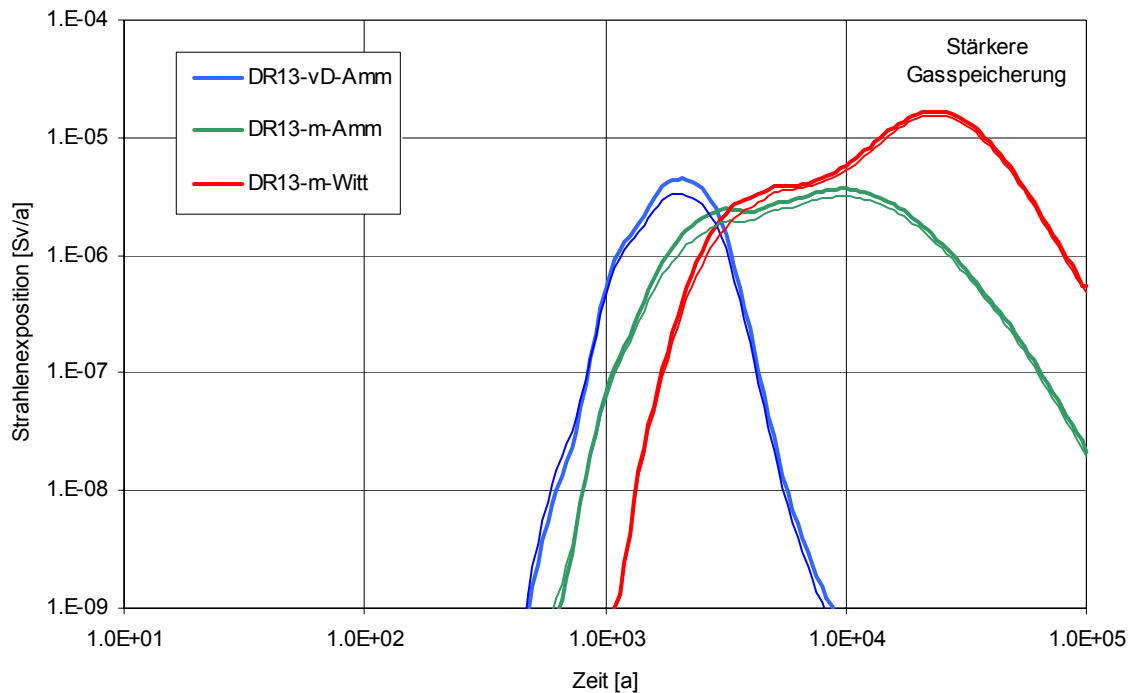


Abb. 4.36 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Stärkere Gasspeicherung vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.18 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit stärkerer Gasspeicherung)

Stärkere Gasspeicherung Radionuklid	vD-Amm bei 2 100 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 23 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,4 \cdot 10^{-7}$	3 %	$3,2 \cdot 10^{-7}$	9 %	$5,2 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$2,3 \cdot 10^{-9}$	-	$2,3 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,1 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$1,4 \cdot 10^{-7}$	3 %	$9,5 \cdot 10^{-7}$	26 %	$2,3 \cdot 10^{-6}$	14 %
Am-241	$2,5 \cdot 10^{-6}$	55 %	$4,4 \cdot 10^{-10}$	-	$3,4 \cdot 10^{-17}$	-
Np-237	$9,1 \cdot 10^{-9}$	-	$8,7 \cdot 10^{-8}$	2 %	$7,3 \cdot 10^{-7}$	4 %
Ra-226	$7,0 \cdot 10^{-7}$	16 %	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,6 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$7,8 \cdot 10^{-7}$	18 %	$1,2 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,8 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$1,6 \cdot 10^{-8}$	-	$9,5 \cdot 10^{-8}$	3 %	$3,2 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$1,4 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,7 \cdot 10^{-6}$	47 %	$1,1 \cdot 10^{-5}$	69 %
Pa-231	$6,4 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,1 \cdot 10^{-7}$	6 %	$9,3 \cdot 10^{-7}$	6 %
übrige RN	$2,1 \cdot 10^{-9}$	-	$1,8 \cdot 10^{-8}$	-	$1,6 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$4,5 \cdot 10^{-6}$	100 %	$3,7 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,7 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorbehalten.

4.6.2 Einfluss der Permeabilität bzw. Transmissivität

Zum Thema „Strömungswiderstände im Grubengebäude“ sind im Schlussbericht 2005 vier Varianten analysiert worden, für die sowohl KAFKA- als auch LOPOS-Rechnungen vorliegen:

- Erhöhte Permeabilität der Schweben und aufgelockerten Pfeiler im Nahbereich der ELB bei unverändertem Gaseindringdruck,
- geringere Permeabilität der Schweben und aufgelockerten Pfeiler im Nahbereich der ELB mit korrelierter Anpassung des Gaseindringdrucks,
- generell um den Faktor 3 erhöhte Permeabilität als Funktion der Versatzporosität im Grubengebäude, und
- generell um den Faktor 30 erhöhte Transmissivität der Auflockerungszone am Südstoß des Baufeldes in der Südflanke.

4.6.2.1 Variante mit höheren Schwebenpermeabilitäten im Nahbereich

Durch die höheren Permeabilitäten der Schweben und der aufgelockerten Pfeiler wurden die Maxima der Tracerflüsse aus LAW1A, LAW1B und LAW3 in das Deckgebirge geringfügig früher erreicht. Die Tracer aus LAW2 und LAW4 wurden dagegen geringfügig verzögert.

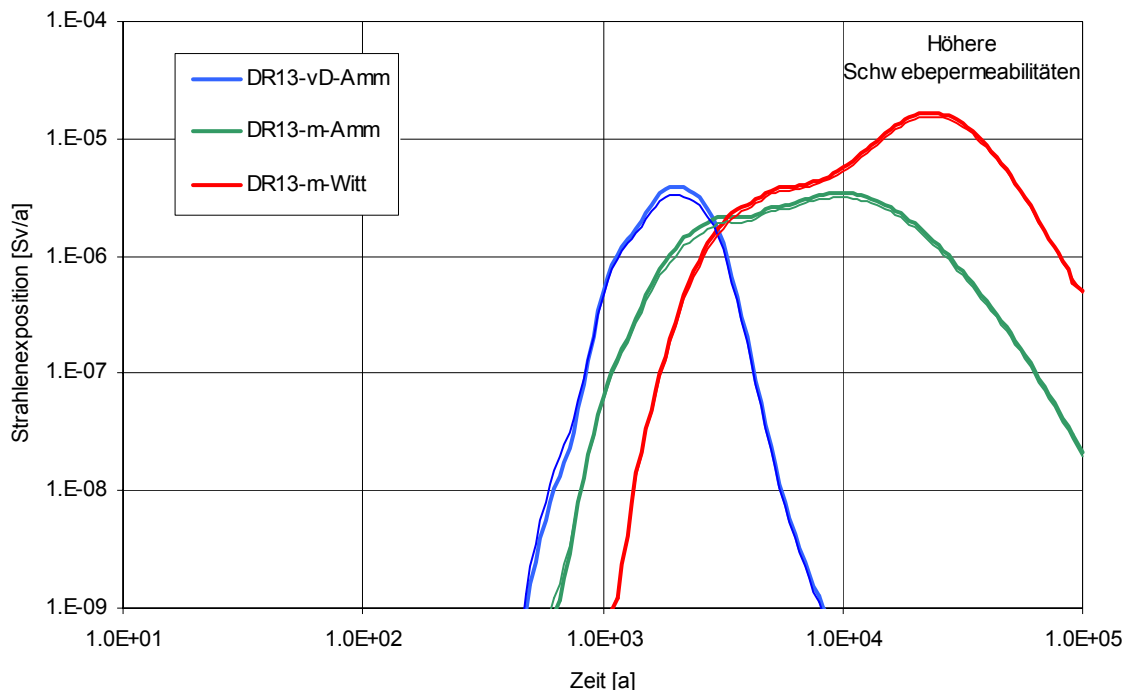


Abb. 4.37 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (höhere Schwebenpermeabilitäten vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Da mit dem ‚Verdünnungsmodell‘ im Schlussbericht 2005 die potenzielle Strahlenexposition bis etwa 2 500 Jahre vorwiegend durch Am-241 – primär aus LAW3 und sekundär aus LAW1A und LAW1B – bedingt wird, zeigten sich die früheren Maxima der Tracerflüsse aus diesen Einlagerungsbereichen als ein um etwa 15 % höheres Maximum. GleichermäÙig wirkt sich dies auf die Strahlenexpositionsentwicklungen in den Exfiltrationsgebieten (Abb. 4.37) als geringfügige, jedoch über die Zeit abklingende Erhöhung der Strahlenexposition aus. Die Maxima der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ und ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ sind gegenüber dem Referenzfall 20 % bzw. 10 % höher. Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ ist gegenüber dem Referenzfall unverändert.

Tab. 4.19 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit erhöhten Permeabilitäten der Schweben und der aufgelockerten Pfeiler im Nahbereich)

erhöhte Schwebep- Permeabilitäten Radionuklid	vD-Amm bei 2 100 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 23 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,2 \cdot 10^{-7}$	3 %	$3,0 \cdot 10^{-7}$	9 %	$5,0 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$1,9 \cdot 10^{-9}$	-	$2,0 \cdot 10^{-8}$	1 %	$1,7 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$1,0 \cdot 10^{-7}$	3 %	$9,1 \cdot 10^{-7}$	26 %	$2,4 \cdot 10^{-6}$	14 %
Am-241	$2,2 \cdot 10^{-6}$	57 %	$4,3 \cdot 10^{-10}$	-	$3,3 \cdot 10^{-17}$	-
Np-237	$8,1 \cdot 10^{-9}$	-	$8,3 \cdot 10^{-8}$	2 %	$7,1 \cdot 10^{-7}$	4 %
Ra-226	$6,0 \cdot 10^{-7}$	15 %	$1,0 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,6 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$6,7 \cdot 10^{-7}$	17 %	$1,2 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,8 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$1,3 \cdot 10^{-8}$	-	$8,0 \cdot 10^{-8}$	3 %	$2,3 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-239	$1,0 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,7 \cdot 10^{-6}$	48 %	$1,2 \cdot 10^{-5}$	69 %
Pa-231	$5,5 \cdot 10^{-8}$	1 %	$1,9 \cdot 10^{-7}$	5 %	$9,1 \cdot 10^{-7}$	5 %
übrige RN	$1,8 \cdot 10^{-9}$	-	$1,7 \cdot 10^{-8}$	-	$1,5 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$3,9 \cdot 10^{-6}$	100 %	$3,5 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,7 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorbehalten.

4.6.2.2 Variante mit geringeren Schwebenpermeabilitäten im Nahbereich

Durch die geringeren Permeabilitäten der Schweben und der aufgelockerten Pfeiler wurden die Maxima der Tracerflüsse aus LAW1A, LAW1B und LAW3 in das Deckgebirge etwas früher erreicht. Die Maxima für LAW1A und LAW1B sind im Vergleich zum Referenzfall leicht – 3 bzw. 10 % – niedriger, jenes für LAW3 um etwa 5 % höher. Die Maxima der Tracerflüsse aus LAW2 und LAW4 wurden dagegen mäßig verzögert erreicht, und sind gegenüber dem Referenzfall auch etwas – 5 bzw. 20 % – niedriger.

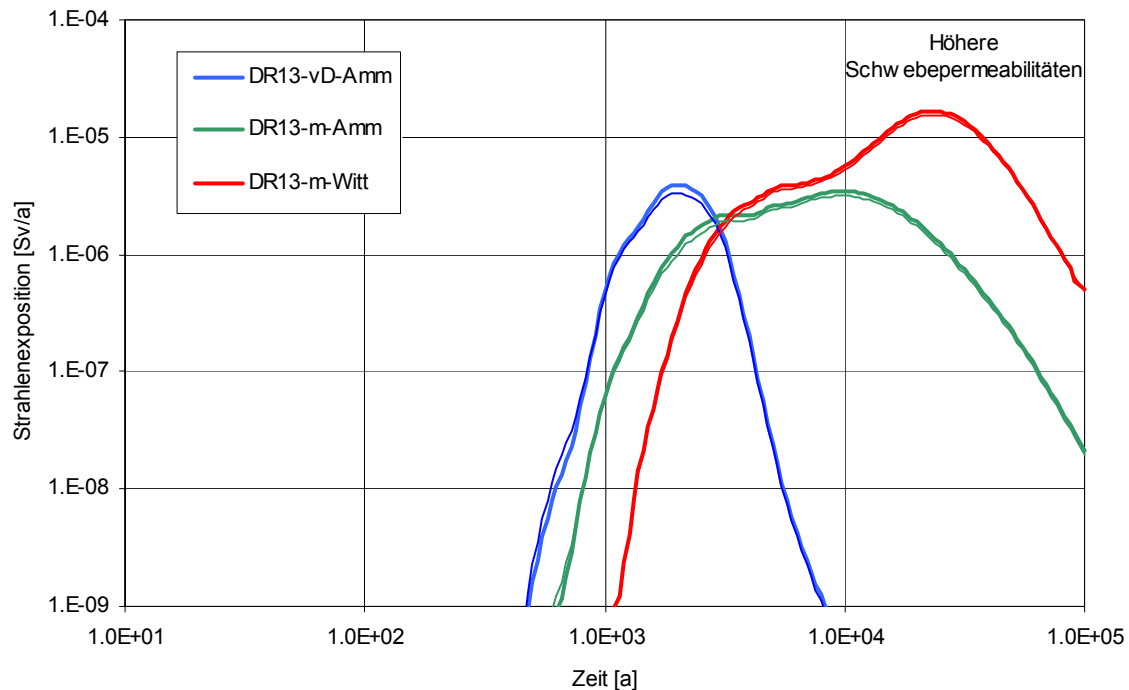


Abb. 4.38 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (höhere Schwebeporositäten vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Da mit dem ‚Verdünnungsmodell‘ im Schlussbericht 2005 die potenzielle Strahlenexposition bis etwa 2 500 Jahre vorwiegend durch Am-241 – primär aus LAW3 und sekundär aus LAW1A und LAW1B – bedingt wird, zeigte sich die frühere Freisetzung von Tracern aus diesen Einlagerungsbereichen als ein um etwa 2 % höheres Maximum. Dies wirkt sich jedoch nicht relevant auf die Strahlenexpositionsentwicklungen in den Exfiltrationsgebieten (Abb. 4.38) aus. Die Maxima der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ und ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ sind gegenüber dem Referenzfall unverändert. Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ ist gegenüber dem Referenzfall 5 % niedriger. Dies ist voraussichtlich den zwischen 2 000 und 10 000 Jahren niedrigeren Konzentrationen der Plutoniumisotope im Lösungsaustritt an der Modellaustrittsstelle in 574 m Tiefe zuzuordnen (vgl. Schlussbericht 2005, Abb. 11.44).

Tab. 4.20 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit geringeren Permeabilitäten der Schweben und der aufgelockerten Pfeiler im Nahbereich)

geringere Schweben- Permeabilitäten Radionuklid	vD-Amm bei 2 100 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 24 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$2,8 \cdot 10^{-7}$	9 %	$4,4 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$1,4 \cdot 10^{-9}$	-	$2,0 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$1,0 \cdot 10^{-7}$	3 %	$8,6 \cdot 10^{-7}$	26 %	$2,1 \cdot 10^{-6}$	13 %
Am-241	$1,8 \cdot 10^{-6}$	51 %	$4,2 \cdot 10^{-10}$	-	$6,4 \cdot 10^{-18}$	-
Np-237	$6,3 \cdot 10^{-9}$	-	$7,9 \cdot 10^{-8}$	2 %	$7,1 \cdot 10^{-7}$	5 %
Ra-226	$6,3 \cdot 10^{-7}$	18 %	$1,0 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,5 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$7,1 \cdot 10^{-7}$	20 %	$1,2 \cdot 10^{-7}$	4 %	$1,7 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$1,0 \cdot 10^{-8}$	-	$8,9 \cdot 10^{-8}$	3 %	$2,9 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$1,0 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,6 \cdot 10^{-6}$	47 %	$1,1 \cdot 10^{-5}$	70 %
Pa-231	$5,8 \cdot 10^{-8}$	2 %	$1,9 \cdot 10^{-7}$	6 %	$9,1 \cdot 10^{-7}$	6 %
übrige RN	$1,6 \cdot 10^{-9}$	-	$1,6 \cdot 10^{-8}$	-	$1,6 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$3,5 \cdot 10^{-6}$	100 %	$3,3 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,6 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorheben.

4.6.2.3 Variante mit erhöhter Versatzpermeabilität

Eine gegenüber dem Referenzfall – sowie auch dem Vergleichsfall RX.1 – um den Faktor 3 erhöhte Versatzpermeabilität bei gleicher Porosität bewirkt zu späteren Zeiten – ab 3 000 Jahre – einen geringeren Lösungsaustausch in den LAW-Einlagerungsbereichen. Weiterhin nimmt die Strömung im östlichen Teil des Baufeldes in der Südflanke leicht ab, im westlichen Teil leicht zu. Auf die Radionuklidfreisetzung ins Deckgebirge wirkt sich dies nur an der Modell-Austrittsstelle in 574 m Teufe als leicht niedrigere Radionuklidkonzentrationen aus (vgl. Schlussbericht 2005, Abb. 11.58). Dort sind die Konzentrationen im Lösungsaustritt der die Strahlenexposition dominierenden Plutoniumisotope zwischen 3 000 und 10 000 Jahren sowie ab 20 000 Jahren leicht geringer. Insgesamt zeigt sich dies nur sehr beschränkt in der mit dem ‚Verdünnungsmodell‘ im Schlussbericht 2005 gerechneten potenziellen Strahlenexposition: Das durch Am-241 dominierte Maximum war etwa 5 % geringer, das anschließende, plutoniumbedingte Plateau war ab etwa 20 000 Jahre geringfügig niedriger.

Diese geringen Unterschiede wirken sich nicht relevant auf die Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete (Abb. 4.39) aus. Die Maxima der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ und ‚Muschelkalk – Wittmar‘ sind gegenüber dem Referenzfall etwa 3 % niedriger, das Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ ist unverändert.

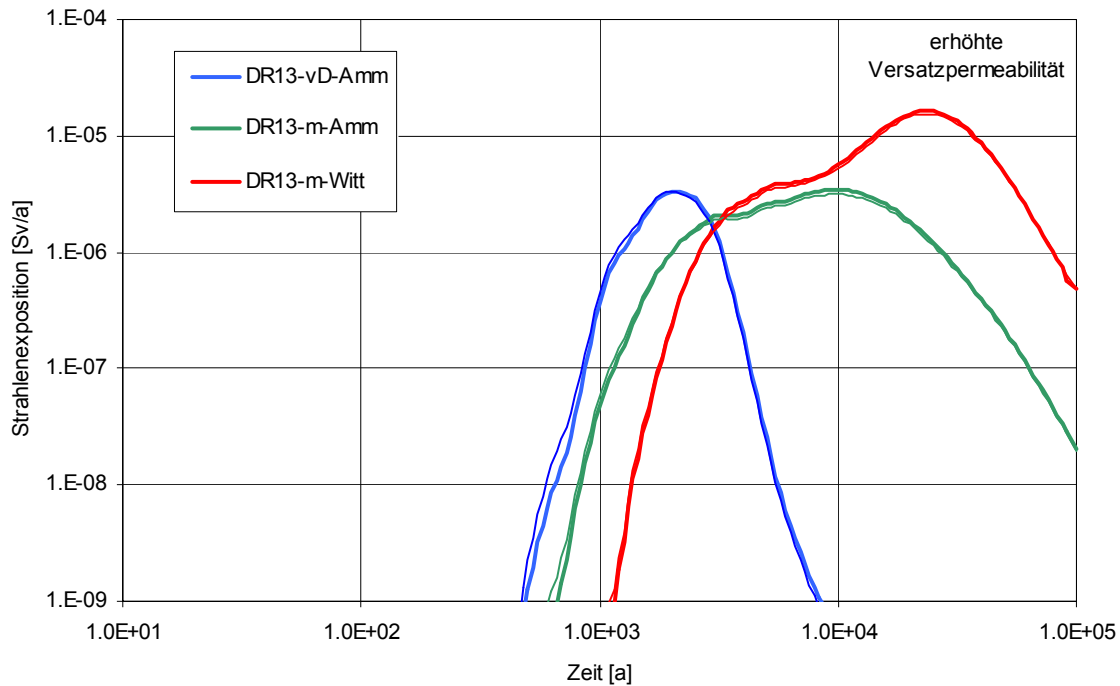


Abb. 4.39 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (erhöhte Versatzpermeabilität vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.21 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit erhöhter Versatzpermeabilität)

erhöhte Versatzpermeabilität Radionuklid	vD-Amm bei 2 100 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 23 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$2,8 \cdot 10^{-7}$	8 %	$4,8 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$1,3 \cdot 10^{-9}$	-	$1,8 \cdot 10^{-8}$	1 %	$1,9 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$1,2 \cdot 10^{-7}$	4 %	$9,2 \cdot 10^{-7}$	26 %	$2,3 \cdot 10^{-6}$	14 %
Am-241	$1,5 \cdot 10^{-6}$	46 %	$4,1 \cdot 10^{-10}$	-	$3,3 \cdot 10^{-17}$	-
Np-237	$5,5 \cdot 10^{-9}$	-	$7,1 \cdot 10^{-8}$	2 %	$6,7 \cdot 10^{-7}$	4 %
Ra-226	$6,6 \cdot 10^{-7}$	20 %	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,5 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$7,4 \cdot 10^{-7}$	22 %	$1,2 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,7 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$8,6 \cdot 10^{-9}$	-	$8,0 \cdot 10^{-8}$	2 %	$2,9 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$1,2 \cdot 10^{-7}$	4 %	$1,7 \cdot 10^{-6}$	48 %	$1,1 \cdot 10^{-5}$	69 %
Pa-231	$6,2 \cdot 10^{-8}$	2 %	$2,0 \cdot 10^{-7}$	6 %	$8,9 \cdot 10^{-7}$	5 %
übrige RN	$1,7 \cdot 10^{-9}$	-	$1,6 \cdot 10^{-8}$	-	$1,5 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$3,4 \cdot 10^{-6}$	100 %	$3,5 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,6 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorheben.

4.6.2.4 Variante mit erhöhter Transmissivität in der Auflockerungszone am Südstoß des Baufeldes in der Südflanke

Eine gegenüber dem Referenzfall – sowie auch dem Vergleichsfall RX.1 – um den Faktor 30 erhöhte Transmissivität der Auflockerungszone am Südstoß des Baufeldes in der Südflanke wirkt sich als ein beschleunigter Ausgleich der Strömungswiderstände der beiden Stränge des Baufeldes in der Südflanke aus. Infolgedessen beschleunigen sich der Lösungsstrom und der Radionuklidtransport im Weststrang, vor allem zwischen 1 000 und 10 000 Jahren. Dies führt in dieser Periode zu höheren Radionuklidkonzentrationen im Lösungsaustritt an der Modell-Austrittsstelle in 574 m Teufe, während die Konzentrationen im Austritt an der Modell-Austrittsstelle in 500 m Teufe nur leicht niedriger sind. Insgesamt zeigt sich dies nur sehr beschränkt in der mit dem ‚Verdünnungsmodell‘ im Schlussbericht 2005 gerechneten potenziellen Strahlenexposition: Das durch Am-241 dominierte Maximum war 5 % geringer, das anschließende, plutoniumbedingte Plateau war vernachlässigbar niedriger.

Wie zu erwarten war, wirken sich diese geringen Unterschiede nicht relevant auf die Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete (Abb. 4.40) aus. Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ ist gegenüber dem Referenzfall etwa 5 % niedriger. Die Maxima der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete ‚Muschelkalk – Wittmar‘ und ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ sind gegenüber dem Referenzfall unverändert.

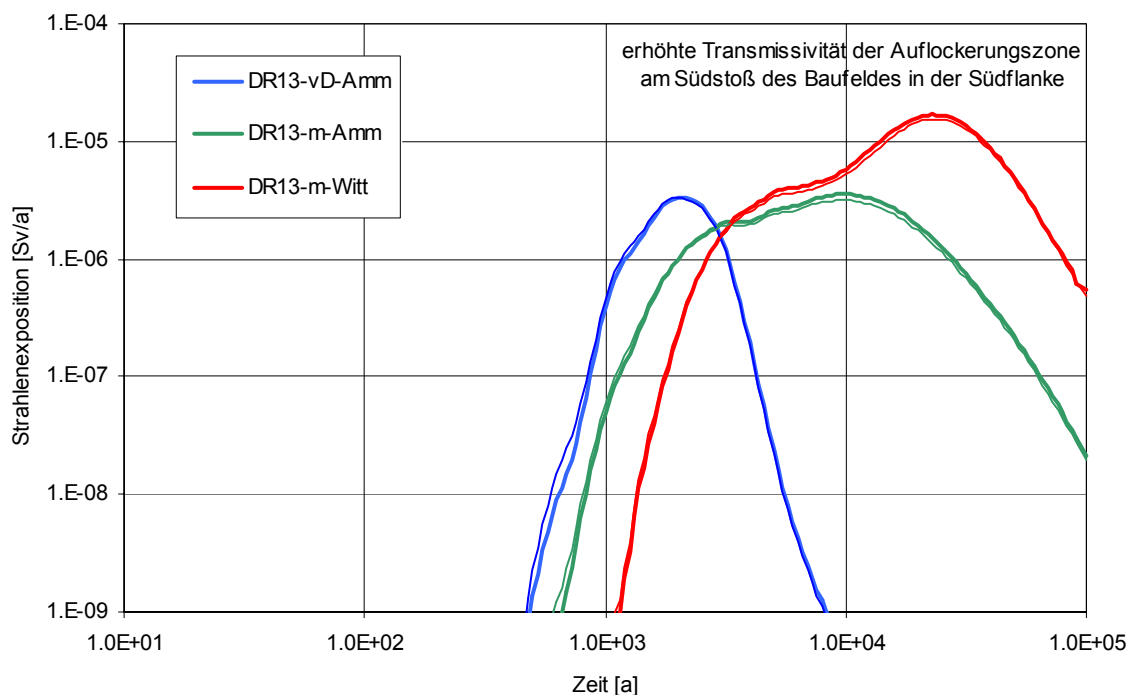


Abb. 4.40 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (erhöhte Transmissivität der Auflockerungszone am Südstoß des Baufeldes in der Südflanke vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.22 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit erhöhter Transmissivität der Auflockerungszone am Südstoß des Baufeldes in der Südflanke)

erhöhte Transmissivität der Auflockerungszone Radionuklid	vD-Amm bei 2 100 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 23 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,2 \cdot 10^{-7}$	3 %	$3,0 \cdot 10^{-7}$	8 %	$5,0 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$1,5 \cdot 10^{-9}$	-	$2,0 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$9,9 \cdot 10^{-8}$	3 %	$9,4 \cdot 10^{-7}$	26 %	$2,4 \cdot 10^{-6}$	14 %
Am-241	$1,7 \cdot 10^{-6}$	51 %	$4,3 \cdot 10^{-10}$	-	$3,4 \cdot 10^{-17}$	-
Np-237	$6,1 \cdot 10^{-9}$	-	$7,5 \cdot 10^{-8}$	2 %	$6,9 \cdot 10^{-7}$	4 %
Ra-226	$5,8 \cdot 10^{-7}$	17 %	$1,0 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,6 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$6,5 \cdot 10^{-7}$	20 %	$1,2 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,8 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$1,0 \cdot 10^{-8}$	-	$8,5 \cdot 10^{-8}$	2 %	$3,1 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$1,0 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,7 \cdot 10^{-6}$	48 %	$1,2 \cdot 10^{-5}$	69 %
Pa-231	$5,4 \cdot 10^{-8}$	2 %	$1,9 \cdot 10^{-7}$	5 %	$9,2 \cdot 10^{-7}$	5 %
übrige RN	$1,6 \cdot 10^{-9}$	-	$1,7 \cdot 10^{-8}$	-	$1,6 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$3,3 \cdot 10^{-6}$	100 %	$3,6 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,7 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorbehalten.

4.6.3 Einfluss der Austrittsfläche ins Deckgebirge

Eine gegenüber dem Referenzfall – sowie auch dem Vergleichsfall RX.1 – vergrößerte Austrittsfläche ins Deckgebirge (Szenariengruppe vZdSB), abgebildet über eine Verschiebung der oberen Modell-Austrittsstelle von 500 m nach 479 m Teufe, wirkt sich wegen dem nun fehlenden Aufbau des großen Gaspolsters im Grubenhöchsten als Verzögerung der Lösungs- und Radionuklidfreisetzung in das Deckgebirge aus. Darüber hinaus sind die Radionuklidkonzentrationen an der Modell-Austrittsstelle in 479 m Teufe bis etwa 3 000 Jahre deutlich geringer als jene an der Modell-Austrittsstelle in 500 m Teufe für den Referenzfall. Dies zeigte sich auch deutlich in der mit dem ‚Verdünnungsmodell‘ im Schlussbericht 2005 gerechneten potenziellen Strahlenexposition: Das durch Am-241 dominierte Maximum war 25 % geringer, das anschließende, plutoniumbedingte Plateau war ab 10 000 Jahre geringfügig niedriger.

Diese Unterschiede wirken sich als eine mit der Zeit abklingende Verringerung auf die Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete (Abb. 4.41) aus. Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ ist gegenüber dem Referenzfall etwa 30 % niedriger. Die Maxima der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ und ‚Muschelkalk – Wittmar‘ sind gegenüber dem Referenzfall etwa 10 % niedriger.

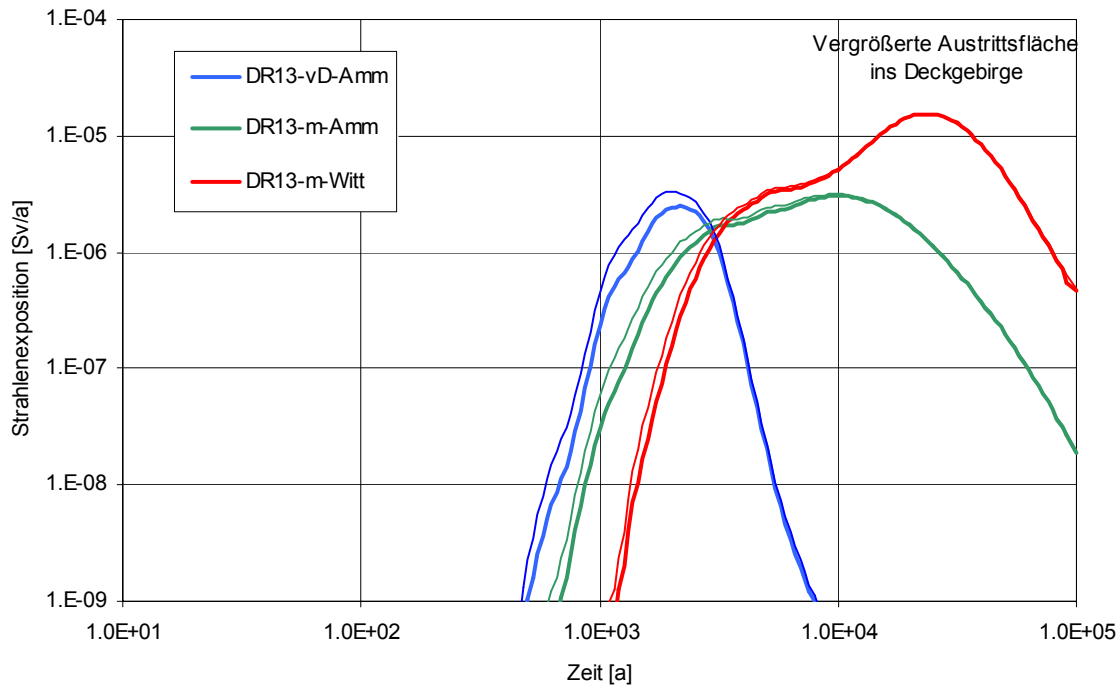


Abb. 4.41 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (vergrößerte Austrittsfläche ins Deckgebirge vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.23 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit vergrößerter Austrittsfläche ins Deckgebirge)

vergrößerte Austrittsfläche Radionuklid	vD-Amm bei 2 200 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 24 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$9,4 \cdot 10^{-8}$	4 %	$2,6 \cdot 10^{-7}$	8 %	$4,2 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$1,1 \cdot 10^{-9}$	-	$1,6 \cdot 10^{-8}$	1 %	$1,7 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$8,2 \cdot 10^{-8}$	3 %	$8,1 \cdot 10^{-7}$	26 %	$2,1 \cdot 10^{-6}$	13 %
Am-241	$1,2 \cdot 10^{-6}$	46 %	$3,5 \cdot 10^{-10}$	-	$5,7 \cdot 10^{-18}$	-
Np-237	$4,8 \cdot 10^{-9}$	-	$6,1 \cdot 10^{-8}$	2 %	$6,1 \cdot 10^{-7}$	4 %
Ra-226	$4,8 \cdot 10^{-7}$	19 %	$9,5 \cdot 10^{-8}$	3 %	$1,4 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$5,4 \cdot 10^{-7}$	22 %	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,6 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$7,7 \cdot 10^{-9}$	-	$6,6 \cdot 10^{-8}$	2 %	$2,3 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$8,3 \cdot 10^{-8}$	3 %	$1,5 \cdot 10^{-6}$	48 %	$1,1 \cdot 10^{-5}$	71 %
Pa-231	$4,7 \cdot 10^{-8}$	2 %	$1,8 \cdot 10^{-7}$	6 %	$9,0 \cdot 10^{-7}$	6 %
übrige RN	$1,3 \cdot 10^{-9}$	-	$1,4 \cdot 10^{-8}$	-	$1,5 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$2,5 \cdot 10^{-6}$	100 %	$3,1 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,6 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorbehalten.

4.6.4 Einfluss der Konvergenz

Zum Thema „Konvergenz“ sind im Schlussbericht 2005 zwei Varianten analysiert worden, für die auch LOPOS-Rechnungen vorliegen:

- Örtlich ungleichmäßige Konvergenz des Baufeldes in der Südflanke und
- niedrigere Konvergenzrate wegen geringerer Ausdehnung der Feuchtezone im Salinar.

Diese beiden Varianten zeigten nur relativ geringe Abweichungen vom Referenzverhalten der Konvergenz. In [ALSA-C 2005b] ist die Auswirkung der Unsicherheit in den physikalisch bedingten Parametern des LOPOS-Konvergenzmodells untersucht worden. Als Ergänzung werden hier daher zusätzlich einige Varianten aus jenem Bericht mit deutlich erhöhter Konvergenz analysiert:

- Höhere Konvergenzrate wegen geringerem Strömungswiderstand im Deckgebirge,
- höhere Konvergenzrate wegen höherem effektiven Gesteinsdruck und
- höhere Konvergenzrate wegen maximaler Ausdehnung der Feuchtezone im Salinar.

4.6.4.1 Variante mit asymmetrischer Konvergenz des Baufeldes in der Südflanke

Da im östlichen und westlichen Teils des Baufeldes in der Südflanke unterschiedliche Konvergenzraten gemessen wurden, wurde eine Variante mit im Durchschnitt in den östlichen Segmenten im Jüngerem Steinsalz um 10 % höheren bzw. in den westlichen Segmenten um 10 % geringeren Konvergenzraten gerechnet. Dies wirkte sich auch auf den Radionuklidtransport aus den ELB in das Baufeld in der Südflanke aus: Jener aus LAW2 war geringfügig höher, jener aus LAW3 geringfügig niedriger. Insgesamt führte dies zu einem bis etwa 700 Jahre leicht beschleunigten Radionuklidtransport in beiden Strängen des Baufeldes. Im Lösungsaustritt zeigte sich dies als bis etwa 700 Jahre leicht beschleunigter Austritt von Am-241, und eine höhere Konzentration von Plutoniumisotopen ab 1 000 Jahre im Lösungsaustritt in 574 m Teufe sowie auch ab etwa 10 000 Jahre im Lösungsaustritt in 500 m Teufe. Dies zeigte sich auch in der mit dem ‚Verdünnungsmodell‘ im Schlussbericht 2005 gerechneten potenziellen Strahlenexposition: Das durch Am-241 dominierte Maximum war vernachlässigbar höher, das anschließende, plutoniumbedingte Plateau war ab 10 000 Jahre geringfügig höher.

Diese geringen Unterschiede wirken sich als ebenfalls geringe Erhöhungen auf die Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete (Abb. 4.42) aus. Die Maxima der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘, ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ und ‚Muschelkalk – Wittmar‘ sind gegenüber dem Referenzfall etwa 5 % höher.

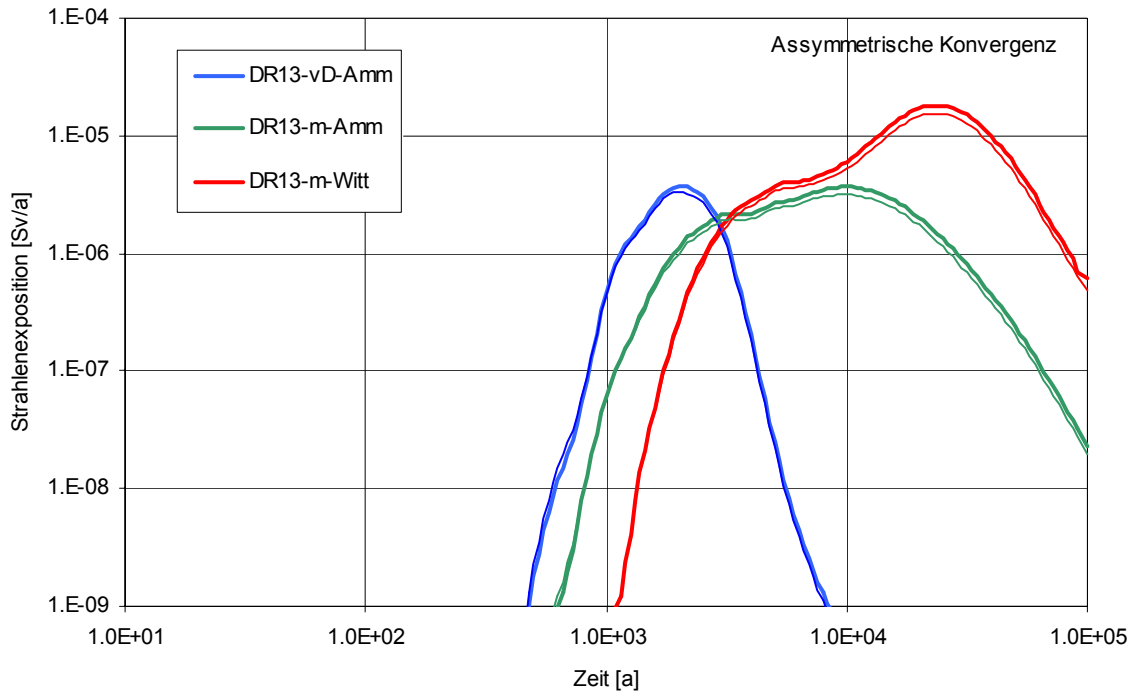


Abb. 4.42 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (asymmetrische Konvergenz des Baufeldes in der Südflanke vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.24 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit asymmetrischer Konvergenz des Baufeldes in der Südflanke)

asymmetrische Konvergenz Radionuklid	vD-Amm bei 2 100 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 24 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,2 \cdot 10^{-7}$	3 %	$3,1 \cdot 10^{-7}$	8 %	$4,7 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$1,7 \cdot 10^{-9}$	-	$2,1 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,1 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$9,7 \cdot 10^{-7}$	26 %	$2,4 \cdot 10^{-6}$	13 %
Am-241	$1,9 \cdot 10^{-6}$	52 %	$4,3 \cdot 10^{-10}$	-	$6,6 \cdot 10^{-18}$	-
Np-237	$6,9 \cdot 10^{-9}$	-	$7,8 \cdot 10^{-8}$	2 %	$7,2 \cdot 10^{-7}$	4 %
Ra-226	$6,4 \cdot 10^{-7}$	17 %	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,7 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$7,2 \cdot 10^{-7}$	19 %	$1,2 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,9 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$1,2 \cdot 10^{-8}$	-	$9,0 \cdot 10^{-8}$	2 %	$3,0 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,8 \cdot 10^{-6}$	48 %	$1,3 \cdot 10^{-5}$	71 %
Pa-231	$5,9 \cdot 10^{-8}$	2 %	$2,0 \cdot 10^{-7}$	5 %	$1,0 \cdot 10^{-6}$	5 %
übrige RN	$1,8 \cdot 10^{-9}$	-	$1,7 \cdot 10^{-8}$	-	$1,7 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$3,7 \cdot 10^{-6}$	100 %	$3,7 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,8 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

4.6.4.2 Variante mit geringer ausgedehnter Feuchtezone im Salinar

Die Einlagerungsbereiche in der LOPOS-Variante, in der die Konvergenzparameter in Annäherung an die gebirgsmechanischen Rechnungen mit minimaler Ausdehnung der Feuchtezone angenommen wurden, zeigten bis etwa 3 000 Jahre unveränderte Konvergenzraten. Die geringeren Konvergenzraten im Baufeld in der Südflanke führten zu einem verzögerten Radionuklidtransport im Baufeld sowie auch zu geringeren Lösungsaustrittsströmen. Dies wirkte sich als verzögerte und niedrigere Radionuklidkonzentrationen im Lösungsaustritt in das Deckgebirge aus (vgl. Schlussbericht 2005, Abb. 11.89, 11.90). In der mit dem ‚Verdünnungsmodell‘ im Schlussbericht 2005 gerechneten potenziellen Strahlenexposition zeigte sich dies als eine Verzögerung und etwa 20 % Verringerung des durch Am-241 bedingten Maximums, sowie ein ab etwa 5 000 Jahre etwa 25 % niedrigeres Niveau des anschließenden, durch Plutoniumisotope bedingten Plateaus. Dieser Unterschied stammt aus den gegenüber dem Referenzfall um etwa 35 % geringeren Konzentrationen der Plutoniumisotope im Lösungsaustritt in 574 m Teufe.

Diese Unterschiede wirken sich als eine mit der Zeit abklingende Verringerung der Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete (Abb. 4.43) aus. Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ ist gegenüber dem Referenzfall etwa 30 % niedriger, die beiden Maxima für die Exfiltrationsgebiete ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ und ‚Muschelkalk – Wittmar‘ sind etwa 15 % niedriger.

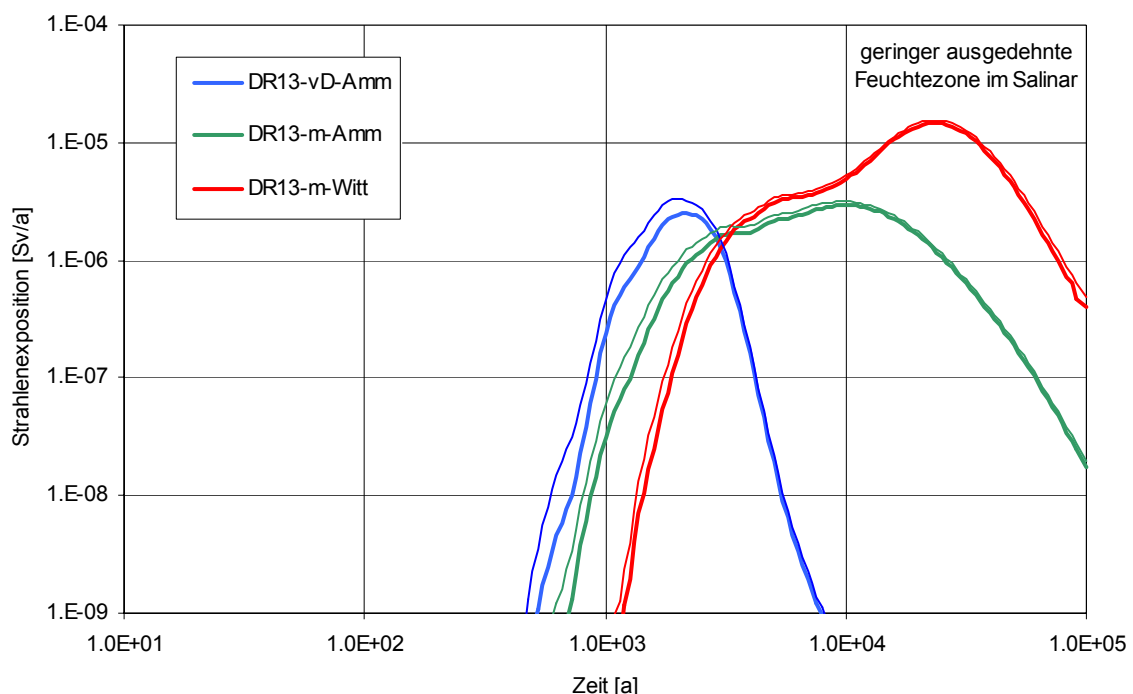


Abb. 4.43 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (geringer ausgedehnte Feuchtezone im Salinar vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.25 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit geringer ausgedehnter Feuchtezone im Salinar)

geringer ausgedehnte Feuchtezone Radionuklid	vD-Amm bei 2 200 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 23 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$9,1 \cdot 10^{-8}$	4 %	$2,5 \cdot 10^{-7}$	9 %	$4,4 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$1,2 \cdot 10^{-9}$	-	$1,6 \cdot 10^{-8}$	1 %	$1,6 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$8,0 \cdot 10^{-8}$	3 %	$7,7 \cdot 10^{-7}$	26 %	$2,1 \cdot 10^{-6}$	14 %
Am-241	$1,2 \cdot 10^{-6}$	47 %	$3,4 \cdot 10^{-10}$	-	$2,6 \cdot 10^{-17}$	-
Np-237	$5,0 \cdot 10^{-9}$	-	$6,1 \cdot 10^{-8}$	2 %	$5,8 \cdot 10^{-7}$	4 %
Ra-226	$4,8 \cdot 10^{-7}$	19 %	$9,2 \cdot 10^{-8}$	3 %	$1,3 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$5,4 \cdot 10^{-7}$	21 %	$1,0 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,4 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$8,3 \cdot 10^{-9}$	-	$6,8 \cdot 10^{-8}$	2 %	$2,5 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$8,1 \cdot 10^{-8}$	3 %	$1,4 \cdot 10^{-6}$	48 %	$1,0 \cdot 10^{-5}$	69 %
Pa-231	$4,7 \cdot 10^{-8}$	2 %	$1,7 \cdot 10^{-7}$	6 %	$8,1 \cdot 10^{-7}$	6 %
übrige RN	$1,3 \cdot 10^{-9}$	-	$1,4 \cdot 10^{-8}$	-	$1,4 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$2,5 \cdot 10^{-6}$	100 %	$3,0 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,5 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorbehalten.

4.6.4.3 Variante mit geringerem Strömungswiderstand im Deckgebirge

In [ALSA-C 2005b], Kap. 5.1 wurde die Variante kdg-1gr mit dreimal niedrigerem Strömungswiderstand im Deckgebirge analysiert. Diese Variante lieferte im Spektrum der innerhalb des Faktors 3 geänderten Strömungswiderstände der Modell-Austrittsstellen sowohl den größten Gesamtlösungsaustritt als auch das höchste Maximum der mit dem ‚Verdünnungsmodell‘ vom Schlussbericht 2005 gerechneten potenziellen Strahlenexposition. Die Konvergenzerhöhung nimmt zu mit abnehmender Teufe. Auf der 750-m-Sohle ist die Konvergenzerhöhung so gering, dass der Nuklidtransport aus den Einlagerungsbereichen unverändert vorwiegend durch Gasspeicherung angetrieben bleibt. Die erhöhte Konvergenz wirkt sich vor allem als Transportbeschleunigung im Baufeld in der Südflanke aus. Wegen dem gegenüber dem Referenzfall geringeren verdünnungswirksamen Volumen im Baufeld sind die Radionuklidkonzentrationen sowohl im Baufeld als auch im Lösungsaustritt in das Deckgebirge höher. Die Unterschiede verschwinden bei etwa 2 000 (Lösungsaustritt) bzw. 4 000 Jahren (Strahlenexposition).

Diese Unterschiede wirken sich als eine mit der Zeit abklingende Erhöhung der Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete (Abb. 4.44) aus. Das Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚verstütztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ ist gegenüber dem Referenzfall etwa 2,5-mal höher, das für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ ist etwa 25 % höher, während das Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ unverändert ist.

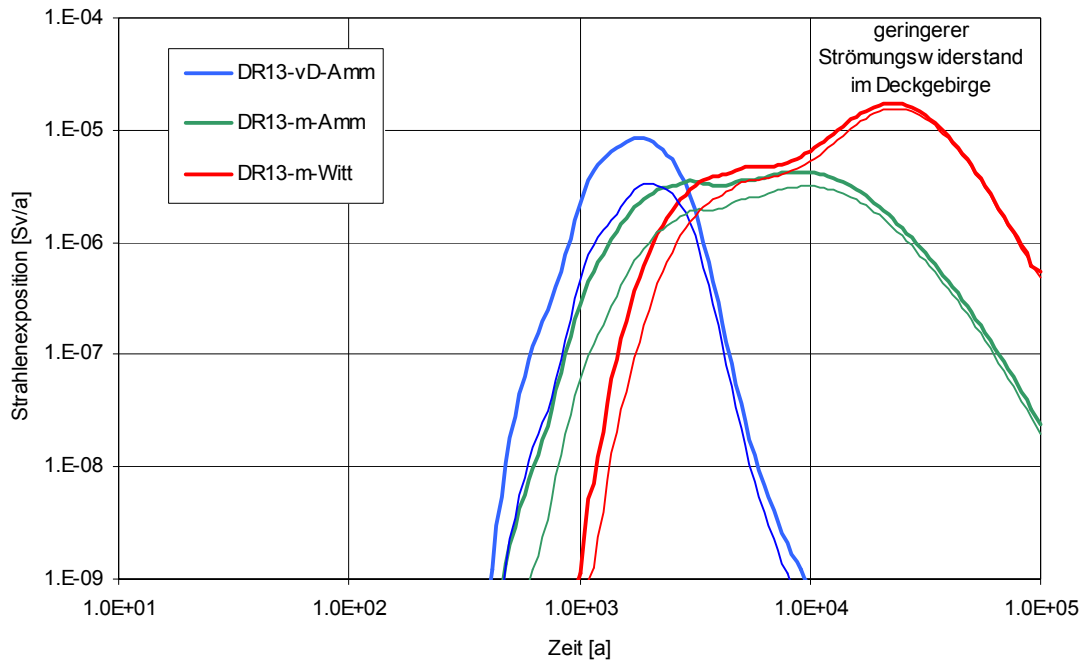


Abb. 4.44 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (geringerer Strömungswiderstand im Deckgebirge vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.26 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit geringerem Strömungswiderstand im Deckgebirge)

geringerer Strömungswiderstand im Deckgebirge Radionuklid	vD-Amm bei 1 800 a		m-Amm bei 9 100 a		m-Witt bei 23 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$2,0 \cdot 10^{-7}$	2 %	$4,2 \cdot 10^{-7}$	10 %	$5,8 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$3,1 \cdot 10^{-9}$	-	$2,7 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,3 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$1,4 \cdot 10^{-7}$	2 %	$1,1 \cdot 10^{-6}$	26 %	$2,4 \cdot 10^{-6}$	14 %
Am-241	$5,5 \cdot 10^{-6}$	65 %	$1,3 \cdot 10^{-9}$	-	$3,2 \cdot 10^{-17}$	-
Np-237	$1,2 \cdot 10^{-8}$	-	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$8,6 \cdot 10^{-7}$	5 %
Ra-226	$1,1 \cdot 10^{-6}$	13 %	$1,8 \cdot 10^{-7}$	4 %	$1,7 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$1,3 \cdot 10^{-6}$	15 %	$2,0 \cdot 10^{-7}$	5 %	$1,9 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$2,2 \cdot 10^{-8}$	-	$1,2 \cdot 10^{-7}$	3 %	$3,5 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$1,4 \cdot 10^{-7}$	2 %	$1,9 \cdot 10^{-6}$	44 %	$1,2 \cdot 10^{-5}$	68 %
Pa-231	$9,2 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,3 \cdot 10^{-7}$	5 %	$9,6 \cdot 10^{-7}$	6 %
übrige RN	$2,8 \cdot 10^{-9}$	-	$2,1 \cdot 10^{-8}$	-	$1,8 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$8,5 \cdot 10^{-6}$	100 %	$4,3 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,7 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

4.6.4.4 Variante mit höherem effektiven Gesteinsdruck

In [ALSA-C 2005b], Kap. 3.4 wurde die Variante pg-18 mit um 1 MPa erhöhtem effektiven Gesteinsdruck analysiert. Diese Variante lieferte im Spektrum des über die Teufen des Grubengebäudes linear bis maximal 1 MPa geänderten effektiven Gesteinsdrucks sowohl den größten Gesamtlösungsaustritt als auch das höchste Maximum der mit dem ‚Verdünnungsmodell‘ vom Schlussbericht 2005 gerechneten potenziellen Strahlenexposition. Für diese Variante sind die Entwicklungen der Konvergenz, Lösungs- und Radionuklidströme und der Radionuklidkonzentrationen vergleichbar mit (jedoch weniger ausgeprägt) jenen der Variante mit dreimal niedrigerem Strömungswiderstand im Deckgebirge (siehe Kap. 4.6.4.3). Die Unterschiede gegenüber dem Referenzfall verschwinden wieder bei etwa 2 000 (Lösungsaustritt) bzw. 4 000 Jahren (Strahlenexposition).

Wie für die Variante kdg-1gr (Kap. 4.6.4.3) wirken sich die Unterschiede für die Variante pg-18 als eine mit der Zeit abklingende Erhöhung der Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete (Abb. 4.45) aus. Das Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ ist nun gegenüber dem Referenzfall etwa 60 % höher, das für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ etwa ist 15 % höher, während das Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ unverändert ist.

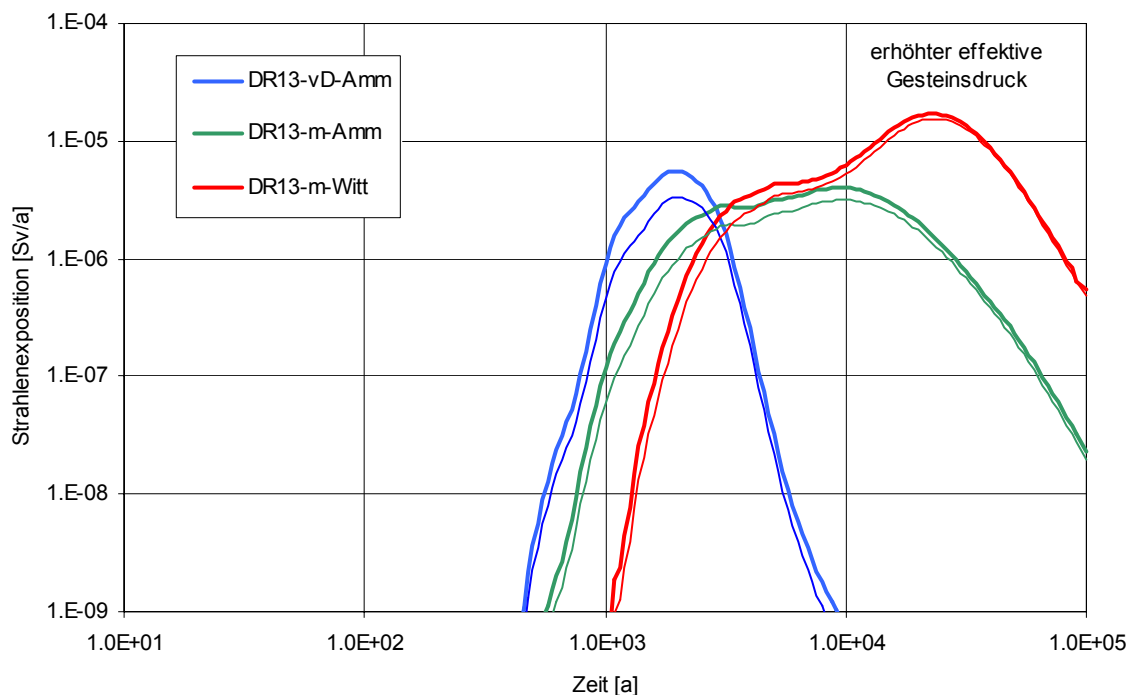


Abb. 4.45 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (erhöhter effektiver Gesteinsdruck vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.27 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit erhöhtem effektiven Gesteinsdruck)

erhöhter effektive Gesteinsdruck Radionuklid	vD-Amm bei 1 900 a		m-Amm bei 9 600 a		m-Witt bei 23 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,5 \cdot 10^{-7}$	3 %	$3,5 \cdot 10^{-7}$	9 %	$5,5 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$2,2 \cdot 10^{-9}$	-	$2,5 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,3 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$1,6 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,1 \cdot 10^{-6}$	26 %	$2,3 \cdot 10^{-6}$	14 %
Am-241	$3,3 \cdot 10^{-6}$	59 %	$7,4 \cdot 10^{-10}$	-	$3,5 \cdot 10^{-17}$	-
Np-237	$8,8 \cdot 10^{-9}$	-	$9,4 \cdot 10^{-8}$	2 %	$7,9 \cdot 10^{-7}$	5 %
Ra-226	$8,1 \cdot 10^{-7}$	15 %	$1,4 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,8 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$9,2 \cdot 10^{-7}$	16 %	$1,5 \cdot 10^{-7}$	4 %	$2,0 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$1,5 \cdot 10^{-8}$	-	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3 %	$3,6 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$1,5 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,9 \cdot 10^{-6}$	47 %	$1,2 \cdot 10^{-5}$	68 %
Pa-231	$7,0 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,1 \cdot 10^{-7}$	5 %	$9,6 \cdot 10^{-7}$	6 %
übrige RN	$2,2 \cdot 10^{-9}$	-	$1,9 \cdot 10^{-8}$	-	$1,7 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$5,6 \cdot 10^{-6}$	100 %	$4,0 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,7 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorbehalten.

4.6.4.5 Variante mit maximal ausgedehnter Feuchtezone im Salinar

In [ALSA-C 2005b], Kap. 3.5 wurde die Variante xf-a4 mit in allen Segmenten maximal ausgedehnter Feuchtezone im Salinar analysiert. Diese Variante lieferte im Spektrum von allen möglichen örtlich unterschiedlichen Konvergenzänderungen durch Feuchtekriechen sowohl den größten Gesamtlösungsaustritt als auch das höchste Maximum der mit dem ‚Verdünnungsmodell‘ vom Schlussbericht 2005 gerechneten potenziellen Strahlenexposition. Auch für diese Variante sind die Entwicklungen der Konvergenz, Lösungs- und Radionuklidströme sowie der Radionuklidkonzentrationen vergleichbar mit jenen der Variante mit dreimal niedrigerem Strömungswiderstand im Deckgebirge (siehe Kap. 4.6.4.3); die Unterschiede gegenüber dem Referenzfall verschwinden auch wieder bei etwa 2 000 (Lösungsaustritt) bzw. 4 000 Jahren (Strahlenexposition).

Gleicherweise wie für die Variante kdg-1gr (Kap. 4.6.4.3) wirken sich die Unterschiede für die Variante xf-a4 als eine – nun jedoch weniger – mit der Zeit abklingende Erhöhung der Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete (Abb. 4.46) aus. Das Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ ist nun gegenüber dem Referenzfall etwa 80 % höher, das für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ ist etwa 45 % höher, während das Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ etwa 35 % höher ist.

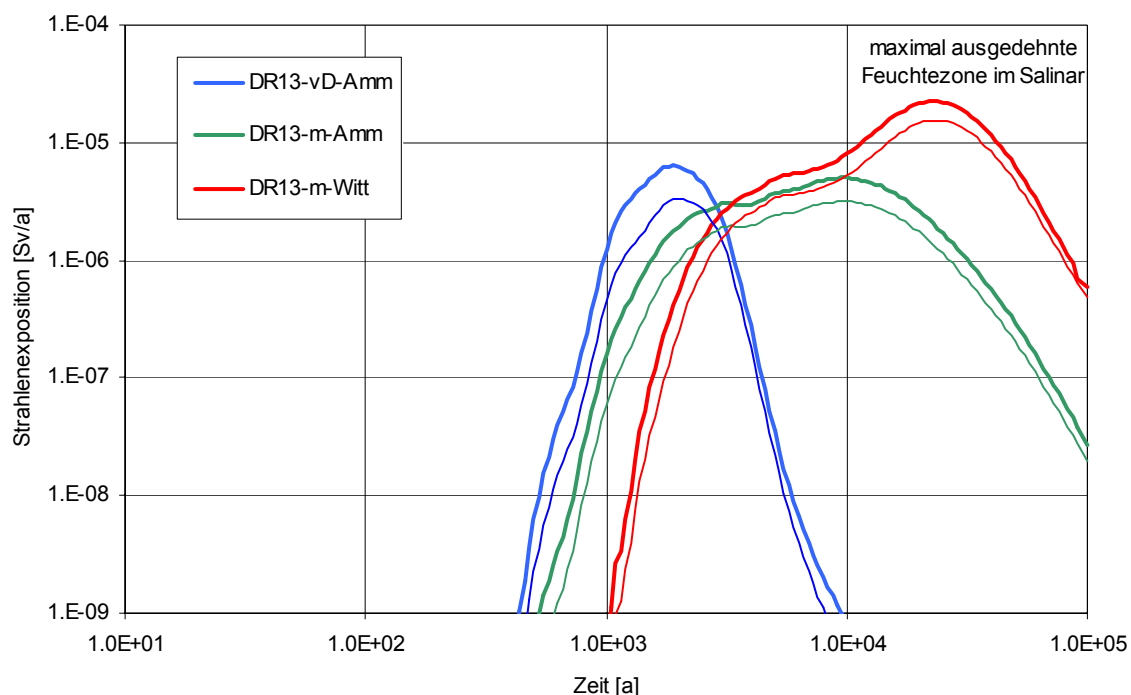


Abb. 4.46 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (maximal ausgedehnte Feuchtezone im Salinar vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 4.28 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (Variante mit maximal ausgedehnter Feuchtezone im Salinar)

maximal ausgedehnte Feuchtezone Radionuklid	vD-Amm bei 1 900 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 23 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,8 \cdot 10^{-7}$	3 %	$4,1 \cdot 10^{-7}$	8 %	$6,3 \cdot 10^{-7}$	3 %
Sn-126	$2,5 \cdot 10^{-9}$	-	$2,6 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,4 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$1,9 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,3 \cdot 10^{-6}$	27 %	$3,1 \cdot 10^{-6}$	14 %
Am-241	$3,8 \cdot 10^{-6}$	60 %	$5,3 \cdot 10^{-10}$	-	$3,7 \cdot 10^{-17}$	-
Np-237	$1,0 \cdot 10^{-8}$	-	$1,0 \cdot 10^{-7}$	2 %	$8,3 \cdot 10^{-7}$	4 %
Ra-226	$8,8 \cdot 10^{-7}$	14 %	$1,3 \cdot 10^{-7}$	3 %	$2,4 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$9,9 \cdot 10^{-7}$	16 %	$1,5 \cdot 10^{-7}$	3 %	$2,7 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$1,7 \cdot 10^{-8}$	-	$1,1 \cdot 10^{-7}$	2 %	$3,7 \cdot 10^{-7}$	2 %
Pu-239	$1,9 \cdot 10^{-7}$	3 %	$2,5 \cdot 10^{-6}$	50 %	$1,6 \cdot 10^{-5}$	70 %
Pa-231	$7,6 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,4 \cdot 10^{-7}$	5 %	$1,3 \cdot 10^{-6}$	6 %
übrige RN	$2,6 \cdot 10^{-9}$	-	$2,2 \cdot 10^{-8}$	-	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$6,3 \cdot 10^{-6}$	100 %	$5,0 \cdot 10^{-6}$	100 %	$2,2 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

4.7 Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel sind die Entwicklungen der Radionuklidkonzentrationen im Lösungsaustritt in das Deckgebirge für einige Varianten und Szenarien der LOPOS-Modellrechnungen im Schlussbericht 2005 benutzt worden, um die Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete unter Zuhilfenahme der Transferfunktionen aus dem Deckgebirgsrechenfall DG13 und der aktualisierten Dosiskonversionsfaktoren zu bestimmen. Die damit erfolgte Neubewertung der Variationsrechnungen aus dem Schlussbericht 2005 ist zulässig, nachdem in Kapitel 3 gezeigt wurde, dass die Aktualisierungen, die vom Referenzfall R8 (Schlussbericht 2005) zum Vergleichsfall RX.1 (Kapitel 3 des vorliegenden Berichts) führen, höchstens geringe Änderungen des Radionuklidübertritts in das Deckgebirge bewirken.

Tab. 4.29 zeigt eine Übersicht der berechneten globalen Maxima der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen, die sich in allen Fällen im Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ ergeben.

Tab. 4.29 Übersicht und Vergleich der globalen Maxima der Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete (Deckgebirgsrechenfall DR13) für LOPOS-Modellrechnungen im Schlussbericht 2005 sowie ausgewählten Rechenfällen aus [ALSA-C 2005b]

Kapitel	Kurzcharakterisierung	Rechenfall ¹⁶ Szenario oder Variante	LOPOS Strahlenexposition [Sv/a] (Verhältnis zum Vergleichsfall)
Szenariengruppe des Referenzszenarios			
4.1	programmspezifische Abbildung des Referenzszenarios - LOPOS-Analyse des Referenzfalls	Referenzfall R8-L	1,7·10 ⁻⁵ (1,1)
4.2.1	LOPOS-Analysen des Themas Radionuklidquellterme und Mobilisierung - schnellere Mobilisierung aus allen Gebinden	R9-L SchnMob	1,7·10 ⁻⁵ (1,1)
4.2.2	- langsamere Mobil. aus allen Gebinden	LangsMob	1,7·10 ⁻⁵ (1,1)
4.2.3	- früherer Wechsel des langzeitigen Milieus in allen ELB infolge Umsetzung von organischem Material zu CO ₂	FrühMilw	1,8·10 ⁻⁵ (1,1)
4.3	- Übertragbarkeit der konditionellen RN-Konzentrationen von Am	Am-opt	1,6·10 ⁻⁵ (1,0)

¹⁶ -K: Rechenfall mit dem Programm KAFKA
-L: Rechenfall mit dem Programm LOPOS

Kapitel	Kurzcharakterisierung	Rechenfall ¹⁶ Szenario oder Variante	LOPOS Strahlenexposition [Sv/a] (Verhältnis zum Vergleichsfall)
4.6.1.1	Gasbildungsrate, Gasspeicherung und Gasbewegung - höhere Gasbildungsraten in den Einlagerungsbereichen und Gasbildung außerhalb der Einlagerungsbereiche	R.V1-K + R.V7-L	1,6·10 ⁻⁵ (1,1)
4.6.1.2	- größere Gasspeichervolumina in allen Grubenbauen	R.V2-K + R.V8-L	1,7·10 ⁻⁵ (1,1)
4.6.4.1	Konvergenz - ungleichmäßige Konvergenz des Baufeldes in der Südflanke	R.V4-L	1,8·10 ⁻⁵ (1,2)
4.6.4.2	- niedrigere Konvergenzraten wegen geringer ausgedehnter Feuchtezone im Salinar	R.V3-L	1,5·10 ⁻⁵ (0,9)
4.6.4.3	- höhere Konvergenzraten wegen geringerem Strömungswiderstand im Deckgebirge	[ALSA-C 2005b] kdg-1gr	1,7·10 ⁻⁵ (1,1)
4.6.4.4	- höhere Konvergenzraten wegen höherem effektiven Gesteinsdruck	pg-18	1,7·10 ⁻⁵ (1,1)
4.6.4.5	- höhere Konvergenzraten wegen maximal ausgedehnter Feuchtezone im Salinar	xf-a4	2,2·10 ⁻⁵ (1,5)
4.6.2.1	Strömungswiderstände im Grubengebäude - höhere Permeabilität der Schweben und Pfeiler im Nahbereich bei unverändertem Gaseindringdruck	R.V3-K + R.V5-L	1,7·10 ⁻⁵ (1,1)
4.6.2.2	- geringere Permeabilität der Schweben im Nahbereich mit entsprechend höherem Gaseindringdruck	R.V4-K + R.V6-L	1,6·10 ⁻⁵ (1,0)
4.6.2.3	- höhere Permeabilität von Salzversatz	R.V1-L	1,6·10 ⁻⁵ (1,1)
4.6.2.4	- höhere Transmissivität der Auflockerungszone am Südstoß des Baufeldes in der Südflanke	R.V2-L	1,7·10 ⁻⁵ (1,1)
4.4	LOPOS-Analysen des Themas Kanalisation im Baufeld in der Südflanke	R10-L	
4.4.1	- 80% Querschnitt des Baufeldes in der Südflanke durchströmt	SFKan80%	8,8·10 ⁻⁶ (0,6)
4.4.2	- 20% Querschnitt des Baufeldes in der Südflanke durchströmt	SFKan20%	2,0·10 ⁻⁵ (1,3)
4.5	LOPOS-Analysen des Themas Schnittstelle mit dem Deckgebirge	R10-L	
4.5.1	- kein Lösungsaustritt in 574 m Teufe	OhneDG574	1,4·10 ⁻⁵ (0,9)
4.5.2	- gleicher Lösungsaustritt in 500 m und 574 m Teufe	GIAustritt	1,7·10 ⁻⁵ (1,1)

Kapitel	Kurzcharakterisierung	Rechenfall ¹⁶ Szenario oder Variante	LOPOS Strahlenexposition [Sv/a] (Verhältnis zum Vergleichsfall)
Szenariengruppe „vergrößerte Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere“ (vZdSB)			
4.6.3	- Lösungs- und Gasaustrittsstelle in Firstbereich der Grube	R.V10-K + R10-L/Zwill.	1,6·10 ⁻⁵ (1,0)

Zusätzlich zu den Angaben in Tab. 4.29 sind die Ergebnisse der LOPOS-Modellrechnungen als Übersicht in Abb. 4.47 grafisch dargestellt und den mit dem ‚Verdünnungsmodell‘ vom Schlussbericht 2005 gerechneten Maxima gegenübergestellt. Das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition liegt nun im Referenzfall bei etwa 5 % des Wertes nach §47 der Strahlenschutzverordnung. In Abb. 4.47 sind diese Werte als fette blaue (Referenzwert) und rote Linie (Wert nach §47 der Strahlenschutzverordnung) gestrichelt eingezeichnet.

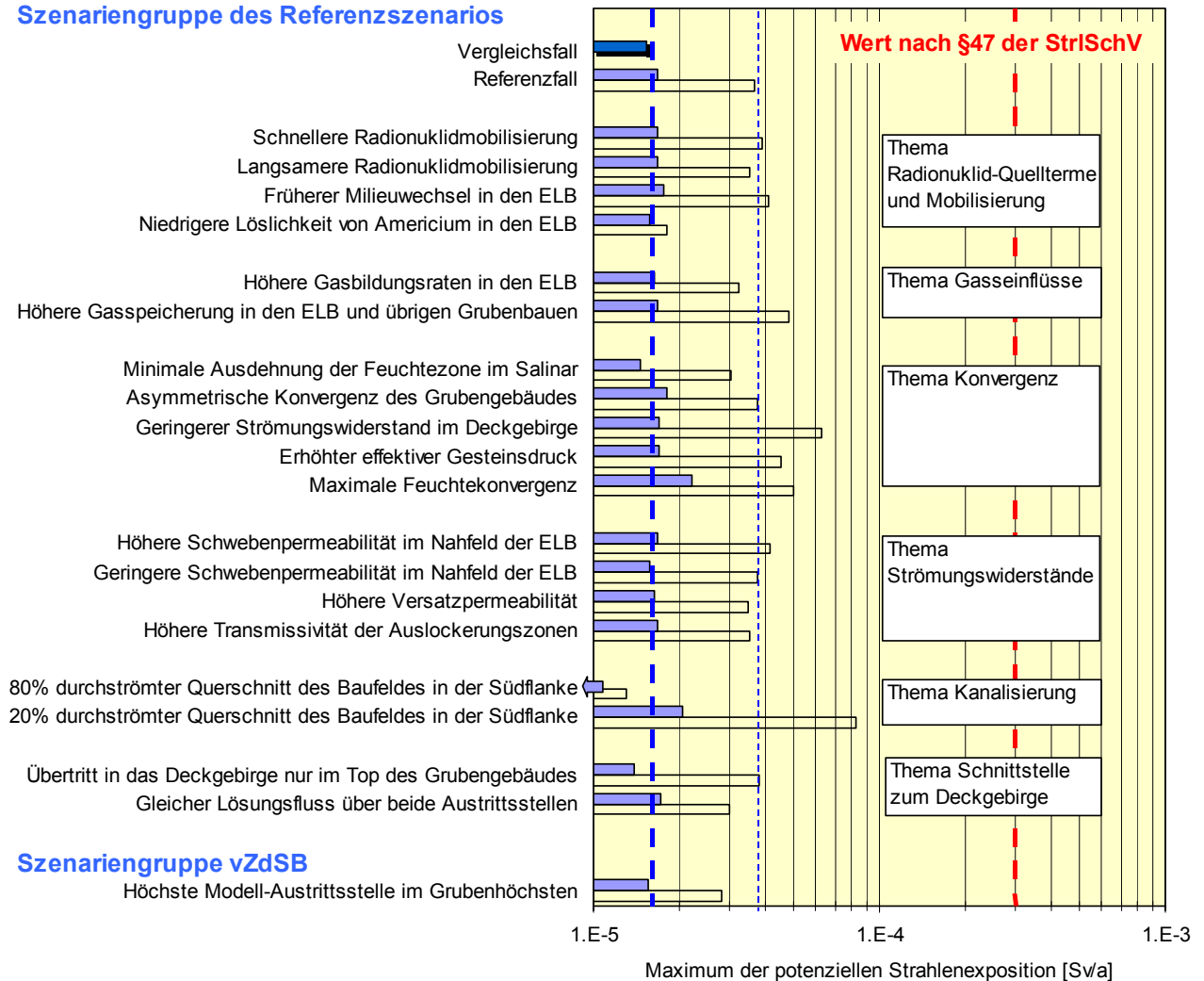
- Für die Szenarien und Varianten der Szenariengruppe des Referenzszenarios hat sich das Bild deutlich geändert. Für den Referenzfall ist das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition, das für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ erreicht wird, nun 2,5-mal niedriger als das mit dem früheren ‚Verdünnungsmodell‘ berechnete Maximum. Zudem hat auch die relative Bandbreite der Abweichungen um etwa den Faktor 3 auf etwa 20 % abgenommen. Ausnahmen bilden die Varianten mit langfristig beschleunigtem advektivem Transport im Baufeld in der Südflanke – die Variante mit maximal unterstelltem Feuchte kriechen hat ein etwa 50 % höheres Maximum – und die beiden, die Bandbreite im Baufeld in der Südflanke umspannenden Kanalisierungsvarianten, die ein etwa 35 % höheres bzw. 1,75-mal kleineres Maximum aufzeigen.
- Das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das untersuchte Szenario der Szenariengruppe „vergrößerte Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere“ ist nun nur noch 10 % niedriger als jenes für den Referenzfall. Damit passt dieses Szenario völlig in das Bild der Änderungen für die Szenarien und Varianten der Szenariengruppe des Referenzszenarios.

Die Strahlenexpositionsmaxima für die beiden übrigen Exfiltrationsgebiete sind immer niedriger als jenes für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘.

- Die relative Bandbreite der Strahlenexpositionsmaxima für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ hat etwa gleichviel abgenommen wie jene des globalen Maximums und hat dieselben Ausnahmen. Das Maximum der Variante mit maximal unterstelltem Feuchte kriechen ist auch hier etwa 50 % größer als jenes des Vergleichsfalls und die beiden, die Bandbreite im Baufeld in der Südflanke umspannenden Kanalisierungsvarianten zeigen ein etwa 75 % höheres bzw. 3-mal kleineres Maximum.
- Die relative Bandbreite der Strahlenexpositionsmaxima für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ ist deutlich größer als jene in den beiden

anderen Exfiltrationsgebieten und etwa gleich wie jene im Schlussbericht 2005. Größere Abweichungen als im Schlussbericht 2005 zeigen die Varianten mit langfristig beschleunigtem advektivem Transport im Baufeld in der Südflanke – die Variante mit geringstem Strömungswiderstand im Deckgebirge hat ein etwa 2,5-mal höheres Maximum – und die beiden, die Bandbreite im Baufeld in der Südflanke umspannenden Kanalisierungsvarianten zeigen ein etwa 4,5-mal höheres bzw. 25-mal kleineres Maximum.

Szenariengruppe des Referenzszenarios



Szenariengruppe vZdSB

Abb. 4.47 Übersicht der berechneten globalen Maxima der Strahlenexposition (blaue Balken) vs. frühere Ergebnisse (offene Balken)

In Tab. 4.30 sind die in den Unsicherheitsbetrachtungen untersuchten Phänomene und die wesentlichen Ergebnisse zusammengestellt. Dabei werden zur Erhöhung der Übersichtlichkeit alle Informationen zu den genannten Auswirkungen in zwei Spalten zusammengefasst. Die Auswirkungen werden bezüglich der Abweichungen vom Referenzfall qualitativ bewertet, wobei vier Stufen zur Anwendung gelangen: gering, mäßig, erheblich und hoch. Auf eine scharfe gegenseitige Abtrennung dieser Bewertungsstufen wird jedoch bewusst verzichtet.

Tab. 4.30 Revidierte Übersicht der Ergebnisse der Unsicherheitsbetrachtungen im Schlussbericht 2005

Kurzcharakterisierung	Rechenfall ¹⁷	Lösungsbewegungen in ELB und Nahbereich	Tracerkonzentration im Rötanhydrit, Strahlenexposition in der Biosphäre
Durchlässigkeit von Strömungsbarrieren			
Global höhere integrale Durchlässigkeit von Strömungsbarrieren und lokal höhere integrale Durchlässigkeit von Auffahrungen mit Stützversatz	R9-K	erheblich	gering
Zusätzlich zu R9-K - höhere integrale Durchlässigkeiten von Schweben und von Auflockerungszonen der LAW-ELB und im Nahbereich - verändertes Einleitregime oberhalb der 700-m-Sohle, - größere Speicherung von Grubenluft in der Einleitphase - Gasbildung außerhalb der Einlagerungskammern	R10-K	erheblich	
Radionuklidquellterme und Mobilisierung			
	R9-L		
Schnellere Mobilisierung aus allen Gebinden	SchnMob	nicht relevant	gering
Langsamere Mobilisierung aus allen Gebinden	LangsMob		
Früherer Wechsel des langzeitigen Milieus in allen ELB infolge Umsetzung von organischem Material zu CO ₂	FrühMilw		
Übertragbarkeit der konditionellen Am-Konzentrationen (niedrigere Löslichkeit von Americium)	Am-opt		

¹⁷ -K: Rechenfall mit dem Programm KAFKA

-L: Rechenfall mit dem Programm LOPOS

Kurzcharakterisierung	Rechenfall ¹⁷	Lösungsbewegungen in ELB und Nahbereich	Tracerkonzentration im Rötanhydrit, Strahlenexposition in der Biosphäre
Gasbildungsrate, Gasspeicherung und Gasbewegung			
Höhere Gasbildungsraten in den Einlagerungsbereichen und Gasbildung außerhalb der Einlagerungsbereiche	R.V1-K + R.V7-L	erheblich	Tracerkonzentration: mäßig Strahlenexposition: gering
Größere Gasspeichervolumina in allen Grubenbauen	R.V2-K + R.V8-L	mäßig	gering
Höherer Gaseindringdruck von Strömungsbarrieren und Schweben bei unveränderter Permeabilität	R.V5-K		
Konvergenz			
Höhere Vorfaktoren der Konvergenzrate	R.V8-K	mäßig	früh: hoch / spät: gering (Tracerkonzentration)
Größere Abhängigkeit der Konvergenzrate vom Fluidruck	R.V9-K	gering	früh: erheblich / spät: gering (Tracerkonzentration)
Niedrigere Konvergenzraten wegen geringerer Ausdehnung der Feuchtezone im Salinar	R.V3-L	mäßig	gering
Ungleichmäßige Konvergenz des Baufeldes in der Südflanke	R.V4-L	gering	
Höhere Konvergenzraten wegen niedrigem Strömungswiderstand im Deckgebirge	kdg-1gr	mäßig	Strahlenexposition: gering
Höhere Konvergenzraten wegen höherem effektiven Gesteinsdruck	pg-18		
Höhere Konvergenzraten wegen maximal ausgedehnter Feuchtezone im Salinar	xf-a4	mäßig	Strahlenexposition: mäßig

Kurzcharakterisierung	Rechenfall ¹⁷	Lösungsbewegungen in ELB und Nahbereich	Tracerkonzentration im Rötanhydrit, Strahlenexposition in der Biosphäre
Strömungswiderstände im Grubengebäude			
Höhere Permeabilität der Schweben und Pfeiler im Nahbereich bei unverändertem Gaseindringdruck	R.V3-K + R.V5-L	gering	gering
Geringere Permeabilität der Schweben im Nahbereich mit entsprechend höherem Gaseindringdruck	R.V4-K + R.V6-L		
Einkriechen von Salz in Schotterstrecken	R.V6-K	mäßig	
Höhere Permeabilität von Salzversatz	R.V1-L	gering	
Höhere Transmissivität der Auflockerungszone am Südstoß des Baufeldes in der Südflanke	R.V2-L	nicht relevant	
Kanalisation im Baufeld in der Südflanke		R10-L	
80% Querschnitt des Baufeldes in der Südflanke durchströmt	SFKan80%	nicht relevant	Tracerkonzentration: erheblich Strahlenexposition: mäßig
20% Querschnitt des Baufeldes in der Südflanke durchströmt	SFKan20%		
Schnittstelle mit dem Deckgebirge		R10-L	
Kein Lösungsaustritt in 574 m Teufe	OhneDG574	nicht relevant	gering
Gleicher Lösungsaustritt in 500 m und 574 m Teufe	GIAustritt		
Szenariengruppe „Gasabfluss über Tagesschacht“ (GT)			
Höhere Permeabilität des Schachtverschlusses mit entsprechend niedrigerem Gaseindringdruck	R.V7-K	nicht relevant	gering
Szenariengruppe „vergrößerte Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere“ (vZdSB)			
Lösungs- und Gasaustrittsstelle im Firstbereich der Grube	R.V10-K + R10-L/Zwill.	nicht relevant	gering

Im Vergleich zu den Ergebnissen im Schlussbericht 2005 hat sich das Bild nur geringfügig geändert, und zwar vor allem im positiven Sinn. Die nachfolgenden Schlussfolgerungen sind daher auch weitgehend identisch mit jenen im Schlussbericht 2005.

- Im Nahbereich der LAW-Einlagerungsbereiche (ELB) ergeben sich in einigen Fällen erhebliche Auswirkungen auf die Auspressung von Lösungen. Dabei spielen vor allem die integralen Durchlässigkeiten der Strömungsbarrieren und die Gasbildung eine Rolle. Der Lösungsaustausch in den einzelnen ELB ändert sich gegenüber dem Referenzfall vielfach nur geringfügig, in einzelnen Fällen erheblich, i.A. jedoch auf einem niedrigen Niveau (ohne Berücksichtigung von evtl. konvektiven Lösungsbewegungen).
- Die Freisetzung von Radionukliden aus den ELB ist einerseits durch die veränderten Lösungsströme beeinflusst, andererseits durch die eventuellen Änderungen des chemischen Milieus in den ELB. Die Auswirkung einer geringeren maximal möglichen Elementkonzentration von Americium auf die Strahlenexposition ist jedoch von geringer Bedeutung.
- Die maximalen Auspressraten für die Lösung an der Übertrittsstelle in das Deckgebirge sind in den Varianten und Szenarien meistens gering, in der Variante mit größerer Abhängigkeit der Konvergenzrate vom Fluiddruck mäßig beeinflusst.
- Die Radionuklidkonzentrationen im Modell-Rötanhydrit und die potenzielle Strahlenexposition in der Biosphäre sind generell gering beeinflusst. In den folgenden Szenarien und Varianten wurden jedoch mäßige bis große Auswirkungen festgestellt:
 - Höhere Vorfaktoren der Konvergenzrate,
 - Abhängigkeit der Konvergenzrate vom Fluiddruck,
 - Höhere Konvergenzraten wegen maximal ausgedehnter Feuchtezone im Salinar,
 - Kanalisierung im Baufeld in der Südflanke.
- In den Varianten mit deutlicher Variation der Konvergenzraten werden die größten Änderungen der Radionuklidkonzentrationen im Modell-Rötanhydrit festgestellt. Dies unterstreicht die Bedeutung des Konvergenzeffektes.

5 Modellrechnungen und Ergebnisse für weitere Varianten und Szenarien

Auf Basis des Vergleichs (vgl. Kap. 3) wird die „kombinierte Variante“ entwickelt, die eine als sehr wahrscheinlich eingeschätzte Entwicklung des Gesamtsystems in der Szenariengruppe des Referenzszenarios darstellt. Gegenüber dem Vergleichsfall umfasst die kombinierte Variante

- neue Erkenntnisse bzgl. der Durchlässigkeit einiger Schweben aus den Erkundungen auf der 750- und 725-m-Sohle,
- Aktualisierung des Schließungskonzeptes [GSF 2006b] bzgl. der Sorelbetonverfüllung im Grubenhöchsten und
- aktualisierte Radionuklid-Quellterme.

Der separate Einfluss dieser Änderungen wird mit den Rechenfällen RX.2 bis RX.4 in den Kapiteln 5.1 bis 5.3 analysiert. Danach werden die Ergebnisse der kombinierten Variante (RX.5) in Kap. 5.4 ausführlich dargestellt und durch ausgewählte Variationen bzgl.

- der hydrogeologischen Modellvorstellung zum Deckgebirge (Kap. 5.5, RX.7),
- des Einflusses der Gasbildung bei maximaler CO₂-Bildung (Kap. 5.6, RX.13), sowie
- der Sensitivität der aktualisierten Radionuklidquellterme in der Bandbreite (Kap. 5.7, RX.9)

abgesichert. Schließlich wird im Kapitel 5.8 mit Hilfe eines im Nahbereich der MAW-Kammer detaillierten Strukturmodells die Szenariengruppe *LsgMAW* untersucht.

5.1 Erhöhte Desintegration des Salzgesteins im Firstbereich von Abbau 6/725(Na2) (LAW1B) und der Einlagerungskammer 12/750 (LAW4)

5.1.1 Beschreibung und Definition

Für den vertikalen Transport von Gas, Lösung und Radionukliden aus LAW1B zum Baufeld in der Südflanke existieren folgende Wegsamkeiten:

- die Wendelstrecke zwischen Abbau 6 (LAW1B) und dem Streckenkreuz auf der 700-m-Sohle mit Strömungsbarriere (SB Wen-1),
- das Gesenk zwischen der Firste von Abbau 6 (LAW1B) und (dem gleichen) Streckenkreuz auf 700-m-Sohle mit Strömungsbarriere (SB Seig-5) und
- die mit Sorelbeton verfüllte Bohrung in der Firste von Abbau 6 (LAW1B).

Maßgeblich für den Gasabfluss aus dem Abbau 6/725(Na2) (LAW1B) ist die Schwebelinie um das Gesenk und dessen Auflockerungszone. Die aktuelle Situation in der Strecke oberhalb von Abbau 6/725 auf der 700-m-Sohle zeigt, dass Risse in diese Schwebelinie weiter als 2 m hineinreichen.

Als Referenzwert wird daher, abweichend von der Parametrisierung im Schlussbericht 2005 Tab. 6.9, für die integrale Permeabilität der Strömungsbarriere Seig-5 (Strömungsbarriere im Gesenk einschließlich der Auflockerungszone) ein Wert von $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ zum Ansatz gebracht. Mit dieser Permeabilität wird unter Einbeziehung der Davies-Regression (vgl. Schlussbericht 2005, Kap. 6.3.6) und unter Berücksichtigung zusätzlich aufgelockerter Bereiche mit einer Mächtigkeit von 2 m in Übereinstimmung mit der Parametrisierung gemäß dem Schlussbericht 2005, Tab. 7.2, ein korrigierter „scheinbarer“ Gaseindringdruck $p_{D\Delta z,i}$ von 15 kPa zugrunde gelegt. Die effektive Permeabilität der im Modellsegment V-LAW1B zusammengefassten parallelen Wegsamkeiten von SB Wen-1 und SB Seig-5 – die mit Sorelbeton verfüllte Bohrung ist vernachlässigbar – wird auf $3,08 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ erhöht.

In der effektiven residualen Gassättigung des ELB LAW4 sind potenzielle Gaspolster unterschiedlicher Mächtigkeit in den drei Einlagerungskammern (ELK) berücksichtigt, die sich auf fehlende oder geringdurchlässige Wegsamkeiten im Firstniveau der Kammern gründen (vgl. Schlussbericht 2005, Kap. 6.3.5.2). So waren im Referenzfall für die beiden Kammern ELK 2/750 und ELK 12/750 bis zu 8 m mächtige Gaspolster unterstellt worden, die aus den mit Sorelbeton verfüllten Verfüllbohrungen im Firstniveau der Kammern einerseits und geringdurchlässigen Pfeilern zum Carnallitbaufeld innerhalb der Firstniveaus andererseits und dem sich damit ergebenden behindernden Einfluss auf den Gasabfluss aus diesen Kammern resultieren. Während der Pfeiler zwischen der ELK 2/750 und dem – den ELK des LAW4 am nächsten liegenden – Abbau C12E im östlichen Carnallitbaufeld relativ mächtig ist, ist der Pfeiler zwischen der ELK 12/750 und dem Abbau C12E in einigen Bereichen nach neueren Aufnahmen nur sehr gering mächtig und die Kontur der ELK 12/750 kommt dem Carnallit sehr nahe. Wegen der langen offenen Standzeit von ELK 12/750 wird angenommen, dass die Dichtheit des Salzgesteins des Pfeilers im Firstniveau der ELK aufgrund von Auflockerungszonen nicht gegeben ist. Ob diesem Pfeiler zwischen der ELK 12/750 und dem Abbau C12E eine rückhaltende Wirkung für das Gas zugemessen werden kann, ist nicht zweifelsfrei zu beurteilen, erscheint nach heutigem Kenntnisstand aber eher wenig wahrscheinlich¹⁸. Für die Variante RX.2-K wird daher bei der Parametrisierung der effektiven residualen Gassättigung in ELK 12/750 neben dem Gasspeicher im Versatz nur die Gasspeicherung in der Firstrauhigkeit mit einer mittleren Mächtigkeit von 0,3 m berücksichtigt. Da die ELK 12/750 und 2/750 im Firstniveau über einen hochdurchlässigen Durchhieb miteinander verbunden sind, wird auch in ELK 2/750 für die Gasspeicherung unter der Firste nur die Firstrauhigkeit von 0,3 m zum Ansatz gebracht.

Der Pfeiler zwischen der ELK 1/750 und dem Abbau C12E ist zwar ebenfalls aufgelockert, aber deutlich mächtiger als jener zwischen der ELK 12/750 und dem Abbau C12E. Da keine

¹⁸ Im Zuge der KAFKA-Rechnungen zum Detailmodell LAW4 [ALSA-C 2006b] wurde unter anderem untersucht, welchen Einfluss ein scheinbarer Gaseindringdruck des Pfeilers zwischen ELK 12/750 und Abbau C12E auf die Ausbildung von Gaspolstern in den ELK des LAW4 und deren Lösungsaustausch hat.

durchlässigen Verbindungen im Firstniveau zwischen den ELK 1/750 und 2/750 existieren, ist entsprechend der Parametrisierung von Auflockerungszonen (vgl. Schlussbericht 2005, Tab. 7.2) ein „scheinbarer“ Gaseindringdruck von 15 kPa oder ein entsprechend maximales Gaspolster von 1,2 m zu unterstellen.

Diese Parametrisierung führt zu einer im Vergleich zum Referenzfall geringeren effektiven residualen Gassättigung des ELB LAW4 (s. u.).

5.1.2 Modellergebnisse KAFKA (RX.2-K)

5.1.2.1 Gasspeicher und Gasflüsse im Grubengebäude

Die effektiven residualen Gassättigungen entsprechen jenen des Referenzfalls im Schlussbericht 2005 bzw. denen im Vergleichsfall RX.1-K. Lediglich für den Einlagerungsbereich LAW4 wird – wie oben dargestellt – eine modifizierte effektive residuale Gassättigung verwendet, die sich unter Berücksichtigung der aktuellen Geometrie und Durchlässigkeiten der Verbindungen zwischen den Einlagerungskammern des ELB LAW4 sowie deren Nahbereich ergibt:

$S_{g,res_eff}(LAW4) = 0,22$ (im Referenzfall 0,63).

Die berechnete Lösungssättigung und den Lösungspegel gibt Abb. 5.1 wieder. Zum Vergleich gestrichelt sind in den folgenden Abbildungen die Kurven des Vergleichsfalls RX.1K mit dargestellt. Das Gaspolster in LAW1B ist deutlich kleiner als im Vergleichsfall, die Gasflüsse aus LAW1A und LAW1B treten etwas früher auf als im Vergleichsfall:

- aus LAW1A: nach 45 Jahren (im Vergleichsfall nach 50 Jahren)
- aus LAW1B: nach 80 Jahren (im Vergleichsfall nach 110 Jahren).

In LAW4 tritt ein Gaspolster nach ca. 290 Jahren auf (im Vergleichsfall nach 1 230 Jahren), und das Gas fließt bereits nach 400 Jahren aus dem ELB ab. Die Gastransportpfade im Nahbereich der ELB und im gesamten Grubengebäude sind identisch mit dem Vergleichsfall. Der Beginn des Gasabflusses aus dem Grubengebäude nach 1 450 Jahren wird nicht beeinflusst. Änderungen im Lösungsabfluss aus dem Grubengebäude treten gegenüber dem Vergleichsfall ebenfalls nicht auf.

Für die Berechnungen mit LOPOS wurde daher empfohlen, die effektiven residualen Gasvolumina abweichend zum Vergleichsfall (Kap. 3.1.1.2) für LAW1B und LAW4 wie folgt anzupassen:

- LAW1B: erhöhte effektive residuale Gassättigung: 0,24 (im Vergleichsfall 0,79)
- LAW4: erhöhte effektive residuale Gassättigung: 0,27 (im Vergleichsfall 0,63).

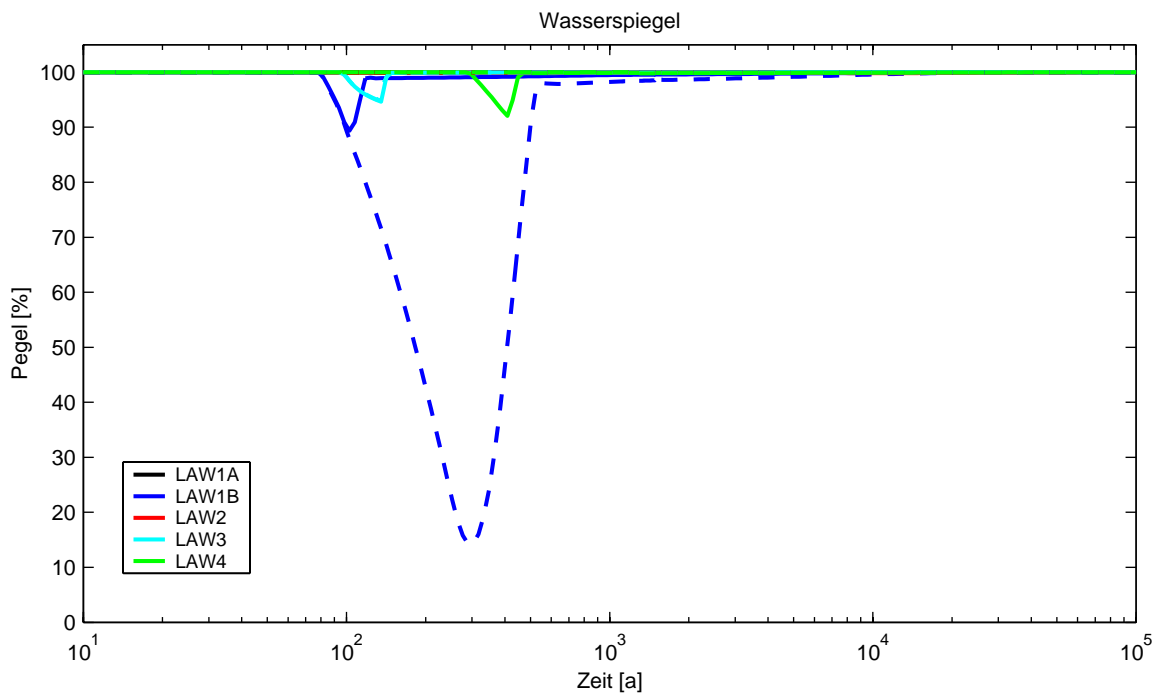
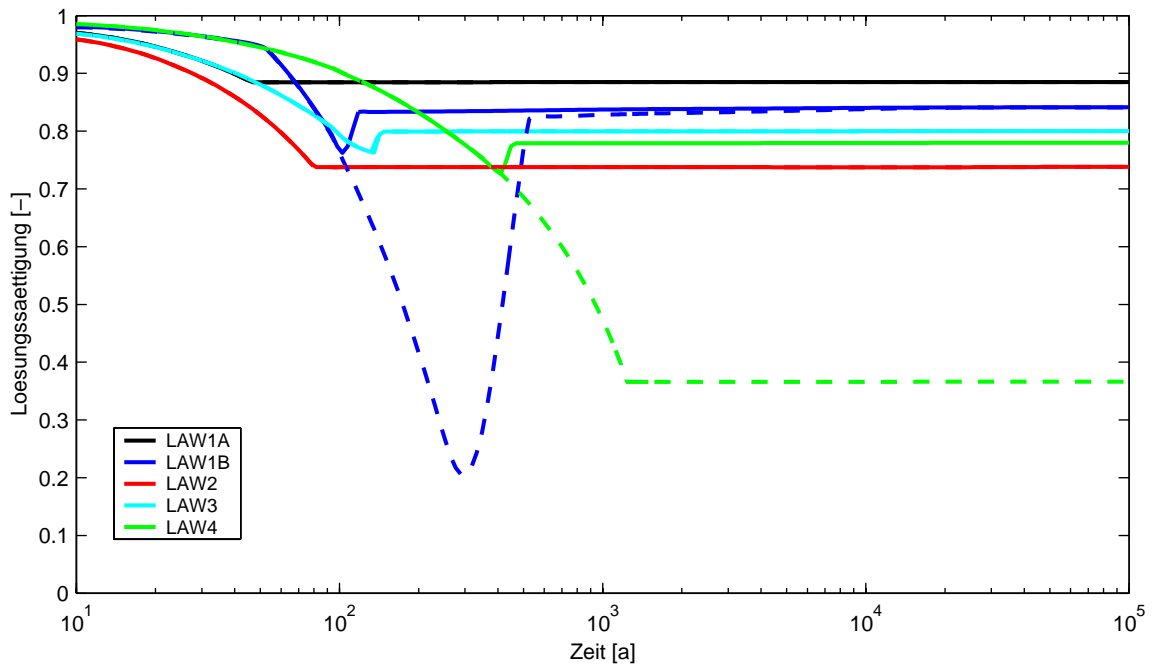


Abb. 5.1 Lösungssättigung und –pegel in den LAW-ELB (RX.2-K, gestrichelt RX.1-K)

5.1.2.2 Transportprozesse der Lösungsverdrängung aus den ELB

Für die drei ELB LAW1A, LAW1B und LAW4, für die sich Änderungen gegenüber dem Vergleichsfall – gestrichelte Linien – ergeben, zeigen Abb. 5.2 bis Abb. 5.4 die Lösungsflüsse bezogen auf das anfängliche Porenvolumen.

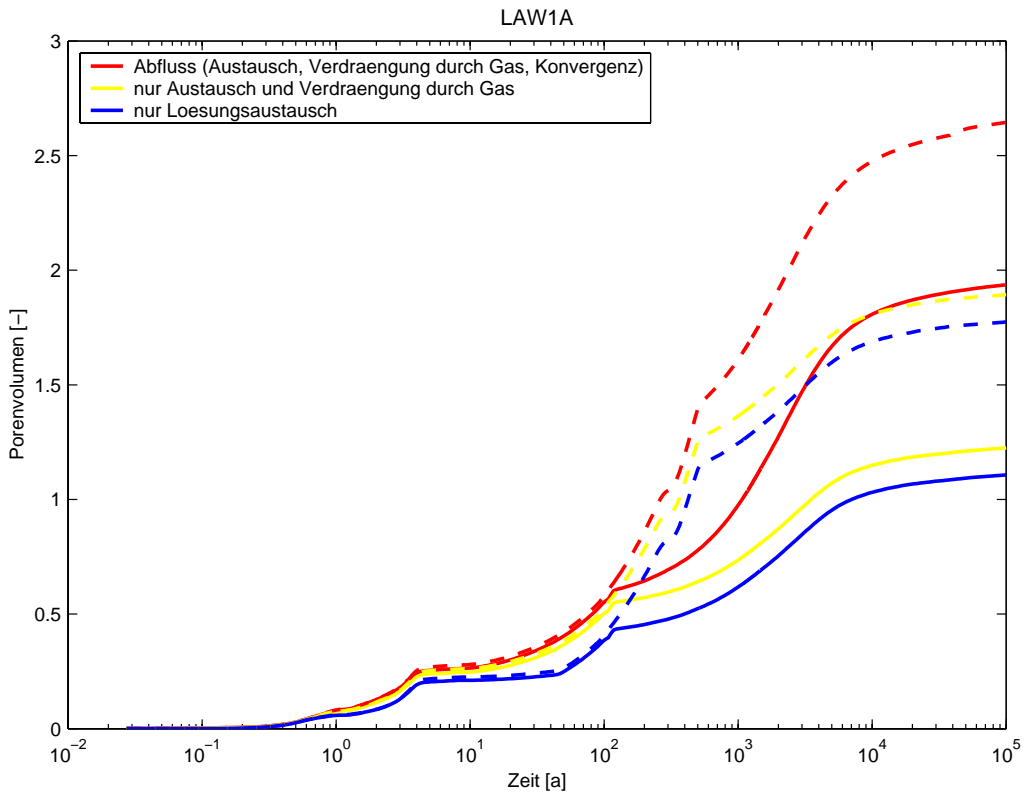


Abb. 5.2 Lösungsfluss aus dem ELB LAW1A bezogen auf das anfängliche Porenvolumen (RX.2-K, gestrichelt RX.1-K)

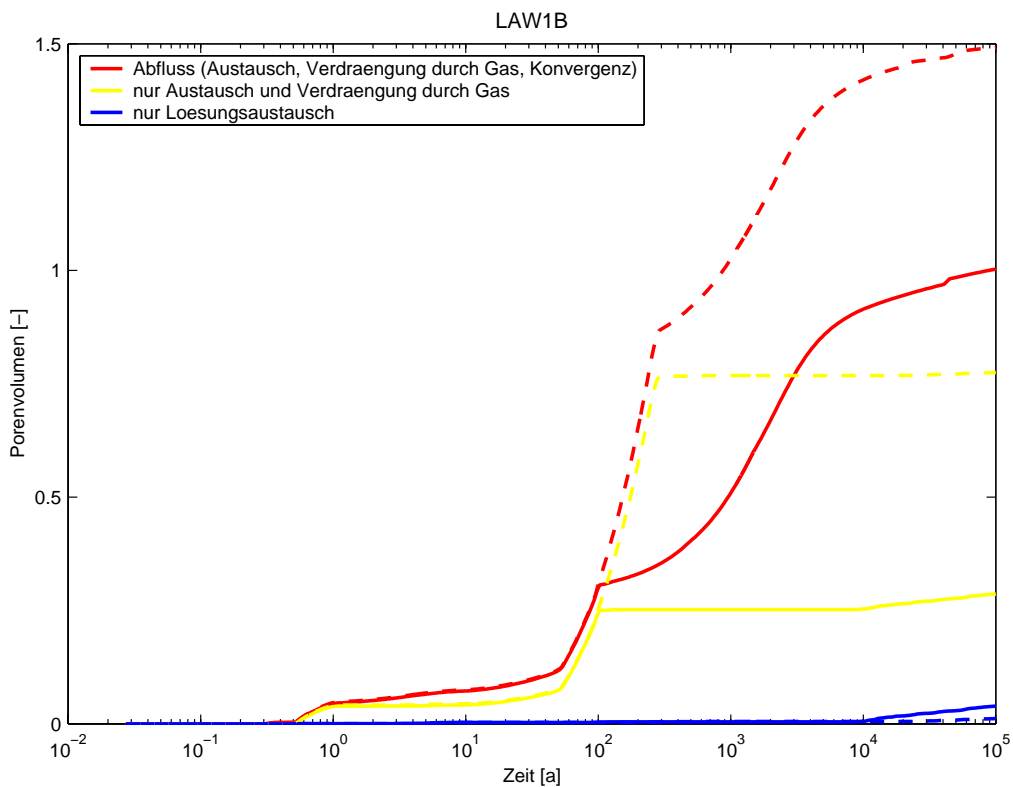


Abb. 5.3 Lösungsfluss aus dem ELB LAW1B bezogen auf das anfängliche Porenvolumen (RX.2-K, gestrichelt RX.1-K)

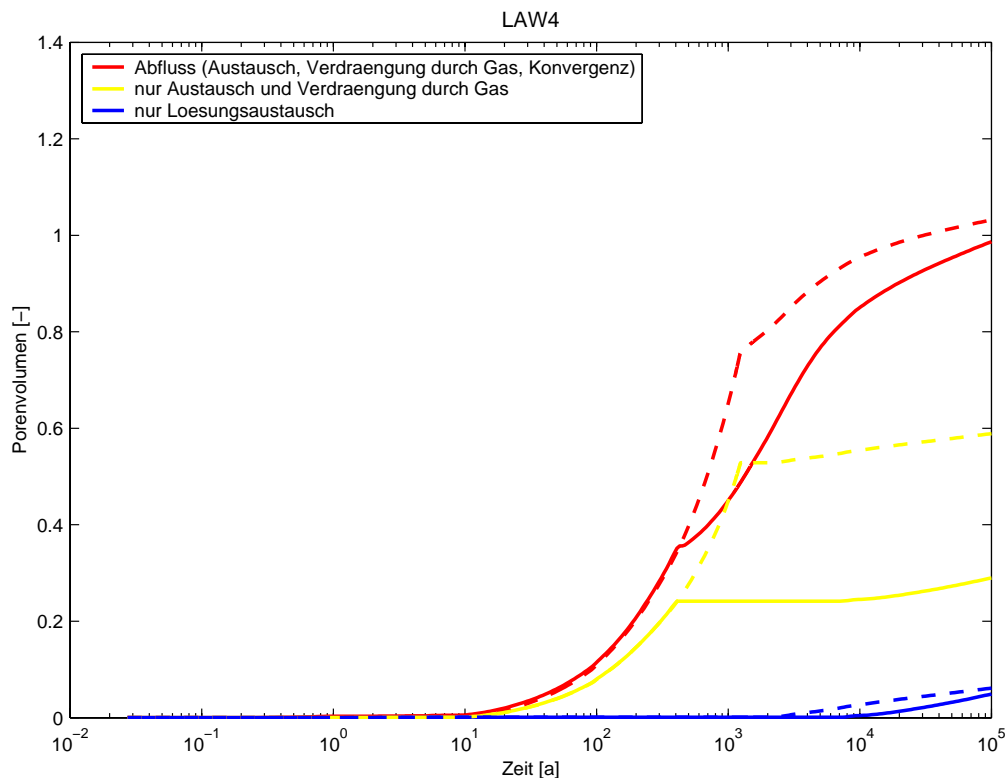


Abb. 5.4 Lösungsfluss aus dem ELB LAW4 bezogen auf das anfängliche Porenvolumen (RX.2-K, gestrichelt RX.1-K)

Der weniger behinderte Abfluss von Gas aus LAW1B führt in diesem ELB zu einem geringeren Beitrag der Lösungsverdrängung durch Gasspeicherung (kumuliert $\frac{1}{4}$ des anfänglichen Porenvolumens, im Vergleichsfall $\frac{3}{4}$). Dies hat auch einen geringeren Lösungsaustausch (Durchfluss) im ELB LAW1A zur Folge, der durch die Bildung des Gaspolsters in LAW1B begünstigt wird.

In LAW4 ist durch den rascheren Abfluss des Gases der Beitrag durch Gasspeicherung nur etwa halb so groß wie im Vergleichsfall, der gesamte Lösungsabfluss bezogen auf das anfängliche Porenvolumen wird aber teilweise und langfristig durch einen höheren Beitrag der Konvergenz kompensiert.

5.1.2.3 Lösungsflüsse im Nahbereich der ELB LAW1A, LAW1B und LAW4 und bei Übertritt in das Deckgebirge

Der Lösungs- und Tracerfluss nahe der ELB wird nur wenig beeinflusst. Zwischen 100 und 300 Jahren fließen etwas weniger Lösung und Tracer aus LAW1A über den maßgeblichen Transportpfad (Durchhieb von Abbau 3/750 nach 4/750Na2: A-1.AS) und aus LAW1B über die Schwebel zu LAW1A ab. Aus LAW4 fließt durch den kleineren Gasspeicher zwischen 400 und 1 200 Jahren weniger Lösung ab, und es wird weniger Tracer über den aufgelockerten Pfeiler zum Carnallitbaufeld (A-4.Ca) transportiert. Anschließend ist der Beitrag über diese Verbindung allerdings etwas höher als im Vergleichsfall.

Der Lösungsfluss aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge ist gegenüber dem Vergleichsfall unverändert.

5.1.2.4 Tracertransport im Grubengebäude und –übertritt in das Deckgebirge

Die Tracer aus LAW1A und LAW1B sind im Vergleich zum Vergleichsfall in der Ostflanke des Baufeldes geringfügig verzögert. Für Tracer aus LAW4 sind die Änderungen nur sehr gering. Auf die Freisetzung aus dem Grubengebäude wirkt sich diese Verzögerung im Osten an der Modellübertrittsstelle in 500 m Teufe (DG500) und, sekundär, geringfügig beschleunigt im Westen in 574 m Teufe (DG574) nur für Tracer aus LAW1B aus.

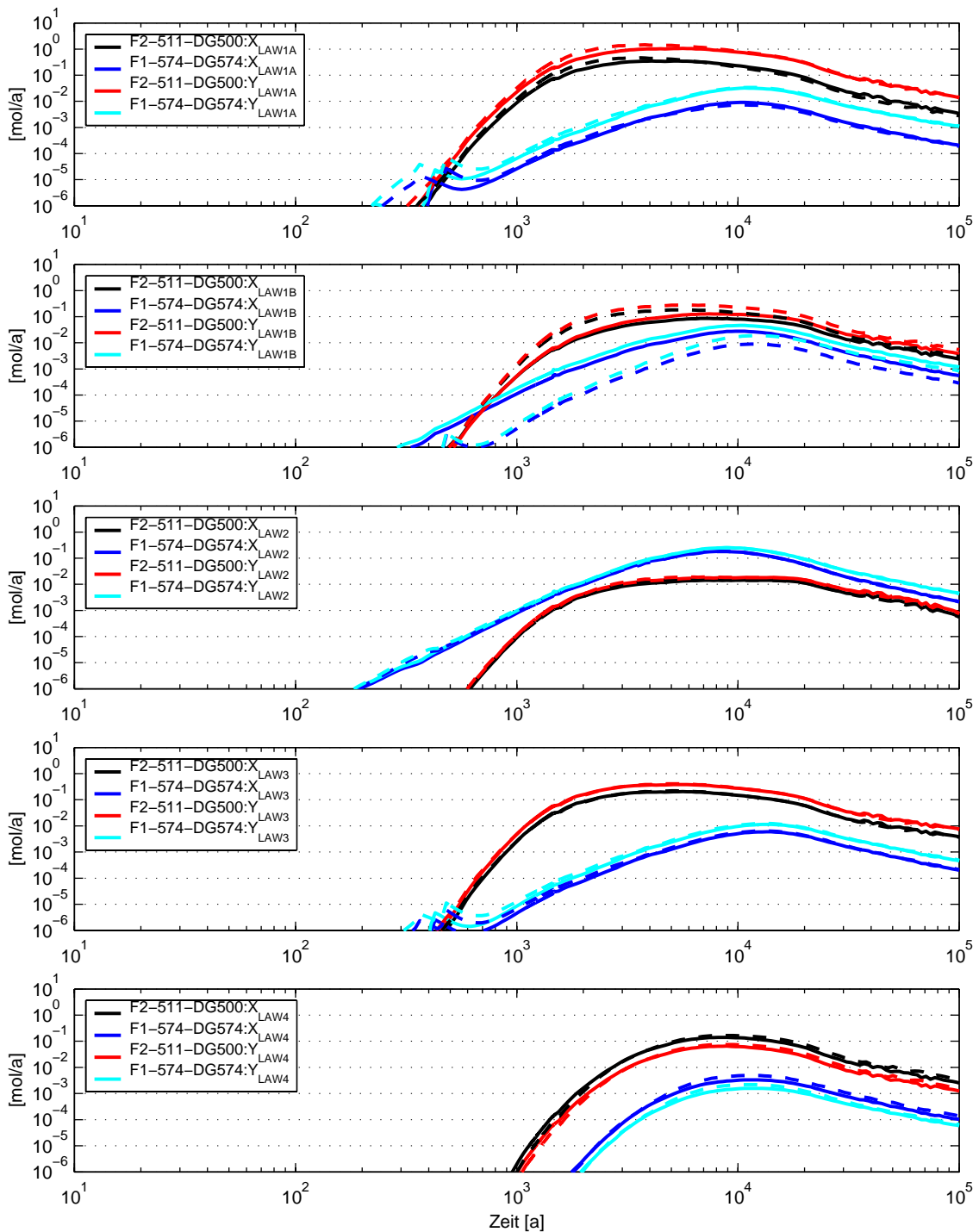


Abb. 5.5 Tracerflüsse beim Übertritt in das Deckgebirge (RX.2-K, gestrichelt RX.1-K)

Die veränderten Flüsse führen auch zu einer Verzögerung des Anstieges der LAW1B-Tracerkonzentration im Rötanhydrit (Abb. 5.6).

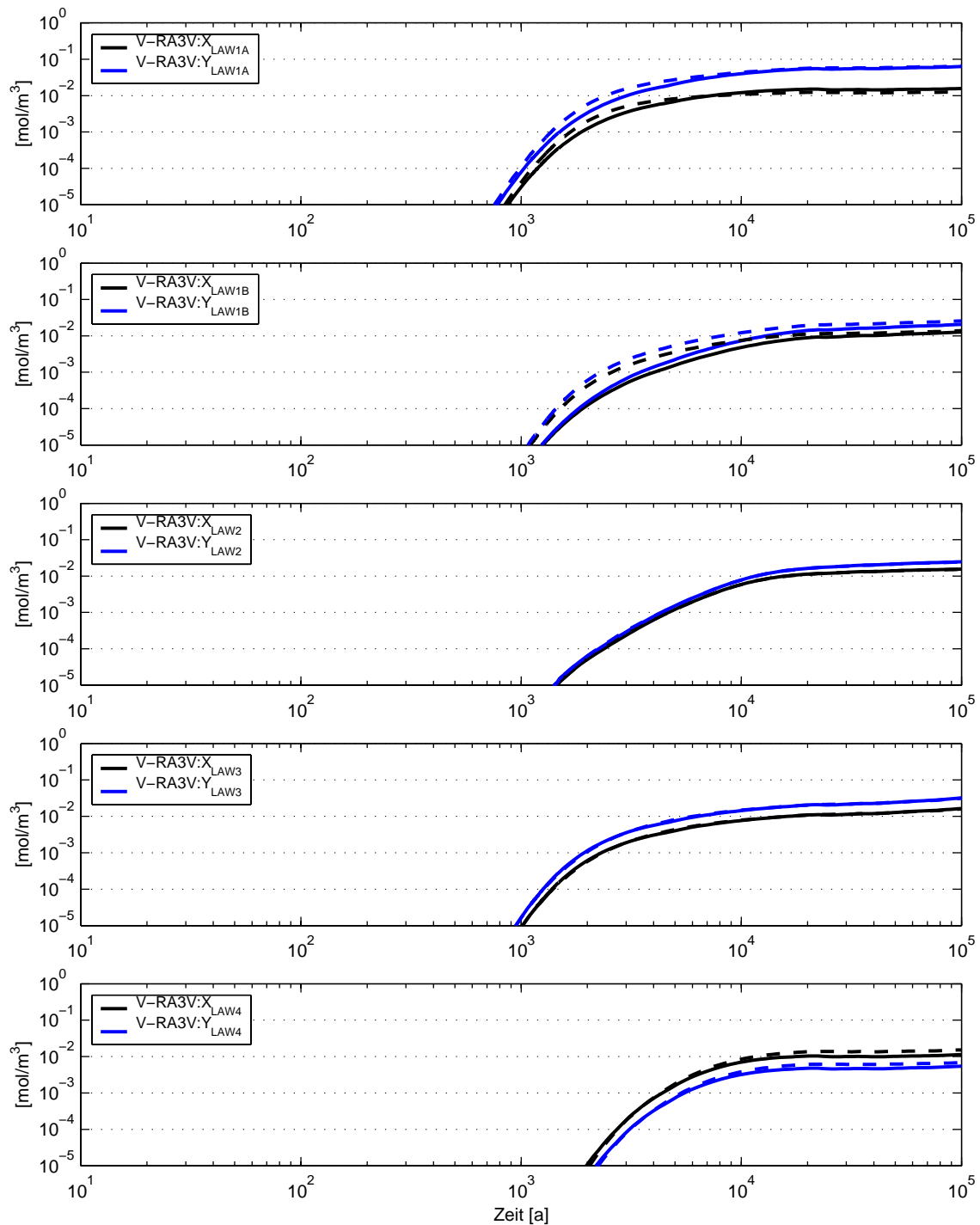


Abb. 5.6 Tracerkonzentration im Rötanhydrit (RX.2-K, gestrichelt RX.1-K)

Einen Vergleich der maximalen Konzentrationsanstiege im Modellsegment RA2 – als Maß für die Transportverzögerung im Grubengebäude – und der Flüsse im Rötanhydrit gibt Tab. 5.1 wieder. Die größte Transportverzögerung im Grubengebäude gegenüber dem Vergleichsfall erfahren danach in dieser Variante die Tracer aus LAW1B.

Tab. 5.1 Vergleich der Konzentrationsänderungen und der Maxima der Flüsse der X-Tracer zum Vergleichsfall

	Zeitpunkt des maximalen Konzentrationsanstiegs im Rötanhydrit [a]		Zeitpunkt des Maximums der Tracerflüsse [a]		Veränderung der Tracerflüsse im Maximum gegenüber dem Vergleichsfall
	Variante RX.2-K	Vergleichsfall	Variante RX.2-K	Vergleichsfall	
LAW1A	3 000	2 300	5 100	3 600	-24%
LAW1B	8 100	3 800	7 400	5 500	-48%
LAW4	6 200	6 600	8 900	9 100	-15%

5.1.2.5 Tracerkonzentrationen nach Transfer im Deckgebirge

Nach dem Transfer im Deckgebirge sind insbesondere Dämpfungen der Konzentrationen der Tracer aus LAW1B im verstürzten Deckgebirge Ammerbeek (*vD-Amm*) und im Muschelkalk Ammerbeek (*m-Amm*) nachweisbar (X-Tracer: Abb. 5.7). Die genannten Effekte treffen gleichermaßen auf die Y-Tracer zu.

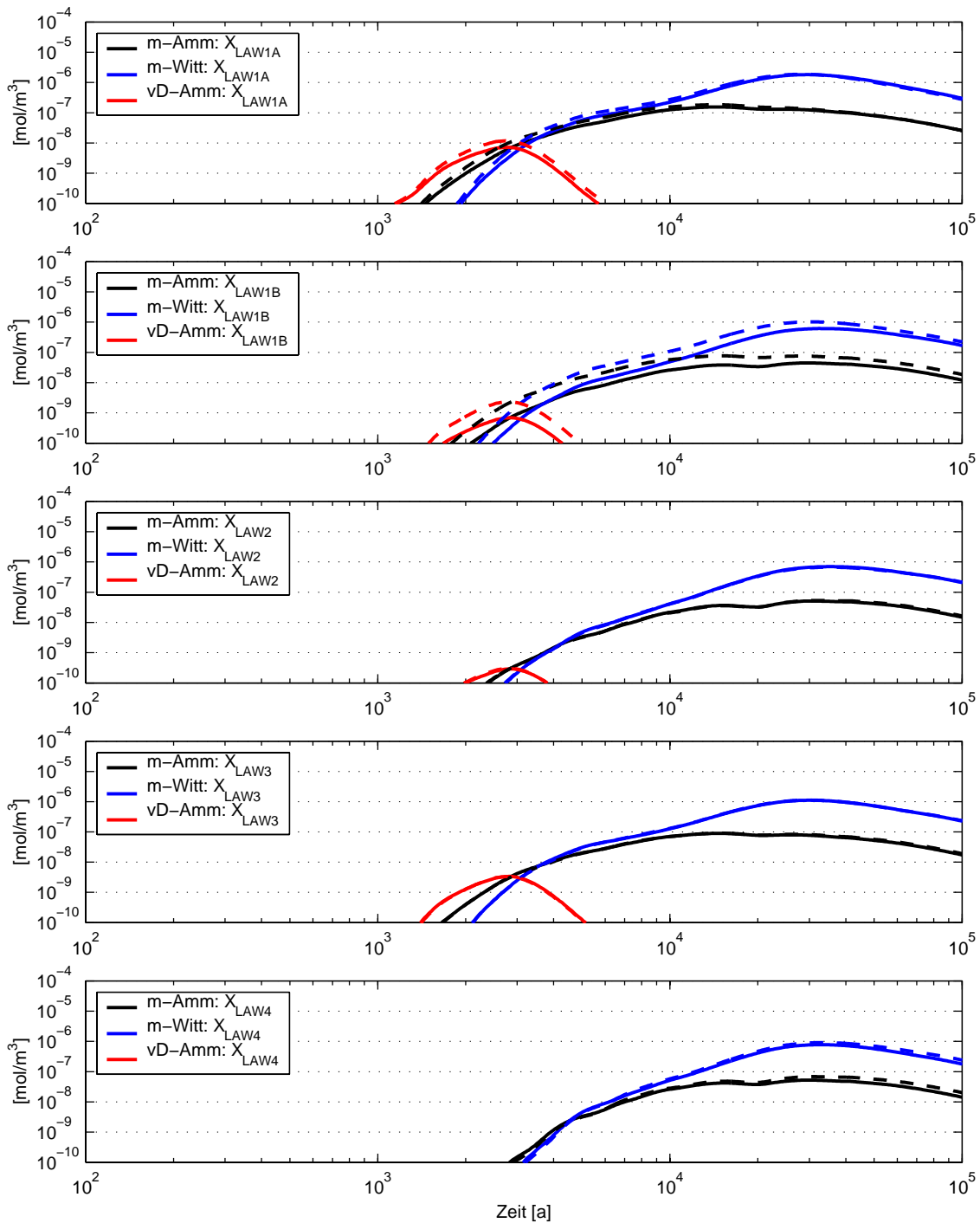


Abb. 5.7 X-Tracerkonzentration für die Exfiltrationsgebiete des Deckgebirges (RX.2-K, gestrichelt RX.1-K)

5.1.3 Modellergebnisse LOPOS (RX.2-L)

5.1.3.1 Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen

Die im Rechenfall RX.2 gegenüber dem Vergleichsfall RX.1 geänderten Strömungen im Umfeld der Einlagerungsbereiche LAW1A, LAW1B und LAW4 wirken sich nur beschränkt auf die Elementkonzentrationen aus: Die Änderungen der Plutoniumkonzentrationen sind vernachlässigbar gering, die Elementkonzentrationen von Uran und Thorium unverändert. Die Konzentrationsänderungen der weniger strahlenexpositionsrelevanten Elemente Radium und Neptunium ergeben sich erst zu späteren Zeiten und bleiben auf weniger als einen Faktor 2 beschränkt. Die Konzentrationsänderungen des potenziell relevanteren Americiums sind entweder kurzzeitig und gering oder ergeben sich auf sehr niedrigerem Niveau. In LAW2 und LAW3 sind die Konzentrationsänderungen generell vernachlässigbar bzw. sehr gering.

Folglich sind für den Rechenfall RX.2 auch die Zeitfenster, in dem die maximal möglichen Elementkonzentrationen erreicht werden, gegenüber dem Vergleichsfall meist unverändert. Nur in LAW1A wird wegen des geringeren Lösungsaustausches der Zeitpunkt, zu dem die maximal mögliche Plutoniumkonzentration wieder unterschritten wird, von 675 Jahren im Vergleichsfall (RX.1) auf 1 170 Jahre verzögert.

5.1.3.2 Radionuklidströme aus und zu den Einlagerungsbereichen

Beispielhaft sind in Abb. 5.8 ff. für den Rechenfall RX.2 – fette Linien – die Radionuklidströme von Pu-239 in den Einlagerungsbereichen LAW1A, LAW1B und LAW4 jenen des Vergleichsfalls RX.1 – dünne Linien – gegenübergestellt.

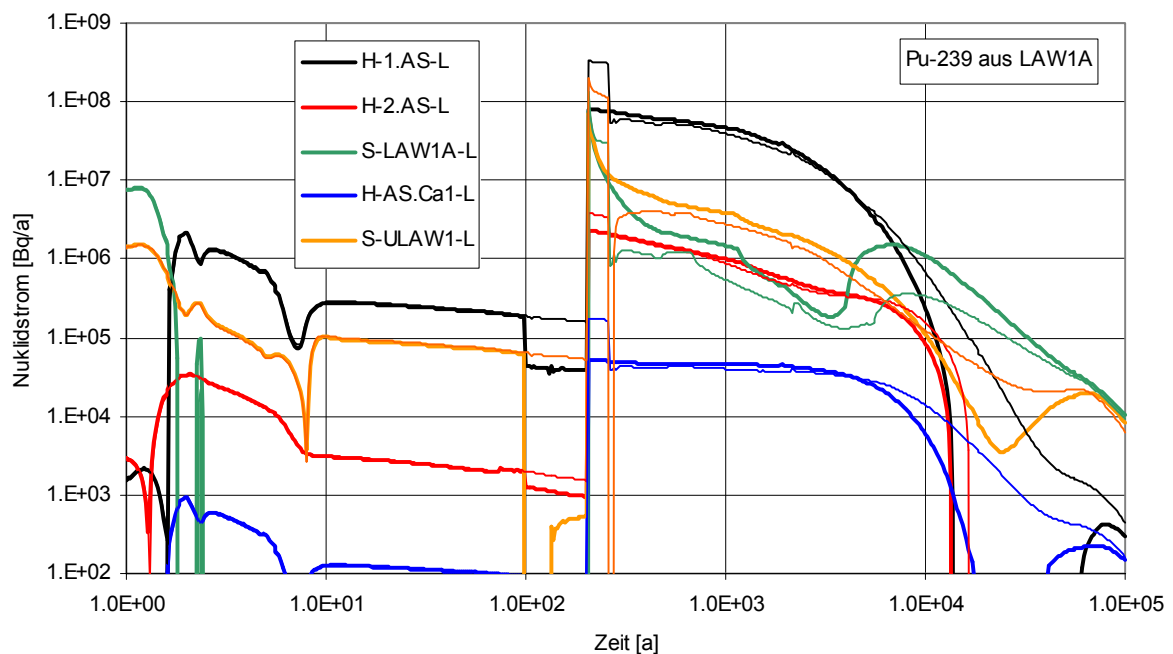


Abb. 5.8 Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW1A (RX.2 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

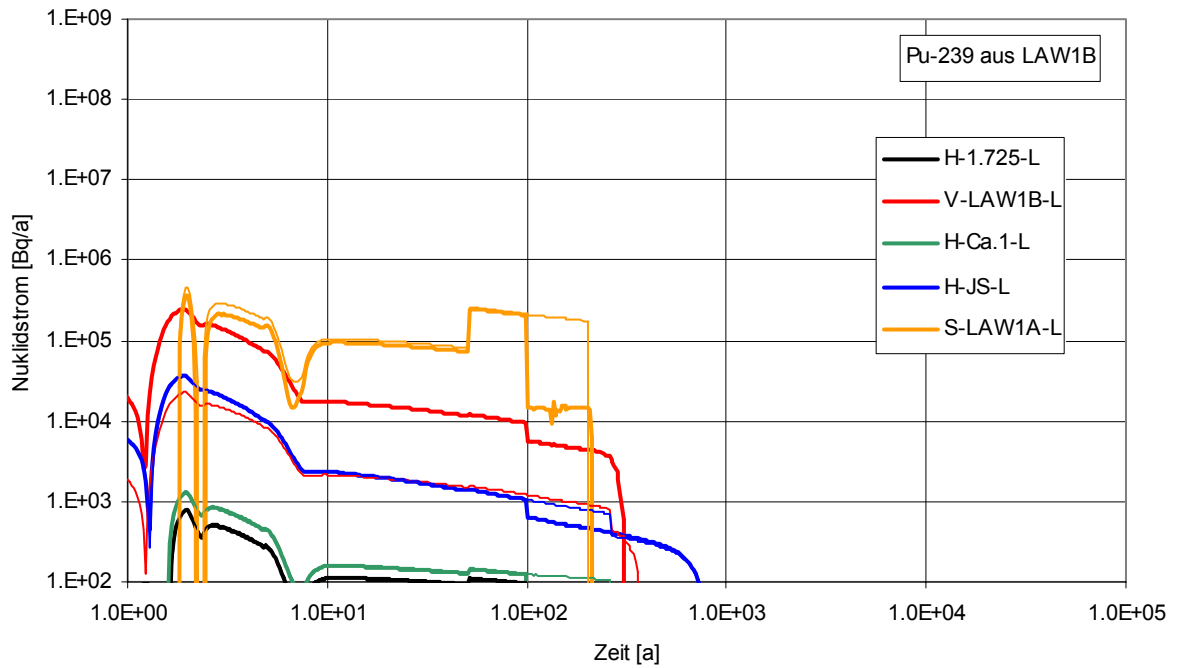


Abb. 5.9 Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW1B (RX.2 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

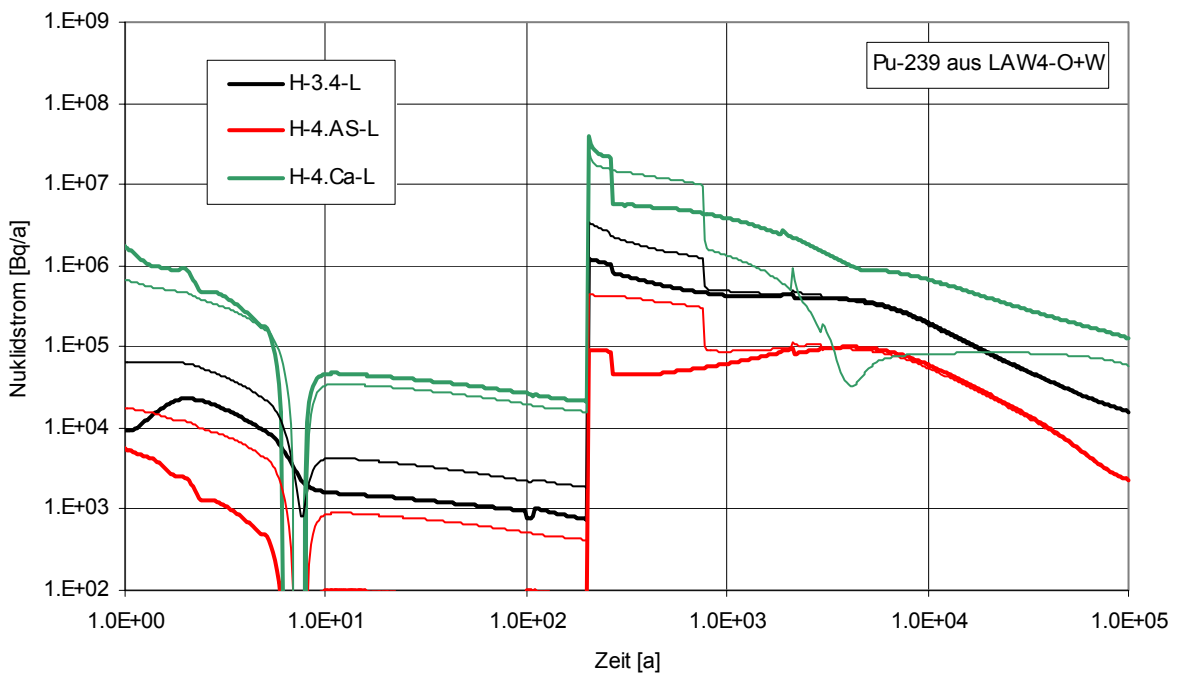


Abb. 5.10 Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW4 (RX.2 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Da im Rechenfall RX.2 der Gasspeicher in LAW1B viel kleiner als im Vergleichsfall ist, ist er viel früher vollständig gefüllt. Dies führt dazu, dass im Zeitrahmen zwischen 100 und 250

Jahren¹⁹ deutlich weniger Lösung aus LAW1B nach vor allem LAW1A verdrängt wird. Infolgedessen wird in dieser Periode weniger hoch kontaminierte Lösung aus LAW1A nach AS2 und ULAW1 transportiert. Der wegen dem geringeren Strömungswiderstand höhere Lösungsstrom aus LAW1B nach F1-700 zeigt sich deutlich als höherer Transport über V-LAW1B. Die geänderten Strömungsverhältnisse in LAW1B und LAW1A wirken sich nur sehr geringfügig auf die Radionuklidströme von benachbarten Einlagerungsbereichen aus.

Wie für LAW1B ist auch der Gasspeicher in LAW4 viel kleiner als im Vergleichsfall RX.1. Dies führt dazu, dass im Zeitrahmen zwischen 250 und 750 Jahren¹⁹ deutlich weniger Lösung aus LAW4 in das Carnallitbaufeld verdrängt wird. Gleichzeitig bedingt der geringere Strömungswiderstand von A.4-Ca einen geringeren Strom von LAW4 nach LAW3, wodurch der Radionuklidtransport über H-3.4 abnimmt.

5.1.3.3 Radionuklidkonzentrationen im Baufeld in der Südflanke

In Abb. 5.11 und Abb. 5.12 sind für den Rechenfall RX.2 – fette Linien – beispielsweise die Entwicklungen der Radionuklidkonzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke jenen des Vergleichsfalls RX.1 – dünne Linien – gegenübergestellt.

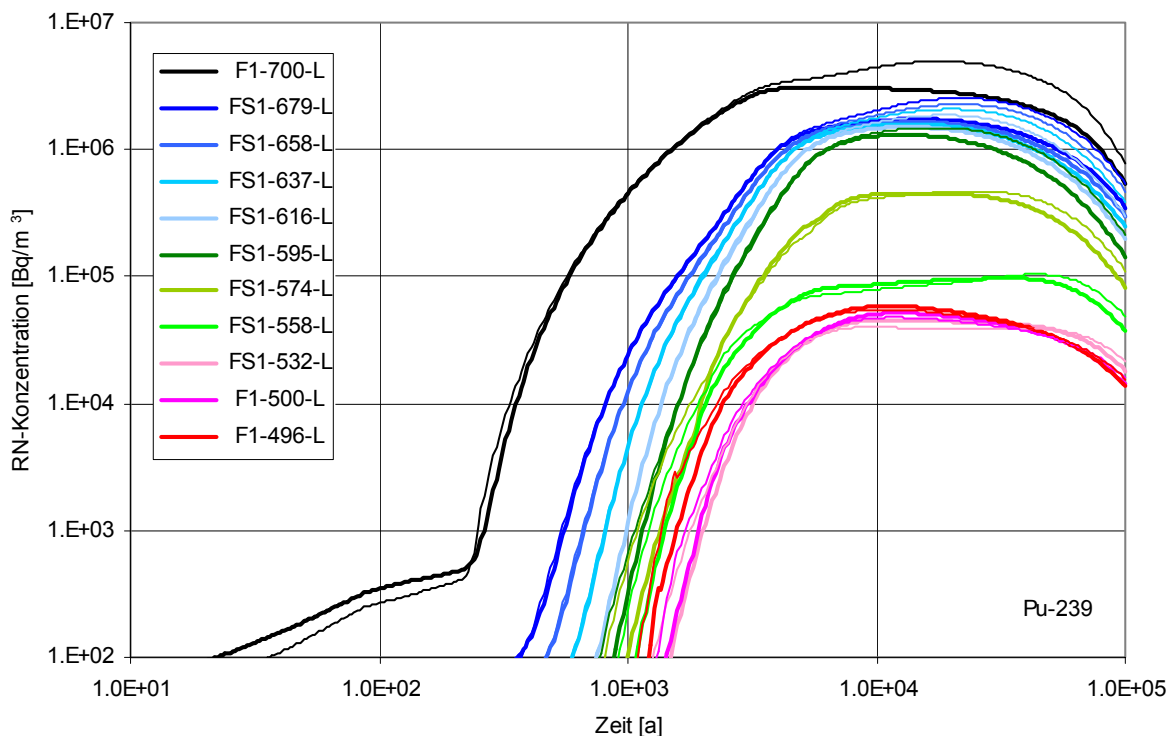


Abb. 5.11 Konzentration von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (RX.2 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

¹⁹ Diese Zeitpunkte unterscheiden sich wegen Modellierungsunterschieden in KAFKA und LOPOS geringfügig

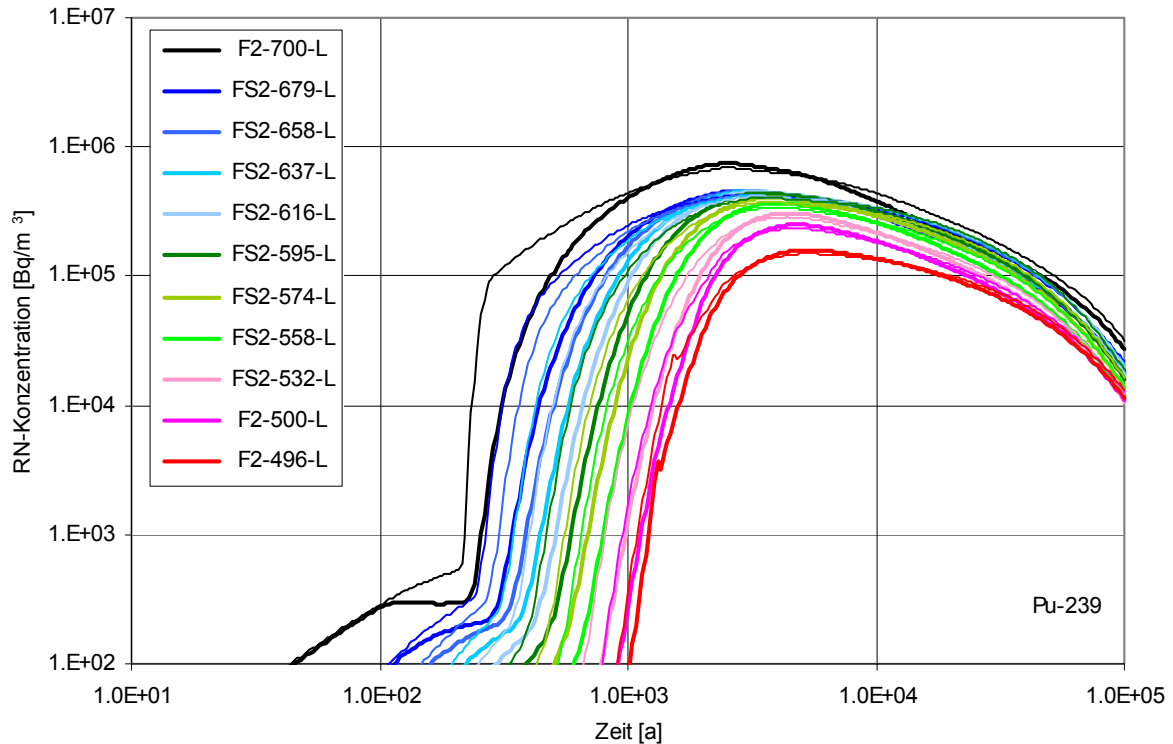


Abb. 5.12 Konzentration von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (RX.2 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Der im Rechenfall RX.2 gegenüber dem Vergleichsfall RX.1 größere Lösungsstrom von LAW1B zu F1-700 über V-LAW1B zeigt sich als leicht beschleunigt ansteigende Radionuklidkonzentration in F1-700. Da Pu-239 vorwiegend aus LAW1A stammt, zeigen sich die gegenüber dem Vergleichsfall verringerte Durchströmung von LAW1A und der dadurch verzögerte Transport (über AS2, den oberen Teil von Carn_s.w und die Verbindung H-Ca710B) in F2-700 als ein verzögerter Anstieg der Pu-239-Konzentration. Diese Verzögerung setzt sich in allen Segmenten des Oststrangs (F2/FS2-Segmente) fort.

5.1.3.4 Radionuklidfreisetzung aus der Grube

In Abb. 5.13 sind für den Rechenfall RX.2 – fette Linien – die Gesamt-Radionuklidströme ausgewählter Radionuklide aus der Grube dargestellt, welche der Berechnung des Transports im Deckgebirge zu den Exfiltrationsgebieten mit Hilfe der Transferfunktionen zu Grunde gelegt werden. Wie die Entwicklung der Radionuklidkonzentrationen im Oststrang des Baufelds in der Südflanke, ist die Entwicklung der Radionuklidströme gegenüber dem Referenzfall ab 100 Jahre gering verzögert. Ab etwa 2 000 Jahre sind die Unterschiede nur noch gering.

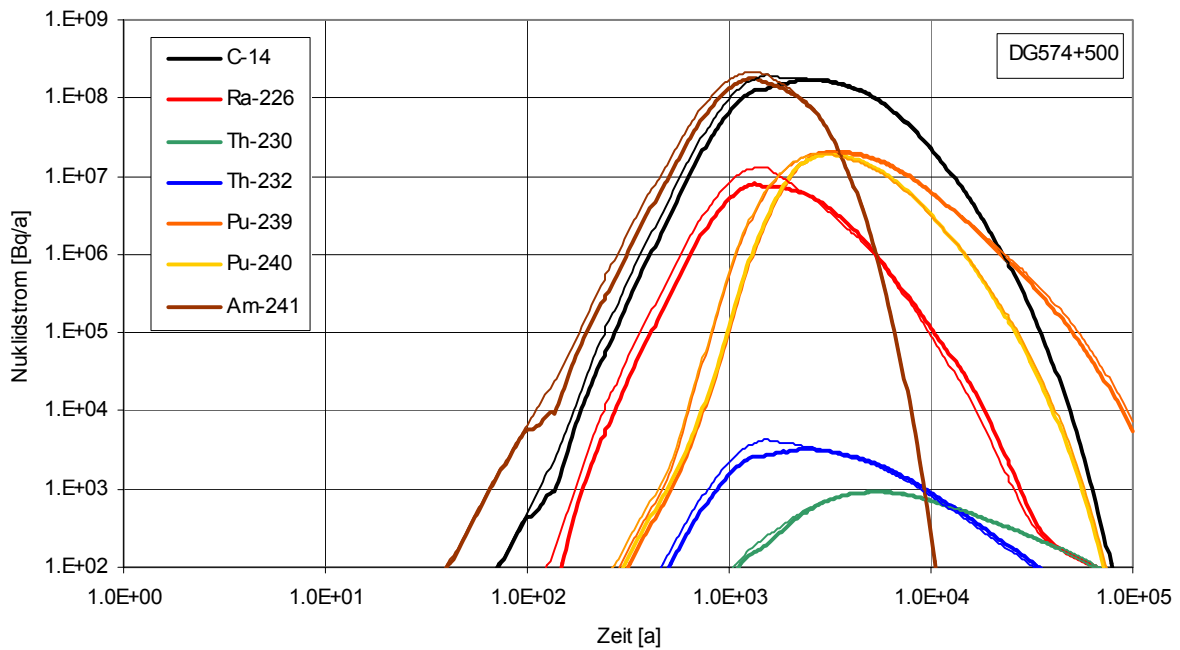


Abb. 5.13 Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube (RX.2 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

5.1.3.5 Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete

Abb. 5.14 zeigt für den Rechenfall RX.2 – fette Linien – einen Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells mit jenen des Vergleichsfalls – dünne Linien. Die bis etwa 10 000 Jahre leicht geringeren potenziellen Strahlenexpositionen in allen drei Exfiltrationsgebieten sind vor allem der bis etwa 2 000 Jahre geringeren Plutoniumfreisetzung in das Deckgebirge zuzuordnen. Tab. 5.2 gibt einen Überblick der Änderungen gegenüber dem Vergleichsfall.

Tab. 5.2 Größen und Zeitpunkte der Strahlenexpositionsmaxima für den Rechenfall RX.2 im Vergleich zum Vergleichsfall

DR13	Maximum der potenziellen Strahlenexposition [Sv/a]		Zeitpunkt des Maximums der Strahlenexposition [a]		Veränderung der Strahlenexposition im Maximum gegenüber dem Vergleichsfall
	Variante RX.2-L	Vergleichsfall	Variante RX.2-L	Vergleichsfall	
vD-Amm	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	2 100	2 100	- 30 %
m-Amm	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	10 000	10 000	- 10 %
m-Witt	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	24 000	23 000	-

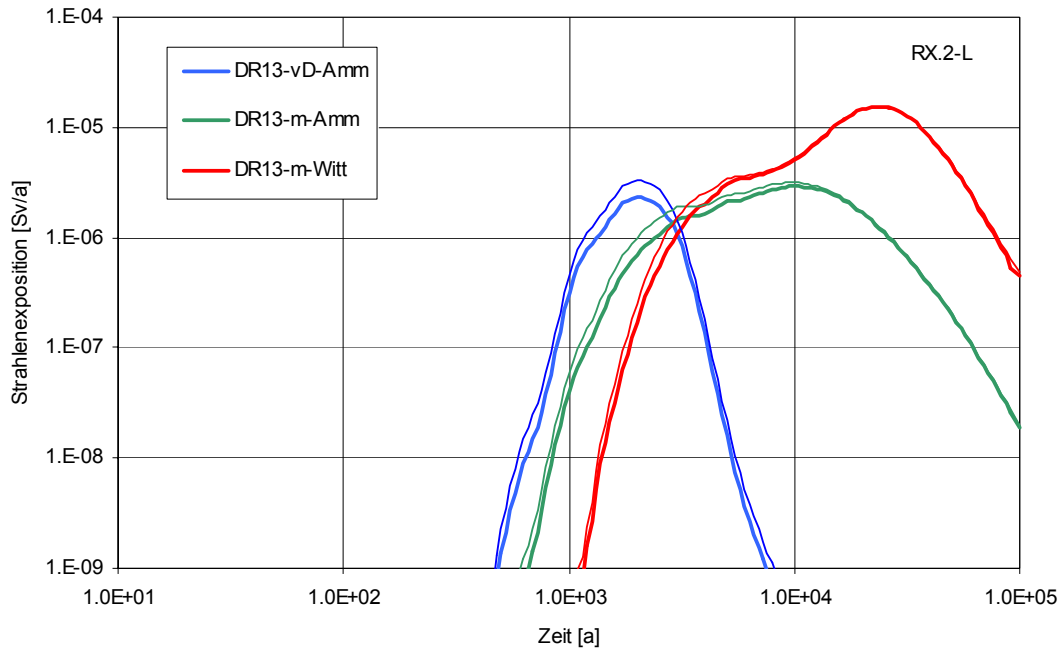


Abb. 5.14 Potenzielle Strahlendosis für die Exfiltrationsgebiete (RX.2 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

5.1.4 **Schlussfolgerungen zur Variante mit erhöhter Desintegration des Salzgesteins im Firstbereich von Abbau 6/725(Na2) (LAW1B) und ELK 12/750 (LAW4)**

In diesem Kapitel wurden die relevanten Ergebnisse des Rechenfalls RX.2 dargestellt und jenen des Vergleichsfalls RX.1 gegenübergestellt. Der Rechenfall RX.2 unterscheidet sich vom Vergleichsfall RX.1 lediglich betreffend der modellierten höheren Durchlässigkeit des Salzgesteins im Firstbereich von Abbau 6/725 (Na2) sowie von Einlagerungskammer 12/750 (vgl. Kap. 5.1.1).

Die Ergebnisse des Rechenfalls RX.2 führen zu den nachfolgenden Schlussfolgerungen:

- Die erhöhte Desintegration des Salzgesteins in der Firste von Abbau 6/725 (Na2) (LAW1B) und im Firstniveau von ELK 12/750 (LAW4) beeinflusst die Gasspeicherung und den Gasfluss aus LAW1B und LAW4, sowie auch den Lösungsaustausch zwischen LAW1A und LAW1B. Auf den Lösungsfluss sowie auf den Tracer- und Radionuklidtransport aus den anderen ELB haben diese Eigenschaften keinen Einfluss.
- In LAW1B ist das Gasspeichervolumen kleiner, da der Abfluss über den desintegrierten Firstbereich weniger behindert wird. Dadurch werden weniger Lösung verdrängt, der Lösungsdurchfluss in LAW1A verringert und in Folge dessen anfänglich weniger Tracer und Radionuklide ausgetragen. In der Folge sind die Zutritte von Tracern und Radionukliden aus LAW1A in das Baufeld in der Südflanke verzögert bzw. es erhöht sich die Verdünnung im Nahbereich der LAW1A. Diese Verzögerung und Verdünnung

setzen sich in den Entwicklungen der Radionuklidkonzentrationen im Oststrang des Baufeldes in der Südflanke, und in den Austritten über beide Modell-Austrittsstellen fort.

- Wegen des geringeren Gasspeichervermögens im Firstbereich von LAW4 kann Gas aus dem ELB schneller abfließen, und es werden über diesen Zeitraum aus dem ELB weniger Lösung, Tracer und Radionuklide verdrängt. Insgesamt werden dadurch die Konzentrationen im Deckgebirge und die resultierenden Strahlenexpositionen für die Exfiltrationsgebiete jedoch nur wenig verringert.
- Die Änderungen der Radionuklidkonzentrationen im Austritt aus der Grube wirken sich als mit der Zeit abklingende Abnahme der potenziellen Strahlenexposition in allen Exfiltrationsgebieten aus. Das Maximum bei 2 100 Jahren für das Exfiltrationsgebiet ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ nimmt um 30 %, das Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ bei 10 000 Jahren um 10 % ab. Das dominierende Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘, nun leicht verzögert bei 24 000 Jahren, bleibt unverändert.

5.2 Sorelbetonverfüllung im Grubenhöchsten

5.2.1 Beschreibung der Anpassungen

In der Steinsalzbarriere im Bereich der Abbaukante im Grubenhöchsten hat sich infolge der langen Standzeit eine Scherdeformation entwickelt [IfG 2006], durch die sich unter Umständen durchgehende Wegsamkeiten bis in das Deckgebirge entwickeln könnten. Zur Verhinderung stärkerer Deformationen während der Einleitung von Schutzfluid in das Grubengebäude werden deshalb die noch offenen Auffahrungen im Grubenhöchsten mit Sorelbeton anstatt mit Salzgrus verfüllt. Zudem werden der Zugang zum Tagesschacht auf der 553-m-Sohle sowie die Zugänge zu den Tagesschächten auf der 490-m-Sohle mit Sorelbeton verfüllt. Diese Maßnahmen fördern sowohl die Stabilisierung des Tragsystems im oberen Grubengebäude während der Schutzfluideinleitung als auch die Langzeitwirksamkeit der Schachtverschlüsse. Im Rechenfall RX.3 sind die Auswirkungen dieser Maßnahme, die Teil des Schließungskonzepts [GSF 2006b] ist, untersucht worden.

Die Änderungen auf Modellebene sind:

- auf der 490-m-Sohle bis ins Grubenhöchste (Modellsegmente oberhalb 490m): ein um 70 000 m³ reduziertes Hohlraumvolumen, davon 60% im Westen, 40% im Osten; mit unveränderter Anfangsporosität
- auf der 511-m-Sohle (Modellsegmente zwischen 511m und 490m): ein um 26 000 m³ reduziertes Hohlraumvolumen, davon 2/3 in Westen, 1/3 im Osten; mit unveränderter Anfangsporosität
- Zugänge zum Tagesschacht auf der 490-m-Sohle (Modellsegment H-MB490): Sorelbetonverfüllung mit effektiver Permeabilität $9,03 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$, Porosität 13%

- Zugang zum Tagesschacht auf der 553-m-Sohle (Modellsegment H-MB553): Sorelbetonverfüllung mit Permeabilität $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$, Porosität 13%

5.2.2 Modellergebnisse KAFKA (RX.3-K)

5.2.2.1 Gasspeicher und Gasflüsse im Grubengebäude

Im Rechenfall RX.3 entsprechen die effektiven residualen Gassättigungen jenen des Referenzfalls im Schlussbericht 2005 bzw. denen im Vergleichsfall RX.1-K.

Nach Einsetzen des Gasflusses aus den ELB und der Akkumulation im Grubenhöchsten des Baufeldes in der Südflanke wird der Porenraum der Bereiche oberhalb und einschließlich der Anschlusshöhe ins Deckgebirge (in 500 m Teufe) ab ca. 200 Jahren bis auf die residuale Lösungssättigung durch Gas gesättigt. Die Gassättigung dieser Modellsegmente erfolgt, beginnend im Grubenhöchsten und sukzessiv nach unten fortschreitend, aufgrund des geringeren Porenvolumens deutlich schneller als im Vergleichsfall RX.1-K (Abb. 5.15).

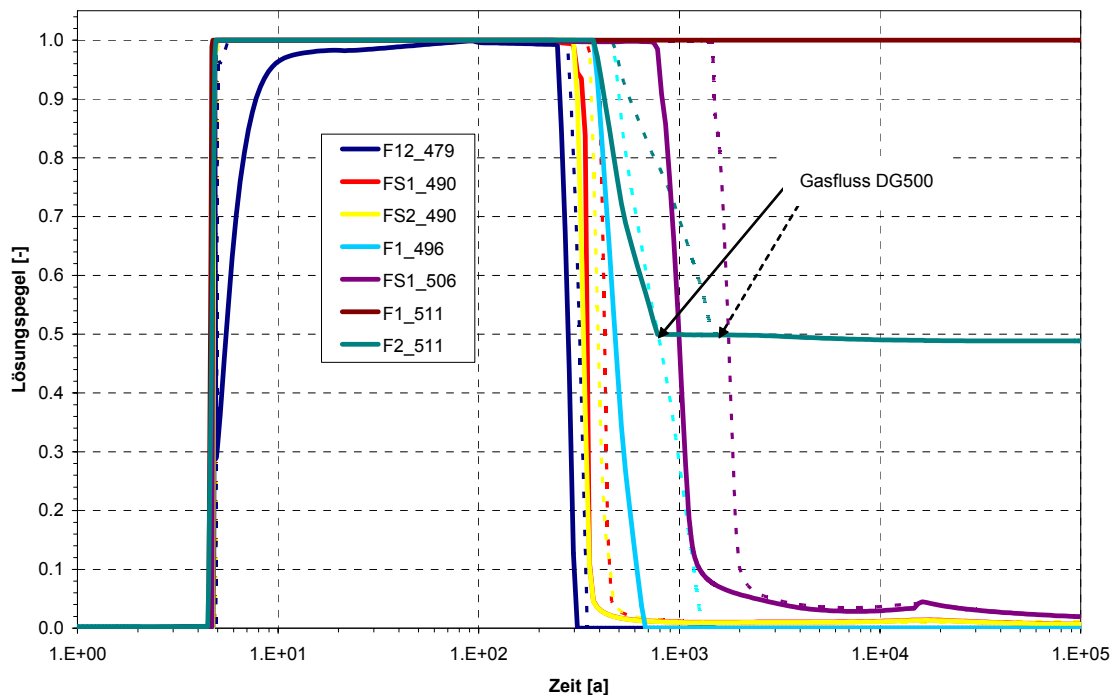


Abb. 5.15 Lösungspegel in den oberen Bereichen des Baufeldes in der Südflanke in RX.3-K (gestrichelt Vergleichsfall RX.1-K)

Weitere Abweichungen im zeitlichen Auftreten von Gaspolstern gegenüber dem Vergleichsfall sind nicht feststellbar. Die Mächtigkeit der Gaspolster stimmt mit jenen in RX.1-K überein. Entsprechend ergeben sich keine Änderungen der erhöhten effektiven residualen Gassättigungen gegenüber dem Vergleichsfall RX.1-K (vgl. Kap. 3.1.1.2).

Auch die Transportpfade für das Gas und die Zeitpunkte ihrer Aktivierung unterscheiden sich nicht vom Vergleichsfall. Lediglich der Gasfluss in das Deckgebirge setzt in RX.3-K bereits nach ca. 770 Jahren und damit etwa 700 Jahre früher ein als im Vergleichs- oder im Referenzfall RX.1-K (Abb. 5.16, oben). Lediglich in diesem Zeitraum zwischen den unterschiedlichen Gasfreisetzungen unterscheiden sich durch die Zweiphasenbeziehungen von Gas- und Lösungsfluss auch die Lösungsflüsse in das Deckgebirge geringfügig (Abb. 5.16, unten).

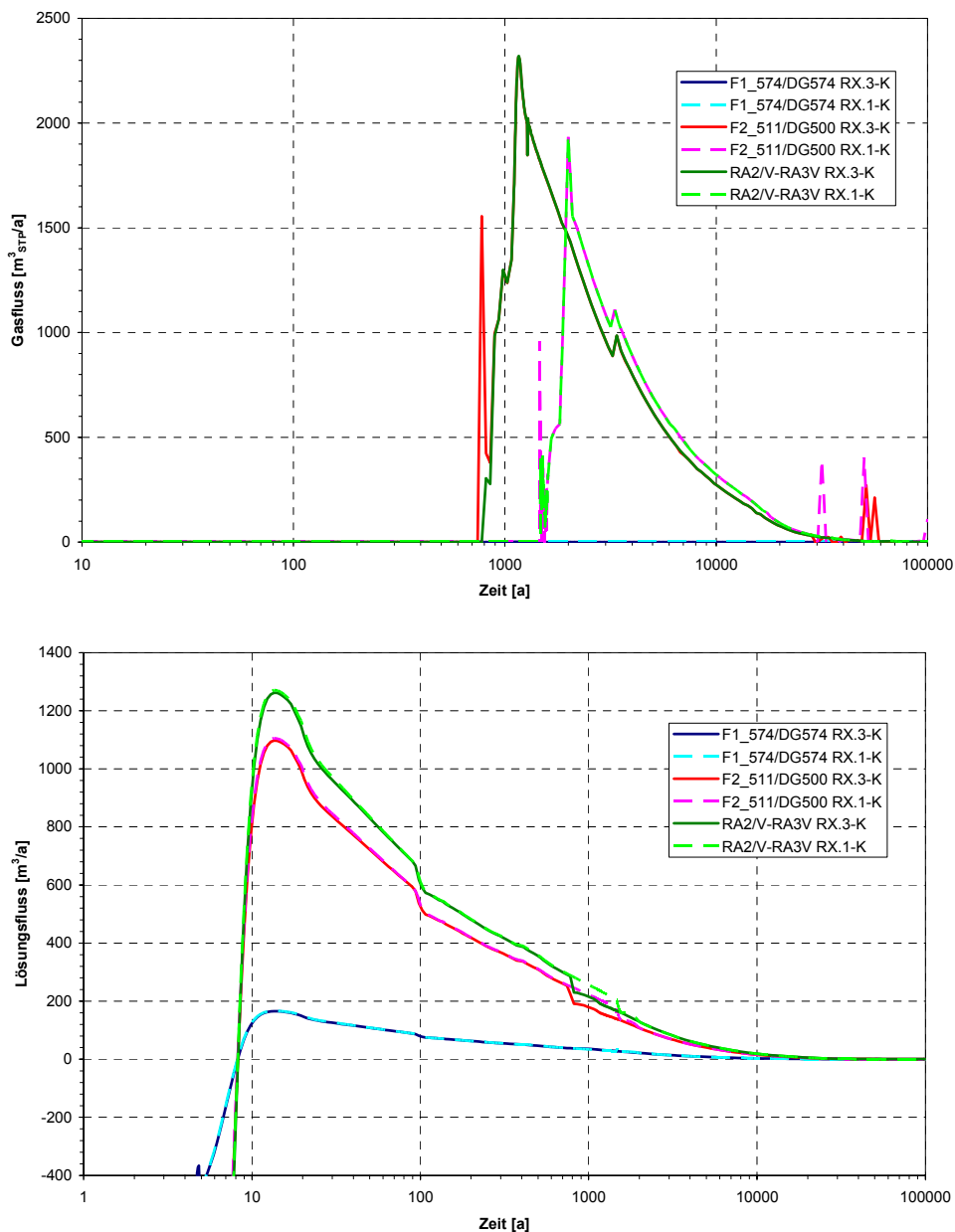


Abb. 5.16 Gas- und Lösungsflüsse aus dem Grubengebäude und im Deckgebirge in RX.3-K (gestrichelt Vergleichsfall RX.1-K)

5.2.2.2 Tracertransport im Grubengebäude und –übertritt in das Deckgebirge

Die Prozesse der Lösungsverdrängung aus den ELB und der Tracertransport im Nahbereich der ELB werden durch die Veränderung des Porenvolumens in den oberen Bereichen des Baufeldes in der Südflanke nicht beeinflusst.

Die frühere Entsättigung in den Sohlen des Baufeldes in der Südflanke oberhalb von 500 m Tiefe verhindert den Lösungsaustausch zwischen den Säulen der Ost- und Westflanke des Baufeldes in der Südflanke in diesen Teufen entsprechend früher. In deren Folge verringert sich in den Bereichen oberhalb 532 m die Konzentration der Tracer im sekundären Transportpfad im Baufeld in der Südflanke (Weststrang) gegenüber dem Vergleichsfall.

5.2.2.3 Tracerkonzentrationen und –flüsse im Deckgebirge

Auf die Flüsse und Konzentrationen der Tracer im Rötanhydrit haben die Änderungen im Porenvolumen des Baufeldes in der Südflanke nur vernachlässigbare Auswirkungen. Wie Tab. 5.3 zeigt, treten die maximalen Konzentrationsanstiege und die Maxima der Flüsse zu vergleichbaren Zeiten ein, und letztere haben praktisch unveränderte Beträge.

Tab. 5.3 Vergleich der Konzentrationsänderungen und der Maxima der Flüsse der X-Tracer zum Vergleichsfall

	Zeitpunkt des maximalen Konzentrationsanstiegs im Rötanhydrit [a]		Zeitpunkt des Maximums der Tracerflüsse [a]		Veränderung der Tracerflüsse im Maximum gegenüber dem Vergleichsfall
	Variante RX.3-K	Vergleichsfall	Variante RX.3-K	Vergleichsfall	
LAW1A	2 200	2 300	3 700	3 600	+1%
LAW1B	3 600	3 800	5 600	5 500	+1%
LAW2	8 500	8 700	10 700	10 500	-1%
LAW3	2 800	2 800	4 900	5 000	<1%
LAW4	6 800	6 600	8 500	9 100	<1%

5.2.2.4 Tracerkonzentrationen nach Transfer im Deckgebirge

Nach dem Transport im Deckgebirge ist keine nennenswerte Änderung der Tracerkonzentrationen in den Exfiltrationsgebieten zu erwarten (stellvertretend die X-Tracer in Abb. 5.17, die Einflüsse auf die Y-Tracer sind vergleichbar gering).

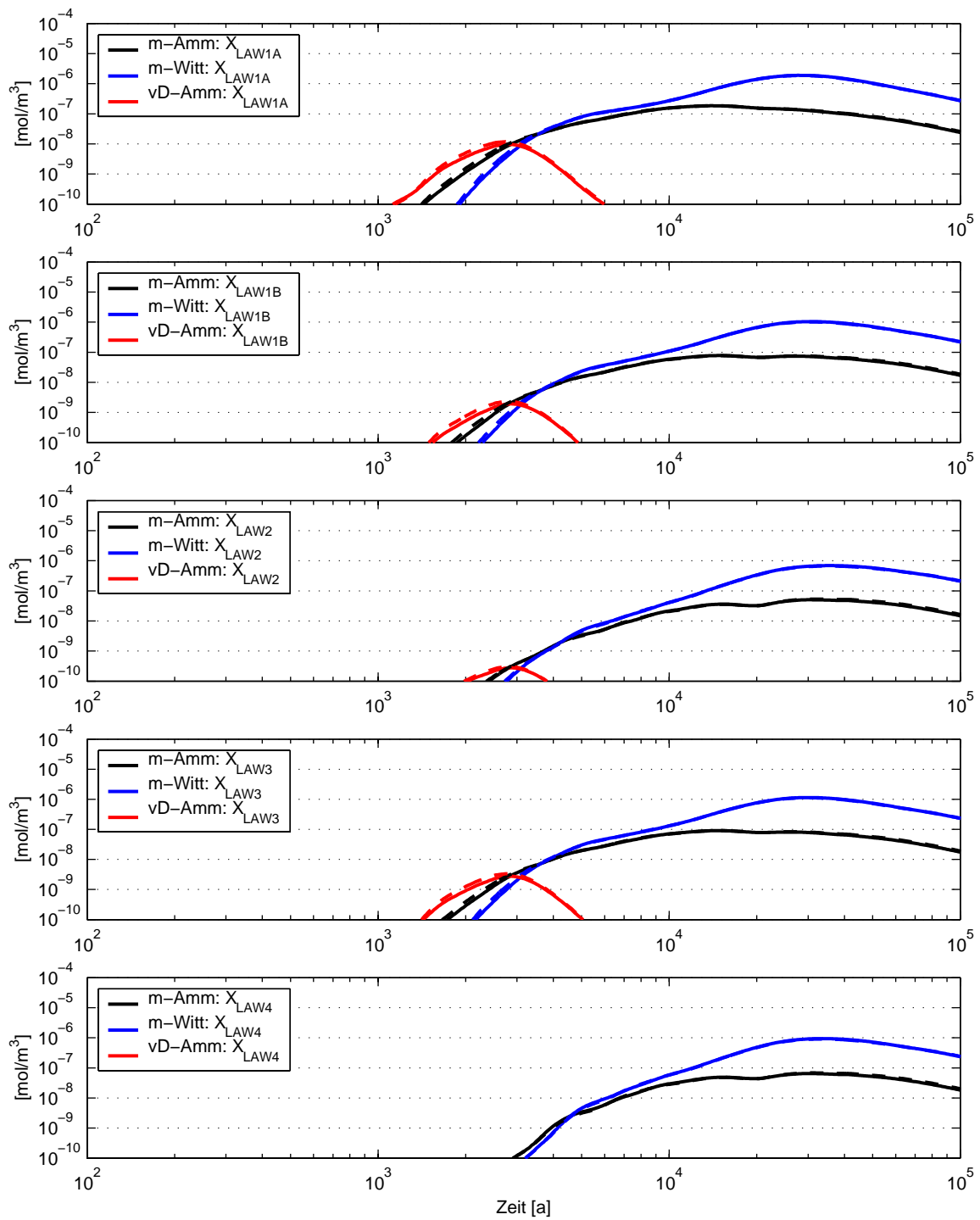


Abb. 5.17 X-Tracerkonzentrationen für die Exfiltrationsgebiete im Deckgebirge in RX.3-K (gestrichelt Vergleichsfall RX.1-K)

5.2.3 Modellergebnisse LOPOS (RX.3-L)

5.2.3.1 Radionuklidströme aus den Einlagerungsbereichen

Die Unterschiede in den Lösungsströmen in den Einlagerungskammern zwischen Rechenfall RX.3-L und dem Vergleichsfall RX.1-L sind immer von kurzer Dauer und beschränken sich auf die Perioden, die durch die unterschiedlichen Auffüllungszeiten der Grube mit Schutzfluid verursacht sind, d.h. die Periode zwischen 5 bis 9 Jahren²⁰, und die unterschiedlichen Auffüllungszeiten des Gasspeichers im Grubenhöchsten.

Da sich die Radionuklid-Quellterme des Rechenfalls RX.3 nicht von jenen des Vergleichsfalls RX.1 unterscheiden und auch die Lösungsströme in den Einlagerungsbereichen sehr ähnlich sind, entwickeln sich die Radionuklidkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen gleich. Deshalb ergeben sich zwischen Rechenfall RX.3-L und dem Vergleichsfall RX.1-L nur geringe Unterschiede in den Radionuklidströmen, welche durch die kurzzeitigen Unterschiede der Lösungsströme in den Einlagerungsbereichen bedingt sind. Wegen der kurzen Dauer dieser Unterschiede wirkt sich dies vernachlässigbar gering auf die Radionuklidtransporte aus den Einlagerungsbereichen in das Baufeld in der Südflanke aus.

5.2.3.2 Radionuklidkonzentrationen im Baufeld in der Südflanke

Für den Rechenfall RX.3 zeigen die Radionuklidkonzentrationen im Baufeld in der Südflanke lediglich geringe Abweichungen von jenen des Vergleichsfalls RX.1 für Segmente im und in der Nähe vom Grubenhöchsten, wo im Rechenfall RX.3 das Porenvolumen kleiner ist. Die kurzzeitig gering unterschiedlichen Radionuklidtransporte aus den Einlagerungsbereichen wirken sich nicht auf die Konzentrationsentwicklungen im Baufeld in der Südflanke aus.

5.2.3.3 Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete

Für den Rechenfall RX.3 unterscheiden sich die Radionuklidströme aus der Grube in das Deckgebirge nur sehr geringfügig von jenen für den Vergleichsfall RX.1. Nur zwischen 1 250 und 2 100 Jahren sind die Ströme geringfügig größer. Dadurch sind die Entwicklungen der Strahlenexpositionen für die drei Exfiltrationsgebiete ebenfalls fast unverändert. Abb. 5.18 zeigt für den Rechenfall RX.3 – fette Linien – einen Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells. Diese Entwicklungen weichen nur marginal von jenen des Vergleichsfalls – dünne Linien – ab. Tab. 5.4 gibt einen Überblick der Änderungen gegenüber dem Vergleichsfall.

²⁰ Wegen geringer Modellierungsunterschiede ist dieser Effekt in LOPOS etwas deutlicher ausgeprägt als in KAFKA

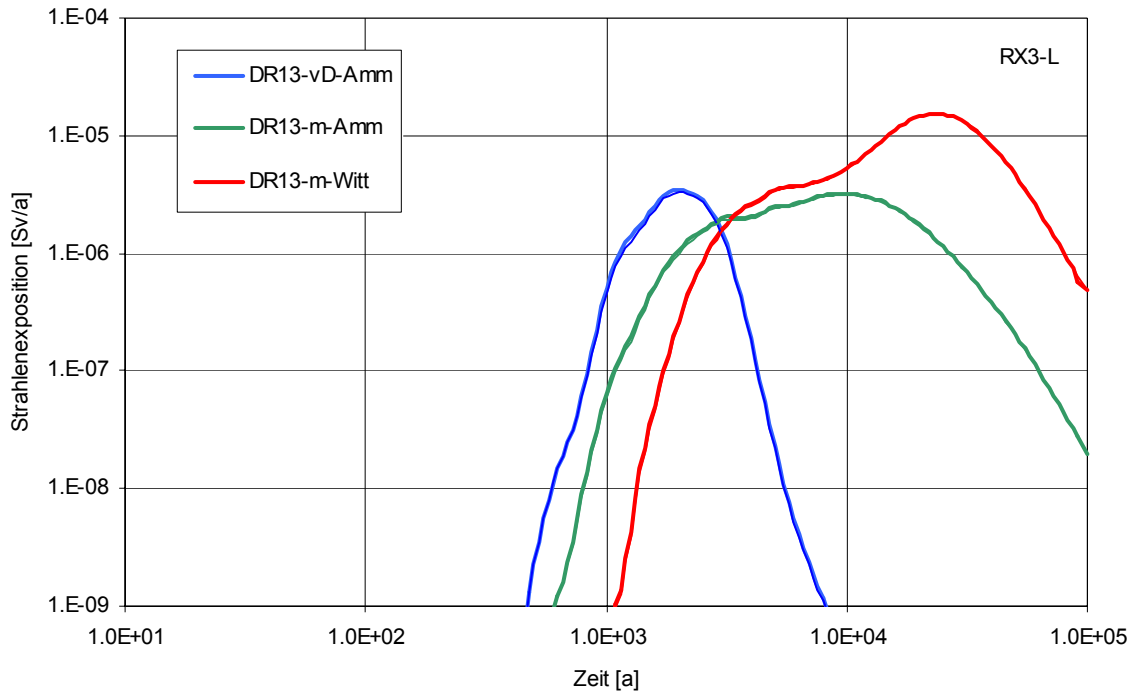


Abb. 5.18 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (RX.3 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 5.4 Größen und Zeitpunkte der Strahlenexpositionsmaxima für den Rechenfall RX.3 im Vergleich zum Vergleichsfall

DR13	Maximum der potenziellen Strahlenexposition [Sv/a]		Zeitpunkt des Maximums der Strahlenexposition [a]		Veränderung der Strahlenexposition im Maximum gegenüber dem Vergleichsfall
	Variante RX.3-L	Vergleichsfall	Variante RX.3-L	Vergleichsfall	
vD-Amm	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	2 000	2 100	+ 5 %
m-Amm	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	10 000	10 000	+ 5 %
m-Witt	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	23 000	23 000	-

5.2.4 Schlussfolgerungen für den Rechenfall mit Sorelbetonverfüllung im Grubenhöchsten

In diesem Kapitel wurden die relevanten Ergebnisse des Rechenfalls RX.3 dargestellt und jenen des Vergleichsfalls RX.1 gegenübergestellt. Der Rechenfall RX.3 unterscheidet sich vom Vergleichsfall lediglich betreffend (vgl. Kap. 5.2.1):

- der Verfüllung der noch offenen Auffahrungen im Grubenhöchsten auf der 511-m-Sohle und 490-m-Sohle mit Sorelbeton statt Salzversatz,

- der Verfüllung des Zugangs zum Tagesschacht auf der 553-m-Sohle bzw. der Zugänge zu den Tagesschächten auf der 490-m-Sohle mit Sorelbeton.

Die Ergebnisse des Rechenfalls RX.3 führen zu den nachfolgenden Schlussfolgerungen:

- Die durch die Verfüllung mit Sorelbeton verringerten Porenvolumina im Grubenhöchsten führen nach dem Aufstieg von Gas im Grubengebäude zu einer – ausgehend vom Grubenhöchsten – schnelleren Absenkung des Lösungsspiegels bis auf die Höhe der oberen Modellverbindung zum Deckgebirge auf 500 m Teufe und damit zu einer rascheren Gasfreisetzung aus dem Grubengebäude.
- Die geänderte Lösungsverdrängung im Grubenhöchsten hat sehr geringe Einflüsse auf die Lösungs-, Tracer- und Radionuklidtransporte im Grubengebäude. Dadurch sind auch die Auswirkungen auf die Tracer- und Radionuklidfreisetzung in das Deckgebirge, sowie – nach Transport im Deckgebirge – auf die Tracerkonzentrationen und Entwicklungen der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete sehr gering.

5.3 Aktualisierte Radionuklid-Quellterme

5.3.1 Beschreibung und Definition

Die spezifischen Quellterme für die einzelnen Einlagerungsbereiche sind wichtige Eingangsgrößen für die Berechnung der Konsequenzen einer potenziellen Freisetzung von Radionukliden auf dem Lösungspfad. Sie beschreiben die Konzentrationen der mobilisierten Elemente in den Lösungen der Einlagerungsbereiche, genauer: in den Lösungen, die aus den Einlagerungsbereichen heraus transportiert werden. Diese Konzentrationen können inventarbestimmt oder durch maximal mögliche Elementkonzentrationen begrenzt sein. Die Quellterme ergeben sich bei einem herrschenden geochemischen Milieu durch die Löslichkeitsbegrenzung der Elemente und in wenigen Fällen durch Sorptionseffekte. Die Kinetik der Radionuklidfreisetzung wird dabei nicht berücksichtigt. Im Schlussbericht 2005 wurden die Quellterme für die LAW-Einlagerungsbereiche auf Basis von kammer-spezifischen Quelltermen abgeleitet, wobei in der Regel der jeweils größte Wert für die maximal mögliche Elementkonzentration in den einzelnen Einlagerungskammern eines Einlagerungsbereiches für den gesamten Einlagerungsbereich angesetzt worden ist.

Durch weiterführende Untersuchungen sowohl zum Mobilisierungsverhalten bestimmter Elemente unter den geochemischen Bedingungen, die in den Einlagerungskammern der Schachtanlage Asse II herrschen, sowie zum Lösungsaustausch zwischen den einzelnen Kammern der Einlagerungsbereiche sind im Anschluss an den Schlussbericht zusätzliche Erkenntnisse gewonnen worden, die bei der Aktualisierung der spezifischen Quellterme für die Einlagerungsbereiche berücksichtigt worden sind [INE 2006], [ALSA-C 2005a].

So zeigte sich, dass in CaCl_2 -betonten Lösungen bei pH-Werten > 9 deutlich höhere Thoriumlöslichkeiten als bisher unterstellt nicht auszuschließen sind. Außerdem können in alkalischen Lösungen höhere Americiumkonzentrationen auftreten. Die Plutonium-

konzentrationen hängen vom Redoxmilieu und pH-Wert der Lösung sowie von der Lösungszusammensetzung, insbesondere der Carbonatkonzentration ab. Unter schwach reduzierenden Bedingungen ist im alkalischen Bereich zwischen 6 und 8 nicht eindeutig anzugeben, ob die Plutoniumlöslichkeit durch Pu(IV) oder durch Pu(III) bestimmt wird. Außerdem ist für die Einlagerungskammer 2/750Na2 eine Versauerung des geochemischen Milieus nicht auszuschliessen und ist dadurch von deutlich höheren Löslichkeiten für die radioaktiven Elemente auszugehen.

Jeder Einlagerungsbereich der Schachanlage Asse II besteht aus einer bestimmten Anzahl von Einlagerungskammern und sonstigen Grubenbauen. Diese werden im Strukturmodell, das den sicherheitsanalytischen Modellrechnungen zugrunde liegt, in einem Modellsegment zusammengefasst. Im Laufe der Zeit kommt es in den Einlagerungsbereichen zu Lösungsströmen zwischen benachbarten Grubenbauen. Diese werden durch Lösungsverdrängung infolge der Konvergenz der Grubenbaue, durch Gasspeicherung in Grubenbauen sowie durch Konvektionsbewegungen verursacht, die durch die sich einstellenden Dichteunterschiede in Grubenbauen ausgelöst werden. Die Prozesse bewirken auch das Auspressen von Lösung aus den Einlagerungsbereichen. In der Regel ist zu erwarten, dass Lösungen aus einem Einlagerungsbereich über verschiedene, parallele Wege – aus einer Kammer oder auch aus mehreren Grubenbauen – abfließen können. Bei der Aktualisierung der spezifischen Quellterme für jeden Einlagerungsbereich [ALSA-C 2006b] ist dies genauso berücksichtigt worden wie die Möglichkeit, dass die einzelnen Einlagerungskammern eines Einlagerungsbereichs unterschiedliche Radionuklidquellterme aufweisen.

Für den Radionuklidtransport aus einem Einlagerungsbereich sind nur die Lösungsmengen mit den zugehörigen Radionuklidkonzentrationen entscheidend, die aus den einzelnen Kammern dieses Einlagerungsbereiches in die übrige Grube abfließen²¹. Diese Mengen bestimmen in ihrer Summe den Quellterm [ALSA-C 2006b]. Sollten die Konzentrationen eines Elementes dabei durch Löslichkeitsgrenzen oder Sorptionseffekte begrenzt sein, können wegen des unterschiedlichen geochemischen Milieus in verschiedenen Kammern eines Einlagerungsbereiches Lösungen mit unterschiedlichen Radionuklidkonzentrationen abfließen. Lösungsmengen, die in benachbarte Kammern desselben oder eines anderen Einlagerungsbereiches fließen, tragen nicht direkt zum Quellterm eines Einlagerungsbereiches bei und werden deshalb hier auch nicht berücksichtigt. Ihr Einfluss kann indirekter Natur sein, in dem das geochemische Milieu in der Kammer, in die die Lösung abfließt, verändert wird. Derartige Effekte werden bei der zeitlichen Entwicklung des geochemischen Milieus berücksichtigt.

5.3.2 Modellparameter

Unter Berücksichtigung der Stoffinventare wurden für die einzelnen Einlagerungskammern das sich einstellende geochemische Milieu sowie spezifische Löslichkeitskonzentrationen für die Elemente berechnet und zusätzlich Plutonium- und Americium-Sorptionskonzentrationen für einige Kammern angegeben. Diese Werte sind in [INE 2006] dokumentiert. Aussagen zur

²¹ Der Begriff „übrige Grube“ bezieht sich in diesem Kapitel immer auf Grubenbaue, die nicht zu den Einlagerungsbereichen gehören.

zeitlichen Entwicklung des geochemischen Milieus aufgrund der zufließenden Lösungen aus benachbarten Grubenbauen basieren ebenfalls auf geochemischen Modellrechnungen.

Basierend auf den Modellrechnungen für die LAW-Detailmodelle [ALSA-C 2005a] wurden die bei den einzelnen Grubenbauen der Einlagerungsbereiche zu- und abfließenden Lösungsmengen jeweils für fünf Zeiträume t_i ($t_1 = 0 - 977$ a, $t_2 = 977 - 2951$ a, $t_3 = 2951 - 9772$ a, $t_4 = 9772 - 29\,512$ a und $t_5 = 29\,512 - 100\,000$ a) berechnet [ALSA-C 2005b]. Auf Basis dieser Zahlen wird ermittelt, welchen relativen Anteil A_{ELK,t_i} eine bestimmte Einlagerungskammer in jedem Zeitraum an der Gesamtmenge an abfließender Lösung aus dem Einlagerungsbereich besitzt. Lösungsmengen, die in die übrigen Grubenbaue über benachbarte Grubenbaue, die selbst keine Einlagerungskammern sind, abfließen, wurden bei den ursprünglichen Einlagerungskammern berücksichtigt.

Auf Basis der relativen Beiträge der einzelnen Einlagerungskammern eines Einlagerungsbereiches zur Gesamtmenge an abfließender Lösung sowie der jeweiligen, kammer-spezifisch ermittelten maximal möglichen Elementkonzentration $C_{\max}(el)_{ELK,t_i}$ wird für jeden Zeitraum t_i die maximal mögliche Gesamtkonzentration des Elementes $c(el)_{ELB,t_i}$ in der Lösung bestimmt, die in dem Zeitraum aus dem Einlagerungsbereich in die übrige Grube abfließt:

$$c(el)_{ELB,t_i} = \sum_{ELK} (C_{\max}(el)_{ELK,t_i} \cdot A_{ELK,t_i}) \quad (5.1)$$

Dieser Zahlenwert für den Quellterm unterscheidet sich für die verschiedenen Zeiträume t_i . Um einen einheitlichen Zahlenwert für alle Zeiträume verwenden zu können, wird der maximale Wert für die verschiedenen Zeiträume t_i verwendet und auf die nächste Nachkommastelle aufgerundet. Ausnahmen von dieser generellen Vorgehensweise bestehen in den Fällen, in denen aufgrund eines Wechsels im geochemischen Milieu sich sehr starke Änderungen in elementspezifischen maximalen Konzentrationswerten ergeben: Da dies zu unnötigen Überschätzungen des Quellterms in bestimmten Zeiträumen führen würde, werden hier zeitraum-spezifisch unterschiedliche Quellterme nach der hier beschriebenen Vorgehensweise ermittelt. Damit wird sichergestellt, dass man abdeckende Quellterme ableitet, die trotzdem nicht in übermäßiger Weise konservativ sind. Die Herleitung der Quellterme für die Einlagerungsbereiche ist in [ALSA-C 2005b] erläutert.

Für einige Einlagerungskammern ist davon auszugehen, dass die Inventare für bestimmte Elemente so klein sind, dass sie bei vollständiger Mobilisierung bei den herrschenden Volumenverhältnissen die thermodynamisch maximal mögliche Elementkonzentration nicht erreichen, die durch die Löslichkeit oder durch Sorptionseffekte bestimmt wird. Solche Elemente sind dann in diesen Kammern inventarbestimmt. Bei der Ableitung der Quellterme wird dieser Aspekt berücksichtigt, indem diese Elemente auch für die Einlagerungsbereiche als inventarbestimmt angesetzt werden. Die abgeleiteten Quellterme umfassen also die Gesamtheit der inventarbestimmten Elemente und derjenigen Elemente, für die Obergrenzen als maximal mögliche Konzentrationen ermittelt wurden. In den sicherheitsanalytischen Modellrechnungen wird auf der Basis der kammer-spezifischen Inventare und des aktuellen

Lösungsvolumens jeweils eine Konzentration für die radioaktiven Elemente errechnet, die gegebenenfalls durch die maximal möglichen Elementkonzentrationen begrenzt wird.

Anhand der oben dargestellten Berechnungsmethode wurden für die Einlagerungsbereiche die maximal möglichen Elementkonzentrationen sowie deren obere und untere Bandbreiten ermittelt, die in Tab. 5.5 zusammengefasst angegeben sind. Beim MAW-Bereich beziehen sich die Ergebnisse auf die Annahme, dass der Lösungspegel ca. 85 % des fluid-zugänglichen Hohlraums ausfüllt.

Wenn in Tab. 5.5 zwei Werte angegeben sind, entspricht der obere Wert der maximal möglichen Elementkonzentration in dem Zeitraum, in dem das anfängliche geochemische Milieu weitgehend unverändert bleibt, so dass sich keine Auswirkungen auf die maximal möglichen Elementkonzentrationen ergeben. Im Einlagerungsbereich LAW2 ist dies im Zeitraum bis 3 000 Jahre der Fall, im LAW3 bis 30 000 Jahre. Der untere Wert der maximal möglichen Konzentrationen gibt die maximal möglichen Konzentrationen für den anschließenden Zeitbereich wieder. Die Auswirkung der Unsicherheitsbandbreite der maximal möglichen Elementkonzentrationen, welche im Allgemeinen etwa eine Größenordnung nach oben und nach unten beträgt, wird in Kapitel 5.7 untersucht.

Die Vorgehensweise für die Ableitung von Quelltermen für die Einlagerungsbereiche bietet die folgenden Vorteile:

- Die Strömungsvorgänge zwischen den Grubenbauen und ihr möglicher Einfluss auf das geochemische Milieu sowie dessen zeitliche Entwicklung in den Einlagerungskammern werden berücksichtigt.
- Es werden nur die Lösungsmengen mit ihren Konzentrationen berücksichtigt, die aus den Einlagerungsbereichen in die übrigen Grubenbaue abfließen und damit tatsächlich zu einem Transport von Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen heraus beitragen.
- Die Einführung zusätzlicher Konservativitäten wird weitgehend vermieden, da die maximal mögliche Elementkonzentration praktisch der höchsten berechneten bzw. experimentell bestimmten Konzentration in dem Zeitbereich entspricht, für den das geochemische Milieu gültig ist. Die berechneten Konzentrationen bei den übrigen Zeitpunkten liegen in der Regel bei ähnlichen Werten und sind nie kleiner als ein Drittel dieses Wertes [ALSA-C 2005b].
- Die berechneten Zahlenwerte für den Quellterm reagieren relativ unempfindlich auf Änderungen in den Lösungsmengen, die aus einer bestimmten Kammer abfließen. Die Berücksichtigung relativer Lösungsmengen dämpft den Einfluss individueller Strömungsmengen.

Tab. 5.5 Aktualisierte maximal mögliche Elementkonzentrationen [mol/(kg H₂O)] in den Einlagerungsbereichen nach [ALSA-C 2005b]

		LAW1A	LAW1B	LAW2	LAW3	LAW4	MAW
Am	Referenzwert	3,4E-5	5,0E-8	5,0E-8	7,8E-7	6,0E-8	7,0E-8
	obere Bandbr.	3,4E-4	5,0E-7	5,0E-7	7,8E-6	6,0E-7	7,0E-7
	untere Bandbr.	3,4E-6	5,0E-9	5,0E-9	7,8E-8	6,0E-9	7,0E-9
Pu	Referenzwert	3,0E-5	5,0E-8	5,0E-8	3,0E-8 8,5E-8*	1,0E-8	1,0E-8
	obere Bandbr.	3,0E-4	5,0E-7	5,0E-7	3,0E-7 8,5E-7*	1,0E-7	1,0E-7
	untere Bandbr.	3,0E-6	5,0E-9	5,0E-9	3,0E-9 8,5E-9*	1,0E-9	1,0E-9
Np	Referenzwert	7,0E-1	1,0E-3	9,4E-4 3,2E-2**	5,0E-4 2,5E-3*	3,0E-4	3,0E-4
	obere Bandbr.	7	1,0E-2	9,4E-3 3,2E-1**	5,0E-3 2,5E-2*	3,0E-3	3,0E-3
	untere Bandbr.	7,0E-2	1,0E-4	9,4E-5 3,2E-3**	5,0E-5 2,5E-4*	3,0E-5	3,0E-5
Ra	Referenzwert	5,0E-6	2,0E-6	1,5E-4 5,2E-2**	1,6E-3 1,5E-1*	5,0E-6	7,0E-6
	obere Bandbr.	5,0E-5	2,0E-5	1,5E-3 5,2E-1**	1,6E-2 1,5*	5,0E-5	7,0E-5
	untere Bandbr.	5,0E-7	2,0E-7	1,5E-5 5,2E-3**	1,6E-4 1,5E-2*	5,0E-7	7,0E-7
Th	Referenzwert	5,0E-7	5,0E-7	5,0E-7	7,7E-5	5,0E-7	5,0E-7
	obere Bandbr.	5,0E-6	5,0E-6	5,0E-6	7,8E-5	5,0E-6	5,0E-6
	untere Bandbr.	5,0E-8	5,0E-8	5,0E-8	7,7E-6	5,0E-8	5,0E-8
Sr	Referenzwert	8,0E-5	3,0E-4	1,1E-2	3,2E-2	2,0E-4	2,0E-4
	obere Bandbr.	8,0E-4	3,0E-3	1,1E-1	3,2E-1	2,00E-3	2,0E-3
	untere Bandbr.	8,0E-6	3,0E-5	1,1E-3	3,2E-3	2,00E-5	2,0E-5
U	Referenzwert	4,0E-6	4,0E-6	4,0E-6	4,0E-6	4,0E-6	4,0E-6
	obere Bandbr.	4,0E-6	4,0E-6	4,0E-6	4,0E-6	4,0E-6	4,0E-6
	untere Bandbr.	4,0E-7	4,0E-7	4,0E-7	4,0E-7	4,0E-7	4,0E-7

* der zweite Wert gilt ab 30 000 a, ** der zweite Wert gilt ab 3 000 a

- Nur in wenigen Fällen führt die zeitliche Änderung des geochemischen Milieus dazu, dass für einige Elemente ab bestimmten Zeitpunkten andere, höhere maximal mögliche Elementkonzentrationen gelten. Die höheren maximal möglichen Elementkonzentrationen werden dabei im Fall der Elemente Np und Ra keine Auswirkungen auf die Ergebnisse der Transportmodellierungen haben, da die Inventare in den jeweiligen Einlagerungskammern bereits bei den niedrigeren maximal möglichen Elementkonzentrationen nicht ausreichen, um die Löslichkeitsgrenze zu erreichen.
- Die Referenzwerte sowie die oberen und unteren Bandbreitenwerte werden in konsistenter Weise abgeleitet.

Diesen Vorteilen steht gegenüber, dass der Modellierung der Lösungsaustauschvorgänge zwischen den Grubenbauen bei der gewählten Berechnungsweise eine gewisse Bedeutung zukommt. Hier nicht berücksichtigte, in den Einlagerungskammern ablaufende Prozesse können eventuell die Gesamtmenge der in die übrige Grube transportierten Lösungen und Radionuklide beeinflussen. Eine detaillierte Betrachtung der Auswirkungen solcher denkbarer Prozesse zeigt jedoch, dass die abgeleiteten Zahlenwerte für die maximal möglichen Elementkonzentrationen robust reagieren [ALSA-C 2005b].

5.3.3 Modellergebnisse LOPOS (RX.4-L)

Da dieser Rechenfall lediglich in Bezug auf die Radionuklidquellterme vom Vergleichsfall RX.1 abweicht, sind die Lösungs-, Gas- und Tracertransporte in diesem Rechenfall gegenüber dem Vergleichsfall unverändert, für welche auf Kap. 3.2 verwiesen sei. Die Unterschiede gegenüber dem Vergleichsfall beschränken sich also auf die Entwicklungen der Element- und Radionuklidkonzentrationen, sowohl in den Einlagerungsbereichen und den Segmenten im Transportpfad als auch im Lösungsaustritt in das Deckgebirge.

5.3.3.1 Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen

Die aktualisierten Radionuklidquellterme wirken sich unmittelbar auf die Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen aus. Ausführlich werden die Änderungen in der kombinierten Variante (Rechenfall RX.5) diskutiert, bei der neben den aktualisierten Radionuklidquelltermen auch die Änderungen berücksichtigt werden, die Gegenstand der Rechenfälle RX.2 und RX.3 sind. Darum wird hier für die Darstellung der zeitlichen Entwicklungen der Elementkonzentrationen auf Kap. 5.4.3.1 verwiesen. Die wesentlichen Auswirkungen der aktualisierten Radionuklidquellterme auf die Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen sind nachfolgend zusammengefasst:

- In LAW1A sind bis 200 Jahre die Konzentrationen von Uran und Plutonium um mehrere Größenordnungen höher. Ab 50 Jahre nimmt die Plutoniumkonzentration durch Zufuhr aus LAW1B noch geringfügig zu. Nach 200 Jahren beträgt der Unterschied gegenüber dem Vergleichsfall für Plutonium nur noch einen Faktor 2, während die Konzentration von Uran dann um etwa den Faktor 6 höher ist. Die höhere Urankonzentration kann sich

jedoch nur über Zerfall über das langlebige Tochternuklid Th-230 (Halbwertszeit 74 000 a), das selber nicht eingelagert wurde, auf die Strahlenexposition auswirken.

- In LAW1B sind die Konzentrationen von Uran und Plutonium um etwa 2,5 bzw. 3,5 Größenordnungen höher.
- Die Änderungen in LAW2 sind vergleichbar mit jenen in LAW1A.
- In LAW3 ist die Plutoniumkonzentration um etwa 3,5 Größenordnungen, die Thorium- und Urankonzentrationen sind um den Faktor 150 bzw. 2 höher.
- In LAW4 ist die Konzentration von Plutonium bis 200 Jahre, im Vergleichsfall der Zeitpunkt des Milieuwechsels, um 3 Größenordnungen höher, danach unverändert. Die Urankonzentration ist über den gesamten Betrachtungszeitraum um 1 Größenordnung höher. Im Gegensatz zum Vergleichsfall ist Americium nun löslichkeitsbegrenzt, wodurch bis 1 000 Jahre die Americiumkonzentration nun bis 1 Größenordnung geringer ist.

In Tab. 3.2 sind die Zeitpunkte des Erreichens und ggf. wieder Unterschreitens der maximal möglichen Elementkonzentrationen für den Rechenfall RX.4 aufgelistet.

Tab. 5.6 Erreichen und Unterschreiten der maximal möglichen Konzentrationen [a]

RX.4	U		Pu		Th		Np		Am	
	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis
LAW1A	0,0	> 10 ⁵	-	-	0,0	> 10 ⁵				
LAW1B	0,0	> 10 ⁵	3,9	39 800	0,0	> 10 ⁵				
LAW2	0,0	> 10 ⁵	3,9	9 770	0,0	> 10 ⁵				
LAW3-O	0,4	> 10 ⁵	0,9	> 10 ⁵	1,4	> 10 ⁵	-	-	-	-
LAW3-W	0,1	> 10 ⁵	0,9	> 10 ⁵	0,2	> 10 ⁵	-	-	-	-
LAW4-O	0,0	> 10 ⁵	0,1	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵			3,6	1 450
LAW4-W	0,0	> 10 ⁵	0,1	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵			3,6	1 450

Änderungen gegenüber dem Vergleichsfall RX.1 sind fett hervorgehoben (Zellen ohne Eintrag: maximal mögliche Elementkonzentration wurde – unverändert – nicht erreicht)

In der obigen Tabelle sind die Änderungen gegenüber dem Vergleichsfall RX.1 fett hervorgehoben:

- Wegen der gegenüber dem Vergleichsfall höheren Werte der maximal möglichen Elementkonzentrationen wird diese Konzentration in LAW1A für Plutonium und in LAW3 für Neptunium und Americium nun nicht mehr erreicht, bzw. in LAW1B und LAW2 für Plutonium nun früher wieder unterschritten;
- In LAW4 wird die gegenüber dem Vergleichsfall niedrigere maximal mögliche Elementkonzentration für Americium nun bis 1 450 Jahre erreicht.

5.3.3.2 Radionuklidkonzentrationen im Baufeld in der Südflanke

Die höheren Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen wirken sich als ebenfalls höhere Radionuklidkonzentrationen im Baufeld in der Südflanke aus. In Abb. 5.19 und Abb. 5.20 sind die zeitlichen Entwicklungen der Radionuklidkonzentrationen für Pu-239 in ausgewählten Segmenten vom westlichen bzw. östlichen Strang des Baufeldes in der Südflanke dargestellt. Der beschleunigte Anstieg sowie auch die im Maximum um etwa den Faktor 3 höheren Pu-239-Konzentrationen im Baufeld in der Südflanke sind offensichtlich den höheren Plutoniumkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen zuzuordnen.

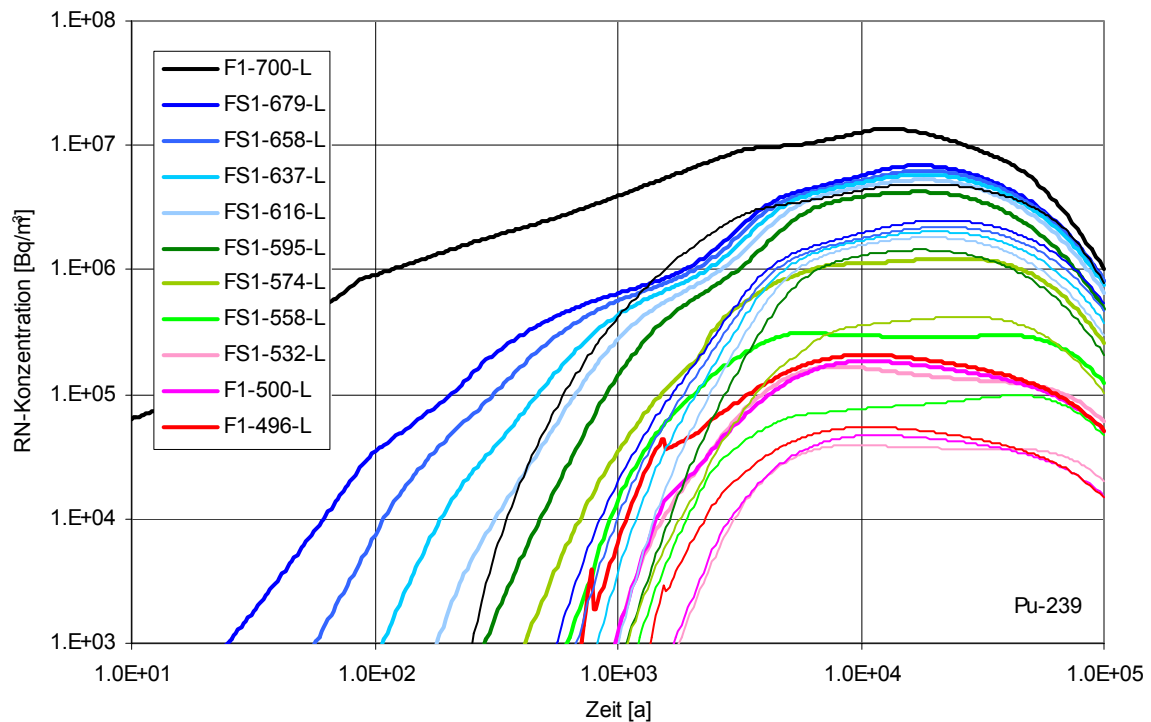


Abb. 5.19 Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (RX.4 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

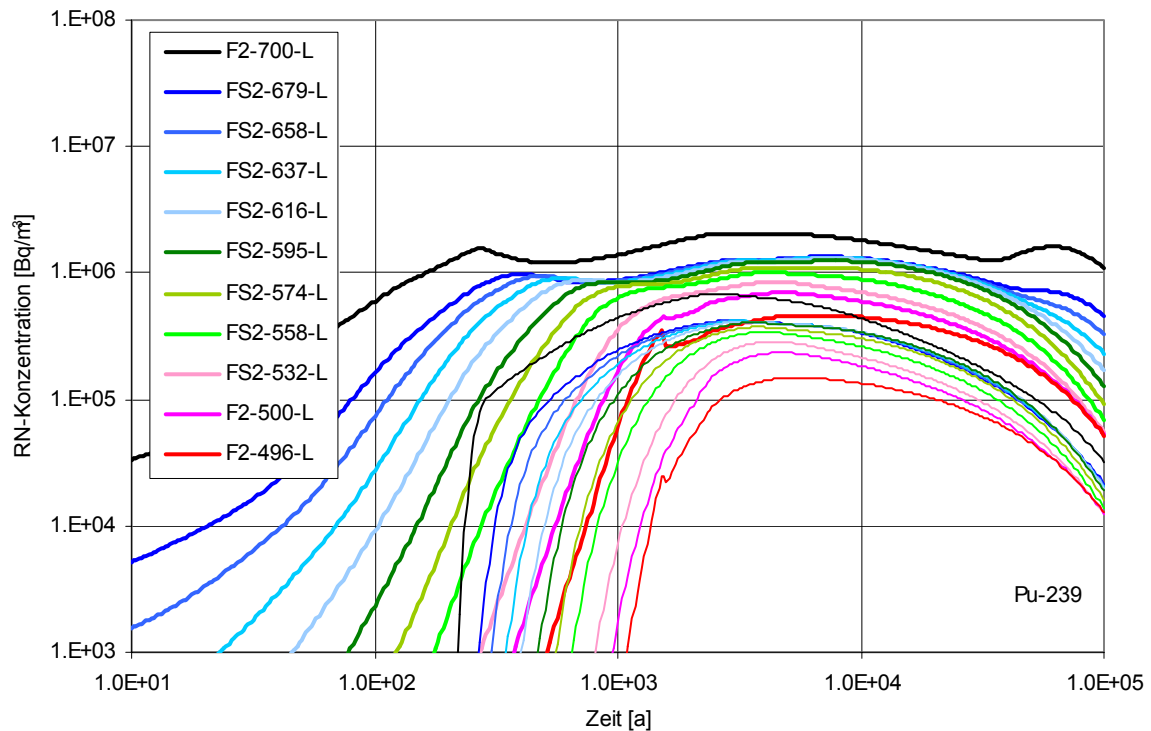


Abb. 5.20 Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (RX.4 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Die Änderungen der Konzentrationsentwicklungen für Americium und Radium sind viel weniger prägnant. Da auch im Vergleichsfall die maximal mögliche Elementkonzentration für Americium nur kurzzeitig in LAW3 erreicht wurde und das Am-241-Inventar in LAW4 nicht relevant zur potenziellen Strahlenexposition beitrug, bleibt die Entwicklung der Konzentrationen von Am-241 weitgehend unverändert. Das Radionuklid Ra-226 ist in keinem der Einlagerungsbereiche durch maximal mögliche Elementkonzentrationen begrenzt, jedoch zeigt sich für dieses Radionuklid ab etwa 15 000 Jahren eine Konzentrationserhöhung, die dem Aufbau über das Zerfallsprodukt Th-230 aus dem gegenüber dem Vergleichsfall in erhöhtem Maße gelösten Mutternuklid U-234 zuzuordnen ist.

5.3.3.3 Radionuklidfreisetzung aus der Grube

In Abb. 5.21 sind für den Rechenfall RX.4 – fette Linien – die Gesamt-Radionuklidströme ausgewählter Radionuklide aus der Grube dargestellt, welche dem Transport im Deckgebirge zu den Exfiltrationsgebieten über die Transferfunktionen zu Grunde gelegt werden. Im Einklang mit den in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Änderungen der Element- und Radionuklidkonzentrationen sind nur die Austritte der Plutonium- und Thoriumisotope sowie zu späten Zeiten auch des Th-230-Zerfallsprodukts Ra-226 relevant höher. Anfänglich sind die Austritte der Plutoniumisotope um etwa 3,5 Größenordnungen höher, dieses Verhältnis klingt jedoch ziemlich schnell ab auf den Faktor 30 bei etwa 1 000 Jahren, den Faktor 3 bei etwa 5 000 Jahren bis etwa den Faktor 2 bei 100 000 Jahren. Die Austrittserhöhung der Thoriumisotope ist über die Zeit relativ konstant: Der Austritt von

Th-232 – in LAW3 um den Faktor 150 höher – ist um etwa den Faktor 30, jener von Th-230 – Zerfallsprodukt von U-234, das in allen ELB (meist beschränkt) höher ist – um etwa den Faktor 3 höher.

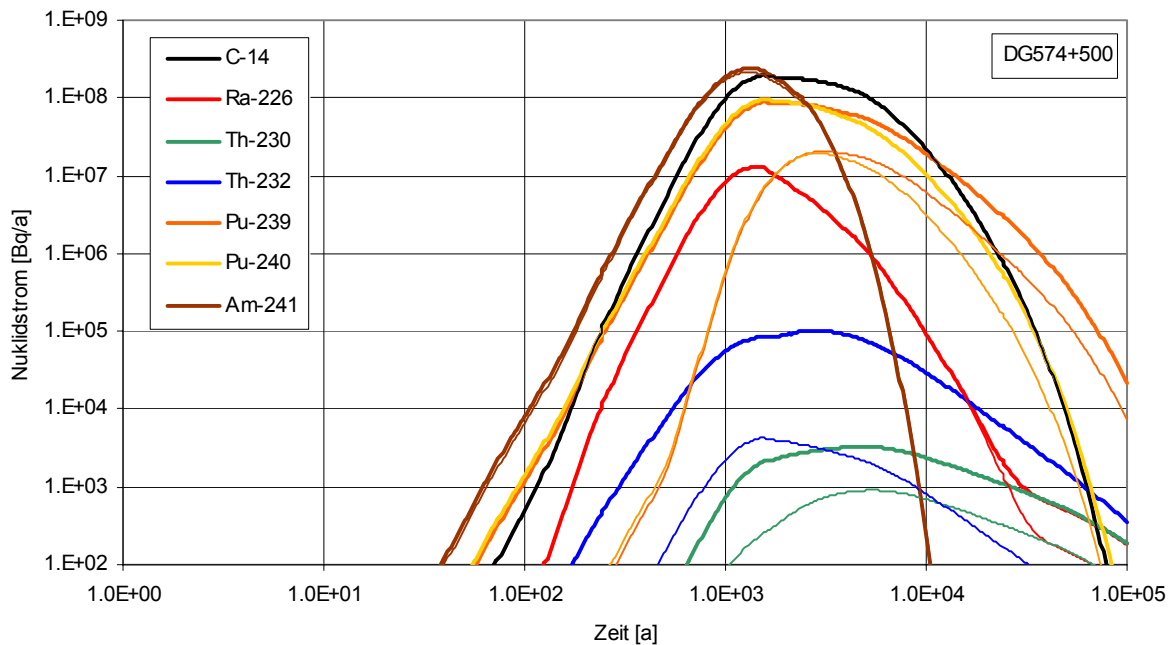


Abb. 5.21 Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube (RX.4 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

5.3.3.4 Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete

Abb. 5.22 zeigt für den Rechenfall RX.4 – fette Linien – einen Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells. Diese Entwicklungen sind ab etwa 1 000 Jahren gegenüber jenen des Vergleichsfalls – dünne Linien – deutlich höher. Die maximale relative Erhöhung, um den Faktor 4, wird bei etwa 10 000 Jahren erreicht, bei 100 000 Jahren beträgt der Unterschied noch einen Faktor 2. Tab. 5.7 gibt einen Überblick der Änderungen gegenüber dem Vergleichsfall.

Tab. 5.7 Größen und Zeitpunkte der Strahlenexpositionsmaxima für den Rechenfall RX.4 im Vergleich zum Vergleichsfall

DR13	Maximum der potenziellen Strahlenexposition [Sv/a]		Zeitpunkt des Maximums der Strahlenexposition [a]		Veränderung der Strahlenexposition im Maximum gegenüber dem Vergleichsfall
	Variante RX.4-L	Vergleichsfall	Variante RX.4-L	Vergleichsfall	
vD-Amm	$6,9 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	2 200	2 100	+ 110 %
m-Amm	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	10 000	10 000	+ 300 %
m-Witt	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	23 000	23 000	+ 250 %

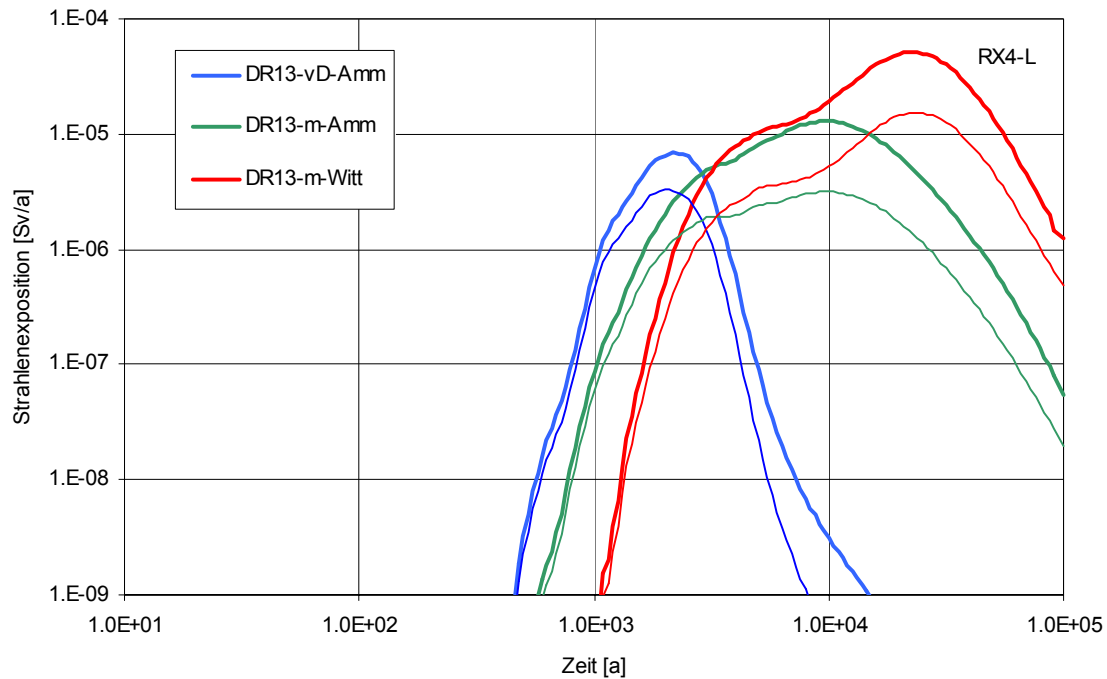


Abb. 5.22 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (RX.4 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

In Tab. 5.8 sind die wichtigsten Radionuklidbeiträge zur Zeit der jeweiligen Maxima zusammengetragen. Für den Rechenfall RX.4 sind die Beiträge der Plutoniumisotope zur Zeit der jeweiligen Maxima gegenüber dem Vergleichsfall RX.1 deutlich höher. Hervorzuheben ist, dass zur Zeit des Maximums für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ die Radionuklide Pu-239, Pu-240, Am-241 und Ra-226/Pb-210 im Gleichgewicht je etwa 25 % der potenziellen Strahlenexposition bestimmen. In beiden anderen Exfiltrationsgebieten dominiert der Gesamtbeitrag der Plutoniumisotope deutlich.

Tab. 5.8 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete

RX.4 – DR13 Radionuklid	vD-Amm bei 2 200 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 23 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,2 \cdot 10^{-7}$	2 %	$2,8 \cdot 10^{-7}$	2 %	$4,7 \cdot 10^{-7}$	1 %
Sn-126	$1,4 \cdot 10^{-9}$	-	$1,5 \cdot 10^{-8}$	-	$1,4 \cdot 10^{-7}$	-
Pu-240	$1,8 \cdot 10^{-6}$	26 %	$4,3 \cdot 10^{-6}$	33 %	$8,4 \cdot 10^{-6}$	17 %
Am-241	$1,7 \cdot 10^{-6}$	24 %	$3,5 \cdot 10^{-10}$	-	$2,5 \cdot 10^{-17}$	-
Np-237	$6,9 \cdot 10^{-9}$	-	$8,1 \cdot 10^{-8}$	1 %	$7,9 \cdot 10^{-7}$	2 %
Ra-226	$6,4 \cdot 10^{-7}$	9 %	$1,1 \cdot 10^{-7}$	1 %	$4,8 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$7,3 \cdot 10^{-7}$	11 %	$1,2 \cdot 10^{-7}$	1 %	$5,4 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$1,1 \cdot 10^{-8}$	-	$6,6 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,0 \cdot 10^{-7}$	-
Pu-239	$1,8 \cdot 10^{-6}$	26 %	$7,7 \cdot 10^{-6}$	59 %	$3,9 \cdot 10^{-5}$	77 %
Pa-231	$6,3 \cdot 10^{-8}$	1 %	$1,9 \cdot 10^{-7}$	1 %	$9,4 \cdot 10^{-7}$	2 %
übrige RN	$1,8 \cdot 10^{-8}$	-	$9,8 \cdot 10^{-8}$	1 %	$7,3 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$6,9 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,3 \cdot 10^{-5}$	100 %	$5,1 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

Im Bezug auf die Herkunft der strahlenexpositionsrelevanten Radionuklide unterscheidet sich der Rechenfall RX.4 nicht relevant vom Rechenfall RX.5, der kombinierten Variante:

- Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ wird zu etwa 50 % durch Beiträge aus LAW1A, 25 % durch Beiträge aus LAW3 und etwa 15 % durch Beiträge aus LAW1B bestimmt;
- Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ wird zu je etwa 30 % durch Beiträge aus LAW1A und LAW1B, und je etwa 20 % durch Beiträge aus LAW2 und LAW3 bestimmt;
- Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ wird zu je etwa 30 % durch Beiträge aus LAW2 und LAW1B, und je etwa 20 % durch Beiträge aus LAW1A und LAW3 bestimmt.

Für die radionuklidspezifischen Details wird daher auf das entsprechende Kap. 5.4.3.6 zur kombinierten Variante verwiesen.

5.3.4 Schlussfolgerungen für aktualisierte Radionuklid-Quellterme

In diesem Kapitel wurden die relevanten Ergebnisse des Rechenfalls RX.4 dargestellt und jenen des Vergleichsfalls RX.1 gegenübergestellt. Der Rechenfall RX.4 unterscheidet sich

vom Vergleichsfall lediglich betreffend der geänderten, d.h. meist höheren maximal möglichen Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen (siehe Kap. 5.3.2).

Die Ergebnisse des Rechenfalls RX.4 führen zu den nachfolgenden Schlussfolgerungen:

- Die aktualisierten maximal möglichen Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen wirken sich eigentlich nur wesentlich als höhere Konzentrationen von Plutonium – vor allem in LAW1B und LAW3 um 3,5 Größenordnungen – und Uran – vor allem in LAW1B um den Faktor 500 – aus. Die übrigen Elementkonzentrationen sind nicht bzw. nicht relevant von den Änderungen betroffen.
- In Bezug auf die Konzentrationsentwicklungen der strahlenexpositionsrelevanten Radionuklide im Baufeld in der Südflanke ist vor allem der schnellere Anstieg als auch die im Maximum um etwa den Faktor 3 höhere Konzentrationsentwicklung von Pu-239 hervorzuheben. Diese Entwicklung spiegelt sich natürlich auch in den Austritten der Plutoniumisotope in das Deckgebirge wieder.
- Die höheren Austritte der Plutoniumisotope in das Deckgebirge führen nach Transport und Verdünnung im Deckgebirge zu ebenfalls höheren Konzentrationen jener Isotope in Oberflächenwassern, was letztendlich ab etwa 1 000 Jahren zu einer in allen Exfiltrationsgebieten um den Faktor 2 bis 4 höheren potenziellen Strahlenexposition führt. Unverändert wird das globale Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ erreicht, welches bei etwa 23 000 Jahren gegenüber dem Vergleichsfall um etwa den Faktor 3,5 höher ist und nun $5,1 \cdot 10^{-5}$ Sv/a beträgt.
- Wegen der unterschiedlich höheren Plutoniumkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen hat sich auch die Relevanz der ELB-Beiträge verschoben. Für das globale Maximum, im Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘, bestimmen die Beiträge der im Vergleichsfall RX.1 bestimmenden Einlagerungsbereiche LAW1A und LAW2 insgesamt zwar noch immer in etwa die Hälfte des Pu-239-Beitrags, die Beiträge der Einlagerungsbereiche LAW1B und LAW3 bestimmen nun zusammen jedoch die andere Hälfte. Die Größen der höheren ELB-Beiträge sind mit den höheren Konzentrationen in den jeweiligen Einlagerungsbereichen in Übereinstimmung.

5.4 Kombinierte Variante

5.4.1 Beschreibung und Definition

Mit den in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Rechenfällen RX.2, RX.3 und RX.4 sind die Auswirkungen des gegenüber dem Referenzfall im Schlussbericht 2005 aktualisierten Kenntnisstands untersucht worden. Mit der in diesem Kapitel betrachteten Variante, dem Rechenfall RX.5, wird die kombinierte Auswirkung dieser Aktualisierungen analysiert. Deshalb wird diese Variante im vorliegenden Bericht als „kombinierte Variante“ bezeichnet, die nachfolgend auch als Vergleichsbasis für die weiteren Szenarien und

Varianten in diesem Bericht benutzt wird. Die kombinierte Variante RX.5 unterscheidet sich also vom Vergleichsfall RX.1 betreffend:

- der höheren Durchlässigkeit des Salzgesteins im Firstbereich von Abbau 6/725 (Na₂) sowie von Einlagerungskammer 12/750 (vgl. Kap. 5.1.1).
- der Verfüllung der noch offenen Auffahrungen im Grubenhöchsten auf der 511-m-Sohle und der 490-m-Sohle mit Sorelbeton statt Salzversatz, sowie der Verfüllung des Zugangs zum Tagesschacht auf der 553-m-Sohle bzw. der Zugänge zu den Tagesschächten auf der 490-m-Sohle mit Sorelbeton (siehe Kap. 5.2.1).
- der aktualisierten, meist höheren maximal möglichen Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen (siehe Tab. 5.5 im Kap. 5.3.2).

5.4.2 Modellergebnisse KAFKA (RX.5-K)

5.4.2.1 Gasspeicher und Gasflüsse im Grubengebäude

Die effektiven residualen Gassättigungen in der kombinierten Variante stimmen mit jenen in Variante RX.2 überein (s. Kap. 5.1.2). Das zeitliche Auftreten von Gaspolstern und deren weitere Entwicklung entsprechen jenen in der Variante RX.2-K (Abb. 5.23, vgl. Abb. 5.1). Für die Anwendung in LOPOS sind daher die erhöhten effektiven residualen Gassättigungen für die Bereiche entsprechend Variante RX.2 anzuwenden (Kap. 5.1.2):

- LAW1B: 0,24 (zum Vergleich RX.1-K: 0,79)
- LAW4: 0,27 (zum Vergleich RX.1-K: 0,63).

Das Einsetzen des Gasabflusses aus den ELB LAW1A, LAW1B und LAW4 entspricht der Variante RX.2-K (Kap. 5.1.2). Wie dort findet in den Gastransportpfaden V-LAW1B (aus LAW1B) und HA-4 bzw. AZ-4 (aus LAW4) die Abnahme der Lösungssättigung durch den Gasfluss aus den ELB früher statt als im Vergleichsfall. Die Gastransportpfade im Grubengebäude unterscheiden sich nicht vom Vergleichsfall.

Im Baufeld in der Südflanke ist die Sättigung der Bereiche oberhalb und einschließlich der Anschlusshöhe (Teufe 500 m) mit Gas analog zum Ergebnis in Variante RX.3-K schneller als in RX.2-K abgeschlossen. Das Gas tritt, wie in Variante RX.3-K, bereits nach 770 Jahren aus dem Grubengebäude aus (Abb. 5.24).

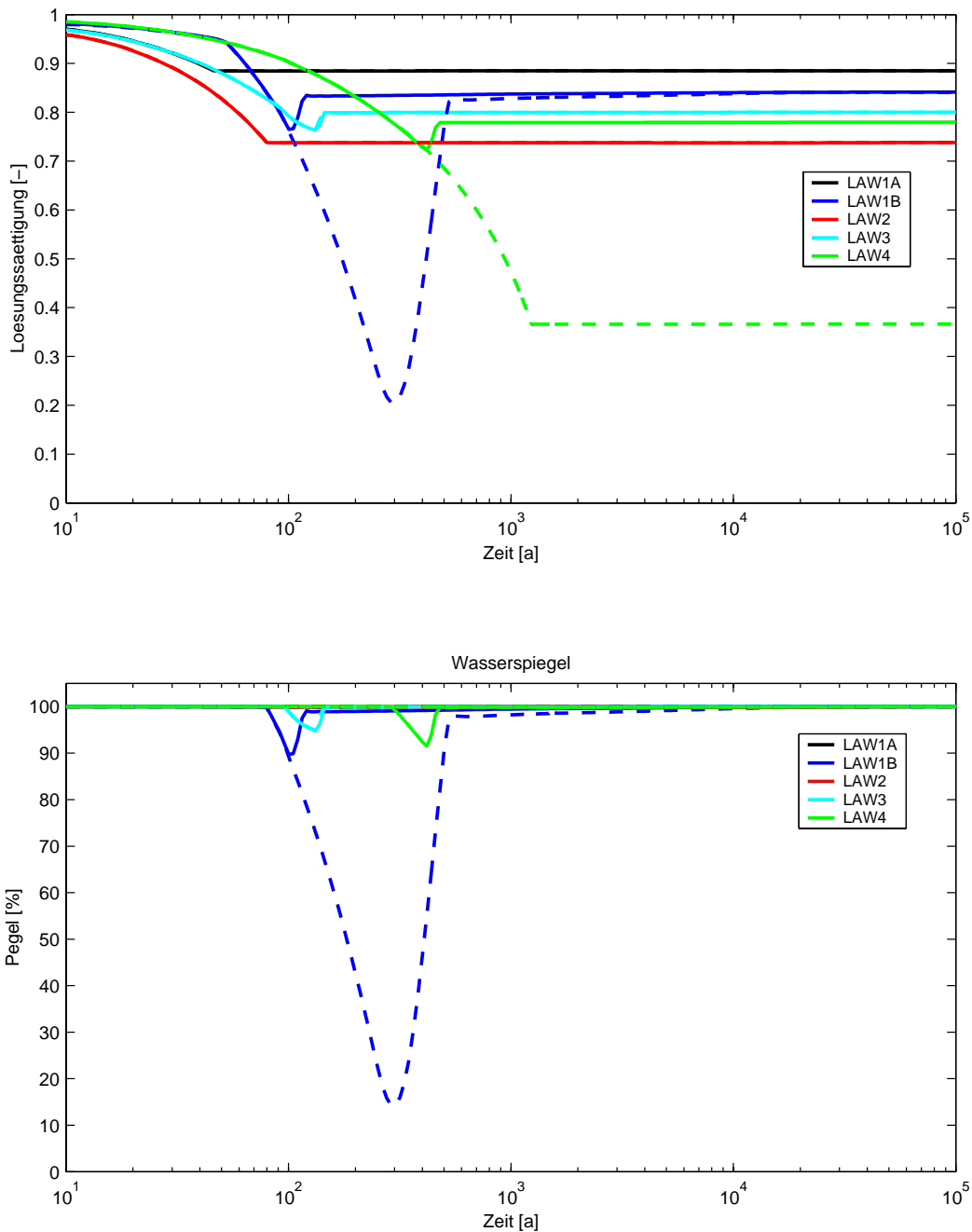


Abb. 5.23 Lösungssättigung und –pegel in den LAW-ELB (RX.5-K, gestrichelt RX.1-K)

5.4.2.2 Lösungs- und Gasflüsse in das Deckgebirge

Die Lösungs- und Gasflüsse aus dem Grubengebäude zeigen in dieser kombinierten Variante RX.5-K gegenüber dem Vergleichfall RX.1-K die Auswirkungen entsprechend Variante RX.3-K. Da das Gas, wie in Variante RX.3-K, bereits nach 770 Jahren aus dem Grubengebäude austritt, sind ab diesem Zeitpunkt die Lösungsflüsse aus dem Grubengebäude bis zu dem Zeitpunkt, bei dem im Vergleichsfall das Gas austritt (1 500 Jahre), etwas geringer als im Vergleichsfall RX.1-K (Abb. 5.24).

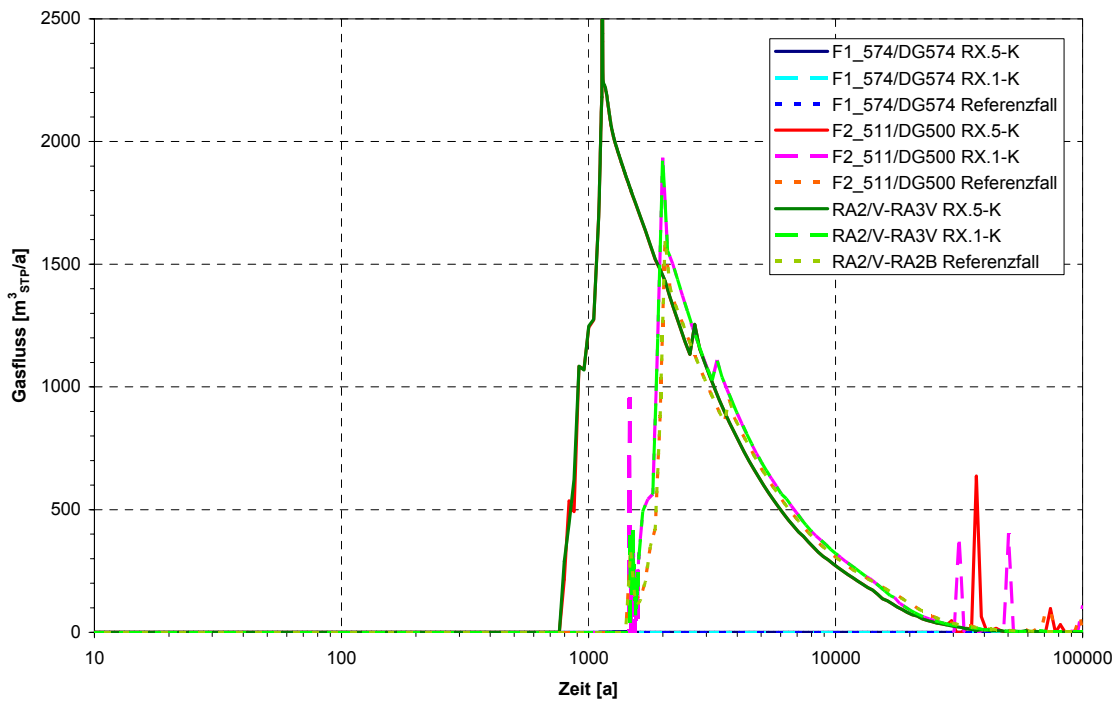
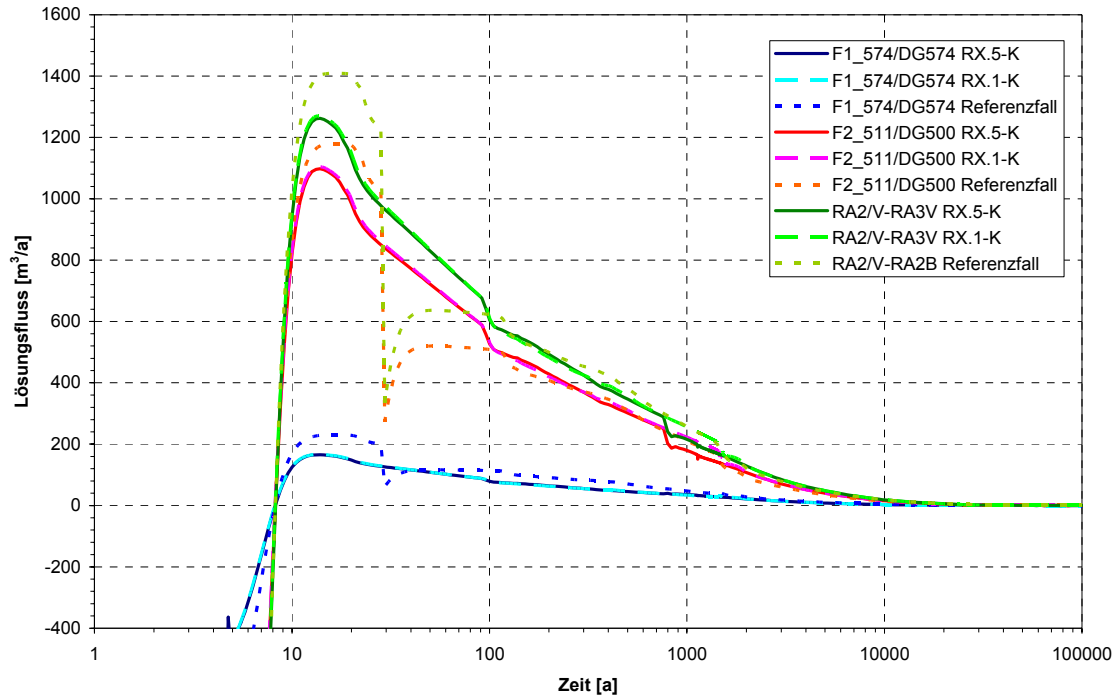


Abb. 5.24 Lösungs- und Gasflüsse aus dem Grubengebäude in RX.5-K im Vergleich zu RX.1-K und zum Referenzfall

5.4.2.3 Transportprozesse der Lösungsverdrängung aus den ELB und Tracertransport aus den ELB

Die relativen Beiträge der Prozesse der Lösungsverdrängung aus den ELB sind vergleichbar zu RX.2-K (in RX.3-K hatte die Verfüllung der oberen Bereiche im Baufeld in der Südflanke keine Auswirkungen auf die Prozesse im Nahbereich der ELB). Dabei sind, wie in RX.2-K, die Auswirkungen im Umfeld der ELB LAW2 und LAW3 vernachlässigbar.

Durch den früher einsetzenden Gasabfluss aus LAW1B wird auch der Lösungsaustausch in LAW1A verringert (Abb. 5.25). Durch die Verdrängung infolge Gasspeicherung und durch die Konvergenz wird hier insgesamt das anfängliche Porenvolumen im Betrachtungszeitraum nur zweifach ausgetauscht.

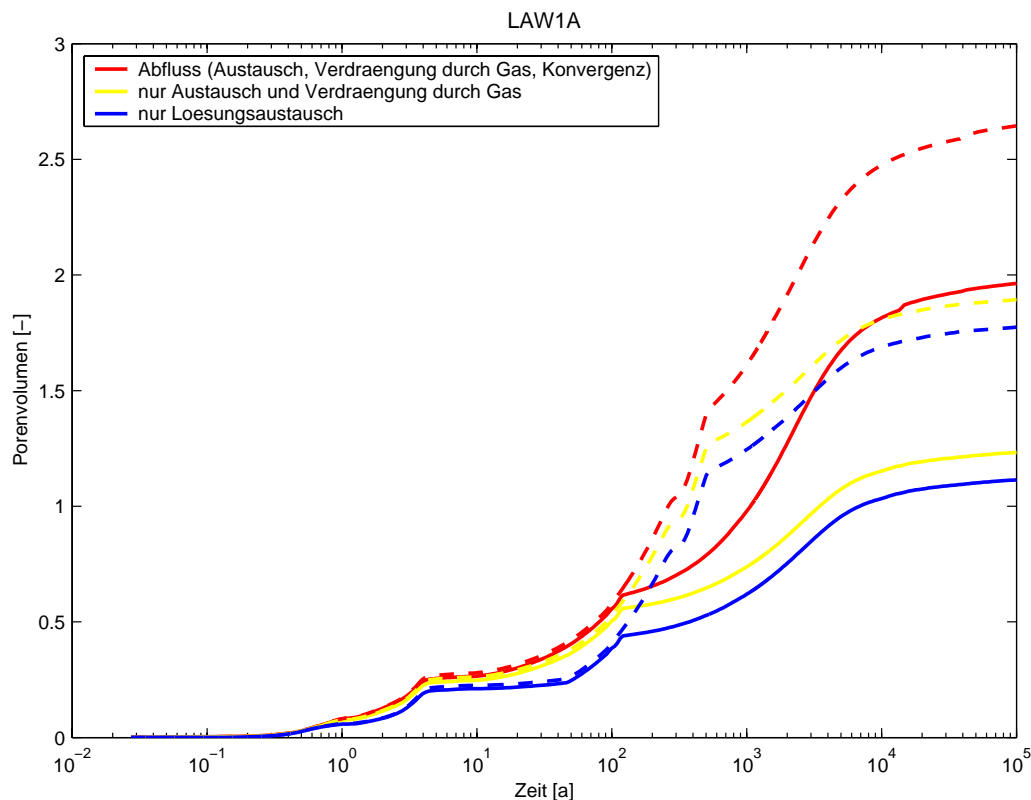


Abb. 5.25 Lösungsfluss aus dem ELB LAW1A bezogen auf das anfängliche Porenvolumen in RX.5-K (gestrichelt Vergleichsfall RX.1-K)

In LAW1B verringert sich, durch den früher einsetzenden Gasabfluss über die Auflockerungszone in der Schwebe um das Gesenk in der Firste, der Anteil der Verdrängung durch Gasspeicherung (Abb. 5.26). Insgesamt wird im Betrachtungszeitraum das anfängliche Porenvolumen einmal ausgetauscht.

Wie in Variante RX.2-K verringert sich in LAW4 durch das kleinere Gasspeichervolumen im Firstbereich der Anteil der Verdrängung durch Gasspeicherung (Abb. 5.27).

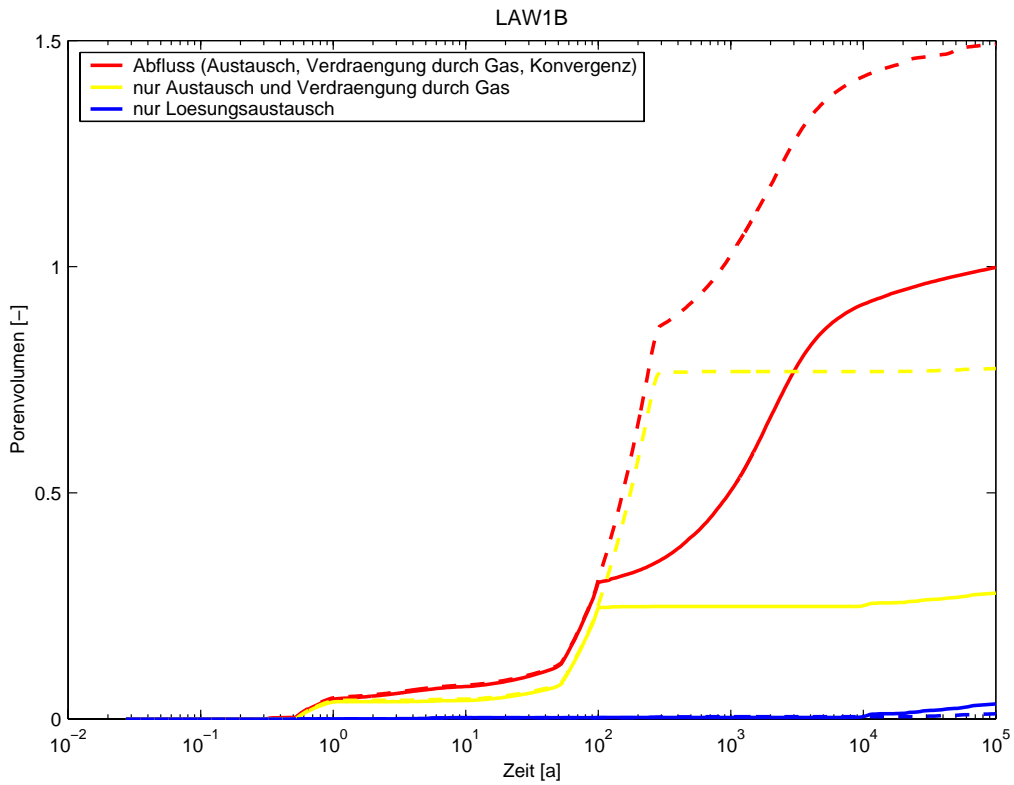


Abb. 5.26 Lösungsfluss aus dem ELB LAW1B bezogen auf das anfängliche Porenvolumen in RX.5-K (gestrichelt Vergleichsfall RX.1-K)

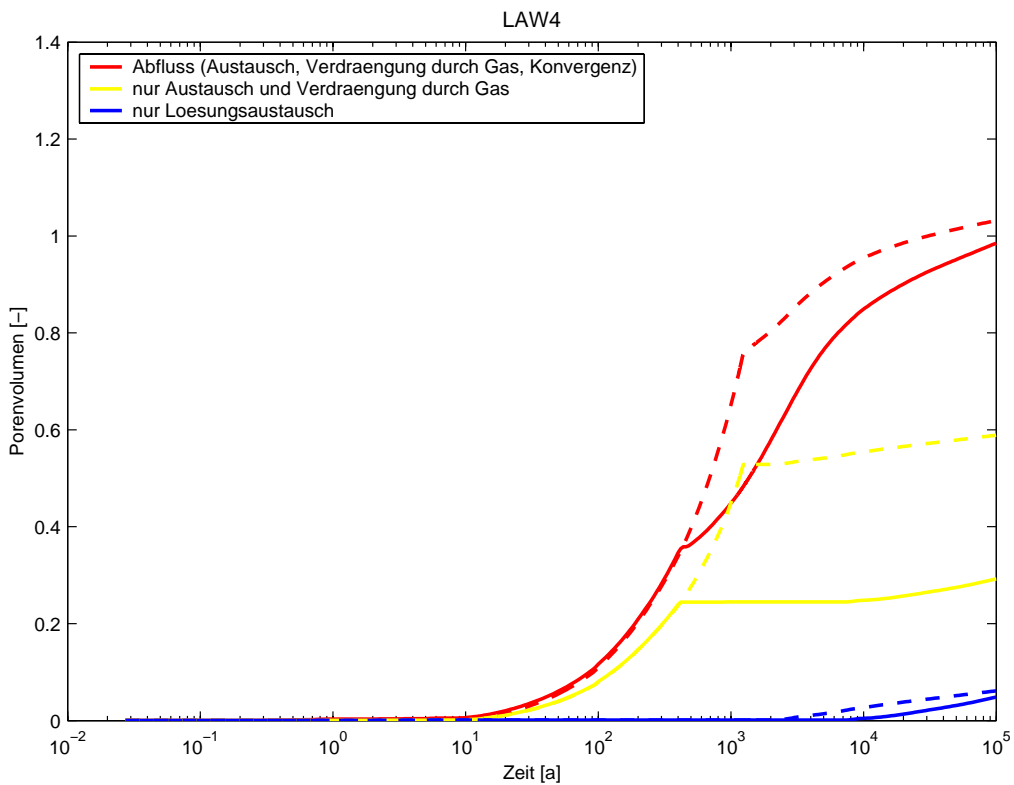


Abb. 5.27 Lösungsfluss aus dem ELB LAW4 bezogen auf das anfängliche Porenvolumen in RX.5-K (gestrichelt Vergleichsfall RX.1-K)

5.4.2.4 Lösungsfluss und Tracertransport im Nahbereich der ELB

Die gegenüber dem Vergleichsfall veränderten Verhältnisse der Gasspeicherung in LAW1B und LAW4 beeinflussen im Zeitraum ihres Wirksamwerdens auch den Transport von Tracern im Nahbereich der ELB. Da der Lösungstransport aus LAW1A auch durch den Gasfluss aus LAW1B beeinflusst wird, treten auch hier Änderungen zutage.

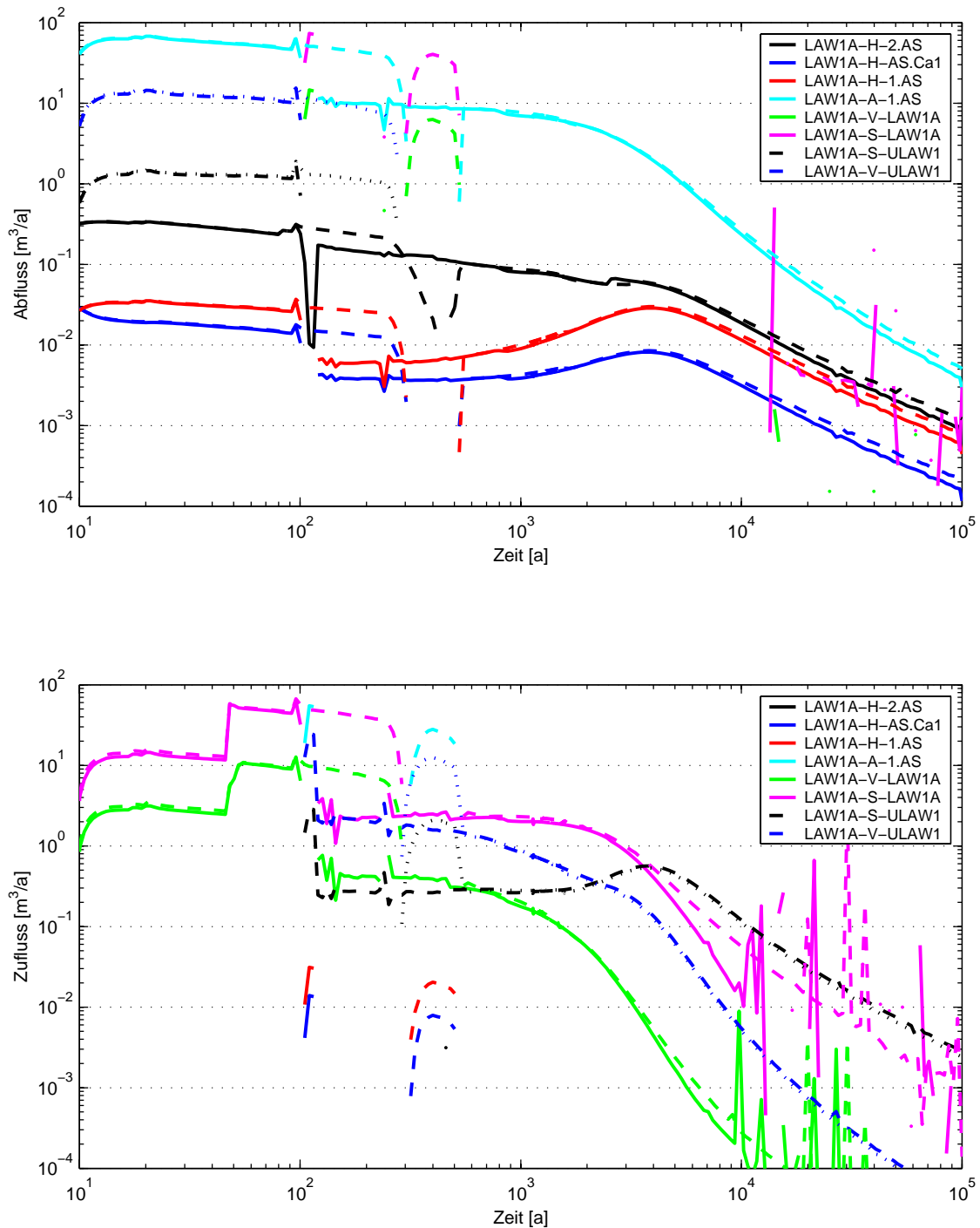


Abb. 5.28 Lösungsabfluss aus (obern) und Zufluss zu (unten) LAW1A in RX.5-K

Zwischen ca. 100 und 300 Jahren ist der gleichzeitige Lösungszu- und -abfluss in bzw. aus LAW1A geringer (Abb. 5.28). Dadurch treten in diesem Zeitraum auch weniger Tracer aus dem ELB aus (Abb. 5.29).

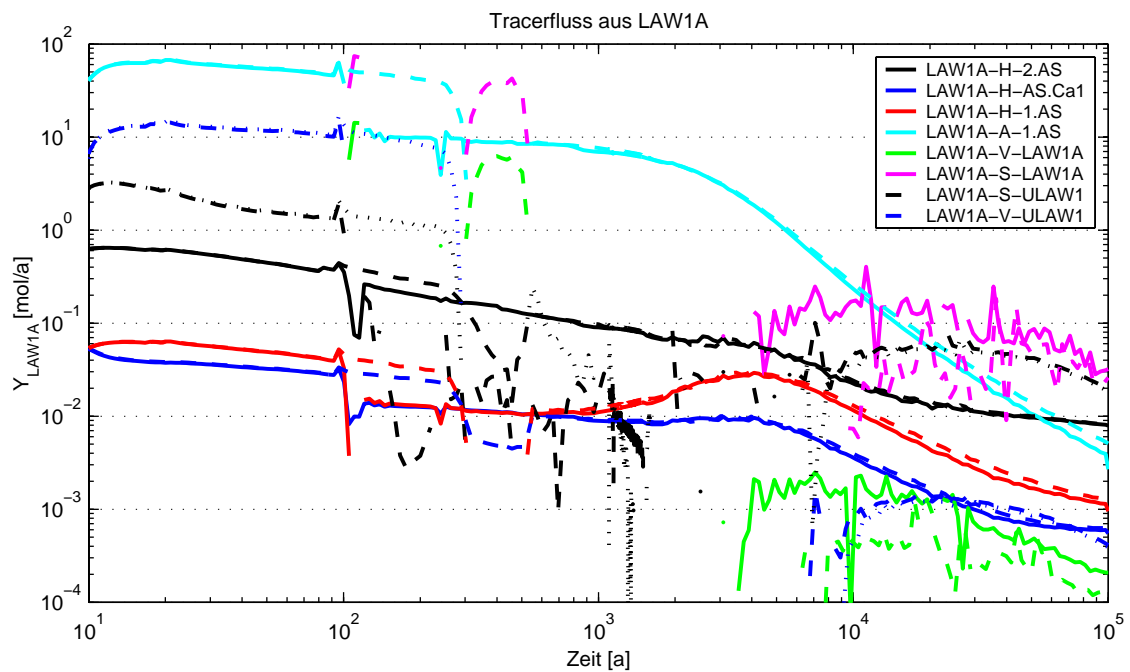
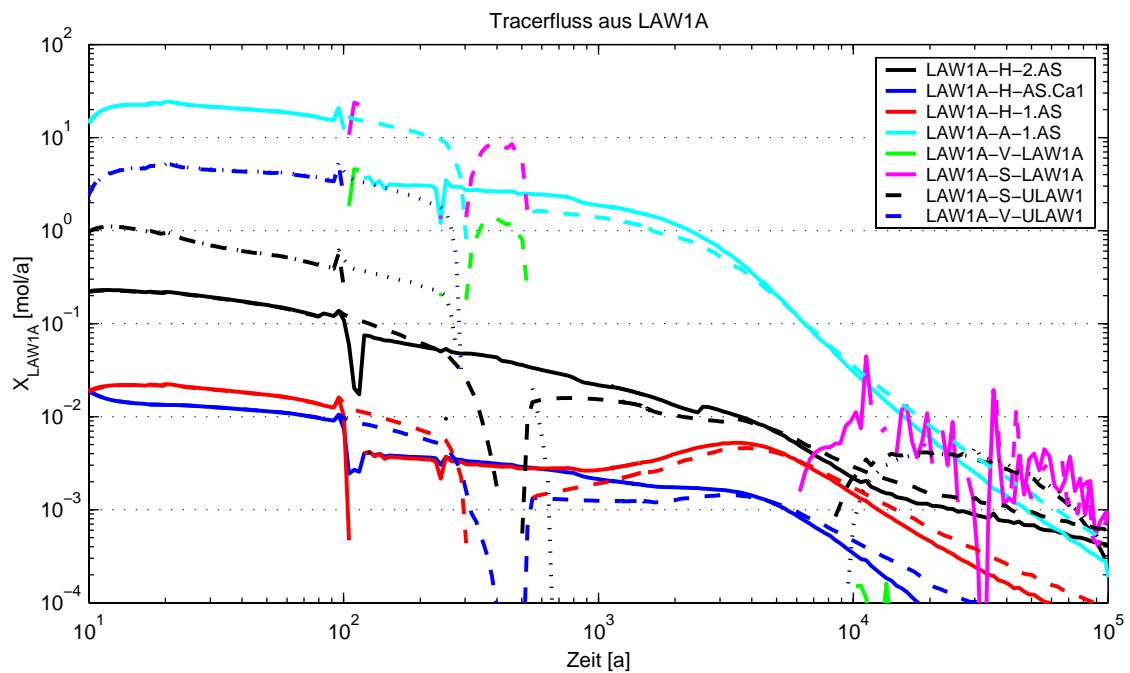


Abb. 5.29 Tracerabfluss aus dem ELB LAW1A in RX.5-K im Vergleich zum Vergleichsfall

Da im Zeitraum zwischen 100 und 300 Jahren weniger Lösung aus LAW1B verdrängt wird (Abb. 5.30), sind in diesem Zeitraum auch die Abflüsse der Tracer aus dem ELB geringer (Abb. 5.31).

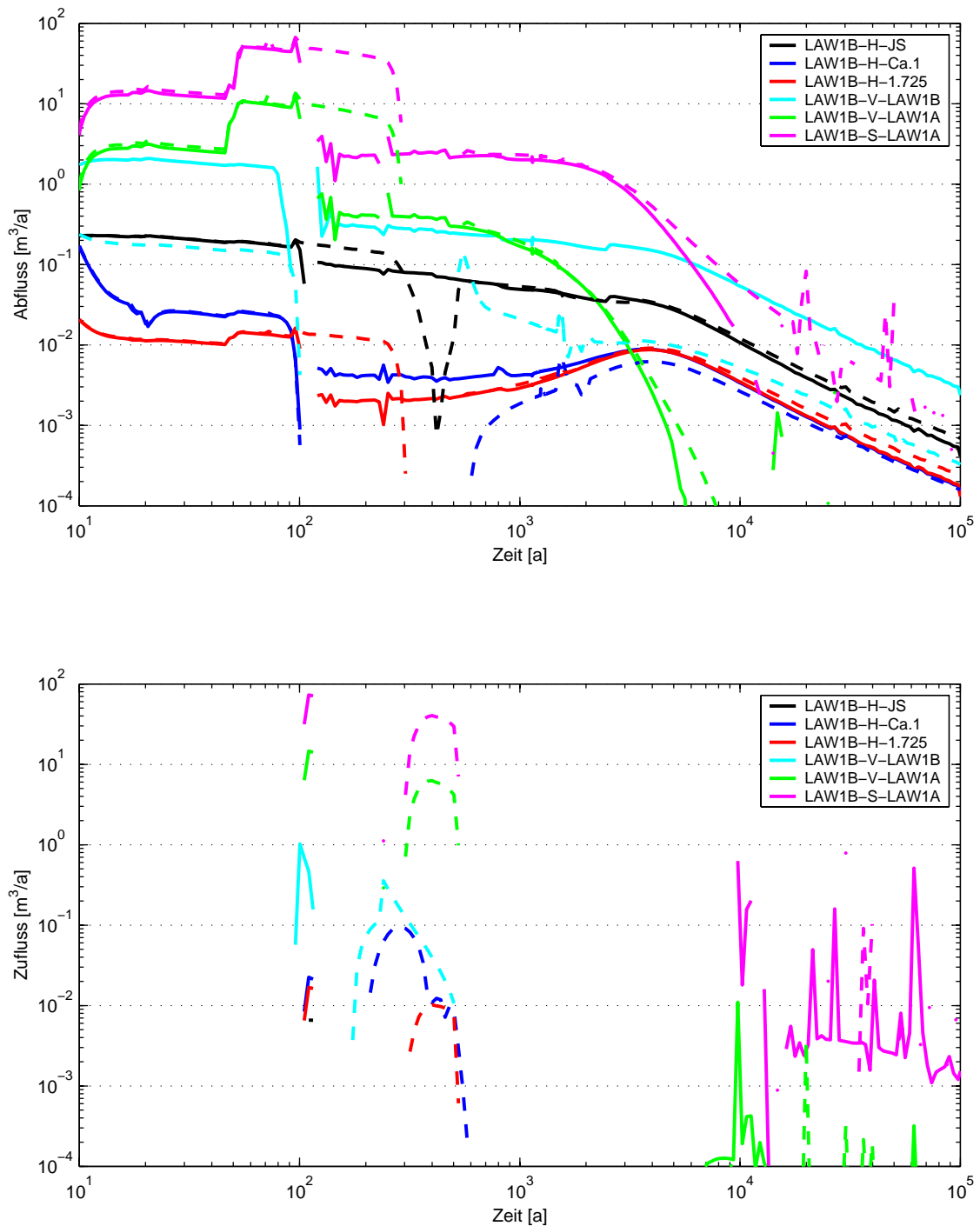


Abb. 5.30 Lösungsabfluss aus (oben) und Zufluss zu (unten) LAW1B in RX.5-K

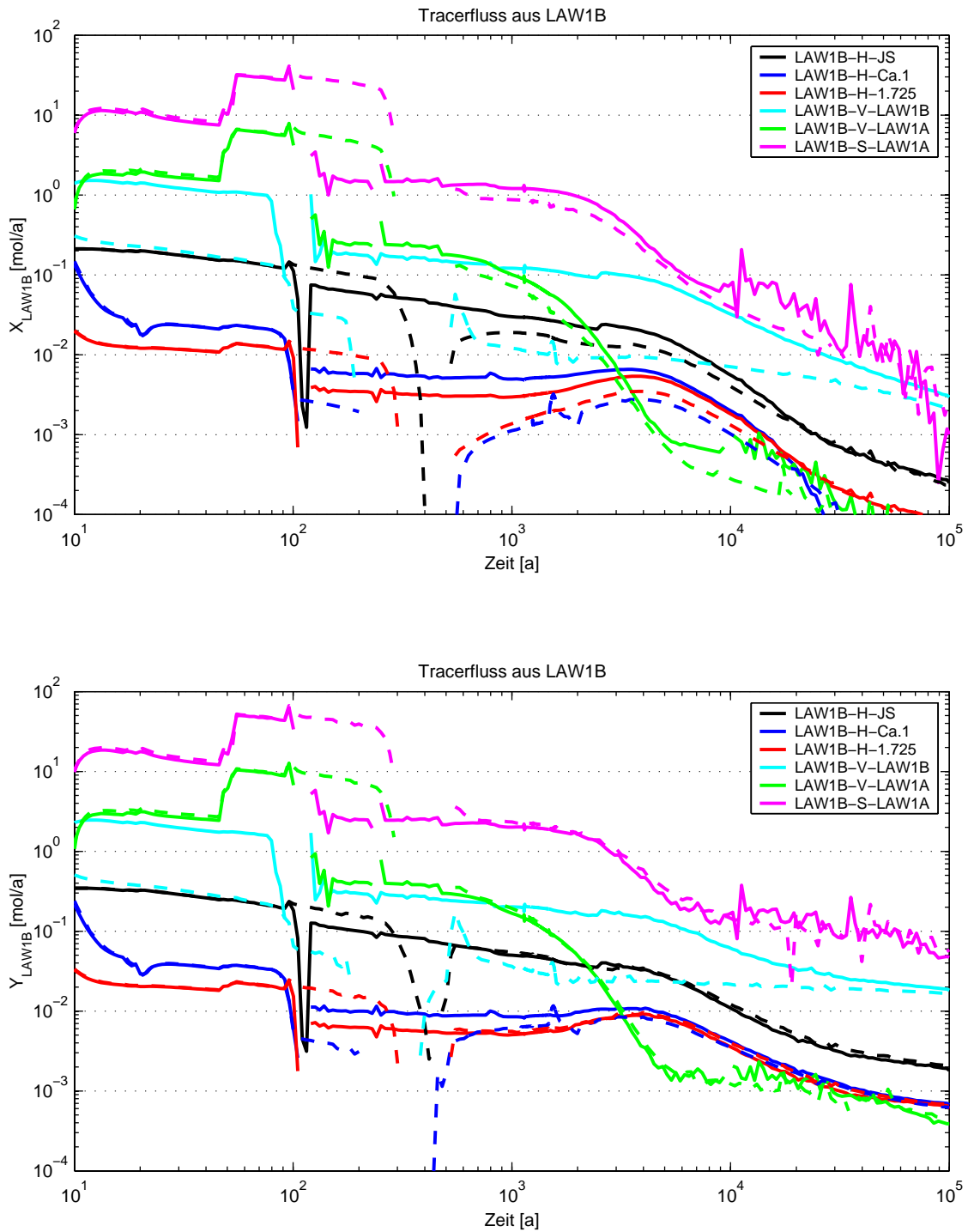


Abb. 5.31 Tracerabfluss aus dem ELB LAW1B in RX.5-K im Vergleich zum Vergleichsfall

In LAW3 fließt bis 1 200 Jahre, begründet in dem früheren Gasabfluss aus LAW4, über die südliche Richtstrecke nach Osten mit Strömungsbarriere – Modellverbindung H-3.4 – etwas weniger Lösung aus dem ELB LAW4 zu, auf den Tracerabfluss aus LAW3 hat dies jedoch keinen Einfluss. Die Auswirkungen auf den ELB LAW2 im Vergleich zum Vergleichsfall RX.1-K sind vernachlässigbar.

Begründet durch den früheren Gasabfluss ist der Lösungsabfluss aus dem ELB LAW4 zwischen ca. 400 und 1 200 Jahren geringer als im Vergleichsfall (Abb. 5.32). Dadurch werden in diesem Zeitraum auch weniger Tracer aus dem ELB transportiert. Im Gegensatz zum Vergleichsfall bleibt auch danach der aufgelockerte Pfeiler zum Carnallititbaufeld (A-4.Ca) der maßgebliche Transportpfad für Tracer aus dem ELB (mit Ausnahme der X-Tracer nach mehr als 60 000 Jahren).

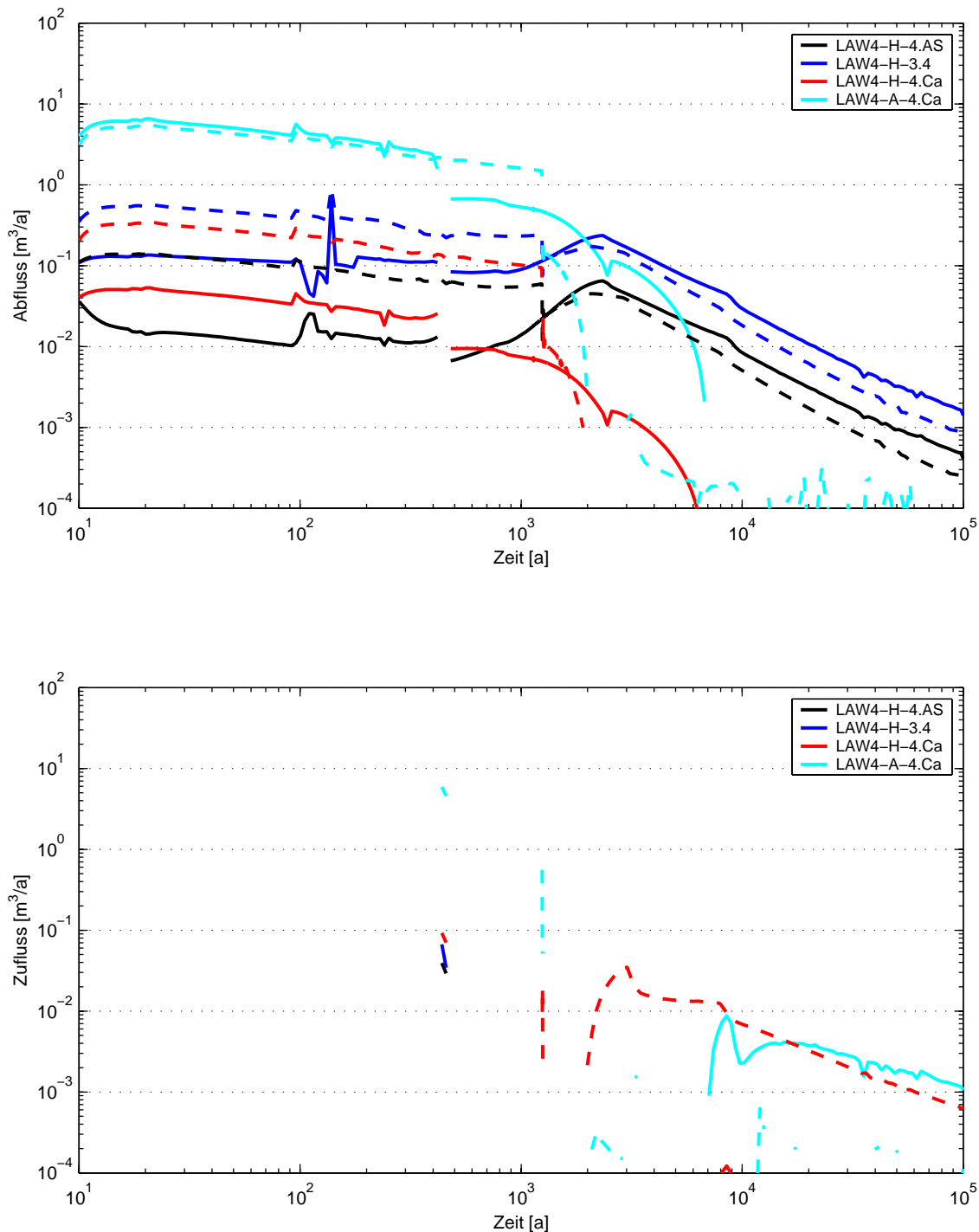


Abb. 5.32 Lösungsabfluss aus (obern) und Zufluss zu (unten) LAW4 in RX.5-K

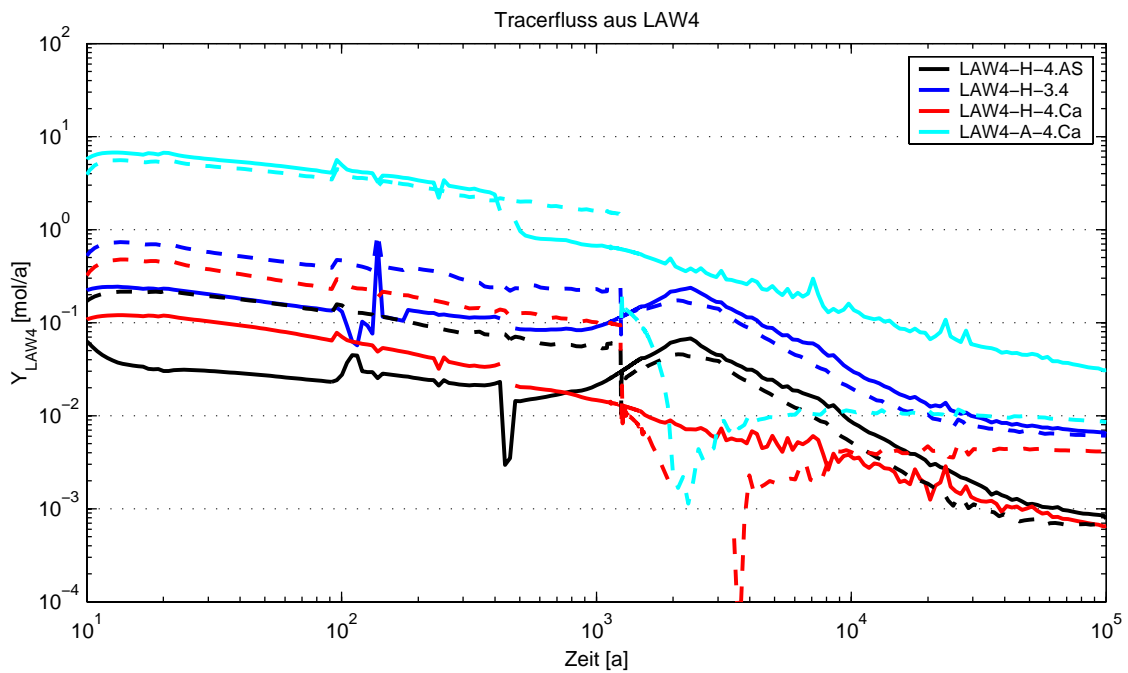
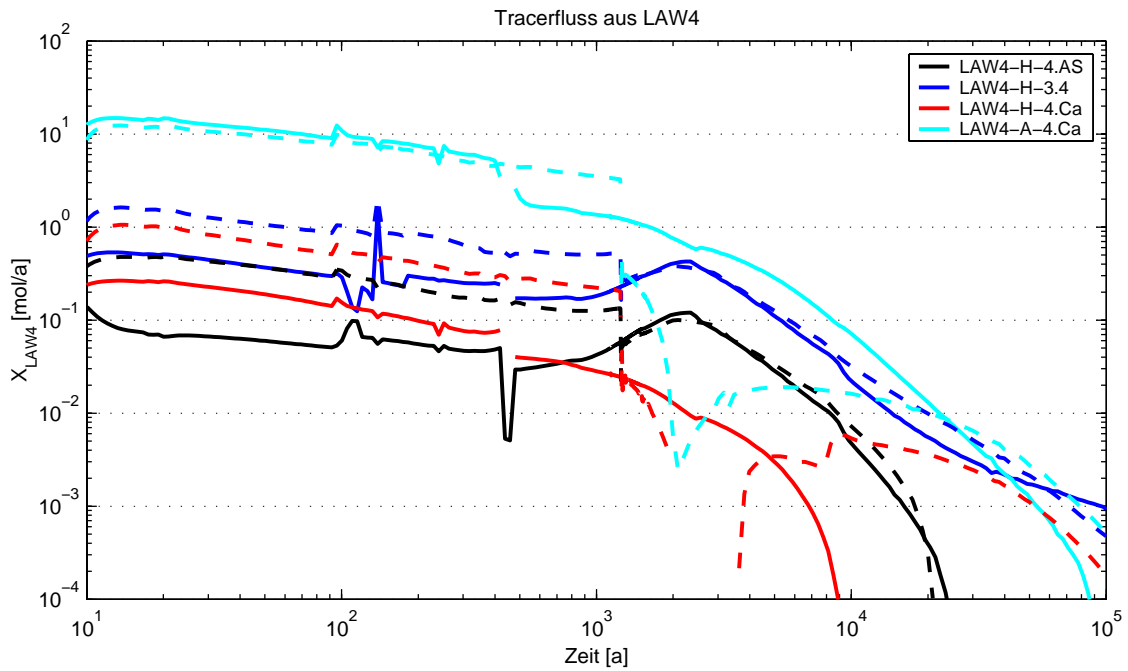


Abb. 5.33 Tracerabfluss aus dem ELB LAW4 in RX.5-K im Vergleich zum Vergleichsfall

5.4.2.5 Tracertransport im Grubengebäude und –übertritt in das Deckgebirge

Beim Tracertransport im Grubengebäude bzw. durch das Baufeld in der Südflanke bis zum Übertritt in das Deckgebirge überlagern sich die bei den Rechenfällen RX.2-K und RX.3-K gezeigten Effekte: Die schnellere Entsättigung in den oberen Grubenbereichen durch das reduzierte Porenvolumen (wie RX.3-K) führt zu einer früheren Unterbindung des Lösungsaustauschs zwischen den beiden Modellsäulen des Baufeldes in der Südflanke und damit zu

einer Verzögerung des Konzentrationsanstieges auf dem sekundären Transportpfad (für alle Tracer).

Die über mehrere 100 Jahre reduzierte Freisetzung von Tracern aus LAW1B, LAW1A und LAW4 verzögert auch die Expositionen auf dem primären Transportpfad. Tracer aus LAW2 und LAW3 werden davon nicht beeinflusst. In Abb. 5.34 bis Abb. 5.36 dargestellt sind daher lediglich die Konzentrationsänderungen der Tracer aus LAW1A, LAW1B und LAW4 auf verschiedenen Modellsohlen im Baufeld in der Südflanke.

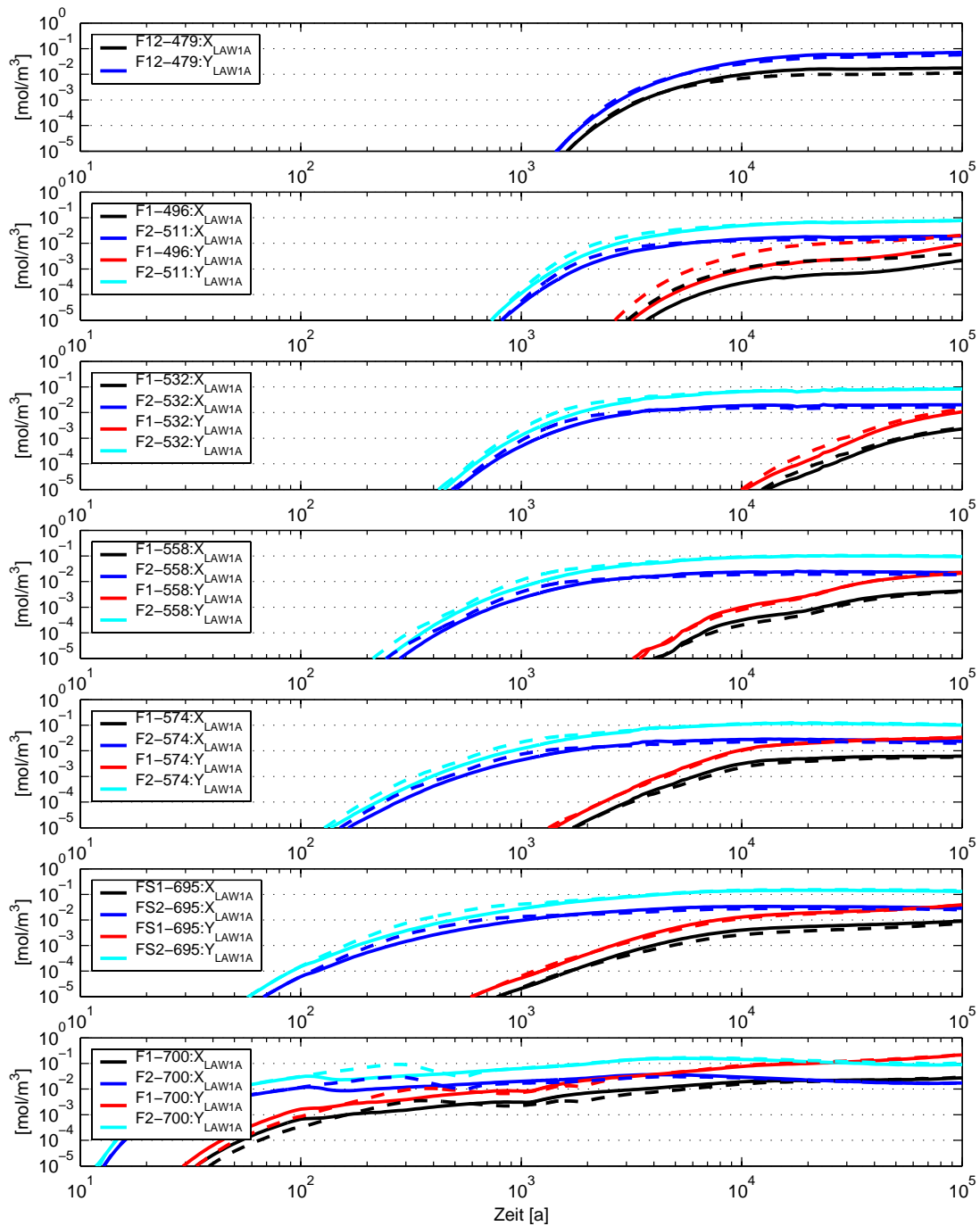


Abb. 5.34 Tracerkonzentrationen X_{LAW1A} und Y_{LAW1A} in der Südflanke in RX.5-K

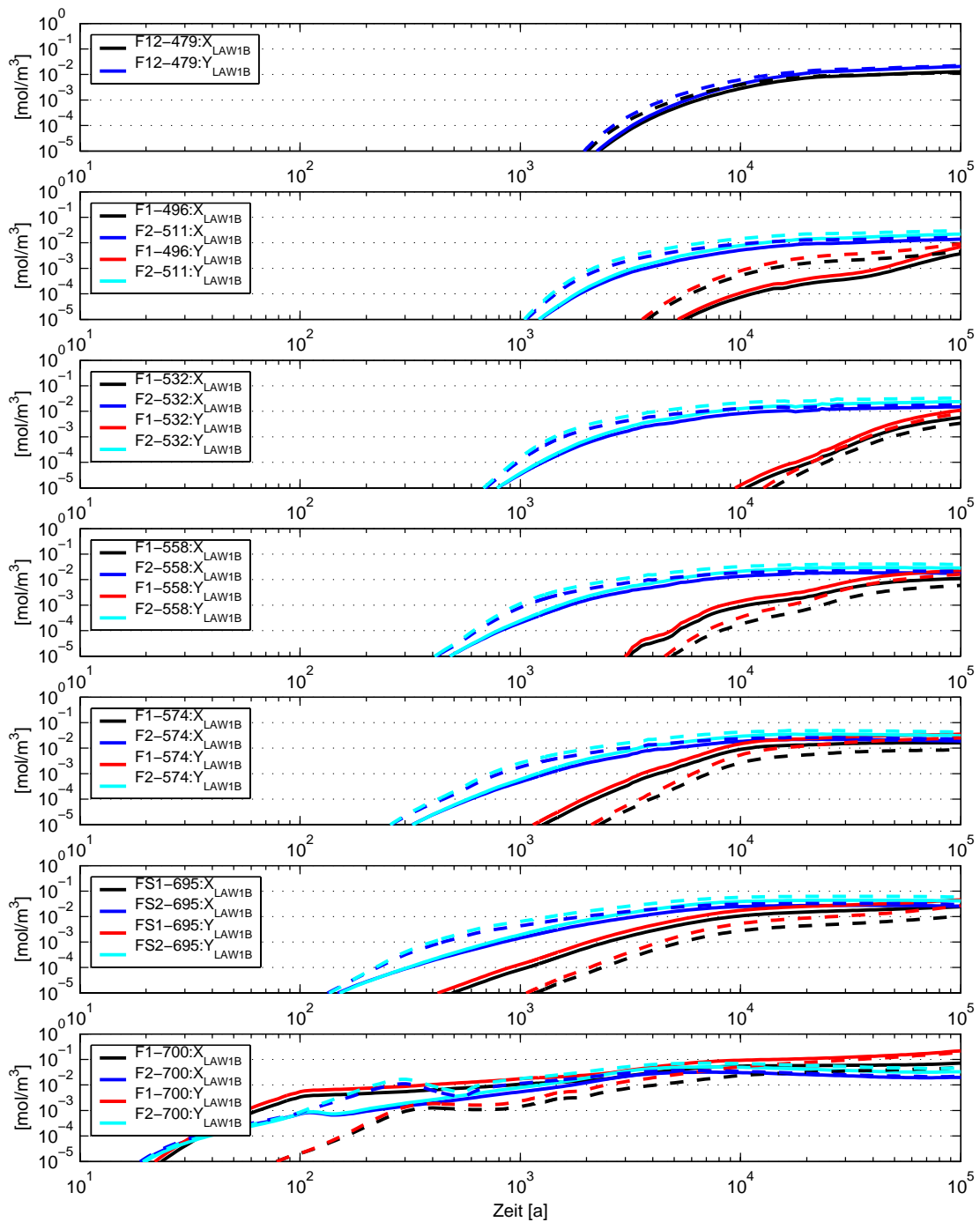


Abb. 5.35 Tracerkonzentrationen X_{LAW1B} und Y_{LAW1B} in der Südflanke in RX.5-K

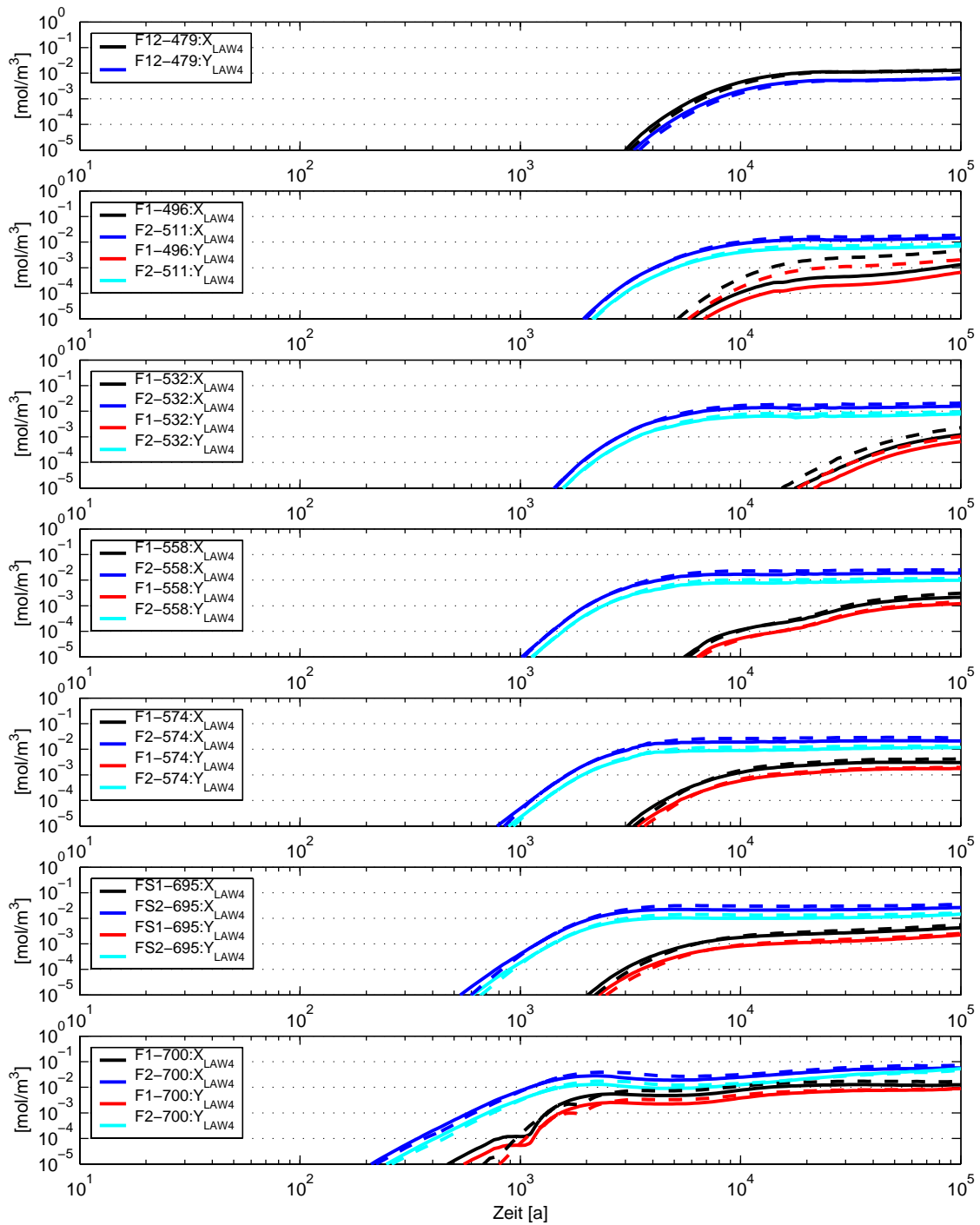


Abb. 5.36 Tracerkonzentrationen X_{LAW4} und Y_{LAW4} in der Südflanke in RX.5-K

5.4.2.6 Tracerkonzentrationen und -flüsse im Deckgebirge

Die Freisetzung der Tracer aus dem Grubengebäude ändert sich daher maßgeblich für Tracer aus LAW1B, die im Oststrang (und damit auf 500 m Teufe) verzögert und im Weststrang (Übertritt auf 574 m) beschleunigt frei gesetzt werden (Abb. 5.37).

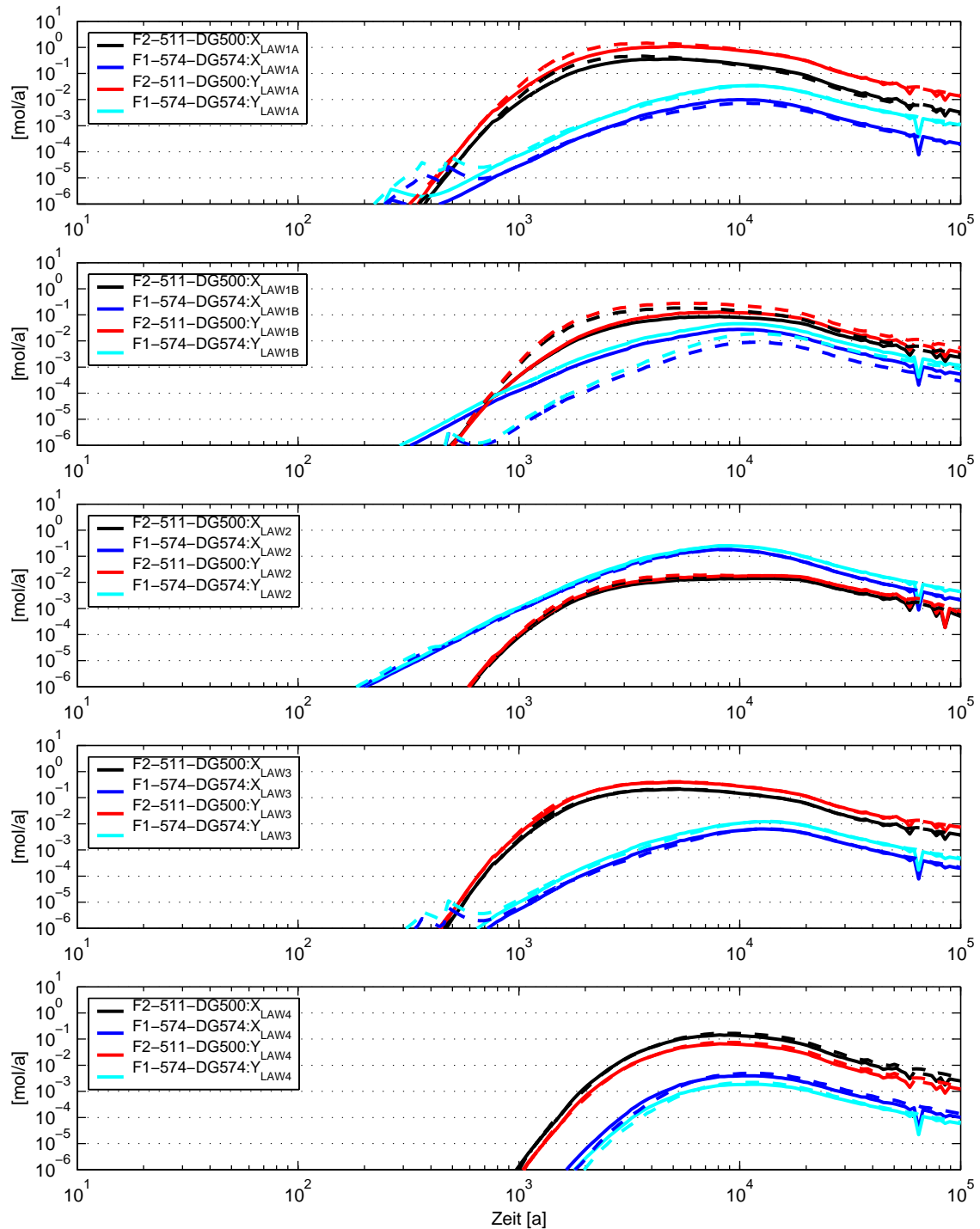


Abb. 5.37 Tracerübertritt in das Deckgebirge an den beiden Modell-Schnittstellen in RX.5-K

Die Änderung der Konzentrationen im Rötanhydrit (Modellgebiet RA2) gibt Abb. 5.38 wieder. Danach ergeben sich maßgebliche Verzögerungen für die Tracer aus LAW1B und LAW1A und eine gewisse langfristige Dämpfung für Tracer aus LAW4.

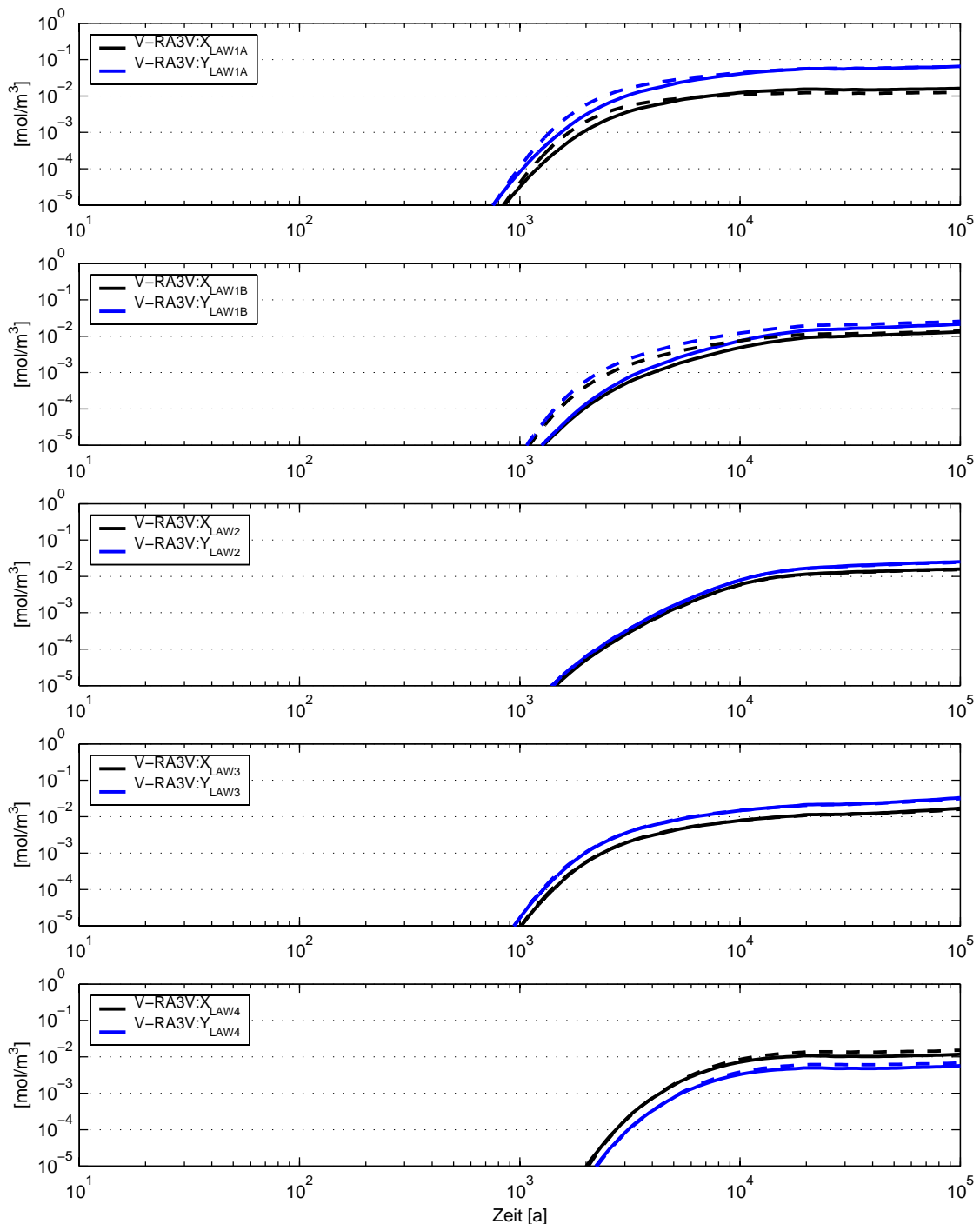


Abb. 5.38 Konzentrationsänderung der Tracer im Rötanhydrit in RX.5-K

Die Zeitpunkte der größten Konzentrationsänderung im Rötanhydrit, der Maxima der Tracerflüsse und die Änderung der Maxima der Tracerflüsse gibt Tab. 5.9 wieder. Auch hieraus wird deutlich, dass – trotz der um ca. eine Größenordnung höheren Durchlässigkeit der Verbindung V-LAW1B zum Baufeld in der Südflanke - hauptsächlich die Tracer aus

LAW1B eine signifikante Verzögerung im Grubengebäude und höhere Verdünnung erfahren. Tracer aus LAW2 sind gegenüber dem Vergleichsfall unbeeinflusst, Tracer aus LAW3 vernachlässigbar beeinflusst.

Tab. 5.9 Vergleich der Konzentrationsänderungen und der Maxima der Flüsse der X-Tracer zum Vergleichsfall

ELB	Zeitpunkt des maximalen Konzentrationsanstiegs im Rötanhydrit [a]		Zeitpunkt des Maximums der Tracerflüsse [a]		Veränderung der Tracerflüsse im Maximum gegenüber dem Vergleichsfall
	Variante RX.5-K	Vergleichsfall	Variante RX.5-K	Vergleichsfall	
LAW1A	3 000	2 300	5 400	3 600	-21%
LAW1B	5 400 ²²	3 800	8 100	5 500	-47%
LAW2	8 100	8 700	10 700	10 500	-1%
LAW3	3 000	2 800	5 400	5 000	-3%
LAW4	5 400	6 600	8 100	9 100	-14%

5.4.2.7 Tracerkonzentrationen nach Transfer im Deckgebirge

Neben den auch langfristig wirksamen Reduzierungen der Beiträge der Tracer aus LAW1B in allen drei Exfiltrationsgebieten sind kurzfristige Reduzierungen der Beiträge aus LAW1A nur im ‚verstärzten Deckgebirge – Ammerbeek‘ zu erwarten (Abb. 5.39 und Abb. 5.40).

²² 2. Maximum bei 8 100 Jahren (vergleichbar zu RX.2-K)

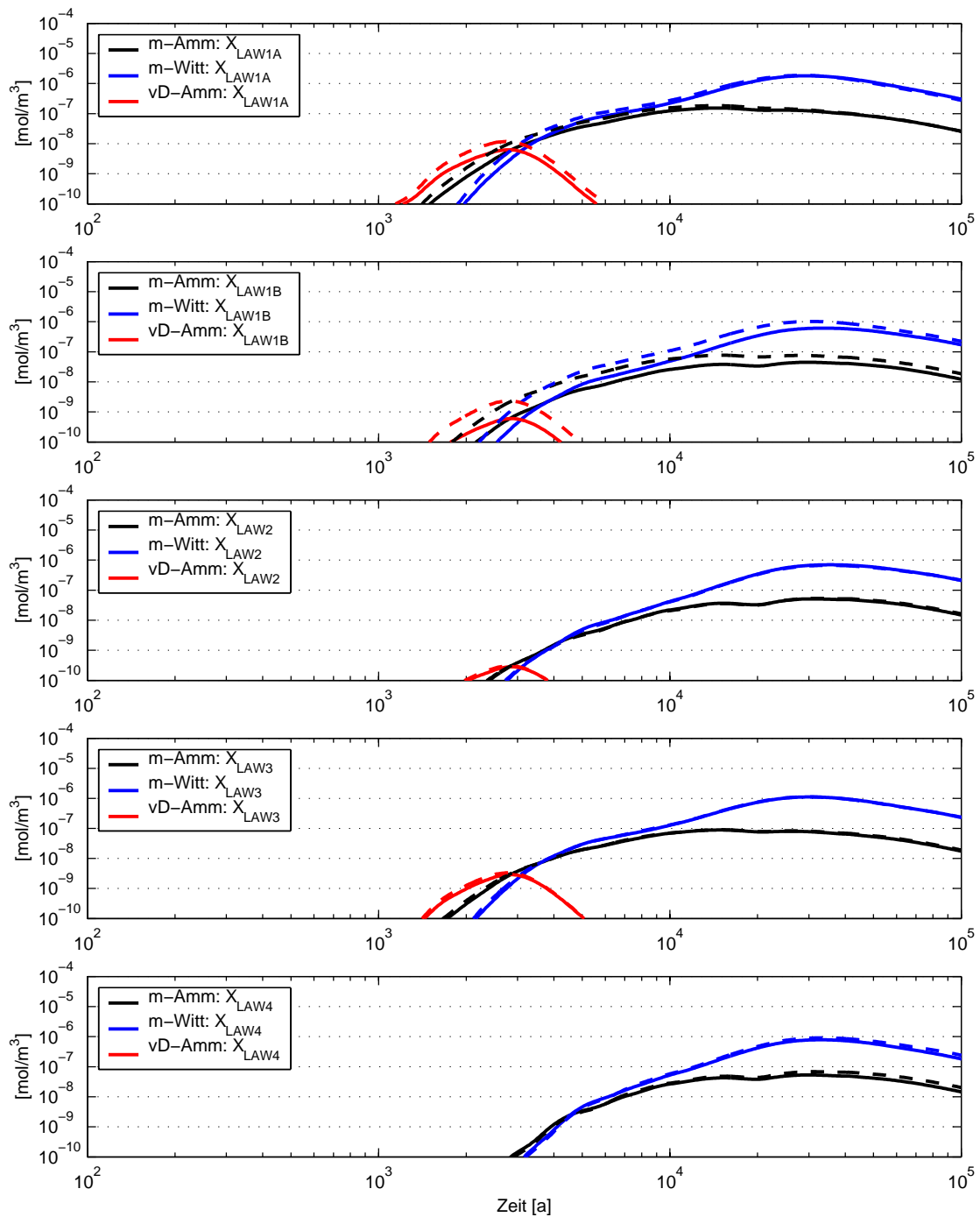


Abb. 5.39 X-Tracerkonzentrationen in den drei Exfiltrationsgebieten in RX.5-K

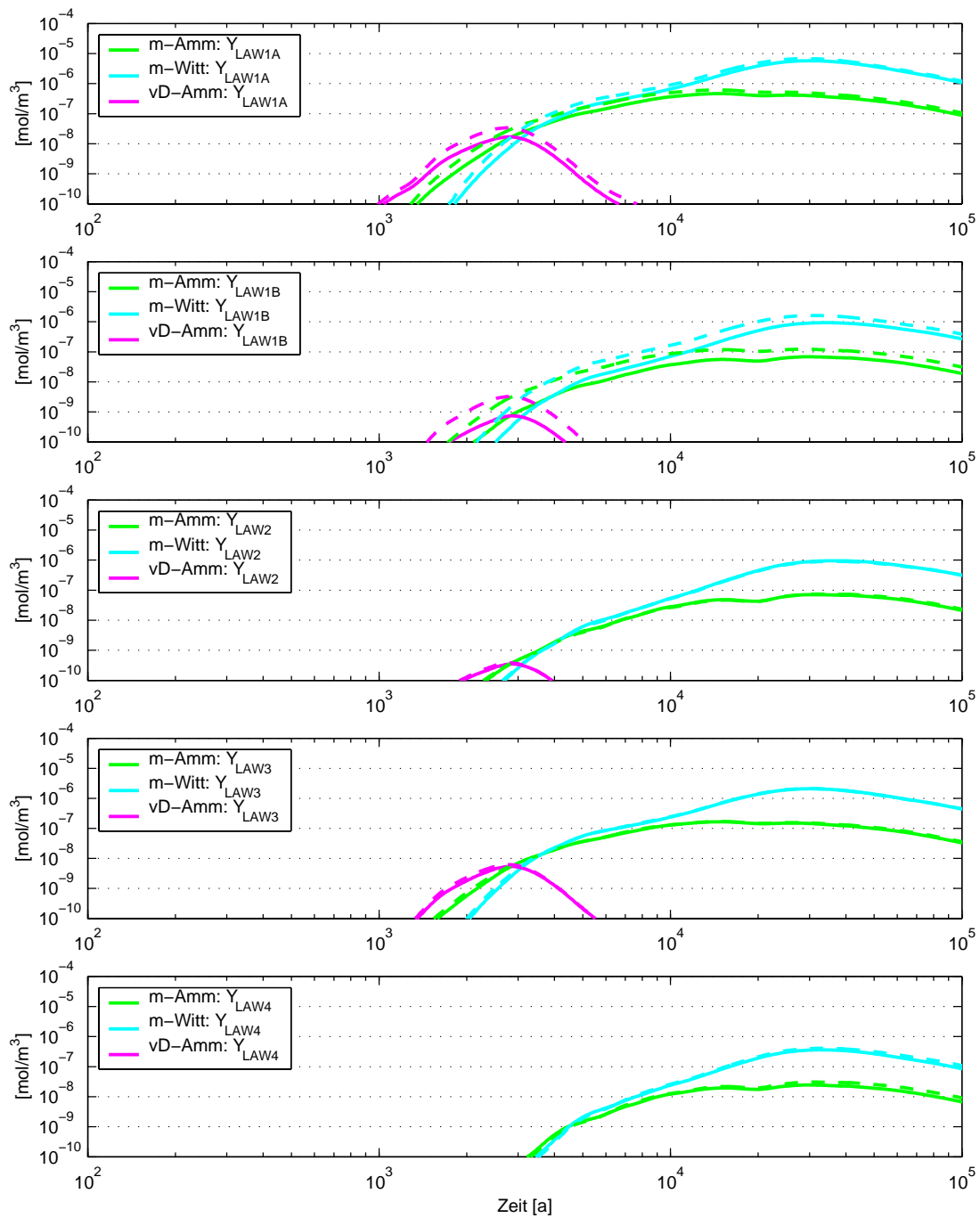


Abb. 5.40 Y-Tracerkonzentrationen in den drei Exfiltrationsgebieten in RX.5-K

Konzentrationen der Tracer aus LAW1B in der kombinierten Variante in allen drei Gebieten, sowie das spätere Maximum im Exfiltrationsgebiet „Muschelkalk – Ammerbeek“ (*m-Amm*). Abgesehen von um ungefähr den Faktor 2 niedrigeren Tracerkonzentrationen aus LAW1A im Exfiltrationsgebiet „verstürzten Deckgebirge – Ammerbeek“ (*vD-Amm*), sind die Einflüsse bei allen anderen Tracern vernachlässigbar.

Vergleicht man die Gesamtverdünnung der Tracer im Grubengebäude und im Deckgebirge für das Exfiltrationsgebiet *m-Witt* (Abb. 5.41 im Vergleich zu Abb. 3.33 in Kap. 3.1.2) wird deutlich, dass die Tracer aus LAW1B in dieser Variante eine Gesamtverdünnung von mehr als 10^6 erfahren (z.Vgl. in RX.1-K: 620 000)²³. Ein Einfluss auf die Beiträge aus LAW1A wird in dieser Abbildung nicht ersichtlich, da das Maximum der Exposition über diesen Transportpfad erst nach 30 000 Jahren erreicht wird, wo die verzögernden Effekte im Grubengebäude nicht mehr wirksam werden.

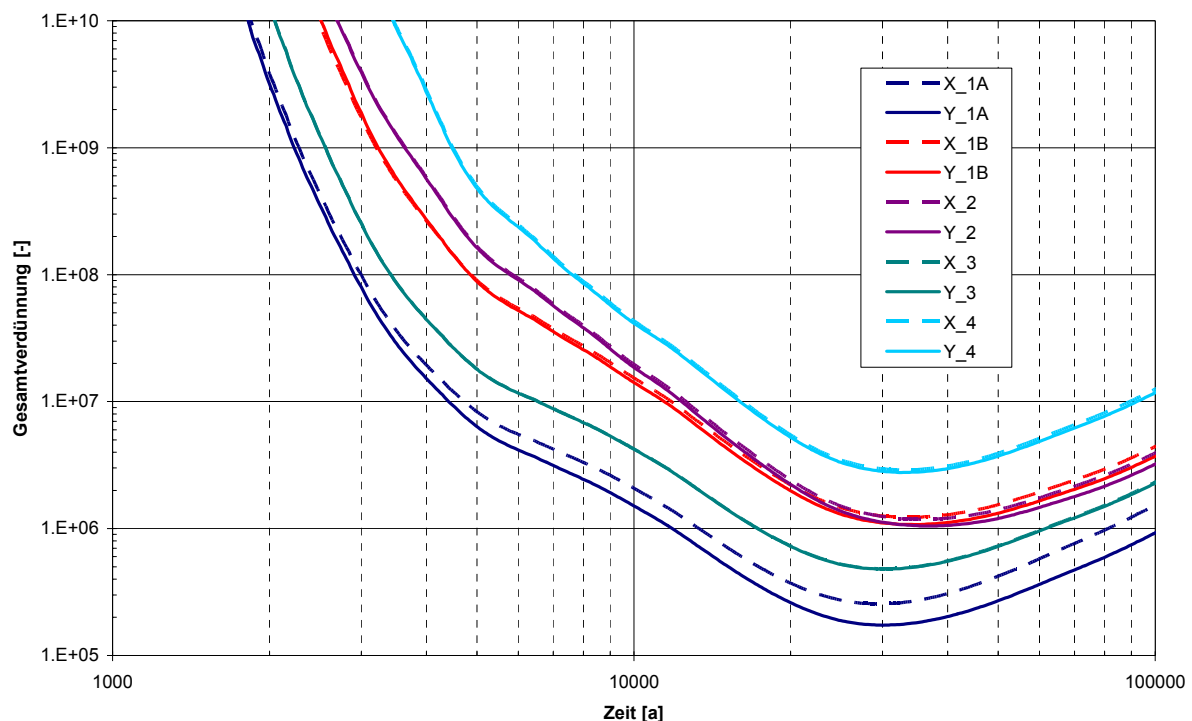


Abb. 5.41 Gesamtverdünnung der Tracer im Gruben- und im Deckgebirge bis zum Exfiltrationsgebiet *m-Witt* (Variante RX.5-K)

²³ Wie bereits im Vergleichsfall (Kap. 3.1.2) wurden bei den Berechnungen zur Verdünnung der Tracer Effekte der Kanalisierung im Grubengebäude nicht berücksichtigt. Vergleichsrechnungen unter Berücksichtigung dieser Effekte mit LOPOS (Kanalisierung auf 40 % der Grundfläche im Baufeld in der Südflanke) zeigen, dass das Minimum der Gesamtverdünnung dadurch nochmals um einen Faktor 2 ... 5 verringert sein kann.

5.4.3 **Modellergebnisse LOPOS (RX.5-L)**

5.4.3.1 *Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen*

Die wie im Rechenfall RX.2 gegenüber dem Vergleichsfall RX.1 geänderten Strömungen im Umfeld der Einlagerungsbereiche sowie die wie im Rechenfall RX.4 aktualisierten Radionuklidquellterme wirken sich unmittelbar auf die Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen aus. Abb. 5.42 ff. zeigen die zeitlichen Entwicklungen der Konzentrationen für die Strahlenexposition potenziell wesentlicher Elemente in den Einlagerungsbereichen:

- In LAW1A sind bis 200 Jahre, im Vergleichsfall der Zeitpunkt eines Milieuwechsels, die Konzentrationen von Uran und Plutonium um mehrere Größenordnungen höher. Nach 200 Jahren ist der Unterschied für Plutonium nur noch gering, während die Konzentration von Uran dann um etwa den Faktor 6 höher bleibt. Die höhere Urankonzentration kann sich jedoch nur über Zerfall über das langlebige Tochternuklid Th-230 (Halbwertszeit 74 000 a), das selber nicht eingelagert wurde, auf die Strahlenexposition auswirken.
- In LAW1B sind die Konzentrationen von Uran und Plutonium um etwa 2,5 bzw. 3,5 Größenordnungen höher.
- Die Änderungen in LAW2 sind vergleichbar mit jenen in LAW1A.
- In LAW3 ist die Plutoniumkonzentration um etwa 3,5-Größenordnungen höher, die Thorium- und Urankonzentrationen sind um den Faktor 150 bzw. 2 höher.
- In LAW4 ist die Plutoniumkonzentration von Plutonium bis 200 Jahre, im Vergleichsfall der Zeitpunkt des Milieuwechsels, um 3 Größenordnungen höher, danach unverändert. Die Urankonzentration ist über dem Gesamtbetrachtungsraum um eine Größenordnung höher. Im Gegensatz zum Vergleichsfall ist Americium nun löslichkeitsbegrenzt, wodurch bis 1 000 Jahre die Americiumkonzentration nun um bis zu einer Größenordnung geringer ist.

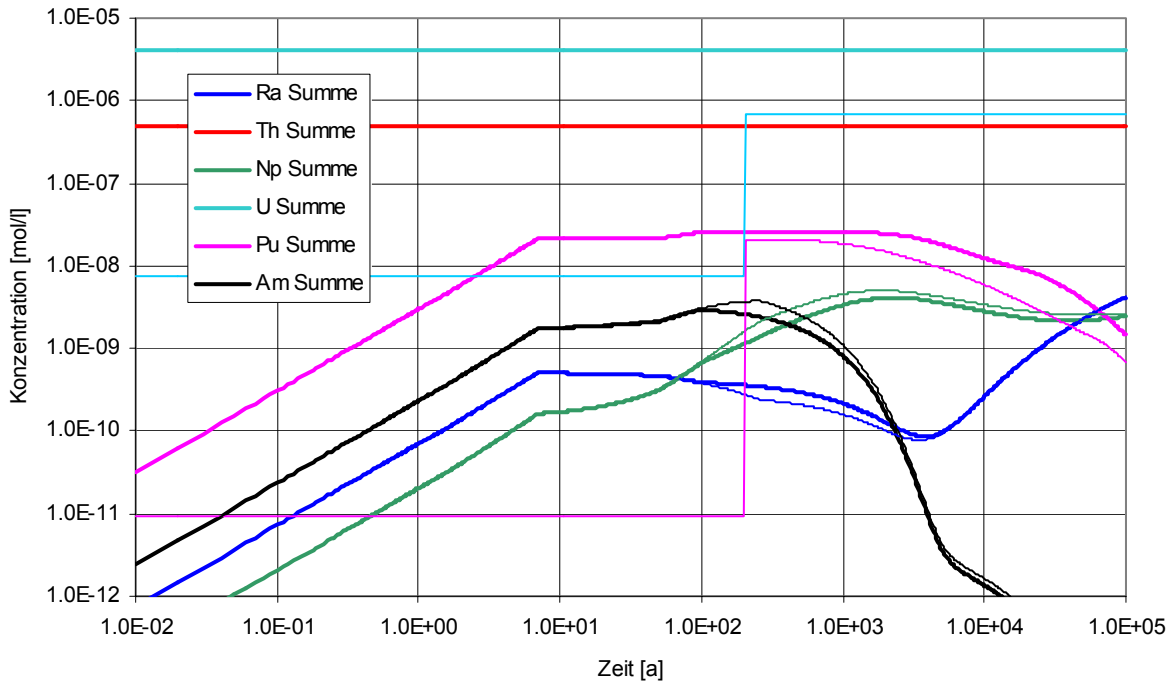


Abb. 5.42 Elementkonzentrationen in LAW1A (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

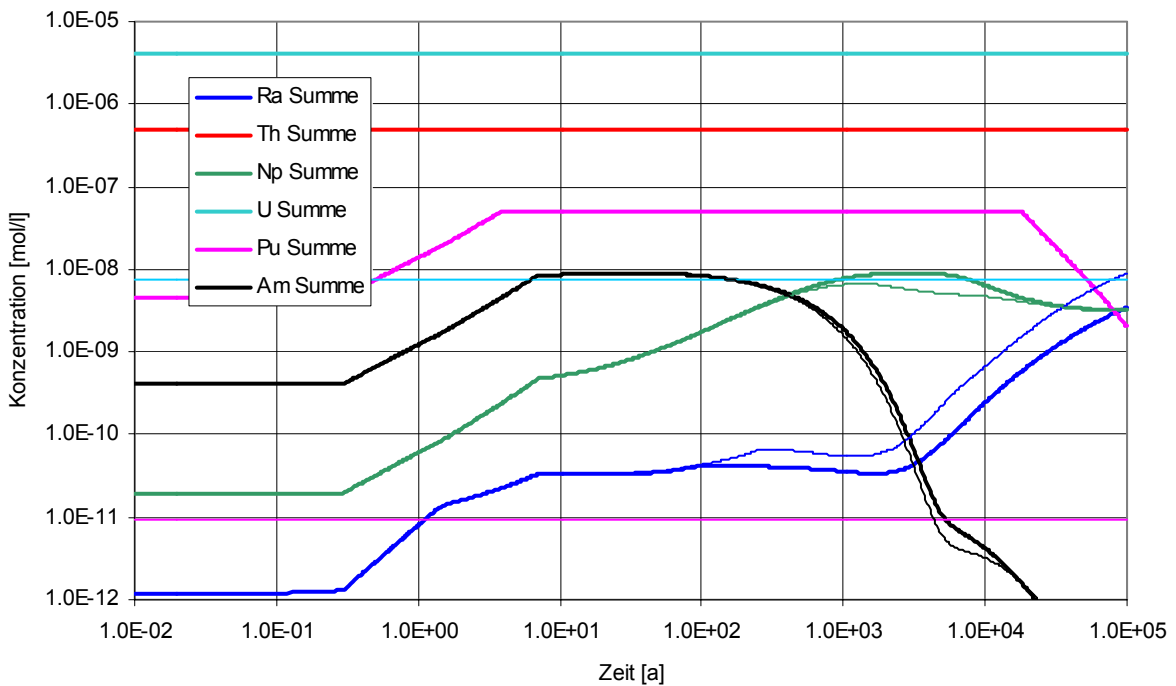


Abb. 5.43 Elementkonzentrationen in LAW1B (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

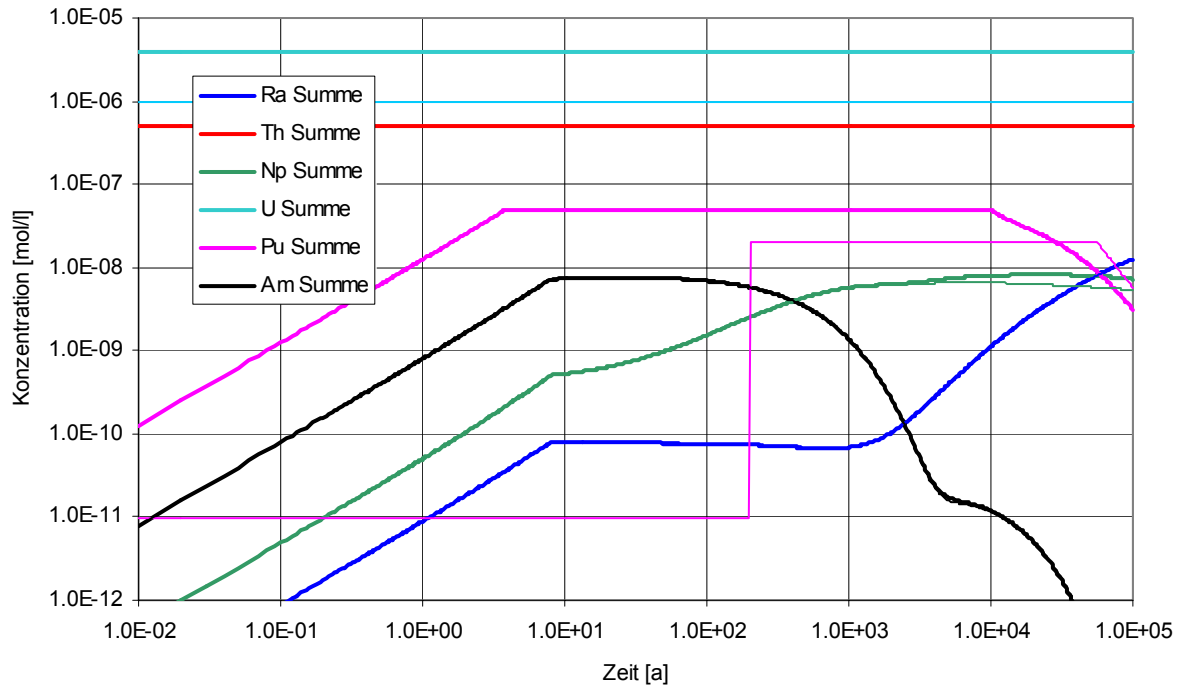


Abb. 5.44 Elementkonzentrationen in LAW2 (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

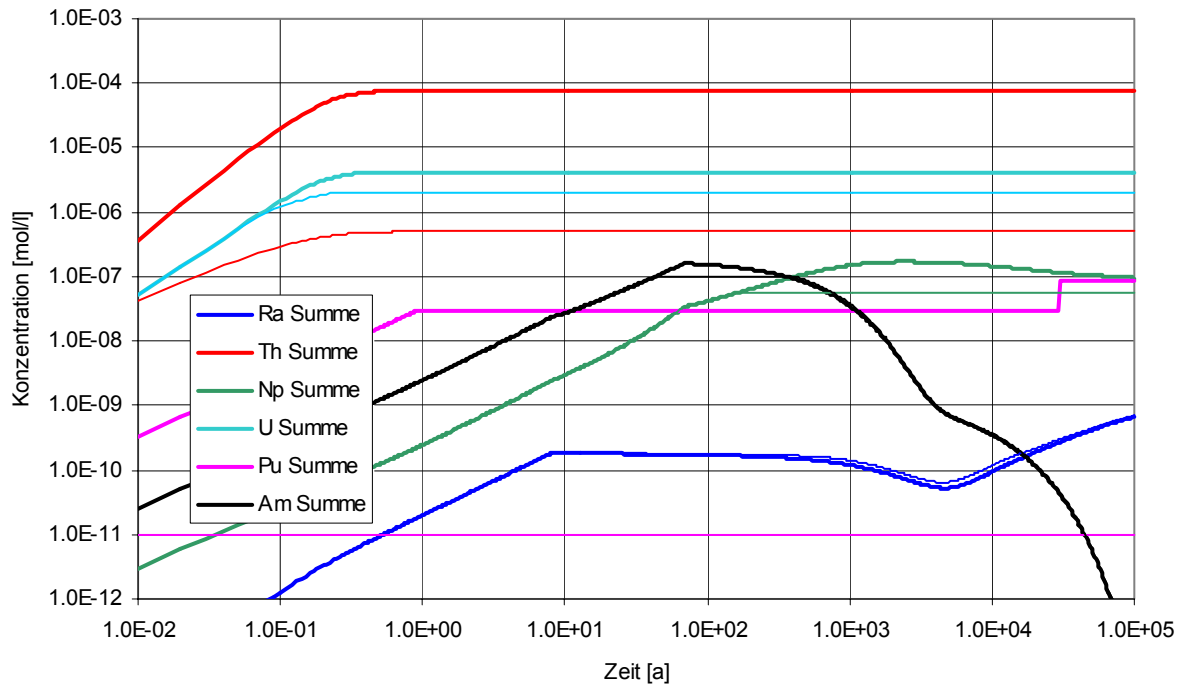


Abb. 5.45 Elementkonzentrationen in LAW3-O – enthält VBA (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

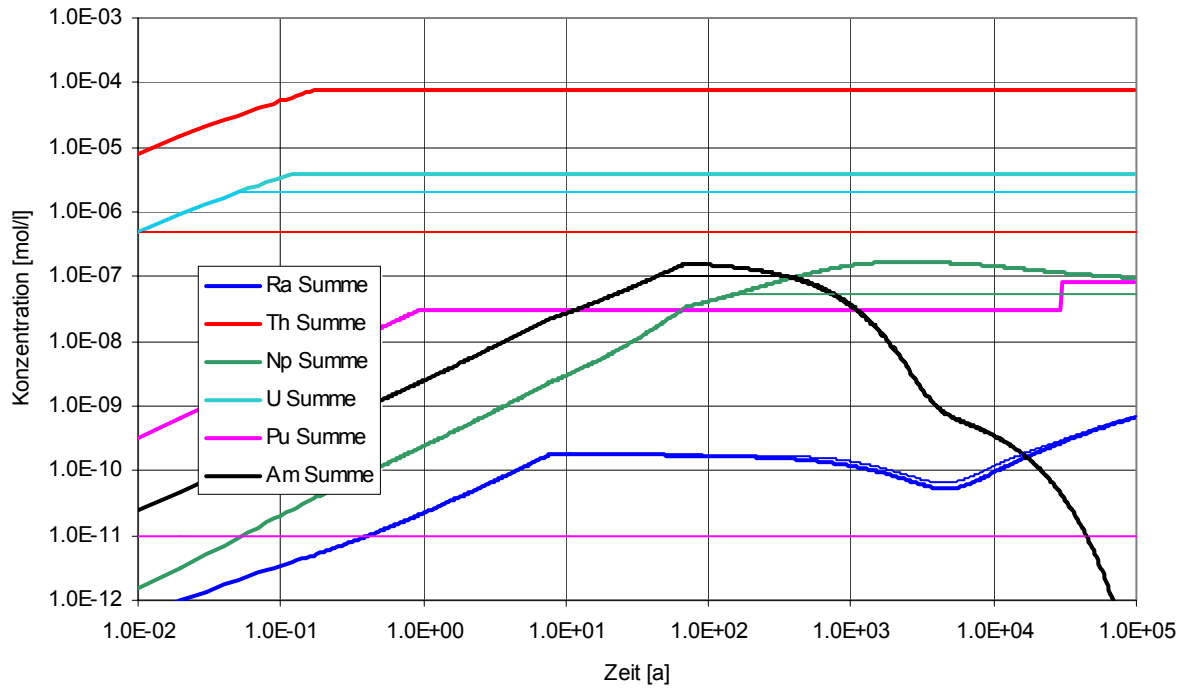


Abb. 5.46 Elementkonzentrationen in LAW3-W (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

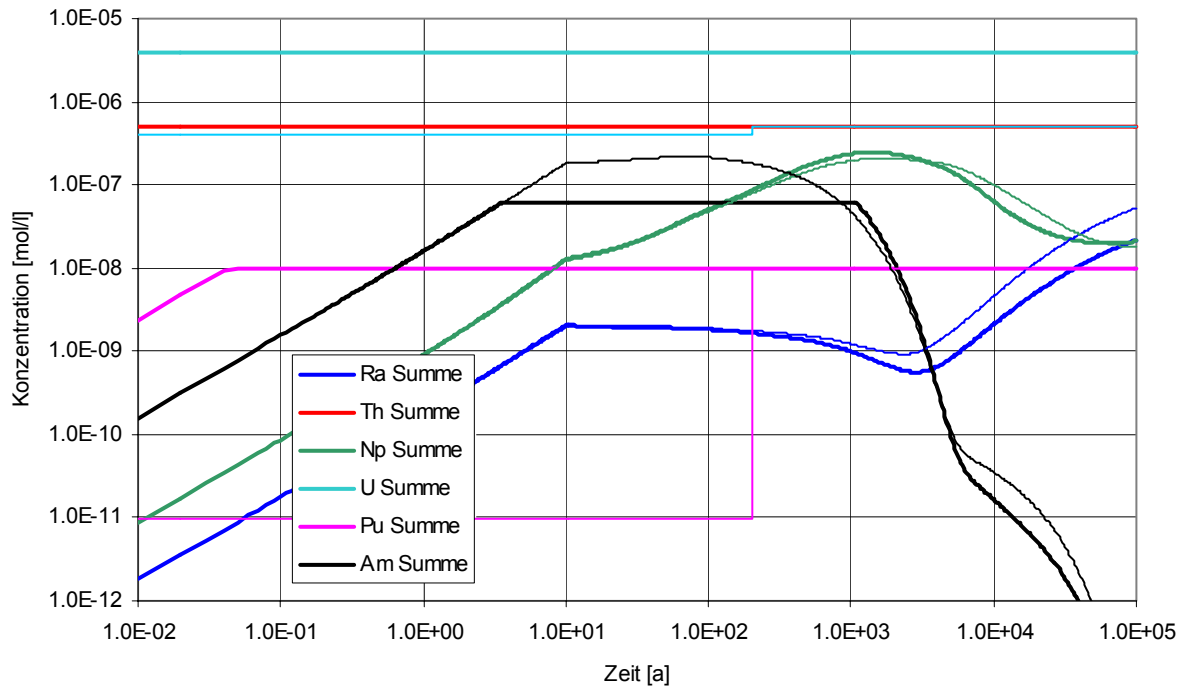


Abb. 5.47 Elementkonzentrationen in LAW4-O (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

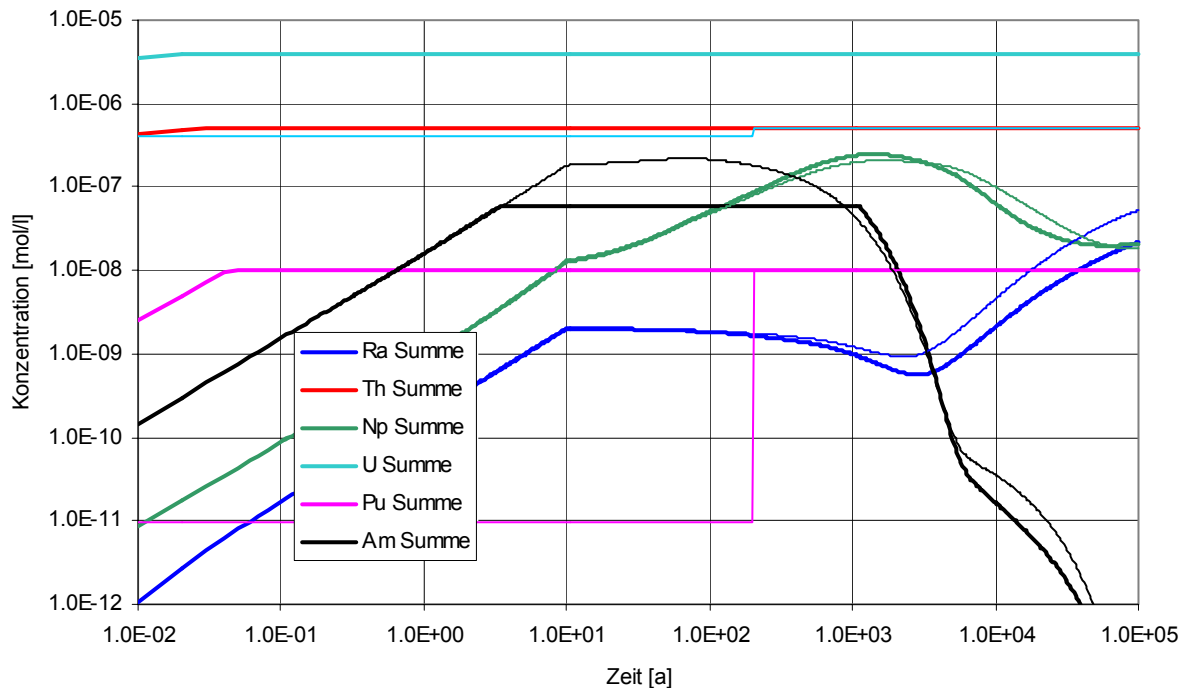


Abb. 5.48 Elementkonzentrationen in LAW4-W – enthält VBA (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

In Tab. 5.11 sind die Zeitpunkte des Erreichens und ggf. wieder Unterschreitens der maximal möglichen Elementkonzentrationen für den Rechenfall RX.5 aufgelistet:

- Wegen der gegenüber dem Vergleichsfall RX.1 höheren Werte der maximal möglichen Elementkonzentrationen wird diese Konzentration in LAW1A für Plutonium und in LAW3 für Neptunium und Americium nun nicht mehr erreicht, bzw. in LAW1B und LAW2 für Plutonium nun früher wieder unterschritten.
- In LAW4 wird die gegenüber dem Vergleichsfall niedrigere maximal mögliche Elementkonzentration für Americium wegen dem im Rechenfall RX.5 größeren verdünnungswirksamen Volumen im Vergleich zum Rechenfall RX.4 etwa 500 Jahre früher erreicht.
- In LAW2 ist, wegen des geringeren Lösungsaustausches jenes Einlagerungsbereichs, der Zeitpunkt, zu dem die maximal mögliche Elementkonzentration von Plutonium wieder unterschritten wird, im Vergleich zum Rechenfall RX.4 leicht verzögert.

Tab. 5.11 Erreichen und Unterschreiten der maximal möglichen Konzentrationen [a]

RX.5 ELB	U		Pu		Th		Np		Am	
	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis
LAW1A	0,0	> 10 ⁵	-	-	0,0	> 10 ⁵				
LAW1B	0,0	> 10 ⁵	3,9	17 800	0,0	> 10 ⁵				
LAW2	0,0	> 10 ⁵	3,9	10 000	0,0	> 10 ⁵				
LAW3-O	0,4	> 10 ⁵	0,9	> 10 ⁵	1,4	> 10 ⁵	-	-	-	-
LAW3-W	0,1	> 10 ⁵	0,9	> 10 ⁵	0,2	> 10 ⁵	-	-	-	-
LAW4-O	0,0	> 10 ⁵	0,1	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵			3,5	955
LAW4-W	0,0	> 10 ⁵	0,1	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵			3,5	955

Änderungen gegenüber dem Vergleichsfall RX.1 sind fett hervorgehoben

5.4.3.2 Radionuklidströme aus und zu den Einlagerungsbereichen

In Abb. 3.46 ff. sind für die kombinierte Variante RX.5 – fette Linien – die Radionuklidströme über die jeweiligen Modellverbindungen im Umfeld der Einlagerungsbereiche, beispielsweise für Pu-239 dargestellt, und jenen des Vergleichsfalls RX.1 – dünne Linien – (siehe Kap. 3.2.1.3) gegenübergestellt.

Die zeitlichen Entwicklungen der Nuklidströme folgen im Allgemeinen jenen der Flüssigkeitsströme. Meist wird erst zu späten Zeiten auch Diffusion relevant. Als Ausnahme ist dabei insbesondere der größtenteils diffusionsbedingte, teilweise der Strömungsrichtung entgegen gerichtete Austausch zwischen LAW1A und LAW1B über S-LAW1A²⁴, zwischen LAW1A und ULAW1 über S-ULAW1, sowie auch zwischen LAW1B und F1-700 über V-LAW1B zu beachten.

²⁴ Im LOPOS Modell sind parallele Verbindungen zwischen Segmenten zusammengefasst. Dies trifft hier insbesondere zu für S-LAW1A (S-LAW1A und V-LAW1A), H-1.AS-L (H-1.AS und A-1.AS), S-LAW2-L (S-LAW2 und V-LAW2), S-LAW3-L (S-LAW3 und V-LAW3) und H-4.Ca-L (H-4.Ca und A-4.Ca)

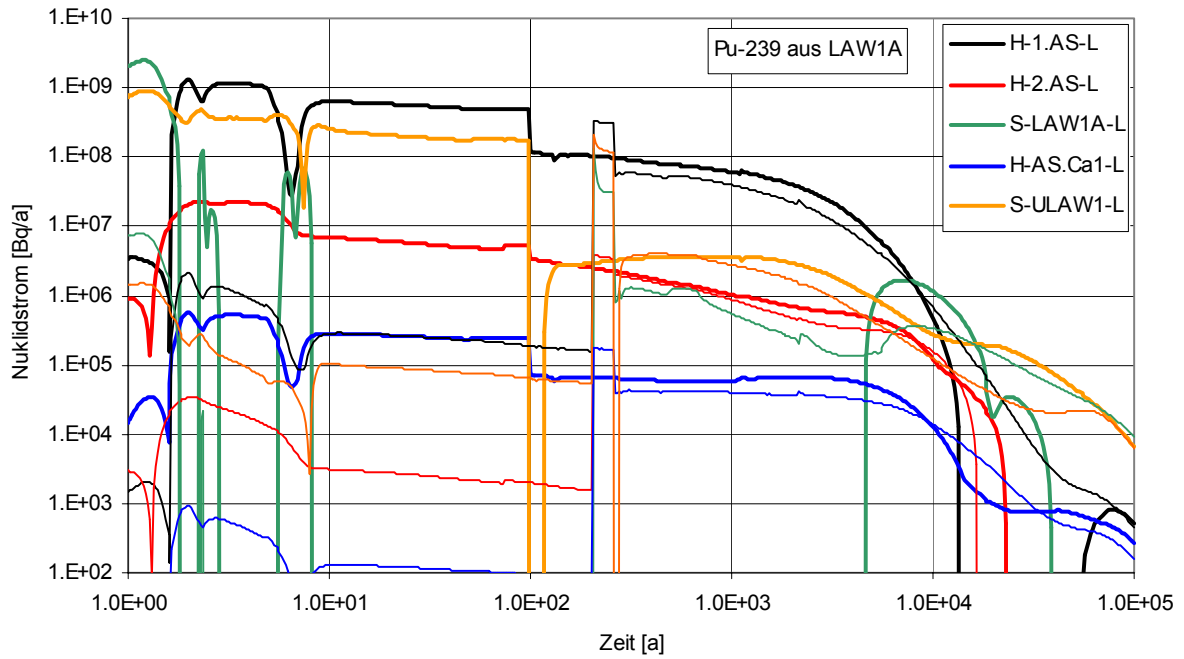


Abb. 5.49 Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW1A (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

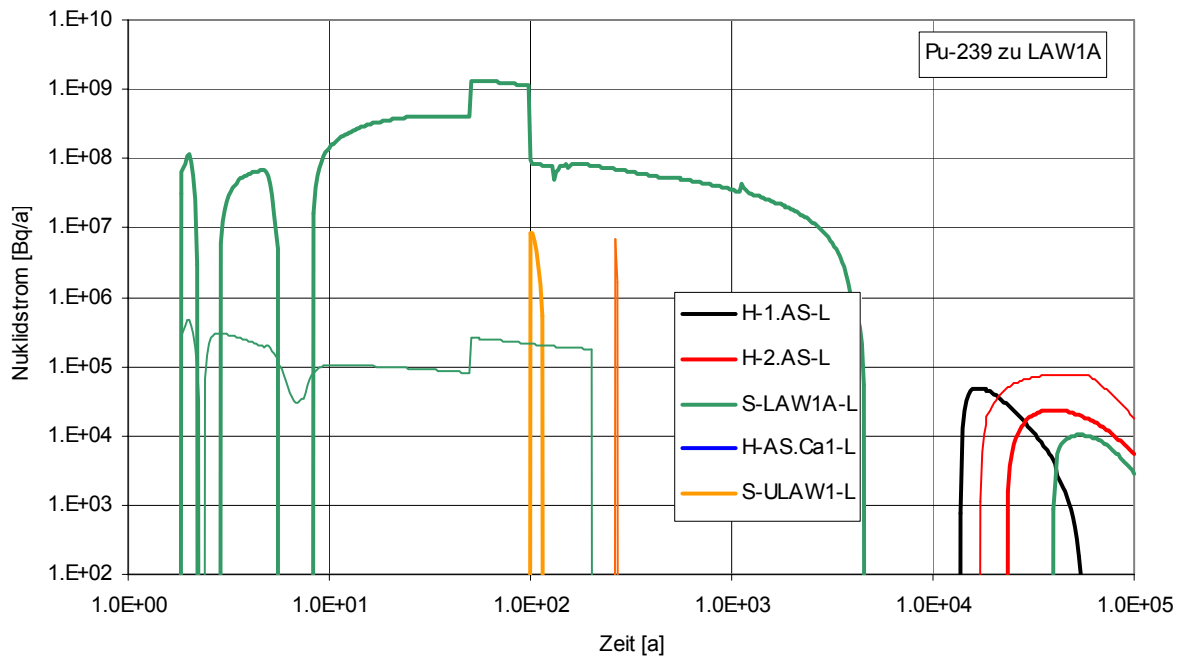


Abb. 5.50 Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW1A (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

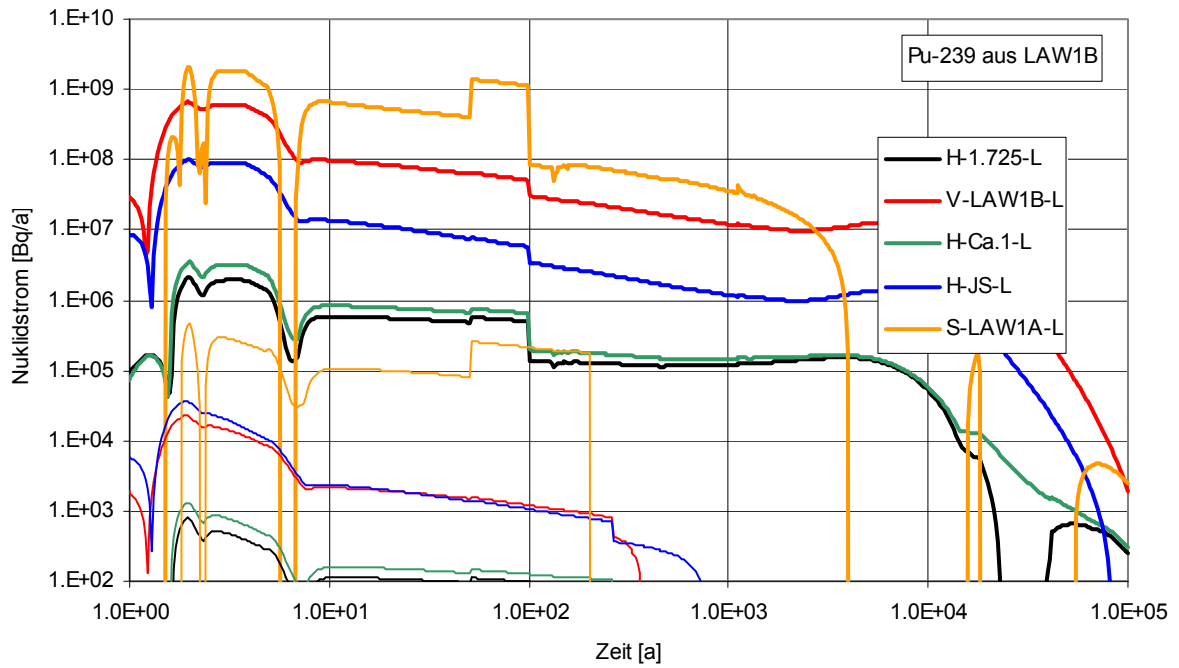


Abb. 5.51 Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW1B (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

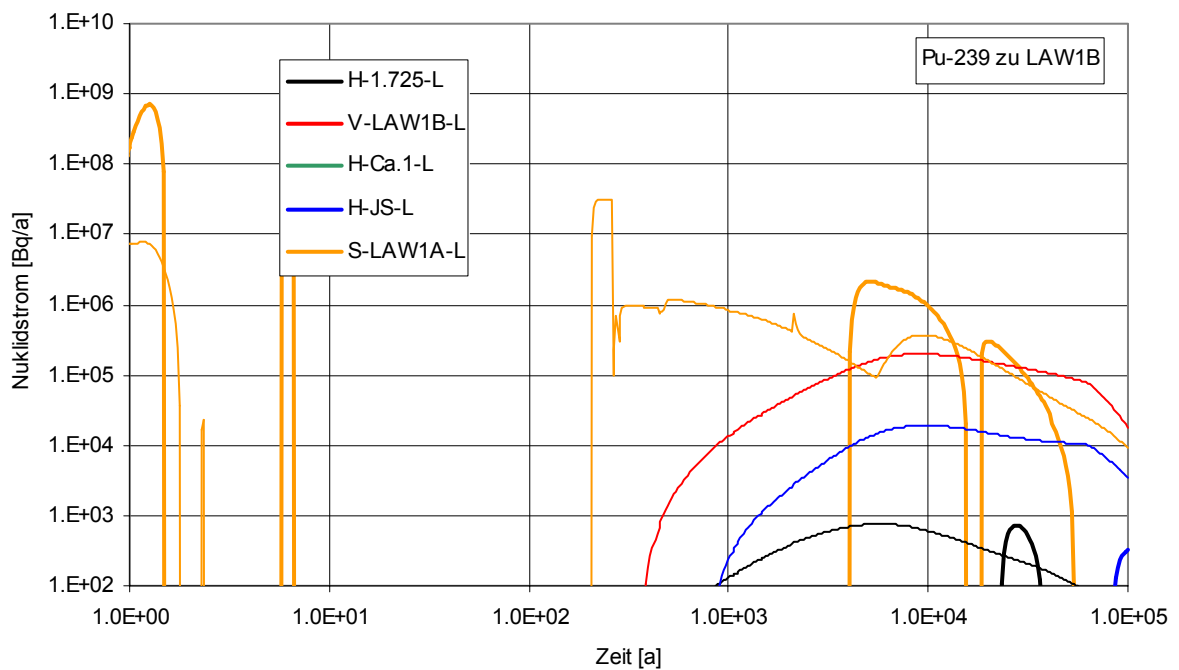


Abb. 5.52 Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW1B (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

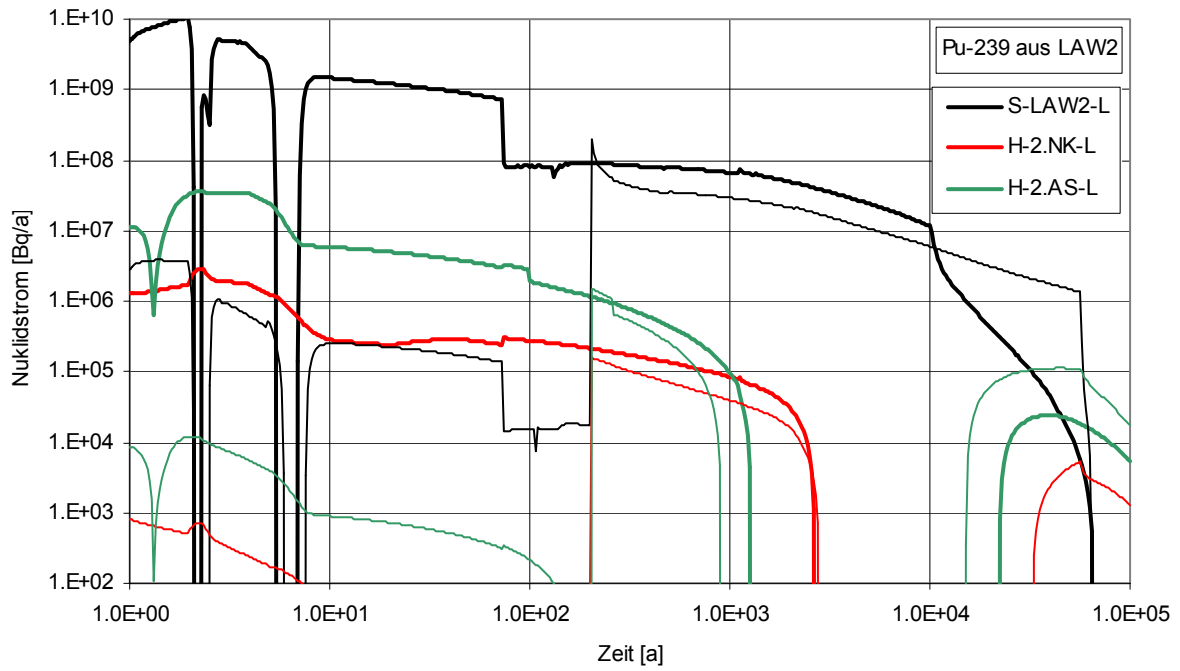


Abb. 5.53 Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW2 (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

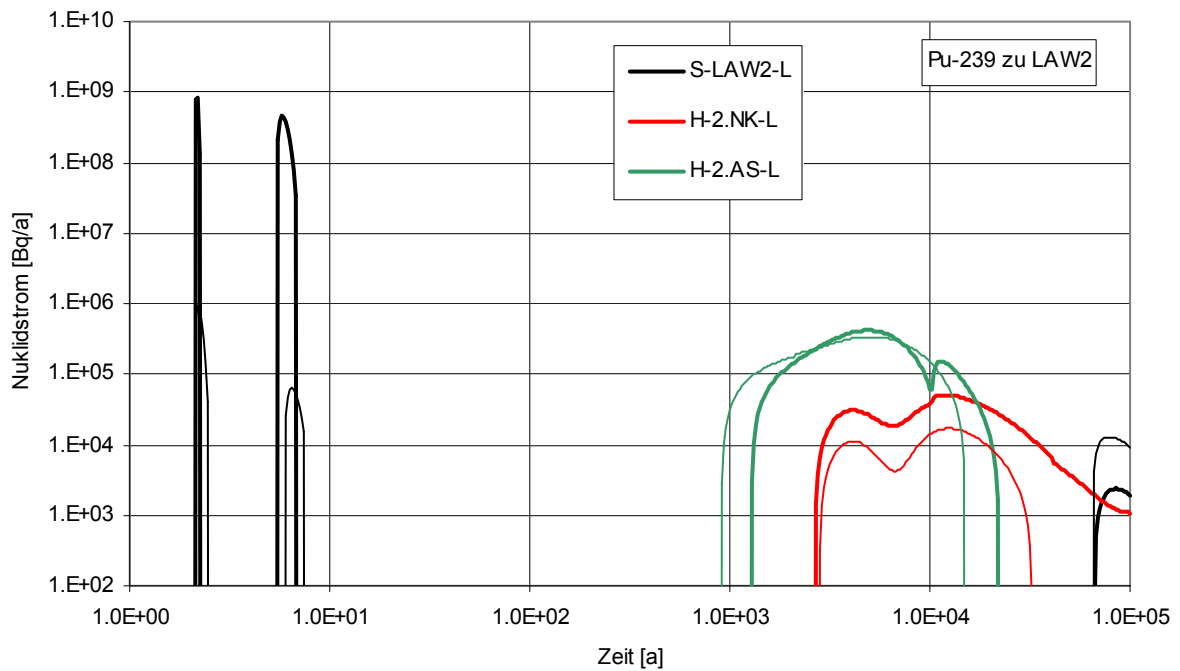


Abb. 5.54 Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW2 (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

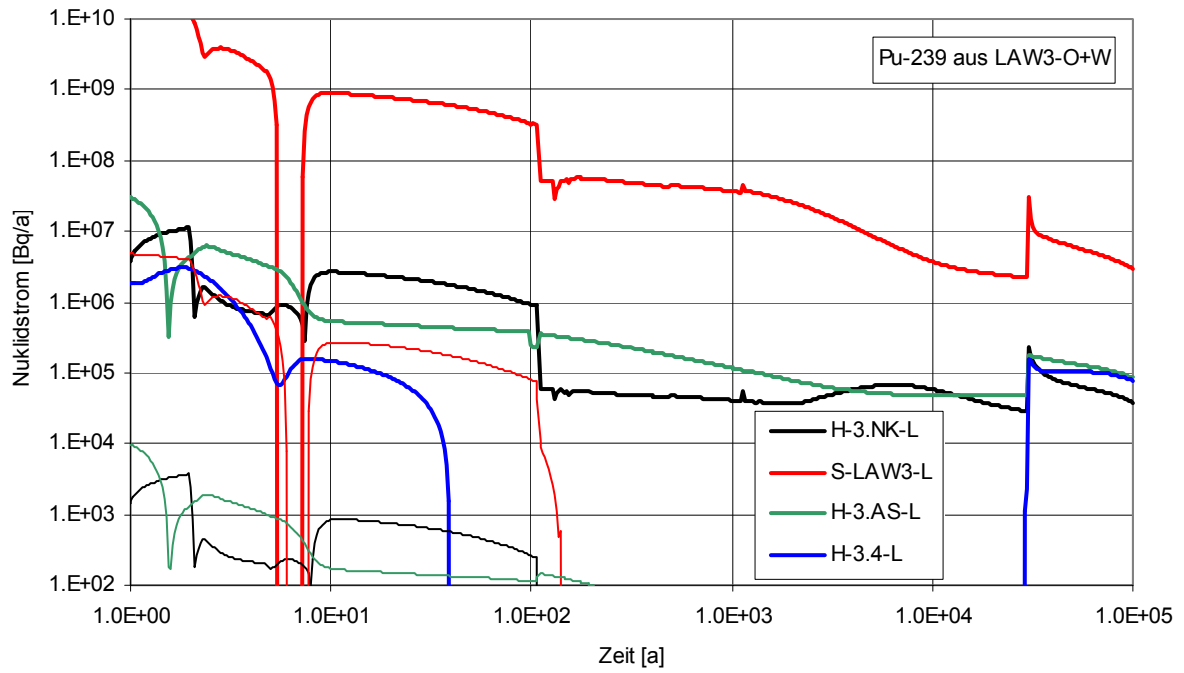


Abb. 5.55 Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW3 (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

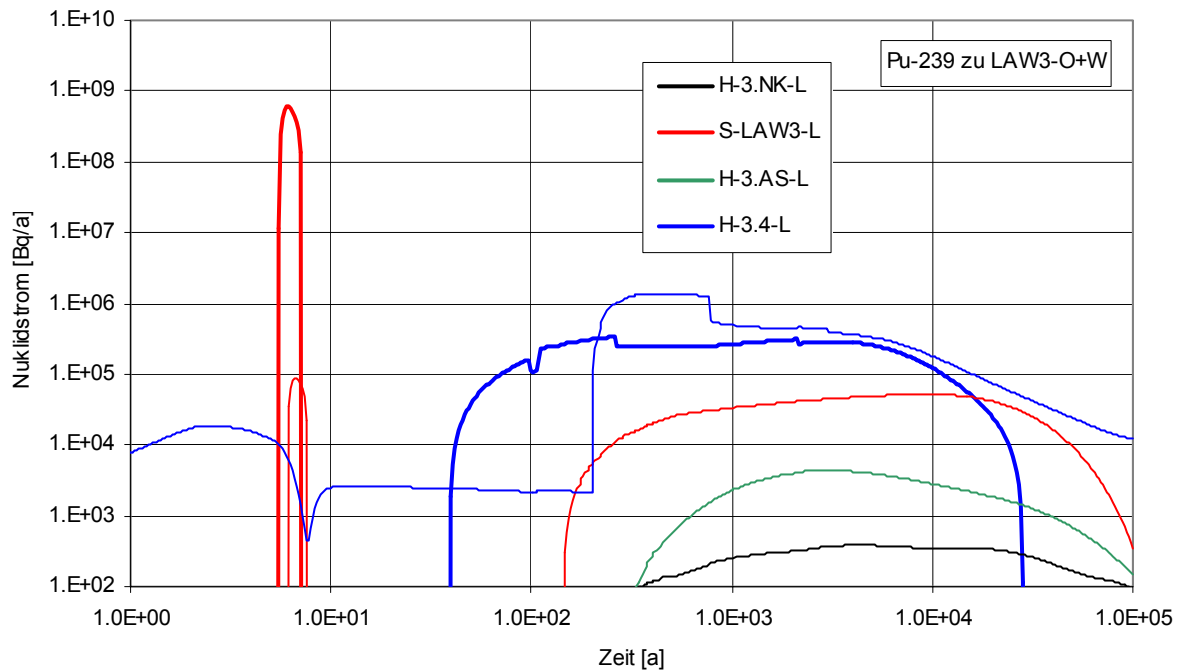


Abb. 5.56 Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW3 (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

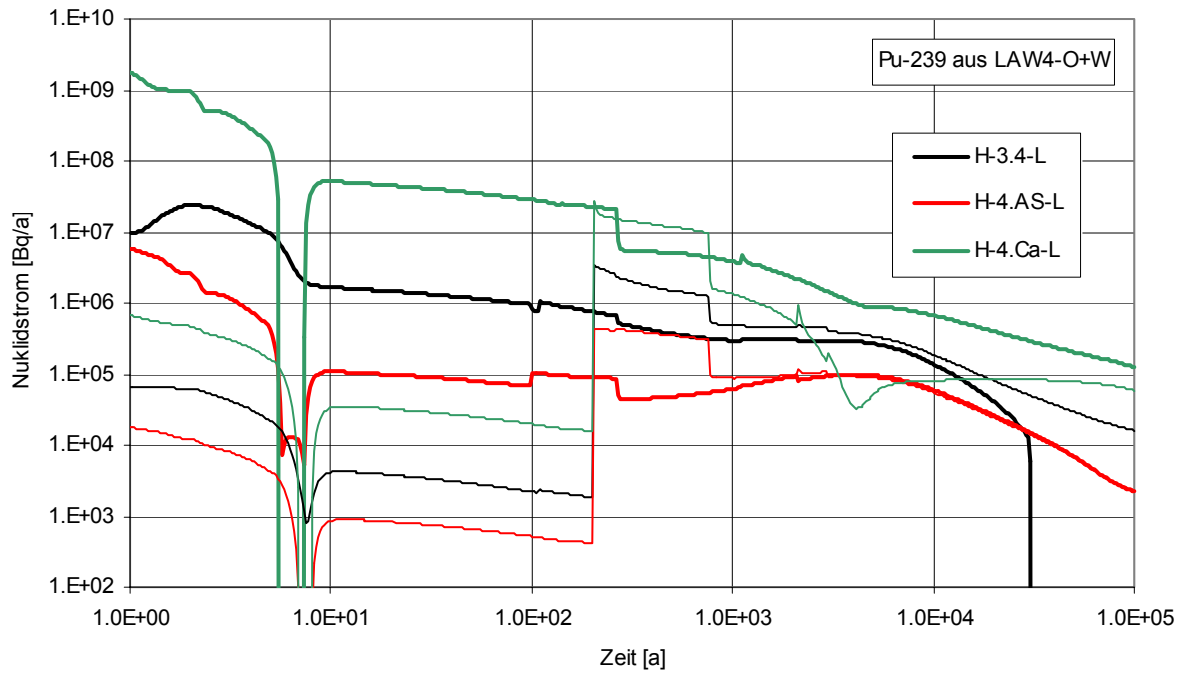


Abb. 5.57 Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW4 (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

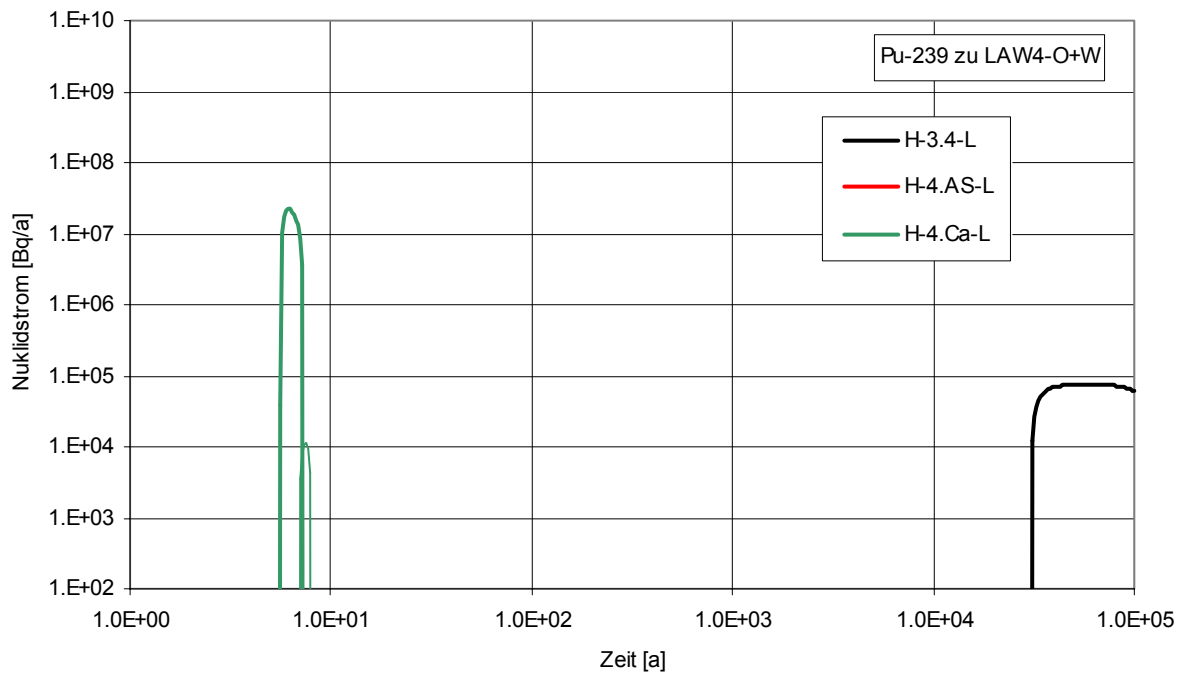


Abb. 5.58 Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW4 (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

5.4.3.3 Radionuklidkonzentrationen im Baufeld in der Südflanke

Abb. 5.59 ff. zeigen für den Rechenfall RX.5 die Radionuklidkonzentrationen für Am-241, Ra-226 und Pu-239 in ausgewählten Segmenten des Baufeldes in der Südflanke.

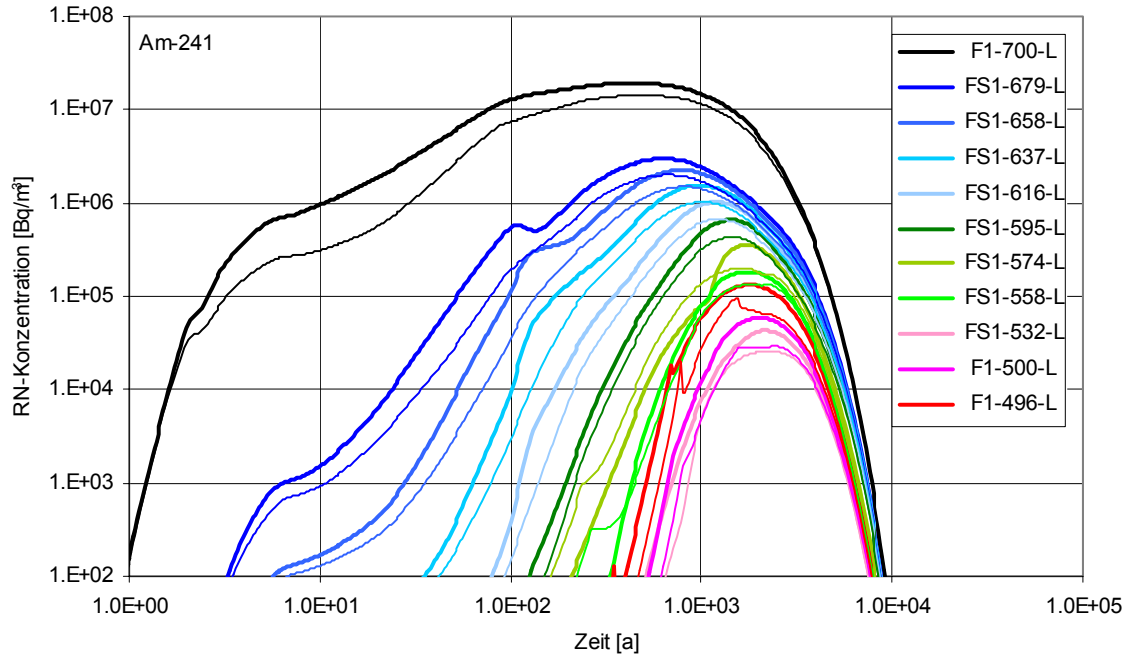


Abb. 5.59 Konzentrationen von Am-241 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

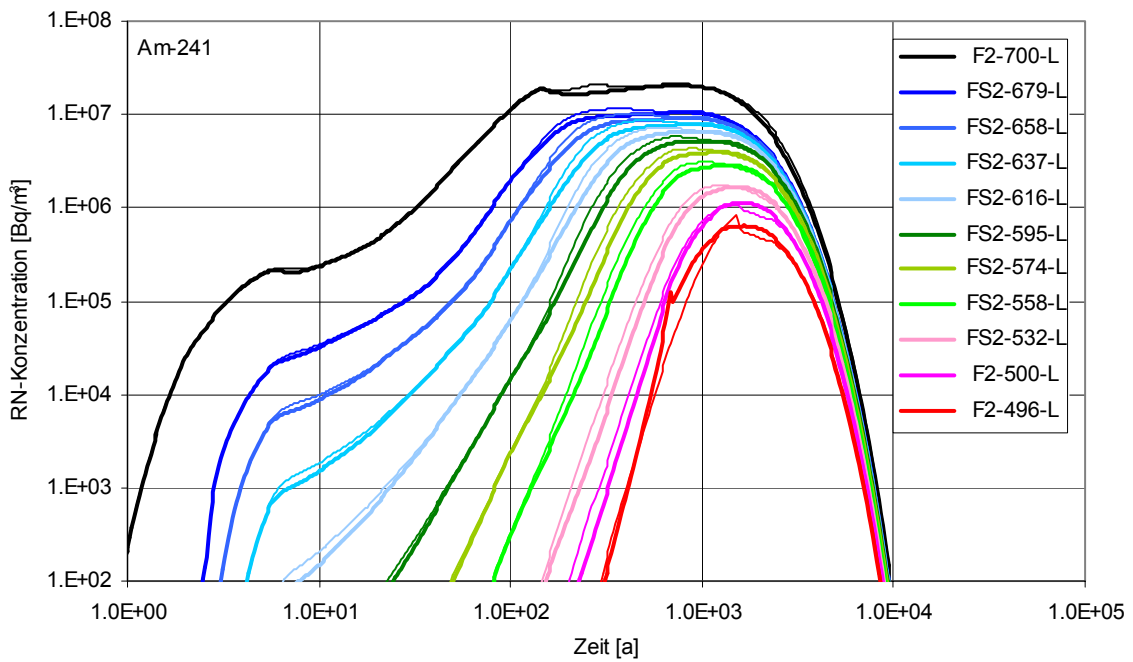


Abb. 5.60 Konzentrationen von Am-241 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

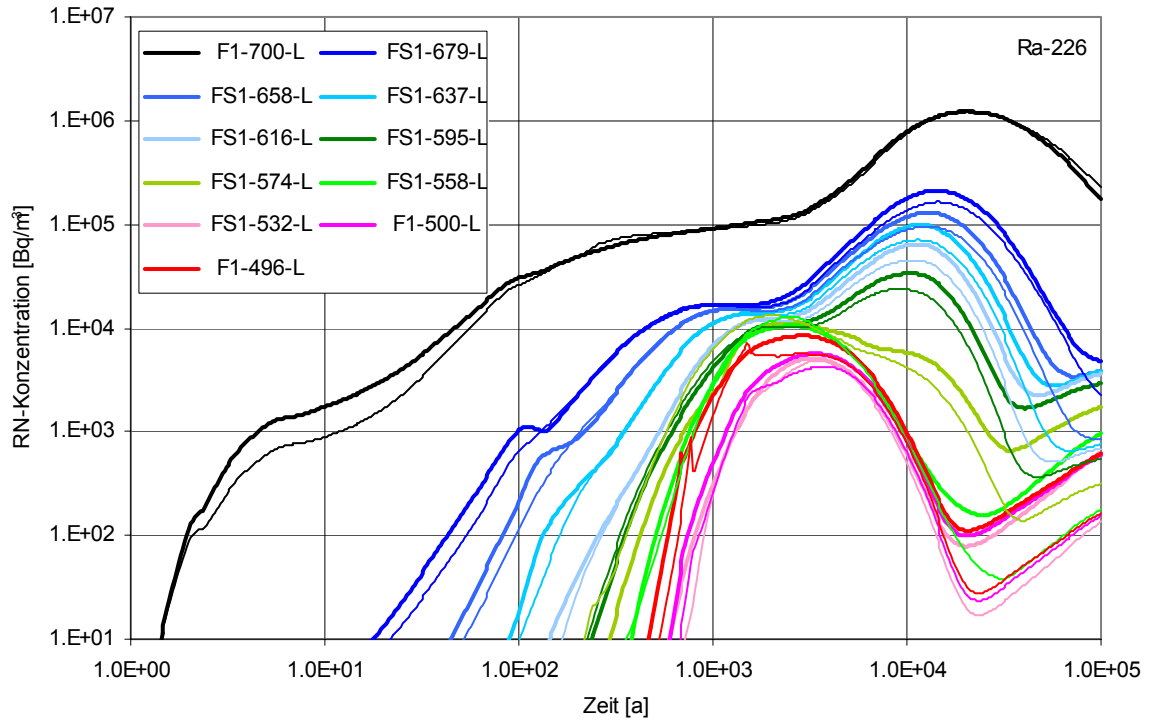


Abb. 5.61 Konzentrationen von Ra-226 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

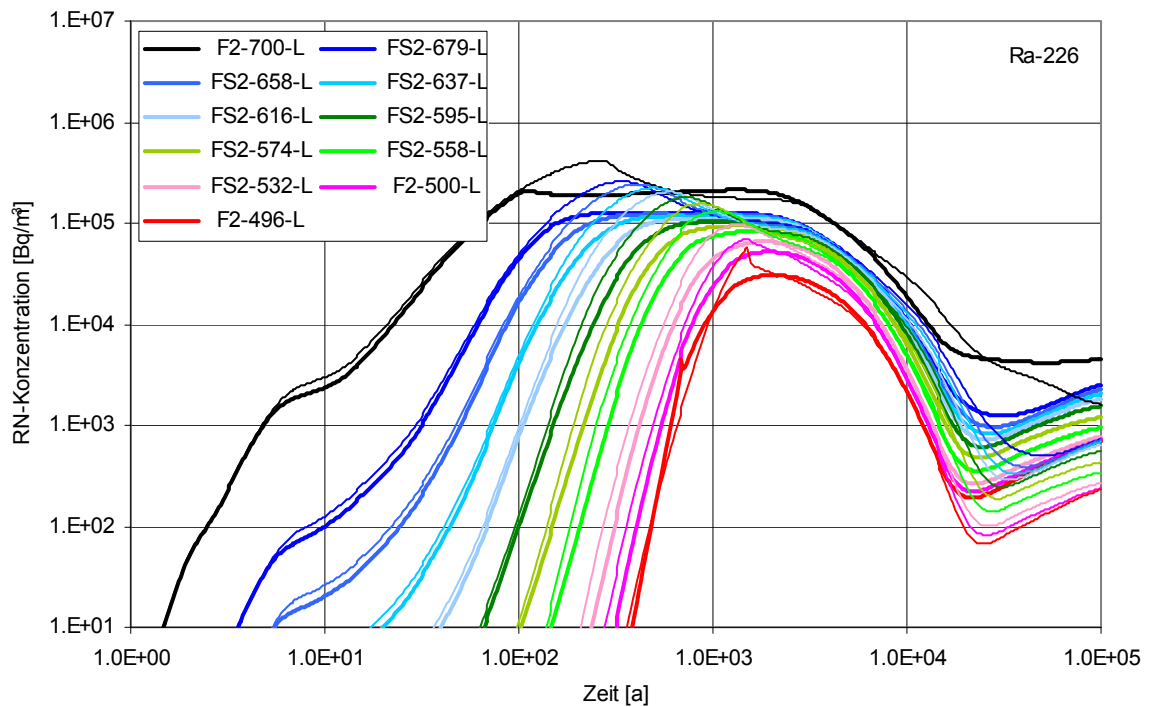


Abb. 5.62 Konzentrationen von Ra-226 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

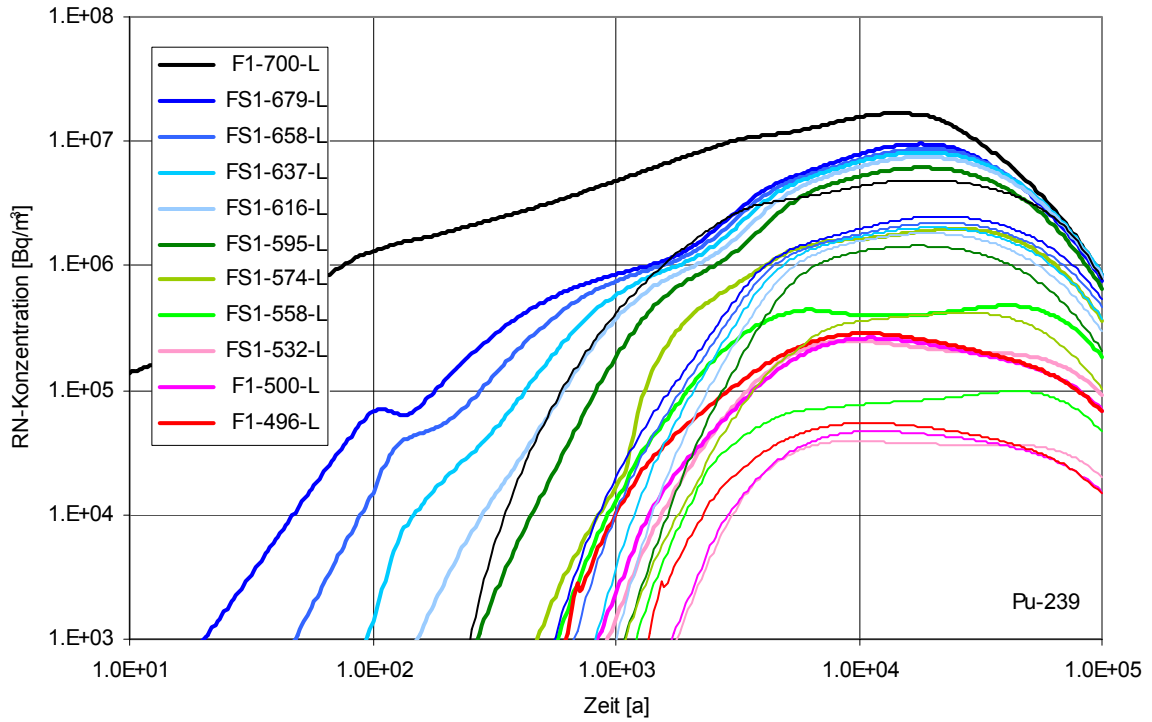


Abb. 5.63 Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

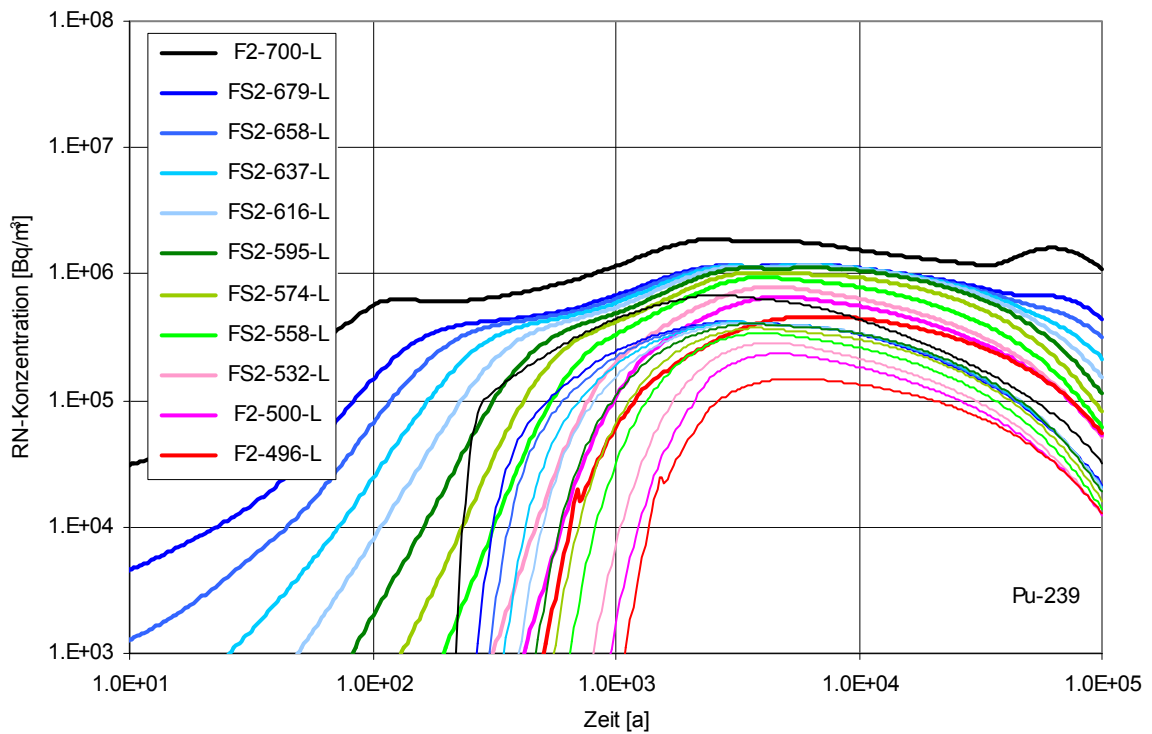


Abb. 5.64 Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Die höheren Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen wirken sich als ebenfalls höhere Radionuklidkonzentrationen im Baufeld in der Südflanke aus. Obwohl die Americium- und Radiumkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen weitgehend unbeeinträchtigt sind, führt der im Rechenfall RX.5 gegenüber dem Vergleichsfall RX.1 größere Lösungsstrom von LAW1B zu F1-700 über V-LAW1B zu beschleunigt ansteigenden Radionuklidkonzentrationen in F1-700. Diese Beschleunigung setzt sich im Weststrang (F1/FS1-Segmente) in den Konzentrationsentwicklungen in allen Segmenten unterhalb der Austrittsstelle in 574 m Tiefe fort. Im Oststrang des Baufeldes in der Südflanke wirken sich die geänderten Strömungsverhältnisse im Umfeld von LAW1B als leichte Verzögerung aus.

Der beschleunigte Anstieg sowie auch die im Maximum um etwa den Faktor 3 höheren Pu-239-Konzentrationen im Baufeld in der Südflanke sind – wie im Rechenfall RX.4 – vor allem den höheren Plutoniumkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen zuzuordnen.

5.4.3.4 Radionuklidfreisetzung aus der Grube

In Abb. 5.65 sind für den Rechenfall RX.5 – fette Linien – die Gesamt-Radionuklidströme ausgewählter Radionuklide aus der Grube dargestellt, welche dem Transport im Deckgebirge zu den Exfiltrationsgebieten über die Transferfunktionen zu Grunde gelegt werden. Diese Ströme sind jenen für den Vergleichsfall RX.1 – dünne Linien – gegenübergestellt.

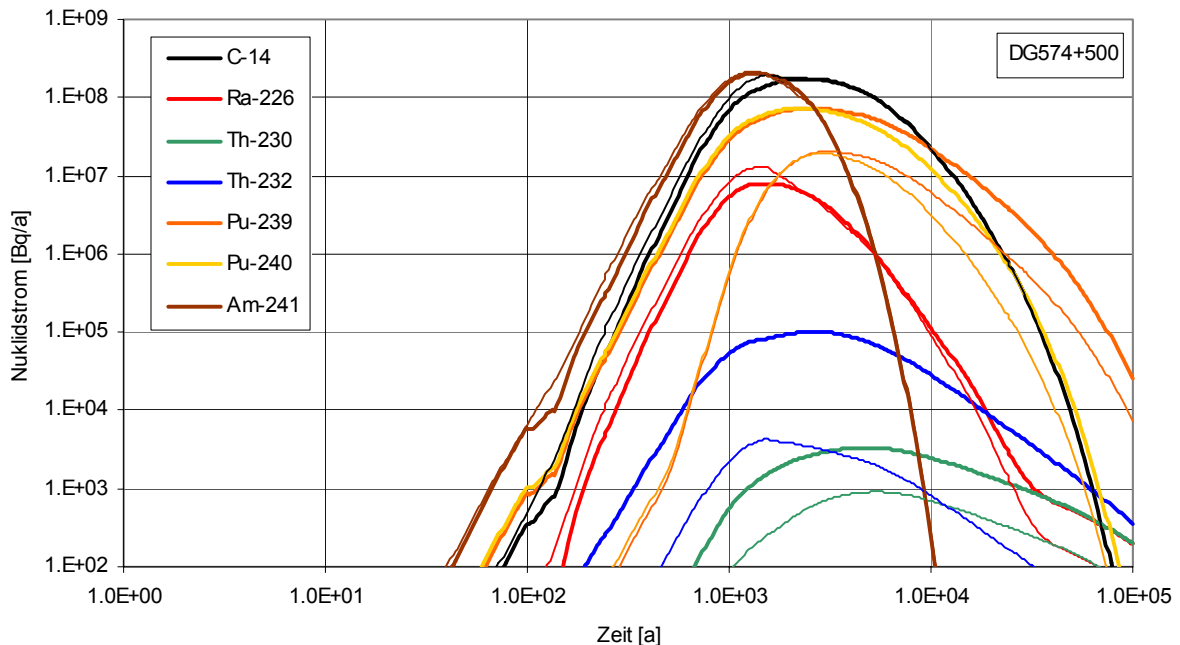


Abb. 5.65 Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Da der Transport über den Oststrang weitgehend die Radionuklidkonzentrationen im Austritt bestimmt, zeigt sich der verzögerte Transport von Am-241 und Ra-226 im Oststrang ebenfalls als leicht verzögerte Freisetzung von Am-241 und Ra-226 aus der Grube.

Im Einklang mit den in den vorhergehenden Kapiteln dargestellten Änderungen der Element- und Radionuklidkonzentrationen sind nur die Austritte der Plutonium- und Thoriumisotope sowie zu späten Zeiten jene ihrer Radiumtochternuklide, relevant höher. Wie im Rechenfall RX.4 sind anfänglich die Austritte der Plutoniumisotope um etwa 3,5 Größenordnungen höher. Dieses Verhältnis klingt jedoch ziemlich schnell ab auf den Faktor 30 bei etwa 1 000 Jahren, den Faktor 3,5 bei etwa 5 000 Jahren, bis etwa den Faktor 3 bei 100 000 Jahren. Der Austrittserhöhung der Thoriumisotope ist relativ konstant: Der Austritt von Th-232 – mit in LAW3 um den Faktor 150 höherer Konzentration – ist um etwa den Faktor 10, jener von Th-230 – Zerfallsprodukt von U-234, mit in allen ELB (meist beschränkt) höherer Konzentration – um etwa den Faktor 3 höher.

5.4.3.5 Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete

Abb. 5.66 zeigt für den Rechenfall RX.5 – fette Linien – einen Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells. Diese Entwicklungen sind ab etwa 1 000 Jahren gegenüber jenen des Vergleichsfalls – dünne Linien – deutlich höher. Die maximale relative Erhöhung, um den Faktor 4, wird bei etwa 10 000 Jahren erreicht, bei 100 000 Jahren beträgt der Unterschied noch einen Faktor 2.

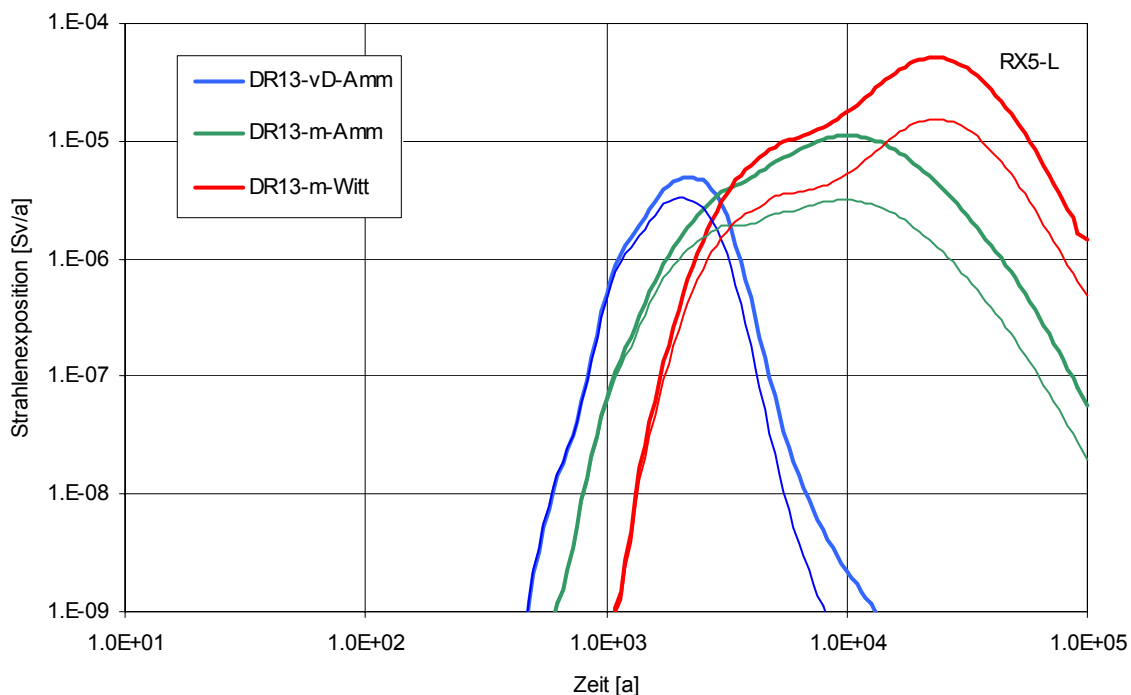


Abb. 5.66 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 5.12 gibt einen Überblick der Änderungen gegenüber dem Vergleichsfall.

Tab. 5.12 Größen und Zeitpunkte der Strahlenexpositionsmaxima für den Rechenfall RX.5 im Vergleich zum Vergleichsfall

DR13	Maximum der potenziellen Strahlenexposition [Sv/a]		Zeitpunkt des Maximums der Strahlenexposition [a]		Veränderung der Strahlenexposition im Maximum gegenüber dem Vergleichsfall
	Variante RX.5-L	Vergleichsfall	Variante RX.5-L	Vergleichsfall	
vD-Amm	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	2 200	2 100	+ 50 %
m-Amm	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	10 000	10 000	+ 250 %
m-Witt	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	23 000	23 000	+ 250 %

In Abb. 5.67 bis Abb. 5.69 sind für den Rechenfall RX.5 – fette Linien – die radionuklid-spezifischen Strahlenexpositionsbeiträge für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells dargestellt und jenen des Vergleichsfalls RX.1 – dünne Linien – gegenübergestellt. In Tab. 5.13 sind die wichtigsten Radionuklidbeiträge zur Zeit der jeweiligen Maxima zusammengetragen. Wie für den Rechenfall RX.4 sind die Beiträge der Plutoniumisotope zur Zeit der jeweiligen Maxima im Vergleich zu RX.1 deutlich höher. Hervorzuheben ist, dass zur Zeit des Maximums für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ der Gesamtbeitrag der Plutoniumisotope jenen von Am-241 und Ra-226/Pb-210 übersteigt.

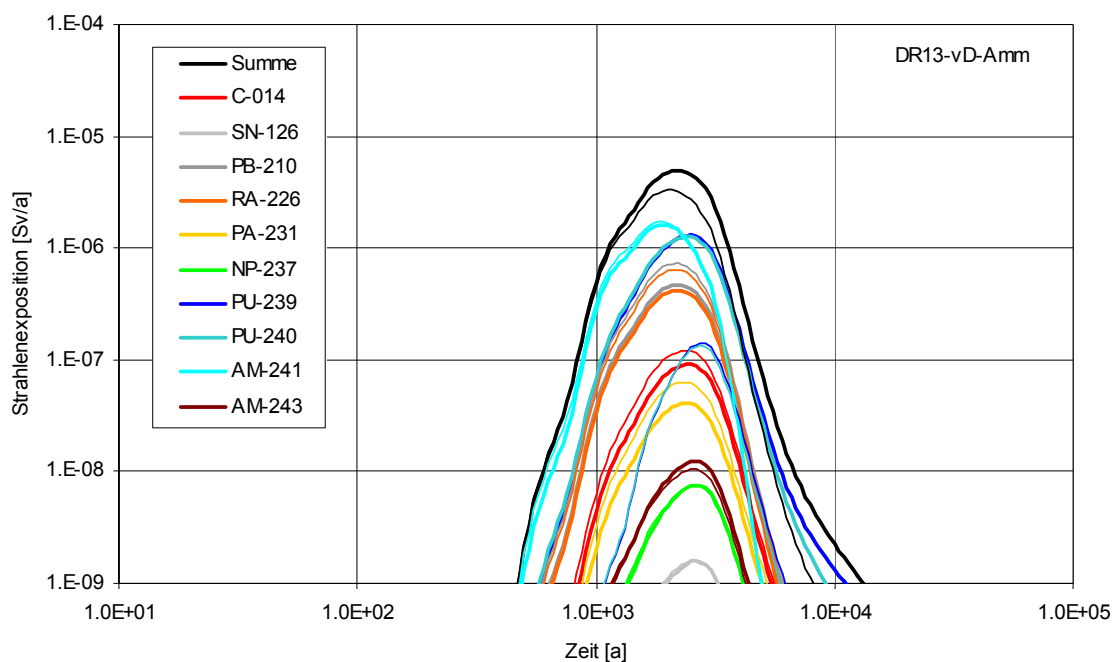


Abb. 5.67 Radionuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

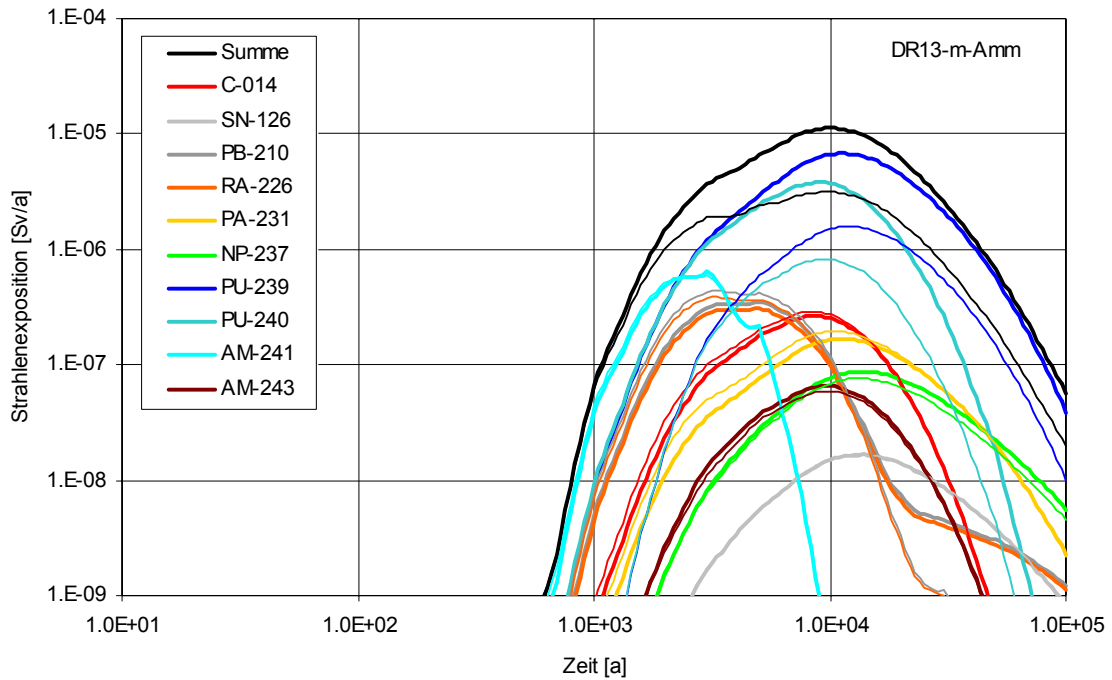


Abb. 5.68 Radionuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

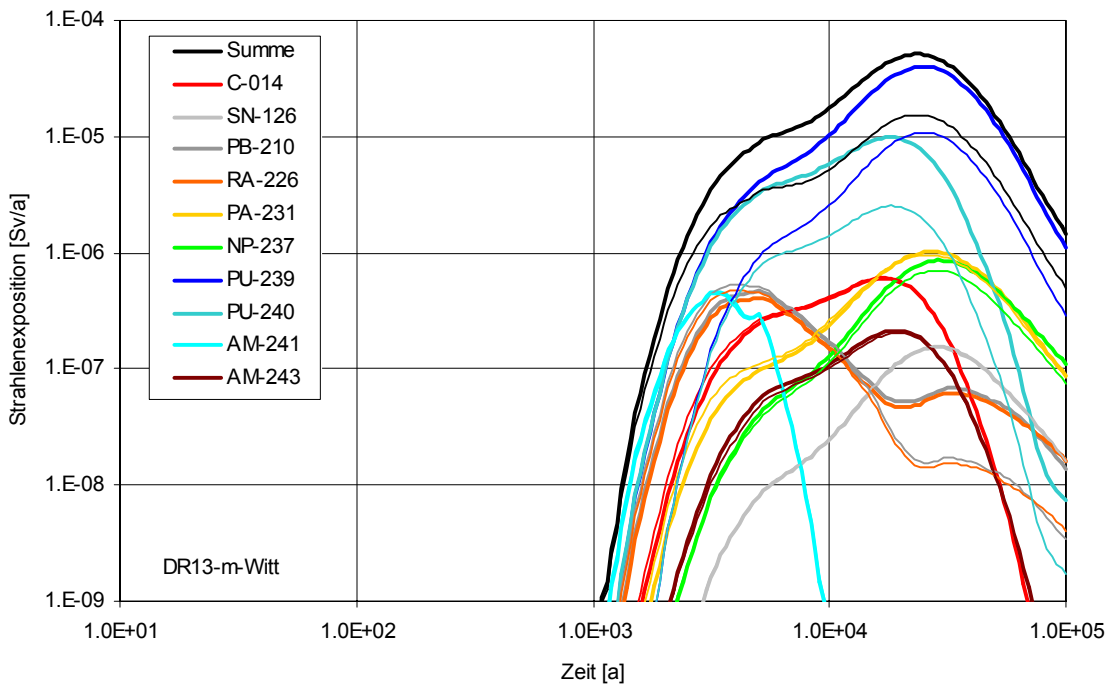


Abb. 5.69 Radionuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (RX.5 vs. Vergleichsfall RX.1, dünn)

Tab. 5.13 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete

RX.5 – DR13 Radionuklid	vD-Amm bei 2 200 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 23 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$8,6 \cdot 10^{-8}$	2 %	$2,6 \cdot 10^{-7}$	2 %	$4,7 \cdot 10^{-7}$	1 %
Sn-126	$1,3 \cdot 10^{-9}$	-	$1,5 \cdot 10^{-8}$	-	$1,4 \cdot 10^{-7}$	-
Pu-240	$1,2 \cdot 10^{-6}$	25 %	$3,7 \cdot 10^{-6}$	33 %	$8,5 \cdot 10^{-6}$	17 %
Am-241	$1,5 \cdot 10^{-6}$	30 %	$3,4 \cdot 10^{-10}$	-	$2,5 \cdot 10^{-17}$	-
Np-237	$6,1 \cdot 10^{-9}$	-	$7,8 \cdot 10^{-8}$	1 %	$7,6 \cdot 10^{-7}$	1 %
Ra-226	$4,1 \cdot 10^{-7}$	8 %	$9,8 \cdot 10^{-8}$	1 %	$4,8 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$4,7 \cdot 10^{-7}$	10 %	$1,1 \cdot 10^{-7}$	1 %	$5,4 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$1,0 \cdot 10^{-8}$	-	$6,6 \cdot 10^{-8}$	1 %	$2,0 \cdot 10^{-7}$	-
Pu-239	$1,2 \cdot 10^{-6}$	25 %	$6,7 \cdot 10^{-6}$	59 %	$3,9 \cdot 10^{-5}$	77 %
Pa-231	$3,9 \cdot 10^{-8}$	1 %	$1,7 \cdot 10^{-7}$	1 %	$9,6 \cdot 10^{-7}$	2 %
übrige RN	$1,5 \cdot 10^{-8}$	-	$9,1 \cdot 10^{-8}$	1 %	$7,2 \cdot 10^{-7}$	1 %
Gesamt	$4,9 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,1 \cdot 10^{-5}$	100 %	$5,1 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

5.4.3.6 Herkunft des die Strahlenexposition dominierenden Nuklids

Die Strahlenexpositionsbeiträge für die Exfiltrationsgebiete (Tab. 5.13) zeigen, dass wie für den Rechenfall RX.4 das Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ etwa zu gleichen Teilen durch Pu-239, Pu-240 und Am-241 bedingt wird, und dass Pu-239 die Maxima in den beiden anderen Exfiltrationsgebieten dominiert. In der Folge wird verdeutlicht, in welchem Ausmaß das Inventar der einzelnen Einlagerungsbereiche bzw. das der beiden Abfalltypen (mit oder ohne VBA) zur Strahlenexposition beiträgt, siehe Abb. 5.70 ff.

Der Beitrag von Pu-239 zum Maximum der Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ stammt auch hier zu fast der Hälfte aus LAW1A, jedoch ist nun der 22 %-Beitrag aus LAW3 hervorzuheben, und es spielen auch die fast gleichgroßen Beiträge aus LAW1B (17 %) und LAW2 (15 %) eine gewisse Rolle.

Da sich für Am-241 und Ra-226, abgesehen von einer leichten Verzögerung, im Rechenfall RX.5 gegenüber dem Vergleichsfall RX.1 wenig geändert hat, stammt wie zuvor der Beitrag von Am-241 vor allem aus den VBA-Gebinden im Einlagerungsbereich LAW3, jedoch nun sekundär aus LAW1A und den Blechfässern in LAW3, und deutlich weniger aus LAW1B. Der Beitrag von Ra-226 stammt unverändert fast völlig aus LAW1A.

In Tab. 5.14 ist sowohl für Pu-239 als auch für Am-241 und Ra-226 die Herkunft der Radionuklide zur Zeit des jeweiligen Beitragsmaximums für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ zusammengetragen.

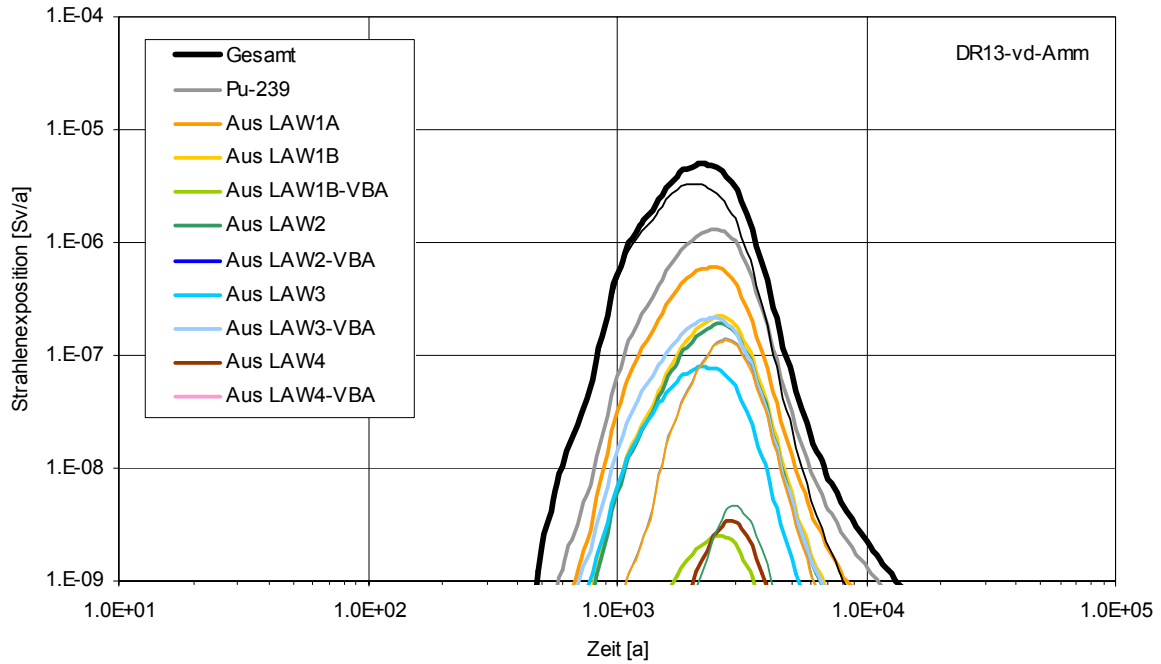


Abb. 5.70 ELB-Beiträge Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘

Tab. 5.14 ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)

RX.5 DR13 – vD-Amm	Am-241 bei 1 900 a		Pu-239 bei 2 500 a		Ra-226 bei 2 200 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
Aus LAW1A	2,1·10⁻⁷	12 %	6,0·10⁻⁷	46 %	3,8·10⁻⁷	92 %
Aus LAW1B	1,1·10 ⁻⁷	6 %	2,2·10⁻⁷	17 %	2,2·10 ⁻⁹	1 %
Aus LAW1B-VBA	1,2·10 ⁻⁹	-	2,5·10 ⁻⁹	-	-	-
Aus LAW2	6,5·10 ⁻⁸	4 %	1,9·10⁻⁷	14 %	4,9·10 ⁻⁹	1 %
Aus LAW2-VBA	5,6·10 ⁻¹¹	-	8,7·10 ⁻¹¹	-	-	-
Aus LAW3	1,7·10⁻⁷	10 %	7,6·10 ⁻⁸	6 %	2,5·10 ⁻⁸	6 %
Aus LAW3-VBA	1,1·10⁻⁶	66 %	2,1·10⁻⁷	16 %	-	-
Aus LAW4	8,0·10 ⁻⁹	-	2,7·10 ⁻⁹	-	2,5·10 ⁻⁹	1 %
Aus LAW4-VBA	5,8·10 ⁻¹⁰	-	2,3·10 ⁻¹⁰	-	-	-
Summe	1,7·10 ⁻⁶	100 %	1,3·10 ⁻⁶	100 %	4,1·10 ⁻⁷	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

Zur Zeit des Maximums stammt die für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ die Strahlenexposition dominierende Pu-239 etwa zu gleichen Teilen aus LAW1A, LAW2 und LAW1B sowie sekundär aus LAW3. In Tab. 5.15 ist für Pu-239, Am-241 und Ra-226 die Herkunft der Radionuklide zur Zeit des jeweiligen Beitragsmaximums zusammengetragen.

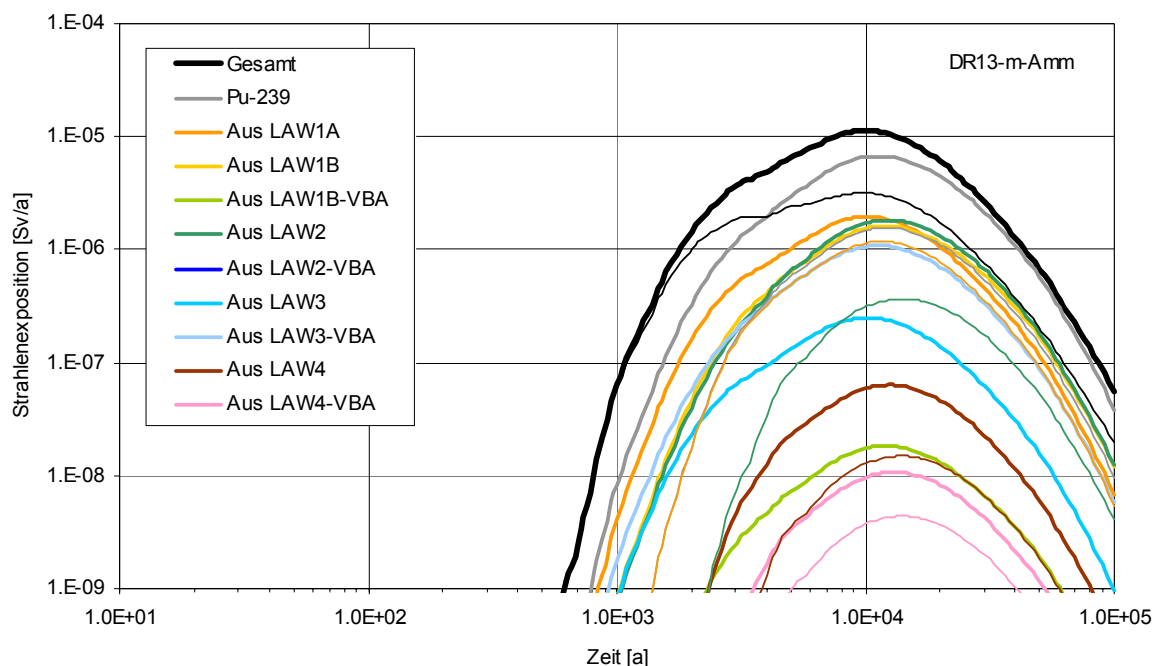


Abb. 5.71 ELB-Beiträge Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘

Tab. 5.15 ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)

RX.5 DR13 – m-Amm	Am-241 bei 3 000 a		Pu-239 bei 11 000 a		Ra-226 bei 5 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
Aus LAW1A	$4,5 \cdot 10^{-8}$	7 %	$1,9 \cdot 10^{-6}$	29 %	$2,4 \cdot 10^{-7}$	78 %
Aus LAW1B	$4,1 \cdot 10^{-8}$	6 %	$1,6 \cdot 10^{-6}$	24 %	$3,0 \cdot 10^{-9}$	1 %
Aus LAW1B-VBA	$4,8 \cdot 10^{-10}$	-	$1,8 \cdot 10^{-8}$	-	-	-
Aus LAW2	$2,5 \cdot 10^{-8}$	4 %	$1,8 \cdot 10^{-6}$	26 %	$7,9 \cdot 10^{-9}$	3 %
Aus LAW2-VBA	$2,2 \cdot 10^{-11}$	-	$8,1 \cdot 10^{-10}$	-	-	-
Aus LAW3	$4,9 \cdot 10^{-8}$	8 %	$2,5 \cdot 10^{-7}$	4 %	$2,6 \cdot 10^{-8}$	9 %
Aus LAW3-VBA	$4,6 \cdot 10^{-7}$	72 %	$1,1 \cdot 10^{-6}$	16 %	-	-
Aus LAW4	$1,9 \cdot 10^{-8}$	3 %	$6,2 \cdot 10^{-8}$	1 %	$3,1 \cdot 10^{-9}$	10 %
Aus LAW4-VBA	$2,4 \cdot 10^{-9}$	-	$1,0 \cdot 10^{-8}$	-	-	-
Summe	$6,4 \cdot 10^{-7}$	100 %	$6,7 \cdot 10^{-6}$	100 %	$3,1 \cdot 10^{-7}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

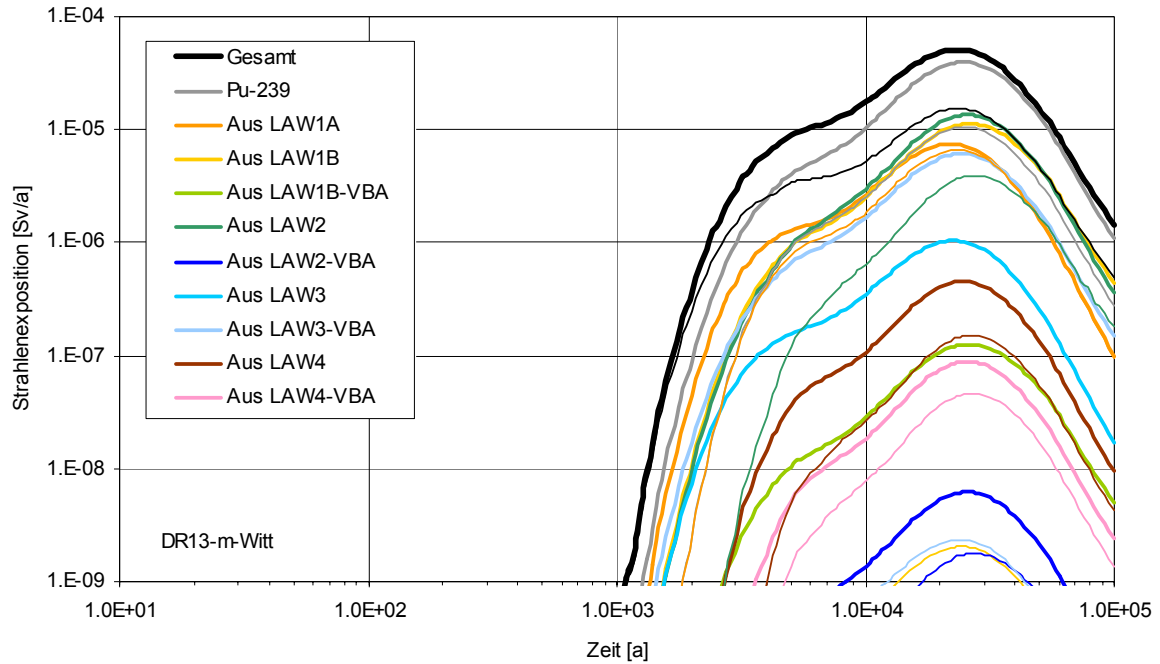


Abb. 5.72 ELB-Beiträge Pu-239 zur Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘

Tab. 5.16 listet für Pu-239 sowie auch für Am-241 und Ra-226 die Herkunft der Radionuklide zur Zeit des jeweiligen Beitragsmaximums für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ auf.

Tab. 5.16 ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)

RX.5 DR13 – m-Witt	Am-241 bei 3 300 a		Pu-239 bei 25 000 a		Ra-226 bei 5 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
Aus LAW1A	$3,4 \cdot 10^{-8}$	7 %	$7,2 \cdot 10^{-6}$	18 %	$3,1 \cdot 10^{-7}$	76 %
Aus LAW1B	$3,0 \cdot 10^{-8}$	6 %	$1,1 \cdot 10^{-5}$	28 %	$4,3 \cdot 10^{-9}$	1 %
Aus LAW1B-VBA	$3,5 \cdot 10^{-10}$	-	$1,3 \cdot 10^{-7}$	-	-	-
Aus LAW2	$1,9 \cdot 10^{-8}$	4 %	$1,4 \cdot 10^{-5}$	34 %	$1,1 \cdot 10^{-8}$	3 %
Aus LAW2-VBA	$1,6 \cdot 10^{-11}$	-	$6,2 \cdot 10^{-9}$	-	-	-
Aus LAW3	$3,6 \cdot 10^{-8}$	8 %	$1,0 \cdot 10^{-6}$	3 %	$3,7 \cdot 10^{-8}$	9 %
Aus LAW3-VBA	$3,3 \cdot 10^{-7}$	71 %	$6,1 \cdot 10^{-6}$	15 %	-	-
Aus LAW4	$1,3 \cdot 10^{-8}$	3 %	$4,5 \cdot 10^{-7}$	1 %	$4,5 \cdot 10^{-8}$	11 %
Aus LAW4-VBA	$1,5 \cdot 10^{-9}$	-	$8,9 \cdot 10^{-8}$	-	-	-
Summe	$4,7 \cdot 10^{-7}$	100 %	$4,0 \cdot 10^{-5}$	100 %	$4,1 \cdot 10^{-7}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

Im Rechenfall RX.5 stammt das zur Zeit des Maximums für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ die Strahlenexposition dominierende Pu-239 vorwiegend aus LAW2 (34 %) und sekundär aus LAW1B (28 %). Weiterhin sind die Beiträge aus LAW1A und LAW3 (beide 18 %) relevant.

5.4.4 Schlussfolgerungen zur kombinierten Variante

In diesem Kapitel wurden die relevanten Ergebnisse des Rechenfalls RX.5 dargestellt und jenen des Vergleichsfalls RX.1 gegenübergestellt. Die Ergebnisse des Rechenfalls RX.5 führen zu den nachfolgenden Schlussfolgerungen:

- Die abweichenden Ergebnisse der kombinierten Variante ergeben sich aus der Summe der Auswirkungen der Varianten „erhöhte Desintegration des Salzgesteins im Firstbereich von LAW1B und LAW4“ (RX.2, Kap. 5.1), der Verfüllung der Auffahrungen im Grubenhöchsten mit Sorelbeton (RX.3, Kap. 5.2) sowie der maximal möglichen Elementkonzentrationen nach Variante RX.4 (Kap. 5.3). Entsprechend gelten die Schlussfolgerungen aus den Kapiteln 5.1.4, 5.2.4 und 5.3.4 auch hier.
- Die – auch gegenüber dem Rechenfall RX.4 – leicht höhere Freisetzung von Plutoniumisotopen in das Deckgebirge führt gegenüber dem Vergleichsfall ab etwa 1 000 Jahren zu einer in allen Exfiltrationsgebieten um den Faktor 1,5 bis 4 höheren potenziellen Strahlenexposition (vgl. Kap. 5.4.3.5). Unverändert wird das globale Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ erreicht, welches bei etwa 23 000 Jahren gegenüber dem Vergleichsfall um etwa den Faktor 3,5 höher ist und nun $5,1 \cdot 10^{-5}$ Sv/a beträgt.
- Wegen der unterschiedlich höheren Plutoniumkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen hat sich auch die Relevanz der ELB-Beiträge verschoben (vgl. Kap. 5.4.3.6).
 - Das globale Maximum wird zu über 75 % durch Pu-239 und mehr als 15 % durch Pu-240 bedingt.
 - Für das globale Maximum stammen die Plutoniumisotope zu etwa 35 % aus LAW2, zu etwa 30 % aus LAW1B und je zu etwa 20 % aus LAW1A und LAW3.

Für dieses Maximum bestimmen die Beiträge der im Vergleichsfall RX.1 bestimmenden Einlagerungsbereiche LAW1A und LAW2 insgesamt zwar noch immer etwa die Hälfte des Pu-239-Beitrags, nun bestimmen jedoch die Beiträge der Einlagerungsbereiche LAW1B und LAW3 zusammen die andere Hälfte (vgl. Tab. 5.16). Die Größen der erhöhten ELB-Beiträge sind mit den Konzentrationserhöhungen in den jeweiligen Einlagerungsbereichen völlig im Einklang.

Die Ergebnisse der kombinierten Variante RX.5 bestätigen die wesentlichen Ergebnisse des Vergleichsfalls (RX.1) und des Referenzfalls im Schlussbericht 2005. Diese Variante wird nachfolgend zum Vergleich für weitere Varianten herangezogen.

5.5 Variation des konzeptuellen Modells für das Deckgebirge

5.5.1 Beschreibung und Definition

Diese Variation betrachtet eine Variante des konzeptuellen Modells für das Deckgebirge. Die Deckgebirgsmodellrechnungen gehen von plausiblen Annahmen zum geologischen Strukturmodell und dessen hydrogeologischer Charakterisierung aus (konzeptuelles Modell), zeigen die Übereinstimmung von Modellergebnissen mit beobachtbaren Größen und weisen im Ergebnis als Prognosen u.a. potenziell bevorzugte Fließwege im Deckgebirge und Exfiltrationen in der Biosphäre aus (vgl. Kap. 2.2).

Die Ergebnisse der Modellrechnungen finden hier als Schnittstelle – über die Definition der Abhängigkeit des Widerstandes gegenüber der ausgepressten Grubenlösung – und durch die Transferfunktionen Verwendung. Als Variation des konzeptuellen Modells des Deckgebirges wird ein relativ gering durchlässiger Röttaquitard *so2-so4* (hauptsächlich als Folge eines hydraulisch nicht wirksamen Scherdeformationsbereichs S3/D9) betrachtet, der zwar weniger wahrscheinlich als ein hydraulisch wirksamer Scherdeformationsbereich ist, jedoch auch in Einklang zu den beobachtbaren Größen steht (vgl. [Colenco 2006a]). Die bisher im vorliegenden Bericht beschriebenen Modellrechnungen beruhen auf der Schnittstellen-Parametrisierung und den Transferfunktionen, die unter Annahme eines hydraulisch wirksamen Scherdeformationsbereichs ermittelt wurden (Deckgebirgsrechenfall DR13).

Für die hier darzustellenden Modellrechnungen der Prozesse im Grubengebäude bei Variation der Verhältnisse im Deckgebirge bedeutet dies die Verwendung der alternativen Parametrisierung der Schnittstelle Deckgebirge (Kap. 2.2.1 für den Deckgebirgsrechenfall DR12, Tab. 2.2). Für die Ermittlung des Transports von Tracern und Radionukliden im Deckgebirge kommen die alternativen Transferfunktionen gemäß Kap. 2.3.2, Abb. 2.11 - Abb. 2.13, zur Anwendung. Alle übrigen Parameter dieser Variante sind die Parameter der kombinierten Variante RX.5 (Kap. 5.4.1). Die Variante trägt die Bezeichnung RX.7.

5.5.2 Modellergebnisse KAFKA (RX.7-K)

5.5.2.1 Lösungs- und Gasaustrittsrate aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge

Die Lösungs- und Gasflüsse über die beiden Modellverbindungen zum Deckgebirge und über die Modellverbindung im Deckgebirge (RA2-V-RA3V; vgl. Kap. 2.2.2) geben die Abb. 5.73 und Abb. 5.74 wieder. Die gestrichelten Linien sind die Kurven der kombinierten Variante RX.5-K (Kap. 5.4.2). Die Unterschiede zur kombinierten Variante sind in der geänderten Parametrisierung der Schnittstelle zum Deckgebirge begründet (im Widerstand gegenüber Lösungsfluss und in der Höhe des Bezugsdruckes p_0 auf 500 m; Kap. 2.2.1).

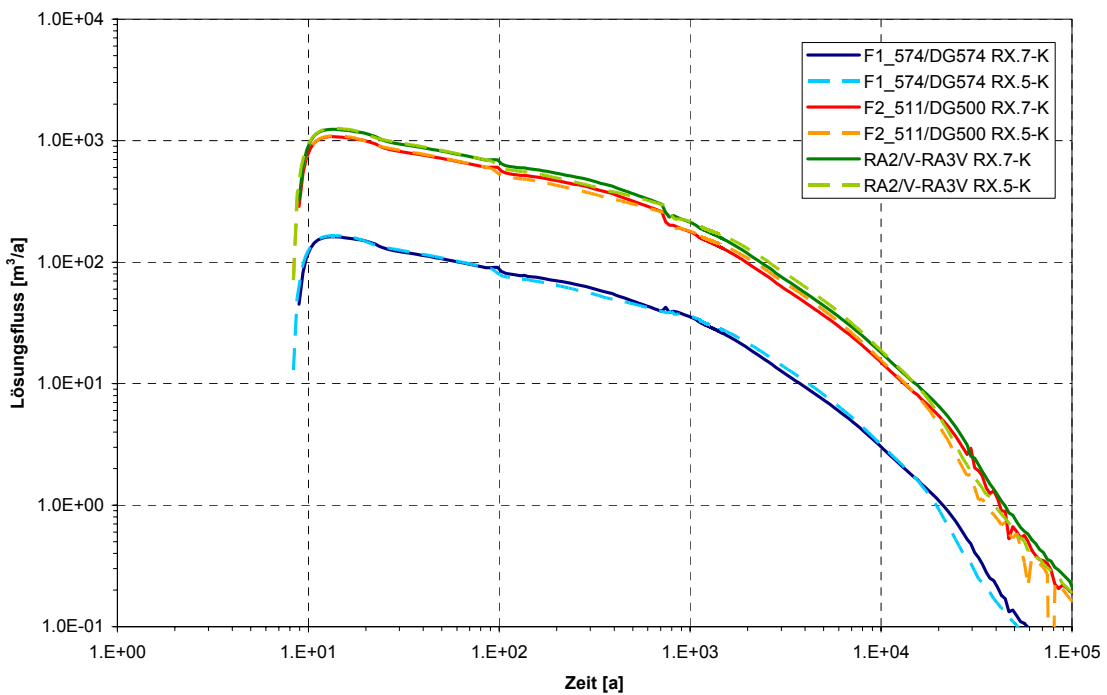
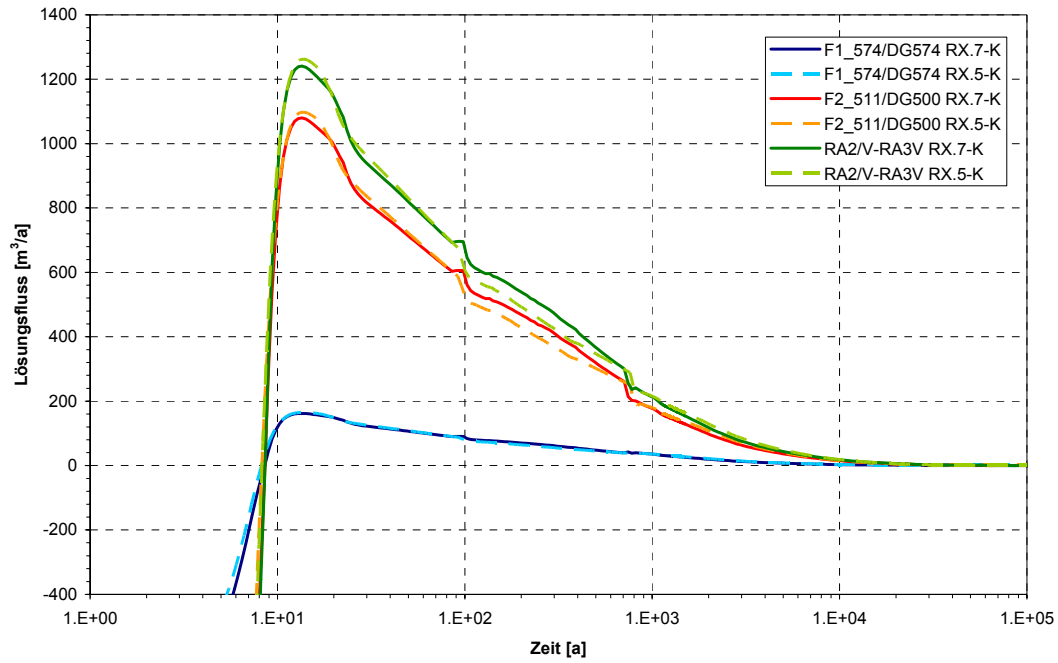


Abb. 5.73 Lösungsabfluss ins Deckgebirge in RX.7-K, z. Vgl. gestrichelt RX.5-K (oben linear, unten logarithmisch)

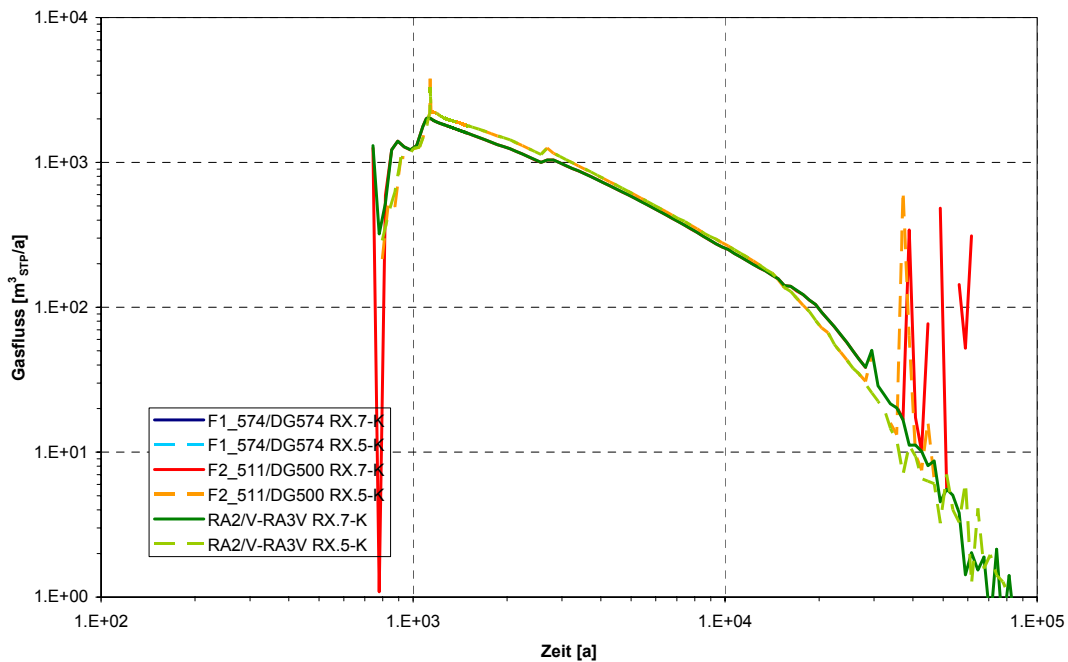
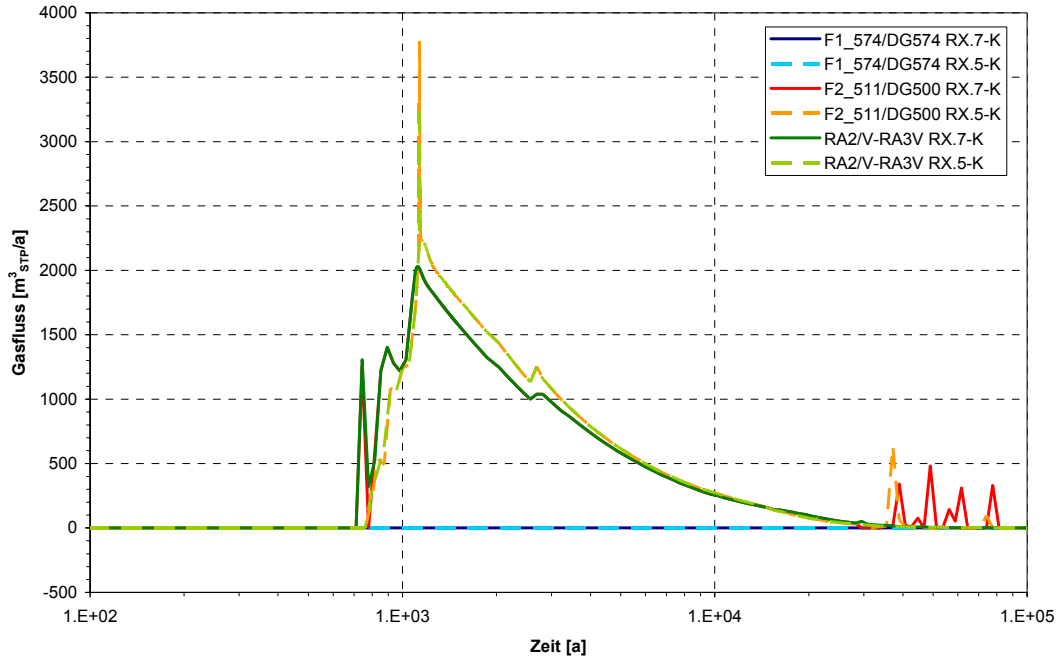


Abb. 5.74 Gasabfluss ins Deckgebirge in RX.7-K, z. Vgl. gestrichelt RX.5-K (oben linear, unten logarithmisch)

Bis ca. 100 Jahre sind die Lösungsflüsse in das Deckgebirge in beiden Rechenfällen etwa gleich groß (Abb. 5.73). Der maximale Lösungsfluss beträgt $1\,240\text{ m}^3/\text{a}$ gegenüber $1\,260\text{ m}^3/\text{a}$ in RX.5-K. Nach ca. 100 Jahren nimmt der konvergenzbedingte Lösungsfluss in das Deckgebirge weniger stark ab als in der kombinierten Variante, da der Druck im Grubengebäude etwas geringer ist (Abb. 5.75). Mit Einsetzen des Gasabflusses aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge nach 740 Jahren (RX.7-K) bzw. 770 Jahren (RX.5-K)

vermindern sich die Unterschiede im Lösungsabfluss zwischen den Rechenfällen RX.7-K und RX.5-K deutlich. Über den gesamten Betrachtungszeitraum ist das ausgepresste Lösungsvolumen mit rund 1,12 Millionen Kubikmetern ungefähr gleich. Abgesehen vom geringfügig früheren Einsetzen des Gasabflusses (siehe Kap. 5.5.2.2) hat die Variation des konzeptuellen Modells für das Deckgebirge keinen Einfluss auf den Gasfluss aus dem Grubengebäude.

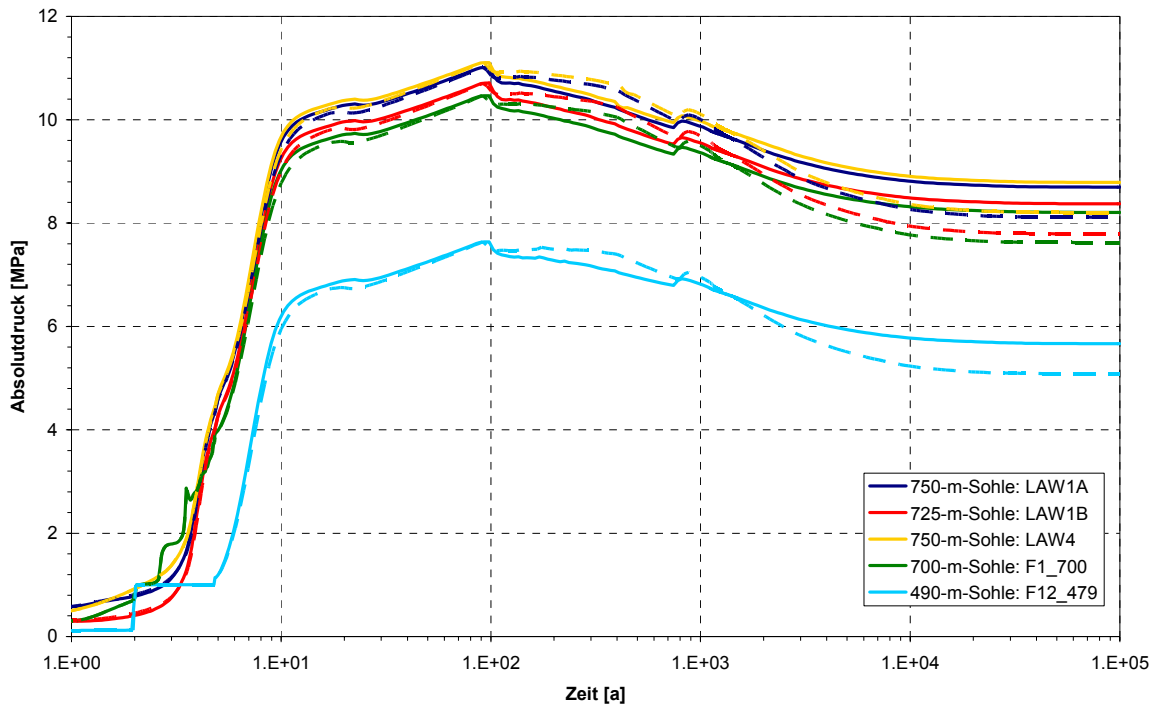


Abb. 5.75 Druckentwicklung in ausgewählten Modellbereichen, Variante RX.7-K (gestrichelt: RX.5-K)

5.5.2.2 Gasspeicher und Gasflüsse im Grubengebäude

Die effektiven residualen Gassättigungen in Variante RX.7-K stimmen mit jenen in der kombinierten Variante RX.5-K überein (Kap. 5.4.2). Das zeitliche Auftreten von Gaspolstern und deren weitere Entwicklung entsprechen weitgehend jenen in der kombinierten Variante RX.5-K. Für die Anwendung in LOPOS sind die erhöhten effektiven residualen Gassättigungen für die Bereiche entsprechend der kombinierten Variante RX.5-K anzuwenden (Kap. 5.4.2).

Das Einsetzen des Gasabflusses aus den LAW-Einlagerungsbereichen entspricht jenem in der kombinierten Variante, nur aus LAW4 fließt das Gas geringfügig früher ab. Die Gastransportpfade im Grubengebäude unterscheiden sich nicht von jenen in der kombinierten Variante.

Bedingt durch die gegenüber der kombinierten Variante geringeren Fluiddruckwerte, die im Grubengebäude zwischen 100 und 800 Jahren erreicht werden, nimmt das in den Einlagerungsbereichen gebildete Gas nach Akkumulation im Grubenhöchsten ein größeres Volumen als in der kombinierten Variante ein. Entsprechend schreitet die Lösungsentsättigung der Modellbereiche, ausgehend vom Grubenhöchsten, bis auf die Höhe der oberen Modellverbindung ins Deckgebirge in 500 m Teufe etwas schneller voran als in RX.5-K. Der Gasaustritt aus dem Grubengebäude setzt nach etwa 740 Jahren und damit 30 Jahre früher als in der kombinierten Variante ein (Abb. 5.74).

5.5.2.3 *Transportprozesse der Lösungsverdrängung aus den ELB*

Die relativen Beiträge der Prozesse der Lösungsverdrängung aus den ELB sind sehr ähnlich zu jenen in der kombinierten Variante RX.5-K. Die Auswirkungen der geänderten Parametrisierung der Schnittstelle zum Deckgebirge sind im Nahbereich der LAW-ELB insgesamt vernachlässigbar.

5.5.2.4 *Tracertransport im Nahbereich der ELB und im Grubengebäude*

Aufgrund der im Vergleich zur kombinierten Variante kaum veränderten Verhältnisse der Gasspeicherung in den LAW-Einlagerungsbereichen und der ebenfalls kaum veränderten Lösungsflüsse aus diesen treten im Transport von Tracern im Nahbereich der ELB keine signifikanten Unterschieden zur kombinierten Variante auf.

Der Einfluss der gegenüber der kombinierten Variante geänderten Parametrisierung der Schnittstelle zum Deckgebirge ist insgesamt gering. Dies gilt sowohl für die Haupttransportpfade als auch für die sekundären Transportwege. Die Konzentrationswerte der Tracer auf den verschiedenen Modellsohlen des Baufeldes in der Südflanke sind nicht in relevantem Maße durch die Variation der Schnittstelle zum Deckgebirge beeinflusst.

5.5.2.5 *Tracerkonzentrationen und -flüsse im Deckgebirge*

Die Freisetzung der Tracer aus dem Grubengebäude erfolgt für alle Tracer – unabhängig davon, ob der Transport dominant über die westliche oder die östliche Modellsäule des Baufeldes in der Südflanke erfolgt – über beide Modellverbindung (in 500 m Teufe und in 574 m Teufe) geringfügig beschleunigt (Abb. 5.76).

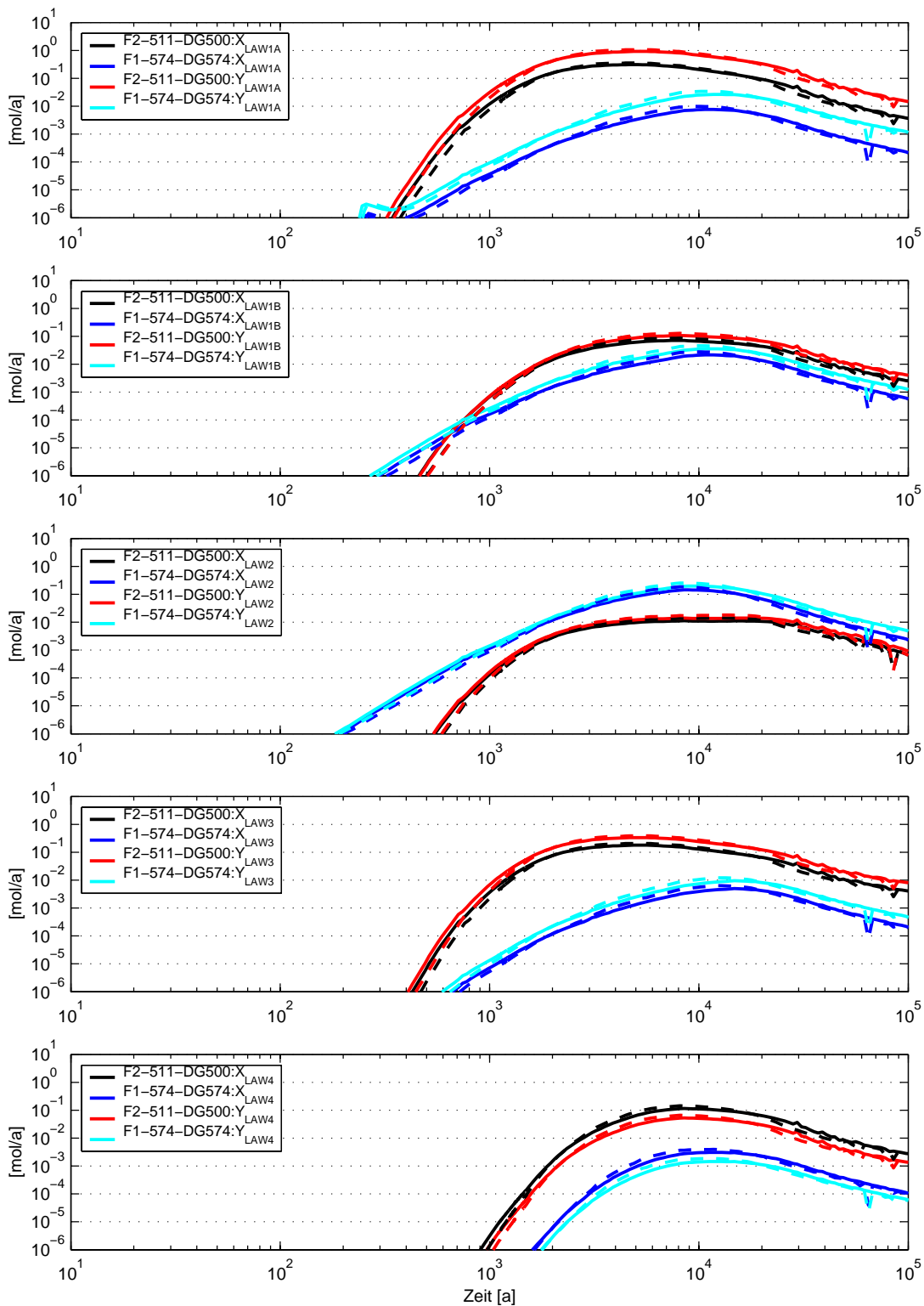


Abb. 5.76 Tracerübertritt in das Deckgebirge an den beiden Modell-Schnittstellen in RX.7-K (gestrichelt RX.5-K)

Die Änderung der Konzentrationen im Rötanhydrit (Modellgebiet RA2) gibt Abb. 5.77 wieder. Danach ergibt sich gegenüber der kombinierten Variante für alle Tracer bis etwa 2 000 Jahre ein um wenige hundert Jahre beschleunigter Konzentrationsanstieg.

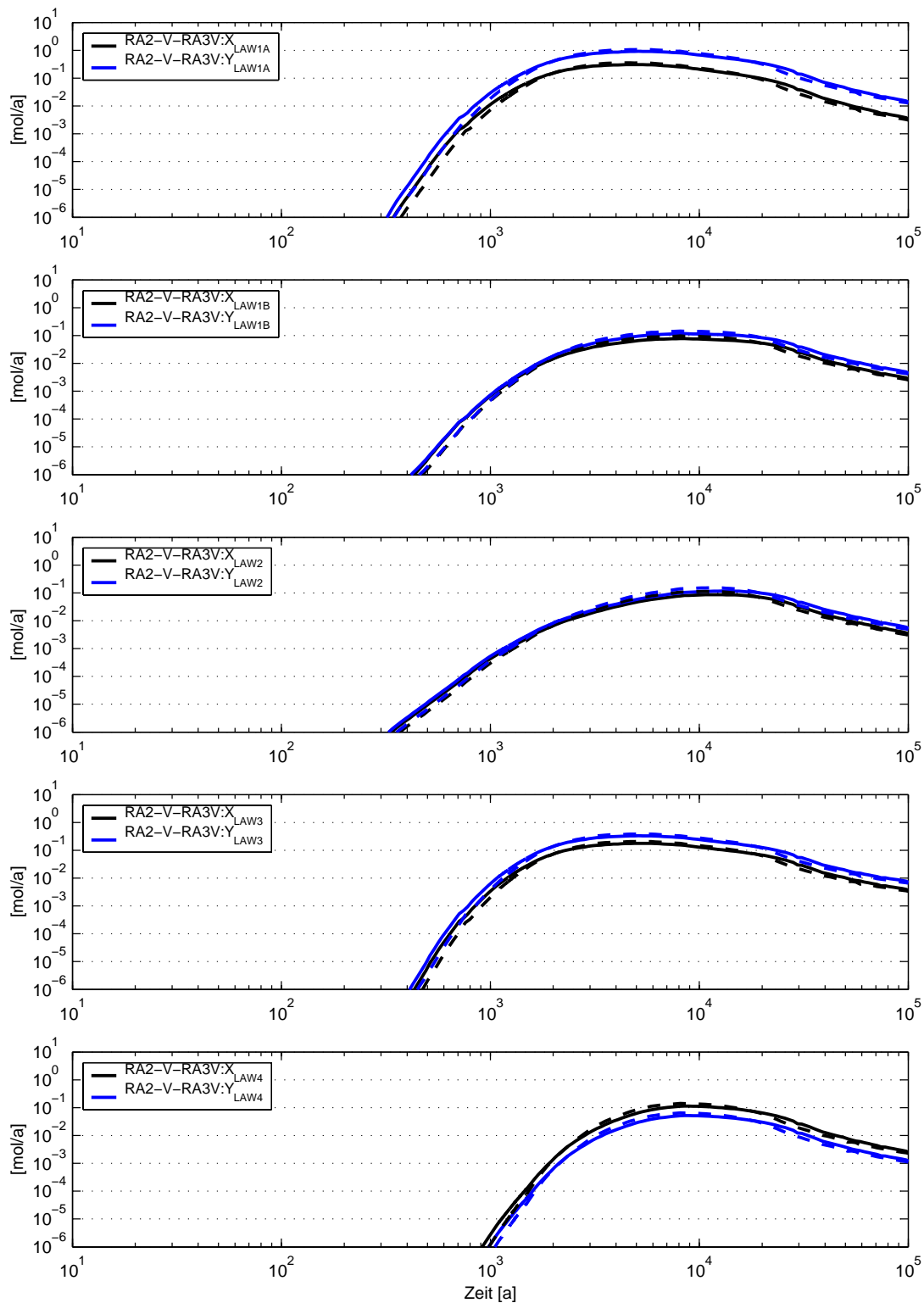


Abb. 5.77 Konzentrationsänderung der Tracer im Rötanhydrit in RX.7-K (gestrichelt RX.5-K)

Die Zeitpunkte der größten Konzentrationsänderung im Rötanhydrit, der Maxima der Tracerflüsse und die relative Änderung der Maxima der Tracerflüsse gibt Tab. 5.17 wieder. Die jeweiligen Maxima der Tracerflüsse werden in Variante RX.7-K im Allgemeinen später -

maximal 1 500 Jahre (X_{LAW2}) – als in der kombinierten Variante erreicht. Das Maximum liegt dabei für den X-Tracer um ca. 15 bis 25 % unter jenem der kombinierten Variante.

Tab. 5.17 Vergleich der Konzentrationsänderungen und der Maxima der Flüsse der X-Tracer zur kombinierten Variante

	Zeitpunkt des maximalen Konzentrationsanstiegs im Rötanhydrit [a]		Zeitpunkt des Maximums der Tracerflüsse [a]		Veränderung der Tracerflüsse im Maximum gegenüber der kombinierten Variante
	Variante RX.7-K	kombinierte Variante	Variante RX.7-K	kombinierte Variante	
LAW1A	3 100	3 000	5 100	5 400	-20%
LAW1B	7 400	5 400	8 500	8 100	-19%
LAW2	9 300	8 100	12 300	10 700	-25%
LAW3	3 100	3 000	5 100	5 400	-19%
LAW4	7 400	5 400	8 500	8 100	-17%

5.5.2.6 Tracerkonzentrationen nach Transfer im Deckgebirge

Die der Variante RX.7-K zu Grunde liegende Variation des konzeptuellen Modells für das Deckgebirge führt zu erheblichen Änderungen in den resultierenden Tracerkonzentrationen in den drei Exfiltrationsgebieten. Für das Exfiltrationsgebiet *Verstürztes Deckgebirge – Tal der Ammerbeek (vD-Amm)* nehmen die erreichten maximalen Konzentrationswerte aller Tracer markant zu (Abb. 5.78 für X-Tracer). Die Zunahme beträgt maximal einen Faktor 420 gegenüber der kombinierten Variante (Tracer aus LAW4) und minimal einen Faktor 65 (Tracer aus LAW1A) (vgl. Tab. 5.18). Das jeweilige Maximum der Tracerkonzentrationen wird in Variante RX.7-K ca. 1 000 Jahre später als in der kombinierten Variante erreicht. Für das Exfiltrationsgebiet *Muschelkalk – Tal der Ammerbeek (m-Amm)* ist im Vergleich dazu nur eine moderate Zunahme der maximalen Tracerkonzentrationen gegenüber der kombinierten Variante feststellbar (Abb. 5.78). Sie liegt bei einem Faktor 3 (vgl. Tab. 5.18). Nach dem früheren schnellen Anstieg der Tracerkonzentrationen werden die Maximalwerte infolge eines lang andauernden, aber insgesamt nur noch geringen Konzentrationsanstieg zwischen ca. 38 000 Jahren und 48 000 Jahren deutlich später als in der kombinierten Variante erreicht. Anders als in den beiden bisher betrachteten Exfiltrationsgebieten nehmen für das Exfiltrationsgebiet *Muschelkalk – Tal von Wittmar (m-Witt)* in Variante RX.7-K die ermittelten Tracerkonzentrationen gegenüber der kombinierten Variante um 30 % bis 40 % ab (Tab. 5.18). Die jeweiligen Tracermaxima werden dabei mehr als doppelt so spät erreicht wie in der kombinierten Variante.

Tab. 5.18 Vergleich der maximalen Konzentrationen der X-Tracer für die Exfiltrationsgebiete *vD-Amm*, *m-Amm* und *m-Witt*. Variante RX.7-K und kombinierte Variante RX.5-K

	<i>vD-Amm</i>		<i>m-Amm</i>		<i>m-Witt</i>		
	Zeitpunkt des Konzentrationsmaximums	Veränderung der Maximalkonzentration: RX.7-K / RX.5-K	Zeitpunkt des Konzentrationsmaximums	Veränderung der Maximalkonzentration: RX.7-K / RX.5-K	Zeitpunkt des Konzentrationsmaximums	Veränderung der Maximalkonzentration: RX.7-K / RX.5-K	
	RX.7-K	RX.5-K	RX.7-K	RX.5-K	RX.7-K	RX.5-K	
X _{1A}	3 900	2 800	38 000	14 900	71 000	29 000	0,71
X _{1B}	4 300	2 800	47 000	28 600	83 000	32 000	0,64
X ₂	4 300	2 800	48 000	30 300	83 000	35 000	0,63
X ₃	4 100	2 800	38 000	14 900	75 000	30 000	0,69
X ₄	4 300	3 000	41 000	29 700	77 000	32 000	0,66

Insgesamt gewinnt in RX.7-K der zum Exfiltrationsgebiet *vD-Amm* gehörende Ausbreitungspfad im Deckgebirge gegenüber den beiden anderen stark an Bedeutung, obgleich auch in diesem Fall die höchsten Konzentrationswerte für das Exfiltrationsgebiet *m-Witt* erreicht werden. Die Zahlenangaben zu den Maximalwerten der X-Tracer in Tab. 5.18 besitzen ebenfalls für die Y-Tracer Gültigkeit.

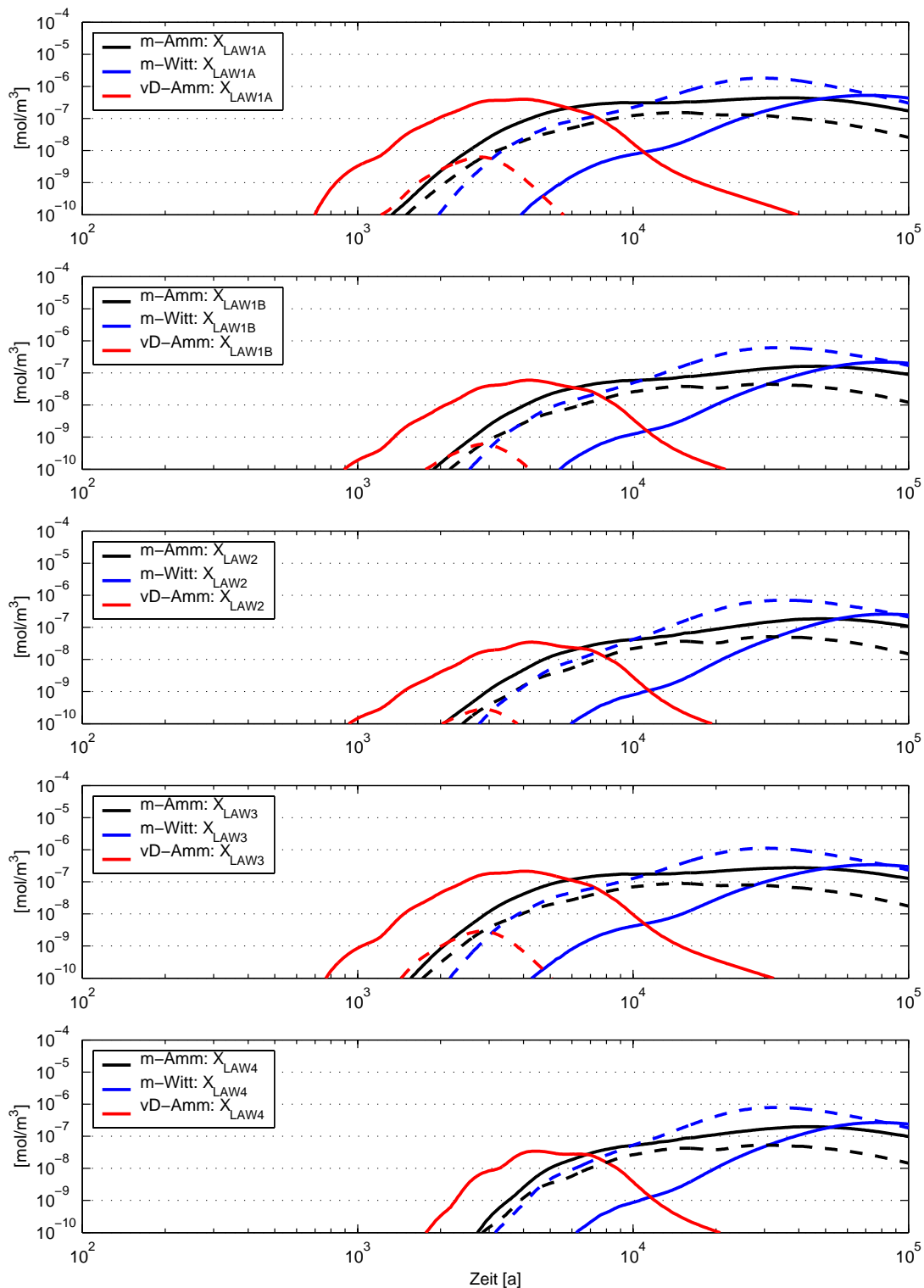


Abb. 5.78 X-Tracerkonzentrationen für die drei Exfiltrationsgebiete in RX.7-K (gestrichelt RX.5-K)

Vergleicht man die Gesamtverdünnung der Tracer im Grubengebäude und im Deckgebirge für das Exfiltrationsgebiet *m-Witt* (Abb. 5.79 oben, im Vergleich zu Abb. 5.41 in Kap. 5.4.2) wird deutlich, dass die Minima der Gesamtverdünnung der Tracer deutlich später als in der kombinierten Variante erreicht werden (ca. um einen Faktor 2). Deutlich früher werden die Minima der Gesamtverdünnung im Exfiltrationsgebiet *vD-Amm* erreicht (Abb. 5.79 unten).

Entsprechend der nach wie vor niedrigeren Tracerkonzentrationen in diesem Exfiltrationsgebiet sind die Werte der Gesamtverdünnung jedoch höher als für *m-Witt*.

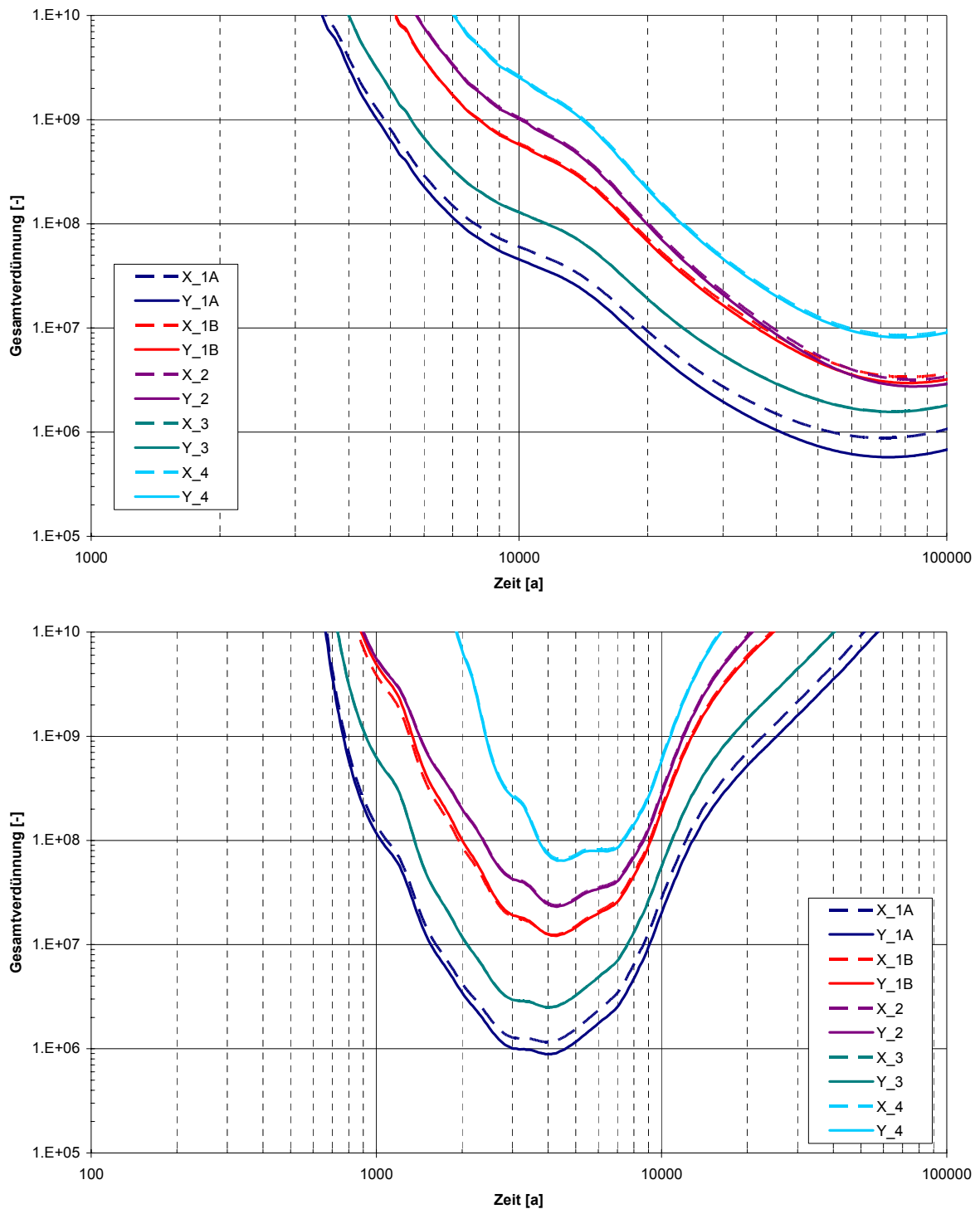


Abb. 5.79 Gesamtverdünnung der Tracer im Grubengebäude und im Deckgebirge für die Exfiltrationsgebiete *m-Witt* (oben) und *vD-Amm* (unten): Variante RX.7-K

Für alle Tracer ist die minimale Verdünnung in RX.7-K jedoch deutlich größer als in der kombinierten Variante (Tab. 5.19).

Tab. 5.19 Vergleich der minimalen Gesamtverdünnung im Grubengebäude und Deckgebirge: Variante RX.7-K und kombinierte Variante RX.5-K für das Exfiltrationsgebiet *m-Witt* (Gebiet mit der größten Tracerkonzentration)

Tracer	Minimale Gesamtverdünnung		Tracer	Minimale Gesamtverdünnung	
	Variante RX.7-K	kombinierte Variante		Variante RX.7-K	kombinierte Variante
X _{1A}	880 000	170 000	Y _{1A}	580 000	260 000
X _{1B}	3 400 000	1 200 000	Y _{1B}	3 000 000	1 100 000
X ₂	3 200 000	1 200 000	Y ₂	2 700 000	1 000 000
X ₃	1 600 000	480 000	Y ₃	1 600 000	480 000
X ₄	8 500 000	2 900 000	Y ₄	8 100 000	2 800 000

5.5.3 Modellergebnisse LOPOS (RX.7-L)

5.5.3.1 Radionuklidtransport in der Grube

Im Rechenfall RX.7 sind die Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen gegenüber der kombinierten Variante RX.5 unverändert. Da sich auch die Fluidströme im Umfeld der Einlagerungsbereiche kaum geändert haben, sind auch die Radionuklidströme in den Einlagerungsbereichen sehr ähnlich. Demzufolge ändern sich auch die Entwicklungen der Radionuklidkonzentrationen im Baufeld in der Südflanke nur geringfügig. Insgesamt sind die Auswirkungen der geänderten Parametrisierung der Schnittstelle zum Deckgebirge auf den Transport in der Grube vernachlässigbar bis gering.

5.5.3.2 Radionuklidfreisetzung aus der Grube

Da der Radionuklidtransport in der Grube im Vergleich zu der kombinierten Variante nur gering durch die geänderte Parametrisierung der Schnittstelle zum Deckgebirge beeinflusst ist, sind auch die Radionuklidströme aus der Grube jenen der kombinierten Variante sehr ähnlich. Abb. 5.80 zeigt für den Rechenfall RX.7 – fette Linien – die Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube, welche der Abbildung des Transports im Deckgebirge zu den Exfiltrationsgebieten über die Transferfunktionen zu Grunde gelegt werden. Diese Ströme sind jenen für die kombinierte Variante RX.5 – dünne Linien – gegenübergestellt.

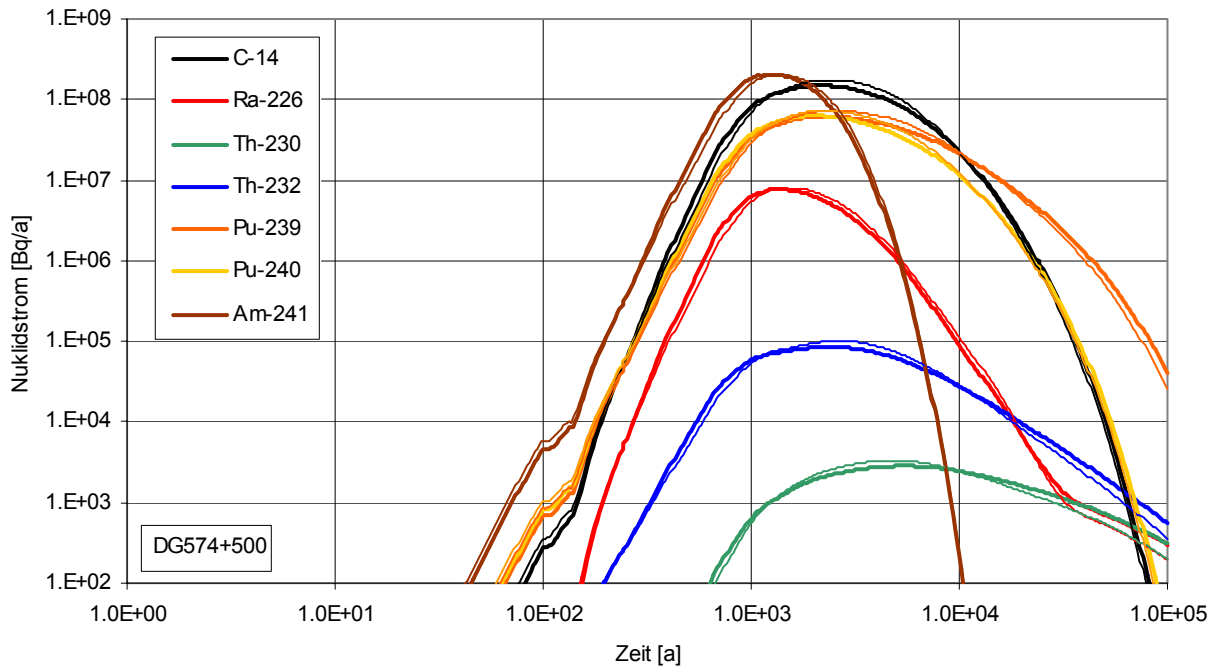


Abb. 5.80 Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube (RX.7 vs. kombinierte Variante RX.5, dünn)

5.5.3.3 Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete

Abb. 5.81 zeigt für den Rechenfall RX.7 – fette Linien – einen Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells. Hier zeigt sich der große Unterschied gegenüber allen vorhergehenden Rechenfällen, welcher fast ausschließlich den zur Abbildung von Transport und Verdünnung im Deckgebirge verwendeten Transferfunktionen des Deckgebirgsrechenfalls DR12 zuzuordnen ist, während in allen vorhergehenden Rechenfällen die Transferfunktionen des Deckgebirgsrechenfalls DR13 Anwendung fanden. Statt ein spätes Maximum bei etwa 23 000 Jahren für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (m-Witt) wird im Rechenfall RX.7 das globale Maximum schon bei etwa 2 100 Jahren für das Exfiltrationsgebiet ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (vD-Amm) gefunden. Im Vergleich zu den Änderungen in beiden anderen Exfiltrationsgebieten ist die Änderung für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ relativ gering. Tab. 5.20 gibt einen Überblick der Änderungen gegenüber der kombinierten Variante.

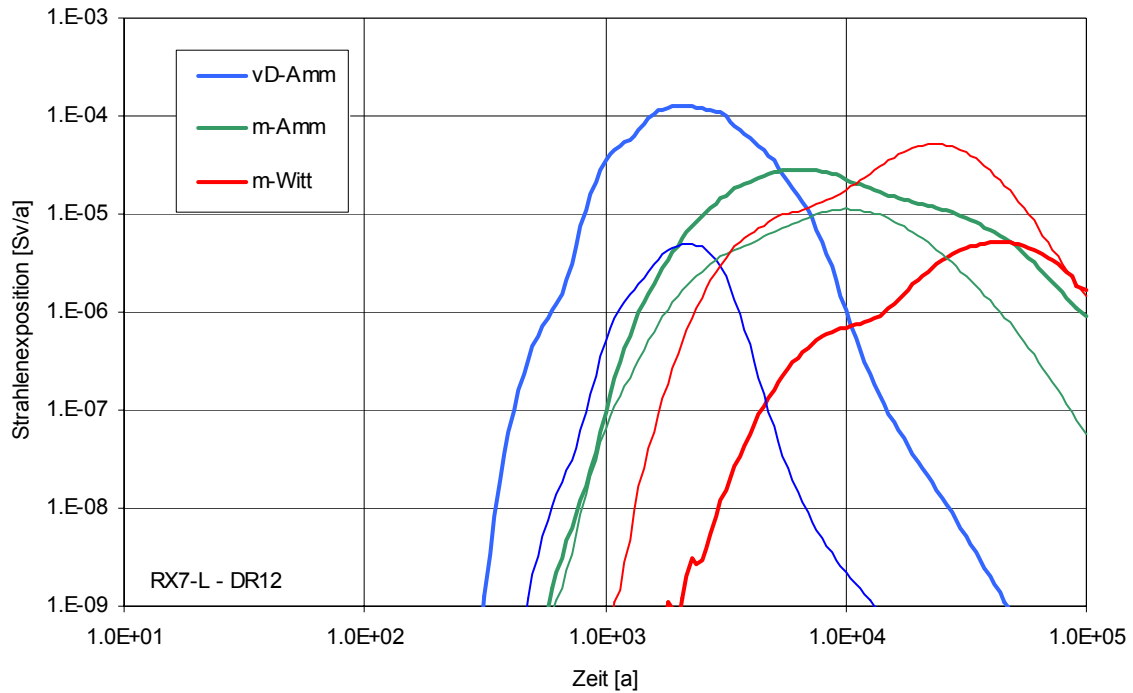


Abb. 5.81 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (RX.7 – DR12 vs. kombinierte Variante RX.5 – DR13, dünn)

Tab. 5.20 Größen und Zeitpunkte der Strahlenexpositionsmaxima für den Rechenfall RX.7 im Vergleich zur kombinierten Variante

	Maximum der potenziellen Strahlenexposition [Sv/a]		Zeitpunkt des Maximums der Strahlenexposition [a]		Veränderung der Strahlenexposition im Maximum gegenüber der kombinierten Variante
	Variante RX.7-L (DR12)	kombinierte Variante (DR13)	Variante RX.7-L (DR12)	kombinierte Variante (DR13)	
vD-Amm	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	2 100	2 200	25-mal größer
m-Amm	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	6 300	10 000	2,5-mal größer
m-Witt	$5,1 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	43 700	23 000	10-mal kleiner

In Tab. 5.21 sind die wichtigsten Radionuklidbeiträge zur Zeit der jeweiligen Maxima zusammengetragen. Die Verhältnisse der Radionuklidbeiträge im Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ haben sich gegenüber RX.5 nicht relevant geändert, die Beiträge sind nur etwa 25-mal höher. Obwohl wegen den Verschiebungen der Zeitpunkte der Maxima das gegenseitige Verhältnis der Plutoniumisotope Pu-239 und Pu-240 geändert ist, dominieren sie, wie zuvor, insgesamt die potenzielle Strahlenexposition in beiden anderen Exfiltrationsgebieten zu etwa 90 %.

Tab. 5.21 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete

RX.7 – DR12 Radionuklid	vD-Amm bei 2 100 a		m-Amm bei 6 300 a		m-Witt bei 43 700 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$2,1 \cdot 10^{-6}$	2 %	$7,7 \cdot 10^{-7}$	3 %	$7,9 \cdot 10^{-9}$	-
Sn-126	$3,3 \cdot 10^{-8}$	-	$2,9 \cdot 10^{-8}$	-	$2,6 \cdot 10^{-8}$	1 %
Pu-240	$2,9 \cdot 10^{-5}$	23 %	$1,0 \cdot 10^{-5}$	37 %	$2,0 \cdot 10^{-7}$	4 %
Th-232	$9,7 \cdot 10^{-8}$	-	$4,6 \cdot 10^{-8}$	-	$3,5 \cdot 10^{-8}$	1 %
Ra-228	$1,3 \cdot 10^{-7}$	-	$6,0 \cdot 10^{-8}$	-	$4,5 \cdot 10^{-8}$	1 %
Am-241	$4,5 \cdot 10^{-5}$	35 %	$1,5 \cdot 10^{-7}$	1 %	-	-
Np-237	$1,5 \cdot 10^{-7}$	-	$1,5 \cdot 10^{-7}$	1 %	$1,5 \cdot 10^{-7}$	3 %
Pu-242	$9,0 \cdot 10^{-8}$	-	$4,7 \cdot 10^{-8}$	-	$3,8 \cdot 10^{-8}$	1 %
Ra-226	$1,0 \cdot 10^{-5}$	8 %	$8,8 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,6 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$1,2 \cdot 10^{-5}$	9 %	$9,9 \cdot 10^{-7}$	3 %	$1,7 \cdot 10^{-8}$	-
Am-243	$2,7 \cdot 10^{-7}$	-	$1,8 \cdot 10^{-7}$	1 %	$5,8 \cdot 10^{-9}$	-
Pu-239	$2,9 \cdot 10^{-5}$	23 %	$1,4 \cdot 10^{-5}$	50 %	$4,4 \cdot 10^{-6}$	86 %
Pa-231	$9,3 \cdot 10^{-7}$	1 %	$3,4 \cdot 10^{-7}$	1 %	$1,3 \cdot 10^{-7}$	2 %
übrige RN	$3,6 \cdot 10^{-8}$	-	$2,2 \cdot 10^{-8}$	-	$3,0 \cdot 10^{-8}$	1 %
Gesamt	$1,3 \cdot 10^{-4}$	100 %	$2,8 \cdot 10^{-5}$	100 %	$5,1 \cdot 10^{-6}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

Da sich sowohl der Radionuklidtransport in der Grube als auch die Radionuklidfreisetzung aus der Grube in das Deckgebirge gegenüber der kombinierten Variante nicht relevant geändert haben, sind auch die anteiligen ELB-Beiträge zur potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete zur Zeit der Maxima fast unverändert.

5.5.4 Schlussfolgerungen zur Variation des konzeptuellen Modells für das Deckgebirge

In diesem Kapitel wurden die relevanten Ergebnisse des Rechenfalls RX.7 dargestellt und jenen der kombinierten Variante RX.5 gegenübergestellt. Der Rechenfall RX.7 unterscheidet sich von der kombinierten Variante durch ein anderes hydrogeologisches Konzeptmodell des Deckgebirges und damit:

- in der geänderten Strömungswiderstandsentwicklung der Schnittstelle Deckgebirge, nun gehörend zum Deckgebirgsrechenfall DR12 statt jener des Deckgebirgsrechenfalls DR13 (vgl. Kap. 2.2),

- in den angewandten Transferfunktionen zur Abbildung von Transport und Verdünnung im Deckgebirge, nun gehörend zum Deckgebirgsrechenfall DR12, statt jene des Deckgebirgsrechenfalls DR13 (vgl. Kap. 2.3).

Die Ergebnisse des Rechenfalls RX.7 führen zu den nachfolgenden Schlussfolgerungen:

- Die Anwendung der mit dem Deckgebirgsrechenfall DR12 anstelle jener aus DR13 harmonisierten Widerstandsentwicklung im Deckgebirge hat auf den Lösungs-, Gas- und Tracerfluss im Grubengebäude nur sehr geringen Einfluss. Zwar treten in den ersten 1 000 Jahren etwas höhere Lösungsflüsse ins Deckgebirge auf, die langfristige Entwicklung der Tracer- (vgl. Kap. 5.5.2.5) und Radionuklidfreisetzung (vgl. Kap. 5.5.3.2) in das Deckgebirge beeinflusst dies jedoch nur gering (Abweichungen im Maximum kleiner als 10 %).
- Die zur Abbildung von Transport und Verdünnung im Deckgebirge angewandten Transferfunktionen aus dem Deckgebirgsrechenfall DR12 anstelle jener aus DR13 haben jedoch große Folgen auf die berechneten Entwicklungen der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (vgl. Kap. 5.5.3.3). Statt ein spätes Maximum bei etwa 23 000 Jahren für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘, wie in alle vorhergehenden Rechenfällen, wird nun das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition von $1,3 \cdot 10^{-4}$ Sv/a schon bei etwa 2 100 Jahren für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (vD-Amm) gefunden. Für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ (m-Amm) wird das gegenüber RX.5 etwa zweimal höhere Maximum von $2,8 \cdot 10^{-6}$ Sv/a hier schon bei etwa 6 300 Jahren erreicht. Das Maximum der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ (m-Witt), das hier erst bei etwa 43 700 Jahren erreicht wird, beträgt in diesem Fall nur $5,1 \cdot 10^{-6}$ Sv/a und ist damit gegenüber jenen in den beiden anderen Exfiltrationsgebieten relativ gering.
- Obwohl für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ die Verhältnisse der Radionuklidbeiträge sowie auch die Herkunft der Strahlenexpositionsrelevanten Radionuklide sich gegenüber der kombinierten Variante RX.5 nicht relevant geändert haben, ist das Maximum der potenziellen Strahlenexposition in jenem Exfiltrationsgebiet nun deutlich am höchsten.
 - Dieses Maximum wird zu 35 % durch Am-241, je 23 % durch Pu-239 und Pu-240 und 17 % durch Ra-226 und Pb-210 im Gleichgewicht bedingt.
 - Für dieses Maximum stammt das Am-241 zu 76 % aus LAW3 und zu 13% aus LAW1A; Die Plutoniumisotope stammen zu 40 % aus LAW1A und zu je etwa 20 % aus LAW1B, LAW2 und LAW3; Das Ra-226 stammt zu mehr als 90 % aus LAW1A.
 - Insgesamt wird dieses Maximum also durch Radionuklide bestimmt, welche zu je etwa 40 % aus LAW1A und LAW3 und zu je etwa 10 % aus LAW1B und LAW2 stammen bzw. daraus zugewachsen sind.

5.6 Gasbildung bei maximaler CO₂-Bildung

5.6.1 Beschreibung und Definition

Die Bildungsraten und Volumina der Gas-Hauptbestandteile werden für die Variante „Gasbildung bei maximaler CO₂-Bildung“ unter Annahme einer stöchiometrischen CO₂-Bildung kammer-spezifisch berechnet und entsprechend der Zusammenfassung zu ELB bereichsspezifisch ermittelt [ISTec 2005]. Diese Berechnung spiegelt die obere Grenze der Bandbreite bezüglich der Gesamtgasbildung wieder. Dabei ergibt sich, dass aufgrund der vorhandenen Nitrat-, Sulfat-, Karbonat- und Eisen(III)-Anteile maximal 46 % des gesamten organischen Kohlenstoffs zu Kohlendioxid umgesetzt werden können [ISTec 2005]. Unter diesen Bedingungen sind die pH-Werte in den ELK geringer im Vergleich zur Referenzentwicklung – jedoch kammer-spezifisch in unterschiedlichem Ausmaß. Bei geringerem pH-Wert beschleunigen sich die Korrosion des Eisens und damit die korrosive Gasbildung; die Reduzierung der korrosiv gebildeten Gasmengen gegenüber den maximal möglichen durch den Verbrauch von Wasserstoff bei der Bildung von Methan (CH₄) wurde nicht berücksichtigt, da dies mit einer Abnahme des gebildeten Gasvolumens verbunden wäre. Bezüglich der mikrobiellen Gasbildung wurde in dieser Bandbreitenbetrachtung davon ausgegangen, dass nach der maximal möglichen Umsetzung zu CO₂(g) und dessen weitgehender Fällung der noch verfügbare organische Kohlenstoff vollständig zu CH₄(g) umgesetzt wird. Ein anteiliger Übergang von CH₄ in die Lösungs- und Festphase wurde nicht berücksichtigt. Die „Gasbildung bei maximaler CO₂-Bildung“ gemäß [ISTec 2005] wird als theoretisch möglicher, wenig realitätsnaher hoher Wert für die Gesamtgasbildung erachtet, der die Bandbreiten der Standortbedingungen, des Modellansatzes und der Berechnungsmodi (Extrapolationen) wiedergibt. Er ist zu verstehen als extreme Variante eines Prozesses, die im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse als Szenario mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit zu untersuchen ist.

Gegenüber der kombinierten Variante RX.5 sind die übrigen Modellparameter unverändert. Diese Variante untersucht damit lediglich den Einfluss der maximalen CO₂-Bildung auf den Lösungs- und Gasfluss und die daraus resultierende Tracer- und Radionuklid-ausbreitung im Grubengebäude.

5.6.1.1 Parametrisierung der Gasbildung in KAFKA

Die Gasbildung durch Korrosion und durch mikrobiellen Abbau wird in KAFKA durch die Summe von zwei Reaktionen erster Ordnung beschrieben, d.h. die Rate der Gasbildung nimmt exponentiell mit der Zeit ab (siehe Schlussbericht, Kap. 7.1.3.1). Die Parameter für die Variante mit maximaler Gasbildung ergeben sich durch Näherung („fit“) an den jeweils bereichsspezifischen Verlauf in den ELB für die Gasbildung bei maximaler CO₂-Bildung aus [ISTec 2005] (dort: Tab. 9.21) und sind in Tab. 5.22 aufgeführt. Das Ergebnis der Parametrisierung zeigt Abb. 5.82.

Tab. 5.22 Parameter der Gasbildung in KAFKA in der Variante RX.13-K

Bereich	V_{gk} [m ³]	λ_{gk} [1/a]	$t_{i,0}^{gk}$ [a] ^{*)}	V_{gm} [m ³]	λ_{gm} [1/a]	$t_{i,0}^{gm}$ [a]
LAW1A	$1,64 \cdot 10^6$	$9,38 \cdot 10^{-4}$	-6,49	$3,01 \cdot 10^6$	$4,85 \cdot 10^{-2}$	4,85
LAW1B	$3,37 \cdot 10^5$	$4,91 \cdot 10^{-4}$	-23,5	$7,27 \cdot 10^5$	$7,55 \cdot 10^{-3}$	3,67
LAW2	$1,30 \cdot 10^6$	$1,38 \cdot 10^{-2}$	0,83	$1,00 \cdot 10^6$	$5,51 \cdot 10^{-4}$	10,0
LAW3	$1,76 \cdot 10^6$	$8,57 \cdot 10^{-3}$	-0,08	$1,42 \cdot 10^6$	$9,35 \cdot 10^{-5}$	0,49
LAW4	$2,07 \cdot 10^4$	$5,00 \cdot 10^{-3}$	-32,4	$2,40 \cdot 10^6$	$5,43 \cdot 10^{-4}$	0,05
MAW	$2,64 \cdot 10^5$	$4,57 \cdot 10^{-4}$	-2,62	$1,34 \cdot 10^4$	$1,13 \cdot 10^{-1}$	0,40

*) Die negativen Zeiten für $t_{i,0}^{gk}$ (Beginn der Gasbildung vor Beginn des Modellzeitraums $t = 0$) sind fit-Parameter und ohne physikalische Bedeutung.

Darin ist (vgl. Schlussbericht 2005, Kap. 7.1.3.1):

- $V_{gk,i}$ Gesamtes Gasvolumen, das durch Reaktion 1 im ELB i entsteht (bei der vorherrschenden Temperatur von 25 °C und Atmosphärendruck) [m³_{STP}]
- $V_{gm,i}$ Gesamtes Gasvolumen, das durch Reaktion 2 im ELB i entsteht (bei der vorherrschenden Temperatur von 25 °C und Atmosphärendruck) [m³_{STP}]
- $\lambda_{gk,i}$ Gasbildungskonstante für Reaktion 1 [a⁻¹]
- $\lambda_{gm,i}$ Gasbildungskonstante für Reaktion 2 [a⁻¹]
- $t_{i,0}^{gk}$ Zeitpunkt des Beginns der Gasbildung durch Reaktion 1 im Bereich i [a]
- $t_{i,0}^{gm}$ Zeitpunkt des Beginns der Gasbildung durch Reaktion 2 im Bereich i [a]

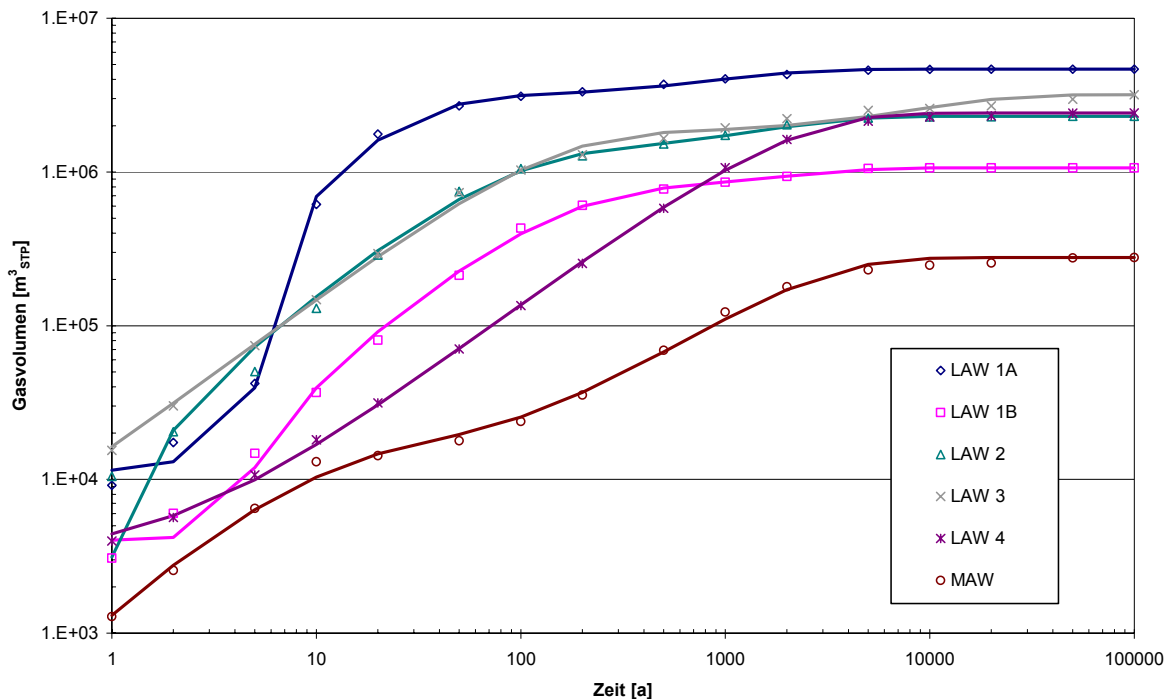


Abb. 5.82 Gasbildung ISTec 2005 (Punkte) und Parametrisierung in KAFKA (Linien) für RX.13-K

5.6.1.2 Annäherung der Gasbildung in LOPOS

Im LOPOS-Programm fängt die Gasbildung, mit exponentiell abnehmender Rate, immer unmittelbar nach dem Flüssigkeitszutritt in einem Einlagerungsbereich an. Die Gasbildung aus [ISTec 2005] gemäß den obigen Annahmen zeigt für den Einlagerungsbereich LAW1A ab etwa 5 Jahren eine plötzlich ansteigende Rate. Diese Rate ist so hoch, dass, wenn sie unmittelbar wirksam wäre, der Gasspeicher in LAW1A statt nach etwa 5 bis 10 Jahren schon innerhalb eines Jahres vollständig mit Gas gefüllt wäre. Dadurch würde in dieser Periode weitgehend unkontaminierte Lösung verdrängt werden, wodurch der Radionuklidtransport aus LAW1A wesentlich unterschätzt wäre. Deshalb wird das Verhalten der Gasbildung in LAW1A in LOPOS mit Hilfe eines zusätzlichen Gasbildungssegments auf die gleiche Ebene modelliert, das erst nach etwa 5 Jahren als instantan geflutet zugeschaltet wird. Abb. 5.83 zeigt das Ergebnis der in LOPOS verwendeten Parametrisierung der für den Rechenfall RX.13 vorgegebenen Gasbildung. Die ISTec-Gasdaten sind als darin als Punkte dargestellt. Die in LOPOS angesetzten Modellstoffmengen und Gasbildungs- und Stoffumsetzungsraten (siehe Schlussbericht 2005, Kap. 7.2.3.1) sind in Tab. 5.23 zusammengestellt.

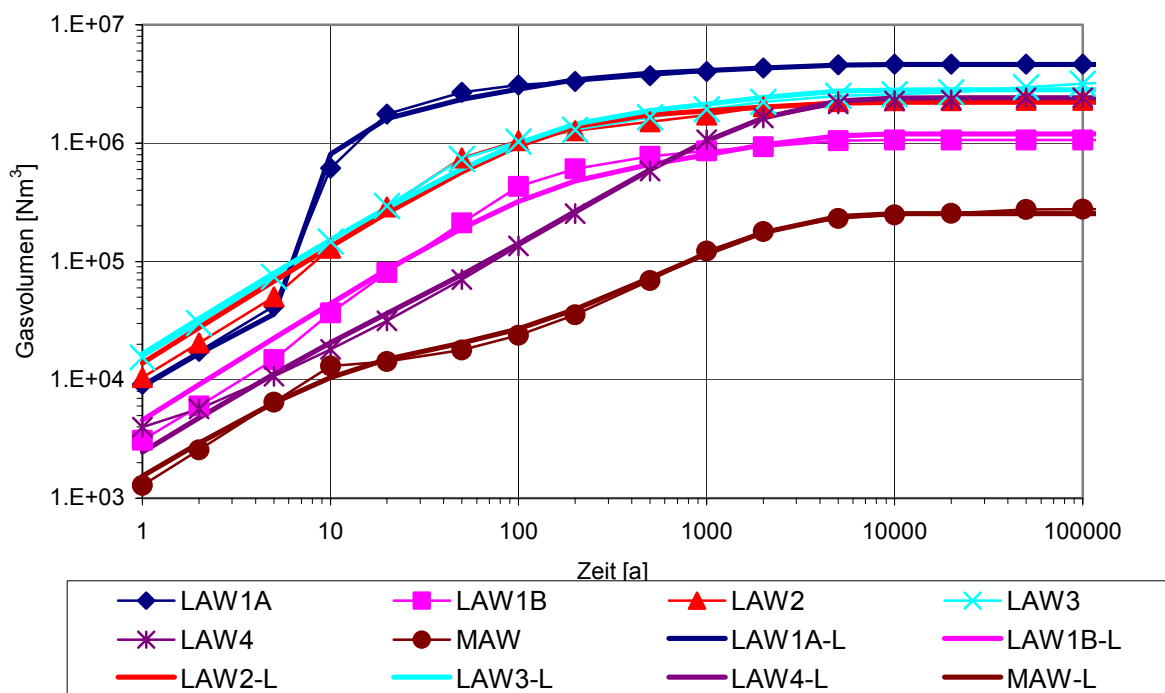


Abb. 5.83 Beste Annäherung der für den Rechenfall RX.13 vorgegebenen Gasbildung

Tab. 5.23 Modellstoffmengen, -Gasbildungs – und -Stoffumsetzungsraten in LOPOS in der Variante RX.13-L

Verzögerung [a]	0	0	5,0	0	0	0	0		
Massen [Mg]	MAW	LAW1A	LAW1A-Z	LAW1B	LAW2	LAW3	LAW4	m ³ /Mg	1/a
Metalle 1	0	15	3336	831	2686	2657	0	600	8,43·10 ⁻³
Metalle 2	400	0	1500	1164	1000	2000	4000	600	5,60·10 ⁻⁴
Organika	253	1572	29459	0	0	464	2000	55	1,06·10 ⁻¹

5.6.2 Modellergebnisse KAFKA (RX.13-K)

5.6.2.1 Gasspeicher und Gasflüsse im Grubengebäude

Die effektiven residualen Gassättigungen in Variante RX.13 stimmen mit jenen in der kombinierten Variante RX.5 überein (Kap. 5.4.2). Das zeitliche Auftreten von Gaspolstern und deren weitere Entwicklung in den Einlagerungsbereichen unterscheiden sich aufgrund der raschen Gasbildung bei größeren gebildeten Gesamtgasmengen deutlich von den entsprechenden Resultaten der kombinierten Variante RX.5-K (Abb. 5.84). Durch die höhere Gasbildung in LAW1A (und LAW1B) und einem damit verbundenen sehr früh einsetzenden Gasfluss aus LAW1A in den ELB LAW1B bildet sich in diesem rasch ein großes Gaspolster aus – trotz eines ebenfalls sehr früh einsetzenden Gasabflusses aus LAW1B in das Baufeld in der Südflanke. In LAW2, LAW3 und LAW4 erreicht die Lösungssättigung deutlich schneller den jeweiligen Wert, ab dem das Gas mobil wird. Gaspolster bilden sich – anders als in der kombinierten Variante – in den ELB LAW3 und LAW4 nicht in relevantem Ausmaß aus.

Das Gaspolster im östlichen Carnallitbaufeld (Modellsegment Carn_s.o) ist in RX.13-K nur temporär von Bestand (ca. 85 Jahre bis 2 300 Jahre). Die Ursache hierfür liegt in einem Wechsel des Gasfließpfades aus dem Carnallitbaufeld. So fließt nach rund 2 000 Jahren das Gas nicht mehr im Carnallitbaufeld nach Westen, sondern nach Überschreiten des Gaseindringdrucks in H-JS.Ca (Blindschacht 3 und Strecken zum Carnallitbaufeld, einschließlich der Auflockerungszonen) zum Jüngeren Steinsalz im Osten und von dort in das Baufeld in der Südflanke.

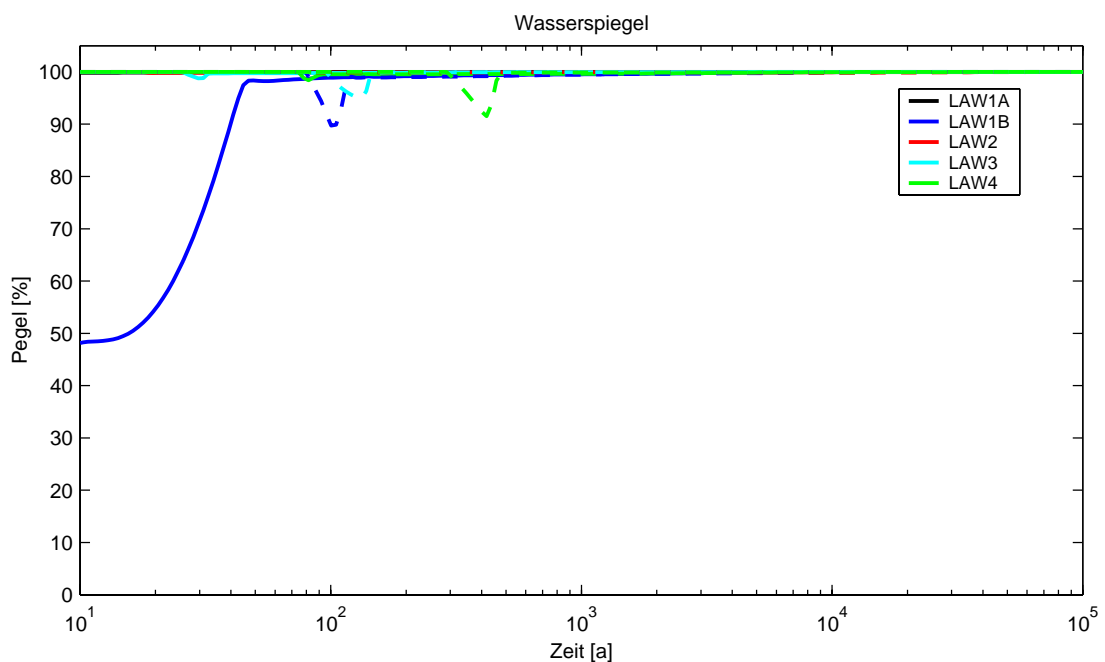
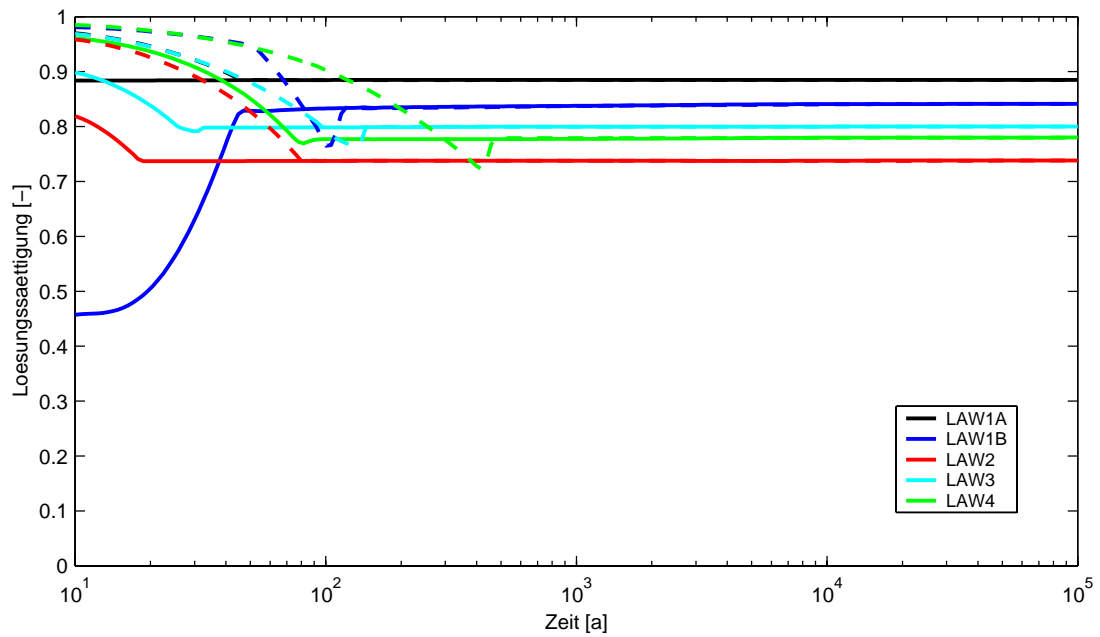


Abb. 5.84 Lösungssättigung und –pegel in den LAW-ELB (RX.13-K, gestrichelt kombinierte Variante RX.5-K)

Für die Anwendung in LOPOS sind die erhöhten effektiven residualen Gassättigungen für die Bereiche entsprechend Tab. 5.24 anzuwenden. Weicht die bestimmte erhöhte effektive residuale Gassättigung für eine Modellkammer von jener in der kombinierten Variante RX.5-K ab, sind zum Vergleich die entsprechenden Werte aus RX.5-K angegeben.

Tab. 5.24 Parametrisierung der erhöhten effektiven residualen Gassättigung in den ELB und großen Kammern: Variante RX.13-K

	MAW	UMAW	LAW1B	LAW3	LAW4	HA-4/ AZ-4	Carn_s.o	SF ^{*)}
Erhöhte effektive residuale Gassättigung [-]	0,9	0,9	0,59 (RX.5-K: 0,24)	0,21 (RX.5-K: 0,24)	0,23 (RX.5-K: 0,27)	0,29 / 0,21 (RX.5-K: 0,18 / 0,18)	0,13	0,9

*) im Baufeld in der Südflanke die Modellsegmente oberhalb 500 m (FS1_506, FS2_506, F1_496, F2_496, FS1_490, FS2_490, F12_479)

Die Transportpfade entsprechen – bis auf den oben erwähnten Wechsel im Gasfließpfad aus dem Carnallititbaufeld – weitgehend jenen in RX.5-K (Tab. 5.25).

Tab. 5.25 Gasfließpfade aus den LAW-ELB und Zeitpunkte ihrer Aktivierung: Variante RX.13-K

LAW1A ²⁵	
S-LAW1A / V-LAW1A – LAW1B ...	< 1 Jahr
LAW1B	
V-LAW1B – F1_700 – FS1_695 ... FS2_506 – F2_511 – DG500 (geringfügig zwischen 3 und 30 Jahren auch über H-Ca.1 ins westliche Carnallititbaufeld (Modellsegment Carn_s.w))	ab ca. 1 Jahr
LAW2	
V-LAW2 – JS725W – S-JS725W – F1_700 ...	ab ca. 18 Jahren
LAW3	
S-LAW3 – JS725O – V-JS725 – F2_700 ...	ab ca. 25 Jahren
LAW4	
A-4.Ca – Carn_s.o – HA-4 – Carn.s.w – H-Ca710B – F2_700...	ca. 85 – 2 000 Jahre
A-4.Ca – Carn_s.o – H-JS.Ca – JS725O – V-JS725/S-JS725O – F2_700...	ab ca. 2 000 Jahren

Ein Gasabfluss aus dem Modellsegment UMAW in das Baufeld in der Südflanke findet faktisch nicht statt²⁶.

²⁵ Bis ca. 4 Jahre strömt Gas aus LAW1A auch über die Verbindung A-1.AS zu Modellsegment AS2 (Abbauen 4/750, 4a/750, 5/750, 5a/750 und 5b/750 im Älteren Steinsalz) und von dort in das westliche Carnallititbaufeld.

Das Einsetzen des Gasabflusses aus den LAW-Einlagerungsbereichen erfolgt in Variante RX.13-K deutlich früher als in der kombinierten Variante. Zum einen wird aufgrund der rascheren und größeren gebildeten Gasmengen das Gas im Porenraum der Einlagerungsbereiche schneller mobil, zum anderen werden aufgrund der höheren Druckwerte in den Einlagerungsbereichen (Abb. 5.85) bei Modellverbindungen, die den primären Gas-transportpfad aus einem Einlagerungsbereich darstellen und einen Gaseindringdruck aufweisen diese Gaseindringdrücke schneller als in der kombinierten Variante erreicht.

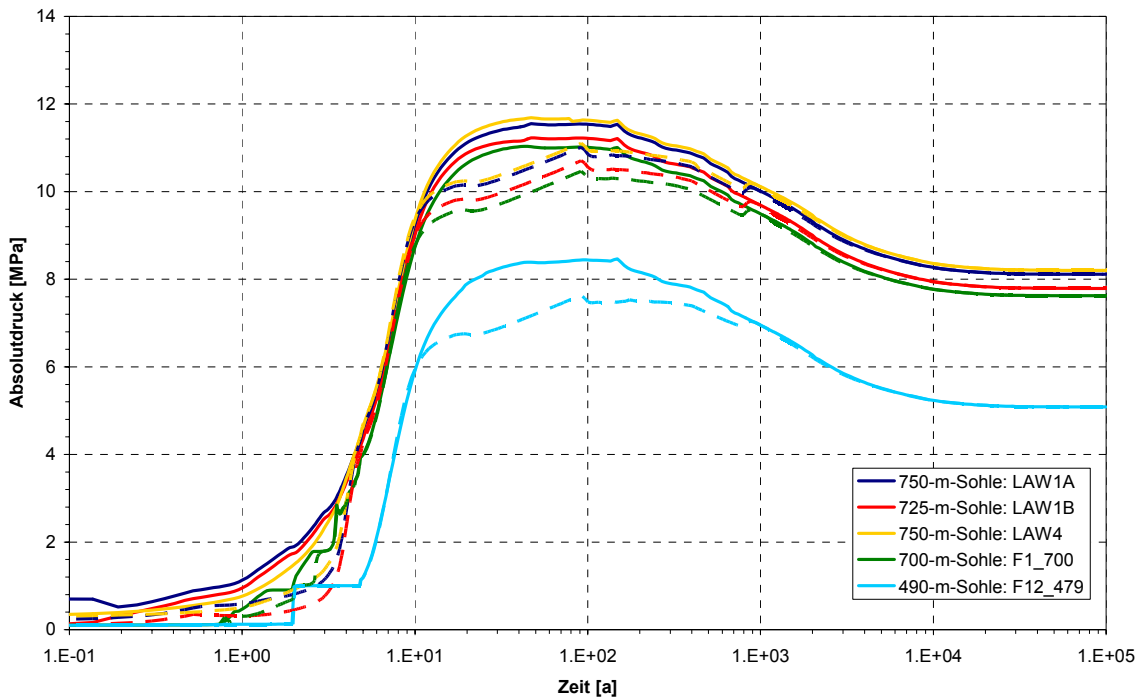


Abb. 5.85 Druckentwicklung in ausgewählten Modellbereichen, Variante RX.13-K (gestrichelt: RX.5-K)

Die gegenüber der kombinierten Variante früher in den Einlagerungsbereichen gebildeten, größeren Gasvolumina führen nach der Akkumulation im Grubenhöchsten zu einer deutlich schneller fortschreitenden Lösungsentsättigung der Modellbereiche, ausgehend vom Grubenhöchsten, bis auf die Höhe der oberen Modellverbindung ins Deckgebirge in 500 m Tiefe. Der Gasaustritt aus dem Grubengebäude setzt bereits nach etwa 130 Jahren und damit 640 Jahre früher als in der kombinierten Variante ein (Abb. 5.86). Bis etwa 1 000 Jahre fließt das Gas mit Raten in das Deckgebirge, die deutlich über dem maximalen Gasabfluss in der kombinierten Variante liegen. Der Gesamtgasabfluss im Betrachtungszeitraum beträgt in Variante RX.13-K 14,6 Millionen m^3_{STP} und ist damit rund 5,5 Millionen m^3_{STP} größer als in RX.5-K. Zum Vergleich: Die in den Einlagerungsbereichen gebildete Gesamtgasmenge beträgt in RX.13-K 13,9 Millionen m^3_{STP} und in RX.5-K rund 9 Millionen m^3_{STP} .

²⁶ Nach der Entsättigung der UMAW bis auf das residuale Lösungsvolumen nach ca. 15 000 Jahren kommt es ab 20 000 Jahren zu geringen fluktuierenden Gasflüssen über die Verbindung A-UMAW zum Baufeld in der Südflanke.

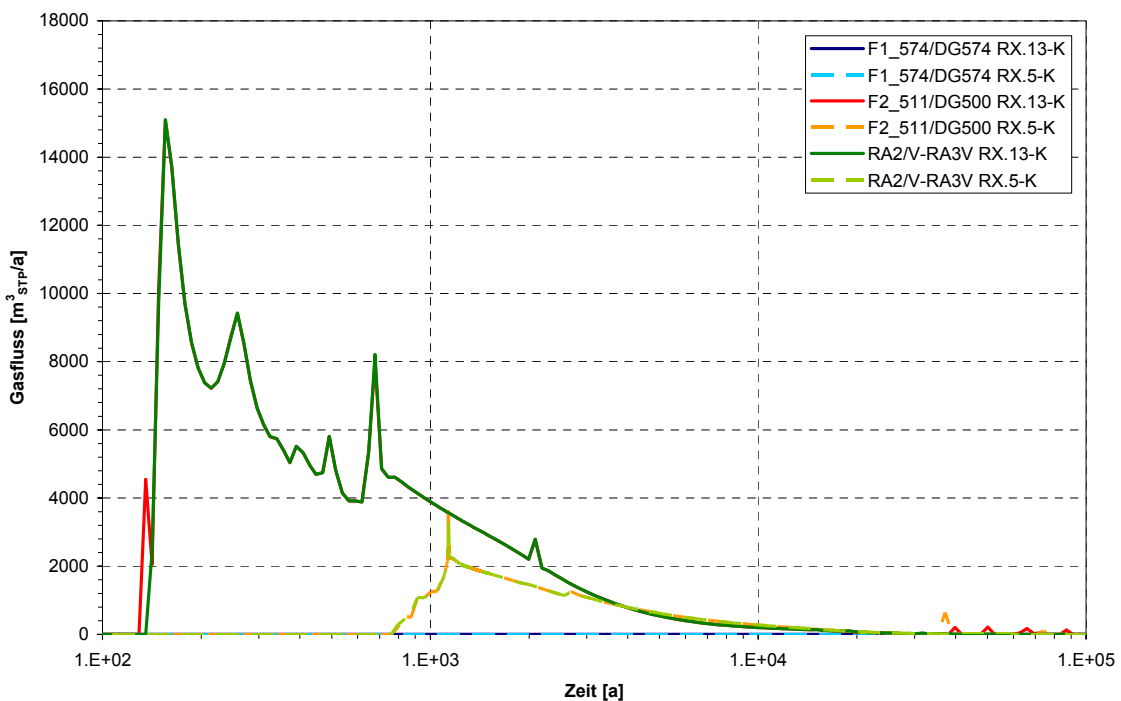
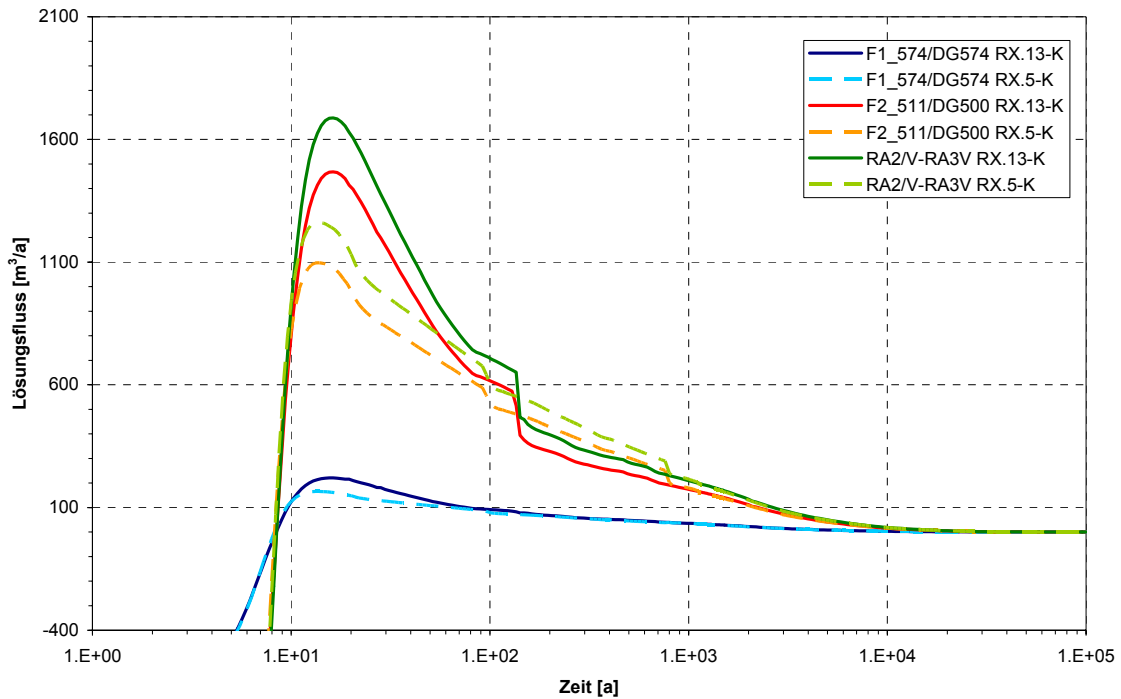


Abb. 5.86 Lösungsabfluss ins Deckgebirge (oben) und Gasabfluss ins Deckgebirge (unten) in RX.13-K, z. Vgl. gestrichelt RX.5-K

Die gegenüber der kombinierten Variante stärkere Gasbildungsrate führt zunächst zu einer erhöhten Verdrängung von Lösung aus dem Grubengebäude. Bis zum Einsetzen des Gasabflusses liegt daher der Lösungsabfluss aus dem Grubengebäude – besonders über die obere Modellverbindung zum Modell-Rötanhydrit in 500 m Teufe – deutlich über jenem in der kombinierten Variante (Abb. 5.86). Der Maximalwert des Lösungsabflusses im Modell-Rötanhydrit beträgt 1690 m^3 gegenüber 1260 m^3 in RX.5-K. Nach Einsetzen des

Gasabflusses in das Deckgebirge nach 130 Jahren liegen die Raten der Lösungsauspressung in RX.13-K unter jener der kombinierten Variante, bis nach 770 Jahren – mit dem Beginn des Gasabflusses aus dem Grubengebäude in der kombinierten Variante – die Unterschiede zwischen RX.13-K und RX.5-K vernachlässigbar gering werden. Insgesamt wird über den Betrachtungszeitraum etwa dieselbe Gesamtlösungsmenge in den beiden Rechenfällen aus dem Grubengebäude ausgepresst.

5.6.2.2 Transportprozesse der Lösungsverdrängung aus den ELB

Die relativen Beiträge der Prozesse der Lösungsverdrängung aus den ELB sind grundsätzlich vergleichbar mit jenen in der kombinierten Variante RX.5-K (Abb. 5.87 bis Abb. 5.91). Deutlich ist in allen LAW-Einlagerungsbereichen der Einfluss der maximalen Gasbildung in Form des früheren Ansteigens der Lösungsverdrängung durch Gasspeicherung im Porenraum erkennbar. Da der Gasabfluss aus den Einlagerungsbereichen früher als in der kombinierten Variante einsetzt, liegt die Gesamtlösungsmenge, die durch die Gasspeicherung aus den Einlagerungsbereichen bis zum Einsetzen des Gasabflusses verdrängt werden kann, in der Regel unter dem entsprechenden Wert, der sich in der kombinierten Variante ergibt.

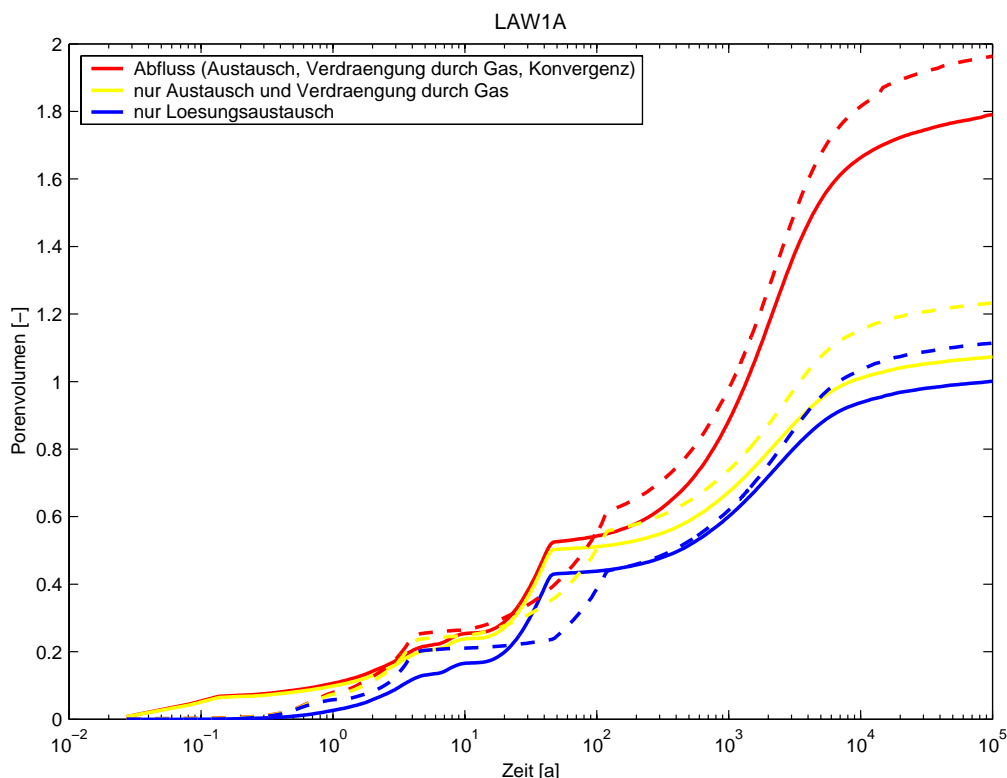


Abb. 5.87 Lösungsfluss aus dem ELB LAW1A bezogen auf das anfängliche Porenvolumen in RX.13-K (gestrichelt kombinierte Variante RX.5-K)

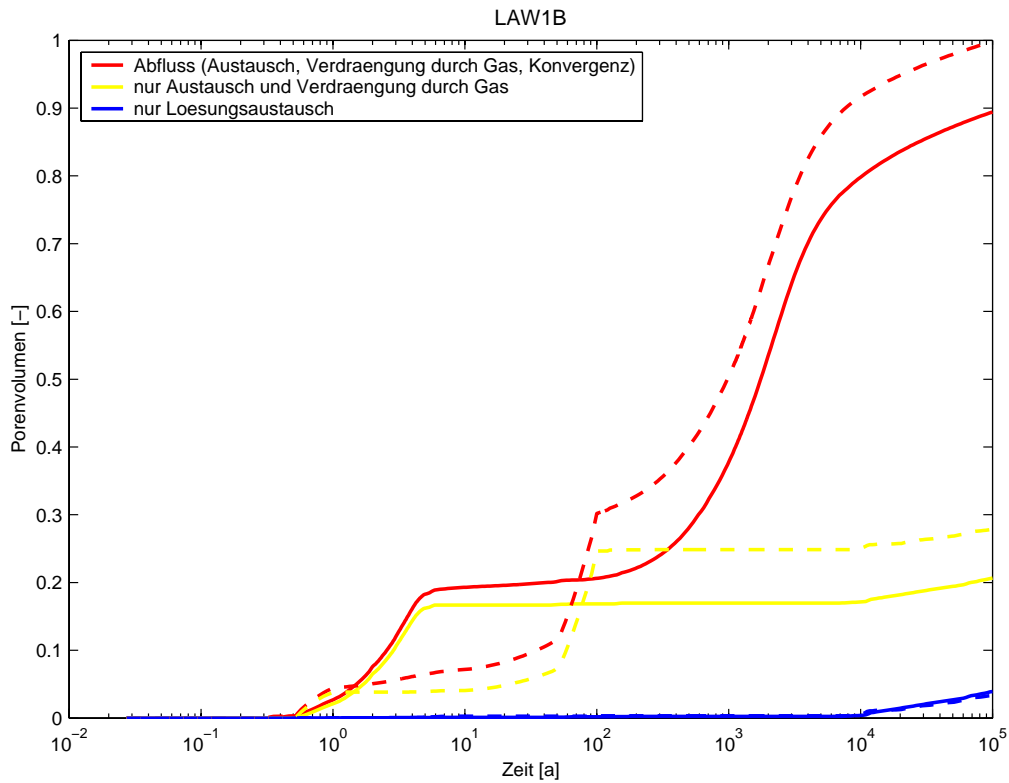


Abb. 5.88 Lösungsfluss aus dem ELB LAW1B bezogen auf das anfängliche Porenvolumen in RX.13-K (gestrichelt kombinierte Variante RX.5-K)

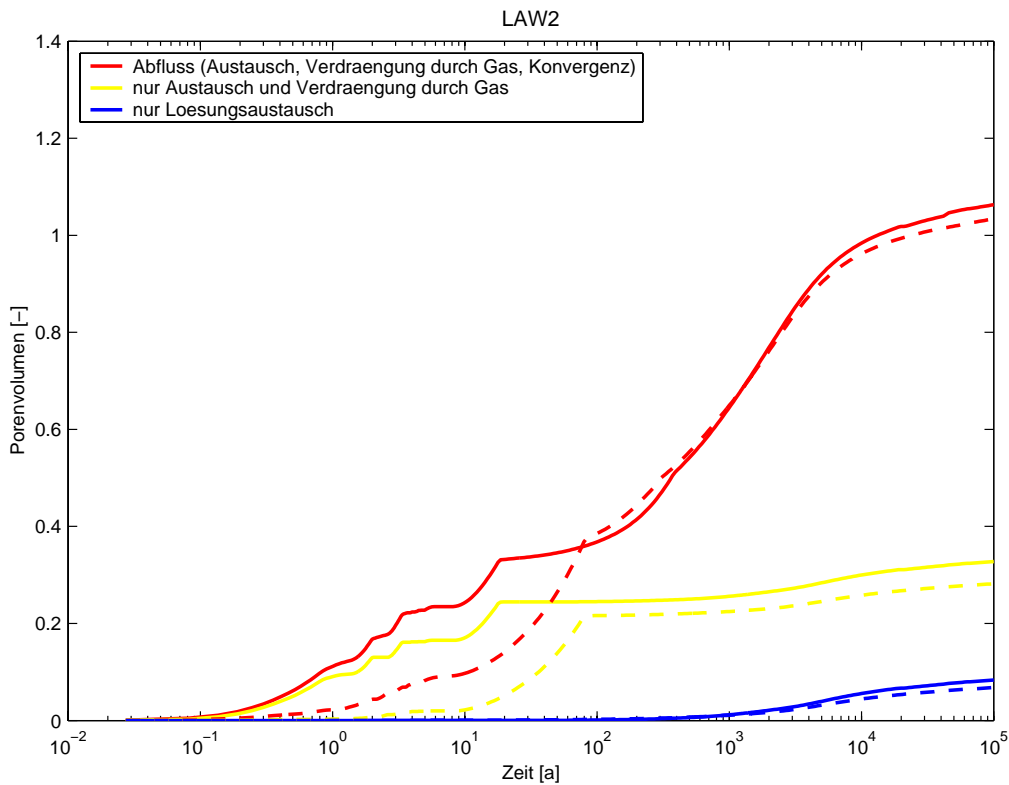


Abb. 5.89 Lösungsfluss aus dem ELB LAW2 bezogen auf das anfängliche Porenvolumen in RX.13-K (gestrichelt kombinierte Variante RX.5-K)

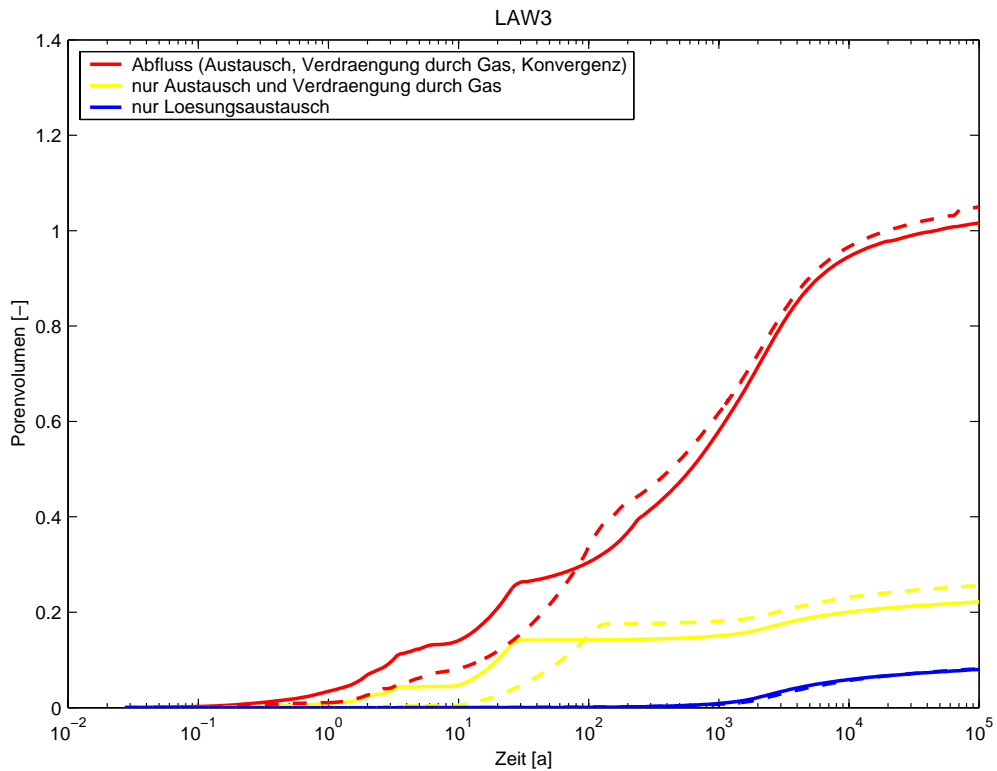


Abb. 5.90 Lösungsfluss aus dem ELB LAW3 bezogen auf das anfängliche Porenvolumen in RX.13-K (gestrichelt kombinierte Variante RX.5-K)

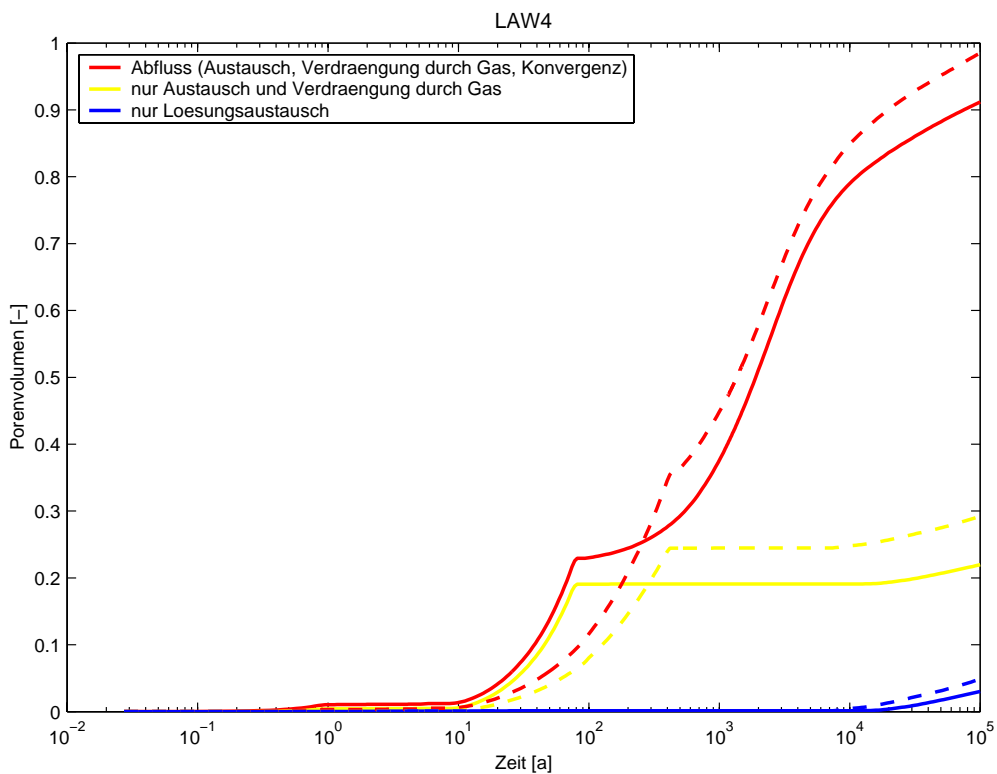


Abb. 5.91 Lösungsfluss aus dem ELB LAW4 bezogen auf das anfängliche Porenvolumen in RX.13-K (gestrichelt kombinierte Variante RX.5-K)

Die Bedeutung des Lösungsaustausches am Lösungsabfluss nimmt in LAW1A und LAW4 aufgrund einer geringeren Durchströmung dieser Einlagerungsbereiche ab. In den übrigen LAW-Einlagerungsbereichen sind die Abweichungen im Lösungsaustausch gegenüber der kombinierten Variante gering. Bei einer weitgehend unveränderten Bedeutung der konvergenzbedingten Lösungsauspressung am Abfluss aus den LAW-Einlagerungsbereichen nimmt insgesamt das über den Betrachtungszeitraum kumuliert ausgepresste Lösungsvolumen aus LAW1A, LAW1B und LAW4 um jeweils etwa 10 % gegenüber RX.5-K ab. Aus LAW2 wird geringfügig mehr (< 5 %) und aus LAW3 geringfügig weniger (< -5 %) Lösung ausgepresst.

5.6.2.3 *Tracertransport im Nahbereich der ELB*

Der Tracertransport im Nahbereich von LAW2, LAW3 und LAW4 ist in der Phase der Lösungsverdrängung durch Gasspeicherung in diesen Einlagerungsbereichen durch deutliche größere Tracerabflüsse gekennzeichnet. Die Phase dieses erhöhten Tracer-austrages bis zum Einsetzen des Gasabflusses aus dem jeweiligen Einlagerungsbereich dauert in LAW4 mit knapp 100 Jahren am längsten an. Nach dem Beginn des Gasabflusses gehen die Lösungs- und damit auch die Tracerabflüsse aus den Einlagerungsbereichen ebenso deutlich unter die entsprechenden Werte in der kombinierten Variante zurück. Wird auch in der kombinierten Variante das Gas in diesen Einlagerungsbereichen mobil, nähert sich das Niveau der Tracerflüsse in Variante RX.13-K jenem in RX.5-K an, und sind im weiteren Verlauf nur noch geringe Unterschiede in den Tracerabflüssen aus diesen Einlagerungsbereichen zwischen den beiden Rechenfällen festzustellen.

Anders sieht die Situation für LAW1A und LAW1B aus. Hier führt die stärkere Gasbildung bis zum Verschwinden des Gaspolsters in LAW1B nach etwa 50 Jahren zu einem Wechsel im Fließmuster zwischen LAW1A und LAW1B. In dieser Phase werden Lösung und Tracer aus LAW1A über die Schweben und Rolllöcher dominant in den ELB LAW1B ausgepresst. Da gleichzeitig aus LAW1B kein Lösungsabfluss stattfindet, werden auch die Tracer aus LAW1B (einschließlich der aus LAW1A zugeströmten Tracer) bis etwa 50 Jahre nicht advektiv in den Nahbereich freigesetzt. Mit dem Verschwinden des Gaspolsters in LAW1B stellt sich ein Fließmuster ähnlich jenem nach dem Verschwinden des Gaspolsters im Rechenfall RX.5 ein. Als Folge dieser temporären Änderung im Fließmuster zwischen LAW1A und LAW1B werden bis etwa 50 Jahre Tracer aus LAW1A und LAW1B nur in untergeordnetem Maße in das übrige Grubengebäude freigesetzt.

5.6.2.4 *Tracertransport im Grubengebäude und –übertritt in das Deckgebirge*

Der Einfluss der Gasbildung bei maximaler CO₂-Bildung auf den Tracertransport im Grubengebäude ist insgesamt gering. Die Tracer aus LAW1A und LAW1B gelangen aufgrund des gegenüber der kombinierten Variante bis etwa 50 Jahre verminderten Abflusses der Tracer aus diesen beiden Einlagerungsbereichen im Vergleich zu RX.5-K deutlich verzögert in das Baufeld in der Südflanke. Die Konzentrationen der Tracer aus LAW2, LAW3 und LAW4 steigen im Baufeld in der Südflanke dagegen geringfügig (Tracer aus LAW2 und LAW3) bzw. erkennbar (Tracer aus LAW4) früher als in der kombinierten Variante an. Darin spiegeln sich die – unterschiedlich lange andauernden – deutlich erhöhten

Lösungs- und Tracerabflüsse aus diesen Einlagerungsbereichen bis zum Beginn des jeweiligen Gasabflusses wieder.

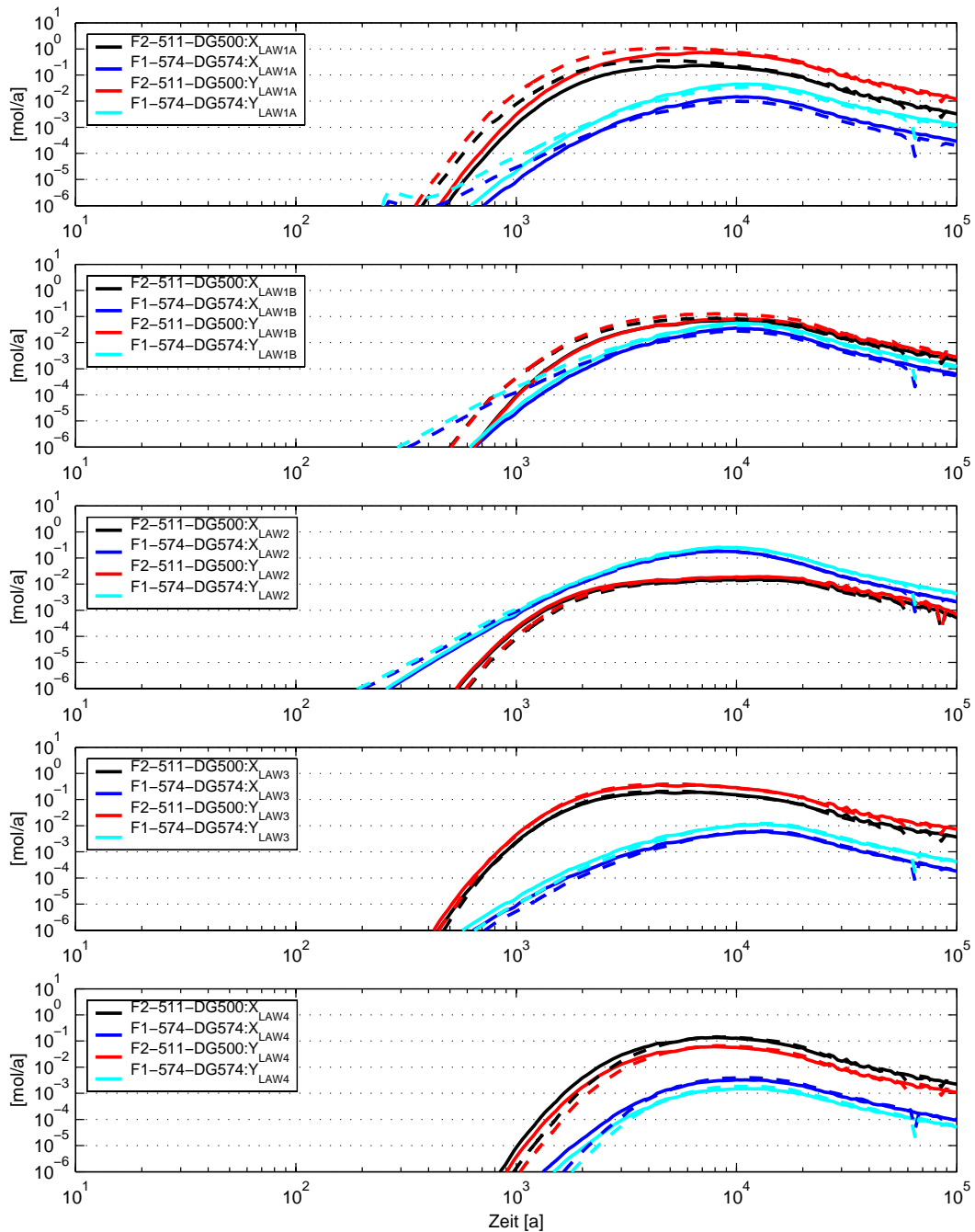


Abb. 5.92 Tracerübertritt in das Deckgebirge an den beiden Modell-Schnittstellen: RX.13-K im Vergleich zur kombinierten Variante (gestrichelt)

5.6.2.5 Tracerkonzentrationen und -flüsse im Deckgebirge

Die Freisetzung der Tracer aus dem Grubengebäude ist in Abb. 5.92 dargestellt. Analog zu den bisherigen Ergebnissen der Variante ist der Fluss der Tracer aus LAW1A und LAW1B gegenüber der kombinierten Variante erkennbar verzögert und erreicht geringere Maximalwerte. Für die Tracer aus LAW2 und LAW3 zeigen sich nur geringe Abweichungen

im Vergleich zu RX.5-K. Deutliche Änderungen ergeben sich wiederum für die Tracer aus LAW4. Hier ist ein früherer Anstieg der Fließraten der Tracer festzustellen.

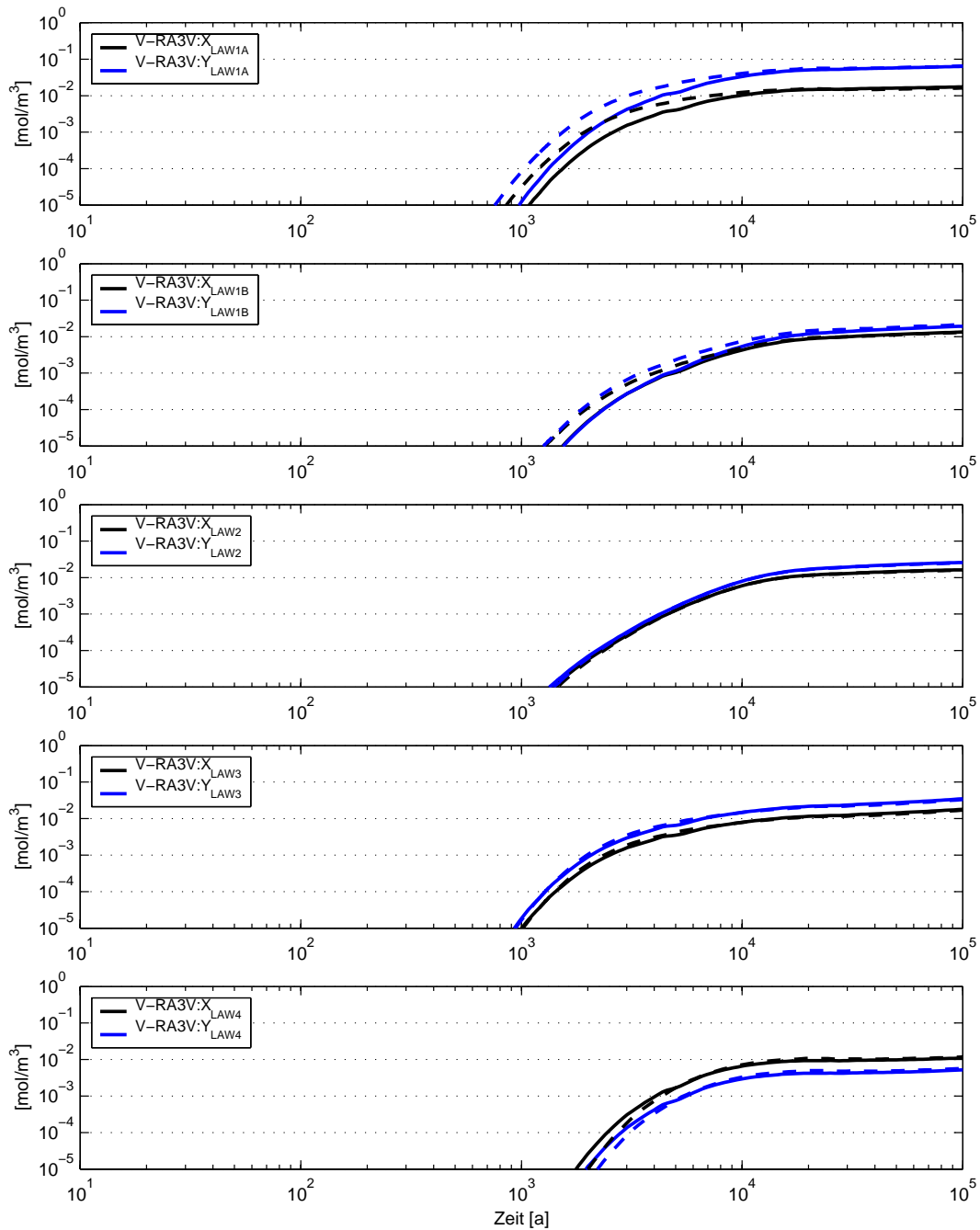


Abb. 5.93 Konzentrationsänderung der Tracer im Rötanhydrit: RX.13-K im Vergleich zur kombinierten Variante (gestrichelt)

Die Änderung der Konzentrationen im Rötanhydrit (Modellgebiet RA2) gibt Abb. 5.93 wieder. Die Zeitpunkte der größten Konzentrationsänderung im Rötanhydrit, der Maxima der Tracerflüsse und die Änderung der Maxima der Tracerflüsse sind in Tab. 5.26 zusammengefasst. Bis auf die Tracer aus LAW2 nehmen die Maxima der Tracerflüsse gegenüber der kombinierten Variante ab. Am deutlichsten ist die Abnahme für die Tracer aus LAW1A mit einer Reduktion um über 50 %. Weniger ausgeprägt ist die Abnahme im Fluss

der Tracer aus LAW1B und LAW3, und für die Tracer aus LAW2 und LAW4 sind die Abweichung gegenüber RX.5-K sehr gering. Die Zeitpunkte des Maximums der jeweiligen Tracerflüsse werden für die Tracer aus LAW1A und LAW1B 1 500 Jahre bzw. 1 900 Jahre später als in der kombinierten Variante erreicht. Für die anderen Tracer ergeben sich frühere Zeitpunkte mit maximalen Flusswerten.

Tab. 5.26 Vergleich der Konzentrationsänderungen und der Maxima der Flüsse der X-Tracer zur kombinierten Variante

	Zeitpunkt des maximalen Konzentrationsanstiegs im Rötanhydrit [a]		Zeitpunkt des Maximums der Tracerflüsse [a]		Veränderung der Tracerflüsse im Maximum gegenüber der kombinierten Variante
	Variante RX.13-K	kombinierte Variante	Variante RX.13-K	kombinierte Variante	
X _{1A}	4 400	3 000	6 900	5 400	-53 %
X _{1B}	6 600	5 400	10 000	8 100	-14 %
X ₂	8 300	8 100	10 000	10 700	4 %
X ₃	4 400	3 000	4 400	5 400	-11 %
X ₄	6 000	5 400	7 900	8 100	-6 %

5.6.2.6 Tracerkonzentrationen nach Transfer im Deckgebirge

Die resultierenden Tracerkonzentrationen in den drei Exfiltrationsgebieten *Verstärktes Deckgebirge – Tal der Ammerbeek (vD-Amm)*, *Muschelkalk – Tal der Ammerbeek (m-Amm)* und *Muschelkalk – Tal von Wittmar (m-Witt)* zeigen stellvertretend die LAW-X-Tracer in Abb. 5.94. Für das Exfiltrationsgebiet *m-Witt* mit den höchsten Tracerkonzentration der drei Exfiltrationsgebiete ergeben sich für die Tracer aus LAW1A und LAW1B Maximalwerte der Konzentration, die 30 % (X_{LAW1B} : 20 %) unter jenen der kombinierten Variante liegen. Für die Tracer aus LAW2, LAW3 und LAW4 ergeben sich Maximalkonzentrationen, die maximal 10 % unter den entsprechenden Werten in RX.5-K liegen. In der zeitlichen Entwicklung der Konzentrationen aus LAW1A und LAW1B ist wiederum deutlich eine Verzögerung gegenüber der kombinierten Variante zu erkennen. Während für das Exfiltrationsgebiet *m-Witt* die Maximalwerte der Tracerkonzentrationen zwischen 30 000 Jahren und 40 000 Jahren erreicht werden, resultieren für das Exfiltrationsgebiet *vD-Amm* die – gegenüber *m-Witt* um rund drei Größenordnungen kleineren – Maxima der Tracerkonzentrationen bereits nach ca. 3 000 Jahren. Im Vergleich zur kombinierten Variante nehmen für das Exfiltrationsgebiet *vD-Amm* die Konzentrationsmaxima der Tracer aus LAW1A und LAW1B um gut 60 %, jene der Tracer aus LAW3 nur geringfügig um wenige Prozent ab. Das jeweilige Maximum der Tracer aus LAW2 liegt 20 % über dem Vergleichswert in RX.5-K, und für die Tracer aus LAW4 übertreffen die Maximalkonzentrationen die entsprechenden Werte der kombinierten Variante um gut einen Faktor 2.

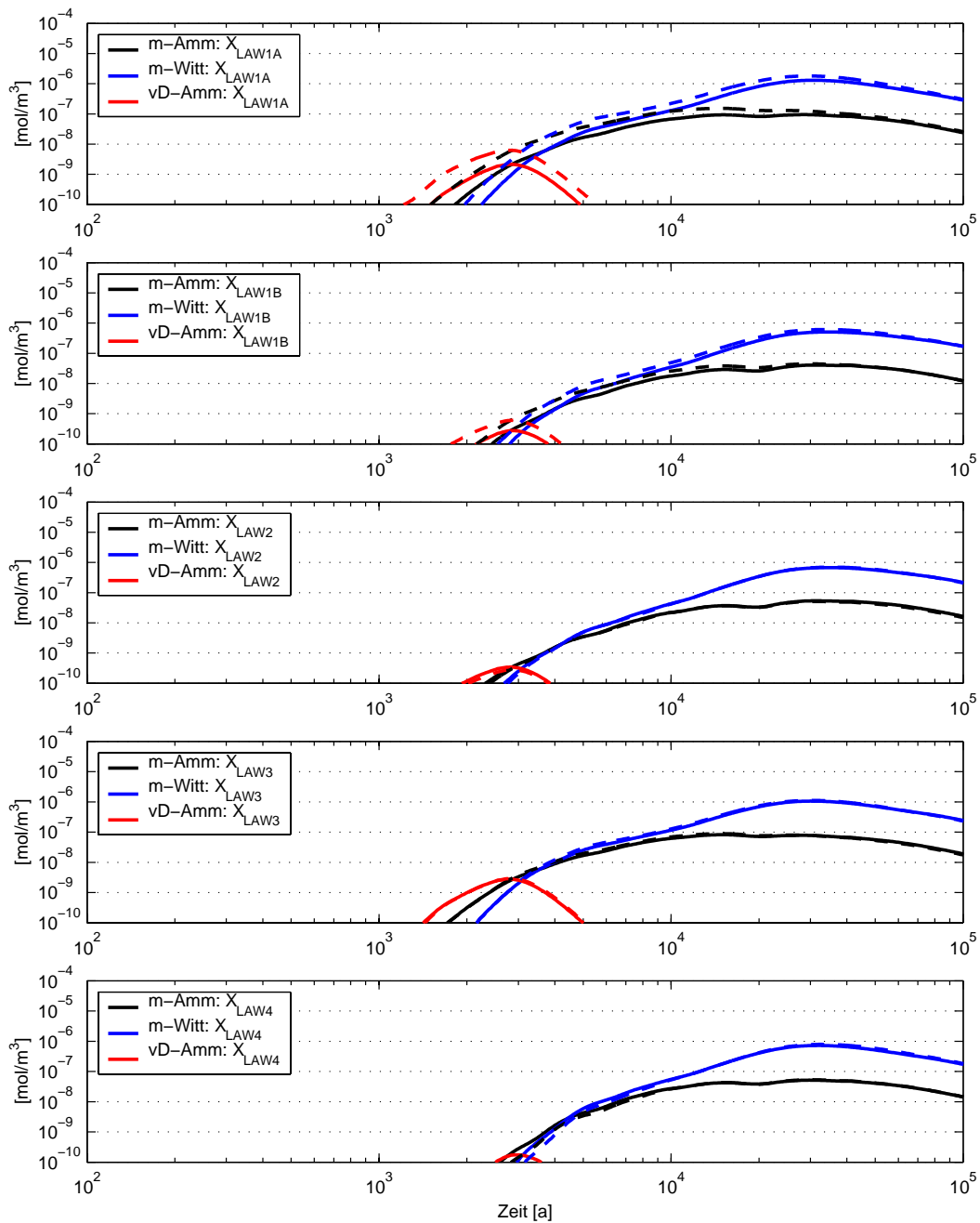


Abb. 5.94 X-Tracerkonzentrationen für die drei Exfiltrationsgebiete: RX.13-K im Vergleich zur kombinierten Variante (gestrichelt)

Vergleicht man die Gesamtverdünnung der Tracer im Grubengebäude und im Deckgebirge für das Exfiltrationsgebiet *m-Witt* (Abb. 5.95, im Vergleich zu Abb. 5.41 in Kap. 5.4.2), zeigt sich, dass die Minima der Gesamtverdünnung der Tracer aus LAW1A und LAW1B in RX.13-K um 40 % (X_{LAW1B} : 70 %) größer als die entsprechenden Werte in der kombinierten Variante sind. Für die Tracer aus den übrigen LAW-Einlagerungsbereichen resultiert eine minimale Gesamtverdünnung, die maximal 10 % über jener in RX.5-K liegt.

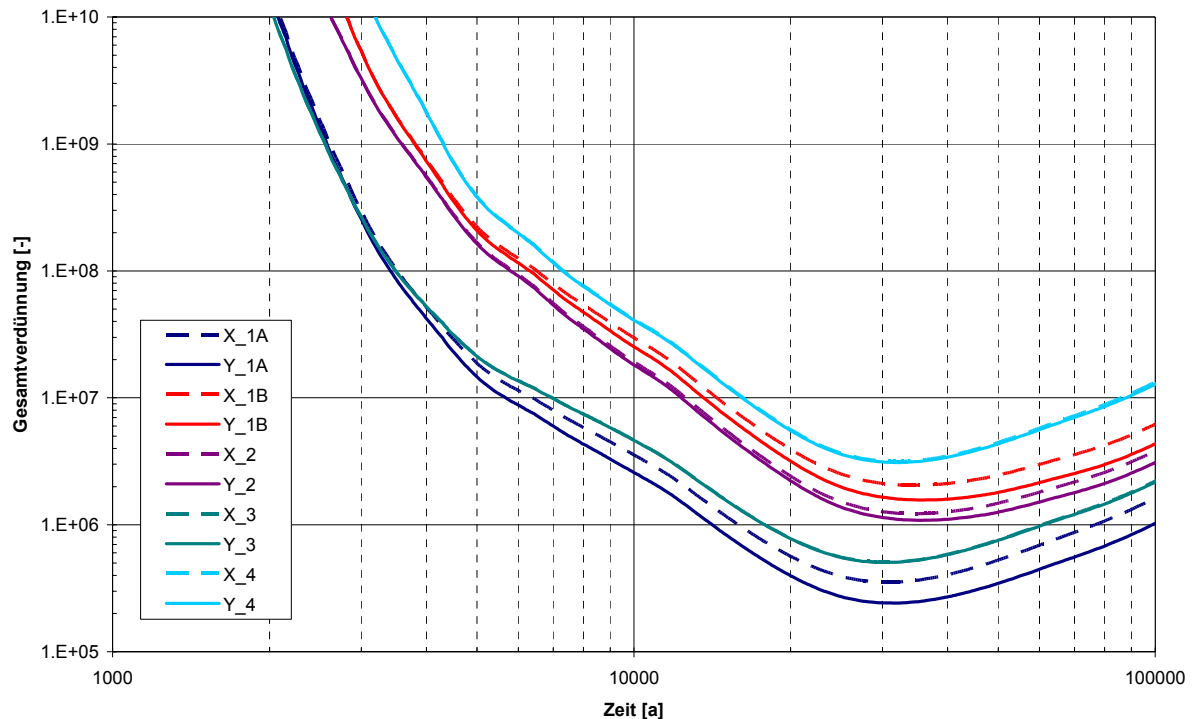


Abb. 5.95 Gesamtverdünnung der Tracer im Grubengebäude und im Deckgebirge für die Exfiltrationsgebiete *m-Witt*, Variante RX.13-K

5.6.3 Modellergebnisse LOPOS (RX.13-L)

5.6.3.1 Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen

Die im Rechenfall RX.13 gegenüber der kombinierten Variante RX.5 erhöhte Gasbildung in den Einlagerungsbereichen bewirkt nur Änderungen der Konzentrationsentwicklung einiger inventarbestimmten Elemente in den Einlagerungsbereichen LAW1A und LAW1B.

Bei etwa 6 Jahren ist der Gasspeicher in LAW1A vollständig mit Gas gefüllt, wonach das weiterhin in LAW1A gebildete Gas bis etwa 12 Jahre den Gasspeicher in LAW1B füllt. Infolgedessen zeigen in LAW1A die Konzentrationsänderungen der inventarbestimmten Elemente, wegen der in LAW1B abweichenden Elementkonzentrationen, sich nun schon in der Periode 6 bis 12 Jahre, statt erst zwischen 50 und 100 Jahren wie für die kombinierte Variante RX.5. Wegen des in diesem Fall zudem viel größeren Gasspeichers in LAW1B sind auch die Konzentrationsänderungen in LAW1A größer; Die Americiumkonzentration ist zwischen 5 und 50 Jahren um etwa den Faktor 2 höher, die übrigen Änderungen sind deutlich geringer. Nach 100 Jahren sind die Unterschiede nur noch gering.

In LAW1B zeigt sich die geänderte Gasbildung lediglich in der zwischen 12 und 100 Jahren bis 50 % höheren Radiumkonzentration als Folge des höheren Austausches mit LAW1A, wo eine um eine Größenordnung höhere Radiumkonzentration vorliegt.

In Tab. 5.27 sind die Zeitpunkte des Erreichens und ggf. wieder Unterschreitens der maximal möglichen Elementkonzentrationen für den Rechenfall RX.13 aufgelistet. In dieser Tabelle sind die Änderungen gegenüber der kombinierten Variante RX.5 fett hervorgehoben. Die Verlängerung der Löslichkeitsbegrenzung für Plutonium in LAW2 beträgt nur 5 %, jene für Americium in LAW4 nur etwa 10 %.

Tab. 5.27 Erreichen und Unterschreiten der maximal möglichen Konzentrationen [a]

RX.13 ELB	U		Pu		Th		Np		Am	
	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis
LAW1A	0,0	> 10 ⁵			0,0	> 10 ⁵				
LAW1B	0,0	> 10 ⁵	3,8	17 800	0,0	> 10 ⁵				
LAW2	0,0	> 10 ⁵	3,6	10 500	0,0	> 10 ⁵				
LAW3-O	0,4	> 10 ⁵	0,9	> 10 ⁵	1,3	> 10 ⁵				
LAW3-W	0,1	> 10 ⁵	0,9	> 10 ⁵	0,2	> 10 ⁵				
LAW4-O	0,0	> 10 ⁵	0,1	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵			3,5	1 070
LAW4-W	0,0	> 10 ⁵	0,1	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵			3,5	1 070

Änderungen gegenüber der kombinierten Variante RX.5 sind fett hervorgehoben

5.6.3.2 Radionuklidströme aus und zu den Einlagerungsbereichen

Die Elementkonzentrationen sind im Rechenfall RX.13 nur in LAW1A und LAW1B (Radium) gegenüber der kombinierten Variante RX.5 relevant beeinflusst. Da sich die Fluidströme im Umfeld der Einlagerungsbereiche nur während der Auffüllung der Gasspeicher deutlich gegenüber der kombinierten Variante geändert haben, werden die Radionuklidströme nach der Auffüllung der Gasspeicher in den Einlagerungsbereichen vergleichbar sein.

In Abb. 5.96 ff. sind für den Rechenfall RX.13 – fette Linien – beispielsweise für Pu-239 die Radionuklidströme über die jeweiligen Modellverbindungen im Umfeld der Einlagerungsbereiche LAW1A und LAW1B dargestellt, und jene der kombinierten Variante RX.5 – dünne Linien – (siehe Kap. 3.2.1.3) gegenübergestellt²⁷. Als Folge der geänderten Strömungsverhältnisse und Konzentrationsentwicklungen in den beiden ELB zeigen die Unterschiede gegenüber der kombinierten Variante sich vor allem in den Radionuklidströmen über die Schweben zwischen LAW1A und LAW1B (S-LAW1A-L) und zwischen U-LAW1 und LAW1A (S-ULAW1-L). Nach Abschluss der gasbedingten Lösungsverdrängung sind die Unterschiede in den übrigen Einlagerungsbereichen in beiden Rechnungen relativ gering, ein Hinweis auf die deutlich advective Natur der Radionuklidströme.

²⁷ Das im Kap. 5.6.2.1 ausgewiesene Gaspolster im Einlagerungsbereich LAW1B über ca. 50 Jahre unterbindet in diesem Zeitraum die Radionuklidfreisetzung über die desintegrierte Zone im Firstbereich der LAW1B zum Baufeld in der Südflanke. Da dieser Prozess in den Berechnungen zum Radionuklidtransport nicht berücksichtigt wird, ist der hier ausgewiesene frühe Beitrag der Radionuklide aus LAW1B eine Überschätzung.

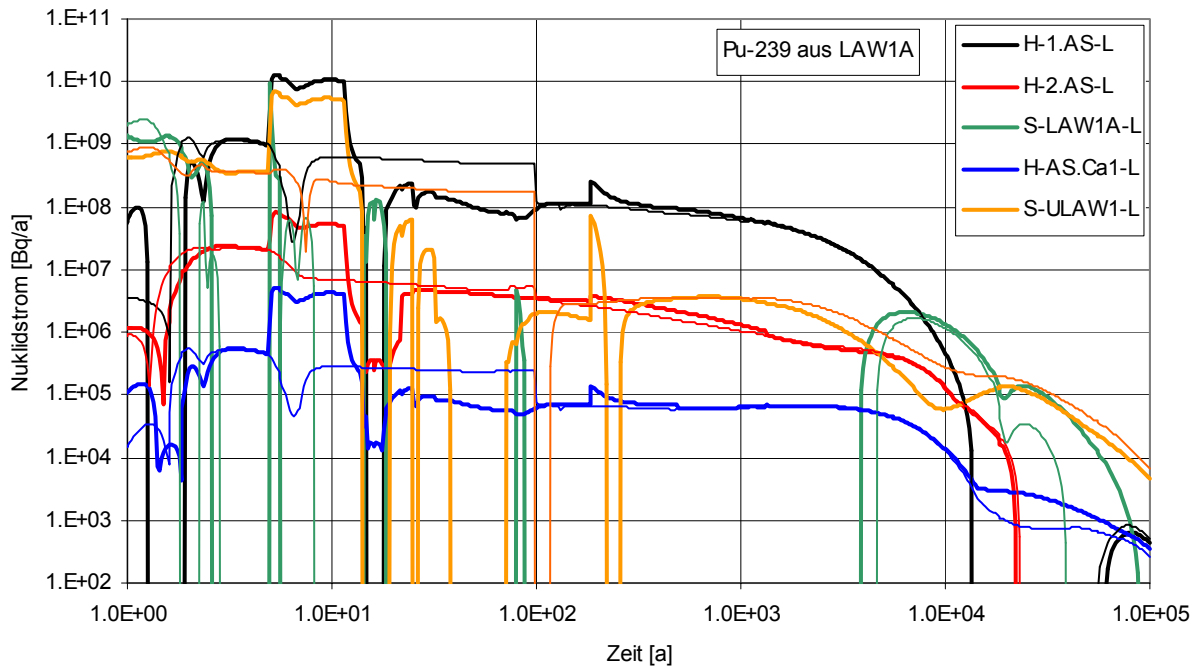


Abb. 5.96 Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW1A (RX.13 vs. kombinierte Variante RX.5, dünn)

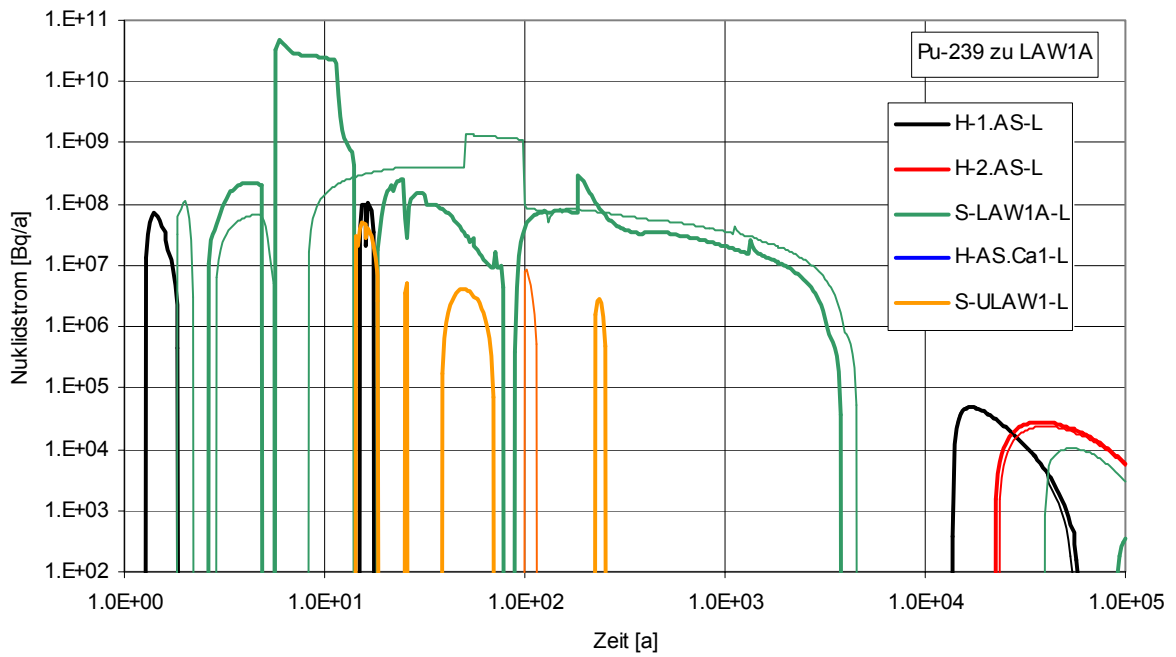


Abb. 5.97 Radionuklidströme von Pu-239 zu LAW1A (RX.13 vs. kombinierte Variante RX.5, dünn)

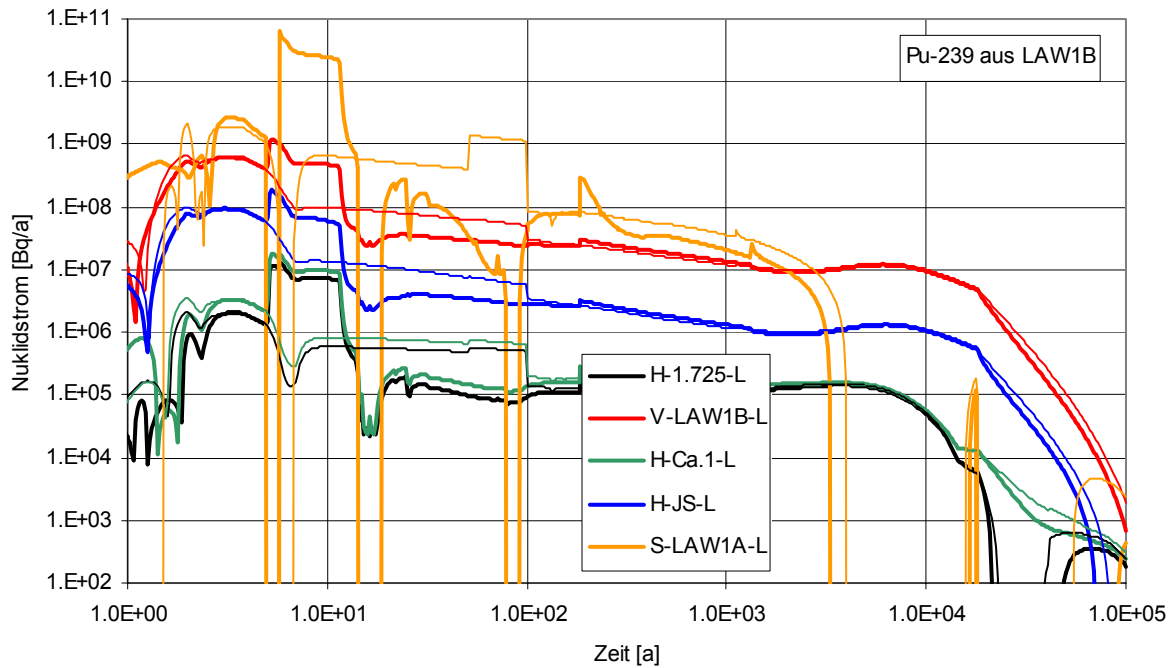


Abb. 5.98 Radionuklidströme von Pu-239 aus LAW1B (RX.13 vs. kombinierte Variante RX.5, dünn)

5.6.3.3 Radionuklidkonzentrationen im Baufeld in der Südflanke

In Abb. 5.99 und Abb. 5.100 sind für den Rechenfall RX.13 – fette Linien – beispielsweise die Entwicklungen der Pu-239-Konzentration in ausgewählten Segmenten des Baufeldes in der Südflanke dargestellt. Diese Entwicklungen sind jenen der kombinierten Variante – dünne Linien – gegenübergestellt.

Da, nach Abschluss der gasbedingten Lösungsverdrängungsphase, im Vergleich zu der kombinierten Variante sowohl die Fluidströme als die Radionuklidtransporte aus den Einlagerungsbereichen kaum verändert sind, sind abhängig von der Teufe nach etwa 300 bis 2 000 Jahren die Unterschiede in den Radionuklidkonzentrationsentwicklungen im Baufeld in der Südflanke im Vergleich zur kombinierten Variante weitgehend verschwunden.

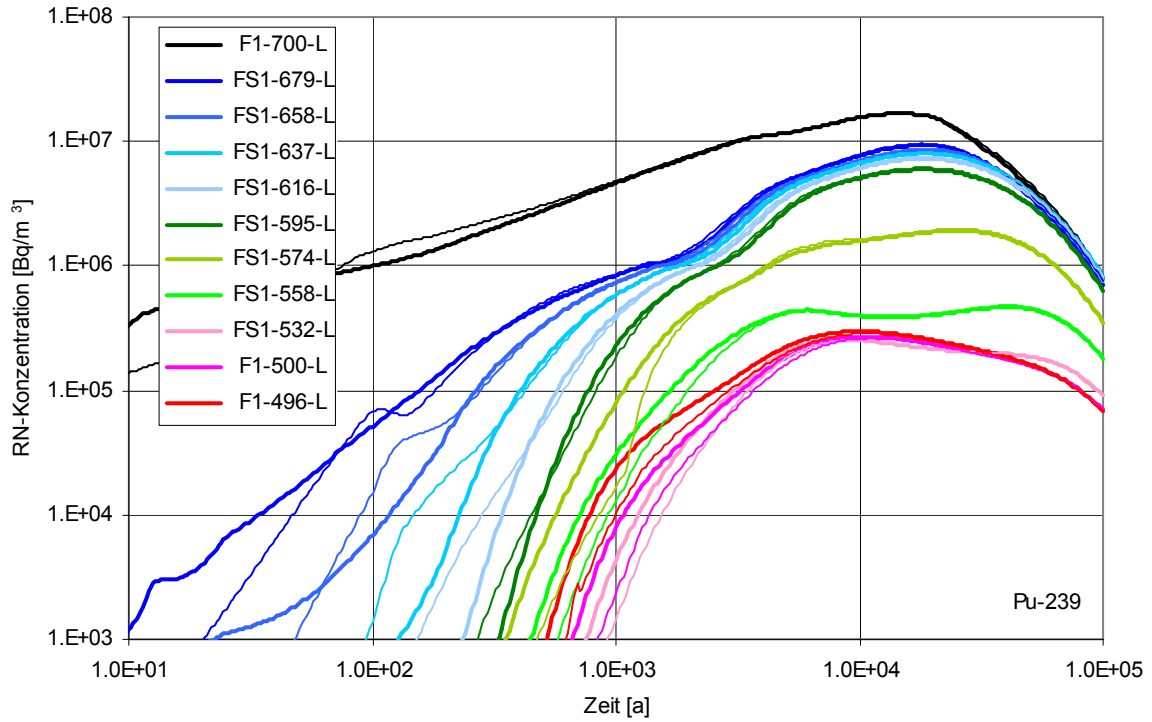


Abb. 5.99 Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (RX.13 vs. kombinierte Variante RX.5, dünn)

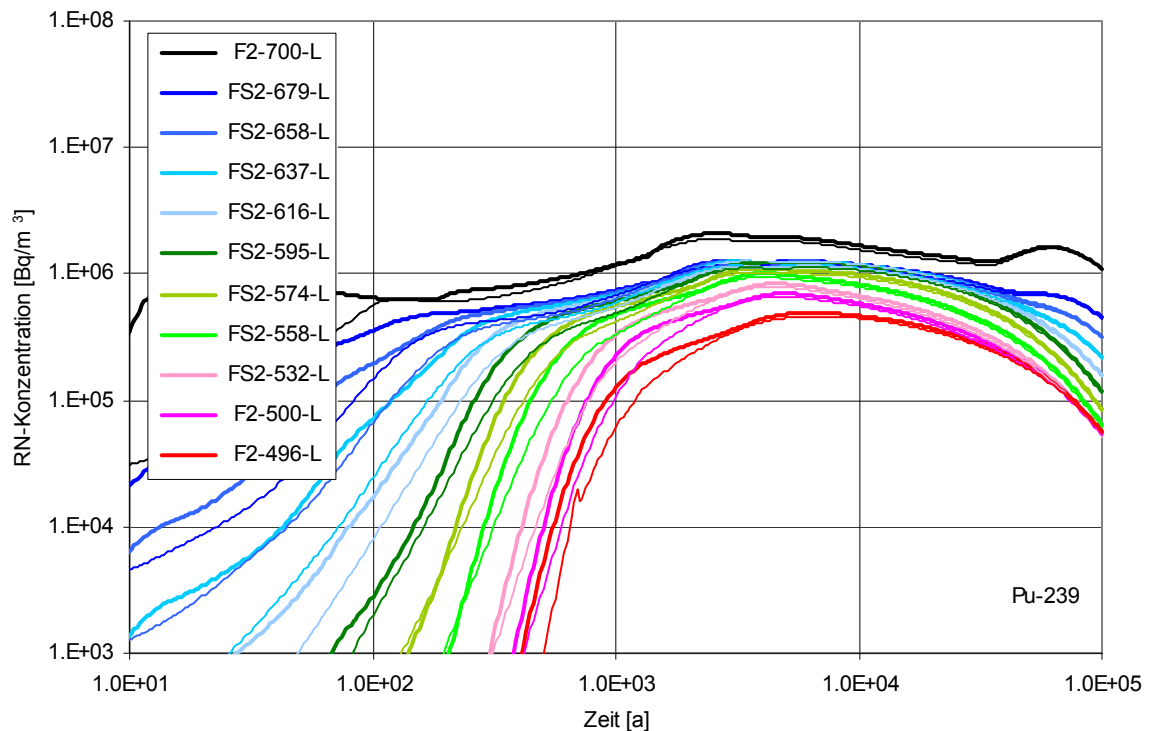


Abb. 5.100 Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (RX.13 vs. kombinierte Variante RX.5, dünn)

5.6.3.4 Radionuklidfreisetzung aus der Grube

Abb. 5.101 zeigt für den Rechenfall RX.13 – fette Linien – die Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube, welche der Abbildung des Transports im Deckgebirge zu den Exfiltrationsgebieten über die Transferfunktionen zu Grunde gelegt werden. Diese Austritte sind jenen für die kombinierte Variante RX.5 – dünne Linien – gegenübergestellt. Wie aufgrund der geringen Änderungen der Element- und Radionuklidkonzentrationen im Baufeld in der Südflanke zu erwarten war, sind nach etwa 2 000 Jahren die Unterschiede im Vergleich zur kombinierten Variante RX.5 weitgehend verschwunden. Wegen ihrem Einfluss auf die potenzielle Strahlenexposition sind der relativ geringere Austritt von Am-241 und die relativ höheren Austritte von Pu-239 und Pu-240 zwischen 1 000 und 2 000 Jahren hervorzuheben.

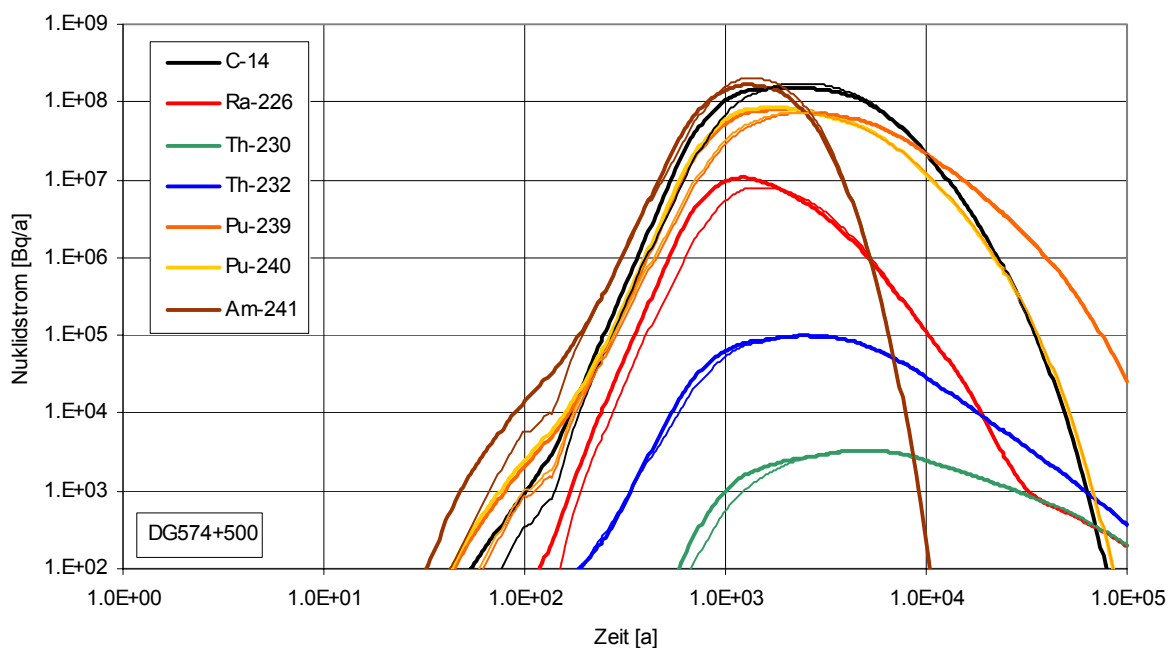


Abb. 5.101 Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube (RX.13 vs. kombinierte Variante RX.5, dünn)

5.6.3.5 Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete

Abb. 5.102 zeigt für den Rechenfall RX.13 – fette Linien – einen Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells. Tab. 5.28 gibt einen Überblick der Änderungen gegenüber der kombinierten Variante.

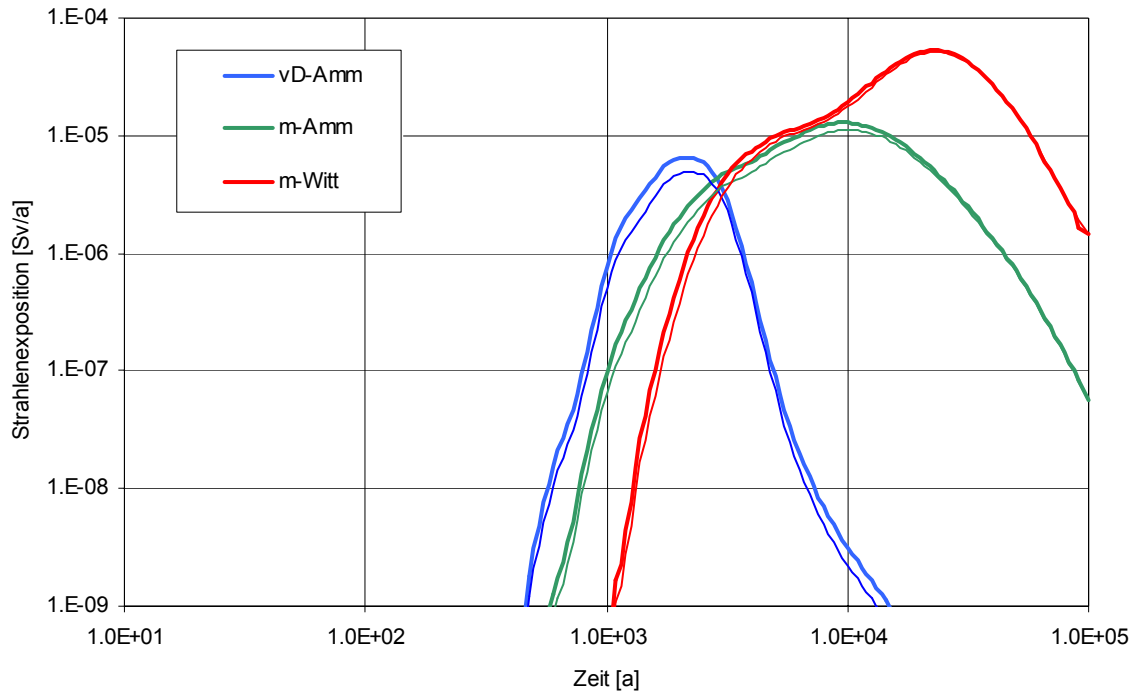


Abb. 5.102 Potenzielle Strahlensexposition für die Exfiltrationsgebiete (RX.13 vs. kombinierte Variante RX.5, dünn)

Tab. 5.28 Größen und Zeitpunkte der Strahlensexpositionsmaxima für den Rechenfall RX.13 im Vergleich zur kombinierten Variante

DR13	Maximum der potenziellen Strahlensexposition [Sv/a]		Zeitpunkt des Maximums der Strahlensexposition [a]		Veränderung der Strahlensexposition im Maximum gegenüber der kombinierten Variante
	Variante RX.13-L	kombinierte Variante	Variante RX.13-L	kombinierte Variante	
vD-Amm	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	2 200	2 200	+ 35 %
m-Amm	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	10 000	10 000	+ 15 %
m-Witt	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	23 000	23 000	+ 5 %

In Tab. 5.29 sind die wichtigsten Radionuklidbeiträge zur Zeit der jeweiligen Maxima zusammengetragen. Die anteiligen Radionuklidbeiträge im Maximum der potenziellen Strahlensexposition für die Exfiltrationsgebiete haben sich gegenüber RX.5 im Allgemeinen nicht viel verändert. Nur sind für das Exfiltrationsgebiet ‚verstürztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ (vD-Amm) der relativ geringere Beitrag von Am-241 und die relativ höheren Beiträge von Pu-239 und Pu-240 im Maximum hervorzuheben.

Tab. 5.29 Wichtigste Radionuklidbeiträge zur Zeit des Maximums der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete

RX.13 – DR13 Radionuklid	vD-Amm bei 2 200 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 23 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
C-14	$1,1 \cdot 10^{-7}$	2 %	$2,5 \cdot 10^{-7}$	2 %	$4,4 \cdot 10^{-7}$	1 %
Pu-240	$1,9 \cdot 10^{-6}$	29 %	$4,3 \cdot 10^{-6}$	34 %	$8,8 \cdot 10^{-6}$	17 %
Am-241	$1,2 \cdot 10^{-6}$	19 %	$3,2 \cdot 10^{-10}$	-	$3,5 \cdot 10^{-17}$	-
Np-237	$5,1 \cdot 10^{-9}$	-	$6,8 \cdot 10^{-8}$	1 %	$6,9 \cdot 10^{-7}$	1 %
Ra-226	$6,1 \cdot 10^{-7}$	9 %	$1,0 \cdot 10^{-7}$	1 %	$5,1 \cdot 10^{-8}$	-
Pb-210	$6,9 \cdot 10^{-7}$	10 %	$1,2 \cdot 10^{-7}$	1 %	$5,6 \cdot 10^{-8}$	-
Pu-239	$1,9 \cdot 10^{-6}$	29 %	$7,7 \cdot 10^{-6}$	60 %	$4,1 \cdot 10^{-5}$	77 %
Pa-231	$5,8 \cdot 10^{-8}$	1 %	$1,8 \cdot 10^{-7}$	1 %	$9,4 \cdot 10^{-7}$	2 %
übrige RN	$2,6 \cdot 10^{-8}$	-	$1,6 \cdot 10^{-7}$	1 %	$1,0 \cdot 10^{-6}$	2 %
Gesamt	$6,6 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,3 \cdot 10^{-5}$	100 %	$5,3 \cdot 10^{-5}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

5.6.3.6 Herkunft des die Strahlenexposition dominierenden Nuklids

Die Strahlenexpositionsbeiträge für die Exfiltrationsgebiete (Tab. 5.29) zeigen, wie für die kombinierte Variante, dass das Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚verstütztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ durch Pu-239, Pu-240 und (nun sekundär) Am-241 bedingt wird, und dass Pu-239 die Maxima in den beiden anderen Exfiltrationsgebieten dominiert. Tab. 5.30 zeigt daher für den Rechenfall RX.13 die Herkunft des Pu-239 zur Zeit des Beitragsmaximums zur Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete.

Für das Exfiltrationsgebiet ‚verstütztes Deckgebirge – Ammerbeek‘ sind die Beiträge von LAW1A, LAW1B und LAW4 gegenüber der kombinierten Variante RX.5 deutlich höher (mit 40 %, 160 % bzw. 100 %), die Beiträge von LAW2 und LAW3 jedoch kaum verändert. Damit stammt hier das Pu-239, wie für die kombinierte Variante, wieder zu etwa der Hälfte aus LAW1A, ist jedoch der Anteil von LAW1B auf 30 % erhöht, und sind die Anteile von LAW3 und LAW2 auf 16 % bzw. 10 % abgenommen.

Für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ sind die Beiträge von LAW1A, LAW1B und LAW4 gegenüber der kombinierten Variante RX.5 deutlich höher (mit 25 %, 120 % bzw. 50 %), der Beitrag von LAW2 kaum verändert, und der Beitrag von LAW3 deutlich niedriger (mit 35 %). Damit stammt das Pu-239 nun zu etwa 33 % aus LAW1B, zu je etwa 25 % aus LAW1A, LAW2, und zu etwa 15 % aus LAW3.

In Bezug auf das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ ist der etwa 20 % höhere Pu-239-Beitrag aus LAW1B hervorzuheben.

Tab. 5.30 ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Am-241, Pu-239 bzw. Ra-226 für die Exfiltrationsgebiete (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)

RX.13 DR13 – Pu-239	vD-Amm bei 2 400 a		m-Amm bei 10 500 a		m-Witt bei 25 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
Aus LAW1A	8,3·10⁻⁷	43 %	2,1·10⁻⁶	27 %	6,8·10⁻⁶	17 %
Aus LAW1B	5,8·10⁻⁷	30 %	2,5·10⁻⁶	32 %	1,3·10⁻⁵	33 %
Aus LAW1B-VBA	6,6·10 ⁻⁹	-	2,8·10 ⁻⁸	-	1,5·10 ⁻⁷	-
Aus LAW2	1,9·10 ⁻⁷	10 %	1,7·10⁻⁶	22 %	1,3·10⁻⁵	32 %
Aus LAW2-VBA	8,5·10 ⁻¹¹	-	7,7·10 ⁻¹⁰	-	5,9·10 ⁻⁹	-
Aus LAW3	9,7·10 ⁻⁸	5 %	3,1·10 ⁻⁷	4 %	1,2·10 ⁻⁶	3 %
Aus LAW3-VBA	2,1·10 ⁻⁷	11 %	1,0·10 ⁻⁶	13 %	5,9·10⁻⁶	14 %
Aus LAW4	5,5·10 ⁻⁹	-	6,9·10 ⁻⁸	1 %	4,4·10 ⁻⁷	1 %
Aus LAW4-VBA	4,0·10 ⁻¹⁰	-	7,7·10 ⁻⁹	-	6,2·10 ⁻⁸	-
Summe	1,9·10 ⁻⁶	100 %	7,7·10 ⁻⁶	100 %	4,1·10 ⁻⁵	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

5.6.4 Schlussfolgerungen zum Einfluss der Gasbildung bei maximaler CO₂-Bildung

In diesem Kapitel wurden die relevanten Ergebnisse des Rechenfalls RX.13 dargestellt und jenen der kombinierten Variante RX.5 gegenübergestellt. Der Rechenfall RX.13 unterscheidet sich von der kombinierten Variante lediglich betreffend der unterstellten, viel höheren, wenig realitätsnahen Gasbildung in den Einlagerungsbereichen (vgl. Kap. 5.6.1).

Die Ergebnisse des Rechenfalls RX.13 führen zu den nachfolgenden Schlussfolgerungen:

- Die stärkere Gasbildung hat Einflüsse auf die Ausbildung von Gaspolstern, auf die Verdrängung von Lösung und Lösungsinhaltsstoffen durch Gasspeicherung und auf den gleichzeitigen Transport von Gas und Lösung im Grubengebäude und im Deckgebirge. In LAW1B kommt es zu einer schnelleren und größeren Ausbildung eines Gaspolsters und bis zu dessen Abbau nach 50 Jahren zu einer Strömungsumkehr von Lösung zwischen den ELB LAW1A und LAW1B: Lösung wird dominant aus LAW1A über die Schweben und Rolllöcher in den LAW1B gepresst, aus dem in diesem Zeitraum keine Lösung (und damit Tracer) abfließt (vgl. Kap. 5.6.2.3). In der Folge gelangen in diesem Zeitraum weniger Lösungsinhaltsstoffe in das Baufeld in der Südflanke und in das Deckgebirge. Diese Minderung ist auch längerfristig noch nachweisbar: So werden die Freisetzung der Tracer aus den beiden ELB im Deckgebirge um ca. 1 500 Jahre verzögert und deren Maxima um 20 % bis 30 % reduziert (vgl. Kap. 5.6.2.5).

- Die Einflüsse der höheren Gasbildung in den anderen ELB (LAW2, LAW3 und LAW4) sind trotz merklichen Änderungen der Gasspeicher in den ELB selbst und einer damit verbundenen erhöhten Freisetzung von Tracern während der Gasspeicherung insgesamt gering und tendenziell positiv (vgl. Kap. 5.6.2.4 und 5.6.2.5).
- Die abweichenden Lösungsvolumina und -ströme führen lediglich in LAW1A und LAW1B zu relevanten Änderungen in den Konzentrationsentwicklungen potenziell Strahlenexpositions-relevanter Elemente (vgl. Kap. 5.6.3.1). In LAW1A sind die Konzentrationen von Plutonium, Americium und Neptunium bis etwa 100 Jahre bis etwa den Faktor 2 höher, die Konzentration von Radium bis 50 % geringer; In LAW1B ist die Konzentration von Radium bis 50 % höher. Diese Änderungen wirken sich in diesen Einlagerungsbereichen jedoch nicht auf die Länge der Perioden aus, während denen maximal mögliche Elementkonzentrationen erreicht werden.
- Die während der Auffüllung der Gasspeicher abweichenden Elementkonzentrationen und Lösungsströme in LAW1A und LAW1B bewirken in dieser Periode ebenfalls vor allem größere Radionuklidströme aus diesen Einlagerungsbereichen (vgl. Kap. 5.6.3.2)²⁸. Nachdem in beiden Rechenfällen die Gasspeicher vollständig gefüllt sind, verschwinden die Unterschiede weitgehend.
- Das geänderte Freisetzungsregime zeigt sich in den Radionuklidkonzentrationen im Baufeld in der Südflanke vor allem als mit der Zeit verringernde Beschleunigung der Anstiege (vgl. Kap. 5.6.3.3). Mit Ausnahme der Entwicklung der Am-241-Konzentrationen, die generell etwas niedriger bleiben), sind die Unterschiede – abhängig der Teufenlage – nach etwa 100 (700 m) bis 2 000 Jahren (500 m) weitgehend verschwunden.
- Die geänderten Konzentrationsentwicklungen im Baufeld in der Südflanke wirken sich als leicht beschleunigte – d.h. leicht höhere – und nach etwa 2000 Jahren abgeklungen Unterschiede in der Radionuklidfreisetzung aus der Grube aus (vgl. Kap. 5.6.3.4).
- Die leicht beschleunigte Radionuklidfreisetzung in das Deckgebirge wirkt sich letztendlich als eine über Zeit abklingende Erhöhung der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete aus (vgl. Kap. 5.6.3.5). Das frühe Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ bei etwa 2 200 Jahren ist mit $6,5 \cdot 10^{-6}$ Sv/a etwa 30 % höher, das Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ bei etwa 10 000 Jahren ist mit $1,3 \cdot 10^{-5}$ Sv/a noch etwa 15 % höher, während das globale Maximum für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ bei etwa 23 000 Jahren mit $5,3 \cdot 10^{-5}$ Sv/a nur noch etwa 5 % höher ist. Diese Erhöhungen sind vor allem einem höheren Beitrag von LAW1B, sowie in geringerem Maße von LAW1A, zuzuordnen (vgl. Kap. 5.6.3.6).

²⁸ Das im Kap. 5.6.2.1 ausgewiesene Gaspolster im Einlagerungsbereich LAW1B über ca. 50 Jahre unterbindet in diesem Zeitraum die Radionuklidfreisetzung über die desintegrierte Zone im Firstbereich der LAW1B zum Baufeld in der Südflanke. Da dieser Prozess in den Berechnungen zum Radionuklidtransport nicht berücksichtigt wird, ist der hier ausgewiesene frühe Beitrag der Radionuklide aus LAW1B eine Überschätzung.

5.7 Variation der Radionuklid-Quellterme

5.7.1 Beschreibung und Definition

Die Einlagerungsbereich-spezifischen maximal möglichen Elementkonzentrationen (siehe Kap. 5.3.2) sind mit einer gewissen Bandbreite versehen. Wie der Vergleich zwischen dem Rechenfall RX.4 und dem Vergleichsfall RX.1 schon deutlich gemacht hat, ist die maximal mögliche Plutoniumkonzentration in den Einlagerungsbereichen einer der bezüglich der maximalen Strahlenexposition höchst sensitiven Parameter. Aus diesem Grund ist im Rechenfall RX.9 die Auswirkung der Unsicherheitsbandbreite (siehe Tab. 5.31, Auszug aus Tab. 5.5) der maximal möglichen Elementkonzentrationen untersucht worden.

Tab. 5.31 Bandbreite der maximal möglichen Elementkonzentrationen in den LAW-Einlagerungsbereichen nach [ALSA-C 2005b]. (Erläuterungen im Text)

	Bandbreite der maximal möglichen Elementkonzentration in mol/l _{Lsg}									
	LAW1A		LAW1B		LAW2		LAW3		LAW4	
	uB	oB	uB	oB	uB	oB	uB	oB	uB	oB
Am	3,4·10 ⁻⁶	3,4·10 ⁻⁴	5·10 ⁻⁹	5·10 ⁻⁷	5,0·10 ⁻⁹	5,0·10 ⁻⁷	7,8·10 ⁻⁸	7,8·10 ⁻⁶	6,0·10 ⁻⁹	6,0·10 ⁻⁷
Np	7,0·10 ⁻²	7,0	1,0·10 ⁻⁴	1,0·10 ⁻²	9,4·10 ⁻⁵ 3,2·10 ⁻³	9,4·10 ⁻³ 3,2·10 ⁻¹	5,0·10 ⁻⁵ 2,5·10 ⁻⁴	5,0·10 ⁻³ 2,5·10 ⁻²	3,0·10 ⁻⁵	3,0·10 ⁻³
Pu	3,0·10 ⁻⁶	3,0·10 ⁻⁴	5,0·10 ⁻⁹	5,0·10 ⁻⁷	5,0·10 ⁻⁹	5,0·10 ⁻⁷	3,0·10 ⁻⁹ 8,5·10 ⁻⁹	3,0·10 ⁻⁷ 8,5·10 ⁻⁷	1,0·10 ⁻⁹	1,0·10 ⁻⁷
Ra	5,0·10 ⁻⁷	5,0·10 ⁻⁵	2,0·10 ⁻⁷	2,0·10 ⁻⁵	1,5·10 ⁻⁵ 5,2·10 ⁻³	1,5·10 ⁻³ 5,2·10 ⁻¹	1,6·10 ⁻⁴ 1,5·10 ⁻²	1,6·10 ⁻² 1,5	5,0·10 ⁻⁷	5,0·10 ⁻⁵
Th	5,0·10 ⁻⁸	5,0·10 ⁻⁶	5,0·10 ⁻⁸	5,0·10 ⁻⁶	5,0·10 ⁻⁸	5,0·10 ⁻⁶	7,7·10 ⁻⁶	7,8·10 ⁻⁵	5,0·10 ⁻⁸	5,0·10 ⁻⁶
U	4,0·10 ⁻⁷	4,0·10 ⁻⁶	4,0·10 ⁻⁷	4,0·10 ⁻⁶	4,0·10 ⁻⁷	4,0·10 ⁻⁶	4,0·10 ⁻⁷	4,0·10 ⁻⁶	4,0·10 ⁻⁷	4,0·10 ⁻⁶

uB = untere Bandbreite, oB = obere Bandbreite

Wenn in Tab. 5.31 zwei Werte angegeben sind, entspricht der obere Wert – wie in Tab. 5.5 – der maximal möglichen Konzentration vor dem Milieuwechsel (für LAW2 nach 3 000 Jahren, für LAW3 nach 30 000 Jahren), der untere Wert der maximal möglichen Konzentration nach dem Milieuwechsel. Im Allgemeinen sind die Werte der unteren Bandbreite um den Faktor 10 niedriger, jene der oberen Bandbreite um den Faktor 10 größer als die Referenzwerte in Tab. 5.5. Ausnahmen bilden die Werte für Uran, für das die obere Bandbreite und die Referenzwerte gleich sind, sowie für Thorium in LAW3, für das die obere Bandbreite den Referenzwert kaum übersteigt.

Zur Untersuchung des Einflusses der Unsicherheit in Bezug auf die maximal möglichen Elementkonzentrationen wurden im Rechenfall RX.9 zwei LOPOS-Rechengänge durchgeführt. In diesen beiden Rechengängen wurden alle Parameter, einschließlich Gasspeicher und Gastransportpfade, gleich wie in der kombinierten Variante RX.5 angesetzt, außer die maximal möglichen Elementkonzentrationen, welche einmal alle an der oberen Bandbreite, und einmal alle an der unteren Bandbreite angesetzt wurden.

5.7.2 Modellergebnisse LOPOS (RX.9-oB)

Im Rechengang RX.9-oB sind alle maximal möglichen Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen auf ihre Maximalwerte gestellt. Sonst gibt es gegenüber der kombinierten Variante RX.5 keine veränderten Bedingungen.

5.7.2.1 Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen

Die gegenüber der kombinierten Variante höher angesetzten maximal möglichen Elementkonzentrationen wirken sich lediglich aus auf die Elementkonzentrationen von:

- Plutonium: etwa 1,5 bis 2-mal höher in LAW1A, LAW1B und LAW2, sowie 10-mal in LAW3 und LAW4;
- Thorium: 10-mal höher in allen Einlagerungsbereichen außer LAW3, wo diese unverändert ist;
- Americium: lediglich in LAW4 bis maximal etwa 3,5-mal höher.

In Tab. 5.32 sind für den Rechengang RX.9-oB die Zeitpunkte des Erreichens und ggf. wieder Unterschreitens der maximal möglichen Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen aufgelistet. In dieser Tabelle sind die Änderungen gegenüber der kombinierten Variante RX.5 fett hervorgehoben. Wegen der gegenüber der kombinierten Variante RX.5 erhöhten Werte der maximal möglichen Elementkonzentrationen wird diese Konzentration in LAW1B und LAW2 für Plutonium und in LAW4 für Americium nun nicht mehr erreicht, bzw. in LAW3 für Plutonium nun später erreicht und früher wieder unterschritten.

Tab. 5.32 Erreichen und Unterschreiten der maximal möglichen Konzentrationen [a]

RX.9-oB ELB	U		Pu		Th		Np		Am	
	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis
LAW1A	0,0	> 10 ⁵			0,1	> 10 ⁵				
LAW1B	0,0	> 10 ⁵	-	-	0,0	> 10 ⁵				
LAW2	0,0	> 10 ⁵	-	-	0,0	> 10 ⁵				
LAW3-O	0,4	> 10 ⁵	8,7	43 700	1,3	> 10 ⁵				
LAW3-W	0,1	> 10 ⁵	8,7	43 700	0,2	> 10 ⁵				
LAW4-O	0,0	> 10 ⁵	0,4	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵			-	-
LAW4-W	0,0	> 10 ⁵	0,4	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵			-	-

Änderungen gegenüber der kombinierten Variante RX.5 sind fett hervorgehoben

5.7.2.2 Radionuklidkonzentrationen im Baufeld in der Südflanke

Da die Lösungsströme im Umfeld der Einlagerungsbereiche unverändert sind, bewirken die höheren Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen gleichviel höhere Radionuklidströme aus den Einlagerungsbereichen. Die Konzentrationsentwicklungen von Americium und Radium haben sich kaum bzw. nicht geändert, sodass dies sich insbesondere auf die Strahlenexpositions-relevanten Radionuklide Pu-239 und Pu-240 bezieht. Da diese Ströme nur um die gleichen Faktoren größer sind als die Plutoniumkonzentration in den jeweiligen Einlagerungsbereichen, wird hier auf die Darstellung des Vergleichs dieser Ströme mit jenen der kombinierten Variante RX.5 verzichtet.

Im Rechengang RX.9-oB sind die Konzentrationsentwicklungen von Am-241 und Ra-226 im Baufeld in der Südflanke gegenüber der kombinierten Variante RX.5 kaum verändert. Der im LAW4 höhere Americiumkonzentration zeigt sich erst ab etwa 1 000 Jahre als gering höhere Am-241-Konzentrationen im Oststrang des Baufeldes in der Südflanke. Zu späten Zeiten sind die Ra-226-Konzentrationen leicht höher, was den höheren Konzentrationen dessen Mutternukliden U-234 und Th-230 in den Einlagerungsbereichen zuzuordnen ist.

In Abb. 5.103 und Abb. 5.104 sind die Pu-239-Konzentrationen in ausgewählten Segmenten des Baufeldes in der Südflanke dargestellt. Der beschleunigte Anstieg sowie auch die im Maximum im Oststrang um etwa den Faktor 3 höheren Pu-239-Konzentrationen sind den höheren Plutoniumkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen zuzuordnen.

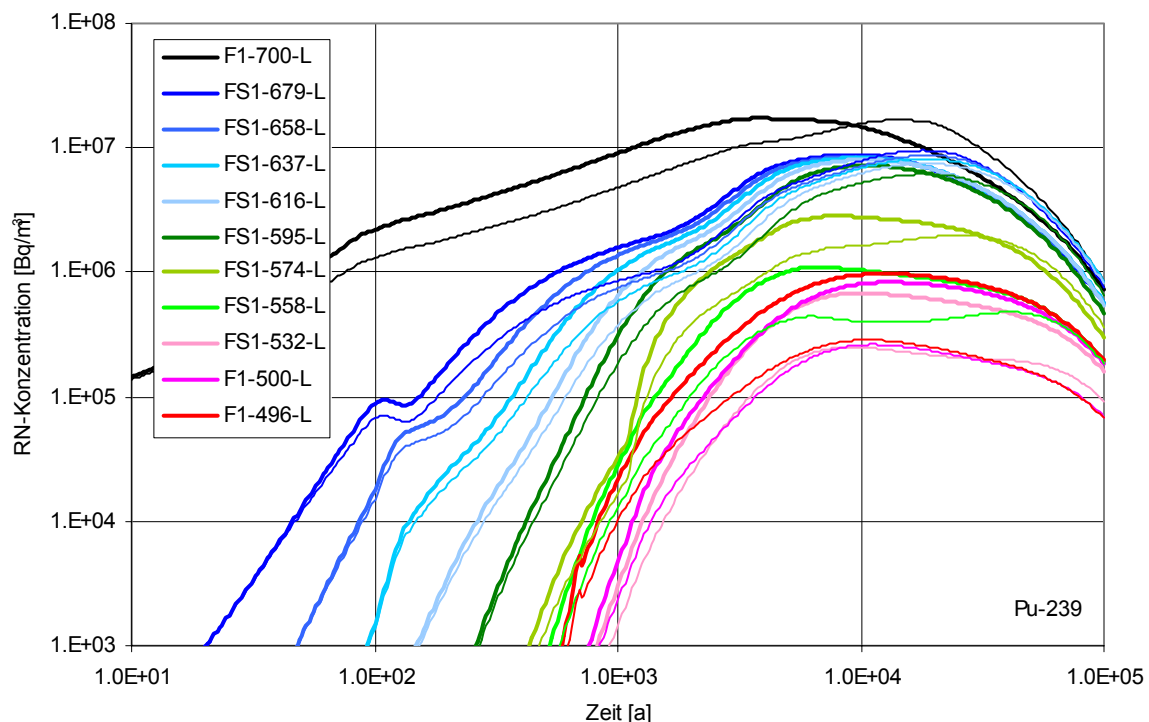


Abb. 5.103 Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (RX.9-oB vs. kombinierte Variante RX.5, dünn)

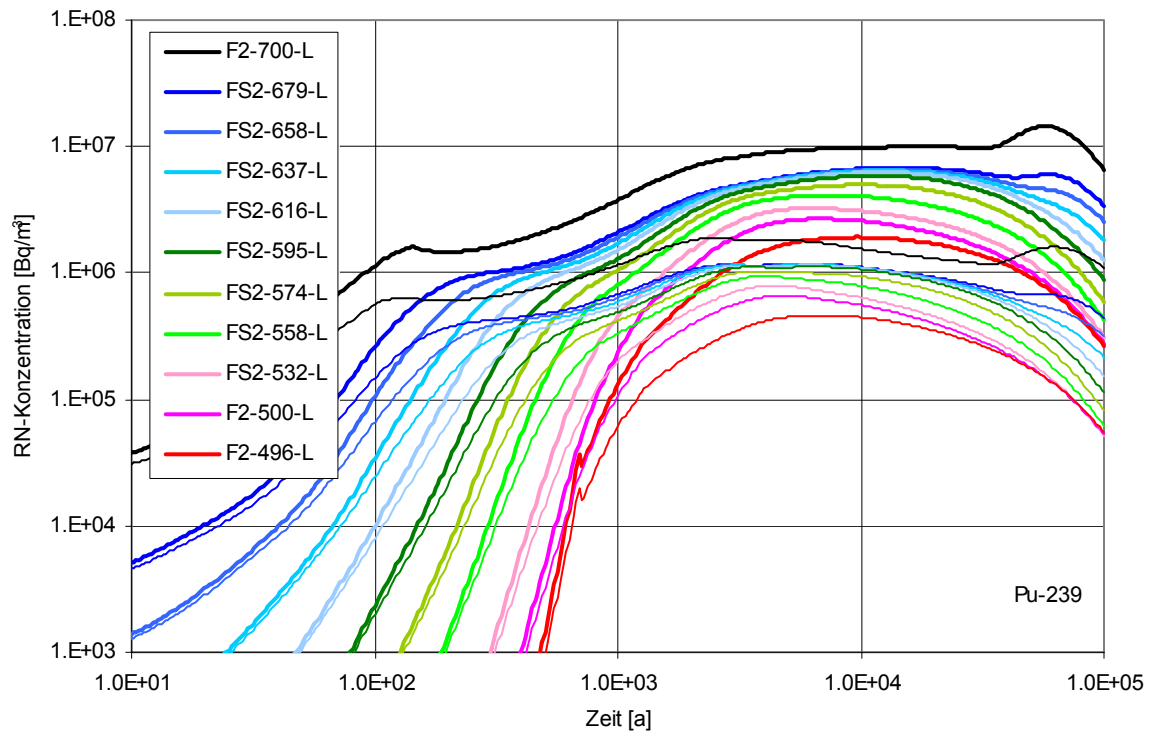


Abb. 5.104 Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (RX.9-oB vs. kombinierte Variante RX.5, dünn)

5.7.2.3 Radionuklidfreisetzung aus der Grube

Abb. 5.105 zeigt für den Rechengang RX.9-oB – fette Linien – die Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube, welche der Abbildung des Transports im Deckgebirge zu den Exfiltrationsgebieten über die Transferfunktionen zu Grunde gelegt werden. Diese Austritte sind jenen für die kombinierte Variante RX.5 – dünne Linien – gegenübergestellt. Im Einklang mit den in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Änderungen der Element- und Radionuklidkonzentrationen zeigen sich vor allem Änderungen für die Plutonium- und Thoriumisotope.

5.7.2.4 Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete

Abb. 5.106 zeigt für den Rechengang RX.9-oB – fette Linien – einen Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die drei Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells. Diese Entwicklungen sind ab etwa 1 000 Jahre gegenüber jenen der kombinierten Variante – dünne Linien – deutlich höher. Die maximale relative Erhöhung, um etwa den Faktor 2,5, wird zwischen 5 000 und 30 000 Jahren erreicht, bei 100 000 Jahren beträgt der Unterschied noch etwa einen Faktor 2. Tab. 5.33 gibt einen Überblick der Änderungen gegenüber der kombinierten Variante.

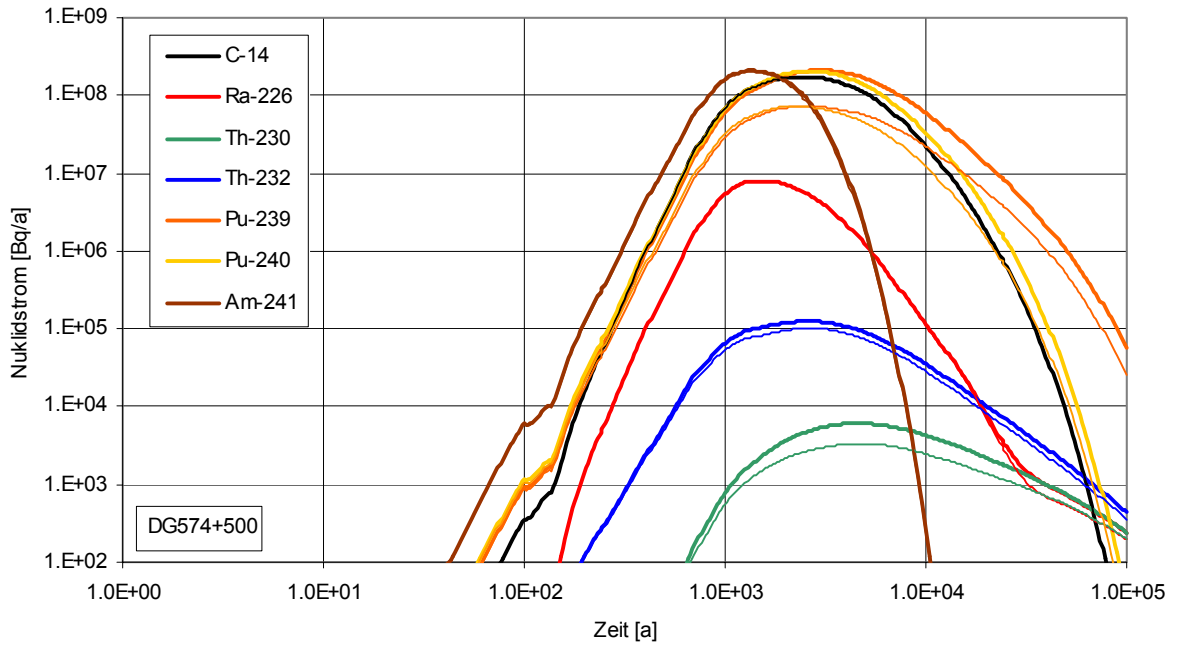


Abb. 5.105 Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube (RX.9-oB vs. kombinierte Variante RX.5, dünn)

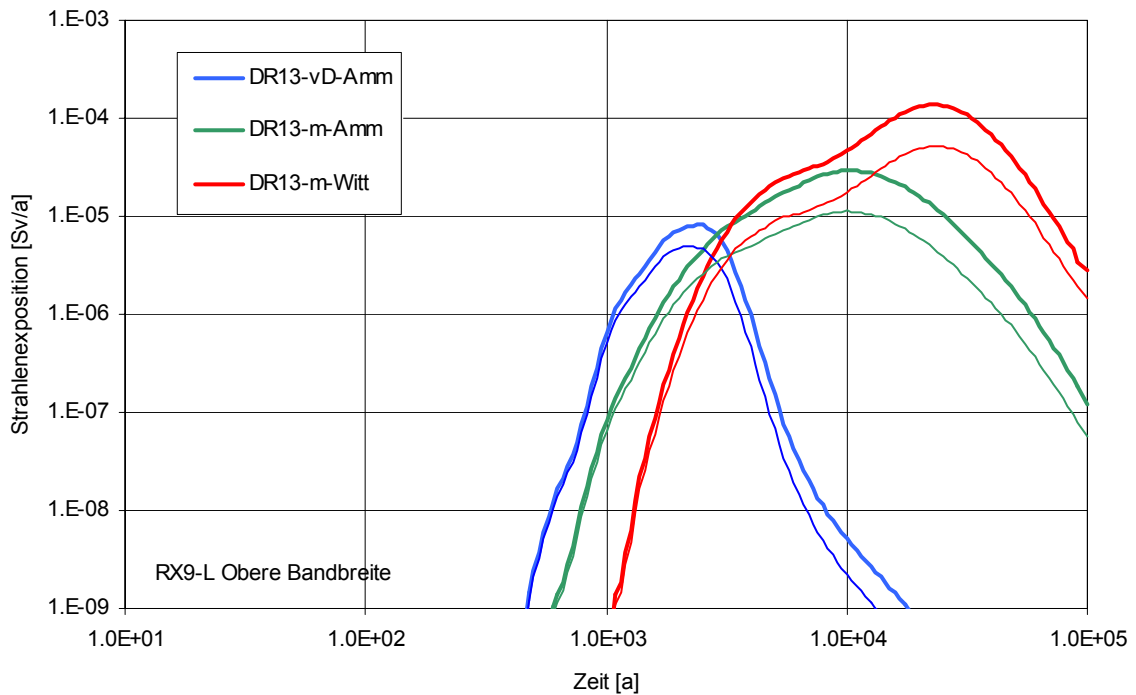


Abb. 5.106 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (RX.9-oB vs. kombinierte Variante RX.5, dünn)

Tab. 5.33 Größen und Zeitpunkte der Strahlenexpositionsmaxima für den Rechengang RX.9-oB im Vergleich zur kombinierten Variante

DR13	Maximum der potenziellen Strahlenexposition [Sv/a]		Zeitpunkt des Maximums der Strahlenexposition [a]		Veränderung der Strahlenexposition im Maximum gegenüber der kombinierten Variante
	Variante RX.9-oB	kombinierte Variante	Variante RX.9-oB	kombinierte Variante	
vD-Amm	$8,1 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	2 400	2 200	1,65-mal größer
m-Amm	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	10 000	10 000	2,65-mal größer
m-Witt	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	23 000	23 000	2,65-mal größer

Im Einklang mit den Änderungen in der Radionuklidfreisetzung (vgl. Abb. 5.105) sind die Zunahmen der Strahlenexpositionsmaxima im Rechengang RX.9-oB fast ausschließlich den um etwa den Faktor 2,5 höheren Beiträgen der Plutoniumisotope zuzuordnen. Die Beiträge der übrigen Radionuklide sind weitgehend unverändert. Erst zu späten Zeiten ist der dann vernachlässigbar geringe Beitrag von Ra-226/Pb-210 (im Zerfallsgleichgewicht um etwa den Faktor 1,5 höher. Hierdurch erhöht sich die Dominanz der Plutoniumisotope zur Zeit der jeweiligen Strahlenexpositionsmaxima weiter (72 % in vD-Amm, 97 % in m-Amm und m-Witt).

5.7.2.5 Herkunft des die Strahlenexposition dominierenden Nuklids

Für Ra-226 und Am-241 hat sich – abgesehen von einer leichten, dem LAW4 zuzuordnenden Erhöhung auf vernachlässigbar geringem Niveau ab 15 000 Jahre – im Rechengang RX.9-oB gegenüber der kombinierten Variante RX.5 wenig geändert. Deshalb stammt, wie zuvor, der Beitrag von Am-241 im Maximum vor allem aus den VBA-Gebinden im Einlagerungsbereich LAW3, und sekundär aus LAW1A und den Blechfässern in LAW3. Im Maximum stammt der Beitrag von Ra-226 unverändert fast völlig aus LAW1A.

In Tab. 5.34 ist die Herkunft des Pu-239 zur Zeit der Beitragsmaxima für die Exfiltrationsgebiete zusammengetragen:

- Der Beitrag von Pu-239 am Maximum der Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ stammt nun zu mehr als der Hälfte aus LAW3, und der Beitrag aus LAW1A bedingt nur noch 20 %. Weiterhin spielen auch die fast gleichgroßen Beiträge aus LAW1B und LAW2 noch eine gewisse Rolle.
- Das Pu-239 stammt zur Zeit des Maximums für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ zu mehr als der Hälfte aus LAW3, sekundär etwa gleichviel aus LAW2, LAW1B und LAW1A.

- Im Rechengang RX.9-oB stammt das zur Zeit des Maximums für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ die Strahlenexposition dominierende Pu-239 zu mehr als der Hälfte aus LAW3 und sekundär etwa gleichviel aus LAW2 und LAW1B.

Tab. 5.34 ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Pu-239 für die Exfiltrationsgebiete (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)

RX.9-oB DR13 – Pu-239	vD-Amm bei 2 500 a		m-Amm bei 11 500 a		m-Witt bei 25 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
Aus LAW1A	$6,1 \cdot 10^{-7}$	20 %	$1,9 \cdot 10^{-6}$	10 %	$7,3 \cdot 10^{-6}$	7 %
Aus LAW1B	$3,7 \cdot 10^{-7}$	12 %	$2,6 \cdot 10^{-6}$	14 %	$1,6 \cdot 10^{-5}$	15 %
Aus LAW1B-VBA	$4,1 \cdot 10^{-9}$	-	$2,9 \cdot 10^{-8}$	-	$1,9 \cdot 10^{-7}$	-
Aus LAW2	$3,3 \cdot 10^{-7}$	11 %	$2,9 \cdot 10^{-6}$	16 %	$2,0 \cdot 10^{-5}$	18 %
Aus LAW2-VBA	$1,5 \cdot 10^{-10}$	-	$1,3 \cdot 10^{-9}$	-	$9,0 \cdot 10^{-9}$	-
Aus LAW3	$3,2 \cdot 10^{-7}$	11 %	$1,3 \cdot 10^{-6}$	7 %	$6,3 \cdot 10^{-6}$	6 %
Aus LAW3-VBA	$1,4 \cdot 10^{-6}$	46 %	$8,9 \cdot 10^{-6}$	48 %	$5,5 \cdot 10^{-5}$	50 %
Aus LAW4	$2,5 \cdot 10^{-8}$	1 %	$5,9 \cdot 10^{-7}$	3 %	$4,3 \cdot 10^{-6}$	4 %
Aus LAW4-VBA	$2,5 \cdot 10^{-9}$	-	$1,1 \cdot 10^{-7}$	1 %	$9,5 \cdot 10^{-7}$	1 %
Summe	$3,1 \cdot 10^{-6}$	100 %	$1,8 \cdot 10^{-5}$	100 %	$1,1 \cdot 10^{-4}$	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

5.7.3 Modellergebnisse LOPOS (RX.9-uB)

Im Rechengang RX.9-uB sind alle maximal möglichen Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen auf ihre Minimalwerte gestellt. Sonst gibt es gegenüber der kombinierten Variante RX.5 keine veränderten Bedingungen.

5.7.3.1 Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen

Die gegenüber der kombinierten Variante niedriger angesetzten maximal möglichen Elementkonzentrationen wirken sich lediglich aus auf die Elementkonzentrationen von:

- Plutonium: 10-mal niedriger in LAW1B, LAW2, LAW3 und LAW4, sowie bis etwa 2-mal niedriger in LAW1A;
- Thorium: 10-mal niedriger in allen Einlagerungsbereichen;
- Uran: 10-mal niedriger in allen Einlagerungsbereichen;
- Americium: 10-mal niedriger in LAW4, sowie kurzzeitig bis etwa 1,5-mal niedriger in LAW1B, LAW2 und LAW3.

Wegen der gegenüber der kombinierten Variante RX.5 niedrigeren Werte der maximal möglichen Elementkonzentrationen wird diese Konzentration für Plutonium in LAW1B, LAW2 während dem gesamten Betrachtungsbereich erreicht, und für Americium in LAW1B, LAW2 und LAW3 während einigen 100-en Jahren bzw. in LAW4 nun 1800 Jahre länger erreicht. In Tab. 5.35 sind für den Rechengang RX.9-uB die Zeitpunkte des Erreichens und ggf. wieder Unterschreitens der maximal möglichen Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen aufgelistet. In dieser Tabelle sind die Änderungen gegenüber der kombinierten Variante RX.5 fett hervorgehoben.

Tab. 5.35 Erreichen und Unterschreiten der maximal möglichen Konzentrationen [a]

RX.9-uB ELB	U		Pu		Th		Np		Am	
	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis
LAW1A	0,0	> 10 ⁵			0,0	> 10 ⁵				
LAW1B	0,0	> 10 ⁵	0,3	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵			4,3	550
LAW2	0,0	> 10 ⁵	0,4	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵			5,8	355
LAW3-O	0,4	> 10 ⁵	0,1	> 10 ⁵	1,3	> 10 ⁵			33	575
LAW3-W	0,1	> 10 ⁵	0,1	> 10 ⁵	0,2	> 10 ⁵			33	575
LAW4-O	0,0	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵			0,4	2690
LAW4-W	0,0	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵			0,4	2820

Änderungen gegenüber der kombinierten Variante RX.5 sind fett hervorgehoben

5.7.3.2 Radionuklidkonzentrationen im Baufeld in der Südflanke

Da die Lösungsströme im Umfeld der Einlagerungsbereiche unverändert sind, bewirken die niedrigeren Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen gleichviel niedrigere Radionuklidströme aus den Einlagerungsbereichen. Die Konzentrationsentwicklungen von Radium haben sich nicht geändert, sodass dies sich insbesondere auf die Strahlenexpositions-relevanten Radionuklide Am-241, Pu-239 und Pu-240 bezieht. Da diese Ströme nur um die gleichen Faktoren größer sind als die Americium- bzw. Plutoniumkonzentration in den jeweiligen Einlagerungsbereichen, wird hier auf die Darstellung des Vergleichs dieser Ströme mit jenen der kombinierten Variante RX.5 verzichtet.

Im Rechengang RX.9-uB sind die in LAW1B, LAW2 und LAW3 während einigen 100-en Jahren erreichten maximal möglichen Americiumkonzentrationen weniger als einen Faktor 2 geringer als die Americiumkonzentrationen in der kombinierten Variante RX.5. Dies wirkt sich als bis etwa 3 000 Jahre leicht geringere Am-241-Konzentrationen in beiden Strängen des Baufeldes in der Südflanke aus. Da der Americiumbeitrag aus LAW4 im Rechenfall RX.5 schon vernachlässigbar gering war, wirkt sich die im Rechengang RX.9-uB im LAW4 um den Faktor 10 niedrigere Americiumkonzentration nicht aus.

Abb. 5.107 und Abb. 5.108 zeigen für den Rechengang RX.9-uB die Radionuklidkonzentrationen für Pu-239 in ausgewählten Segmenten des Baufeldes in der Südflanke.

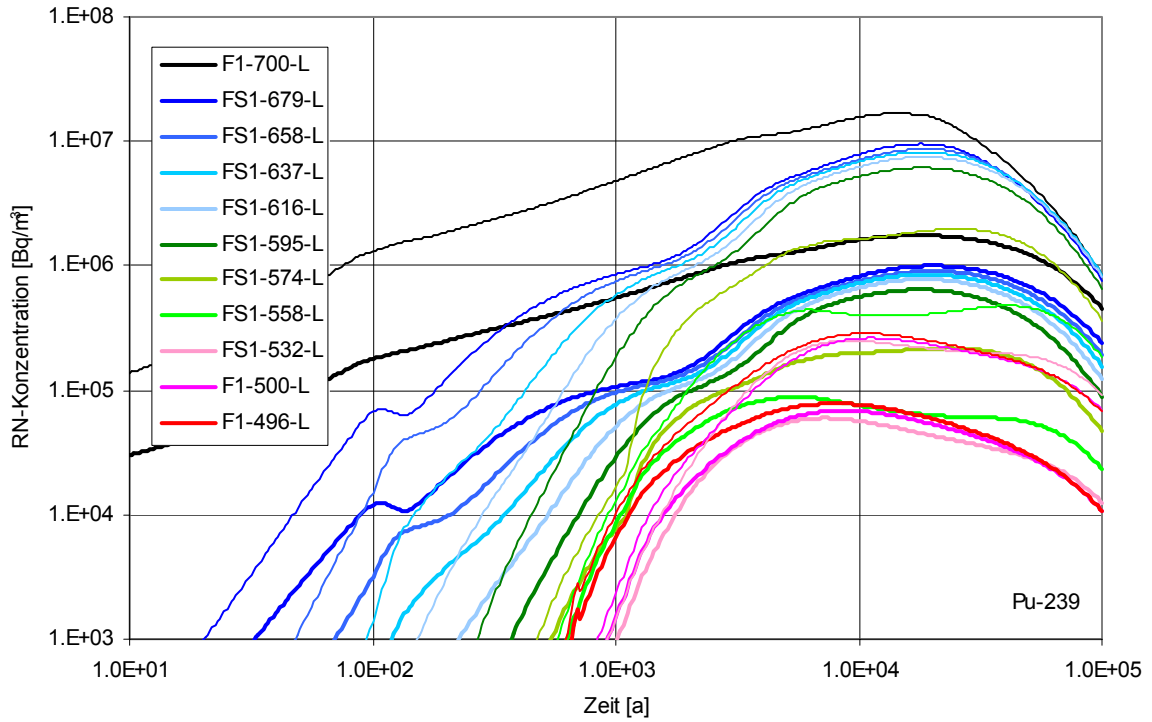


Abb. 5.107 Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, westlicher Teil (RX.9-uB vs. kombinierte Variante RX.5, dünn)

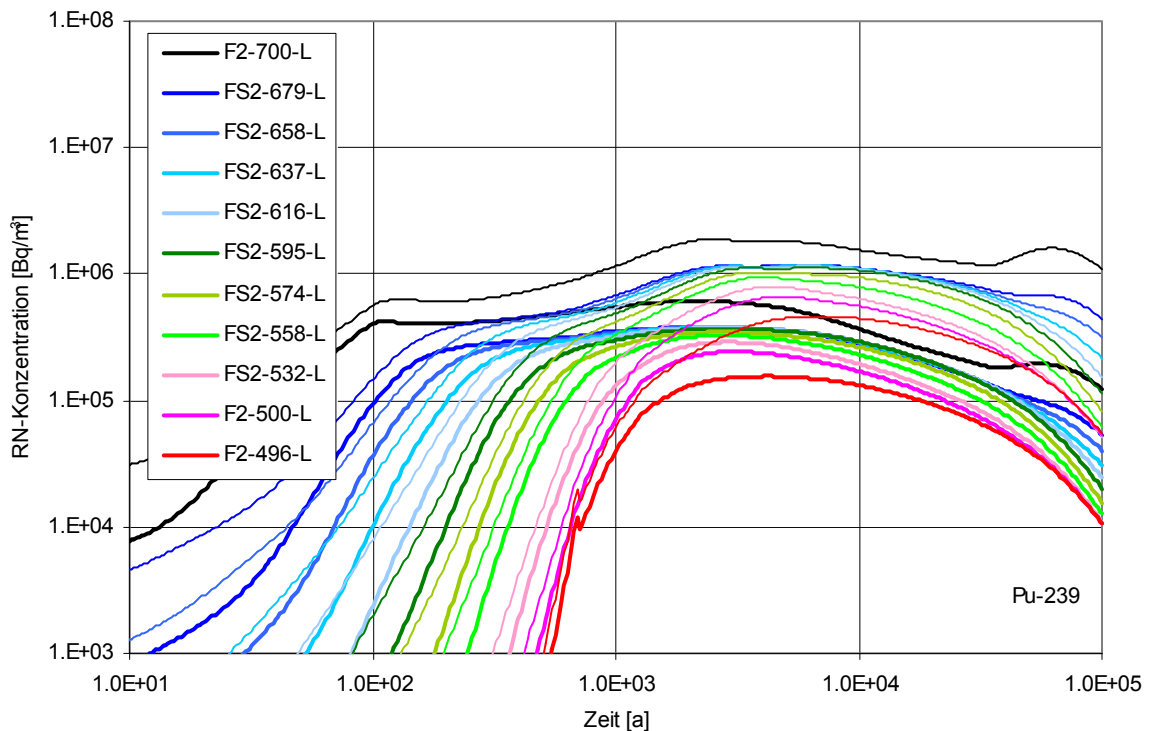


Abb. 5.108 Konzentrationen von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil (RX.9-uB vs. kombinierte Variante RX.5, dünn)

Der für Pu-239 verzögerte Anstieg sowie auch die im Maximum im Oststrang des Baufeldes in der Südflanke um etwa den Faktor 3 niedrigeren Konzentrationen sind offensichtlich vor allem den niedrigeren Plutoniumkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen zuzuordnen.

Zu späten Zeiten ($> 10\,000$ a) sind auch die Ra-226-Konzentrationen im Baufeld in der Südflanke bis eine Größenordnung niedriger, was den niedrigeren Konzentrationen dessen Mutternukliden U-234 und Th-230 in den Einlagerungsbereichen zuzuordnen ist.

5.7.3.3 Radionuklidfreisetzung aus der Grube

Abb. 5.109 zeigt für den Rechengang RX.9-uB – fette Linien – die Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube, welche der Abbildung des Transports im Deckgebirge zu den Exfiltrationsgebieten über die Transferfunktionen zu Grunde gelegt werden. Diese Austritte sind jenen für die kombinierte Variante RX.5 – dünne Linien – gegenübergestellt.

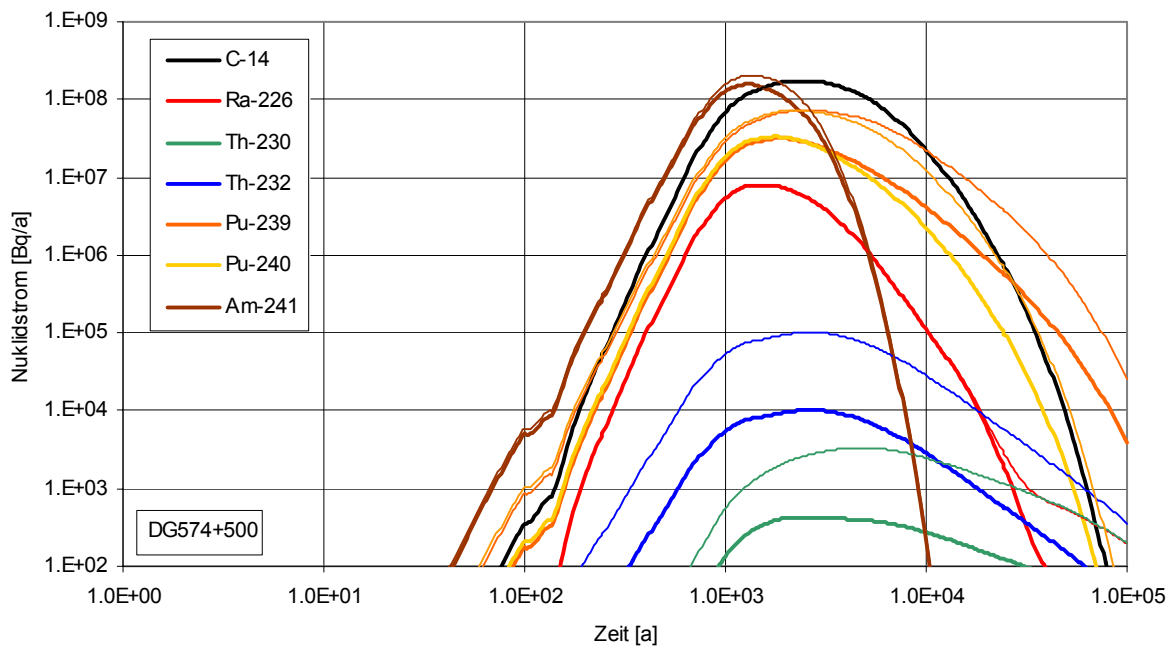


Abb. 5.109 Gesamt-Radionuklidströme aus der Grube aus der Grube (RX.9-uB vs. kombinierte Variante RX.5, dünn)

Wie aus den in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Änderungen der Element- und Radionuklidkonzentrationen zu erwarten war, zeigen sich vor allem Änderungen für die Plutonium- und Thoriumisotope sowie auch in geringerem Maße für Am-241.

5.7.3.4 Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete

Abb. 5.110 zeigt für den Rechengang RX.9-uB – fette Linien – einen Vergleich der potenziellen Strahlenexpositionsentwicklungen für die Exfiltrationsgebiete des Deckgebirgsmodells. Diese Entwicklungen sind ab etwa 1 000 Jahre gegenüber jenen der kombinierten Variante – dünne Linien – deutlich niedriger. Die maximale relative Verringerung, um etwa den Faktor 3, wird zwischen 5 000 bis 30 000 Jahren erreicht, bei 100 000 Jahren beträgt der Unterschied noch etwa einen Faktor 2. Tab. 5.36 gibt einen Überblick der Änderungen gegenüber der kombinierten Variante.

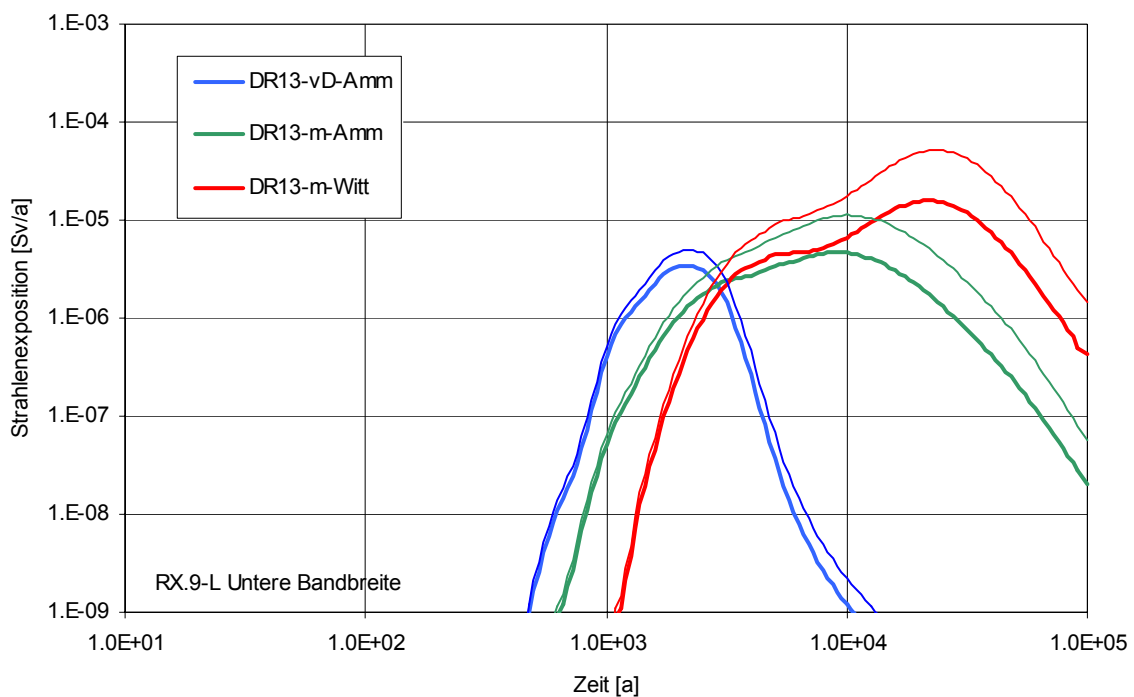


Abb. 5.110 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (RX.9-uB vs. kombinierte Variante RX.5, dünn)

Tab. 5.36 Größen und Zeitpunkte der Strahlenexpositionsmaxima für den Rechengang RX.9-uB im Vergleich zur kombinierten Variante

DR13	Maximum der potenziellen Strahlenexposition [Sv/a]		Zeitpunkt des Maximums der Strahlenexposition [a]		Veränderung der Strahlenexposition im Maximum gegenüber der kombinierten Variante
	Variante RX.9-uB	kombinierte Variante	Variante RX.9-uB	kombinierte Variante	
vD-Amm	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	2 200	2 200	1,4-mal niedriger
m-Amm	$4,7 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	9 100	10 000	2,4-mal niedriger
m-Witt	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	22 000	23 000	3,2-mal niedriger

Im Einklang mit den Änderungen in der Radionuklidfreisetzung (vgl. Abb. 5.109) sind die Abnahmen der Strahlenexpositionsmaxima im Rechengang RX.9-uB fast ausschließlich den um etwa den Faktor 2 bis 3,5 niedrigeren Beiträgen der Plutoniumisotope zuzuordnen. Die Beiträge der übrigen Radionuklide sind weitgehend unverändert. Nur ist zu früheren Zeiten der Beitrag von Am-241 etwa 25 % geringer (vD-Amm), wodurch der Beitrag von Ra-226/Pb-210 im Gleichgewicht an Gewicht zugenommen hat. Insgesamt hat hierdurch die Dominanz der Plutoniumisotope zur Zeit der jeweiligen Strahlenexpositionsmaxima leicht abgenommen (38 % in vD-Amm, 83 % in m-Amm und m-Witt).

5.7.3.5 *Herkunft des die Strahlenexposition dominierenden Nuklids*

Für Am-241 und Ra-226 hat sich – abgesehen von einer leichten, relativ gleichviel den LAW1B, LAW2 und LAW3 zuzuordnenden Verringerung ab 15 000 Jahre – im Rechengang RX.9-uB gegenüber der kombinierten Variante RX.5 wenig geändert. Wie in der kombinierten Variante stammt für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ der Beitrag von Am-241 im Maximum vor allem aus den VBA-Gebinden im Einlagerungsbereich LAW3 sowie sekundär aus LAW1A und den Blechfässern in LAW3. Im Maximum stammt der Beitrag von Ra-226 unverändert fast völlig aus LAW1A.

In Tab. 5.37 ist die Herkunft des Pu-239 zur Zeit der Beitragsmaxima für die Exfiltrationsgebiete zusammengetragen:

- Der Beitrag von Pu-239 am Maximum der Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ stammt nun zu fast 90 % aus LAW1A, und der Beitrag aus LAW3 bedingt nur noch 5 %.
- Zur Zeit des Maximums stammt Pu-239 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Ammerbeek‘ zu etwa 80 % aus LAW1A, sekundär etwa gleichviel aus LAW2, LAW1B und LAW3.
- Im Rechengang RX.9-uB stammt das zur Zeit des Maximums für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ die Strahlenexposition dominierende Pu-239 zu etwa 70 % aus LAW1A und sekundär etwa gleichviel aus LAW2 und LAW1B.

Tab. 5.37 ELB-spezifische Beiträge zum Maximum des Strahlenexpositionsbeitrags von Pu-239 für die Exfiltrationsgebiete (ohne Aufbau durch radioaktiven Zerfall)

RX.9-uB Pu-239 – DR13	vD-Amm bei 2 500 a		m-Amm bei 10 000 a		m-Witt bei 23 000 a	
	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil	Sv/a	Anteil
Aus LAW1A	6,0·10⁻⁷	88 %	1,9·10⁻⁶	79 %	7,3·10⁻⁶	69 %
Aus LAW1B	2,4·10 ⁻⁸	4 %	1,6·10 ⁻⁷	7 %	1,1·10⁻⁶	10 %
Aus LAW1B-VBA	2,7·10 ⁻¹⁰	-	1,9·10 ⁻⁹	-	1,2·10 ⁻⁸	-
Aus LAW2	2,6·10 ⁻⁸	4 %	2,0·10 ⁻⁷	8 %	1,4·10⁻⁶	13 %
Aus LAW2-VBA	1,2·10 ⁻¹¹	-	9,0·10 ⁻¹¹	-	6,4·10 ⁻¹⁰	-
Aus LAW3	6,6·10 ⁻⁹	1 %	2,2·10 ⁻⁸	1 %	9,3·10 ⁻⁸	1 %
Aus LAW3-VBA	2,5·10 ⁻⁸	4 %	1,2·10 ⁻⁷	5 %	6,4·10 ⁻⁷	6 %
Aus LAW4	2,9·10 ⁻¹⁰	-	6,6·10 ⁻⁹	-	4,9·10 ⁻⁸	-
Aus LAW4-VBA	1,0·10 ⁻¹¹	-	4,6·10 ⁻¹⁰	-	4,2·10 ⁻⁹	-
Summe	6,9·10 ⁻⁷	100 %	2,5·10 ⁻⁶	100 %	1,1·10 ⁻⁵	100 %

Die größten Beiträge sind rot, die zweitgrößten blau hervorgehoben.

5.7.4 Schlussfolgerungen für Variation der Radionuklid-Quellterme

Die Maxima der potenziellen Strahlenexposition werden für alle Exfiltrationsgebiete zu einem großen Teil durch die Plutoniumisotope bedingt. Nur für das Exfiltrationsgebiet ‚verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek‘ spielen Am-241 sowie Ra-226/Pb-210 (im Zerfallsgleichgewicht) noch eine gewisse Rolle: Da die Americium- und Radiumkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen fast immer inventarbestimmt sind, reagiert das Maximum in diesem Exfiltrationsgebiet wesentlich weniger sensitiv als in den beiden anderen.

Das globale Maximum, das für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ ermittelt wurde, wird fast völlig durch die Plutoniumisotope bestimmt. Jedoch bewirkt die zwei Größenordnungen große Bandbreite der maximal möglichen Plutoniumkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen letztendlich nur eine Bandbreite der maximalen Strahlenexposition von etwa dem Faktor 9, d.h. zwischen $1,6 \cdot 10^{-5}$ und $1,4 \cdot 10^{-4}$ Sv/a. Die wichtigsten Gründe dafür sind:

- der Fakt, dass im LAW1A, dessen maximaler Beitrag im Rechenfall RX.5 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ etwa 20% der Strahlenexposition bestimmt, die *inventarbestimmte* Plutoniumkonzentration sogar unterhalb der unteren Bandbreite der maximal möglichen Konzentration liegt, welche also nie erreicht wird, und
- der Fakt, dass in LAW1B und LAW2, deren Beiträge im Rechenfall RX.5 für das Exfiltrationsgebiet ‚Muschelkalk – Wittmar‘ insgesamt etwa 60% der Strahlenexposition im Maximum bestimmen, die *inventarbestimmten* Plutoniumkonzentrationen weniger als einen Faktor 2 oberhalb der Referenzwerte der maximal möglichen Konzentrationen

liegen, was die Auswirkung der Bandbreite der maximal möglichen Plutoniumkonzentration in diesen ELB effektiv auf den Faktor 20 beschränkt.

In Abb. 5.111 sind die Entwicklungen der potenziellen Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete für die Bandbreite der Radionuklidquellterme zusammengefasst.

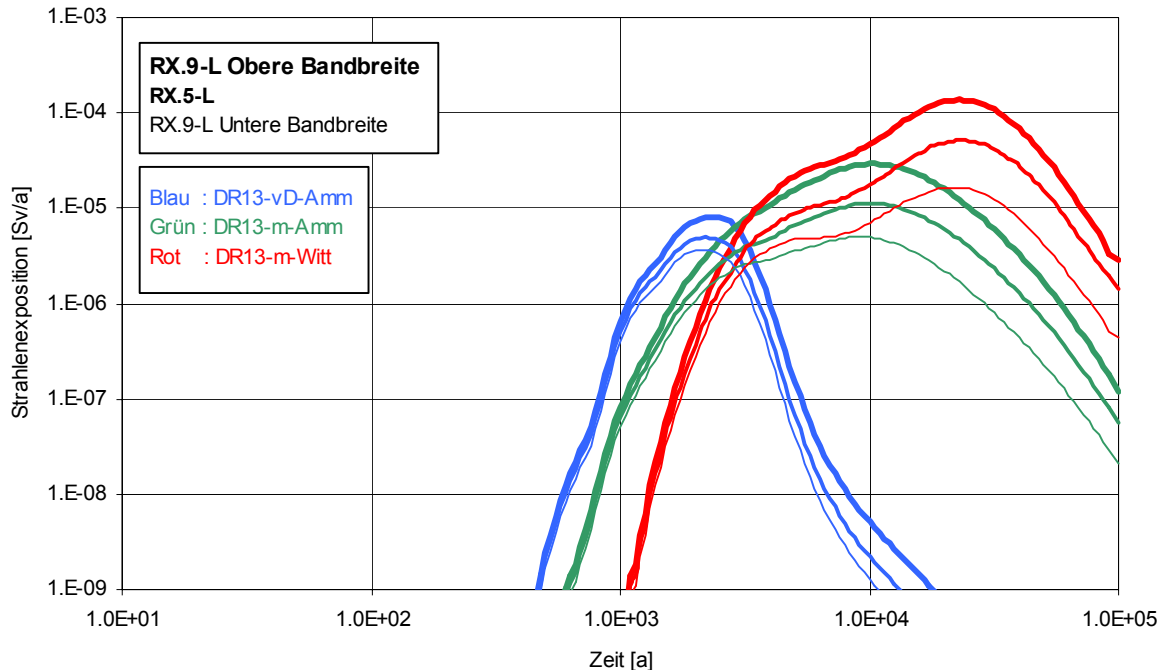


Abb. 5.111 Potenzielle Strahlenexposition für die Exfiltrationsgebiete (RX.9-oB – **fett**, kombinierte Variante RX.5 – mittel, RX.9-uB – *dünn*)

Die Variation der ELB-spezifischen Beiträge zur durch Pu-239 bedingten Strahlenexposition lässt sich fast völlig aus der Variation der Plutoniumkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen erklären. Die geringen Abweichungen lassen sich aus sekundären Effekten erklären, wie die Senke-Wirkung von Einlagerungsbereichen, in denen relativ niedrige maximal mögliche Konzentrationen bestehen, und die geringere Radionuklidmobilität in Einlagerungsbereichen, in denen die maximal möglichen Konzentrationen deutlich früher, noch während der Mobilisierung, erreicht werden.

5.8 Szenario LsgMAW

5.8.1 Beschreibung und Definition des Szenarios

Das Szenario Lösungszutritt in den Fasskegel der MAW-Kammer (*LsgMAW*) geht davon aus, dass in der Nachbetriebsphase Lösung in den Fasskegel eindringen kann (vgl. Schlussbericht 2005, Kap. 4.3). Nach speziellen Modellrechnungen mit dem 2-Phasen-Programm TOUGH2 ist dies wenig wahrscheinlich, bzw. in geringem Umfang lediglich über

Kapillareffekte nicht auszuschließen [Colenco 2006b]. Gestützt auf diese Modellrechnungen wird für die Szenariengruppe des Referenzszenarios angenommen, dass Lösung in Folge des Auffüllens des Baufeldes in der Südflanke mit Schutzfluid zwar verzögert auch in den nicht aktiv befüllten Nahbereich der MAW (in die Kammern 8a/532 und 8b/532) vordringt, durch den anhaltenden Druckanstieg in der frühen Nachbetriebsphase unter Verdrängung und Kompression verbliebener Grubenluft bis in die desintegrierte Schwebelage der Kammer 8a/532 gelangt, jedoch höchstens durch Kapillareffekte Abfälle an der Basis des MAW-Fasskegels erreicht. In der Szenariengruppe des Referenzszenarios bleiben die MAW damit im Wesentlichen trocken.

In der Szenariengruppe *LsgMAW* wird abweichend davon unterstellt, dass der Lösungspegel, d.h. der lösungsgesättigte Bereich, bis in den MAW-Fasskegel ansteigt.

Für die Modellierung des Radionuklid-Mobilisierung im MAW und des Radionuklidtransportes aus der MAW-Kammer bis in das Deckgebirge wird das Strukturmodell der Schachanlage im Bereich der MAW-Kammer verfeinert. Nachfolgend (Kap. 5.8.2) werden das dem Strukturmodell zugrunde liegende konzeptuelle Modell erläutert und im Anschluss (Kap. 5.8.3) das Strukturmodell und dessen Parametrisierung dargestellt.

Die Modellrechnungen werden einerseits für die Parametrisierung der Schnittstelle zum Deckgebirge und die Transferfunktionen wie in der kombinierten Variante RX.5 (Kap. 5.4) und andererseits auch für das konzeptuelle Modell Deckgebirge mit relativ gering-durchlässigem Röttaquitard im Deckgebirge (wie in der Variante RX.7, Kap. 5.5) durchgeführt²⁹. Die Parametrisierung der übrigen Grube beruht in beiden Fällen ansonsten auf jener der kombinierten Variante (RX.5). Modelltechnische Besonderheiten bei der Umsetzung der Varianten des Szenarios sind zusammenfassend in Kap. 5.8.4 dargestellt.

Die Rechenfälle des Szenarios *LsgMAW* tragen die Bezeichnungen RIX.1 (für das Deckgebirge wie in Variante RX.5) und RIX.2 (für das Deckgebirge wie in RX.7).

5.8.2 Konzeptuelles Modell für die Modellrechnungen zum Szenario *LsgMAW*

Für die quantitative Analyse des Alternativszenarios *LsgMAW* werden folgende Sachverhalte und Wertungen zugrunde gelegt:

- Der Übertritt von Radionukliden aus dem MAW-Fasskegel in den UMAW erfolgt – sofern er stattfindet – in den südlichen Firstbereich des Abbaus 8a/532.
- Durchhiebe mit geringem hydraulischem Widerstand vom UMAW in die Kammer 8/532 und damit in den durchströmten Teil des Baufeldes in der Südflanke koppeln im

²⁹ Die Berechnungen zum 2-Phasen-Fluss mit TOUGH2 [Colenco 2006b] hatten deutlich gemacht, dass der Druck im Grubengebäude die wesentliche, sensitive Größe für das Eindringen von Lösung in der frühen Nachbetriebsphase ist. Dieser wiederum wird entscheidend durch den Widerstand im Deckgebirge bestimmt.

Sohlenbereich am Südstoß an die Abbaue 8a/532 und 8b/532 an. Im Firstbereich existiert nur im Abbau 8b/532 ein Durchhieb, dieser wird mit einer Strömungsbarriere abgedichtet.

- Zwischen den Abbauen 8a/532 und 8b/532 bestehen zwei Durchhiebe, die beide keinen nennenswerten hydraulischen Widerstand darstellen: Im Süden verläuft einer im Sohlenbereich, im Norden im Firstbereich.
- Der dominierende Prozess für Lösungsbewegung im UMAW und aus diesem in die Kammer 8/532 ist die Konvergenz der beiden Abbaue 8a/532 und 8b/532, die Gasbildung im MAW ist von geringerer Bedeutung.
- In den Firstbereich der UMAW wurde Portlandzement eingebracht, der dort ein Absinken der Lösungsdichte verursachen wird. Die aus dem Fasskegel in den Firstbereich des Abbaus 8a/532 übertretende Lösung ist leichter als Schutzfluid und leichter oder von ähnlicher Dichte wie die Lösung im Firstbereich des Abbaus 8a/532. Dadurch kann sich die aus dem Fasskegel zutretende Lösung über der im Firstbereich vorhandenen Lösung einschichten, was deren horizontale Ausbreitung im Firstbereich beschleunigen würde. Dieser Prozess wird jedoch als nicht belastbar eingestuft und vernachlässigt.
- Wegen der Dichteschichtung im Abbau 8a/532 (und auch im Abbau 8b/532) erfolgt der Transport vom Firstbereich in den Sohlenbereich in den beiden Abbauen in erster Linie durch Diffusion. Diese Diffusion ist möglicherweise durch die Dichteschichtung zusätzlich behindert. Da diese Behinderung jedoch nicht belastbar zu quantifizieren ist, wird „normale“ Diffusion zwischen dem First- und dem Sohlenbereich unterstellt.
- Die Transportverzögerung im durchströmten Teil des Baufeldes in der Südflanke (Kammer 8/532 bis Übertrittsstelle DG500) lässt sich nicht belasten. Die horizontalen Lösungsgeschwindigkeiten auf der 532-m- und der 511-m-Sohle können nicht ausreichend verlässlich ermittelt werden. Die Kammerreihe, aus der Lösung in das Deckgebirge übertritt, ist nicht bekannt.

Als maßgeblich verzögernder Transportprozess soll jener aus dem Firstbereich des Abbaus 8a/532 (und ggf. 8b/532) in den Sohlenbereich des gleichen Abbaus abgebildet werden. Zu diesem Zweck werden die Modellkammer UMAW im bestehenden Strukturmodell unterteilt und die hydraulischen Verbindungen mit der Modellkammer F2_532 angepasst.

Dazu wird der Abbau 8a/532 in einen südlichen und einen nördlichen Teil unterteilt (vgl. Abb. 5.112). Auch der Abbau 8b/532 wird in einen südlichen und einen nördlichen Teil unterteilt. Jeder dieser vier Teile wird durch ein Sandwich „obere Modellkammer – Modellschacht in der Mitte – untere Modellkammer“ dargestellt. Die Modellkammern der südlichen Sandwiches sind durch Modellstrecken mit geringem Widerstand und großem Querschnitt mit den entsprechenden Modellkammern des zugehörigen nördlichen Teils verbunden. Die Verbindungen zwischen den Sandwiches des Abbaus 8a/532 und jenen des Abbaus 8b/532 stellen die real existierenden Durchhiebe zwischen den beiden Abbauen dar: Die oberen Modellkammern der nördlichen Sandwiches sind durch eine Modellstrecke verbunden, welche den Durchhieb zwischen 8a/532 und 8b/532 im Firstbereich darstellt.

Sandwiches ankoppeln. Die Verbindung im Firstniveau vom Nahbereich MAW sowie von der MAW-Kammer (Strahlenschutzmauer) zum Baufeld in der Südflanke werden im Detailmodell MAW abgebildet (vgl. Abb. 5.112 und Kap. 5.8.3).

Die mit Strömungsbarrieren versehenen Durchhiebe vom UMAW zu den Abbauen 7b/532 und 9a/532 werden nicht in das Modell aufgenommen. Dies wird wie folgt begründet: Sofern entlang diesen Strecken Radionuklidtransport stattfände, würde dies den direkten Transport in den durchströmten Teil des Baufeldes vermindern und der Transport über die Abbaue 7b/532 und 9a/532 wäre mit zusätzlicher Verdünnung verbunden und vermutlich langsamer.

5.8.3 Anpassung bzw. Erweiterungen des Strukturmodells

Tab. 5.38 gibt die Strukturelemente des Nahbereiches der MAW wieder. Die oben beschriebene Unterteilung der UMAW macht insgesamt 8 Kammern, 4 Schächte (die mittleren Bereiche der *Sandwiches*) und 8 Verbindungsstrecken erforderlich³⁰. Die Verbindungen auf der 511-m-Sohle (Strahlenschutzmauer) und aus der Firste der Kammer 8b/532 zum Baufeld in der Südflanke werden mit zwei Modellstrecken H_511_1 und H_8b_F³¹.

Die Modellstrecken bedürfen einer Erläuterung:

- Die Modellstrecken UMAW-S1 bis UMAW-S4 sind keine realen Strecken. Sie verbinden jeweils den Nord- und den Südteil innerhalb der beiden Sandwich-Pakete UMAWa-... und UMAWb-... Ihre Eigenschaften (Porosität und Konvergenz) sind die der Abbaue 8a/532 und 8b/532.
- Die Modellstrecke H-UMAW-oN stellt den mit Salzgrus verfüllten Durchhieb zwischen den beiden Abbauen im nördlichen Firstbereich, die Strecke H-UMAW-uS den Durchhieb im südlichen Sohlenbereich dar.
- Die Modellstrecken A-UMAWa und A-UMAWb charakterisieren die durchlässigen Durchhiebe im Sohlenbereich zum Abbau 8/532 (Baufeld in der Südflanke).
- Die Strecke H_8b_F im südlichen Firstniveau des Abbaus 8b/532 stellt den mit einer Strömungsbarriere versehenen Durchhieb einschließlich der sie umgebenden Auflockerungszone dar. Sie ist in KAFKA als schräge Verbindung abgebildet (Anschluss an die Modellkammer F2_511 an der Basis in der Teufe 511 m), um modelltechnisch einen ggf. gleichzeitigen und gegenläufigen Transport von Lösung und Gas zu erleichtern.

³⁰ Abweichend von der hier dargestellten Struktur werden in der KAFKA-Rechnung der Variante des LsgMAW-Szenarios (RIX.-2K; Kap. 5.8.7) aus numerischen Gründen die obersten Modellsegmente der Abbaue 8a/532 und 8b/532 zusammengefasst (vgl. Anhang A.1)

³¹ Bei KAFKA sind diese beiden Modellstrecken schräg entsprechend der topografischen Anknüpfungen ausgelegt, bei LOPOS horizontal [GRS 2006b].

Tab. 5.38 Strukturelemente des Nahbereiches der MAW

Segmentbezeichnung	Typ	Höhe bzw. Länge ³² [m]	Teufe der Basis [m]	Kompaktierbares Volumen 1 [m ³]	Porosität des kompaktierbaren Volumens 1 [-]	Nicht kompaktierbares Volumen [m ³]	Porosität des nicht kompaktierbaren Volumens [-]	Anteil des residualen Gasspeichers am Porenvolumen [-]
MAW	Kammer	6,5	511			463	0,299	0,25
S-MAW	Schacht	6	517			2996	0,03	0,16
UMAWa-oS	Kammer	2	519	1721	0,3			0,1
UMAWa-mS	Schacht	11	530	8607	0,3			0,286
UMAWa-uS	Kammer	2	532	1721	0,3			0,286
UMAWa-oN	Kammer	2	519	1721	0,3			0,1
UMAWa-mN	Schacht	11	530	8607	0,3			0,286
UMAWa-uN	Kammer	2	532	1721	0,3			0,286
UMAW-S1	Strecke	1	517	100	0,3			0,1
UMAW-S2	Strecke	1	532	100	0,3			0,1
UMAWb-oS	Kammer	2	519	1486	0,37			0,1
UMAWb-mS	Schacht	11	530	7429	0,37			0,16
UMAWb-uS	Kammer	2	532	1486	0,37			0,16
UMAWb-oN	Kammer	2	519	1486	0,37			0,1
UMAWb-mN	Schacht	11	530	7429	0,37			0,16
UMAWb-uN	Kammer	2	532	1486	0,37			0,16
UMAW-S3	Strecke	1	517	100	0,37			0,16
UMAW-S4	Strecke	1	532	100	0,37			0,16
H-UMAW-oN	Strecke	9	517	225	0,33			0,1
H-UMAW-uS	Strecke	9	532	36	0,33			0,16
A-UMAWa	Strecke	12	532	192	0,33			0,16
A-UMAWb	Strecke	12	532	192	0,4			0,16
H_8b_F	Strecke	12	517			192	0,13	0,16
H_511_1	Strecke	16,9	511			313	0,04	0,16

- Die Modellstrecke H_511_1 ist eine Reihenschaltung aus:
- dem Durchhieb von 8/511 zu 8a/511 mit der Strahlenschutzmauer (SV_511_1) im südlichen Teil und

³² Bei Strecken: Länge; bei Kammern, Schächten und Schweben: Höhe

- Auflockerungszone um die Sorelbetonverfüllung (SB_511_1) im Übergangsbereich von der Strahlenschutzmauer in die Kammer 8a/511 und
- einem anschließenden Teil der Sohle mit der kürzesten Entfernung von der Sorelbetonverfüllung zum MAW-Abfall unterhalb der Sorelbetonglocke (Länge ca. 6 m, einer Breite entsprechend der anschließenden Strecke von 5 m und einer Höhe von 6 m).

Die genannten Strecken haben folgende Eigenschaften (Tab. 5.39):

Tab. 5.39 Permeabilität, Konvergenzparameter und Gaseindringdrücke der abgebildeten Modell-Strecken

Modellstrecke		Anfangspermeabilität [m ²]	Exponent der PPB [-]	scheinbarer Gaseindringdruck [kPa]
UMAW-S1		1,67·10 ⁻¹²	4,714	0
UMAW-S2		1,67·10 ⁻¹²	4,714	0
UMAW-S3		4,48·10 ⁻¹²	4,714	0
UMAW-S4		4,48·10 ⁻¹²	4,714	0
H-UMAW-oN		2,61·10 ⁻¹²	4,714	0
H-UMAW-uS		2,61·10 ⁻¹²	4,714	0
A-UMAWa		2,61·10 ⁻¹²	4,714	0
A-UMAWb		6,47·10 ⁻¹²	4,714	0
H_8b_F		1·10 ⁻¹⁵	-	100
H_511_1		8,3·10 ⁻¹⁶	-	100
letztere aus:	Länge [m]	Permeabilität [m ²]	Porosität [-]	Volumen [m ³]
SV_511_1	5	1·10 ⁻¹⁵	0,10	54
SB_511_1	6	1·10 ⁻¹⁵	0,03	81
Schwebe	5,9	1·10 ⁻¹⁵	0,03	178

Eine Beschreibung der modelltechnischen Umsetzung in KAFKA und LOPOS enthält Anhang A.

5.8.4 Beschreibung der Varianten

Die beiden Varianten RIX.1 und RIX.2 behandeln im Wesentlichen die unterschiedlichen Schnittstellen zum Deckgebirge und die Transferfunktionen: in RIX.1 wie in der kombinierten Variante RX.5 (Kap. 5.4) und in RIX.2 wie für das konzeptuelle Modell des Deckgebirges mit relativ geringdurchlässigem Röttaquitard (entsprechend der Variante RX.7, Kap. 5.5). Die Parametrisierung der Schnittstelle ist in Kap. 2.2, die Transferfunktionen für die beiden Deckgebirgsmodelle sind in Kap. 2.3 beschrieben.

Neben diesem Unterschied wird auch eine unterschiedliche Gasbildung im Abfall in der MAW-Kammer betrachtet. Da eine genaue Prognose der lokalen chemischen Milieuverhältnisse bzw. des lokal eintretenden pH-Werts nicht möglich ist, wird für die Variante RIX.1 die Gasbildung für anaerob-feuchte Verhältnisse gemäß [ISTec 2005] (Untergrenze plus 1/3 der Bandbreite zwischen Unter- und Obergrenze des Bereiches) betrachtet.

Für die Variante RIX.2 wird bezüglich der Gasbildung ein realistischerer Fall betrachtet. Ausgehend von einem Ergebnis der Variante RIX.1-K wird das Porenvolumen des Fasskegels nur zu etwa einem Viertel mit Lösung gefüllt (vgl. Kap. 5.8.5.1). Da eine vollständige Lösungsfüllung des MAW-Fasskegels als extrem unwahrscheinlich zu betrachten ist, wird hier als Obergrenze einer Lösungsfüllung unter Berücksichtigung der Kompression der initialen Grubenluft im Porenraum ein Wert von etwa 75 % des Porenraums zum Ansatz gebracht. Für die Variante RIX.2 wurde daher als mittlere Schätzung angenommen, dass für die Gasbildung ein Lösungsvolumen von 50 % des Porenvolumens, also rund 70 m^3 zur Verfügung steht. Mit diesem Lösungsvolumen können unter anaerob-feuchten Bedingungen bei Eisenkorrosion mit korrosiver Gasbildung stöchiometrisch ca. $75\,000 \text{ m}^3$ Gas gebildet werden³³. Für die Variante RIX.2 wird die von ISTec berechnete Gasbildung in der Skalierung so verändert, dass kumuliert maximal $75\,000 \text{ m}_{\text{STP}}^3$ Gas gebildet werden (Abb. 5.113).

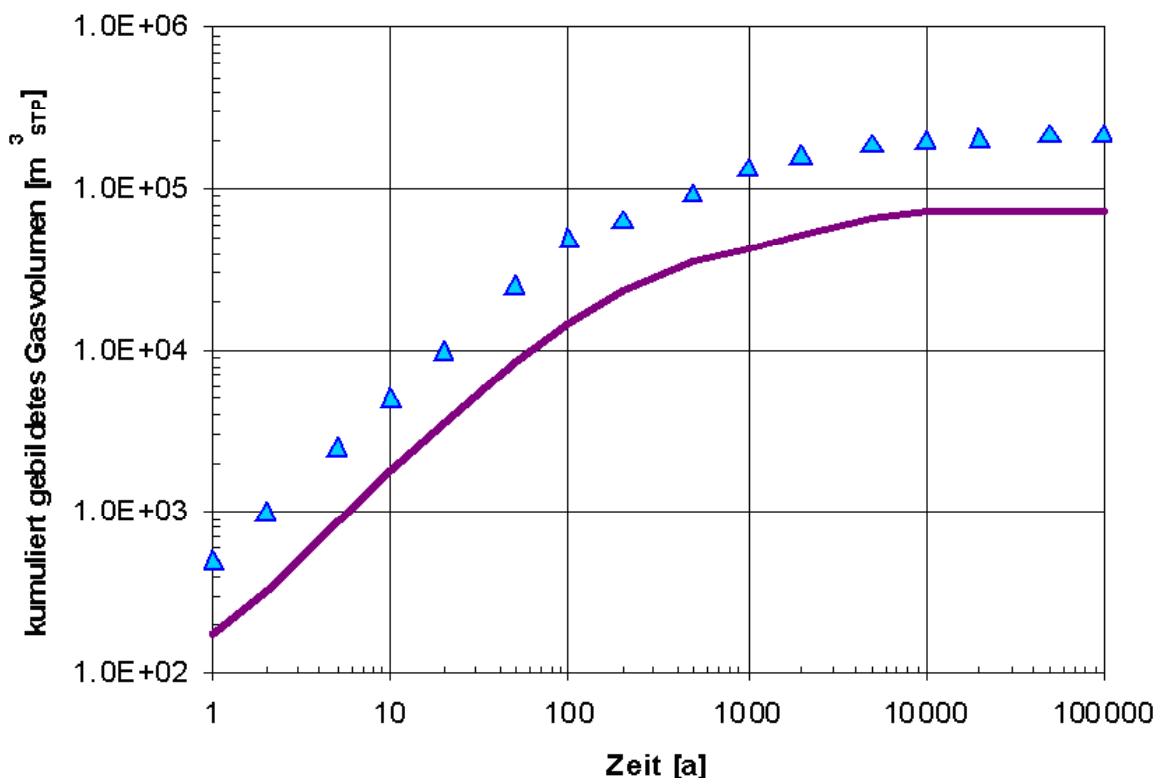


Abb. 5.113 Gasbildung in der MAW in den beiden betrachteten Varianten (blau RIX.1, violett RIX.2)

³³ 1l R-Lösung enthält (bei 30°C) 862 g oder 47,9 mol H₂O. Daraus lassen sich durch Korrosion $1,073 \text{ m}_{\text{STP}}^3 \text{ H}_2$ gewinnen, bei 70 m^3 R-Lösung demnach $75\,110 \text{ m}_{\text{STP}}^3 \text{ H}_2$.

Als eine weitere Veränderung gegenüber RIX.1 wird in dieser Variante unterstellt, dass nach 25 Jahren kein Gas und keine Lösung mehr über die Verbindung H_511_1 (die Zusammenfassung der Strahlenschutzmauer und des Sorelbetons im Durchhieb von 8/511 zu 8a/511, hier aber angesetzt auf Höhe der Schwebe) entweichen kann. Die Ergebnisse der Variante RIX.1 (siehe Kap. 5.8.5 und 5.8.6) haben gezeigt, dass nur ein sehr geringer Teil von Lösungsinhaltsstoffen (Tracer oder Radionuklide) über diesen Transportpfad in das Baufeld in der Südflanke und von dort in das Deckgebirge gelangt. Andererseits führt diese Verbindung (in KAFKA mit einer modellspezifischen Übergangshöhe von 2 m ab der Sohle, in welcher ein gradueller Gas- und Lösungsfluss aus der MAW-Kammer in die Verbindung möglich ist) dazu, dass durch Gasfluss über diese Verbindung die Lösung aus der MAW-Kammer nicht vollständig verdrängt werden kann. Ein Schließen der Verbindung nach einer modelltechnisch notwendigen Zeit – zum Abführen der komprimierten Grubenluft aus der MAW-Kammer und dem Ermöglichen des Lösungszutritts in die MAW-Kammer – führt dazu, dass die Lösung anschließend vollständig, d.h. bis auf die residuale Lösungssättigung, aus der MAW-Modellkammer verdrängt wird. Das Schließen der Verbindung verstärkt im Weiteren die gasbedingte Verdrängung kontaminierter Lösung und in der Folge den Austritt aus dem UMAW-Bereich in das Baufeld in der Südflanke, welcher dort in erster Linie durch Konvergenz verursacht wird. Das erwähnte Schließen der Verbindung ist deshalb eine konservative Ergänzung. Die Variante RIX.2 verknüpft somit ein wenig wahrscheinliches Nahfeldszenario bezüglich der MAW-Kammer mit einer wenig wahrscheinlichen Entwicklung im Deckgebirge. Sie soll im Sinne einer abdeckenden Betrachtung den möglichen Einfluss der Abfälle in der MAW-Kammer auf die Langzeitsicherheit aufzeigen.

5.8.5 Modellergebnisse KAFKA (RIX.1-K)

5.8.5.1 Gasspeicher und Gasflüsse im Umfeld der MAW-Kammer

Die effektiven residualen Gasspeicher im Rechenfall RIX.1-K entsprechen – bis auf jene der Modellkammern, welche die Abbau 8a/532 und 8b/532 abbilden (vgl. Anhang A, Kap. A.1) – den Werten der kombinierten Variante RX.5-K (vgl. Kap. 5.4.2.1). Tab. 5.40 gibt die als Eingangsgrößen verwendeten effektiven residualen Gassättigungen für die Modellkammern der Abbaue 8a/532 und 8b7532 wieder. Die effektive residuale Gassättigung in den obersten Modellkammern berücksichtigt neben der Gasspeicherung im Versatz einen Gasspeicheranteil unter der Firste der Kammern, während in den übrigen Segmenten Gas nur im Porenraum des Versatzes gespeichert wird.

Tab. 5.40 Parametrisierung der effektiven residualen Gasspeicher in den Modellkammern, welche die Abbau 8a/532 und 8b/532 abbilden: Rechenfall RIX.1-K

¹⁾	UMAWa-oX	UMAWb-oX	UMAWa-mX	UMAWb-mX	UMAWa-uX	UMAWb-uX
Effektive residuale Gas-sättigung [-]	0,286	0,286	0,16	0,16	0,16	0,16

¹⁾ X = N bzw. S.

In den LAW-Einlagerungsbereichen entsprechen das zeitliche Auftreten von Gaspolstern und deren weitere Entwicklung jenen in der kombinierten Variante. Die relative Lösungsspiegelhöhe in ausgewählten Modellkammern der Abbaue 8a/532 und 8b/532 sowie in der MAW-Kammer zeigt Abb. 5.114. In Folge des Zustroms von Schutzfluid aus dem Baufeld in der Südflanke über die söhlig durchgehenden Durchbrüche zu den Abbauen 8a/532 und 8b/532 steigt der Lösungspegel in den Modellkammern im Nahbereich der MAW ab etwa 4,5 Jahren an. Nach 10 Jahren sind alle Modellsegmente einschließlich der Schweben der Kammer 8a/532 (S-MAW) bis auf die residuale Gassättigung vollständig mit Schutzfluid gefüllt – und bleiben dies auch bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes. Begünstigt durch den Abfluss der anfänglichen Grubenluft über die Verbindung H_511_1³⁴ (Abb. 5.115), steigt in der MAW-Modellkammer der Lösungspegel bis 20 Jahre zunächst bis zu einer relativen Füllhöhe von ca. 25 % an. In dieser Zeit strömt Lösung über die Schweben der Kammer 8a/532 (S-MAW) zu. Ein Teil dieser Lösung wird – als Folge des Einsetzens der Gasbildung in der MAW-Kammer – in die Verbindung H_511_1 verdrängt (Abb. 5.116).

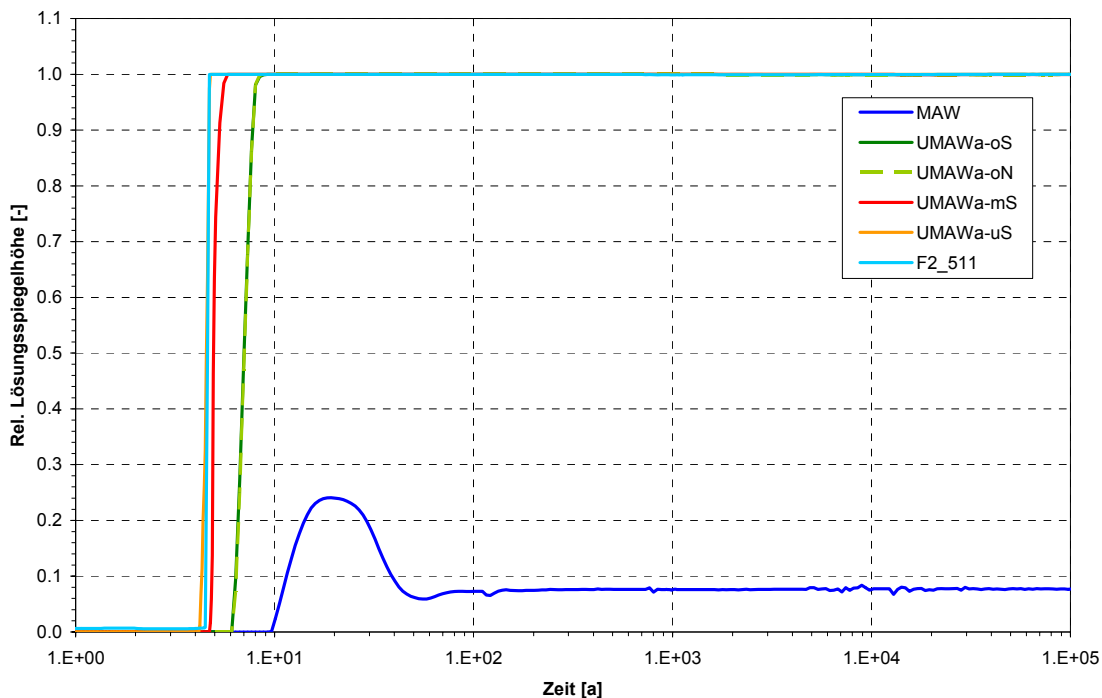


Abb. 5.114 Relative Lösungsspiegelhöhe in ausgewählten Modellkammern der Abbaue 8a/532 und 8b/532 sowie der MAW-Kammer: Rechenfall RIX.1-K

Nach gut 20 Jahren setzt ein Wechsel im Lösungsfluss zwischen der MAW-Kammer und der Schweben ein: Lösung fließt nun aus der MAW-Kammer ab – dominant über die Schweben in die Modellkammern der Abbaue 8a/532 und 8b/532, in deutlich untergeordnetem Maße über die Verbindung H_511_1 (Abb. 5.116).

³⁴ Da der Porenraum der Strecke H_511_1 – wie der aller Modellsegmente im Nahbereich der UMAW – zu Beginn der Modellierung vollständig gasgesättigt ist, bestimmt sich der Gasfluss aus der MAW-Modellkammer in die Strecke H_511_1 ohne Berücksichtigung eines Gaseindringdrucks.

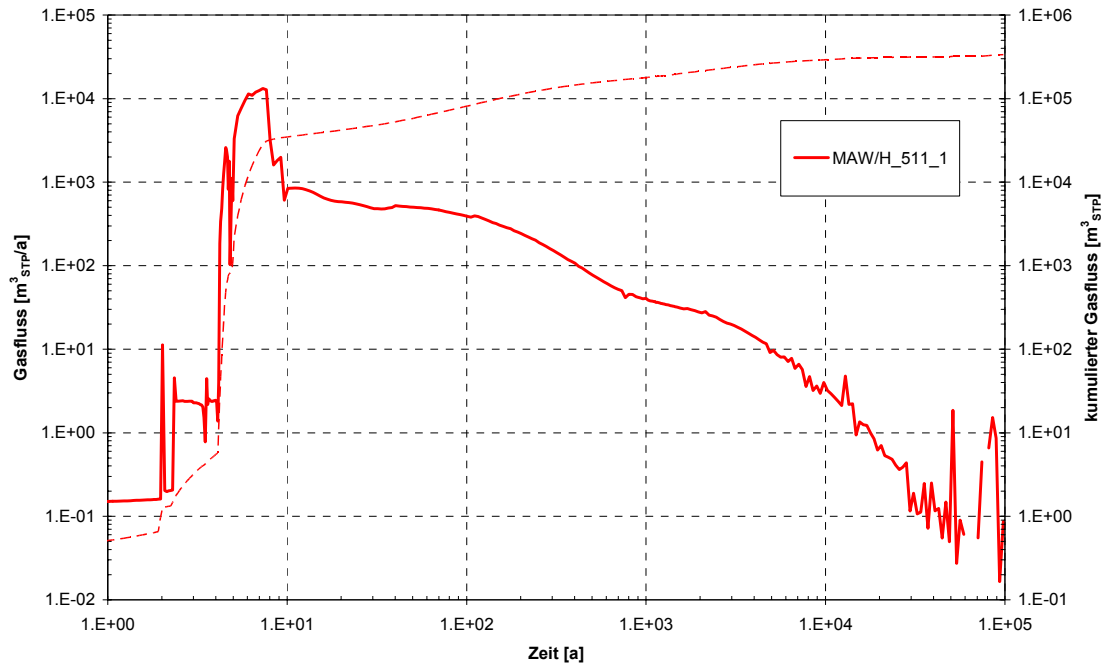


Abb. 5.115 Gasfluss aus der MAW-Modellkammer, gestrichelt kumulierter Gasfluss: Rechenfall RIX.1-K

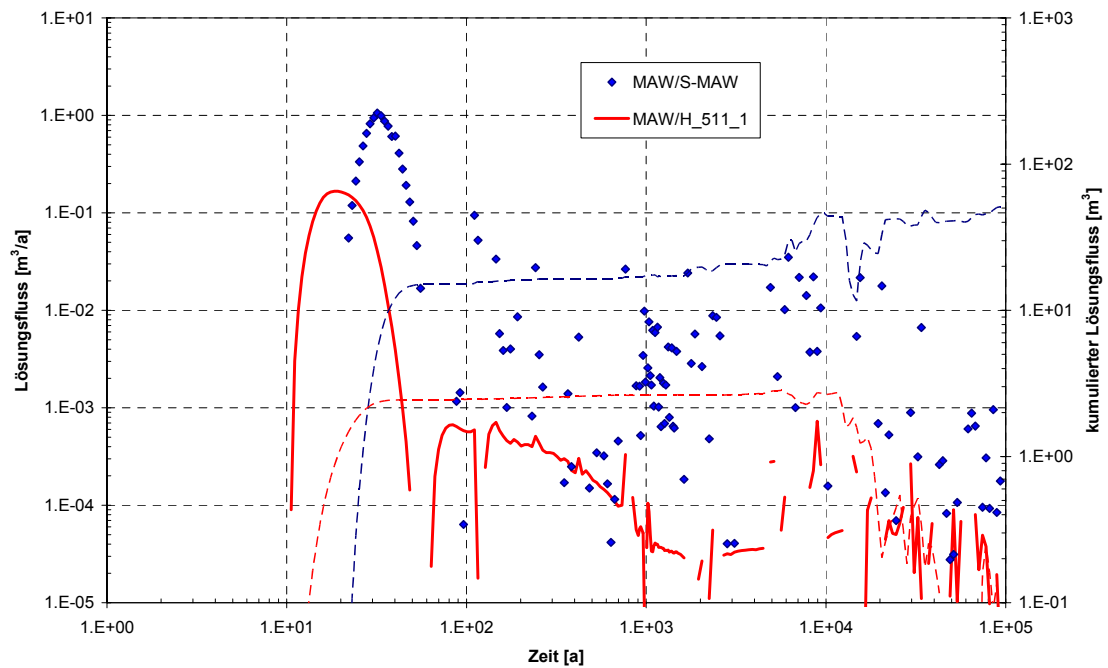


Abb. 5.116 Lösungsfluss aus der MAW-Modellkammer, gestrichelt kumulierter Lösungsfluss³⁵: Rechenfall RIX.1-K

³⁵ Die Entwicklung im kumulierten Lösungsfluss zu späten Zeiten ist das Resultat von – numerisch bedingten – Fluktuationen im Lösungsfluss und wird nicht als belastbar eingestuft.

Der Lösungspegel in der MAW-Modellkammer nimmt in Folge der Lösungsauspressung durch das gebildete Gas ab, bis nach etwa 70 Jahren und bei einer relativen Lösungsfüllhöhe von ca. 8 % ein Zustand erreicht wird, in dem sich die Gasbildung und der Gasabfluss die Waage halten und bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes keine signifikanten Änderungen in der Lösungssättigung in der MAW-Modellkammer mehr auftreten. Die Lösungsabflüsse aus der MAW-Modellkammer ab ca. 50 Jahren sind mit Werten kleiner als $0,1 \text{ m}^3/\text{a}$ über die Schwebe und kleiner als $0,001 \text{ m}^3/\text{a}$ über die Verbindung H_511_1 gering bzw. sehr gering.

Die Entwicklung der Lösungsentsättigung im Baufeld in der Südflanke nach Akkumulation des in den ELB gebildeten Gases im Grubenhöchsten ist vergleichbar mit jener in der kombinierten Variante. Die gegenüber der kombinierten Variante RX.5-K größere Gasmenge, die im ELB MAW gebildet wird, führt allerdings zu einem etwas früheren Beginn der sukzessiven Absenkung des Lösungsspiegels in den Modellbereich oberhalb der oberen Verbindung zum Deckgebirge (Modellsegment DG500 in 500 m Teufe). Der Gasabfluss aus dem Grubengebäude setzt nach 700 Jahren und damit geringfügig früher als in der kombinierten Variante ein (RX.5-K: 770 Jahre).

Für die Anwendung in LOPOS sind die erhöhten effektiven residualen Gassättigungen für die Bereiche entsprechend der kombinierten Variante RX.5-K anzuwenden (Kap. 5.4.2). Lediglich für die MAW-Modellkammer ergibt sich nachfolgender, gegenüber der kombinierten Variante geänderter Wert:

MAW: 0,85 (zum Vergleich RX.5-K: 0,90)

Aus der MAW-Modellkammer fließt zwischen etwa 4,5 Jahren und 10 Jahren vorrangig Grubenluft ab, die im Zuge des Anstieges des Lösungspegels in den Modellkammern der Abbaue 8a/532 und 8b/532 aus diesen verdrängt wird. Ab 10 Jahren strömt Gas über die Verbindung H_511_1 bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes in das Baufeld in der Südflanke (Modellsegment F2_511) ab.

5.8.5.2 *Tracertransport im Nahbereich der MAW, im Baufeld in der Südflanke und Übertritt in das Deckgebirge*

Die Flüsse der Tracer aus dem MAW-Einlagerungsbereich zeigen Abb. 5.117 und Abb. 5.118. Neben den Flüssen im Nahbereich der MAW ist auch die Freisetzung aus dem Grubengebäude ins Deckgebirge sowie der Fluss im Modell-Rötanhydrit (RA2/V-RA3V) dargestellt. Gestrichelt sind zusätzlich die kumulierten Tracerflüsse aus der MAW (über die Schwebe und über die Verbindung H_511_1) sowie aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge (über die Verbindung DG500) eingefügt.

Mit dem Einsetzen des Lösungsabflusses aus der MAW-Modellkammer in die Verbindung H_511_1 (zum Baufeld in der Südflanke) nach 10 Jahren und in die Schwebe (zum Abbau 8a/532) nach 20 Jahren (Abb. 5.116) setzen auch entsprechende advective Tracerabflüsse³⁶ ein. Im weiteren Verlauf gehen die Lösungsabflüsse aus der MAW auf recht geringe Werte

³⁶ Bereits vor dem Einsetzen der Lösungsflüsse sind diffusive Tracerabflüsse feststellbar.

zurück, entsprechend nehmen die Tracerflüsse ab. Ab etwa 100 Jahren sind die Tracerabflüsse aus der MAW weitestgehend diffusiv. Aus der Strecke H_511_1 tritt zwischen etwa 150 Jahren und knapp 20 000 Jahren X-Tracer der MAW-Modellkammer diffusiv wieder zu (Abnahme des kumulierten Tracerflusses in H_511_1 (rot gestrichelte Linie in Abb. 5.117)).

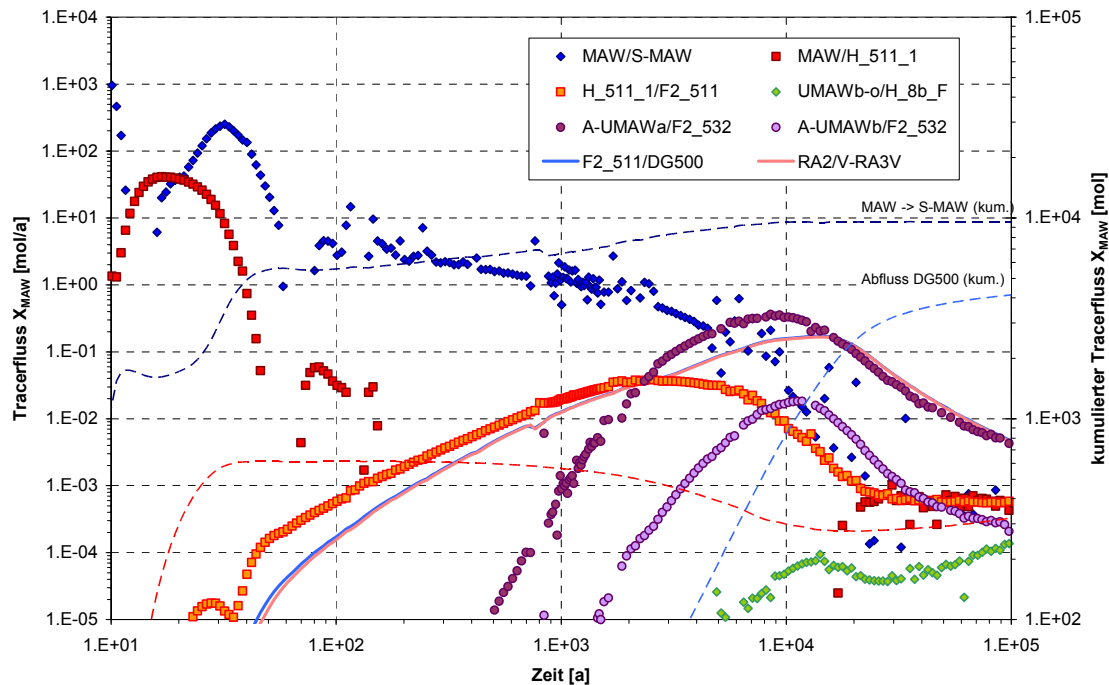


Abb. 5.117 Fluss des Tracers X_{MAW} im Nahbereich der MAW, im Baufeld in der Südflanke und im Deckgebirge; gestrichelt kumulierter Tracerfluss: Rechenfall RIX.1-K

Innerhalb der Abbaue 8a/532 und 8b/532 erfolgt der Tracertransport dominant über Abbau 8a/532, der über die Schwebel mit der MAW-Kammer verbunden ist. Als Folge des Transports durch die Abbaue 8a/532 und 8b/532 und der resultierenden Verdünnung setzt der Fluss der MAW-Tracer aus diesen Abbaue in die söhlig Durchhiebe zum Baufeld in der Südflanke in relevantem Maße erst nach etwa 1 000 Jahren (aus UMAWa-uS) bis 2 000 Jahren (UMAWb-uS) ein. Die Maxima in den Tracerflüssen über die beiden Durchhiebe werden zwischen 9 000 Jahren und 12 000 Jahren erreicht (Tab. 5.41). Zum Tracerfluss aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge über die Verbindung DG500 trägt zu bis etwa 2 000 Jahre der Fluss aus der Strecke H_511_1 in das Modellsegment F2_511 dominant bei. Das jeweilige Maximum der Tracerfreisetzung aus dem Grubengebäude wird aber deutlich durch den Betrag aus den Abbaue 8a/532 und 8b/532 (über die Verbindungen A-UMAWa und A-UMAWb) bestimmt.

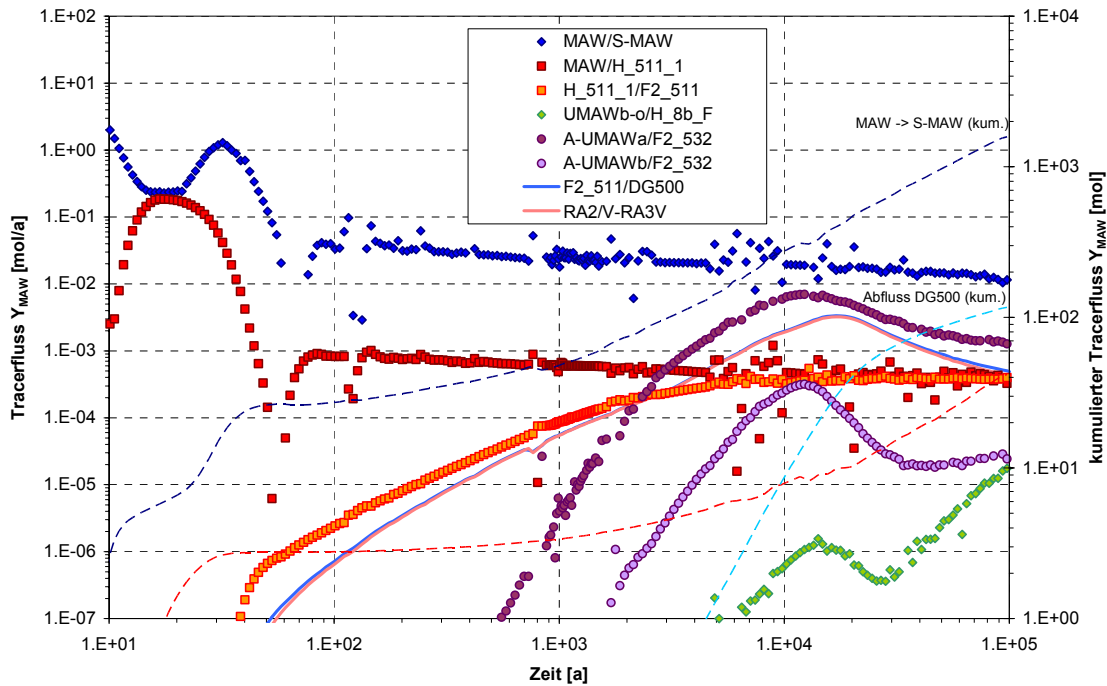


Abb. 5.118 Fluss des Tracers Y_{MAW} im Nahbereich der MAW, im Baufeld in der Südflanke und im Deckgebirge; gestrichelt kumulierter Tracerfluss: Rechenfall RIX.1-K

Tab. 5.41 Vergleich der Maxima der Flüsse der X- und Y-Tracer: Aus dem MAW-Nahbereich in das Baufeld in der Südflanke und im Übertritt in das Deckgebirge, Rechenfall RIX.1-K

	X_{MAW}	Y_{MAW}
Pfad: H_511_1 → F2_511		
Zeitpunkt des Maximums [a]	2 500	12 900
Maximaler Fluss [mol/a]	0,04	$5 \cdot 10^{-4}$
Pfad: A-UMAWa → F2_532		
Zeitpunkt des Maximums [a]	8 500	12 300
Maximaler Fluss [mol/a]	0,36	$7,0 \cdot 10^{-3}$
Pfad: A-UMAWb → F2_532		
Zeitpunkt des Maximums [a]	11 200	11 800
Maximaler Fluss [mol/a]	0,02	$3 \cdot 10^{-4}$
Pfad: F2_511 → DG_500		
Zeitpunkt des Maximums [a]	14 800	17 000
Maximaler Fluss [mol/a]	0,17	$3,4 \cdot 10^{-3}$

Das Maximum im Fluss von X_{MAW} in das Deckgebirge wird nach 14 800 Jahren, von Y_{MAW} nach 17 000 Jahren erreicht, wobei der Maximalwert des X-Tracers einen Faktor 50 größer als jener des Y-Tracers ist. Die Ursache für den Unterschied in der Größe der Flüsse des X- und des Y-Tracers liegt im relativ geringen initialen Lösungsvolumen der MAW-Kammer. Daraus resultiert für den X-Tracer (begrenzt Inventar, keine Löslichkeitslimitierung) gegenüber dem Y-Tracer (nahezu unbegrenzt Inventar, maximale Konzentration von 1 mol/m^3) eine deutlich höhere Anfangskonzentration von über 700 mol/m^3 in der MAW. Dieser Konzentrationsunterschied beeinflusst die Tracerflüsse vom Nahbereich der MAW-Kammer bis zum Traceraustrag in das Deckgebirge.

Für die Ausbreitung der Tracer aus der MAW-Kammer ist der Weg über die Abbaue 8a/532 und 8b/532 insgesamt der dominierende Ausbreitungspfad, der eine Verzögerung von mehreren tausend Jahren bewirkt.

Die Verteilung der Tracerkonzentrationen im Nahbereich des MAW-Einlagerungsbereichs, im oberen Bereich des Baufeldes in der Südflanke und im Rötanhydrit (Modellsegment RA2) sind in Abb. 5.119 und Abb. 5.120 abgebildet³⁷. Ausgehend von der MAW-Modellkammer und analog zu den Lösungsabflüssen aus dieser steigen die Konzentrationen der Tracer X_{MAW} und Y_{MAW} zunächst in der Modellstrecke H_511_1 (Verbindung zum Baufeld in der Südflanke), und mit einer gewissen Verzögerung auch in der Schwebel an. Die Konzentrationswerte des X-Tracers in H_511_1 (bezogen auf die Segmentmitte) liegen zwischen etwa 2 000 Jahren und 15 000 Jahren über jenen in der MAW-Modellkammer, was den diffusiven Zufluss von X_{MAW} aus dem Segment H_511_1 in die MAW während dieser Zeit erklärt (vgl. Abb. 5.117).

In den Modellsegmenten der Abbaue 8a/532 und 8b/532 sowie im Baufeld in der Südflanke erfahren die Tracer aus MAW eine deutliche Verdünnung und eine Verzögerung im Konzentrationsanstieg (Abb. 5.119 und Abb. 5.120, Tab. 5.42). Im Rötanhydrit wird schließlich das Maximum der Konzentration des Tracers X_{MAW} erst nach 35 500 Jahren erreicht. Der Maximalwert ist rund einen Faktor 30 000 geringer als die anfängliche (und maximale) Konzentration des Tracers in der MAW. Deutlich zeigt sich auch nochmals, dass der Beitrag der Tracer aus der MAW, der über die Verbindung H_511_1 in 511 m Teufe in das Baufeld in der Südflanke gelangt, im Vergleich zu jenem über die Abbaue 8a/532 und 8b/532 gering ist.

³⁷ In der Modellstrecke H_511_1 ist die Konzentration in der horizontalen Segmentmitte, in der Modellschwebel S-MAW in der vertikalen Segmentmitte angegeben.

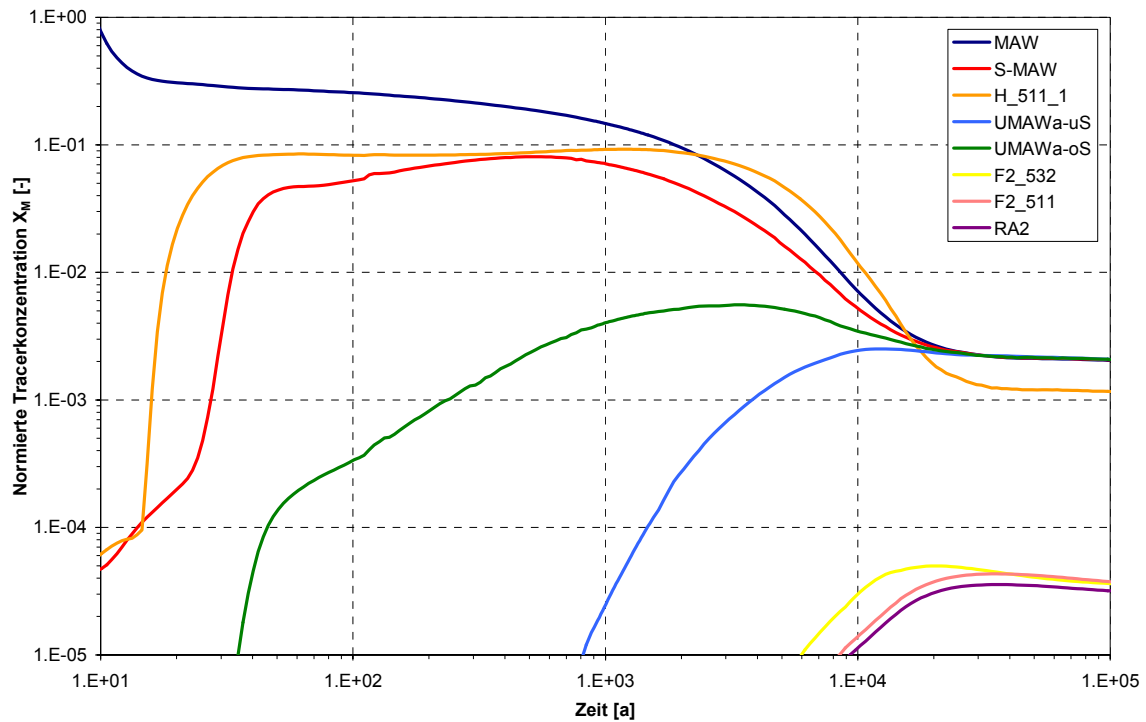


Abb. 5.119 Konzentration des Tracers X_{MAW} im Nahbereich der MAW, im Baufeld in der Südflanke und im Deckgebirge, normiert auf die anfängliche, maximale Konzentration in der MAW: Rechenfall RIX.1-K

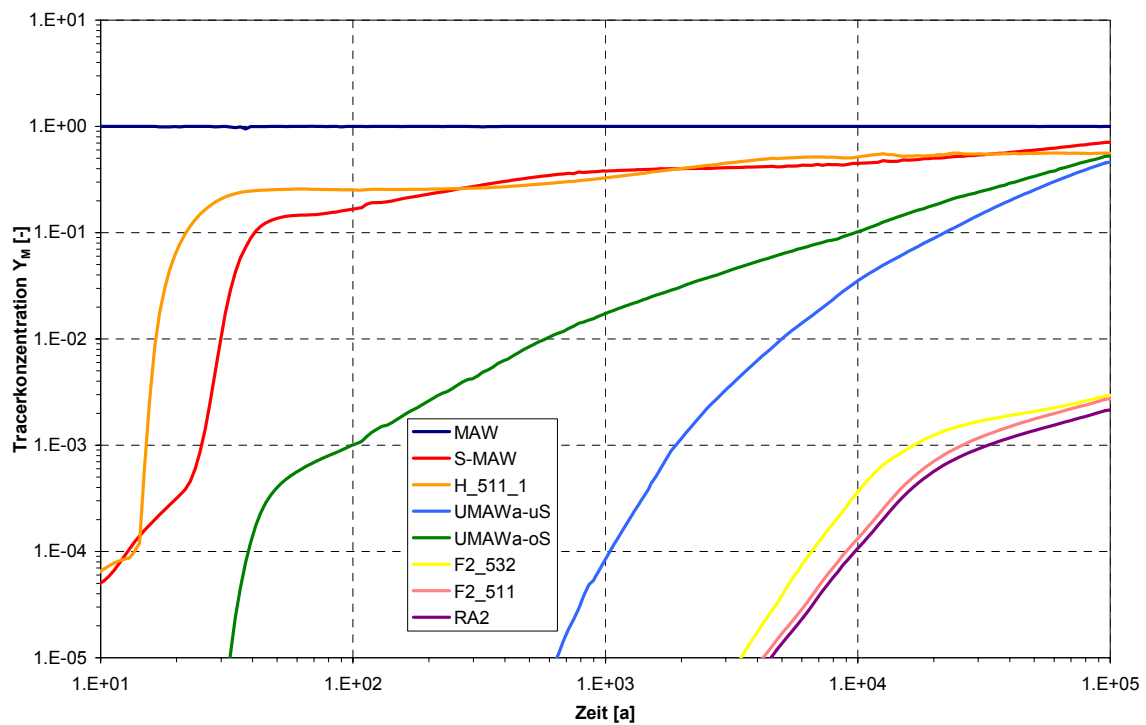


Abb. 5.120 Konzentration des Tracers Y_{MAW} im Nahbereich der MAW, im Baufeld in der Südflanke und im Deckgebirge: Rechenfall RIX.1-K

Tab. 5.42 Vergleich der Maxima der Konzentrationen des Tracers X_{MAW} im Nahbereich der MAW und im Baufeld in der Südflanke (normiert auf die anfängliche, maximale Konzentration in der MAW): Rechenfall RIX.1-K

X_{MAW}	Maximale normierte Tracerkonzentration [-]	Zeitpunkt der max. Konzentration [a]
Mittelpunkt H_511_1	0,09	1 200
Mittelpunkt S-MAW	0,08	500
UMAWa-oS	$5,6 \cdot 10^{-3}$	3 400
UMAWb-oS	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$\geq 10^{5*}$)
UMAWa-uS	$2,5 \cdot 10^{-3}$	12 900
UMAWb-uS	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$\geq 10^{5*}$)
F2_532	$5,0 \cdot 10^{-5}$	21 400
F2_511	$4,3 \cdot 10^{-5}$	35 500
RA2	$3,6 \cdot 10^{-5}$	35 500

^{*)} Konzentration ansteigend bis zum Ende des Betrachtungszeitraums

5.8.5.3 Tracerkonzentrationen nach Transfer im Deckgebirge

Die resultierenden Tracerkonzentrationen der Tracer aus dem MAW-Einlagerungsbereich in den drei Exfiltrationsgebieten *Verstärztes Deckgebirge – Tal der Ammerbeek (vD-Amm)*, *Muschelkalk – Tal der Ammerbeek (m-Amm)* und *Muschelkalk – Tal von Wittmar (m-Witt)* zeigen Abb. 5.121 und Abb. 5.122. Grundsätzlich liegen die Konzentrationen des Tracers X_{MAW} ca. 1,5 Größenordnungen über jenen des Y-Tracers, was auf die stark unterschiedlichen Anfangskonzentrationen in der MAW-Modellkammer zurückzuführen ist (s.o.). Für das Exfiltrationsgebiet *m-Witt* werden jeweils die höchsten Tracerkonzentrationen der drei Exfiltrationsgebiete erreicht. Während die Maxima hier nach 39 000 Jahren (X_{MAW}) bzw. 50 000 Jahren (Y_{MAW}) eintreten, resultieren für das Exfiltrationsgebiet *vD-Amm* die Maximalkonzentrationen der Tracer bereits nach etwa 2 500 Jahren. Die Maximalwerte für *vD-Amm* liegen einen Faktor 500 (X_{MAW}) bzw. 2 400 (Y_{MAW}) unter jenen für das Exfiltrationsgebiet *m-Witt*.

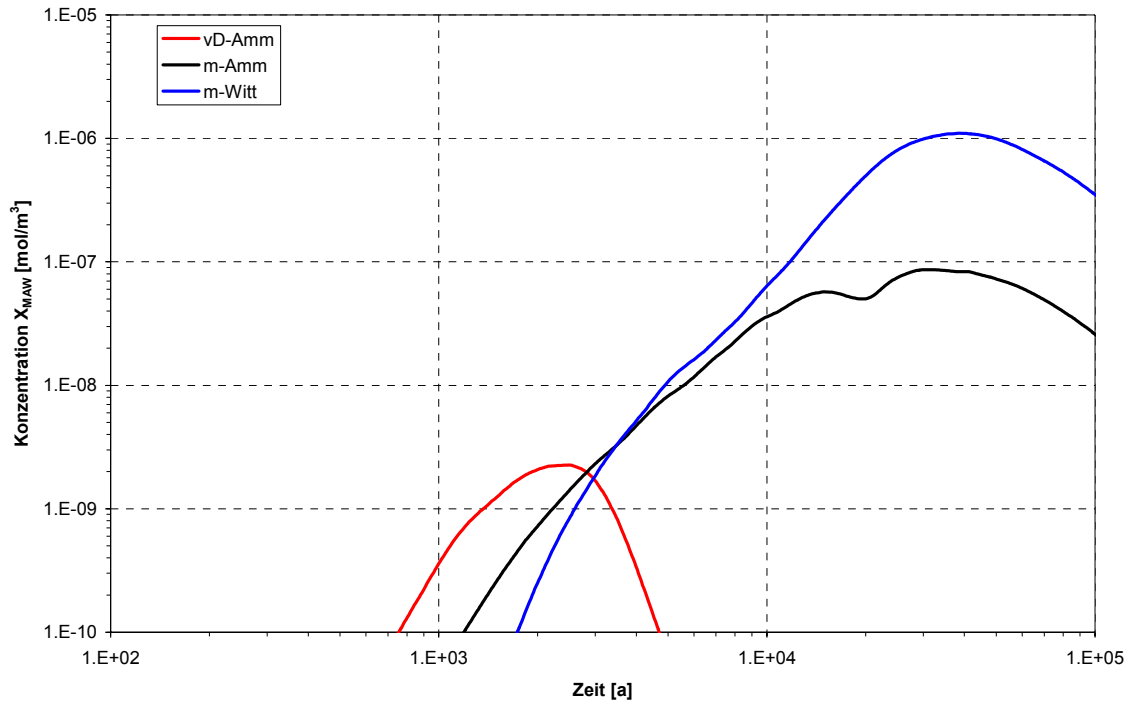


Abb. 5.121 X_{MAW} -Tracerkonzentration für die drei Exfiltrationsgebiete: Rechenfall RIX.1-K

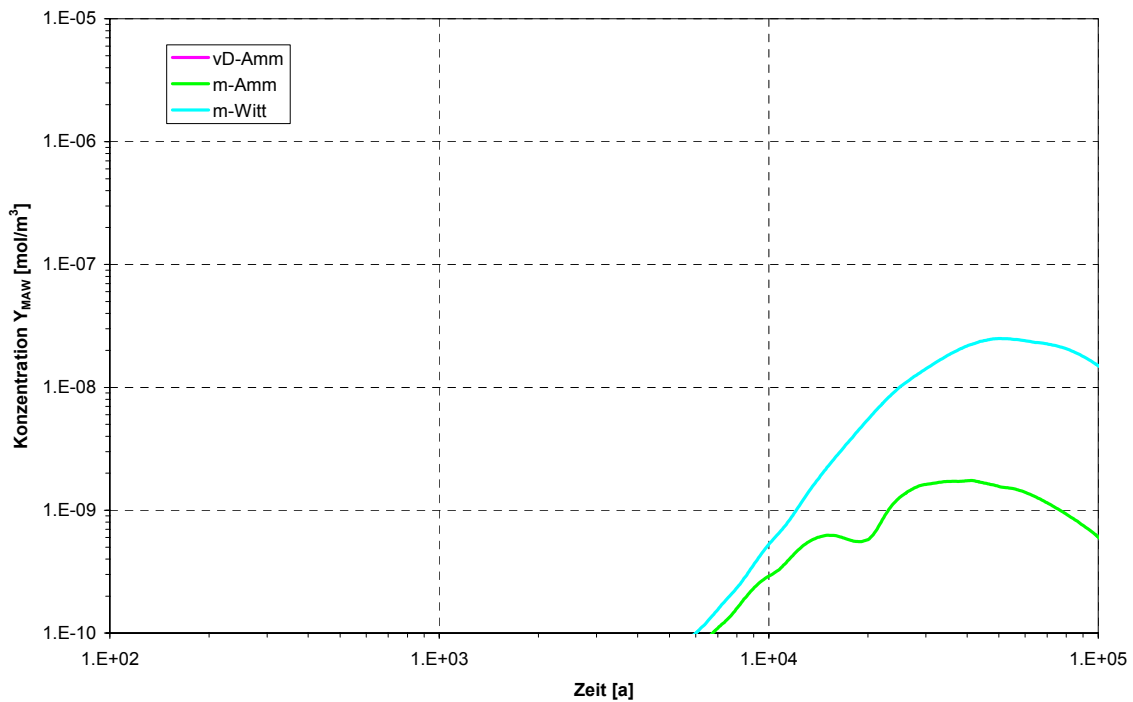


Abb. 5.122 Y_{MAW} -Tracerkonzentration für die drei Exfiltrationsgebiete: Rechenfall RIX.1-K (in $vD-Amm < 10^{-10} \text{ mol/m}^3$)

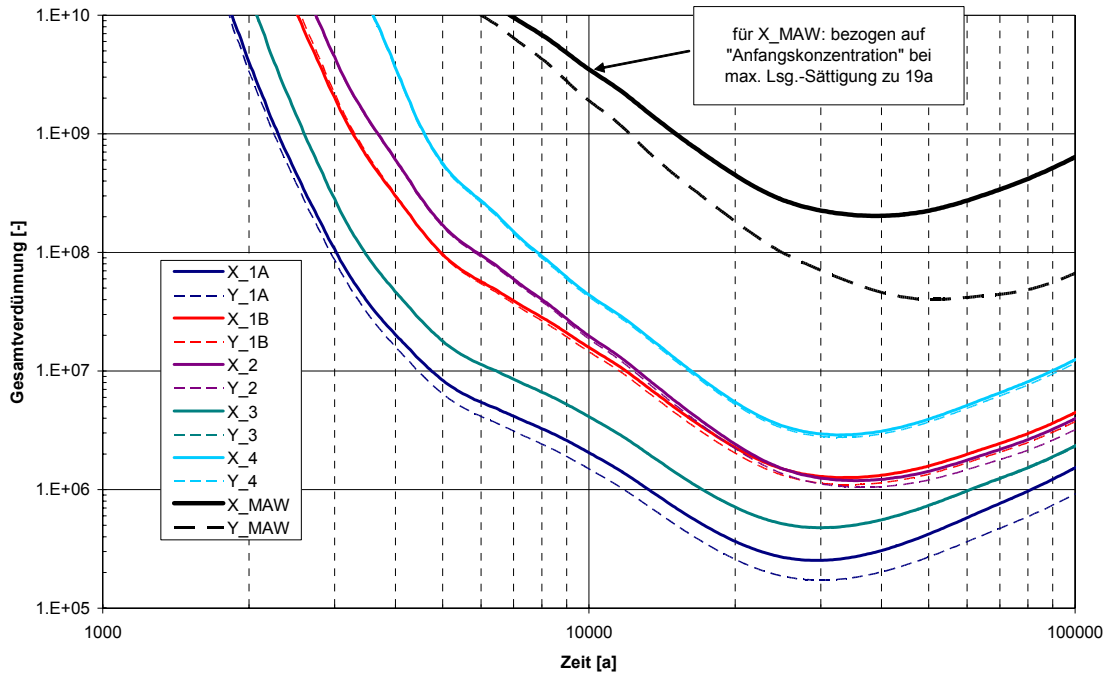


Abb. 5.123 Gesamtverdünnung der Tracer aus MAW im Grubengebäude und im Deckgebirge für das Exfiltrationsgebiet *m-Witt*: Rechenfall RIX.1-K

Die minimale Gesamtverdünnung der MAW-Tracer im Grubengebäude und im Deckgebirge wird im Exfiltrationsgebiet *m-Witt* mit Werten größer als $1 \cdot 10^8$ (X_{MAW}) bzw. $1 \cdot 10^7$ (Y_{MAW}) nach knapp 40 000 Jahren bzw. 50 000 Jahren erreicht (Abb. 5.123 und Tab. 5.43).

Tab. 5.43 Vergleich der minimalen Gesamtverdünnung der Tracer aus der MAW im Grubengebäude und Deckgebirge: Rechenfall RIX.1-K

	<i>vD-Amm</i>		<i>m-Amm</i>		<i>m-Witt</i>	
	min. Gesamtverdünnung	Zeitpunkt der min. Gesamtverdünnung	min. Gesamtverdünnung	Zeitpunkt der min. Gesamtverdünnung	min. Gesamtverdünnung	Zeitpunkt der min. Gesamtverdünnung
X_{MAW}	$9,9 \cdot 10^{10}$	2 500	$2,6 \cdot 10^9$	31 000	$2,0 \cdot 10^8$	39 000
Y_{MAW}	$9,6 \cdot 10^{10}$	2 500	$5,7 \cdot 10^8$	41 000	$4,0 \cdot 10^7$	50 000

5.8.5.4 Schlussfolgerungen aus dem Rechenfall RIX.1-K

Auch im alternativen Szenario *LsgMAW* wird im detaillierten Modell des MAW-Nahbereiches die MAW-Modellkammer nicht vollständig mit Lösung gefüllt. In der frühen Nachbetriebsphase gelangt über die aufgelockerte Schwebelösung des Abbaus 8a/532 Lösung in die Modellkammer und verdrängt gleichzeitig komprimierte Grubenluft über die

Auflockerungszone um den Sorelbeton und die Strahlenschutzmauer im Durchhieb zum Baufeld in der Südflanke. Die relative Lösungsspiegelhöhe erreicht nach ca. 20 Jahren einen maximalen Wert von 25 % in der als quaderförmig angenommenen Modellkammer.

Durch die Gasbildung im Abfall der MAW wird dann zunehmend Lösung – und zwar überwiegend über die Schwebel – zur Kammer 8a/532 ausgepresst, und die relative Lösungsspiegelhöhe nimmt innerhalb von etwa 50 Jahren bis auf 8% ab. Das weiterhin gebildete Gas fließt über den Durchhieb zum Baufeld in der Südflanke ab und verdrängt keine Lösung mehr, wodurch der Lösungsabfluss aus der MAW über die Schwebel weitestgehend zum Erliegen kommt.

Bis zu dieser Zeit – d.h. bis ca. 70 Jahre – gelangen mit der Lösung auch Tracer aus der MAW advektiv in den Nahbereich der MAW (in den Abbau 8a/532 und nachfolgend auch in 8b/532), wo sie zunächst deutlich verdünnt werden. Anschließend, d.h. nach ca. 70 Jahren, gelangen Tracer nur noch diffusiv über die Schwebel in den Nahbereich; Flüsse über den Durchhieb zum Baufeld in der Südflanke sind vernachlässigbar. Durch die Verdünnung im Nahbereich erreichen die Tracerflüsse aus diesem über die söligen Durchhiebe zum Baufeld in der Südflanke erst nach ca. 10 000 Jahren und beim Übertritt in das Deckgebirge erst nach 15 000 Jahren ein Maximum.

Nach dem Transport im Deckgebirge werden die absoluten Maxima der Konzentrationen der Tracer aus der MAW für das Exfiltrationsgebiet *m-Witt*, jedoch erst nach ca. 40 000 Jahren auftreten.

5.8.6 Modellergebnisse LOPOS (RIX.1-L)

Mit LOPOS wurden zwei Rechengänge (Varianten) durchgeführt, welche die Bandbreite der möglichen Lösungsvolumina in der MAW-Kammer abdeckend berücksichtigen. Im ersten Rechengang wird angenommen, dass die maximal mögliche Lösungsmenge von 115 m³ in die Kammer eindringt (entsprechend 85 % des fluidzugänglichen Volumens unter der Sorelbetonglocke in der MAW-Kammer), im zweiten Rechengang wird eine minimale Menge von 30 m³ angesetzt (entsprechend 20 % des fluidzugänglichen Volumens).

Eine wesentliche Annahme dieses Rechenfalls ist, dass die horizontale Verbindungsstrecke H-511-1 über lange Zeiten durchlässig ist, so dass Gas über diese Strecke abfließen kann und kein Gas aus der MAW-Kammer in den UMAW-Bereich gelangt. Das Gasspeichervolumen in den LOPOS-spezifischen Zusatzsegmenten von UMAW wird daher mit 1 % des Gesamtvolumens (aus numerischen Gründen nicht 0 %) angenommen, d.h. ein vernachlässigbarer Wert. Die Schnittstelle zum Deckgebirge basiert wie in der kombinierten Variante RX.5-L auf dem Deckgebirgsrechenfall DR13.

5.8.6.1 Variante mit Lösungsvolumen von 115 m³

Ein Lösungsvolumen von 115 m³ ist die maximal mögliche Menge, wenn man annimmt, dass die MAW-Kammer zu Beginn mit Grubenluft unter 1 MPa Druck steht und dass diese Luft während des Auffüllens von Lösung eingeschlossen und komprimiert wird. Die Gasbildung wird wie in Tab. A.1 angegeben als unter anaerob-feuchten Bedingungen maximal mögliche Gasbildung abgebildet. Die maximal möglichen Elementkonzentrationen für den Einlagerungsbereich MAW sind im Anhang A, Kapitel A.2 angegeben.

Volumina

In Abb. 5.124 sind die zeitlichen Entwicklungen der Volumina in der MAW-Kammer dargestellt. Die Kurvenverläufe sind wegen der gleichen geometrischen Abmessungen und der gleichen Modellparameter für die Gasbildung für MAW-B und MAW-Z gleich und daher nur für ein Segment angegeben. Bei $t = 20$ Jahren findet der instantane Lösungszutritt statt, danach wird die Lösung durch das gebildete Gas ausgepresst. Die Gasbildung ist der einzige Prozess, der zu einem Auspressen von Lösung führt, weil die Kammer wegen der Sorelbetonglocke als nicht konvergierend angenommen wird. Nach ca. 45 Jahren ist das Lösungsvolumen bis auf die residuale Lösungssättigung, die mit 10 % angenommen wird, ausgepresst. Durch die starke Gasbildung unter feuchten Bedingungen erfolgt das Auspressen der Lösung aus der MAW-Kammer in relativ kurzer Zeit.

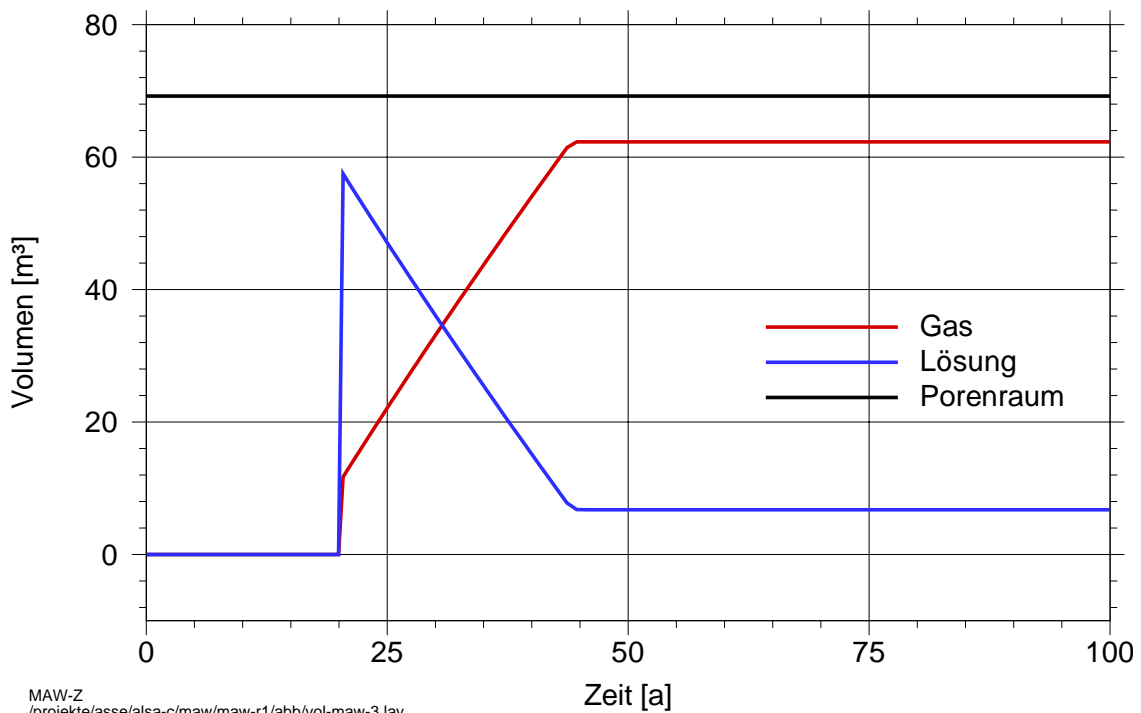


Abb. 5.124 Volumina in MAW-Z, RIX.1-L (Variante 115 m³)

Nach Auffüllen des Gasspeichers in der MAW-Kammer gelangt das weiterhin gebildete Gas gemäß der Modellierung in die oberen Bereiche des UMAW und von dort in das Baufeld in

der Südflanke. Abb. 5.125 zeigt die zeitlichen Entwicklungen der Gasvolumina in den Gasspeichern in allen Segmenten, die von dem Gas aus dem MAW-Bereich betroffen sind. Die anfänglichen Volumina ergeben sich aus den anfangs enthaltenen Luftmengen unter dem jeweiligen Druck. Es ist zu erkennen, dass die zeitliche Abfolge des Auffüllens der Gasspeicher dem modellierten Gaspfad (siehe Abb. A.1) entspricht, insbesondere von MAW-Z über F2-511-Z nach F2-500-Z. Die UMAW-Segmente verzögern den Gastransport wegen des (in diesem Rechenfall) sehr geringen Gasspeichervolumens nicht. Der starke Anstieg des Gasvolumens in F2-500-Z nach ca. 600 Jahren ist auf den Zutritt aus den LAW-Einlagerungsbereichen zurückzuführen.

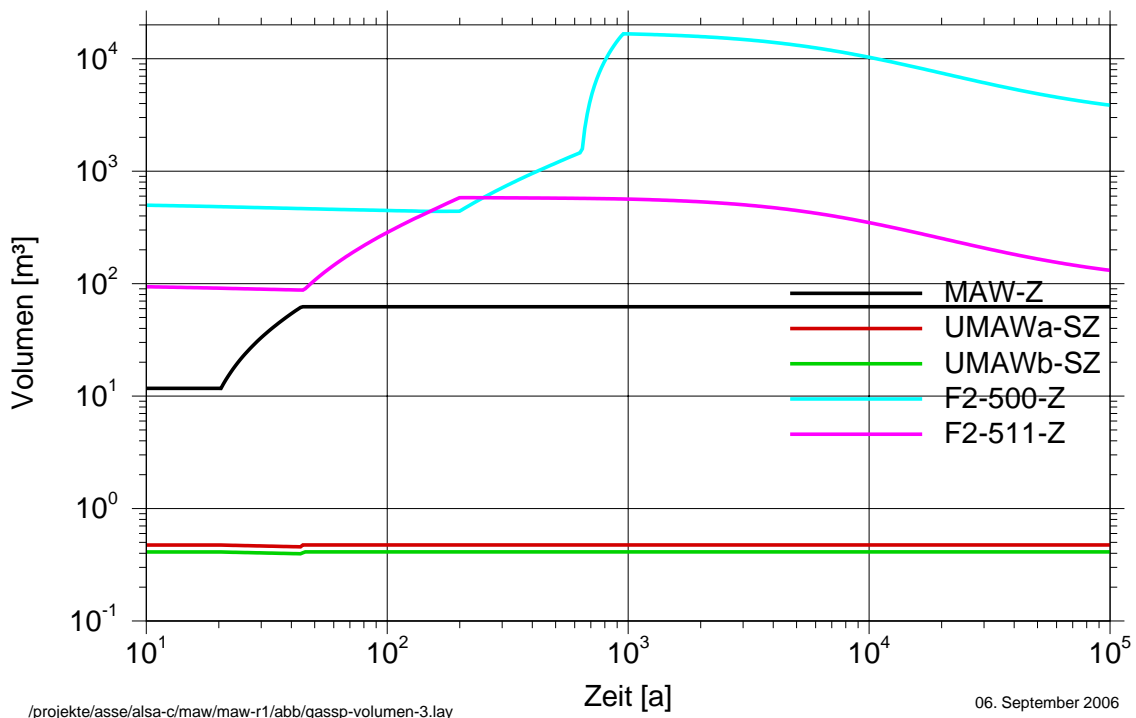


Abb. 5.125 Zeitliche Entwicklung der Gasvolumina, RIX.1-L (Variante 115 m³)

In Abb. 5.126 sind die Lösungsflüsse aus dem Segment MAW-Z dargestellt. Über die Schwebe S-MAW werden ab 20 Jahren ca. 4 m³ jährlich ausgepresst, über die horizontale Strecke H-511-1 ca. 0,05 m³ jährlich. Das Verhältnis der Auspressung über die beiden Segmente ist also ca. 1:80. Nach ca. 45 Jahren gehen beide Lösungsströme stark zurück. In diesem Zeitbereich kommt es zu einer sehr geringen Durchströmung von Lösung aus dem UMAW durch die MAW-Kammer zur Verbindungsstrecke H-511-1, weil sich durch die Konvergenz entsprechende Druckverhältnisse einstellen und das Lösungsvolumen in der MAW-Kammer nach 45 Jahren konstant bleibt.

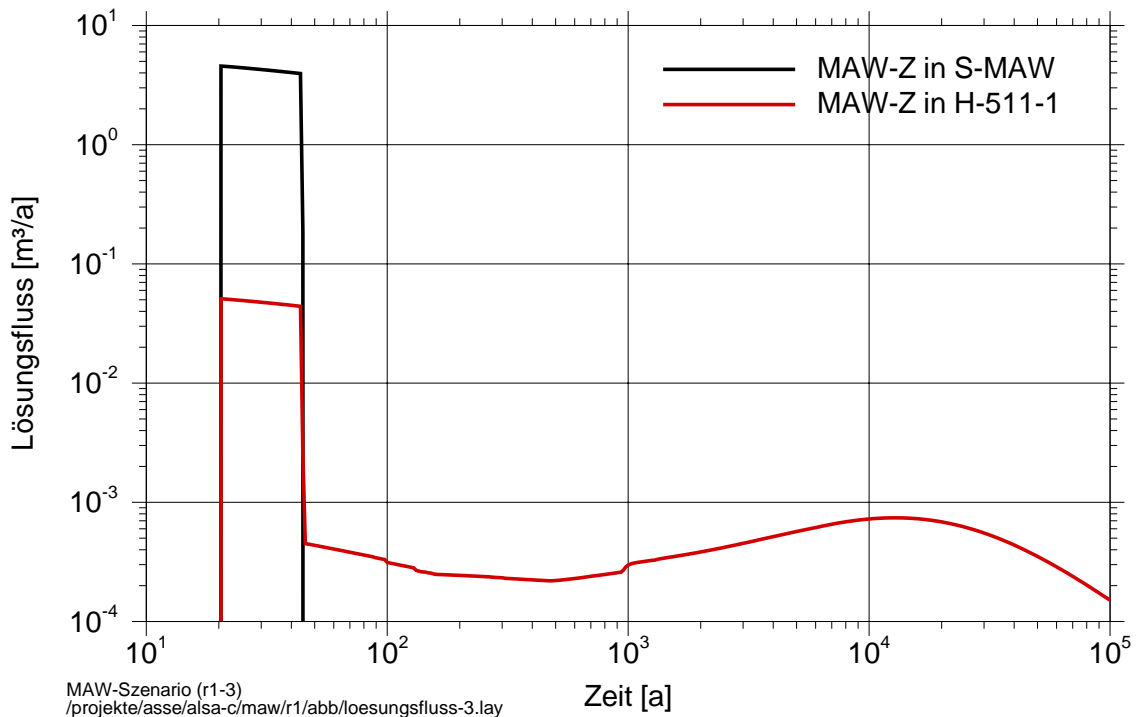


Abb. 5.126 Lösungsfluss aus der MAW-Kammer. RIX.1-L (Variante 115 m³)

Radionuklidströme und Konzentrationen

Im Folgenden werden die Nuklidströme und Konzentrationen für Am-241 und Pu-239 diskutiert. Diese beiden Radionuklide wurden ausgewählt, weil sie zu frühen Zeiten (Am-241), bzw. späten Zeiten (Pu-239) jeweils zu den wichtigsten Radionukliden zählen.

Abb. 5.127 zeigt die Ströme von Am-241 im Nahbereich der MAW-Kammer. Zum Zeitpunkt $t=20$ Jahre beginnt der Transport aus MAW-Z, da die Kammer dann geflutet und ein advektiver Transport möglich ist. Die kontaminierte Lösung wird entsprechend dem Lösungsfluss in Abb. 5.126 ausgepresst. Ab ca. 45 Jahren wird der advektive Transport durch diffusiven Transport überlagert.

Der Transport aus dem Modellsegment H-511-1 in das Baufeld in der Südflanke ist ebenfalls bis ca. 45 Jahre gasbedingt advektiv, danach konvergenzbedingt advektiv und geringfügig diffusiv. Der Transport aus dem Modellsegment A-UMAWa in das Baufeld ist zu allen Zeiten wegen der Konvergenz advektiv und diffusiv.

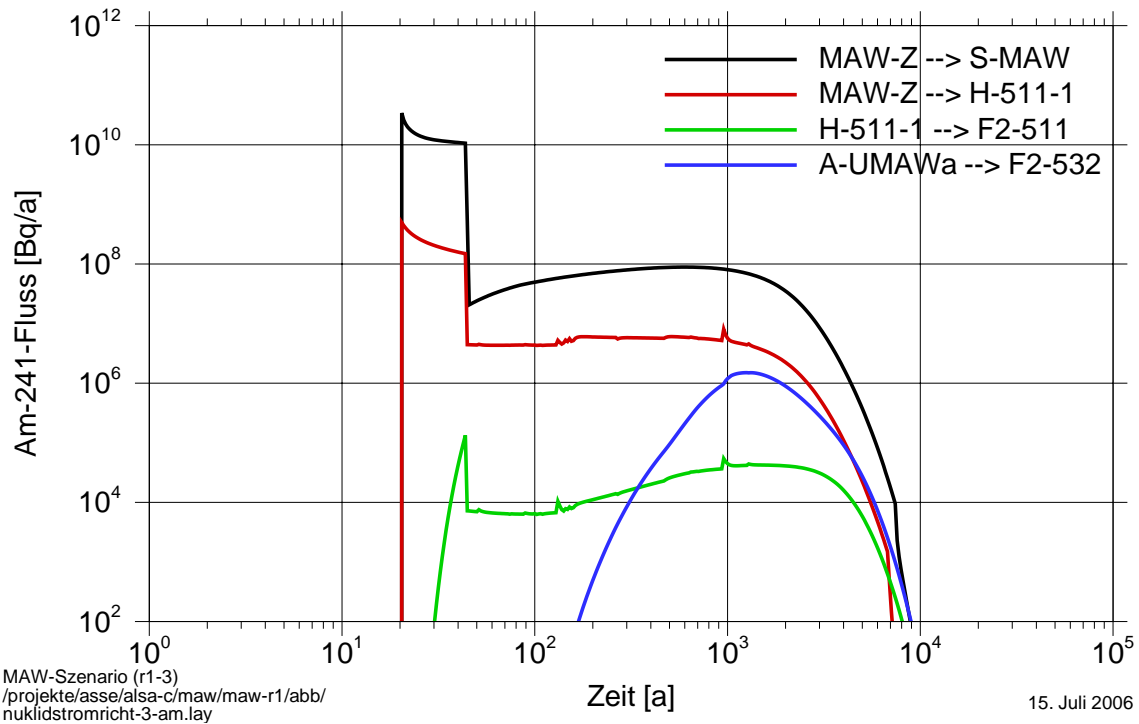


Abb. 5.127 Am-241-Fluss im MAW-Nahbereich, RIX.1-L (Variante 115 m³)

Der Aufbau von Konzentrationen in den durchströmten Segmenten ist in Abb. 5.128 und Abb. 5.129 für Am-241 und Pu-239 dargestellt. Die Kurvenverläufe sind generell für beide Radionuklide ähnlich, jedoch nehmen die Konzentrationen von Am-241 nach ca. 1000 Jahren wegen des radioaktiven Zerfalls stark ab. Die Konzentrationen von Pu-239 nehmen im Modellsegment H-511-1 bis ca. 8000 Jahre zu, weil bis zu diesem Zeitpunkt die Lösungsströme aus dem UMAW-Bereich durch die MAW-Kammer (siehe Abb. 5.126) nahezu ihr Maximum erreichen.

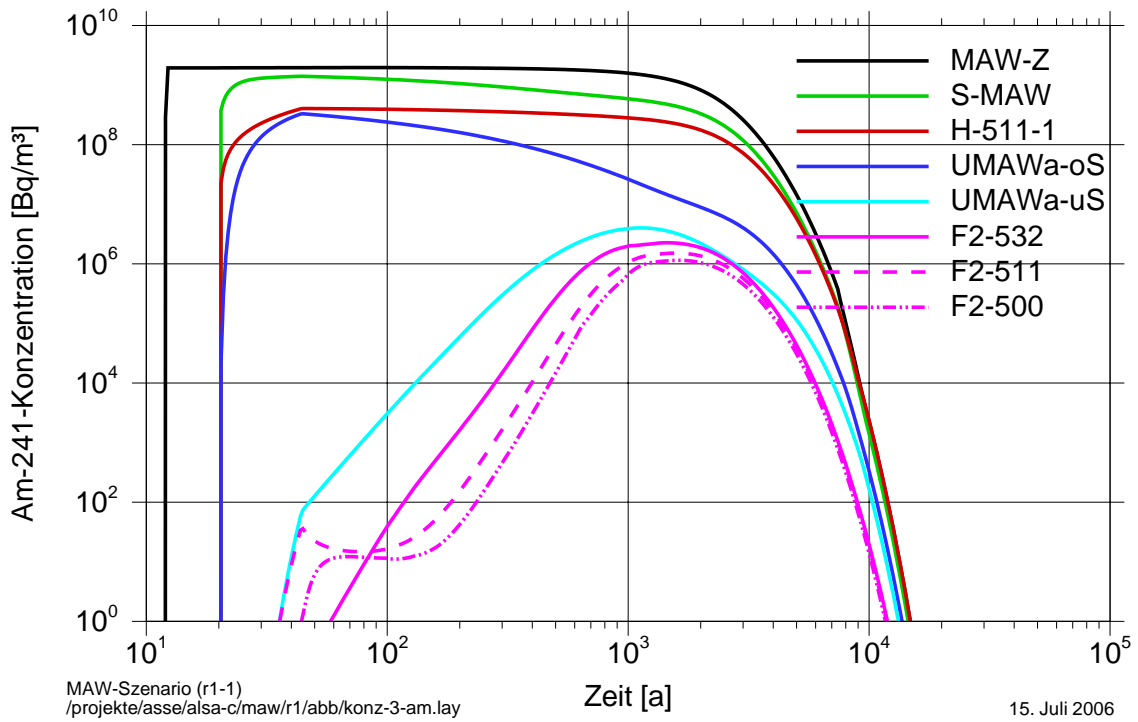


Abb. 5.128 Am-241-Konzentrationen im MAW-Nahbereich, RIX.1-L (Variante 115 m³)

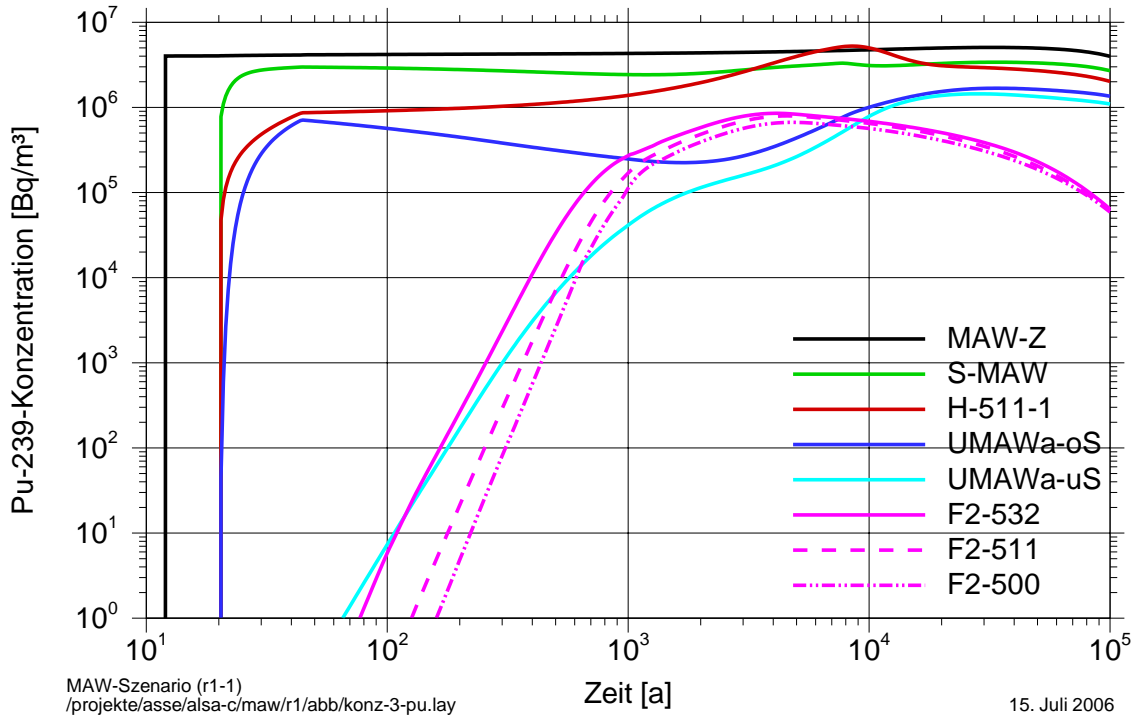


Abb. 5.129 Pu-239-Konzentrationen im MAW-Nahbereich, RIX.1-L (Variante 115 m³)

In Abb. 5.130 sind die aktuell in drei Segmenten des MAW-Nahbereichs vorhandenen Inventare und die kumuliert in diese Segmente freigesetzten Inventare (diese ohne Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls) dargestellt. Entsprechend den Radionuklidströmen sind die Inventare in S-MAW mehr als eine Größenordnung größer als in H-511-1.

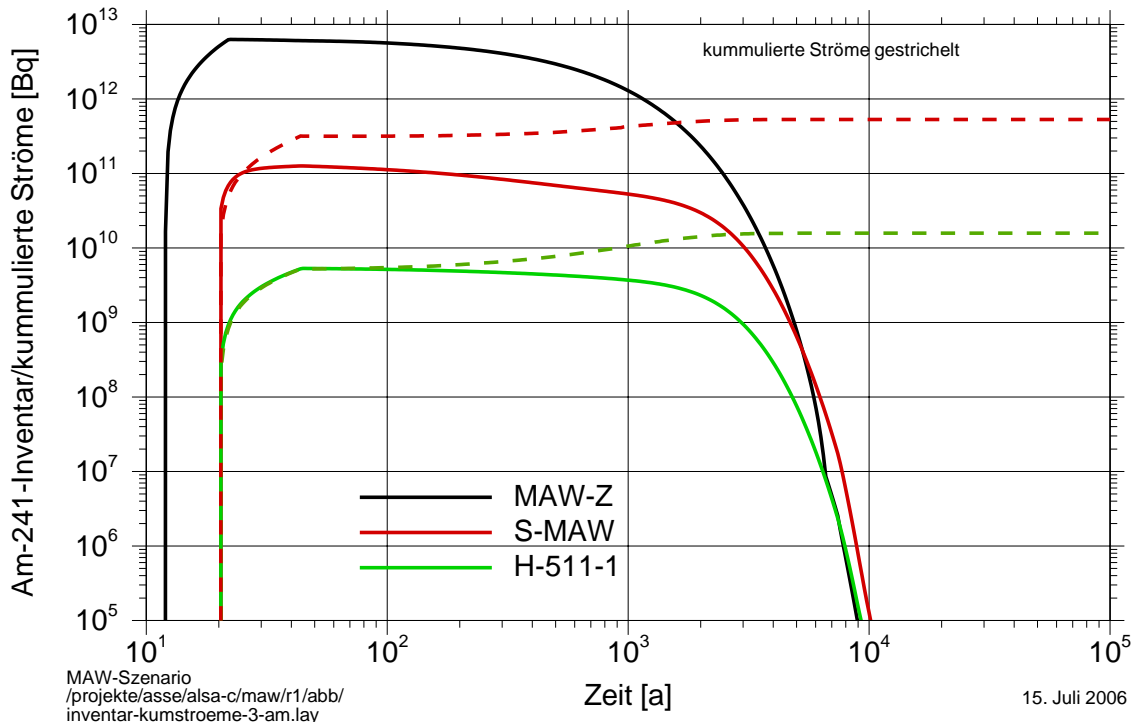


Abb. 5.130 Am-241-Inventare im MAW-Nahbereich, RIX.1-L (Variante 115 m³)

Potenzielle Strahlenexpositionen

Die in den folgenden Darstellungen gezeigten Strahlenexpositionen werden wie in der kombinierten Variante RX.5-L mit Transferfunktionen des Deckgebirgsrechenfalls DR13 berechnet.

Abbildung Abb. 5.131 zeigt einen Vergleich der berechneten potenziellen Strahlenexpositionen für die drei Exfiltrationsgebiete im Deckgebirge. Die Rechnungen ohne Berücksichtigung des MAW-Inventars wurden mit den gleichen Eingangsdaten wie RIX.1-L, aber mit einem Nullinventar in der MAW-Kammer durchgeführt. Sie entsprechen damit der kombinierten Variante RX.5-L, bei der eine geringfügig unterschiedliche Segmentstruktur im Baufeld in der Südflanke verwendet wird. Die Abbildung zeigt keinen Unterschied in den berechneten Strahlenexpositionen, d.h. der Beitrag des Inventars in der MAW-Kammer zur Summendosis ist vernachlässigbar klein.

Die Abb. 5.132 bis Abb. 5.134 zeigen die Beiträge der relevanten Radionuklide zu den potenziellen Strahlenexpositionen für die drei Exfiltrationsgebiete im Deckgebirge. Wie in der kombinierten Variante RX.5-L sind die wichtigsten Radionuklide Am-241, Pu-239, Pu-240 sowie Ra-226/Pb-210, wobei Am-241 nur über das Exfiltrationsgebiet verstärktes Deckgebirge –Ammerbeek (*vD-Amm*) das Maximum der Strahlenexposition bestimmt.

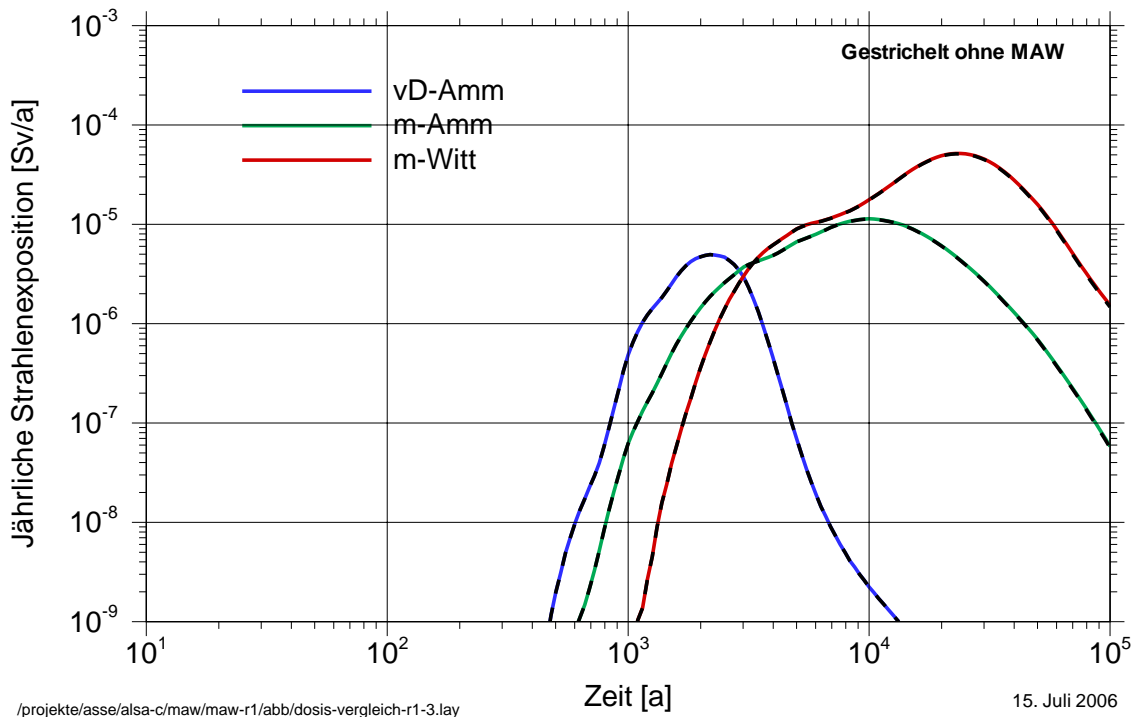


Abb. 5.131 Summen der jährlichen Strahlenexpositionen: RIX.1-L (Variante 115 m³)

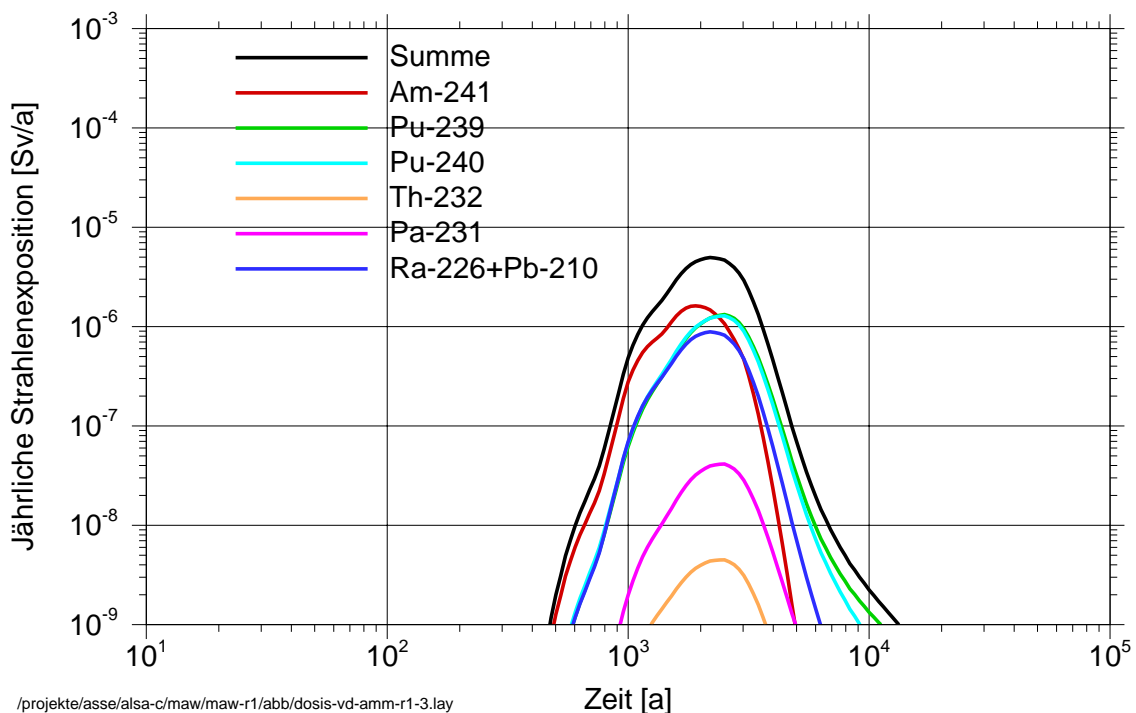


Abb. 5.132 Jährliche Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet *vD-Amm*, RIX.1-L (Variante 115 m³)

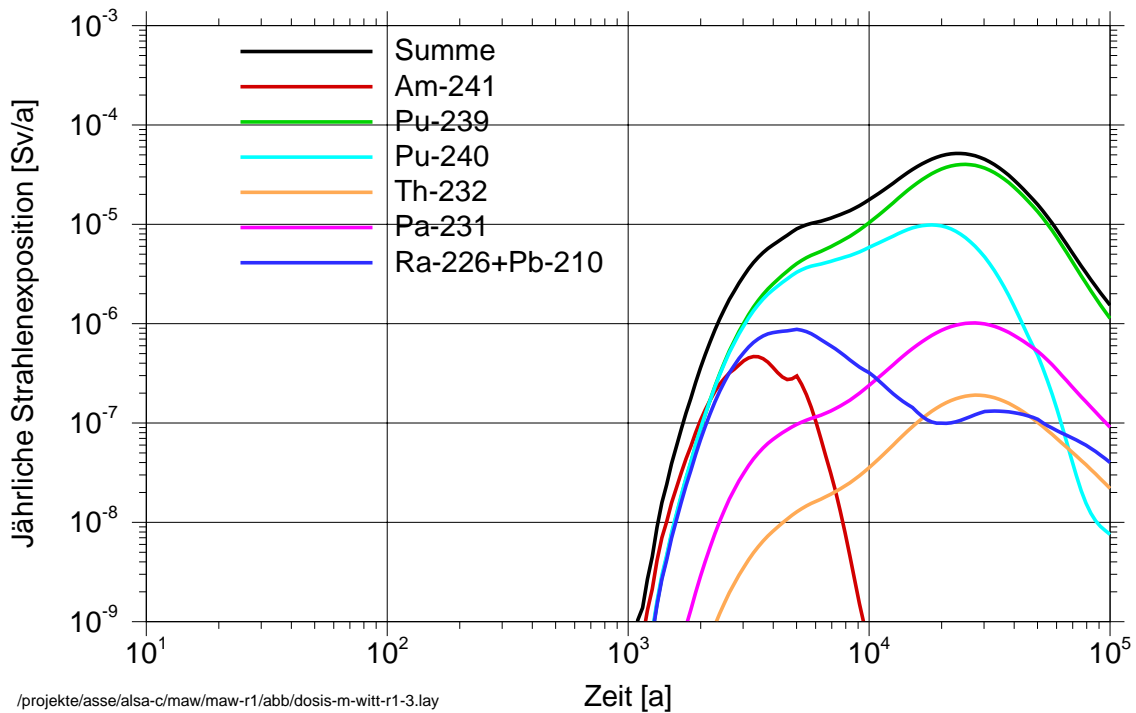


Abb. 5.133 Jährliche Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet *m-Witt*, RIX.1-L (Variante 115 m³)

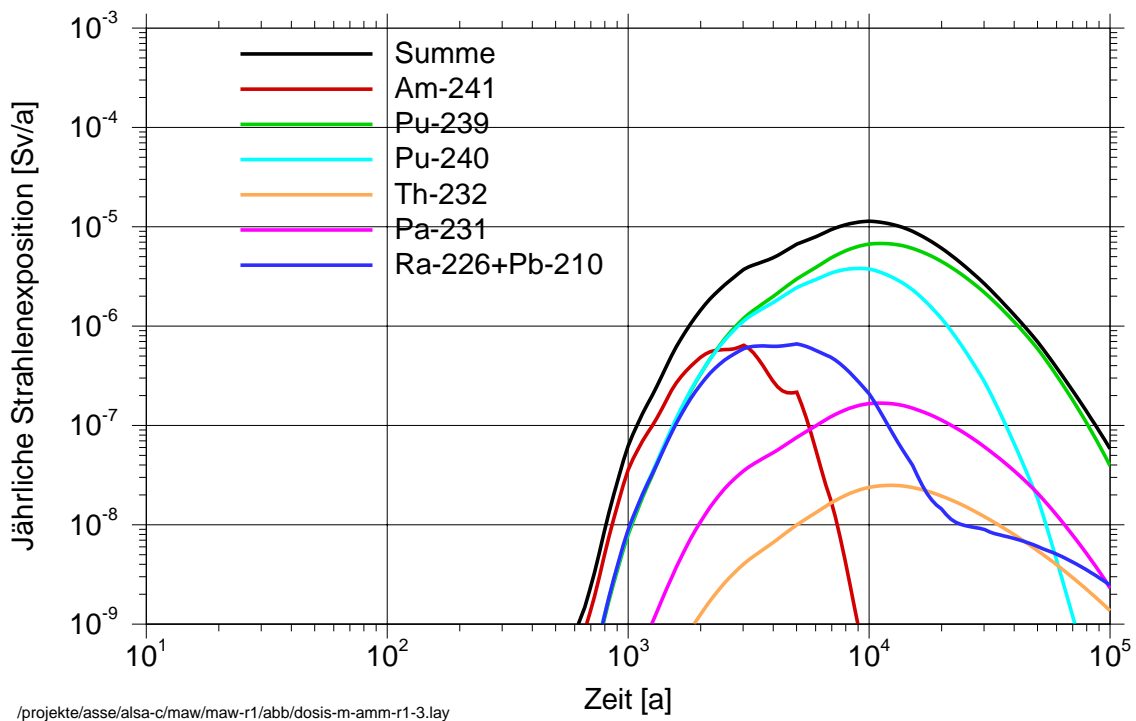


Abb. 5.134 Jährliche Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet *m-Amm*, RIX.1-L (Variante 115 m³)

Die potenziellen Strahlenexpositionen für das Szenario *LsgMAW* sind in den Rechnungen im Schlussbericht 2005 mit Hilfe von Verdünnungsfaktoren berechnet worden. Dabei ergab sich ein frühes Strahlenexpositionsmaximum von etwa $1 \cdot 10^{-5}$ Sv/a, das durch die aus der MAW-Kammer freigesetzten kurzlebigen Radionukliden Cs-137 und Sr-90 verursacht wurde. Für einen Vergleich der Ergebnisse des Rechenfalls RIX.1-L mit den alten Rechnungen werden daher die potenziellen Strahlenexpositionen auch mit Verdünnungsfaktoren berechnet. Durch diese vergleichende Darstellung soll eine bessere Beurteilung der Auswirkungen der detaillierten Modellierung des MAW-Nahbereichs ermöglicht werden, siehe Abb. 5.135.

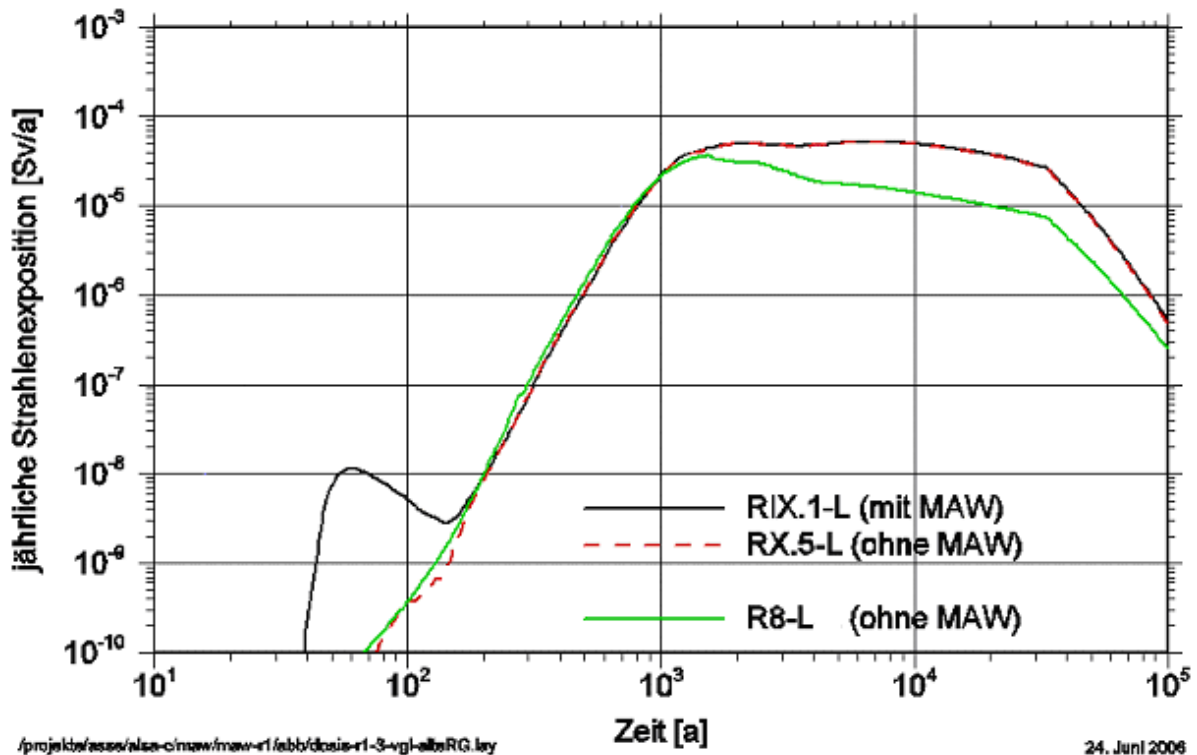


Abb. 5.135 Jährliche Strahlenexpositionen gemäß dem Verdünnungsmodell im Vergleich zum Referenzfall aus dem Schlussbericht 2005

Der Beitrag des MAW-Inventars zur potenziellen Strahlenexposition gemäß dem Verdünnungsmodell nach der detaillierten Modellierung des MAW-Bereichs ist nur zu frühen Zeiten zu erkennen, vergleiche die schwarze Kurve mit der gestrichelten roten Kurve. Bis etwa 200 Jahre führt die schnelle Freisetzung über die Strecke H-511-1 mit dem Verdünnungsmodell zu einem kurzfristigen, relativen Maximum der potenziellen Strahlenexposition auf sehr niedrigem Niveau nach ca. 50 Jahren, das von Sr-90 und Cs-137 dominiert wird. Der Beitrag von Am-241 aus dem MAW-Bereich ist in diesem Zeitraum gering. Im Zeitbereich von 200 Jahren bis zum Ende des Betrachtungszeitraums sind keine Unterschiede in den Summendosen mehr zu erkennen, wobei es jedoch Abweichungen im Ra-226/Pb-210-Verlauf zu späten Zeiten gibt, die die Summendosis aber nicht merklich beeinflussen.

Der Vergleich mit dem Referenzfall (R8-L) aus dem Schlussbericht 2005 in Abb. 5.135 zeigt, dass mit dem Verdünnungsmodell, d.h. ohne Berücksichtigung der Transportverzögerung im Deckgebirge,

- in der neuen Rechnung zum LsgMAW-Szenario ein frühes Strahlenexpositionsmaximum von nur etwa $1 \cdot 10^{-8}$ Sv/a auftritt und dass
- die Strahlenexpositionen nach ca. 1500 Jahren in den neuen Rechnungen generell höher als in den alten Rechnungen sind.

Der erste Effekt beruht auf dem in den neuen Rechnungen verringerten Transport über den UMAW-Bereich und folglich einer Transportverzögerung zwischen der MAW-Kammer und der Übertrittsstelle zum Deckgebirge. Während dieses länger dauernden Transports sind die kurzlebigen Radionuklide Sr-90 und Cs-137 weitgehend zerfallen, so dass das relative Maximum zu frühen Zeiten nur durch die geringe Menge direkt (advektiv) freigesetzter Radionuklide verursacht wird, die über die Verbindung H-511-1 in das Baufeld in der Südflanke gelangen.

Der zweite Effekt beruht auf dem neuen Quellterm für die LAW-Einlagerungsbereiche, der in der kombinierten Variante sowie in allen Rechnungen zum MAW berücksichtigt wird und zu einer größeren Freisetzung langlebiger Radionuklide führt. Dies wird im vorliegenden Bericht an anderer Stelle ausführlich behandelt.

5.8.6.2 Variante mit Lösungsvolumen von 30 m^3

In der Variante mit einem kleineren Lösungsvolumen von 30 m^3 ist außer dem Lösungsvolumen auch der Quellterm verändert, da sich das chemische Milieu in dem kleineren Volumen stärker alkalisch entwickelt. Dadurch sind die maximal möglichen Elementkonzentrationen einiger Radionuklide gegenüber denjenigen bei größerem Lösungsvolumen stark erhöht, (siehe Tab. A.2). Die Variante wird betrachtet, weil angenommen wurde, dass die teilweise höheren Radionuklidkonzentrationen auch zu einer höheren Freisetzung aus der Grube führen³⁸.

Volumina

Die Poren-, Lösungs- und Gasvolumina im Teilbereich MAW-Z der MAW-Kammer sind in Abb. 5.136 dargestellt. Gemäß den Modellannahmen wird die Kammer bei 20 Jahren instantan mit 30 m^3 Lösung gefüllt (15 m^3 in jedem der LOPOS-spezifischen Segmente MAW-Z und MAW-B). Aufgrund der Druckunterschiede in der MAW-Kammer und dem UMAW-Bereich dringt etwas Lösung aus dem UMAW zusätzlich in die MAW-Kammer ein, so dass sich ein Anfangsvolumen von ca. 19 m^3 einstellt. Durch die Gasbildung wird diese

³⁸ In dieser Variante liegt nur während kurzer Zeit mobile Lösung in der MAW-Kammer vor. Trotz der nur teilweisen Lösungssättigung des Abfallkegels wird unterstellt, dass das Gesamt-Radionuklidinventar zeitlich verzögert mobilisiert werden kann. In diesem Zeitraum, in dem in der MAW-Kammer mobile Lösung vorliegt, kann dadurch maximal das gesamte Inventar der in Zement konditionierten Gebinde und ca. 20% des Inventars aus den bituminierten Gebinden in Lösung gehen.

Lösung innerhalb von ca. 5 Jahren bis auf die residuale Lösungssättigung (10 % des Porenvolumens) ausgepresst.

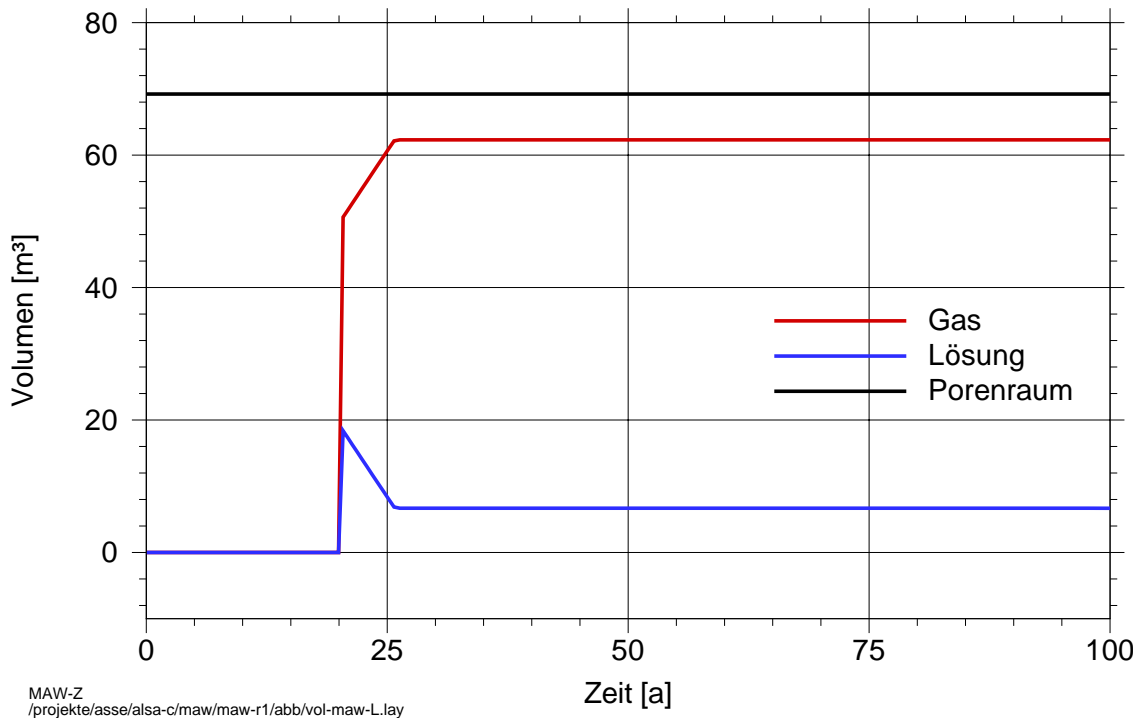


Abb. 5.136 Volumina in MAW-Z, RIX.1-L (Variante 30 m³)

Die zeitliche Entwicklung der Gasvolumina in der MAW-Kammer und in den nachfolgenden Speichersegmenten ist in Abb. 5.137 dargestellt. In der MAW-Kammer selbst wird der Speicher sehr schnell (in ca. 5 Jahren) aufgefüllt, was nur als kleiner Anstieg bei 20 Jahren erkennbar ist. Dieses schnelle Auffüllen führt zu einem früheren Beginn des Auffüllens im nachfolgenden Segment F2-511-Z als in der Variante mit größerem Lösungsvolumen im MAW (vergleiche Abb. 5.125). Die übrigen Kurvenverläufe sind in den beiden Varianten nahezu gleich.

Abb. 5.138 zeigt den Lösungsfluss aus der MAW-Kammer über die beiden angrenzenden Segmente. Der Verlauf ist qualitativ gleich zu der Variante mit größerem Lösungsvolumen in der MAW-Kammer (vergleiche Abb. 5.126), jedoch ist die Dauer des anfänglich hohen Ausflusses kürzer.

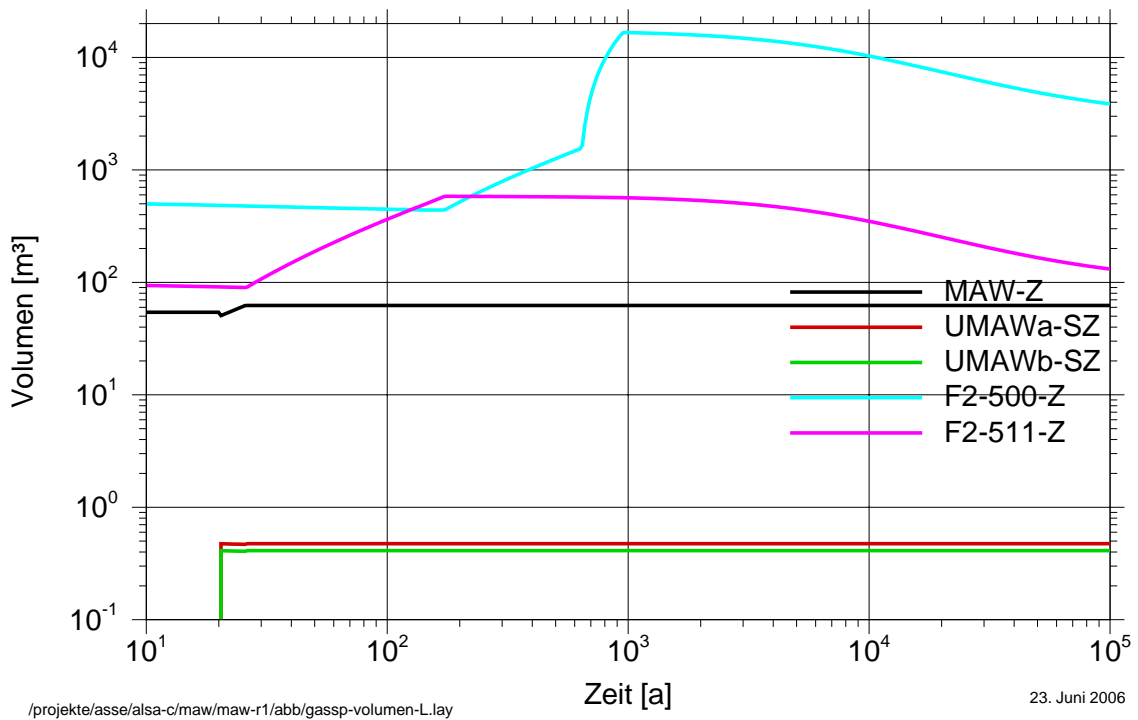


Abb. 5.137 Zeitliche Entwicklung der gebildeten Gasvolumina, RIX.1-L (Variante 30 m³)

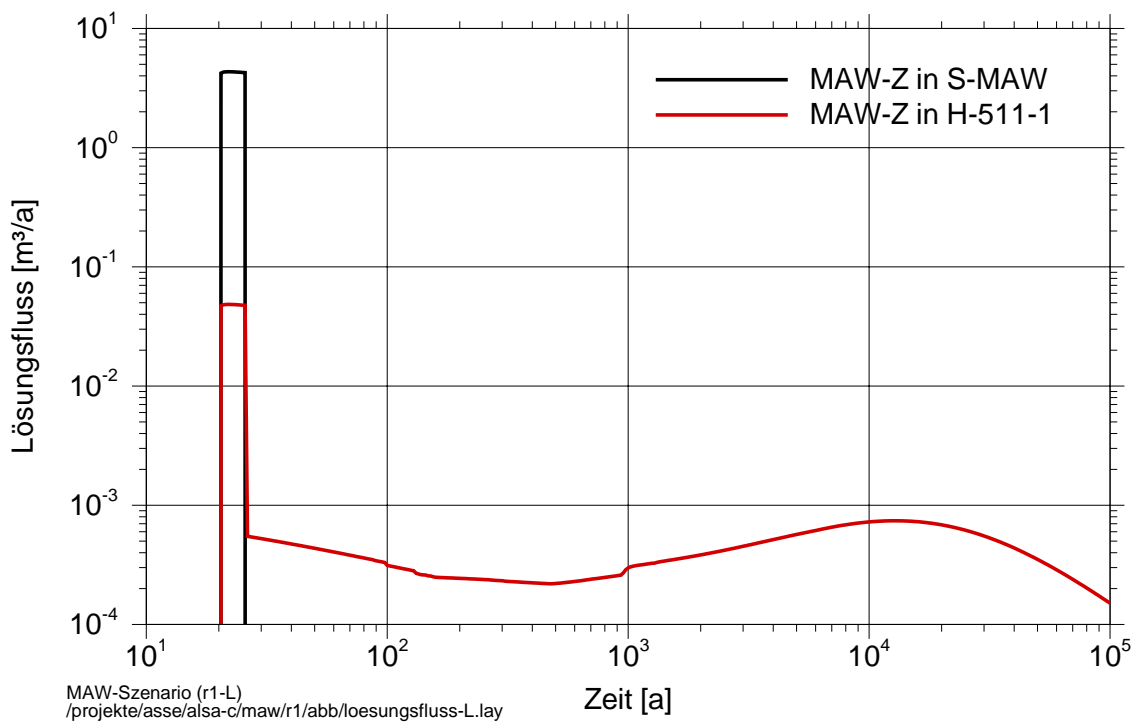


Abb. 5.138 Lösungsfluss aus der MAW-Kammer, RIX.1-L (Variante 30 m³)

Radionuklidströme und Konzentrationen

In Abb. 5.139 sind als Beispiel die Sr-90-Flüsse aus der MAW-Kammer und in das Baufeld in der Südflanke im Vergleich der beiden Varianten dargestellt. Sr-90 wurde für diesen Vergleich gewählt, weil es in den alten Rechnungen im Schlussbericht 2005 zu frühen Zeiten den größten Beitrag der Freisetzung aus dem MAW-Bereich lieferte. Qualitativ gleiche Aussagen gelten für alle anderen Radionuklide. Durch die höheren Radionuklidkonzentrationen in MAW (die maximalen Elementkonzentrationen werden nicht erreicht; Sr ist quasi inventarbestimmt) sind nach dem Ende des gasbedingten hohen Anfangsflusses alle Flüsse aus der MAW-Kammer (nach ca. 45 Jahren) größer als in der Variante „115 m³“. Bei den weiteren Segmenten sind die Verhältnisse anders: In der Variante „30 m³“ bleibt eine höher konzentrierte Lösung in der MAW-Kammer zurück, so dass insgesamt weniger Radionuklide aus MAW transportiert werden und sich geringere Konzentrationen einstellen.

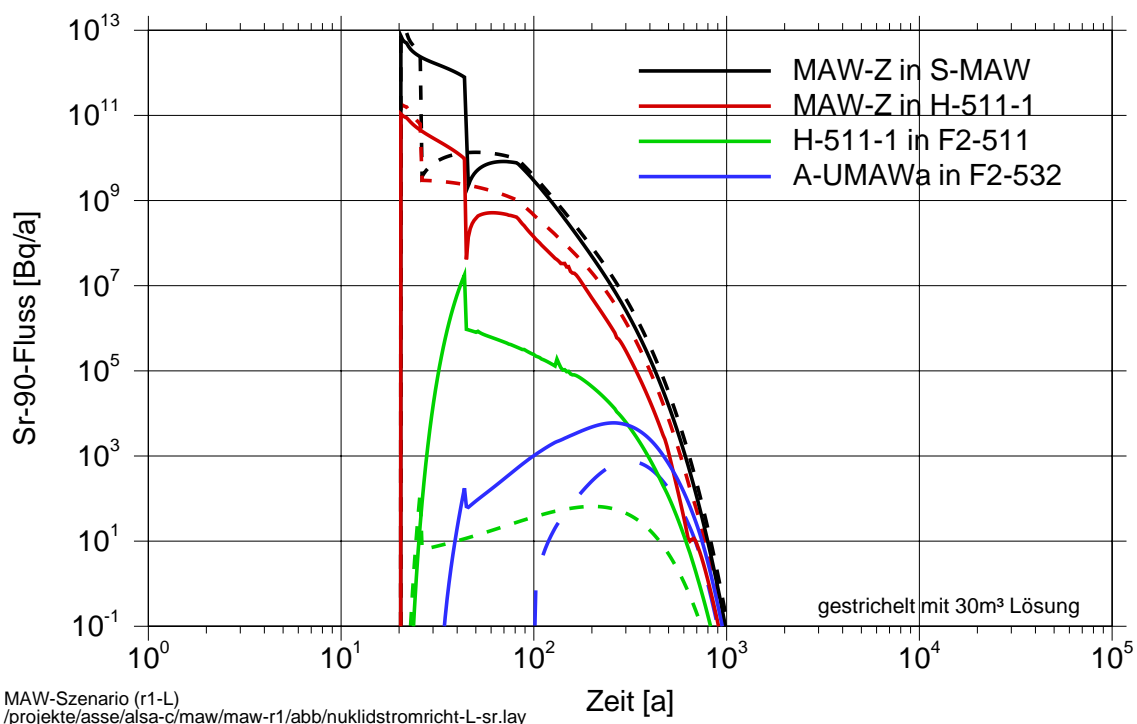


Abb. 5.139 Sr-90-Fluss. Durchgezogen: Variante mit 115 m³ Lösung: RIX.1-L

Für Thorium (Th-230) ist die Situation anders, siehe Abb. 5.140, da in diesem Fall die maximalen Elementkonzentrationen 3 Größenordnungen über diejenigen der Variante „115 m³“ liegen (siehe Tab. A.2). Die Th-230-Flüsse sind daher in allen Segmenten im MAW-Nahbereich größer. Zu späten Zeiten betragen die Unterschiede noch ca. 2 Größenordnungen.

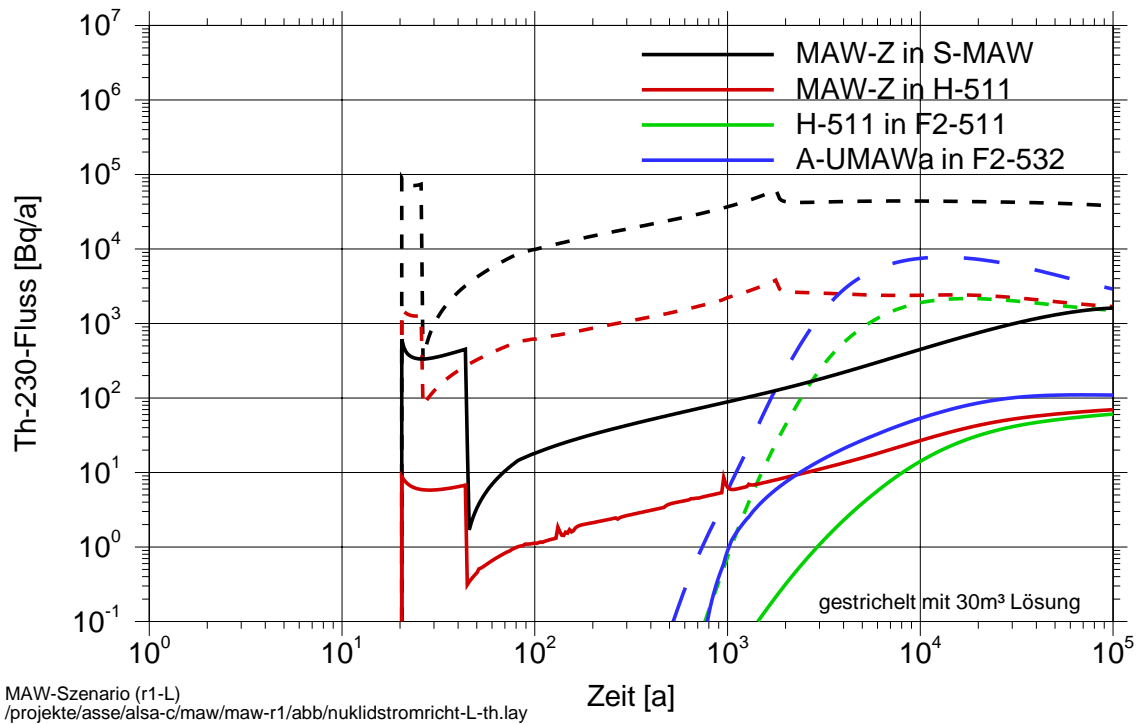


Abb. 5.140 Th-230-Fluss. Durchgezogen: Variante mit 115 m³ Lösung: RIX.1-L

In Abb. 5.141 bis Abb. 5.144 sind die Konzentrationen für die Radionuklide Am-241 und Th-230 für die beiden Varianten miteinander verglichen, wobei die Konzentrationen im Nahbereich der MAW-Kammer und im Baufeld in der Südflanke getrennt dargestellt werden. Gestrichelt ist jeweils die Variante mit 30 m³ Lösungsvolumen dargestellt.

Im Nahbereich der MAW-Kammer sind wegen der höheren Elementkonzentrationen beider Radionuklide in der Variante „30 m³“ die Konzentrationen in der MAW-Kammer und in den direkt angrenzenden Segmenten S-MAW und H-511-1 generell größer. Im UMAW-Bereich gilt dies generell auch, jedoch ist hier wegen des anfangs länger andauernden gasbedingten Ausstroms aus der MAW-Kammer in der Variante „115 m³“ die Konzentration im unteren Teil von UMAW (UMAW-uS) bis 2500 Jahre etwas höher (im dargestellten Bereich nur bei Am-241 sichtbar).

Im Baufeld in der Südflanke sind die Verhältnisse für Am-241 anders als für Th-230. Bei Am-241 gelangen wie für Sr-90 (siehe Abb. 5.139) nur geringe Mengen durch das anfängliche gasbedingte Auspressen in das Baufeld, so dass die Konzentrationen deutlich unter denjenigen in der Variante „115 m³“ liegen, in der anfangs ein schneller Transport über die Strecke H-511-1 in das Baufeld in der Südflanke auf 511 m Teufe erfolgt. Insgesamt ist die Am-241-Konzentration ab ca. 200 Jahren vollständig durch die Beiträge der LAW-Kammern geprägt und die Beiträge aus dem MAW-Bereich sind nicht mehr sichtbar.

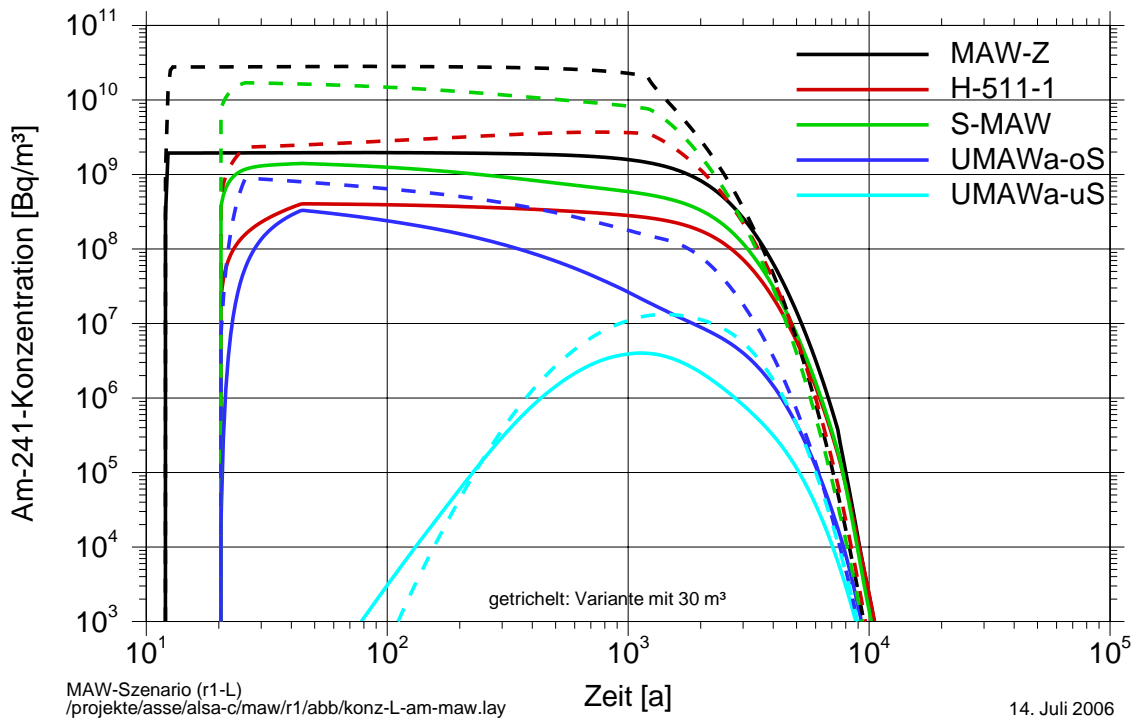


Abb. 5.141 Am-241-Konzentration im MAW-Nahbereich. Durchgezogen: Variante mit 115 m³
Lösung: RIX.1-L

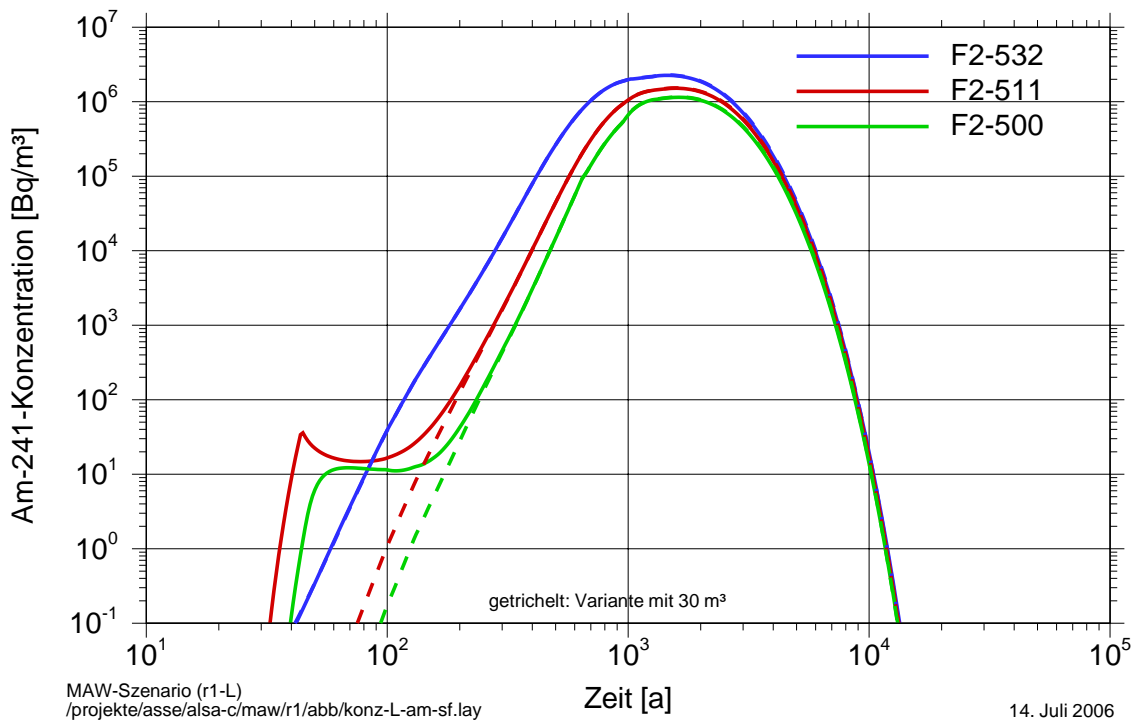


Abb. 5.142 Am-241-Konzentration im Baufeld in der Südflanke. Durchgezogen: Variante mit 115 m³
Lösung: RIX.1-L

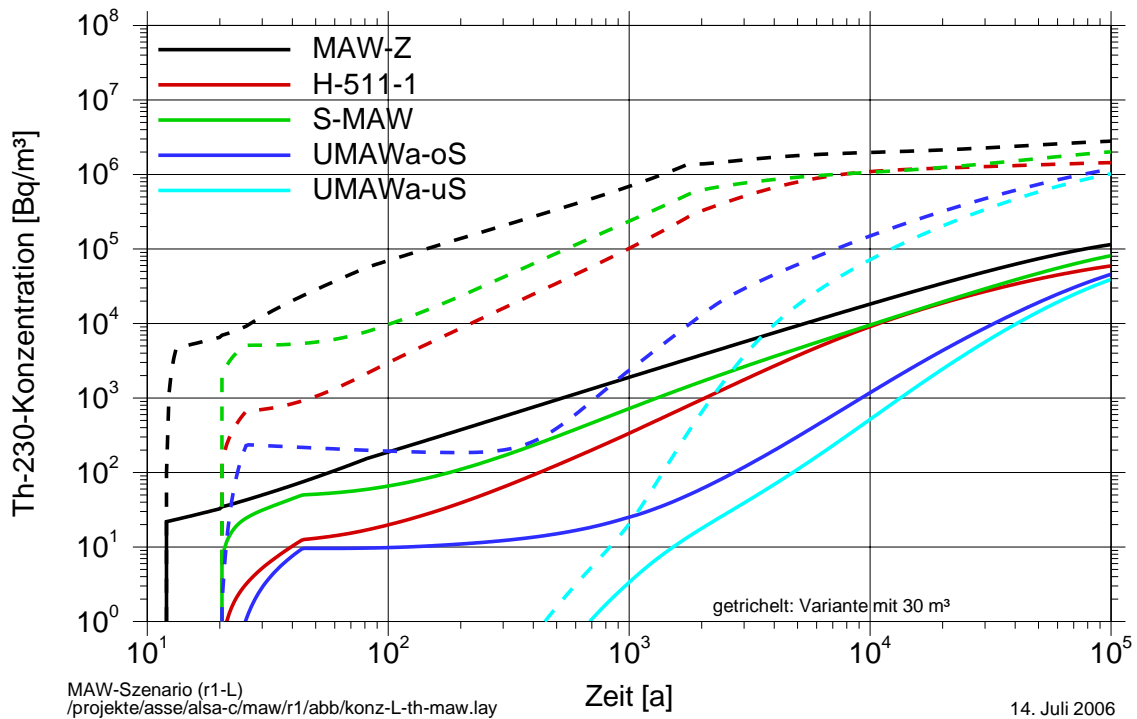


Abb. 5.143 Th-230-Konzentration im MAW-Nahbereich. Durchgezogen: Variante mit 115 m^3
Lösung: RIX.1-L

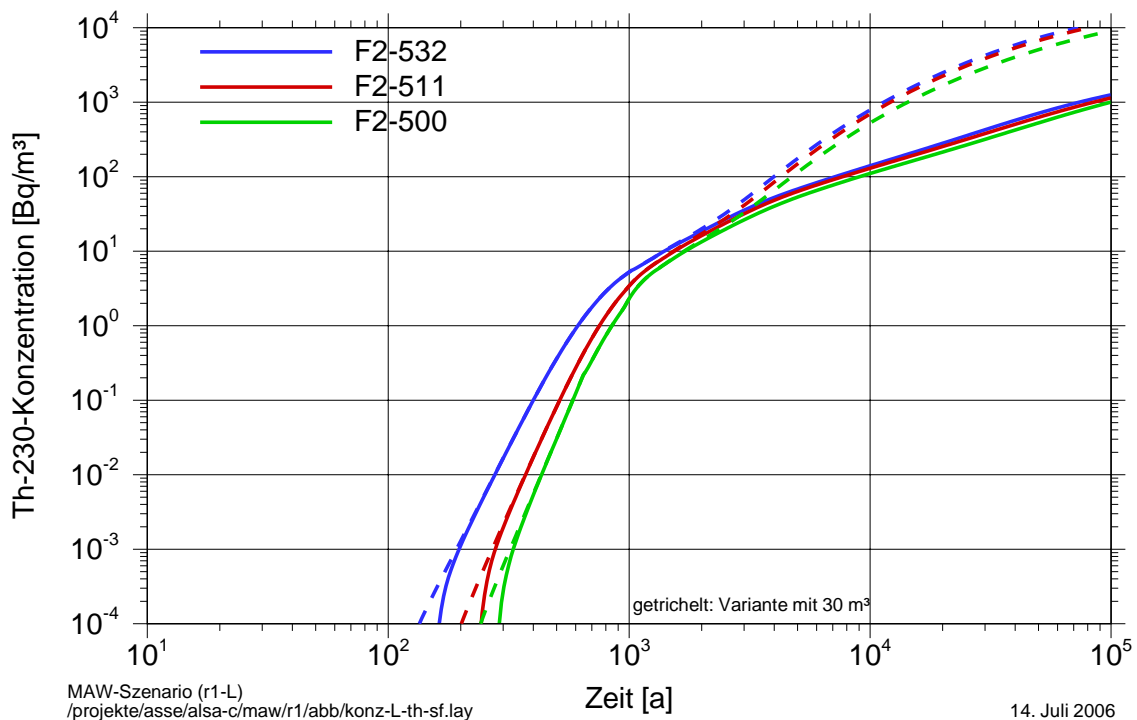


Abb. 5.144 Th-230-Konzentration im Baufeld in der Südflanke. Durchgezogen: Variante mit 115 m^3
Lösung: RIX.1-L

Bei Th-230 ist das Anfangsinventar in der MAW-Kammer gering, es wird durch radioaktiven Zerfall erst langfristig aufgebaut. Folglich ist für das Baufeld in der Südflanke der bei Am-241 beobachtete Anfangseffekt in Abb. 5.144 nicht zu erkennen, vielmehr sind die

Konzentrationen in der Variante „30 m³“ anfangs sogar geringfügig höher, weil die maximalen Elementkonzentrationen nun bemerkbar sind. Im Bereich bis ca. 2000 Jahre sind die Beiträge aus den LAW-Kammern wie bei Am-241 dominant, danach wird aber der Beitrag aus der MAW-Kammer in der Variante „30 m³“ deutlich, da die Th-230-Konzentration in MAW bis zu diesem Zeitpunkt stark ansteigt, siehe Abb. 5.143, und dadurch im Vergleich zu den Beiträgen aus den LAW-Kammern relevant wird. Dadurch liegt die maximale Th-230-Konzentration an der Austrittsstelle in 500 m Teufe um mehr als eine Größenordnung über derjenigen in der Variante „115 m³“, bzw. in der kombinierten Variante. Dieses Verhalten prägt sich dann auch auf die potenziellen Strahlenexpositionen durch, siehe den folgenden Abschnitt.

Potenzielle Strahlenexpositionen

Die Summen der potenziellen Strahlenexpositionen sind ohne und mit Berücksichtigung des MAW für alle Exfiltrationsgebiete nahezu identisch, siehe Abb. 5.145. Nur für das Exfiltrationsgebiet *m-Witt* ist andeutungsweise zu späten Zeiten zu erkennen, dass die Summendosis durch die Beiträge von Ra-226 und Pb-210 aus dem MAW-Bereich geringfügig ansteigt. Dies ist durch die höheren Konzentrationen von Th-230 im Baufeld in der Südflanke bedingt, die durch den Beitrag der MAW-Abfälle stärker ansteigen als bei alleiniger Berücksichtigung des Th-230 aus den LAW-Kammern. Dies macht sich bei den Tochternukliden Ra-226 und Pb-210 bemerkbar.

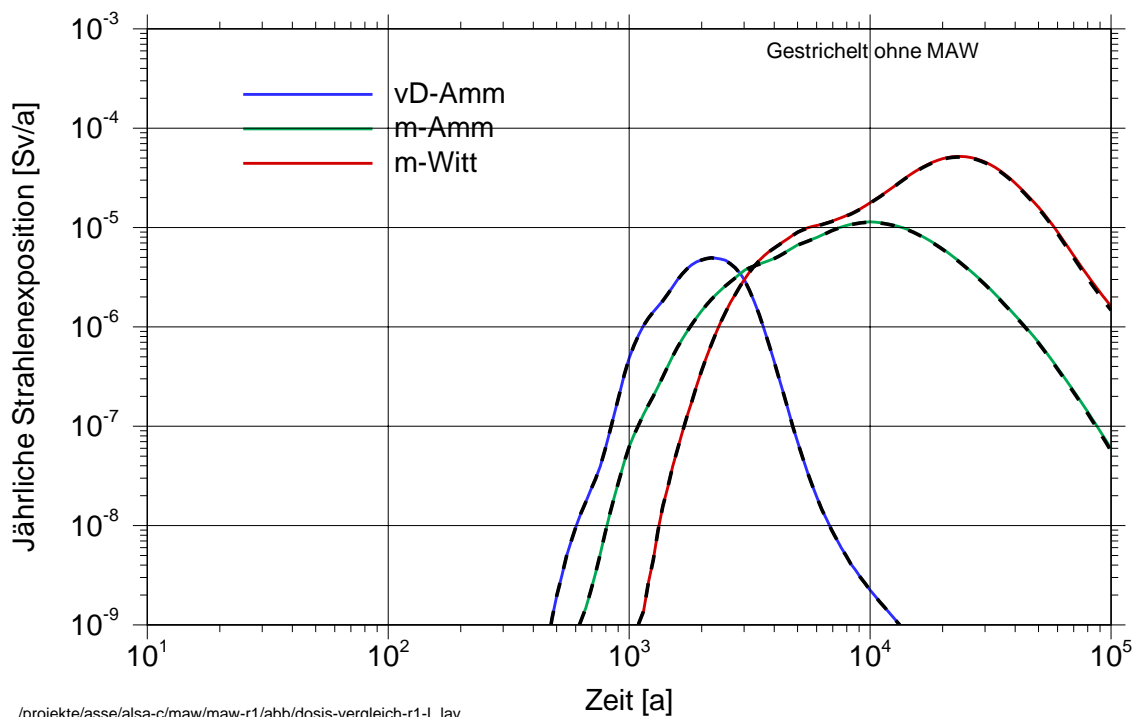


Abb. 5.145 Summen der jährlichen Strahlenexpositionen: RIX.1-L (Variante 30 m³)

5.8.6.3 *Schlussfolgerungen aus den LOPOS-Rechnungen zu RIX.1-L*

Die in die MAW-Kammer eingedrungene Lösung wird zu ca. 99 % in den UMAW-Bereich ausgepresst, der Rest gelangt auf direktem Weg über die Strecke H-511-1 in das Baufeld in der Südflanke. In der Variante mit großem Lösungsvolumen in der MAW-Kammer gelangen trotz dem geringen Lösungsstrom so viele Radionuklide auf direktem Weg in das Baufeld in der Südflanke, dass zu frühen Zeiten einige kurzlebige Radionuklide aus dem MAW die Radiotoxizität der in Lösung in das Deckgebirge freigesetzten Schadstoffen dominieren, aber auf sehr kleinem Niveau. In der Variante mit kleinem Lösungsvolumen ist die Menge der direkt in das Baufeld zutretenden Radionuklide so gering, dass sie gegenüber den Radionukliden aus den LAW-Einlagerungsbereichen nicht relevant sind.

Im Vergleich zu den Rechnungen im Schlussbericht 2005 sind die berechneten potenziellen Strahlenexpositionen auch gemäß dem Verdünnungsmodell zu frühen Zeiten viel kleiner, die detaillierte Abbildung des MAW-Nahbereichs bildet die zu erwartende Verzögerung des Radionuklidübertritts in das Deckgebirge durch den Radionuklidtransport im Grubengebäude realitätsnäher ab.

5.8.7 *Varianten des LsgMAW-Szenarios (RIX.2-K)*

5.8.7.1 *Gasspeicher und Gasflüsse im Umfeld der MAW-Kammer*

Die effektiven residualen Gasspeicher in Variante RIX.2-K entsprechen den Werten der Variante RIX.1-K. Die relative Lösungsspiegelhöhe in ausgewählten Modellkammern der Abbaue 8a/532 und 8b/532 sowie in der MAW-Kammer zeigt Abb. 5.146. Analog zu RIX.1-K steigt der Lösungspegel in den Modellkammern im Nahbereich der MAW ab etwa 4,5 Jahren durch den Zustrom von Schutzfluid aus dem Baufeld in der Südflanke an. Nach 10 Jahren sind alle Modellsegmente unterhalb der MAW-Modellkammer bis auf die residuale Gassättigung vollständig mit Schutzfluid gefüllt. Begünstigt durch den Abfluss der anfänglichen Grubenluft über die Verbindung H_511_1 (Abb. 5.147), steigt in der MAW-Modellkammer der Lösungspegel bis etwa 20 Jahre zunächst bis zu einer relativen Füllhöhe von ca. 28 % an. Aufgrund der gegenüber RIX.1-K geringeren Gasbildung ist diese maximal erreichte Lösungsfüllhöhe in der MAW-Modellkammer geringfügig größer als in Variante RIX.1-K. Während der Lösungszustrom in dieser Phase über die Schwebe erfolgt, wird ein Teil dieser Lösung durch die einsetzende Gasbildung bereits wieder in die Verbindung H_511_1 verdrängt (Abb. 5.148).

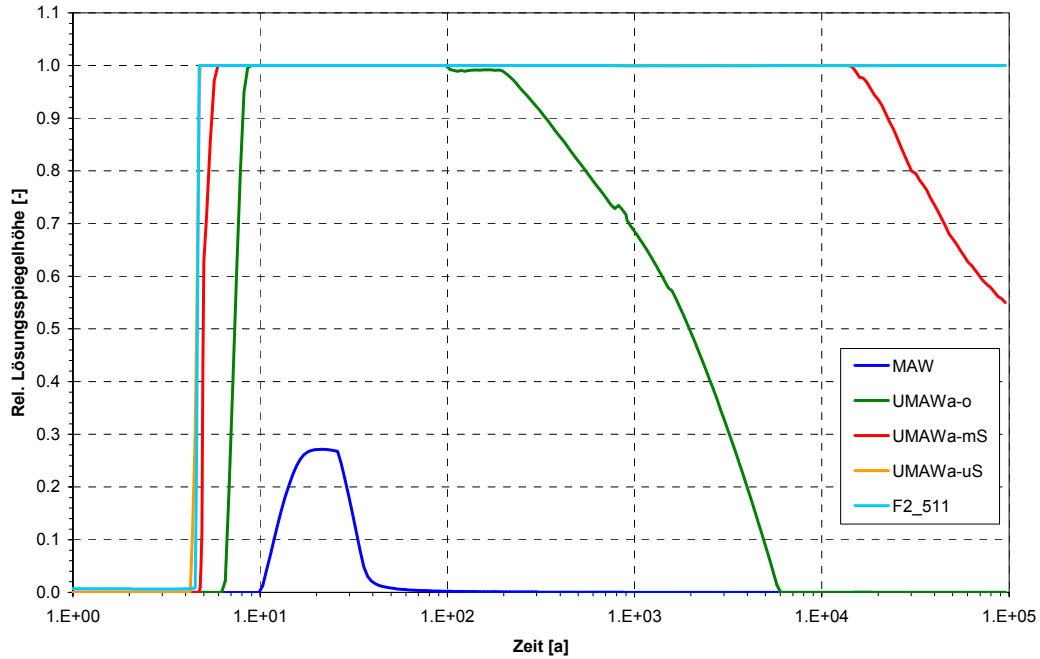


Abb. 5.146 Relative Lösungsspiegelhöhe in ausgewählten Modellkammern der Abbaue 8a/532 und 8b/532 sowie der MAW-Kammer: Variante RIX.2-K

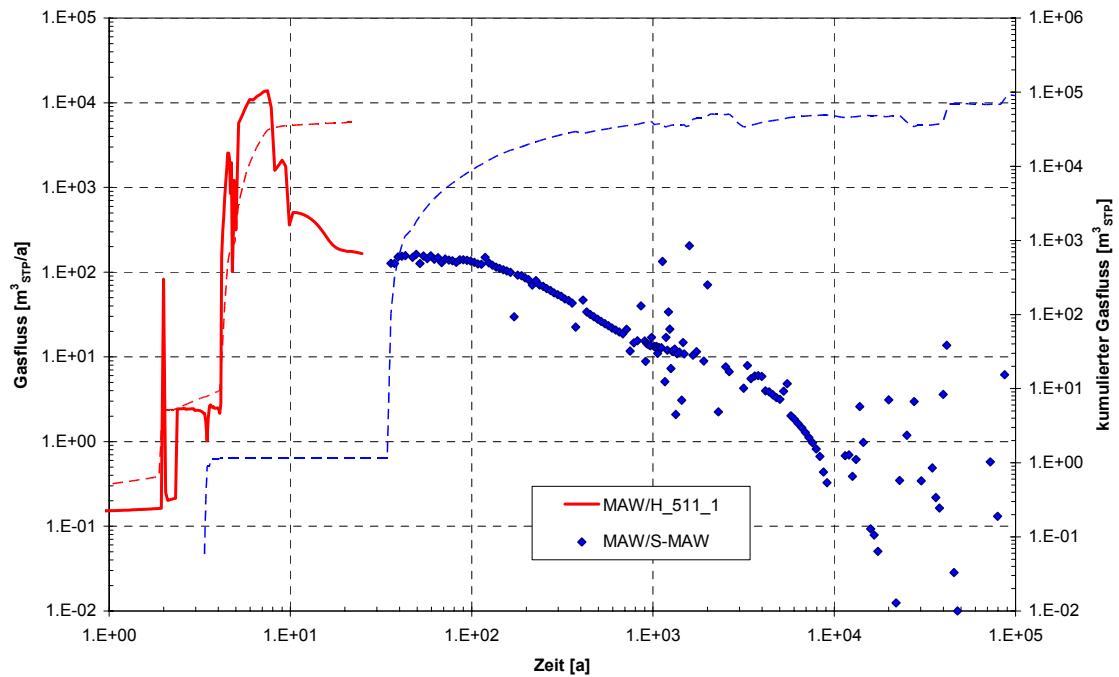


Abb. 5.147 Gasabfluss aus der MAW-Modellkammer, gestrichelt kumulierter Gasabfluss³⁹: Variante RIX.2-K

³⁹ Die Zunahme im kumulierten Gasfluss über die Schwabe zu sehr späten Zeiten ist das Resultat von – numerisch bedingten – Fluktuationen im Gasfluss und wird nicht als belastbar eingestuft.

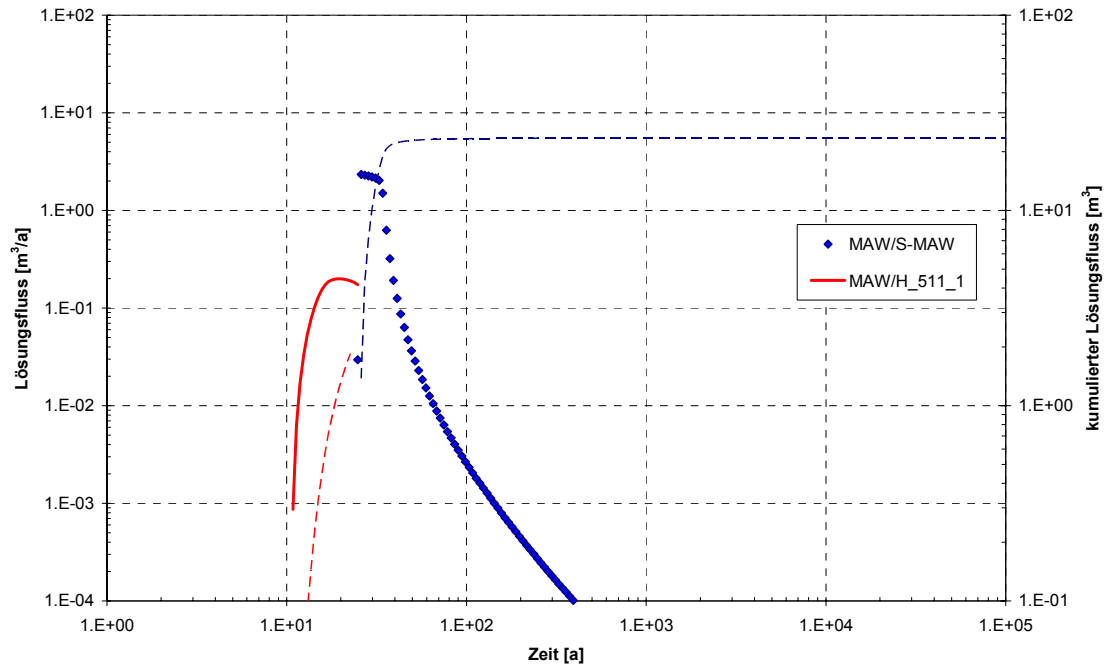


Abb. 5.148 Lösungsfluss aus der MAW-Modellkammer, gestrichelt kumulierter Lösungsfluss:
Variante RIX.2-K

Nach 25 Jahren steht entsprechend dem Modellkonzept die Verbindung H_511_1 nicht mehr für den Gas- und Lösungsfluss zur Verfügung. Die MAW-Modellkammer besitzt ab diesem Zeitpunkt nur noch die Schwebel zum Abbau 8a/532 als Verbindung zum Nahbereich. Damit verbunden ist ein markanter Wechsel im Gas- und Lösungsfluss aus der MAW: Ab diesem Zeitpunkt fließt sowohl Gas als auch Lösung aus der MAW über die Schwebel ab (Abb. 5.147 und Abb. 5.148). Der Lösungspegel in der MAW-Modellkammer nimmt in Folge der Lösungsverdrängung durch das gebildete Gas ab, bis nach etwa 80 Jahren die mobile Lösung aus dem Porenraum der MAW-Modellkammer weitestgehend ausgepresst wurde. Der Lösungsabfluss aus der MAW-Modellkammer über die Schwebel nimmt entsprechend ab und liegt nach 100 Jahren bereits bei $0,002 \text{ m}^3/\text{a}$.

Nach ca. 100 Jahren setzt in den oberen Modellkammern der Abbaue 8a/532 und 8b/532 bedingt durch den Gaszufluss aus der MAW die Absenkung des Lösungsspiegels ein (Abb. 5.146) Diese dauert bis etwa 6 000 Jahre an. Da bei dem dann herrschenden Druck der Gaseindringdruck der Auflockerungszone um die Strömungsbarriere in der Strecke H_8b_F (mit Strömungsbarriere versehene Verbindung im Firstniveau in das Baufeld in der Südflanke) nicht überschritten wird, führt die konvergenzbedingte Abnahme des Porenvolumens in den Abbauen 8a/532 und 8b/532 in deren oberen Bereichen zur Ausdehnung des Gaspolsters, während Lösung aus den Abbauen über die söhliglen Durchhiebe zum Baufeld in der Südflanke verdrängt wird. In der Folge sinkt der Lösungspegel bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes kontinuierlich bis auf eine Teufe von ca. 524 m ab⁴⁰.

⁴⁰ Dieser Effekt ist als konservativ abdeckend bezüglich der Lösungs- und Tracerverdrängung aus dem Nahbereich zu bewerten. Es kann durch hier nicht dokumentierte Berechnungen gezeigt werden, dass bei geringfügig höheren Drücken der Gaseindringdruck der Strecke H_8b_F überwunden und dadurch der Lösungsabfluss aus den Abbauen 8a/532 und 8b/532 verringert wird.

5.8.7.2 Tracertransport im Nahbereich der MAW, im Baufeld in der Südflanke und Übertritt in das Deckgebirge

Die Flüsse der Tracer aus dem MAW-Einlagerungsbereich zeigen Abb. 5.149 und Abb. 5.150. Neben den Flüssen im Nahbereich der MAW ist auch die Freisetzung aus dem Grubengebäude ins Deckgebirge sowie der Fluss im Modell-Rötanhydrit (RA2/V-RA3V) dargestellt. Gestrichelt sind zusätzlich die kumulierten Tracerflüsse aus der MAW (über die Schwebel – dunkelblau – und über die Verbindung H_511_1 – rot) sowie aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge (über die Verbindung DG500) eingefügt.

Mit dem Einsetzen des Lösungsabflusses aus der MAW-Modellkammer in die Verbindung H_511_1 (zum Baufeld in der Südflanke) nach 10 Jahren und in die Schwebel (zum Abbau 8a/532) nach 20 Jahren setzen auch entsprechende advective Tracerabflüsse⁴¹ ein. Mit dem Schließen der Verbindung H_511_1 nach 25 Jahren gibt es nur noch einen Tracerfluss aus der MAW-Modellkammer über die Schwebel. Nach einem kurzfristigen Anstieg geht dieser als Folge des abnehmenden Lösungsabflusses bis 100 Jahre deutlich zurück. Im weiteren Verlauf, wenn Lösung aus der MAW-Modellkammer bis auf die residuale Lösungssättigung vollständig ausgepresst wurde, erfolgt der Traceraustrag aus der MAW diffusiv.

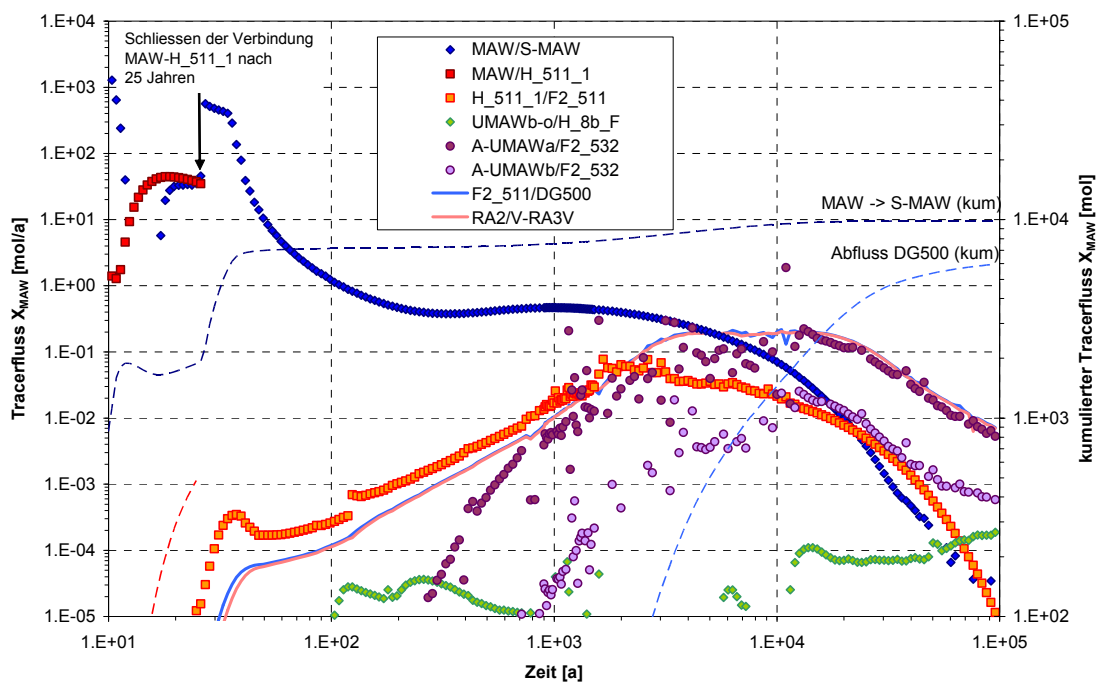


Abb. 5.149 Fluss des Tracers X_{MAW} im Nahbereich der MAW, im Baufeld in der Südflanke und im Deckgebirge; gestrichelt kumulierter Tracerfluss: Variante RIX.2-K

⁴¹ Bereits vor dem Einsetzen der Lösungsflüsse sind diffusive Tracerabflüsse feststellbar.

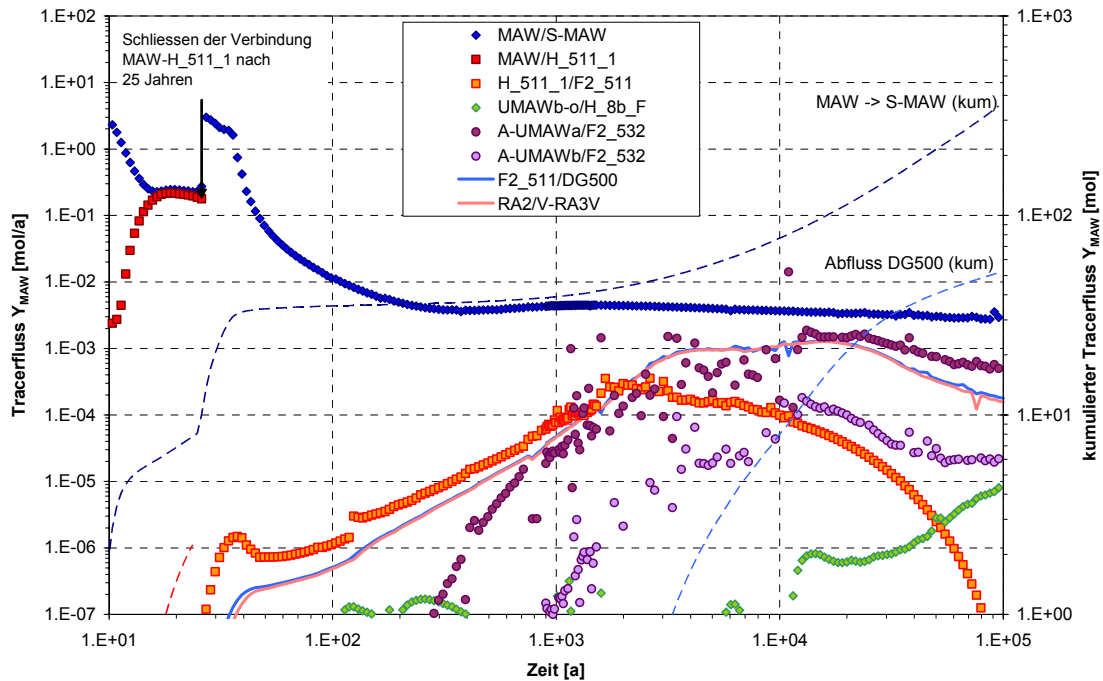


Abb. 5.150 Fluss des Tracers Y_{MAW} im Nahbereich der MAW, im Baufeld in der Südflanke und im Deckgebirge; gestrichelt kumulierter Tracerfluss: Variante RIX.2-K

Innerhalb der Modellsegmente, welche die Abbaue 8a/532 und 8b/532 abbilden, erfolgt der Tracertransport dominant über jene des Abbaus 8a/532, der über die Schwebel mit der MAW-Modellkammer verbunden ist. Als Folge des Transports durch die Abbaue 8a/532 und 8b/532 und der resultierenden Verdünnung setzt der Fluss der MAW-Tracer aus 8a/532 und 8b/532 in die söligen Durchhiebe zum Baufeld in der Südflanke in relevantem Maße zunächst aus UMAWa-uS, später aus UMAWb-uS aber insgesamt etwas früher als in RIX.1-K ein. Der Grund hierfür liegt in der vollständigen Auspressung der tracerhaltigen Lösung aus der MAW über die Schwebel. Die Maxima in den Tracerflüssen über die beiden Segmente A-UMAWa und A-UMAWb werden ähnlich wie in RIX.1-K nach 7 000 bis 13 000 Jahren erreicht (Tab. 5.44).

Tab. 5.44 Vergleich der Maxima der Flüsse der X- und Y-Tracer: Aus dem MAW-Nahbereich in das Baufeld in der Südflanke und im Übertritt in das Deckgebirge, Variante RIX.2-K (zum Vergleich: Werte aus RIX.1-K)

	X_{MAW}	Y_{MAW}
Pfad: H_511_1 → F2_511		
Zeitpunkt des Maximums [a]	1 700 (2 500)	1 700 (13 000)
Maximaler Fluss [mol/a]	0,07 (0,04)	$3,6 \cdot 10^{-4}$ ($5,5 \cdot 10^{-4}$)
Pfad: A-UMAWa → F2_532		
Zeitpunkt des Maximums [a]	6 900 *) (8 500)	13 000 *) (12 000)
Maximaler Fluss [mol/a]	0,11 *) (0,36)	$1,3 \cdot 10^{-3}$ *) ($7,0 \cdot 10^{-3}$)
Pfad: A-UMAWb → F2_532		
Zeitpunkt des Maximums [a]	13 000 *) (11 200)	13 000 *) (12 000)
Maximaler Fluss [mol/a]	0,03 *) (0,02)	$1,8 \cdot 10^{-4}$ *) ($3,2 \cdot 10^{-4}$)
Pfad: F2_511 → DG_500		
Zeitpunkt des Maximums [a]	10 000 (15 000)	17 000 (17 000)
Maximaler Fluss [mol/a]	0,22 (0,17)	$1,3 \cdot 10^{-3}$ ($3,4 \cdot 10^{-3}$)

*) Ohne Berücksichtigung der Fluktuationsmaxima zwischen 2 000 Jahren und 11 000 Jahren

Die maximalen Fließraten variieren zwischen den Rechenfällen RIX.1-K und RIX.2-K für den Tracer X_{MAW} nur geringfügig, für den Tracer Y_{MAW} betragen sie in RIX.2-K etwa ein Drittel bis ein Viertel des jeweiligen Wertes in RIX.1-K. Zum Tracerfluss aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge über die Verbindung DG500 trägt bis etwa 1 000 Jahre auch in RIX.2-K die Strecke H_511_1 bei. Durch den advektiven Zustrom von Tracer aus der MAW in diese Strecke bis 25 Jahre wird auch im weiteren Verlauf diffusiv Tracer in das Baufeld in der Südflanke aus H_511_1 ausgetragen. Das jeweilige Maximum der Tracerfreisetzung aus dem Grubengebäude wird aber deutlich durch den Betrag aus den Abbauen 8a/532 und 8b/532 (über die Verbindungen A-UMAWa und A-UMAWb) bestimmt.

Das Maximum im Fluss von X_{MAW} in das Deckgebirge wird nach 10 000 Jahren und damit 5 000 Jahre früher als in RIX.1-K erreicht, wobei sich die Maximalwerte zwischen den beiden Rechenfällen nur wenig unterscheiden (Abb. 5.151). Für Y_{MAW} resultiert das Maximum, das nur ca. ein Drittel des Wertes in RIX.1-K beträgt, nach 17 000 Jahren wie in RIX.1-K. Zwischen 1 000 Jahren und etwa 5 000 Jahren liegt der Tracer-Fluss allerdings deutlich über

jenem in der Variante RIX.1-K. Die gegenüber RIX.1-K geringeren Tracerflüsse zwischen 100 Jahren und etwa 1 000 Jahren spiegeln den geringeren Beitrag aus der Strecke H_511_1 wider.

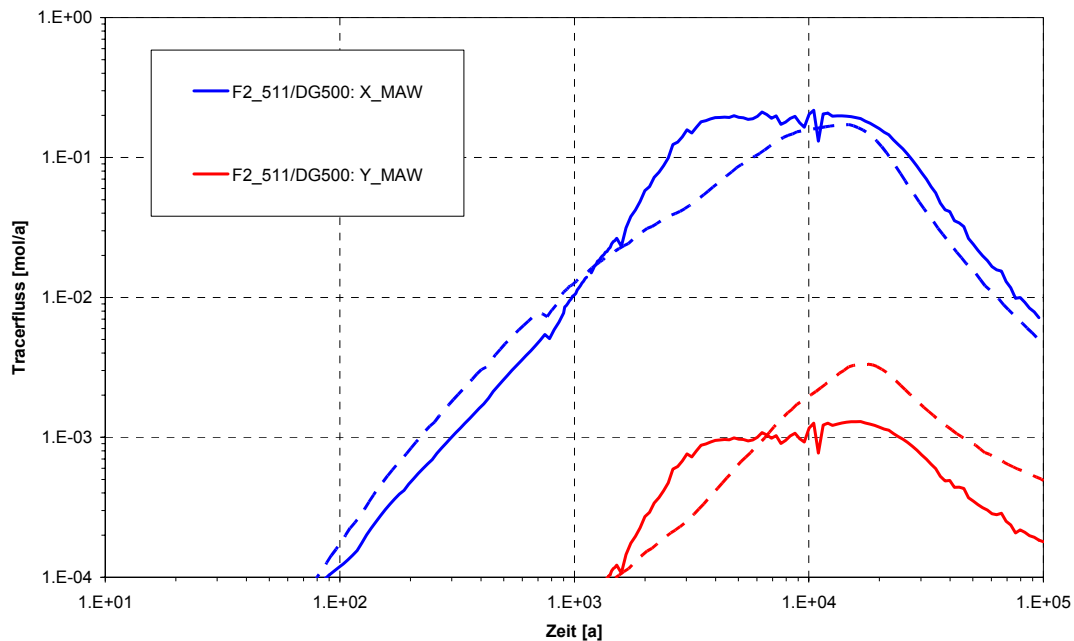


Abb. 5.151 Fluss der Tracer aus der MAW in das Deckgebirge: Variante RIX.2-K, gestrichelt Variante RIX.1-K

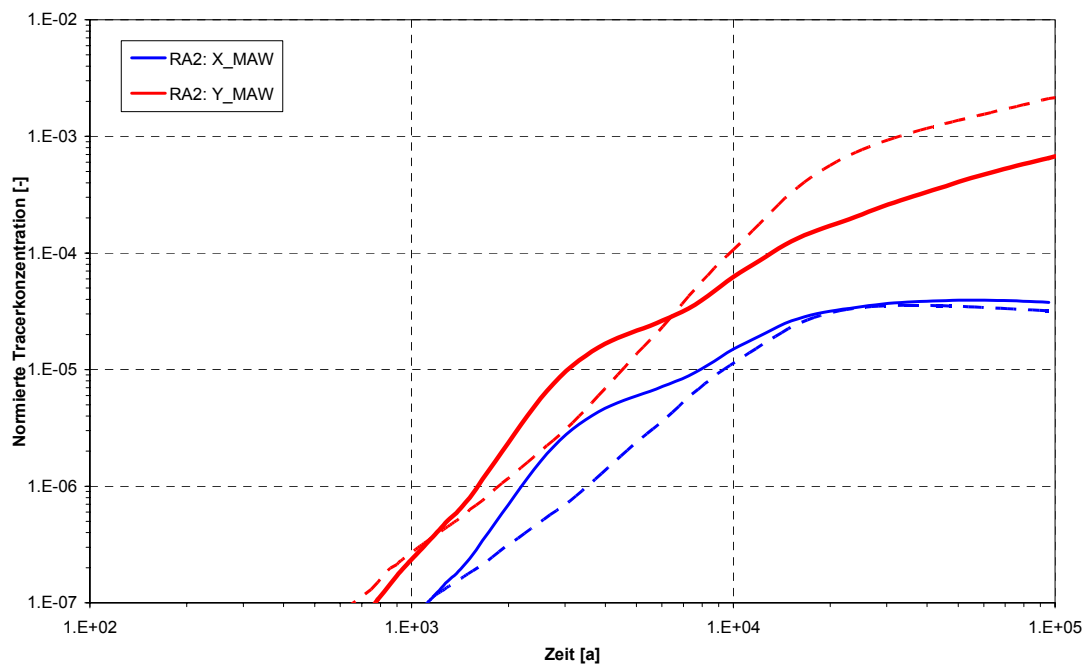


Abb. 5.152 Auf die jeweilige maximale Konzentration in der MAW normierte Konzentration der Tracer im Deckgebirge (Modellsegment RA2): Variante RIX.2-K, gestrichelt Variante RIX.1-K

Für die Ausbreitung der Tracer aus der MAW ist der Weg über die Abbaue 8a/532 und 8b/532 insgesamt der dominierende Ausbreitungspfad, der eine Verzögerung von einigen tausend Jahren bewirkt. Verglichen mit RIX.1-K sind die erhöhte Lösungsauspressung aus der MAW-Kammer in Form eines rascheren Transports des Tracers im Nahbereich der MAW und eines beschleunigten Anstiegs der Tracerfreisetzung aus dem Grubengebäude ab etwa 1 000 Jahre sichtbar.

In den Modellsegmenten der Abbaue 8a/532 und 8b/532 sowie im Baufeld in der Südflanke erfahren die Tracer aus MAW eine deutliche Verdünnung und eine Verzögerung im Konzentrationsanstieg (Tab. 5.45). Zu berücksichtigen ist, dass durch die Zusammenfassung der obersten Modellsegmente der Abbaue 8a/532 und 8b/532 gegenüber der Variante RIX.1-K (vgl. Kap. 5.8.3 und Anhang A.1) die Verdünnung in diesen Bereichen erhöht ist. Deutlich zeigt sich auch, dass der Tracertransport vorrangig über den Abbau 8a/532 erfolgt. Im Vergleich zur Variante RIX.1-K steigt die Konzentration im oberen Bereich des Abbaus 8a/532 deutlich früher an – bei vergleichbaren maximalen Konzentrationswerten. An der Sohle der Abbaue 8a/532 und 8b/532 sind im Vergleich zu RIX.1-K höhere Konzentrationsmaxima und in 8a/532 auch zu früheren Zeiten feststellbar. Im Rötanhydrit wird das Maximum der Konzentration des Tracers X_{MAW} nur gering beeinflusst (Abb. 5.152).

Tab. 5.45 Vergleich der Maxima der Konzentrationen des Tracers X_{MAW} im Nahbereich der MAW und im Baufeld in der Südflanke (normiert auf die anfängliche, maximale Konzentration in der MAW): Variante RIX.2-K (z. Vgl.: Werte aus RIX.1-K)

X_{MAW}	Maximale normierte Tracerkonzentration [-]	Zeitpunkt der max. Konzentration [a]
Mittelpunkt S-MAW	0,18 (0,08)	120 (500)
UMAWa-o	$4,5 \cdot 10^{-3}$ (UMAWa-oS, $5,6 \cdot 10^{-3}$)	140 (UMAWa-oS, 3 400)
UMAWb-o	$2,4 \cdot 10^{-4}$ (UMAWb-oS $1,6 \cdot 10^{-4}$)	96 000 (UMAWb-oS, $\geq 10^5$ *)
UMAWa-uS	$4,5 \cdot 10^{-3}$ ($2,5 \cdot 10^{-3}$)	7 000 (13 000)
UMAWb-uS	$2,7 \cdot 10^{-4}$ ($1,6 \cdot 10^{-4}$)	$\geq 10^5$ *) ($\geq 10^5$ *)
F2_532	$5,2 \cdot 10^{-5}$ ($5,0 \cdot 10^{-5}$)	36 000 (21 000)
F2_511	$4,8 \cdot 10^{-5}$ ($4,3 \cdot 10^{-5}$)	50 000 (35 500)
RA2	$4,0 \cdot 10^{-5}$ ($3,6 \cdot 10^{-5}$)	55 000 (35 500)

* Konzentration ansteigend bis zum Ende des Betrachtungszeitraums

5.8.7.3 Tracerkonzentrationen nach Transfer im Deckgebirge

Die resultierenden Tracerkonzentrationen der Tracer aus dem MAW-Einlagerungsbereich an den drei Exfiltrationsgebieten *Verstürztes Deckgebirge – Tal der Ammerbeek (vD-Amm)*, *Muschelkalk – Tal der Ammerbeek (m-Amm)* und *Muschelkalk – Tal von Wittmar (m-Witt)* zeigen Abb. 5.153 und Abb. 5.154. Ähnlich wie im Vergleich der beiden Varianten RX.5-K und RX.7-K, die bezüglich des verwendeten konzeptionellen Modells des Deckgebirges den Rechenfällen RIX.1-K und RIX.2-K entsprechen (vgl. Kap. 5.5.2) resultieren auch zwischen RIX.1-K und RIX.2-K in den Tracerkonzentrationen für die drei Exfiltrationsgebiete erhebliche Unterschiede. Die Bedeutung des Exfiltrationsgebiets *vD-Amm* nimmt gegenüber RIX.1-K markant zu: Die Maximalkonzentrationen liegen in diesem Exfiltrationsgebiet annähernd zwei Größenordnungen über jenen in RIX.1-K, wobei diese Maxima gut 1 500 Jahre später erreicht werden. Die höchsten Tracerkonzentrationen aller drei Exfiltrationsgebiete werden nach wie vor im Gebiet *m-Witt* erreicht, auch wenn hier die Maximalwerte gegenüber RIX.1-K um 40 % (X_{MAW}) bzw. 80 % (Y_{MAW}) zurückgegangen sind. Die Zeitpunkte des Eintretens der Tracermaxima liegen gegenüber RIX.1-K um ca. 40 000 Jahre später.

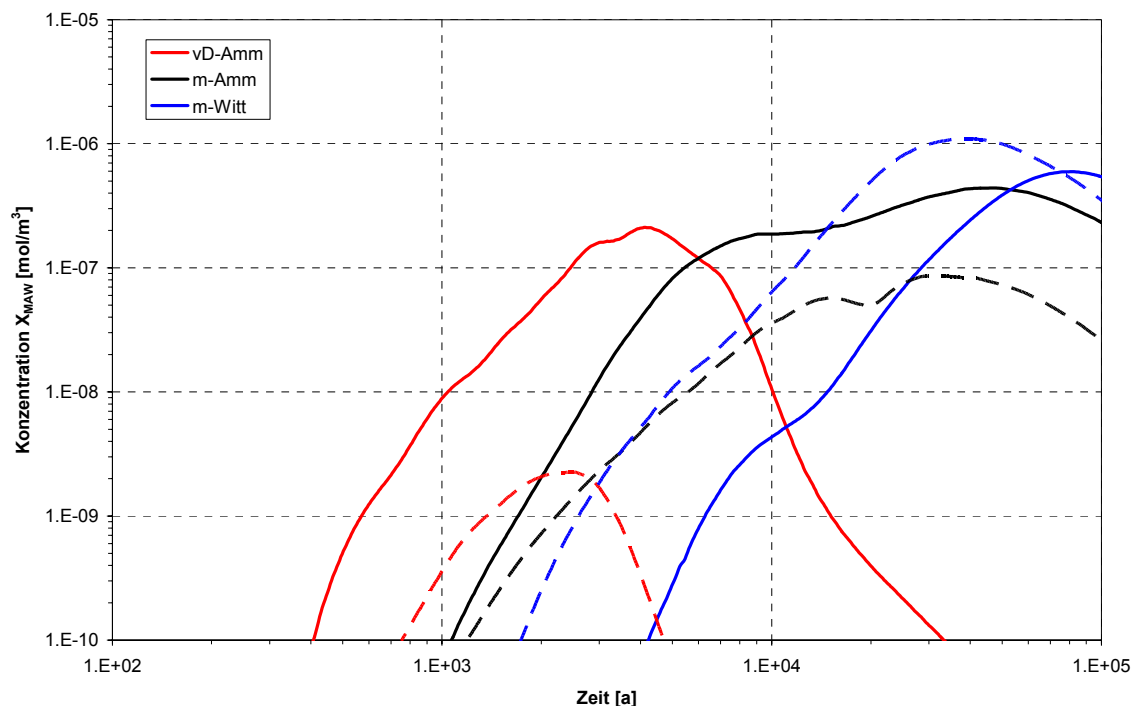


Abb. 5.153 X_{MAW} -Tracerkonzentration für die drei Exfiltrationsgebiete: Variante RIX.2-K, gestrichelt Variante RIX.1-K

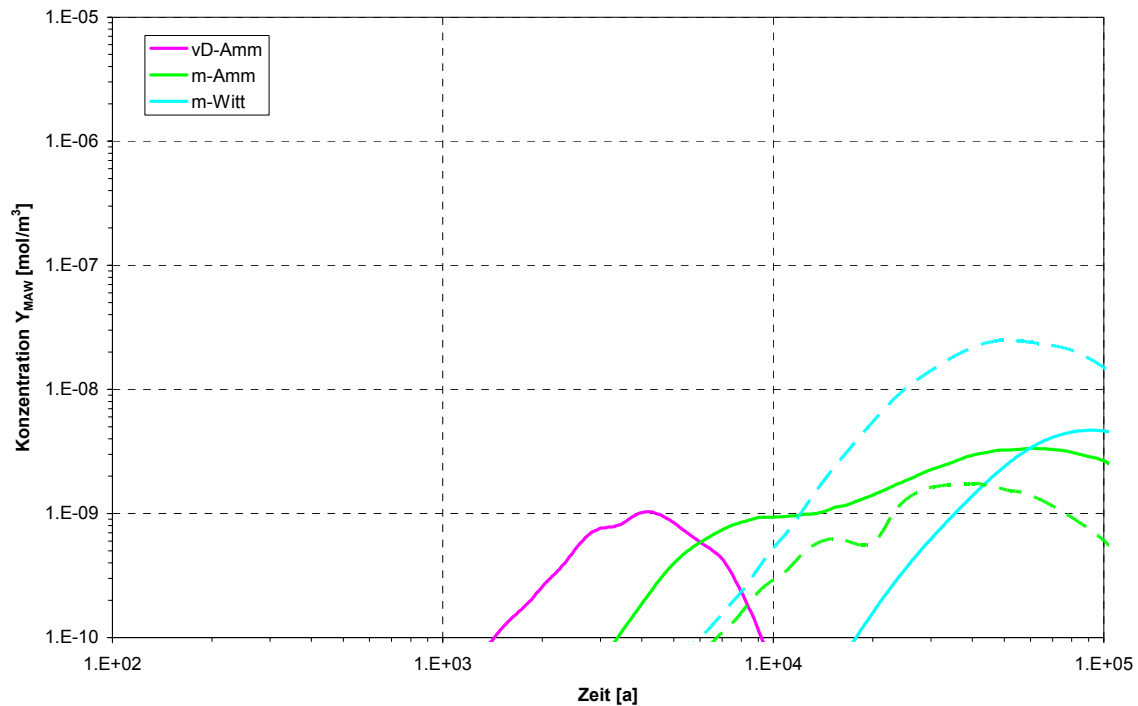


Abb. 5.154 Y_{MAW} -Tracerkonzentration für die drei Exfiltrationsgebiete: Variante RIX.2-K, gestrichelt Variante RIX.1-K

Die minimale Gesamtverdünnung der MAW-Tracer im Grubengebäude und im Deckgebirge ist für die Exfiltrationsgebiete *vD-Amm* und *m-Amm* verglichen mit RIX.1-K jeweils geringer, für das Exfiltrationsgebiet *m-Witt* dagegen größer. Die Werte sind grundsätzlich größer als $1 \cdot 10^8$ (Abb. 5.155 und Tab. 5.46).

Tab. 5.46 Vergleich der minimalen Gesamtverdünnung der Tracer aus der MAW im Grubengebäude und Deckgebirge: Variante RIX.2-K (z. Vgl.: Werte aus RIX.1-K)

	<i>vD-Amm</i>		<i>m-Amm</i>		<i>m-Witt</i>	
	min. Gesamtverdünnung	Zeitpunkt der min. Gesamtverdünnung	min. Gesamtverdünnung	Zeitpunkt der min. Gesamtverdünnung	min. Gesamtverdünnung	Zeitpunkt der min. Gesamtverdünnung
X_{MAW}	$9,9 \cdot 10^8$ ($9,9 \cdot 10^{10}$)	4 100 (2 500)	$4,7 \cdot 10^8$ ($2,6 \cdot 10^9$)	47 000 (31 000)	$3,5 \cdot 10^8$ ($2,0 \cdot 10^8$)	82 000 (39 000)
Y_{MAW}	$9,7 \cdot 10^8$ ($9,6 \cdot 10^{10}$)	4 100 (2 500)	$3,8 \cdot 10^8$ ($5,7 \cdot 10^8$)	60 000 (41 000)	$2,1 \cdot 10^8$ ($4,0 \cdot 10^7$)	91 000 (50 000)

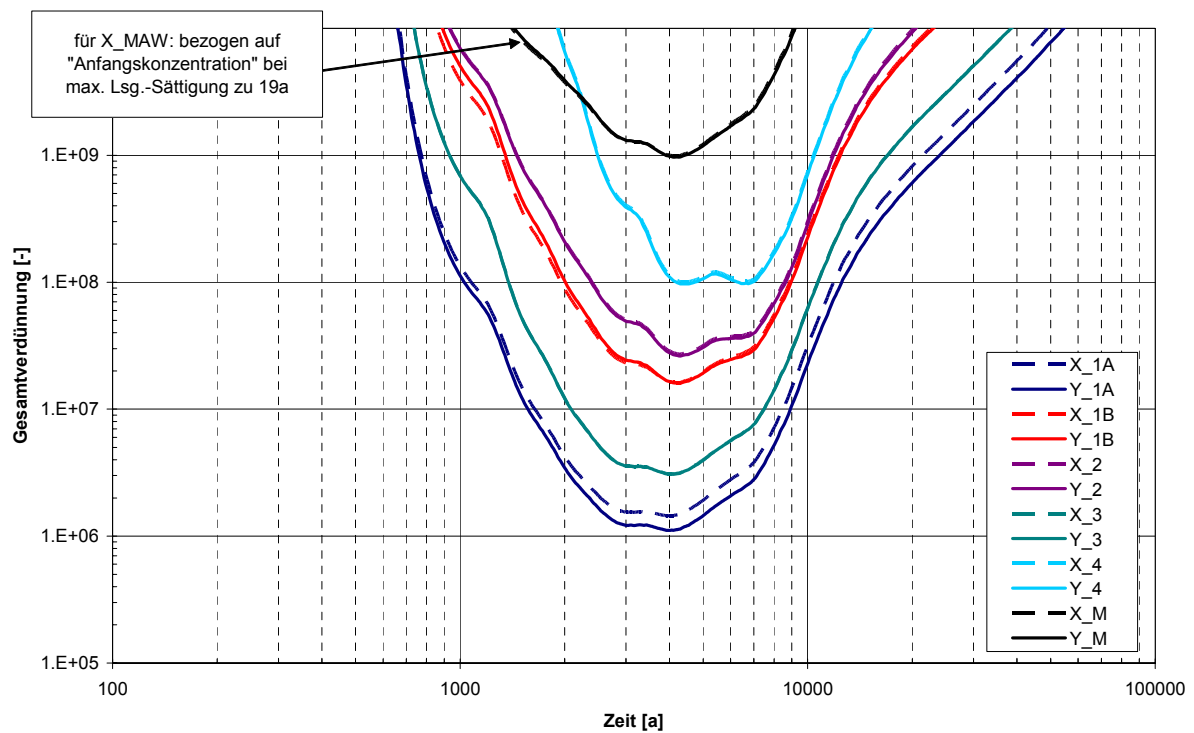
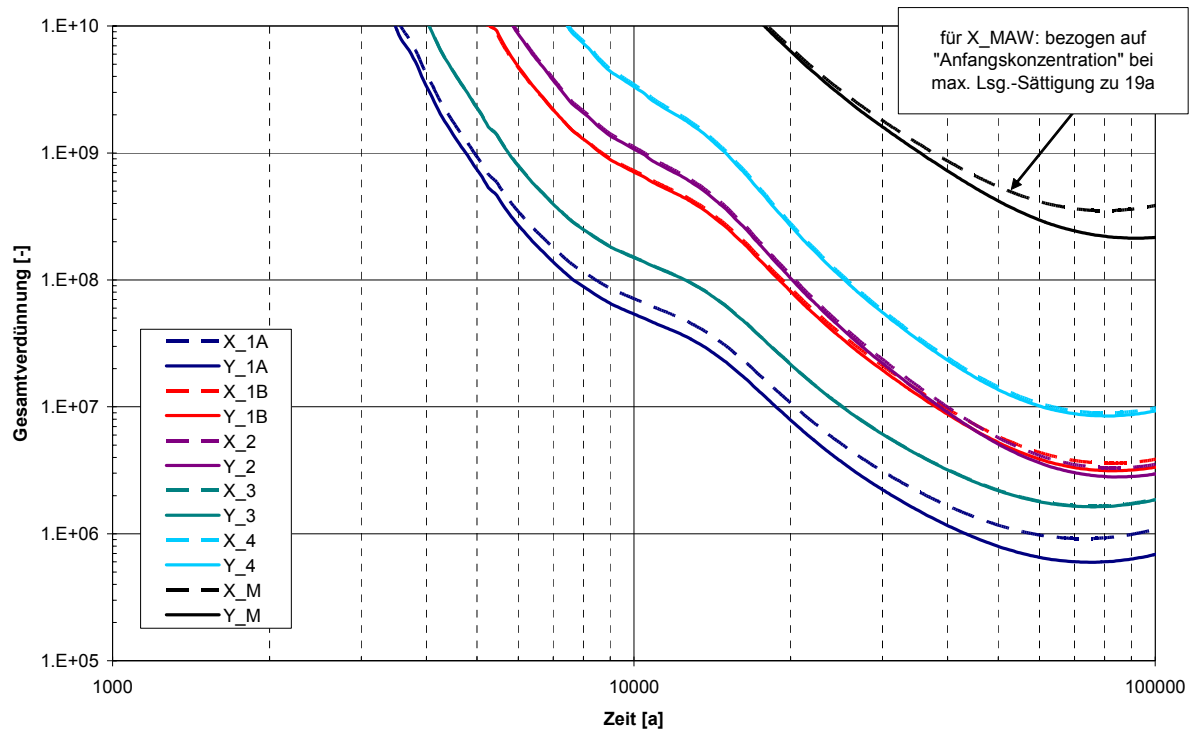


Abb. 5.155 Gesamtverdünnung der Tracer aus MAW im Gruben- und im Deckgebirge für die Exfiltrationsgebiete *m-Witt* (oben) und *vD-Amm* (unten): Variante RIX.2-K

5.8.7.4 Schlussfolgerungen aus dem Rechenfall RIX.2-K

Die Variante RIX.2 des alternativen Szenarios *LsgMAW* stellt eine Kombination eines wenig wahrscheinlichen Nahfeldszenarios mit wenig wahrscheinlichen Verhältnissen im

Deckgebirge dar und soll im Sinne einer abdeckenden Betrachtung den Einfluss eines kurzen Weges über das verstürzte Deckgebirge zum Exfiltrationsgebiet Ammerbeek aufzeigen. Dazu wird eine Gasbildung unterstellt, die eine vollständige korrosive Umsetzung bei einem Lösungskontakt der Hälfte des Fasskegels unter anaerob-feuchten Verhältnissen voraussetzt. Damit diese Gasbildung zu einer vollständigen Verdrängung der Lösung aus der MAW führen kann, wird – modelltechnisch – die Verbindung über den Durchrieb mit Sorelbeton und Strahlenschutzmauer nach 25 Jahre unterbrochen. In der Folge wird sämtliche Lösung bis ca. 100 Jahre aus der MAW-Kammer ausgepresst.

Dies führt auch zu einer zunehmenden Lösungs-Entsättigung in den oberen Bereichen der Abbaue 8a/532 und 8b/532 und damit zu einer zusätzlichen Verdrängung von Lösung aus dem Nahbereich.

Die Tracer aus der MAW gelangen über die Schwebel in den Nahbereich, jedoch nach der vollständigen Auspressung der mobilen Lösung ab etwa 100 Jahren nur noch diffusiv. Die Tracerflüsse aus dem Nahbereich werden gegenüber der Variante RIX.1-K etwas (um ca. 2 000 bis 3 000 Jahre) beschleunigt, erfahren aber im Baufeld in der Sudflanke gleichfalls eine Verdünnung. Letztendlich resultieren daraus im Maximum etwa gleich hohe, aber gegenüber RIX.1-K beschleunigte Flüsse in das Deckgebirge.

Insgesamt wirken sich die betrachteten Effekte auf die relativ frühe Exposition im *vD-Amm* mit einer Erhöhung im Maximum – hier erst nach ca. 4 000 Jahren - um etwa zwei Größenordnungen aus, in erster Linie aufgrund der Verhältnisse im Deckgebirge. Auf die – nach wie vor höheren – späten Maxima im Expositionspfad *m-Witt* nach ca. 80 000 bis 90 000 Jahren haben die betrachteten Effekte eher einen dämpfenden Einfluss.

5.8.8 Modellergebnisse LOPOS (RIX.2-L)

Dieser Rechenfall basiert wie RIX.1-L auf dem Strukturmodell D5. Es wird aber angenommen, dass die horizontale Verbindungsstrecke H-511-1 nur für eine kurze Zeit durchlässig ist, so dass Gas nur während der Auffüllphase der MAW-Kammer über diese Strecke abfließen kann. Während der Auspressphase von Lösung aus der MAW-Kammer ist die Strecke als undurchlässig angenommen, so dass der gesamte Gas- und Lösungstransport über den UMAW-Bereich erfolgt. Folglich wird auch ein Gasspeichervolumen in den Zusatzsegmenten des TOPs von UMAW von 99% des Gesamtvolumens angenommen.

Das anfangs zugeflossene Lösungsvolumen in der MAW-Kammer wird wie in der Variante 2 des Rechenfalls RIX.1-L als 30 m³ angenommen, siehe Kapitel 5.8.6.2. Auch die zugehörigen maximalen Elementkonzentrationen werden verwendet. Für die Gasbildung werden ebenfalls anaerob-feuchte Bedingungen angenommen, jedoch wegen der begrenzten Lösungsmenge mit einer Begrenzung der gesamt gebildeten Gasmenge, siehe Kapitel 5.8.4. Die Schnittstelle zum Deckgebirge basiert wie in der Variante RX.7-L auf dem Deckgebirgsrechenfall DR12.

Volumina

Abb. 5.156 zeigt die Volumina im Teilbereich MAW-Z der MAW-Kammer. Die Kurvenverläufe sind ähnlich wie im Rechenfall RIX.1-L, Variante 2 (vergleiche Abb. 5.136), jedoch ist wegen der geringeren Gasbildung das Auspressen der Lösung langsamer und erst bei ca. 37 Jahren beendet.

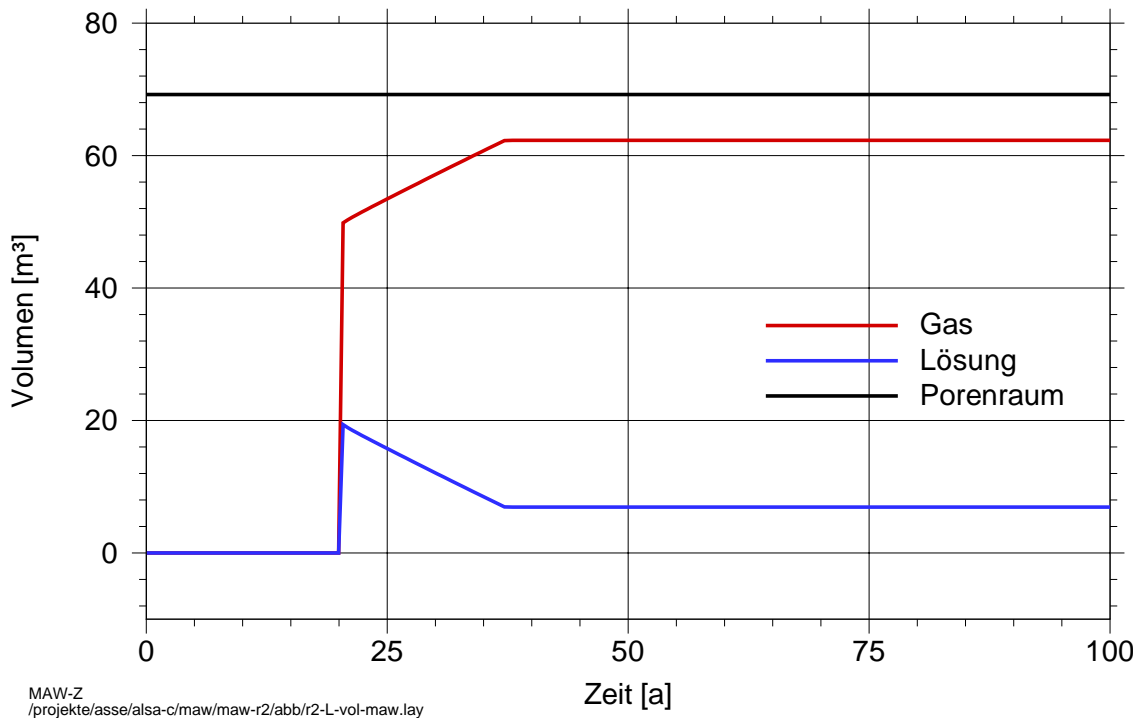


Abb. 5.156 Volumina in MAW-Z: RIX.2-L

Die zeitliche Entwicklung der Gasspeichervolumina in der MAW-Kammer und in den nachfolgenden Speichersegmenten ist in Abb. 5.157 dargestellt. Im Unterschied zum Rechenfall RIX.1-L, Variante 2, beginnt nach Ende der Auffüllphase in der MAW-Kammer das Auffüllen der Gasspeichervolumina im UMAW. Diese Phase ist bei ca. 170 Jahren beendet, danach beginnt das Auffüllen der Gasspeicher im Baufeld in der Südflanke. Wegen der geringeren Gasbildung in der MAW-Kammer dauert dieser Vorgang in F2-511-Z länger als im Rechenfall RIX.1-L.

Abb. 5.158 zeigt den Lösungsfluss aus der MAW-Kammer über die Schwebe S-MAW in den UMAW-Bereich. Wegen des Fehlens der Verbindungsstrecke H-511-1 gibt es im Vergleich zum Rechenfall RIX.1-L auch keinen Strom über diese Strecke, d.h. auch keine Durchströmung in der MAW-Kammer. Der Lösungsfluss ist wegen der geringeren Gasbildung kleiner und dauert bei gleicher Lösungsmenge in der Kammer länger an.

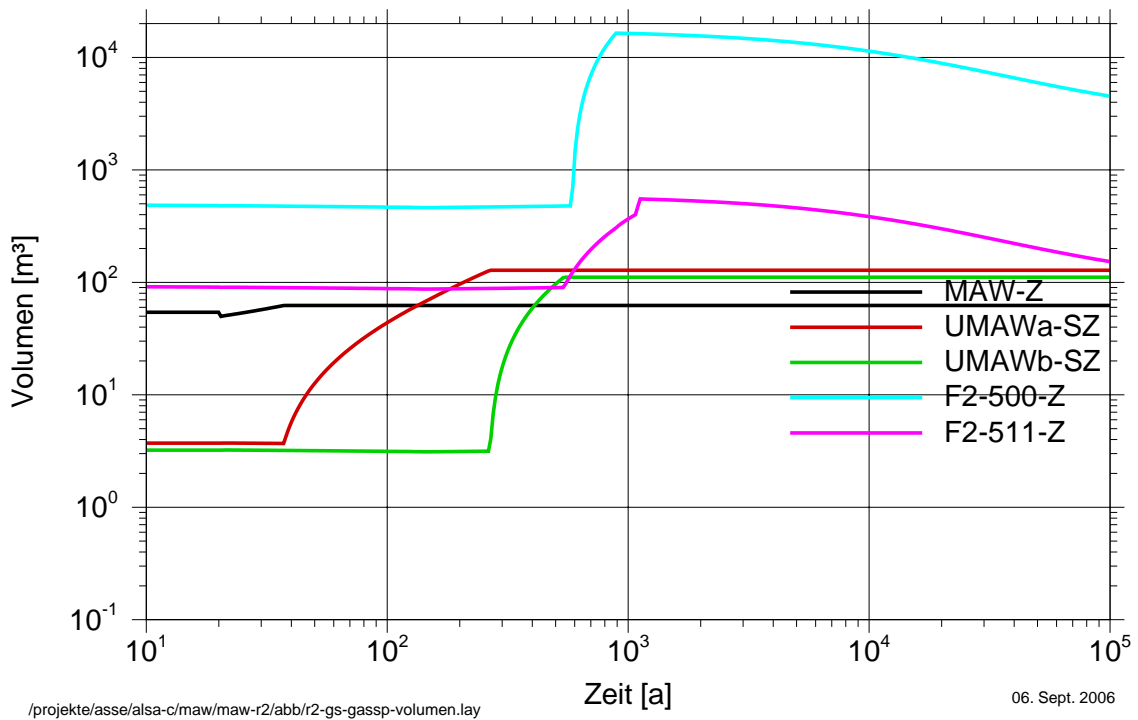


Abb. 5.157 Zeitliche Entwicklung der gebildeten Gasspeichervolumina: RIX.2-L

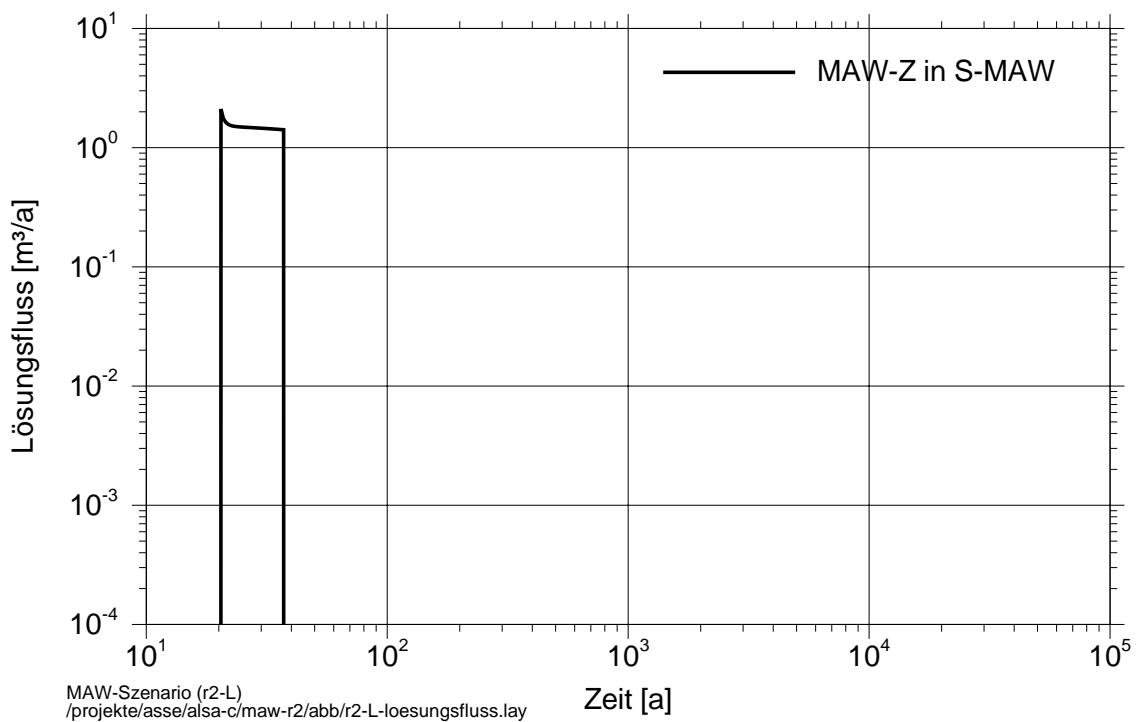


Abb. 5.158 Lösungsfluss aus der MAW-Kammer, RIX.2-L

Radionuklidströme und Konzentrationen

In Abb. 5.159 sind als Beispiel die wesentlichen Sr-90-Flüsse aus der MAW-Kammer und in das Baufeld in der Südflanke im Vergleich zum Rechenfall RIX.1-L, Variante 2, dargestellt. Die Unterschiede in den Flüssen aus der MAW-Kammer sind durch die unterschiedlichen Lösungsströme zu erklären, die Unterschiede in den Flüssen aus A-UMAWa in das Baufeld in der Südflanke durch den Wegfall der Verbindungsstrecke H-511-1. Dadurch gelangt das Strontium nicht mehr direkt über die Strecke H-511-1 in das Baufeld, sondern über den Umweg des UMAW-Bereichs.

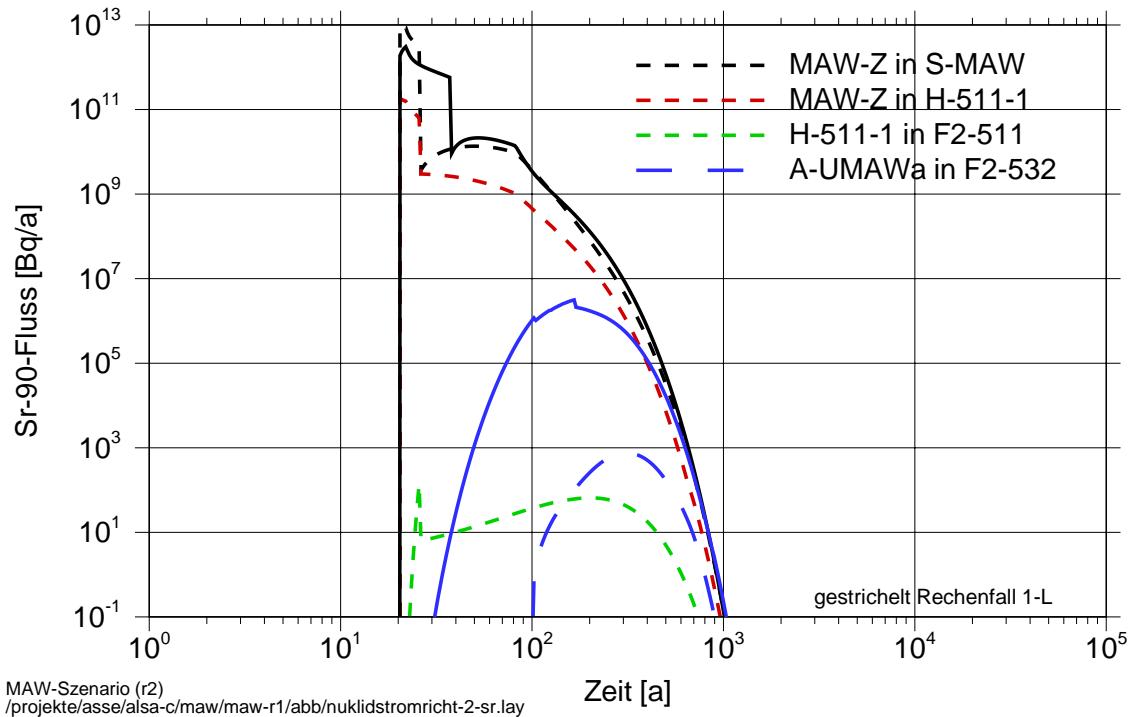


Abb. 5.159 Sr-90-Fluss in RIX.2-L im Vergleich zum Rechenfall RIX.1-L, Variante 2

Für Th-230 gelten nahezu die gleichen Aussagen, siehe Abb. 5.160. Auch hier gelangt das Radionuklid nur noch über den UMAW-Bereich in das Baufeld in der Südflanke, jedoch ist das Maximum des Flusses kaum größer als im Rechenfall RIX.1-L, Variante 2.

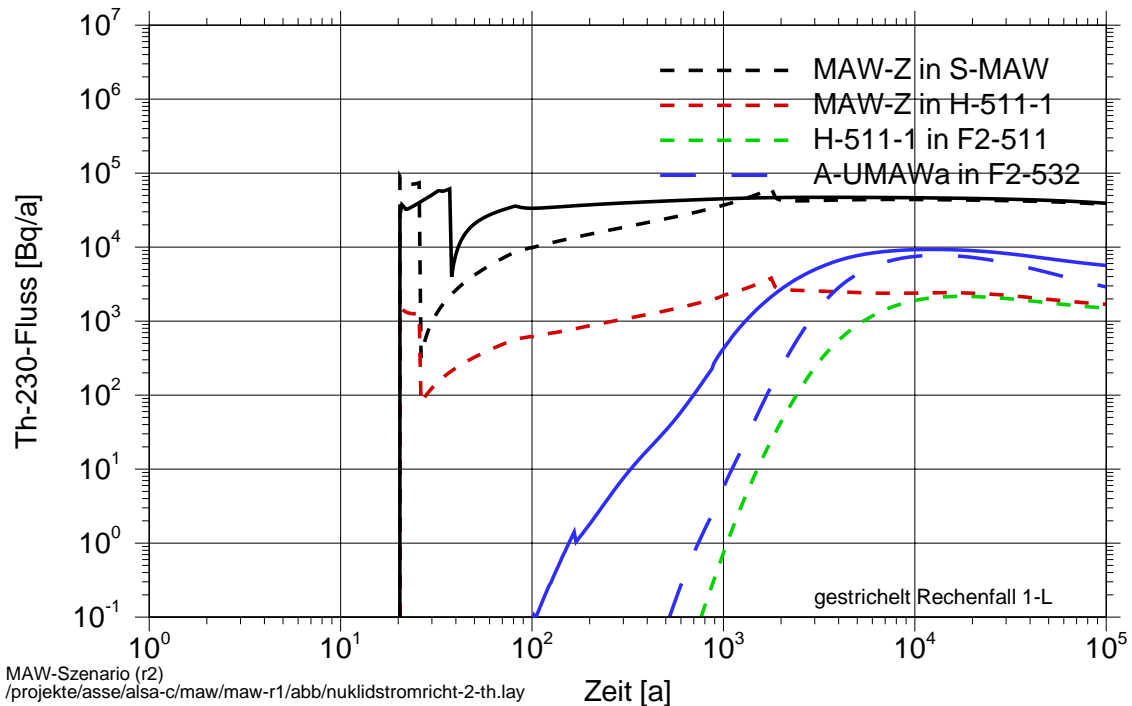


Abb. 5.160 Th-230-Fluss in RIX.2-L im Vergleich zum Rechenfall RIX.1-L, Variante 2

In Abb. 5.161 bis Abb. 5.164 sind die Konzentrationen für die Radionuklide Am-241 und Th-230 für den Rechenfall RIX.2-L mit dem Rechenfall RIX.1-L, Variante 2, verglichen, wobei die Konzentrationen im Nahbereich der MAW-Kammer und im Baufeld in der Südflanke getrennt dargestellt sind. Gestrichelt ist jeweils der Vergleichsfall, d.h. der Rechenfall RIX.1-L, Variante 2.

Für alle dargestellten Segmente, d.h. auch nahe der Austrittsstelle im Segment F2-500-L, ist die Konzentration zu Beginn und zum Teil langfristig größer als im Vergleichsfall, jedoch werden die Unterschiede zu späten Zeiten, d.h. nach maximal einigen tausend Jahren, gering. Bei Th-230 werden die Konzentrationen im UMAW-Bereich langfristig geringer als im Vergleichsfall.

Insgesamt lässt sich aus den Abbildungen folgender Schluss ziehen:

- Die Konzentrationen im Baufeld in der Südflanke sind geringfügig erhöht, im Maximum (bei Am-241) um ca. einen Faktor 2,
- Da Am-241 zu frühen Zeiten die potenzielle Strahlenexposition bestimmt, wird die etwas erhöhte Konzentration auch die Strahlenexposition geringfügig erhöhen, siehe den folgenden Abschnitt.

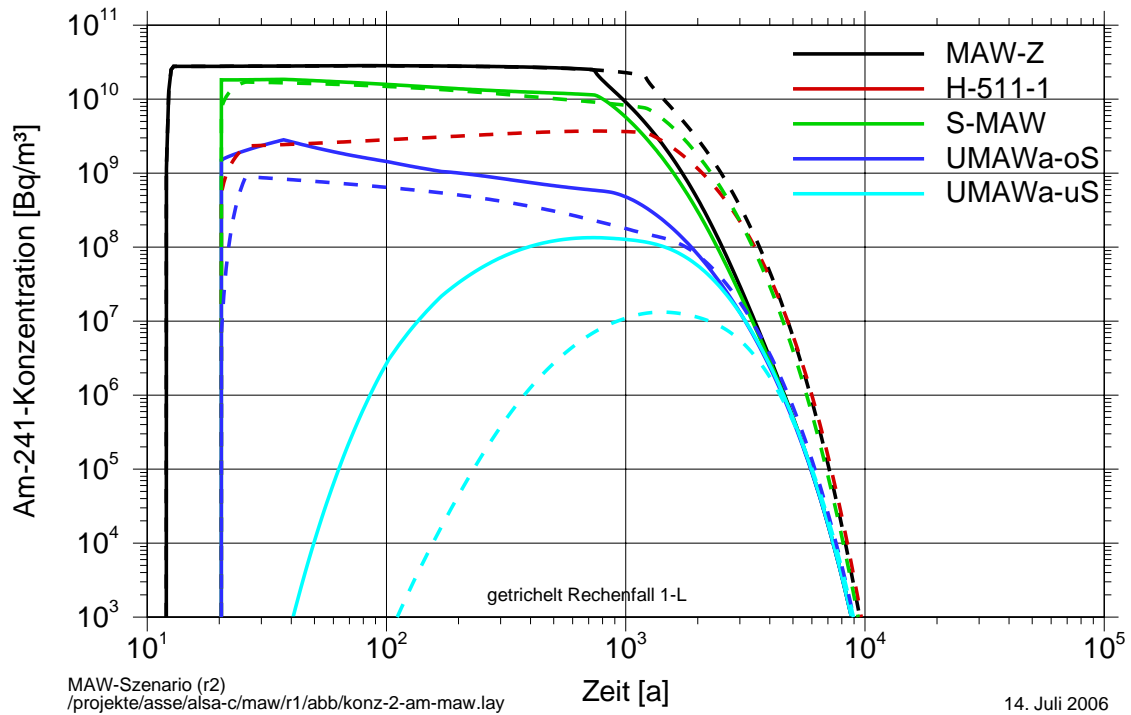


Abb. 5.161 Am-241-Konzentration in RIX.2-L im Vergleich zum Rechenfall RIX.1-L, Variante 2. MAW-Nahbereich

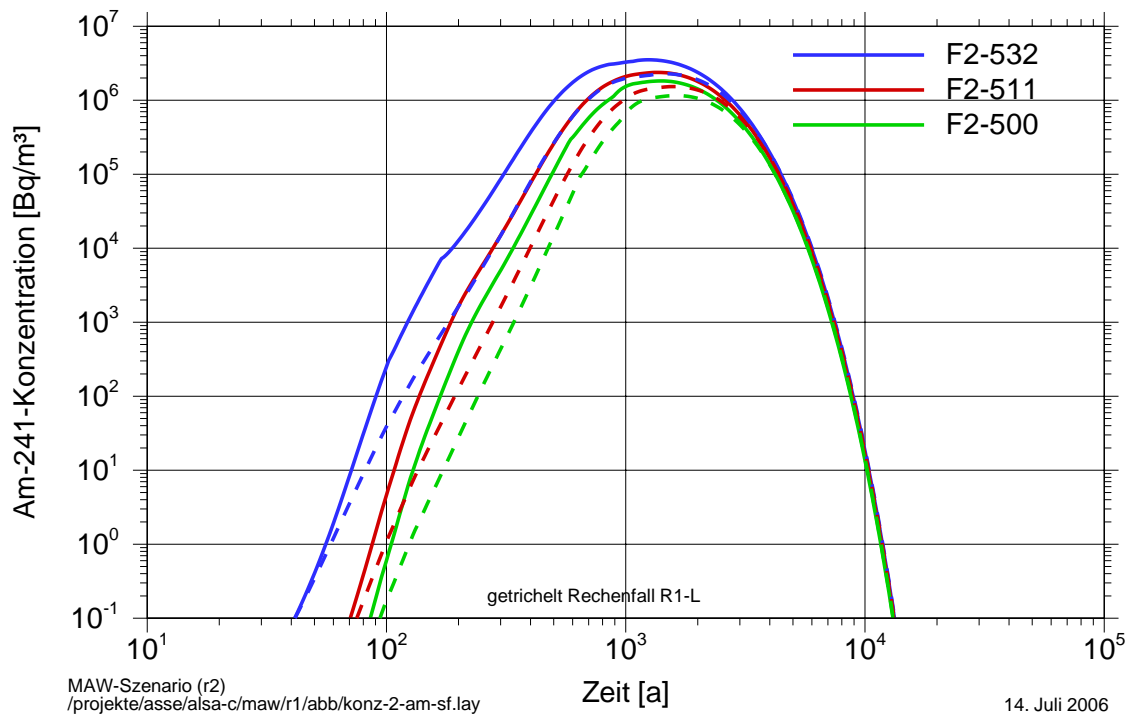


Abb. 5.162 Am-241-Konzentration in RIX.2-L im Vergleich zum Rechenfall RIX.1-L, Variante 2. Baufeld in der Südflanke

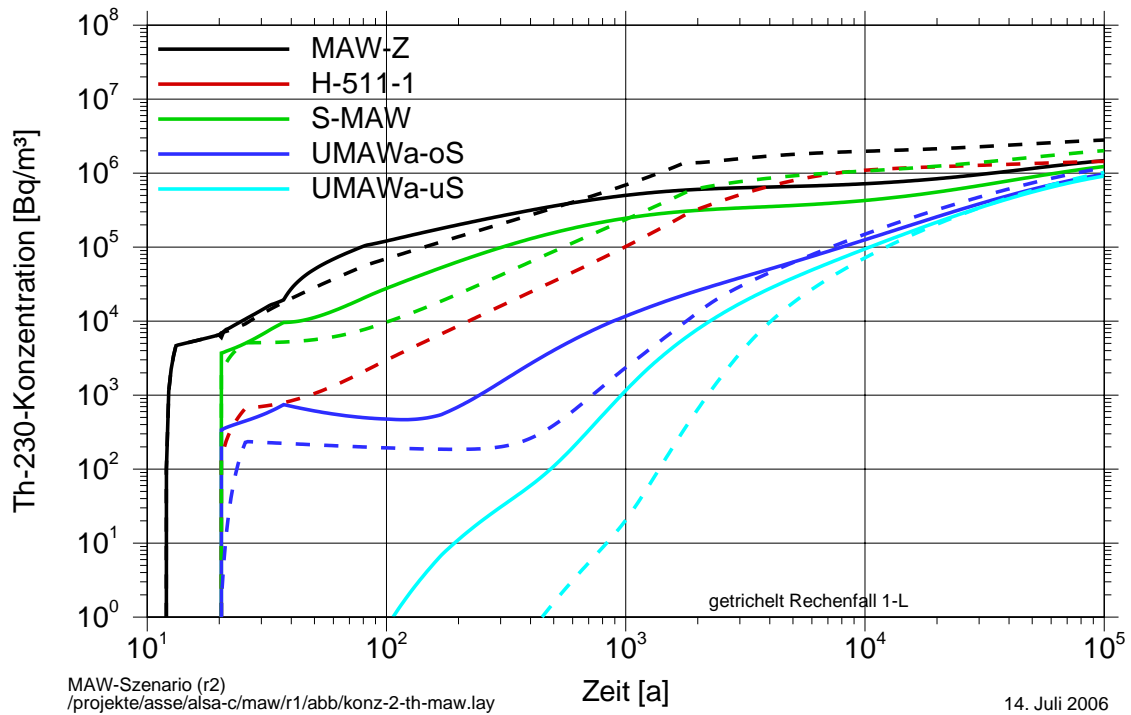


Abb. 5.163 Th-230-Konzentration in RIX.2-L im Vergleich zum Rechenfall RIX.1-L, Variante 2. MAW-Nahbereich

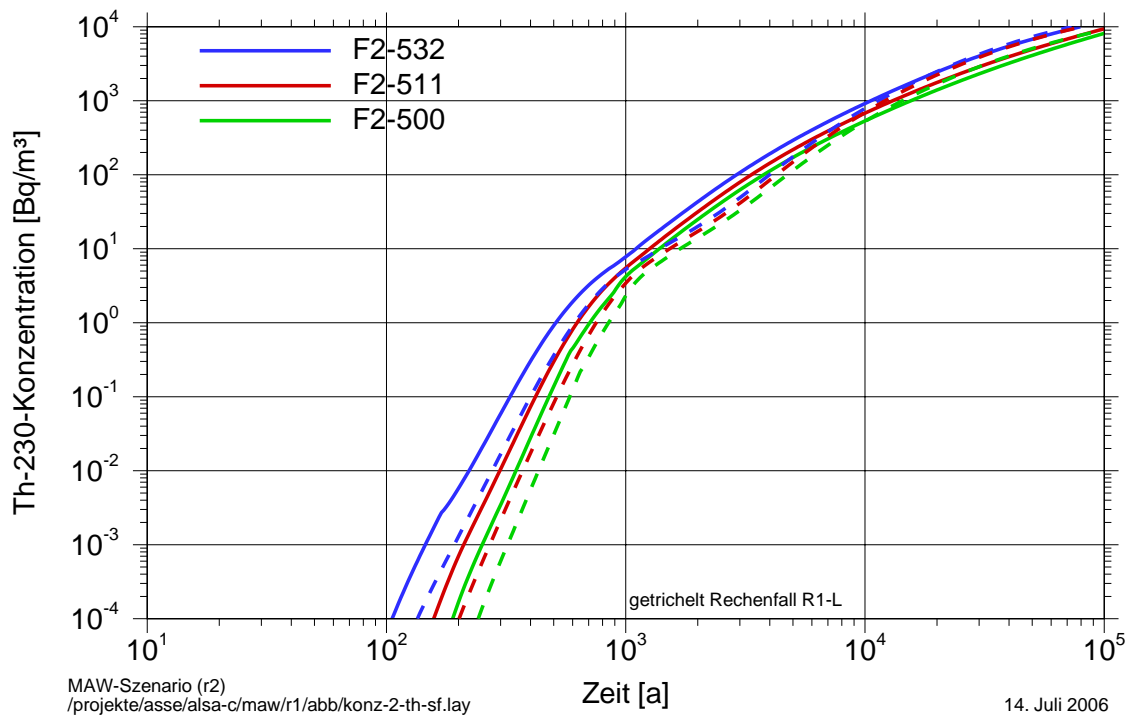


Abb. 5.164 Th-230-Konzentration in RIX.2-L im Vergleich zum Rechenfall RIX.1-L, Variante 2. Baufeld in der Südflanke

Potenzielle Strahlenexpositionen

Die Summen der potenziellen Strahlenexpositionen sind in Abb. 5.165 dargestellt. Die Rechnungen „ohne MAW“ wurden mit den gleichen Eingangsdaten wie die übrigen Rechnungen, aber ohne MAW-Inventar gerechnet und stimmen damit mit dem Rechenfall RX.7-L überein, der jedoch eine etwas andere Struktur des Baufeldes in der Südflanke verwendet.

Die Summen der potenziellen Strahlenexpositionen sind ohne und mit Berücksichtigung des MAW nahezu identisch. Wie im Rechenfall RIX.1-L gibt es geringe Unterschiede in den Strahlenexpositionen durch Ra-226 und Pb-210, die durch die Ausbreitung von Th-230 aus der MAW-Kammer in das Baufeld in der Südflanke hervorgerufen werden. Dies macht sich zu späten Zeiten bei den Tochternukliden Ra-226 und Pb-210 bemerkbar, ist aber in der Summendosis nicht erkennbar.

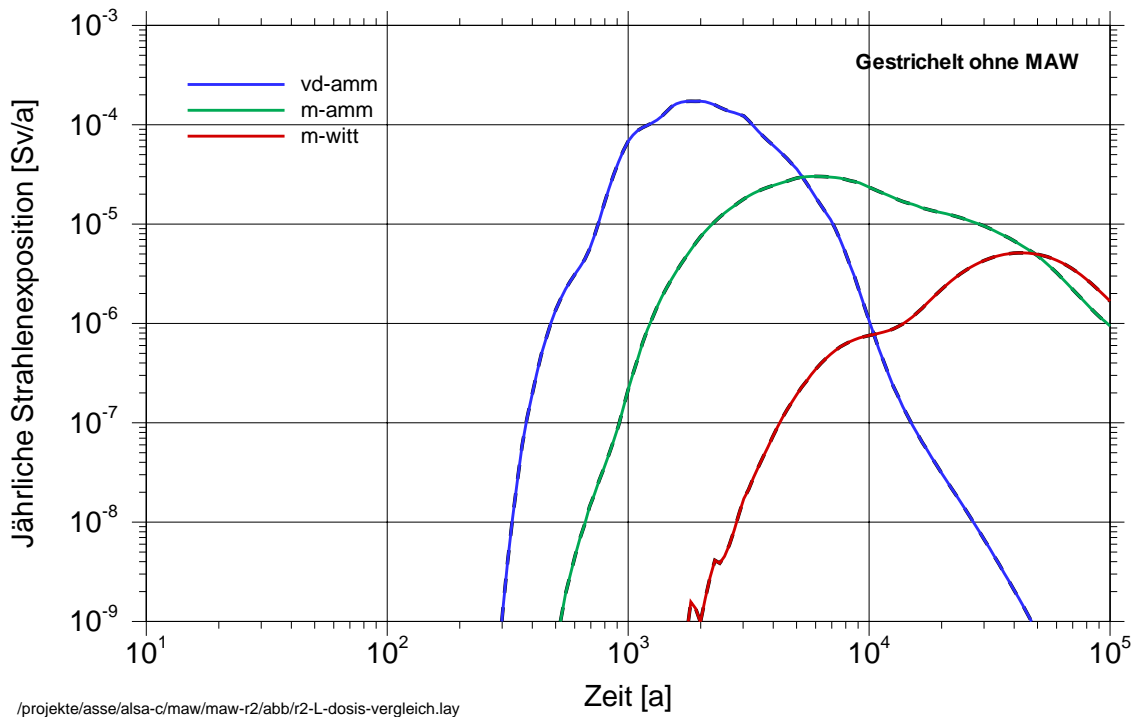


Abb. 5.165 Vergleich der jährlichen Strahlenexpositionen für drei Exfiltrationsgebiete: RIX.2-L

Die Strahlenexpositionen in Abb. 5.165 wurden mit den Transferfunktionen für den Deckgebirgsrechenfall DR12 berechnet. Daher unterscheiden sich die Ergebnisse stark von denjenigen für den Rechenfall RIX.1-L, die mit Transferfunktionen für den Deckgebirgsrechenfall DR13 berechnet wurden, siehe Abb. 5.145. Diese Unterschiede sind viel stärker als diejenigen, die sich aus den veränderten Radionuklidkonzentrationen im Baufeld in der Südflanke ergeben.

5.8.8.1 *Schlussfolgerungen aus dem Rechenfall RIX.2-L*

Durch das Fehlen der Verbindung zwischen der MAW-Kammer über die Auflockerungszone um den Sorelbeton und die Strahlenschutzmauer im Durchhieb zum Baufeld in der Südflanke (H-511-1) entfallen im Vergleich zu Rechenfall RIX.1-L die Auswirkungen auf die frühen Strahlenexpositionen. Trotz den größeren Gaspolstern im UMAW-Bereich ist die Freisetzung über den UMAW-Bereich in das Baufeld in der Südflanke so stark verzögert, dass die Beiträge der Radionuklide aus dem MAW zur gesamten Strahlenexposition vernachlässigbar klein sind.

5.8.9 *Schlussfolgerungen für das Szenario LsgMAW*

Zur detaillierten Untersuchung des Einflusses der in der MAW-Kammer eingelagerten Abfälle auf die potenzielle Strahlenexposition wurde der MAW-Bereich detaillierter als in bisherigen Rechnungen modelliert. Dies ermöglicht die Bewertung der Ausbreitungspfade aus der MAW-Kammer bis in das Baufeld in der Südflanke und die genauere Abbildung der relevanten Prozesse als in bisherigen Rechnungen.

Auch im alternativen Szenario *LsgMAW* wird die MAW-Modellkammer nicht vollständig mit Lösung gefüllt. In der frühen Nachbetriebsphase gelangt über die aufgelockerte Schwebelösung in die Modellkammer und verdrängt gleichzeitig komprimierte Grubenluft über die Auflockerungszone um den Sorelbeton und die Strahlenschutzmauer im Durchhieb zum Baufeld in der Südflanke.

Durch die Gasbildung im Abfall der MAW-Kammer wird dann Lösung – und zwar überwiegend über die Schwebelösung zur Kammer 8a/532 – ausgepresst.

Bis ca. 100 Jahre gelangen mit der Lösung auch Lösungsinhaltsstoffe aus der MAW-Kammer advektiv in den Nahbereich der MAW-Kammer (in den Abbau 8a/532 und nachfolgend auch in 8b/532), wo sie zunächst deutlich verdünnt werden. Anschließend gelangen die Lösungsinhaltsstoffe über die Schwebelösung nur noch diffusiv in den Nahbereich; Flüsse über den Durchhieb zum Baufeld in der Südflanke sind vernachlässigbar.

Der Beitrag der aus dem MAW freigesetzten Radionuklide zur potenziellen Strahlenexposition ist sehr gering. Lediglich bei einigen Aktiniden (Th-230, Ra-226 und Pb-210) sind signifikante Änderungen auf niedrigem Niveau zu erkennen; diese treten aber zu sehr späten Zeiten auf und sind außerdem gering bezüglich der Summendosis. Sie sind außerdem nur dann relevant, wenn die Lösungsmengen in der MAW-Kammer gering und folglich die Anfangskonzentrationen dieser Elemente hoch sind.

Die Menge der in die MAW-Kammer zutretenden Lösung wirkt sich auf die Mobilisierung und Rückhaltung der Radionuklide aus, ist aber wegen der insgesamt geringen Relevanz des MAW zur potenziellen Strahlenexposition nicht relevant. Die Verbindung zwischen der MAW-Kammer über die Auflockerungszone um den Sorelbeton und die Strahlenschutzmauer im Durchhieb zum Baufeld in der Südflanke beeinflusst die Gasfreisetzung und die Ausbreitungspfade für die Radionuklide stark, aber ihr Einfluss auf die potenzielle Strahlenexposition ist trotzdem gering.

6 Schlussfolgerungen

Der Nachweis der Langzeitsicherheit für die Schachanlage Asse bezüglich der potenziellen Freisetzung von Radionukliden auf dem Lösungspfad wird mit Hilfe von Transport- und Ausbreitungsrechnungen durchgeführt. Der Abschlussbericht [ALSA-C 2005a] zu diesen Untersuchungen des Fluid- und Radionuklidtransports, im Folgenden „Schlussbericht 2005“ genannt, beruht auf dem Kenntnisstand von Mitte 2005 und basiert in Bezug auf die Konzepte, Modelle und Daten zum Teil auf Experteneinschätzungen und nicht verifizierten Annahmen. Nach Abschluss dieser Arbeiten konnten einige Annahmen verifiziert, belastbare Werte für Parameter ermittelt und Experteneinschätzungen aktualisiert werden. Dies führte zur Definition einer „kombinierten Variante“, die eine als sehr wahrscheinlich eingeschätzte Entwicklung des Gesamtsystems in der Szenariengruppe des Referenzszenarios darstellt.

Die im vorliegenden Bericht verfolgte Vorgehensweise zur Aktualisierung der im Schlussbericht 2005 dargestellten Analysen wurde auf Basis der in jenem Bericht beschriebenen Systemkenntnisse entwickelt:

- Zunächst wurde ausgehend vom Referenzfall ein Vergleichsfall analysiert, der ein sehr ähnliches Verhalten in Bezug auf den Fluid- und Radionuklidtransport in der Grube zeigt. Neben einigen modelltechnischen Aktualisierungen wurde im Vergleichsfall im Wesentlichen das neue Konzept der Transferfunktionen umgesetzt, das einer realistischeren Berücksichtigung und modellhaften Abbildung des Radionuklidtransports im Deckgebirge dient. Gleichzeitig wurde auch die Schnittstelle zwischen Grubengebäude/Wirtsgestein und Deckgebirge in den Rechenmodellen realitätsnäher abgebildet.
- Nachdem die Ähnlichkeit zwischen Vergleichsfall und Referenzfall in Bezug auf die Systementwicklung im Grubengebäude bestätigt werden konnte, wurden ergänzend die Strahlenexpositionen von Rechnungen zu Varianten des Referenzszenarios und alternativen Szenarien aus dem Schlussbericht 2005⁴², welche durch die Aktualisierungen nicht überholt sind, mit Hilfe der Transferfunktionen ausgewertet. Dadurch wurde es möglich, die Auswirkungen der dort betrachteten, potenziell sensitiven Größen bei realistischerer Abbildung des Transports im Deckgebirge neu zu bewerten.
- Ausgehend vom Vergleichsfall wurde danach die kombinierte Variante entwickelt, für die Modellparameter sowie Annahmen zu hydraulischen Verhältnissen im Grubengebäude aktualisiert wurden. Die wesentliche Aktualisierung betrifft hierbei die Radionuklid-Quellterme in den Einlagerungsbereichen.
- Schließlich wurde das Ergebnis der kombinierten Variante anhand von einigen Varianten abgesichert.

⁴² sowie auch einiger ausgewählten Varianten zum Thema Konvergenz aus dem Bericht [ALSA-C 2005b]

Die Ergebnisse der ergänzenden Analysen haben die auf dem Schlussbericht 2005 basierenden Erwartungen bestätigt. Zusammenfassend ist festzustellen, dass:

- der Vergleichsfall eine aktualisierte Repräsentation des Referenzfalls darstellt,
- die Übertragbarkeit der meisten Aussagen aus dem Schlussbericht 2005 gegeben ist, und dass
- der vorliegende Ergänzungsbericht zusammen mit dem Schlussbericht 2005 eine Einheit bildet, wobei der vorliegende Bericht die Aussagen des Schlussberichtes ergänzt und vertieft.

Die kombinierte Variante stellt die wahrscheinlichste Entwicklung des Systems dar. Ihre Sensitivität in Bezug auf Änderungen von Systemeigenschaften (Parametervariationen) kann aus den Sensitivitätsuntersuchungen für den Referenzfall im Schlussbericht 2005 abgeleitet werden.

Durch die gewählte schrittweise Vorgehensweise wird die Einheit der Modellrechnungen aus dem Schlussbericht 2005 und dem vorliegenden Bericht in nachvollziehbarer Weise belegt. Dies erlaubt Gesamtschlussfolgerungen zu ziehen, die Thema des vorliegenden Kapitels sind.

6.1 Ergebnisse der Untersuchungen

Nur zwei Modellanpassungen haben einen wesentlichen Einfluss auf die berechneten Ergebnisse:

- Die Abbildung des Transports im Deckgebirge unter Einbeziehung der zeitlichen Transportverzögerung (jedoch ohne Berücksichtigung der Sorption).
- Die Aktualisierung des Quellterms der Radionuklide in den Einlagerungsbereichen.

Alle anderen betrachteten Effekte oder Aktualisierungen haben nur vernachlässigbare bis geringe Auswirkungen. Die Tab. 6.1 gibt die Maxima der berechneten Strahlenexpositionen der nachfolgend diskutierten Rechenfälle für die drei Exfiltrationsgebiete wieder, unabhängig von den Zeitpunkten, zu denen das Maximum jeweils auftritt.

Tab. 6.1: Berechnete Maxima der potenziellen Strahlenexpositionen^(*) für die drei Exfiltrationsgebiete in Sv/a (globales Maximum⁴³ der jeweiligen Variante unterstrichen)

	Referenzfall ^(c)	Vergleichsfall	Kombinierte Variante	Alternatives Modellkonzept Deckgebirge	Maximale Gasbildung	Obere Bandbreite Radionuklidquellterm	Untere Bandbreite Radionuklidquellterm
verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	<u>$1,3 \cdot 10^{-4}$</u>	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$
Muschelkalk – Ammerbeek	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$7,7 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-6}$
Muschelkalk – Wittmar	<u>$1,7 \cdot 10^{-5}$</u>	<u>$1,5 \cdot 10^{-5}$</u>	<u>$5,1 \cdot 10^{-5}$</u>	$5,1 \cdot 10^{-6}$	<u>$4,1 \cdot 10^{-5}$</u>	<u>$1,1 \cdot 10^{-4}$</u>	<u>$1,6 \cdot 10^{-5}$</u>

(*) aus dem Schlussbericht 2005, neu bewertet mit Transferfunktionen im Deckgebirge, siehe Kap. 4

6.1.1 Auswirkung der Berücksichtigung des Transports im Deckgebirge

Die detaillierte Berücksichtigung des Transports im Deckgebirge führt für den Vergleichsfall zu den folgenden Ergebnissen, die in Übereinstimmung mit den Erwartungen sind:

- Die Fluidflüsse (Lösung und Gas) und der Transport von Tracern und Radionukliden in der Grube sind durch die realitätsnähere Abbildung der Schnittstelle zum Deckgebirge nur geringfügig und nur für relativ kurze Zeit beeinflusst.
- Die potenziellen Strahlenexpositionen unterscheiden sich wesentlich von jenen im Referenzfall, welche im Schlussbericht 2005 mit Hilfe des Verdünnungsmodells ermittelt wurden. Statt des frühen, durch Am-241 dominierten Maximums wird nun das globale Maximum durch Pu-239 und Pu-240 zu späten Zeiten dominiert und für das Exfiltrationsgebiet „Muschelkalk – Wittmar“ ermittelt⁴⁴.

⁴³ Das „globale Maximum“ kennzeichnet hier und im Folgenden das Maximum der potenziellen Strahlenexpositionen einer Variante unabhängig vom Exfiltrationsgebiet und von der Zeit. Dagegen wird mit „lokalem Maximum“ dasjenige für ein Exfiltrationsgebiet gemeint.

⁴⁴ Dieses Maximum wird ohne Berücksichtigung der Sorption im Deckgebirge für einen Zeitpunkt nach ca. 30 000 Jahren berechnet, es ist im Vergleich zum Schlussbericht 2005 um etwa den Faktor 2,5 geringer.

Die Ergebnisse der meisten bisherigen, im Schlussbericht 2005 diskutierten Rechenfälle wurden unter Berücksichtigung des Transports im Deckgebirge über Transferfunktionen neu bewertet. Dies führte zu den folgenden Ergebnissen:

- Die zeitliche Entwicklung der potenziellen Strahlenexposition für den neu ausgewerteten *Referenzfall* unterscheidet sich nur geringfügig von jener des Vergleichsfall.
- Für alle neu ausgewerteten Rechenfälle wird das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition zu späten Zeiten für das Exfiltrationsgebiet „Muschelkalk – Wittmar“ ermittelt. Für das Exfiltrationsgebiet „Muschelkalk – Ammerbeek“ ergibt sich, ebenfalls zu späten Zeiten, ein deutlich geringeres Maximum. Beide lokalen Maxima werden durch Pu-239 und Pu-240 dominiert. Die relativen Abweichungen dieser Strahlenexpositionsmaxima gegenüber dem Vergleichsfall sind vernachlässigbar bis gering (bis etwa 50 %). Lediglich die Kanalisierung im Baufeld in der Südflanke und die Konvergenzrate sind sensitive Parameter.
- Für das Exfiltrationsgebiet „verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek“ wird zu relativ frühen Zeiten im Allgemeinen ein deutlich geringeres Maximum der potenziellen Strahlenexposition erreicht als für die anderen Exfiltrationsgebiete. Dieses lokale Maximum wird, wie das Maximum in den Rechnungen im Schlussbericht 2005, durch Am-241 dominiert. Für dieses frühe, lokale Maximum sind die relativen Abweichungen der neu ausgewerteten Rechenfälle vom Vergleichsfall deutlich größer als für die beiden späten Maxima für die anderen Exfiltrationsgebiete. Vor allem die Sensitivität bezüglich der Kanalisierung im Baufeld in der Südflanke ist hervorzuheben. Bei starker Kanalisierung im Baufeld in der Südflanke unterscheidet sich das frühe lokale Maximum der Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet „verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek“ nur wenig vom zu späten Zeiten erreichten lokalen Strahlenexpositionsmaximum für das Exfiltrationsgebiet „Muschelkalk – Wittmar“, das meistens das globale Maximum darstellt.

6.1.2 Auswirkung des aktualisierten Quellterms

Die aktualisierten Radionuklidquellterme beeinflussen die Radionuklidfreisetzung aus der Grube in das Deckgebirge und damit die potenziellen Strahlenexpositionen in der Biosphäre. Besonderen Einfluss haben die höheren maximal möglichen Elementkonzentrationen von Plutonium und Thorium in den Einlagerungsbereichen. Hierbei ist vor allem der ab etwa 2 000 Jahren noch um etwa den Faktor 3 höhere Plutoniumaustrag aus der Grube hervorzuheben. Die erhöhte Freisetzung von Plutonium in das Deckgebirge führt zu deutlich höheren Strahlenexpositionen, da deren Maxima in allen Exfiltrationsgebieten meist durch die Plutoniumisotope Pu-239 und Pu-240 dominiert werden. Die Maxima für das Exfiltrationsgebiet „verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek“ werden zu einem nennenswerten Anteil zudem auch von Am-241 und Ra-226/Pb-210 verursacht. Die berechneten Maximalwerte der Strahlenexposition sind in Tabelle 6.1 in der Kolonne *Kombinierte Variante* aufgeführt. Das berechnete globale Maximum der Strahlenexposition beträgt rund $5 \cdot 10^{-5}$ Sv/Jahr.

6.2 Zusätzliche Betrachtungen

6.2.1 Einfluss der Bandbreiten des Radionuklid-Quellterms

Die Bandbreite der maximal möglichen Elementkonzentrationen gemäß den aktualisierten Radionuklidquelltermen ist relativ groß und beträgt zumeist, d.h. in nahezu allen Einlagerungsbereichen, eine Größenordnung nach oben und nach unten. Sofern die tatsächlichen Elementkonzentrationen in sämtlichen Einlagerungsbereichen durch die maximal möglichen Elementkonzentrationen begrenzt wären, würde sich deren Bandbreite linear auf die berechneten Radionuklidflüsse aus den Einlagerungsbereichen bis in das Deckgebirge auswirken. Allerdings sind innerhalb der Bandbreite der maximal möglichen Elementkonzentrationen nur die Elemente Uran, Plutonium, Thorium und Americium (letzteres effektiv nur in LAW4) aufgrund der Inventare potenziell in der Mobilisierung begrenzt. Dabei werden die Konzentrationen von Uran und Thorium, sowie in LAW3 und LAW4 auch jene von Plutonium, in jedem Fall durch die angesetzte maximal mögliche Elementkonzentration bestimmt. Für Plutonium in LAW1B und LAW2 sowie auch für Americium in LAW4 liegt die inventarbestimmte Konzentration innerhalb der Bandbreite, so dass sich nur niedrige maximal mögliche Elementkonzentrationen auf die in Lösung befindliche Menge dieser Isotope in den genannten Einlagerungsbereichen auswirken.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Bandbreite der maximal möglichen Elementkonzentrationen zeigen, dass sich nur die Änderungen der Plutoniumkonzentrationen relevant auf die potenzielle Strahlenexposition auswirken. Daher ergibt sich für die berechnete Strahlenexposition kein lineares Verhalten in Bezug auf den Parameter Radionuklidquellterm. Im Einklang mit der oben erläuterten beschränkten Auswirkung der maximal möglichen Plutoniumkonzentrationen innerhalb der Bandbreite erhöht sich das globale Maximum im Vergleich zur kombinierten Variante nur um etwa den Faktor 3, obwohl die maximal möglichen Elementkonzentrationen um den Faktor 10 erhöht sind.

6.2.2 Alternative Modellvorstellung für das Deckgebirge

Alternative hydrogeologische Modellvorstellungen für das Deckgebirge wurden mit dem Deckgebirgsrechenfall DR12 untersucht. Die Auswirkungen auf den Transport der Radionuklide wurden einerseits mit den Transferfunktionen und andererseits mit der Parametrisierung der Schnittstelle Grubengebäude-Deckgebirge aus diesem Deckgebirgsrechenfall berücksichtigt. Die Rückwirkungen der gegenüber der kombinierten Variante geänderten Parametrisierung der Schnittstelle auf die Prozesse in der Grube haben sich als gering herausgestellt. Dies betrifft auch die Lösungsflüsse aus der Grube und die Tracer- und Radionuklidflüsse in das Deckgebirge.

In Bezug auf die berechneten Strahlenexpositionen werden die Unterschiede zur kombinierten Variante, d.h. zu den Referenz-Modellvorstellungen für das Deckgebirge, fast ausschließlich vom geänderten Transport im Deckgebirge, abgebildet durch die Transferfunktionen, verursacht:

- Statt des in der kombinierten Variante beobachteten späten Maximums der potenziellen Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet „Muschelkalk – Wittmar“ dominiert bei der

alternativen Modellvorstellung für das Deckgebirge ein relativ frühes Maximum für das Exfiltrationsgebiet „verstütztes Deckgebirge – Ammerbeek“.

- Das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition ist dabei mäßig höher als in der kombinierten Variante.

Diese Ergebnisse sind vor dem Hintergrund zu bewerten, dass der Deckgebirgsrechenfall DR12 eine wenig wahrscheinliche hydrogeologische Situation im Deckgebirge repräsentiert.

6.2.3 Einfluss einer hohen Gasbildung

Zur Untersuchung der Auswirkung einer hohen Gasbildungsrate und Gesamtgasmenge wurde in allen Einlagerungsbereichen eine aus theoretischen Überlegungen abgeleitete hohe Gasbildung (Gasbildung bei maximaler CO₂-Bildung) angesetzt. Diese Modellrechnungen führen zu den folgenden Ergebnissen:

- Die Lösungsflüsse in das Deckgebirge sind gegenüber der kombinierten Variante kurzfristig um etwa ein Drittel höher, mittelfristig um etwa ein Drittel niedriger und langfristig nahezu unverändert.
- Die Freisetzung von Tracern und Radionuklide in das Deckgebirge erfolgt gegenüber der kombinierten Variante generell etwas früher, die Tracerfreisetzung aus LAW1A und LAW1B ist jedoch bis einige hundert Jahre verzögert. Danach sind alle Unterschiede vernachlässigbar.
- Die Strahlenexposition ist kurzfristig auf niedrigem Niveau erhöht, vor allem durch die geänderten Beiträge von Pu-239 und Pu-240 aus LAW1A und LAW1B. Das globale Maximum für das Exfiltrationsgebiet „Muschelkalk – Wittmar“ ist nur geringfügig erhöht.

Dies bedeutet, dass die Unsicherheiten in den Modellannahmen zur Gasbildung keine relevanten Auswirkungen auf die berechneten Strahlenexpositionen haben.

6.2.4 Lösungszutritt in den MAW-Fasskegel

Die Ergebnisse der Modellrechnungen, die einen Lösungszutritt in den MAW-Fasskegel unterstellen, zeigen, dass

- im Falle eines Lösungszutritts nur ein kleiner Teil des MAW-Inventars freigesetzt wird. Diese Freisetzung wird im Nahbereich der MAW-Kammer zeitlich so verzögert, dass keine relevanten Mengen kurzlebiger Radionuklide in das Deckgebirge übertreten.
- bereits nach etwa 300 Jahren der Beitrag des MAW-Inventars zu den Austrittsraten von Radionukliden in das Deckgebirge gegenüber jenen der LAW-Einlagerungsbereiche vernachlässigbar gering ist.

Diese Ergebnisse zeigen, dass der Beitrag des MAW-Inventars zur Strahlenexposition selbst unter sehr pessimistischen Annahmen für die Ausbreitung im Nahbereich vernachlässigbar ist. Dies ist bemerkenswert, weil die Radiotoxizität der Abfälle im MAW-Fasskegel nur wenig

kleiner ist als diejenige der Abfälle in den LAW-Einlagerungsbereichen. Die Modellvorstellung, dass im Referenzfall bzw. in der kombinierten Variante die MAW-Kammer trocken bleibt, begründet sich zwar mit den Ergebnissen von Modellrechnungen mit TOUGH, die Schlussfolgerung daraus, dass das Inventar des MAW gar nicht berücksichtigt werden muss, ist aber auch auf Grund der Ergebnisse der hier diskutierten Modellrechnungen gerechtfertigt.

6.3 Zusammenfassende Ergebnisdarstellung

Abb. 6.1 zeigt eine grafische Übersicht der berechneten globalen Strahlenexpositionsmaxima. Die rote Linie kennzeichnet den Wert nach § 47 der StrlSchV ($3 \cdot 10^{-4}$ Sv/a), das radiologische Schutzziel.

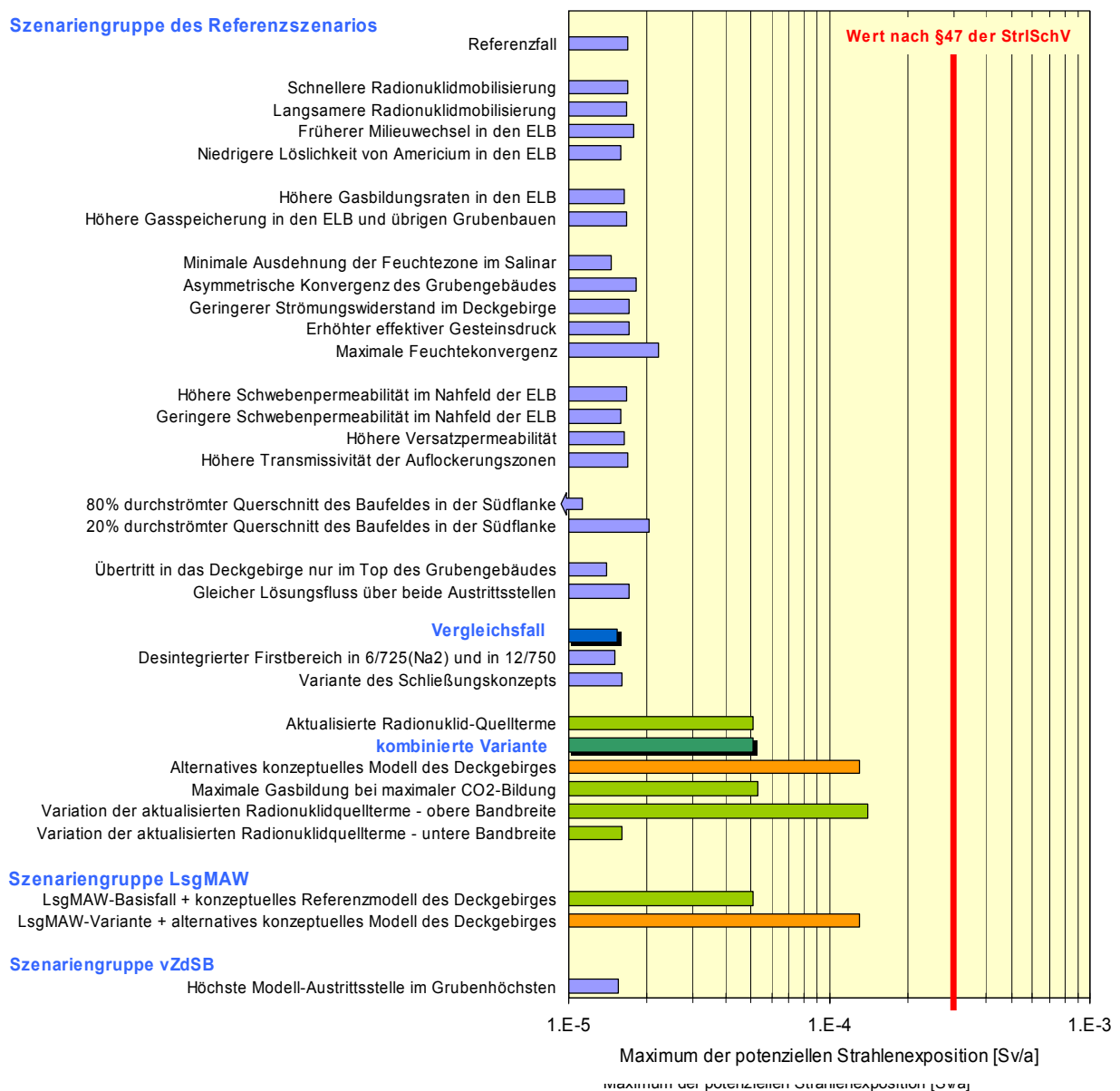


Abb. 6.1 Übersicht der berechneten globalen Maxima der Strahlenexposition

In blau sind die mit Hilfe der Transferfunktionen gemäß dem Deckgebirgsrechenfall DR13 berechneten globalen Maxima der potenziellen Strahlenexposition für die Rechenfälle aus dem Schlussbericht 2005, für einige ergänzende Rechenfälle zum Thema Konvergenz aus [ALSA-C 2005b] sowie für zwei zusätzliche Varianten des Referenzszenarios dargestellt. Diesen Rechenfällen liegen die Referenz-Radionuklidquellterme aus dem Schlussbericht 2005 zugrunde. Der Deckgebirgsrechenfall DR13 repräsentiert dabei die wahrscheinliche hydrogeologische Situation mit wirksamen Wegsamkeiten durch den Rötaquitard. Das berechnete Strahlenexpositionsmaximum im Exfiltrationsgebiet „Muschelkalk – Wittmar“ für den Vergleichsfall beträgt $1,5 \cdot 10^{-5}$ Sv/a, zum Vergleich, das Maximum der Strahlenexposition des Referenzfalls aus dem Schlussbericht 2005 betrug $3,7 \cdot 10^{-5}$ Sv/a.

In grün sind die Ergebnisse der in diesem Ergänzungsbericht ausführlich dargestellten Rechenfälle mit aktualisierten Radionuklid-Quelltermen und einer Ausbreitung im Deckgebirge gemäß DR13 eingezeichnet. Das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition der kombinierten Variante beträgt dabei $5,1 \cdot 10^{-5}$ Sv/a.

Schließlich sind die mit den aktualisierten Radionuklidquelltermen und dem Deckgebirgsrechenfall DR12, d.h. einer wenig wahrscheinlichen hydrogeologischen Situation mit lediglich gering durchlässigen Wegsamkeiten durch den Rötaquitard, berechneten Strahlenexpositionsmaxima in orange dargestellt. In diesen Rechnungen beträgt das Maximum $1,3 \cdot 10^{-4}$ Sv/a bei Exfiltration über das verstürzte Deckgebirge im Tal der Ammerbeek.

6.4 Gesamtschlussfolgerungen

Der hier vorliegende Ergänzungsbericht und der Schlussbericht 2005 bilden eine Einheit. Der Ergänzungsbericht ergänzt und vertieft die Aussagen des Schlussberichtes. Aus der Gesamtbewertung der Ergebnisse aller Modellrechnungen zum Lösungspfad ergeben sich folgende übergeordnete Aussagen:

Die Schachtanlage Asse II ist nach den vorliegenden Berechnungen in Bezug auf die Einhaltung des radiologischen Schutzziels über den Lösungspfad langfristig sicher. Die maximale Strahlenexposition liegt bei der wahrscheinlichen Entwicklung des Systems unter dem Wert des § 47 der Strahlenschutzverordnung.

Die Aussage der langzeitigen Sicherheit bedeutet für das Grubengebäude, dass entsprechend der Radionuklid-Quellterme eine genügend große Rückhaltung der relevanten Elemente (Americium, Plutonium, Thorium, Uran) in den Einlagerungsbereichen gewährleistet ist. Für den Transport im Deckgebirge bedeutet die Aussage, dass die Transportverzögerung im Grubengebäude ausreichend groß ist, um eine erhebliche Strahlenexposition durch Freisetzung über das verstürzte Deckgebirge und damit kurzer Pfade ins Tal der Ammerbeek zu verhindern. Insbesondere kurzlebige Radionuklide werden durch das Barrierensystem wirksam zurückgehalten. Die höchsten Strahlenexpositionen werden für das Tal von Wittmar ermittelt. Die mit den Transferfunktionen abgebildete Transportverzögerung im Deckgebirge ergibt einen relativ späten Zeitpunkt der berechneten

maximalen Strahlenexposition, wobei die Modellrechnungen keine Rückhaltung durch Sorption berücksichtigen.

Bei Berücksichtigung von Unsicherheiten bezüglich des Systemverhaltens liegen die berechneten Strahlenexpositionen in einigen Fällen im Bereich des Wertes des § 47 der Strahlenschutzverordnung.

Nur bei wenigen ungünstigen Verhältnissen, wenn die Mobilisierung von Plutonium in den Einlagerungsbereichen nur geringfügig begrenzt ist oder wenn die Wegsamkeiten durch den Scherdeformationsbereich S3/D9 des Rötaquitards hydraulisch wenig wirksam sind und dies zu einem verstärkten Transport über das verstückelte Deckgebirge in das Tal der Ammerbeek führt, sind Strahlenexpositionsmaxima zu erwarten, die im Bereich des Wertes des § 47 StrlSchV, rechnerisch aber darunter liegen.

Für die berechneten Strahlenexpositionen ergäben sich kleinere Werte, wenn die Rückhaltung von Radionukliden durch Sorption im Deckgebirge belastbar modelliert werden könnte.

In allen Rechenfällen im vorliegenden Bericht wurden durch die Anwendung der Transferfunktionen die Transportverzögerung und die Verdünnung im Deckgebirge explizit modelliert, jedoch das Sorptionspotenzial des Deckgebirges außer Betracht gelassen. Dieses Vorgehen führt immer zu einer deutlichen Überschätzung der potenziellen radiologischen Auswirkungen, weil insbesondere für die dosisbestimmenden Radionuklide bekannt ist, dass sie an vielen geologischen Materialien gute Sorptionseigenschaften aufweisen.

Die Bandbreite der für die verschiedenen untersuchten Rechenfälle berechneten maximalen potenziellen Strahlenexpositionen beträgt ca. eine Größenordnung, wobei der für die wahrscheinlichste Entwicklung des Systems berechnete Wert etwa in der Mitte des Bereiches liegt.

Die Bandbreite der berechneten maximalen Strahlenexpositionen ist generell gering. Lediglich die durch die Unsicherheit der maximal möglichen Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen und die Unsicherheit in Bezug auf die Existenz von wirksamen Wegsamkeiten durch den Rötaquitard verursachten Bandbreiten sind als erheblich einzustufen. Dabei ist aber zu beachten, dass eine Erhöhung der maximal möglichen Elementkonzentrationen über die jeweiligen Referenzwerte keine proportional gleich große Erhöhung der Strahlenexposition bewirkt (nicht lineares Verhalten). Dass die Wegsamkeiten durch den Scherdeformationsbereich S3/D9 des Rötaquitards hydraulisch nur gering wirksam sind, ist angesichts der bergbaubedingten Verformungen im Deckgebirge wenig wahrscheinlich. Mit den geplanten Schließungsmaßnahmen erweist sich das System als robust⁴⁵.

⁴⁵ Für die Behinderung der Radionuklidfreisetzung aus der Grube sind vor allem der Einbau von Mg-Depot in den Einlagerungsbereichen und der Strömungsbarrieren sowie die vollständige Auffüllung des Porenraums mit einem MgCl₂-reichen Schutzfluid (~ R-Lösung) wichtig.

Der Beitrag der Radionuklide aus den Abfällen im MAW-Bereich zu den berechneten Strahlenexpositionen ist generell vernachlässigbar gegenüber dem aus den LAW-Bereichen.

Für den Referenzfall und die kombinierte Variante als wahrscheinliche Entwicklung des Gesamtsystems wird angenommen, dass die Abfälle im MAW-Bereich trocken bleiben und somit keine Radionuklide aus diesem Bereich freigesetzt werden können. Unterstellt man einen Lösungskontakt dieser Abfälle, ist deren Beitrag zur potenziellen Strahlenexposition vernachlässigbar, obwohl die Radiotoxizität des Abfalls in der MAW-Kammer wenig kleiner ist als diejenige der Abfälle in den LAW-Bereichen und der Transportabstand von der MAW-Kammer zum Deckgebirge relativ kurz ist. Diese Aussage gilt auch unter Zugrundelegung und Verknüpfung zusätzlicher ungünstiger Annahmen im Nahfeld und im Deckgebirge.

Das Schließungskonzept der Schachanlage Asse führt zu einem robusten Systemverhalten. Damit kann langfristig die Einhaltung des radiologischen Schutzziels aufgezeigt werden. Bei den diesen Nachweis tragenden Modellrechnungen blieb die Sorption von Radionukliden im Deckgebirge unberücksichtigt, was eine zusätzliche Sicherheitsreserve darstellt.

Literaturverzeichnis

- [ALSA-C 2005a] Transportmodellierung: Fluid- und Radionuklidtransport am Standort Asse. Bericht ALSA-C-1.5B-NR145, Version 2, NRG Petten / Colenco Power Engineering AG / GRS Braunschweig, Juli 2005
- [ALSA-C 2005b] Transportmodellierung: Ergänzende Rechnungen mit LOPOS zur Konvergenz. Bericht ALSA-C-6.1B-GR063, Version 1, NRG Petten / Colenco Power Engineering AG / GRS Braunschweig, November 2005
- [ALSA-C 2005a] Detaillierte Modellrechnungen zum Lösungsaustausch in den Einlagerungskammern für den Referenzfall. Bericht ALSA-C-8.2B-CO148, Colenco Power Engineering AG, November 2006
- [ALSA-C 2005b] Transportmodellierung: Ableitung des Radionuklid-Quellterms für die Einlagerungsbereiche. Bericht ALSA-C-8.3B-GR074, GRS-A-3342, NRG Petten / Colenco Power Engineering AG / GRS Braunschweig, November 2006
- [Boudreau 1996] The diffusive tortuosity of fine-grained unlithified sediments. B.P. Boudreau. *Geochimica et Cosmochimica Acta* Vol. 60, p. 3139 (1996)
- [BMU 1990] BMU: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen. Bundesanzeiger 42, Nr. 64a, 1990
- [Colenco 2006a] Deckgebirgsmodellierung Phase IV, Grundwasserbewegung am Standort Asse, Schlussbericht 3331/71, September 2006
- [Colenco 2006b] Lösungs- und Gasbewegung beim Einlagerungsbereich MAW in der Betriebs- und frühen Nachbetriebsphase, Modellrechnungen mit dem Programm TOUGH2. Colenco-Bericht 3331/76 Rev.3, 2006
- [Colenco/GRS 2006] Berechnung der Radionuklidausbreitung im Deckgebirge mittels Transferfunktionen. Colenco Bericht 3331/94, GRS A-3329, Rev. 02, November 2006
- [ERCOSPLAN 2005] Quantifizierung der Carnallitit-Auflösung für unterschiedliche Zusammensetzungen des Schutzfluides, Teilberichte B, C; ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH; EGB 03-009/EGB 03-009N, Januar 2005
- [Felmy & Weare 1991] Calculation of multicomponent ionic diffusion from zero to high concentration: I. The system Na-K-Ca-Mg-Cl-SO₄-H₂O at 25°C. A.R.

- Felmy and J.H. Weare. *Geochimica et Cosmochimica Acta* Vol. 55, p. 113 (1991)
- [GRS 2006a] LOPOS AS6: Programmanpassungen und Verifikation für den Standort Asse. Version 03; ALSA-C-6.5B-GR072, GRS-A-3338, GRS Braunschweig, November 2006
- [GRS 2006b] Beschreibung der LOPOS-spezifischen Anpassungen für das Strukturmodell D5. ALSA-C-9.1B-GR071, GRS-A-3333 Version 02; GRS Braunschweig, November 2006
- [GSF 2004] Notiz 14: Ableitung einer mittleren dynamischen Viskosität für das Schutzfluid im Nahfeld. Revision 01, 06.12.2004
- [GSF 2005] Herleitung und Beschreibung des Konzepts zur Schließung der Schachanlage Asse. Rev. 04, Bericht zum Projekt Langzeitsicherheit, GSF FB Asse / DBE Tec, Stand: Juli 2005
- [GSF 2006a] Abschätzung der potenziellen Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase der Schachanlage Asse. GSF – Projekt Langzeitsicherheit Asse, ISS, Pröhl, G.; Gering, F.; Koch-Steindle, H.; München, August 2006
- [GSF 2006b] Herleitung und Beschreibung des Konzepts zur Schließung der Schachanlage Asse. Rev. 05, Bericht zum Projekt Langzeitsicherheit, GSF FB Asse / DBE Tec, Stand: Oktober 2006
- [IfG 2006] Tragfähigkeitsanalyse des Gesamtsystems der Schachanlage Asse in der Betriebsphase. Bericht, Rev. 02, IfG Leipzig, Oktober 2006
- [INE 2006] Thermodynamische Rechnungen zum Einfluss eines Lösungsaustausches zwischen den Einlagerungskammern auf das kammer-spezifische geochemische Milieu. Korthaus, E., Metz, V., Lützenkirchen, J. und Kienzler, B., FZK-INE 003/06, 2006
- [ISTec 2005] Realistische und maximale Gasbildung in der Schachanlage Asse. Bracke, G.; Müller, W.; Bericht ISTec-A-979, ISTec, Juli 2005
- [Lobo 1993] Mutual diffusion coefficients in aqueous electrolyte solutions. V.M.M. Lobo. *Pure & Appl. Chem.* Vol. 65, No. 12, p. 2613 (1993)
- [Maerki et al. 2004] The influence of tortuosity on molecular diffusion in freshwater sediments of high porosity. M. Maerki, B. Wehrli, Chr. Dinkel & B. Müller. *Geochimica et Cosmochimica Acta* Vol. 68, No. 7, p. 1519 (2004)
- [Voigt 2005] Stellungnahme zu Diffusionskonstanten im Schutzfluid. W. Voigt, TU Bergakademie Freiberg, Memorandum an GSF FB Asse, 07.12.2005

Anhang A Modellspezifische Umsetzung des alternativen Szenarios LsgMAW

A.1 Modelltechnische Besonderheiten der Umsetzung in KAFKA

Abweichend von der KAFKA-spezifischen Zusammenfassung von Modellsegmenten oberhalb von 511 m im östlichen Teil des Baufeldes in der Südflanke (siehe Schlussbericht 2005, Kap. 7.1.1.4), welche auch in den KAFKA-Rechnungen zu Kap. 3.1 und den LAW-Rechenfällen in Kap. 5 zur Anwendung kommt, wird das Baufeld in der Südflanke entsprechend der Strukturmodellbeschreibung im Schlussbericht 2005, Tab. 6.2 abgebildet und auf die Zusammenfassung verzichtet.

Abweichend von der Strukturmodellbeschreibung in Kap. 5.8.3 wird aus numerischen Gründen in der KAFKA-Berechnung der Variante RIX.2 eine Modifikation vorgenommen: Die jeweils oberen Segmente in den *Sandwich*-Paketen der Abbaue 8a/ und 8b/532, UMAWa-oS und UMAWa-oN mit der dazwischen liegender Modellstrecke UMAW-S1 auf der einen Seite und UMAWb-oS und UMAWb-oN mit der dazwischen liegenden Modellstrecke UMAW-S3 auf der anderen Seite, werden zusammengefasst. Dies war aus numerischen Gründen erforderlich, um nach Absenkung des Lösungsspiegels im oberen UMAW-Bereich die Zahl der potenziellen Gaspfade einzuschränken. Vergleichsrechnungen für die Variante RIX.1-K haben gezeigt, dass die Auswirkungen dieser Vereinfachung auf den Tracerfluss aus den Abbauen 8a/532 und 8b/532 in das Baufeld in der Südflanke tolerierbar sind. In Bezug auf die Ausbreitung von Tracern führt die Vereinfachung zu einer stärkeren Verdünnung im Nahbereich der MAW, da sie im Fall von UMAWa-o einem instantanen Konzentrationsausgleich zwischen der südlichen Modellkammer UMAWa-oS und der nördlichen Modellkammer UMAWa-oN entspricht (analog für UMAWb). In den Tracerabflüssen über die söhligigen Durchhiebe in das Baufeld in der Südflanke resultieren mit der Vereinfachung im dominierenden Fluss aus Abbau 8a/532 eine zeitliche Verzögerung im Anstieg sowie um höchstens einen Faktor 3 verringerte maximale Flüsse. Im Tracerfluss aus Abbau 8b/750 sind keine signifikanten Auswirkungen feststellbar. Ebenso sind im Tracerübertritt in das Deckgebirge keine Auswirkungen der vereinfachten Abbildung der oberen Modellsegmente der Abbaue 8a/532 und 8b/532 erkennbar.

A.2 Modelltechnische Besonderheiten der Umsetzung in LOPOS

Die Beschreibung des LOPOS-spezifischen Strukturmodells für den MAW-Nahbereich ist in [GRS 2006b] enthalten. In folgenden Details gibt es Abweichungen gegenüber dem Strukturmodell für KAFKA:

- Die schräge Verbindung H-8b-F zwischen dem Top der Kammer UMAWb und dem Baufeld in der Südflanke wird durch 2 Segmente ersetzt, weil in LOPOS nur horizontale und vertikale Segmente erlaubt sind.
- Die MAW-Kammer wird in zwei gleich große Segmente unterteilt, um die unterschiedliche Mobilisierung für zementierte und bituminierte Gebinde abbilden zu können.

Die geometrischen Abmessungen aller Segmente, die Konvergenzparameter und die übrigen segmentspezifischen Parameter sowie der Gaspfad für den MAW-Bereich sind in [GRS 2006b] angegeben. Das neue Segmentmodell für die MAW-Kammer (Modell HEKMAW) ist in [GRS 2006a] beschrieben.

Die Gasbildungsparameter entsprechen den Angaben im Schlussbericht 2005, lediglich die Werte für MAW sind verändert, siehe Tab. A.1, da jetzt von anaerob-feuchten Bedingungen ausgegangen wird, die gemäß Kapitel 5.8.4 zu größeren Gasvolumina und Gasbildungsraten führen. Für den Rechenfall RIX.2-L werden diese Mengen für MAW mit einem Faktor 0,338 multipliziert, der sich aus stöchiometrischen Überlegungen zur maximalen Gasbildung unter Annahme eines begrenzten Lösungsvolumens ergibt. Die Gasbildung gemäß MAW (trocken) wie im Schlussbericht 2005 wird in den Rechnungen mit detaillierter Modellierung des MAW-Bereichs nicht verwendet.

Tab. A.1 Massen Gas bildender Stoffe in der MAW-Kammer (LOPOS)

	MAW (anaerob feucht) [Mg]
Metalle 1	10
Metalle 2	350
Organika	0
Variante: *	1/3 oB

* 1/3 oB: auf 1/3 zwischen ISTec Unter- und Obergrenze des jeweiligen Bereichs

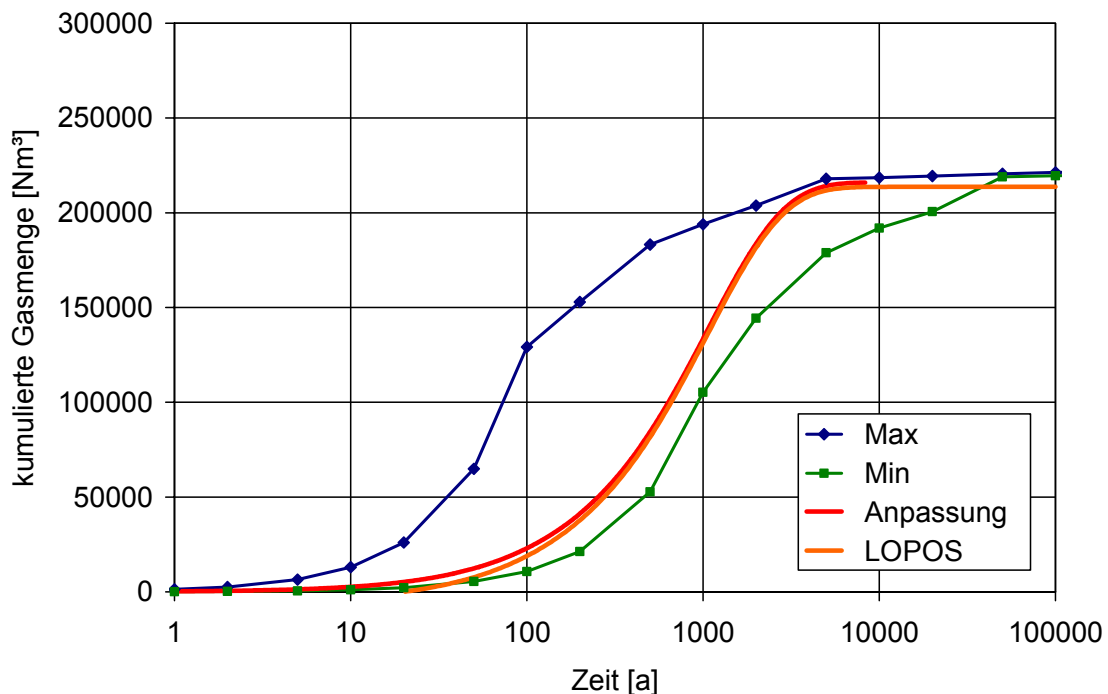


Abb. A.1 Gasbildung in MAW gemäß anaerob-feuchten Bedingungen. Bandbreite nach [ISTec 2005]

Abb. A.1 zeigt die Bandbreiten der Gasbildung gemäß [ISTec 2005], die Ergebnisse der vorgenommenen Parametrisierung („Anpassung“) und die im Rechenlauf RIX.1-L berechneten („LOPOS“) Gasmengen (die Gasbildung fängt hier erst zum Zeitpunkt 20 Jahre an).

Die Gasspeichervolumina entsprechen generell den KAFKA-Ergebnissen in Kapitel 5.8.5 und sind in [GRS 2006b] angegeben.

Für die Mobilisierung des Abfallinventars im MAW wurde ein spezielles Segmentmodell entwickelt (HEKMAW), das in [GRS 2006a] beschrieben ist. In diesem Segmentmodell kann die Mobilisierung des Inventars variabel vorgegeben werden, d.h. der Beginn der Mobilisierung kann vor dem Zeitpunkt des – in LOPOS modellmäßig bei einem festen Zeitpunkt instantanen – Lösungszutritts angegeben werden, denn der Lösungszutritt sollte kontinuierlich erfolgen, was in LOPOS aber nicht abgebildet wird. In Abb. A.2 ist dieses Mobilisierungsmodell skizziert (siehe [GRS 2006a]).

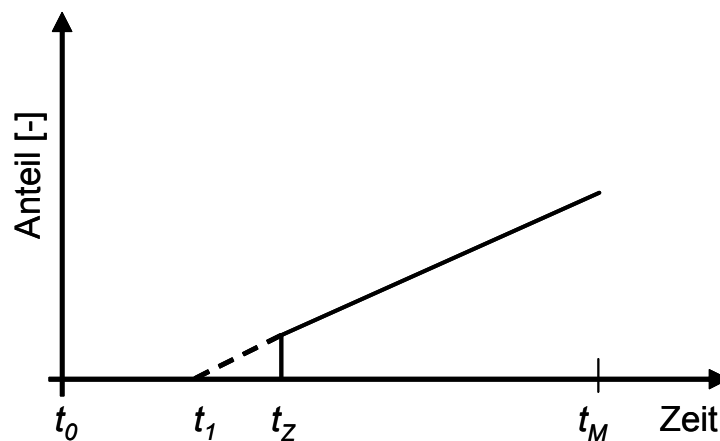


Abb. A.2 Mobilisierungsmodell

I

Im Rechenfall RIX.1-L ist beispielsweise der Zeitpunkt des Zutritts der Lösung bei $t_z = 20$ Jahren, der Zeitpunkt des Mobilisierungsbeginns bei $t_1 = 12$ Jahren. In Abb. A.3 sind diese Mobilisierungsverläufe aus dem Rechenfall RIX.1-L dargestellt. Dabei werden folgende Parameterwerte zugrunde gelegt:

- Mobilisierungsdauer ($t_M - t_1$) MAW-Z: 10 Jahre
- Mobilisierungsdauer ($t_M - t_1$) MAW-B: 70 Jahre

Da der Lösungszutritt zum Zeitpunkt 20 Jahre angesetzt wird, ist das Inventar der zementierten Gebinde bis dahin nahezu vollständig (80 %) für den Transport verfügbar, das Inventar der bituminierten Gebinde erst zu ca. 10 %.

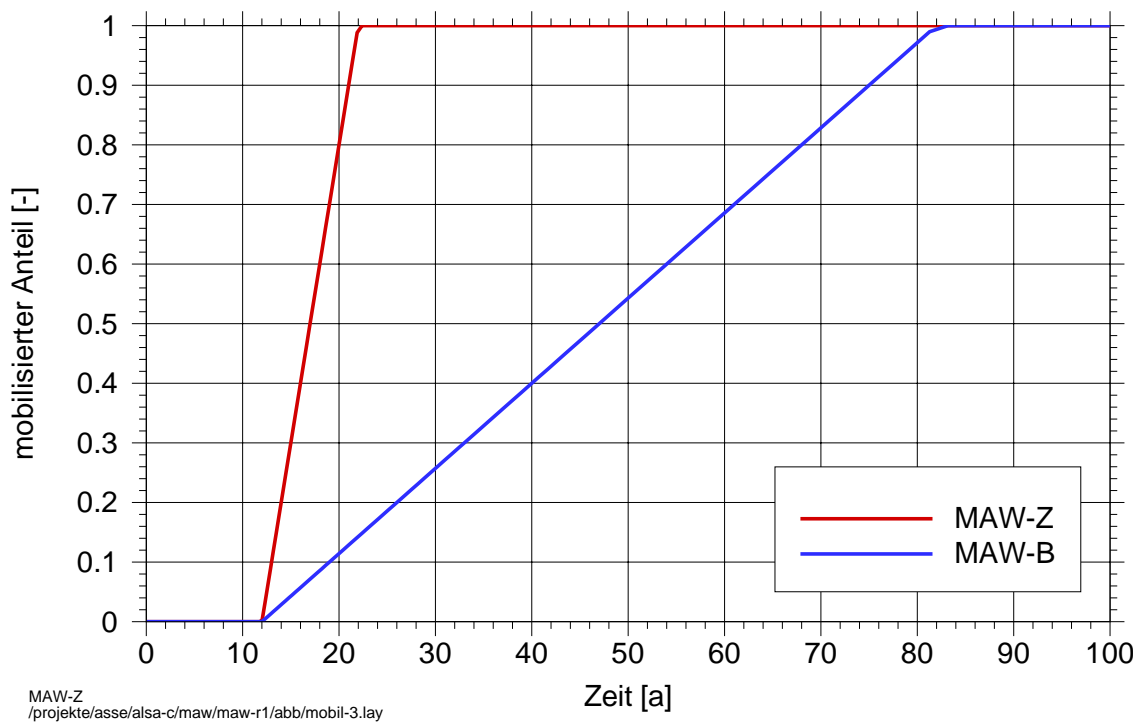


Abb. A.3 Anteil des mobilisierten Inventars gemäß Rechenfall RIX.1-L

Der Quellterm für die MAW-Kammer ist für die beiden Varianten in Kapitel 5.8.6 (geringe, bzw. große Lösungsmenge in der Kammer) in [ALSA-C 2006b] angegeben. In Tab. A.2 sind die maximalen Elementkonzentrationen für die beiden Datensätze zusammengestellt.

Tab. A.2 Maximale Elementkonzentrationen in der MAW-Kammer [ALSA-C 2006b]

Element	Konzentration [mol/m ³]	
	Lösungsvolumen 115 m ³	Lösungsvolumen 30 m ³
Am	$7 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Np	$3 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Pu	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Ra	$7 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{+0}$
Th	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-1}$
U	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Alle übrigen Elemente sind inventarbestimmt, d.h. die maximalen Elementkonzentrationen werden nicht erreicht		