

Arbeitsbericht NAB 20-31

**Methodik zur Definition des
Mindestabstands zwischen den
HAA- und SMA-Lagerteilen im
Kombilager**

Oktober 2021

Nagra

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73
Postfach 280
5430 Wettingen
Telefon 056 437 11 11
www.nagra.ch

Arbeitsbericht NAB 20-31

**Methodik zur Definition des
Mindestabstands zwischen den
HAA- und SMA-Lagerteilen im
Kombilager**

Oktober 2021

Nagra

STICHWÖRTER

Sicherheitstechnischer Vergleich, lagerbedingte Effekte,
Barrierenintegrität, Radionuklidfreisetzung, Kombilager

**Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle**

Hardstrasse 73
Postfach 280
5430 Wettingen
Telefon 056 437 11 11
www.nagra.ch

Nagra Arbeitsberichte stellen Ergebnisse aus laufenden Aktivitäten dar, welche nicht zwingend einem vollumfänglichen Review unterzogen wurden. Diese Berichtsreihe dient dem Zweck der zügigen Verteilung aktueller Fachinformationen.

"Copyright © 2021 by Nagra, Wettingen (Schweiz) / Alle Rechte vorbehalten.

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw."

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Tabellenverzeichnis.....	IV
Figurenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	XI
1 Einleitung	1
1.1 Projektrahmen.....	1
1.2 Ziele	2
1.3 Projektteam.....	2
2 Vorgaben, Anforderungen und Festlegungen	3
2.1 Einordnung des Vorgehens im Rahmen der Sicherheitsbeurteilung	3
2.2 Externe Vorgaben	4
2.2.1 Definition des Begriffs "Kombilager"	4
2.2.2 Überblick zu den Vorgaben.....	5
2.2.3 Sicherheitstechnische Vorgaben des ENSI für SGT Etappe 3.....	6
2.3 Interne Vorgaben, Anforderungen und Festlegungen.....	9
2.3.1 Festlegungen zum Kombilager im Entsorgungsprogramm	9
2.3.2 Weitere Festlegungen zum Kombilager und interne Vorgaben zur Standortwahl.....	10
3 Methodik zur Definition des Mindestabstands HAA – SMA.....	13
3.1 Vorgehen	13
3.2 Formulierung der Methodik.....	13
3.3 Schritt 1: Potenziell sicherheitsrelevante Aspekte.....	16
3.4 Schritt 2: Modelltechnische Festlegungen.....	23
3.5 Schritt 3: Durchführung der modellunterstützten Systemanalysen	26
3.6 Schritt 4: Formulierung der Mindestanforderungen an ein Kombilager	26
4 Phänomenologische Systemanalysen	27
4.1 Zweck und verwendete Modellwerkzeuge	27
4.2 Implementierte Modellkonfigurationen und Entwicklungsszenarien.....	28
4.2.1 Generisches 2D-Modell der Lagerkammern.....	28
4.2.2 Semi-generisches 2D-Modell der Lagerkammern.....	30
4.2.3 Semi-generisches 3D-Modell der Zugangsbauwerke	32
4.2.4 Betrachtete Entwicklungsszenarien	34
4.3 Untersuchte Wechselwirkungen und abgeleitete Rechenfälle.....	40
4.3.1 Zu beurteilende Aspekte, Wechselwirkungen und Indikatoren.....	40
4.3.2 Sicherheitstechnische Bewertung der Wechselwirkungen	44
4.3.3 Abgeleitete Rechenfälle.....	46

4.4	Ergebnisse.....	47
4.4.1	Basisfall (<i>Base Case</i>).....	47
4.4.2	Rechenfälle zur Auflockerungszone.....	54
4.4.3	Rechenfälle zur räumlichen Variabilität der Wirtgesteinseigenschaften.....	59
4.4.4	Rechenfälle zur Gasakkumulation.....	65
4.4.5	Rechenfälle zum Wärmeeintrag	76
4.4.6	Probabilistische Simulationen	77
4.5	Synthese der Ergebnisse	80
5	Systemanalysen zur Barrierenintegrität.....	83
5.1	Zweck und Umfang der Analysen	83
5.2	Modellaufbau und Skalierung des thermischen Quellterms	83
5.2.1	Generisches 2D-Modell.....	83
5.2.2	Semi-generisches 2D-Modell	89
5.3	Rechenfälle und Ergebnisse.....	95
5.3.1	Probabilistische Robustheitsanalysen (generisches 2D-Modell).....	95
5.3.2	Ergänzende deterministische Simulationen (semi-generisches 2D-Modell)	98
5.4	Synthese der Ergebnisse	100
6	Systemanalysen zur Radionuklidfreisetzung	103
6.1	Zweck und Umfang der Analysen	103
6.2	Modellwerkzeuge	104
6.2.1	Makroelement-Modellierungskonzept.....	104
6.2.2	Toolbox und Makroelement-Typen.....	104
6.2.3	Vergleichsrechnungen für das Kombi-Makroelement.....	106
6.2.4	Dimensionierung des Kombi-Makroelements	112
6.2.5	Makroelement-Modell des gesamten Kombilagers	114
6.2.5.1	Makroelement-Layout und -Geometrien	114
6.2.5.2	Anfangs- und Randbedingungen	116
6.2.5.3	Quellterme	118
6.2.5.4	Code.....	119
6.2.6	Vergleichsrechnungen für das Makroelement-Modell des gesamten Kombilagers.....	119
6.2.6.1	Einordnung und Zielsetzung.....	119
6.2.6.2	Ergebnisse der Vergleichsrechnung	120
6.2.6.3	Schlussfolgerungen.....	127
6.3	Systemanalysen	127
6.3.1	Variierte Parameter und ausgewertete Indikatoren.....	128
6.3.2	Basisfall Kombilager und Vergleich mit Einzellagern.....	130
6.3.3	Globale Sensitivitätsanalyse (Morris OAT)	131
6.3.4	Monte-Carlo-Ungewissheitsanalyse	132

6.4	Resultate und Diskussion.....	132
6.4.1	Basisfall Kombilager und Vergleich mit Einzellagern.....	132
6.4.2	Globale Sensitivitätsanalyse (Morris OAT)	138
6.4.2.1	Sensitivität des Maximaldrucks in den Lagerkammern.....	138
6.4.2.2	Sensitivität der Maximaltemperatur in den Lagerkammern	139
6.4.2.3	Sensitivität der maximalen normierten Aktivitätsflüsse.....	141
6.4.3	Monte-Carlo-Ungewissheitsanalyse	143
6.4.4	Robustheitsanalyse und beispielhafte Optimierungsmassnahmen.....	151
6.5	Synthese der Ergebnisse	156
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	157
7.1	Behördliche Vorgaben zum Kombilager	157
7.2	Bereitstellung einer modell-unterstützten Bewertungsmethodik.....	157
7.3	Beispielhafte Durchführung von Systemanalysen.....	158
7.4	Vorläufige Aussagen zum Mindestabstand	159
7.5	Schlussfolgerungen und Ausblick	160
8	Literaturverzeichnis	161
Anhang A: Vorgaben und Erwartungen seitens der Behörden, AdK und EschT in Bezug auf ein Kombilager.....		A-1
Anhang B: Ergänzende Angaben zu den Systemanalysen zur RN-Freisetzung (Kapitel 6).....		B-1
B.1	Geometrische Eigenschaften der Lagerbauwerke und daraus abgeleiteter Lagerstrukturen im Modell	B-1
B.2	Parameterbandbreiten und -verteilungen.....	B-3
B.3	Parametrisierung des Basisfalls	B-10
B.4	Ergebnisse der Monte-Carlo-Ungewissheitsanalyse für die Indikatoren Druck und Temperatur	B-11
B.5	Vorgenommene Anpassungen am Makroelement-Modell des Basisfalls im Rahmen der Vergleichsrechnung.....	B-15

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Übersicht zu den externen Vorgaben zum Kombilager, ihren Quellen und ihrer Klassifizierung (vgl. auch Anhang A).....	6
Tab. 2-2:	Überblick zu den 11 Arbeitshypothesen aus dem "Dry-run".....	10
Tab. 3-1:	Überblick zu den potenziell sicherheitsrelevanten Aspekten und zugehörigen Wechselwirkungen zwischen den SMA- und HAA-Lagerteilen	17
Tab. 3-2:	Überblick über die potenziellen Indikatoren und deren Herleitung aus thermo-hydraulischen Systemanalyse.....	25
Tab. 4-1:	Vereinfachte Darstellung des Betriebszustands des Kombilaggers in der Bau- und Betriebsphase sowie nach Lagerverschluss	36
Tab. 4-2:	Referenzwerte der thermo-hydraulischen Eigenschaften der betrachteten Materialien für die phänomenologischen Systemanalysen	39
Tab. 4-3:	Verwendete Modellvariogramme zur Erzeugung von räumlichen Verteilungen der Wirtgesteins-eigenschaften (Porosität, hydraulische Durchlässigkeit, Wärmeleitfähigkeit) für die thermo-hydraulischen Systemanalysen im Standortgebiet ZNO.....	42
Tab. 4-4:	Überblick über die potenziellen Indikatoren und deren Herleitung aus thermo-hydraulischen Systemanalysen.....	44
Tab. 4-5:	Übersicht über die im Rahmen der phänomenologischen Analysen durchgeführten Rechenfälle.....	46
Tab. 6-1:	Übersicht über die im Modell vorhandenen Quellterme mit Beschreibung und Referenz gemäss den prov. Objektdatensätzen.....	118
Tab. 6-2:	Zusammenstellung der Vergleichsorte für die Zustandsgrössen und Gasflüsse mit der jeweiligen Bezeichnung im Makroelement-(ME-) und 3D-Modell (3D), wie sie in Fig. 6-10/6-11 verwendet werden	121
Tab. 6-3:	Überblick über die im Rahmen der probabilistischen Sensitivitäts- und Ungewissheitsanalyse variierten Parameter.....	129
Tab. 6-4:	Überblick zu den ausgewerteten Indikatoren im Rahmen der probabilistischen Sensitivitäts- und Ungewissheitsanalyse mit den dazugehörigen Lokationen im numerischen Modell.	130
Tab. A-1:	Übersicht der Vorgaben, Empfehlungen und Hinweise zum Kombilager von Behörden und Expertengruppen im Sachplanverfahren	A-1
Tab. B-1:	Geometrische Eigenschaften der berücksichtigten Lagerbauwerke im SMA-Lagerteil gemäss Tab. 2-5 in NAB 16-07 (Nagra 2016d) sowie im HAA-Lagerteil gemäss Tab. 2-8 in NAB 16-08 (Nagra 2016e).....	B-1
Tab. B-2:	Geometrische Eigenschaften der Lagerstrukturen im Modell mit Angabe des Verfüllmaterials und entsprechender Materialklasse (korrespondierend mit Tab. B-3 und Tab. B-4) sowie der Zuordnung zum entsprechenden Makroelement	B-2
Tab. B-3:	Parameterbandbreiten und -verteilungen für die globale Sensitivitätsanalyse (Morris OAT) sowie die Monte-Carlo-Ungewissheitsanalyse	B-3
Tab. B-4:	Hydraulische und thermophysikalische Parameter der verwendeten Materialien im Basisfall.....	B-10

Figurenverzeichnis

Fig. 2-1:	Anforderungsbasierte Entwicklung der drei standortbezogenen Lagerprojekte und indikatorbasierte Bewertung (" <i>Performance Assessment</i> ") im Rahmen des sicherheitstechnischen Vergleichs der Standorte	4
Fig. 2-2:	Schematische Darstellung der Methodik für den Standortvergleich in Etappe 3 (vgl. ENSI 2018c).....	8
Fig. 2-3:	Schematische Darstellung der Methodik für den Standortvergleich in Etappe 3	12
Fig. 3-1:	Flussdiagramm zur modellunterstützten Indikatormethodik zur Festlegung des Mindestabstands zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen eines Kombilagers für jedes der drei vorgeschlagenen Standortgebiete	15
Fig. 3-2:	Hypothetische (ungünstige) Anordnungen der SMA- und HAA-Lagerfelder im generischen (standortunabhängigen) Lagerkonzept	24
Fig. 3-3:	Hypothetische (ungünstige) Anordnungen der SMA- und HAA-Lagerfelder zur beispielhaften Analyse der standortunabhängigen Lagerprojekte unter Berücksichtigung der standortspezifischen Mächtigkeit und Neigung des Wirtgesteins	24
Fig. 4-1:	Generisches 2D-Modell der Lagerkammern eines Kombilagers im vertikal-ebenen Schnitt	29
Fig. 4-2:	Variante des generischen 2D-Modells der Lagerkammern eines Kombilagers im vertikal-ebenen Schnitt	30
Fig. 4-3:	Semi-generisches 2D-Modell der Lagerkammern eines Kombilagers im vertikal-ebenen Schnitt für das Standortgebiet ZNO.....	31
Fig. 4-4:	Semi-generisches 3D-Modell der Lagerkammern eines Kombilagers mit Zugangs- und Verschlussbauwerken für das Standortgebiet ZNO	33
Fig. 4-5:	Spannungsregime in der Nordschweiz und abgeleitete Referenz-Spannungsregimes	35
Fig. 4-6:	Darstellung der Implementierung der oberen und unteren Rahmengesteine und der thermo-hydraulischen Randbedingungen an der Modellober- und -untergrenze	37
Fig. 4-7:	Typische Auflockerungszonen um die SMA- und HAA-Lagerkammern in den Standortgebieten JO, NL und ZNO	41
Fig. 4-8:	Realisationen der hydraulischen Durchlässigkeitsverteilung im semi-generischen 2D-Modell ZNO	42
Fig. 4-9:	Betrachtete Lokationen zur Auswertung der thermo-hydraulischen Wechselwirkungen	45
Fig. 4-10:	Basisfall: Kontour-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 2 Jahren (Ende der Betriebsphase 1) und (b) nach 23 Jahren (Ende der Betriebsphase 2)	49

Fig. 4-11:	Basisfall: Kontour-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 100 Jahren und (b) nach 500 Jahren.....	50
Fig. 4-12:	Basisfall: Kontour-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 5'000 Jahren und (b) nach 20'000 Jahren	51
Fig. 4-13:	Basisfall: Kontour-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung nach 100'000 Jahren.....	52
Fig. 4-14:	Zeitliche Entwicklung von Temperatur, Druck und Gassättigung im Basisfall	53
Fig. 4-15:	Realisationen von Auflockerungszonen um die SMA- und HAA-Lagerkammern in Form von heterogenen Durchlässigkeitsverteilungen	54
Fig. 4-16:	Rechenfall A1: Kontur-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 500 Jahren, (b) nach 5'000 Jahren und (c) nach 20'000 Jahren	56
Fig. 4-17:	Zeitliche Entwicklung von Gasfluss und Wasserfluss in den Rechenfällen A1, A2, A3 sowie im <i>Base Case</i>	58
Fig. 4-18:	Rechenfälle A1, A2, A3 und <i>Base Case</i> : Zeitliche Entwicklung von Massenfluss (links) und kumulativem Massenfluss (rechts) des im Wasser gelösten Wasserstoffs an der Grenzfläche AUZ-SMA zum intakten Wirtgestein.....	59
Fig. 4-19:	Rechenfall B1: Kontour-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 50 Jahren und (b) nach 5'000 Jahren.....	61
Fig. 4-20:	Rechenfall B1: Kontour-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 20'000 Jahren und (b) nach 100'000 Jahren	62
Fig. 4-21:	Kontur-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung a) für Rechenfall B2 und (b) Rechenfall B3 jeweils nach 20'000 Jahren	64
Fig. 4-22:	Rechenfall C2: Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 100 Jahren, (b) 500 Jahren und (c) nach 5'000 Jahren.....	67
Fig. 4-23:	Rechenfall C2 – Kontur-Darstellungen von Druck und Gassättigung im Umfeld des SMA-Betriebstunnels (a) nach 200 Jahren, (b) nach 3'000 Jahren und (c) nach 5'000 Jahren	69
Fig. 4-24:	Rechenfall C2 – Kontur-Darstellungen der Gassättigung im Umfeld des HAA-Betriebstunnels (a) nach 10'000 Jahren, (b) nach 20'000 Jahren, (c) nach 40'000 Jahren und (d) nach 50'000 Jahren.....	70
Fig. 4-25:	Rechenfall C2 – Kontur-Darstellungen von Drucks und Gassättigung im Umfeld des Zugangstunnels (a) nach 5'000 Jahren und (b) nach 20'000 Jahren.....	71
Fig. 4-26:	Rechenfall C3 – Druck und Gassättigung auf Lagerebene (a) nach 5'000 Jahren, (b) 40'000 Jahren	73
Fig. 4-27:	Rechenfall C3 – Kontur-Darstellungen von Druck und Gassättigung im Umfeld des SMA-Betriebstunnels nach 5'000 Jahren.	73

Fig. 4-28:	Rechenfall C3 – Kontur-Darstellungen der Gassättigung im Umfeld des HAA-Betriebstunnels (a) nach 10'000 Jahren, (b) nach 20'000 Jahren, (c) nach 40'000 Jahren und (d) nach 50'000 Jahren.....	74
Fig. 4-29:	Rechenfall C3 – Kontur-Darstellungen von Druck und Gassättigung im Umfeld des Zugangstunnels nach (a) 1'000 Jahren und (b) 20'000 Jahren.....	75
Fig. 4-30:	Monte Carlo Simulationen MC1, MC2, MC3 und MC4 – Zeitliche Entwicklung des Drucks	78
Fig. 4-31:	Monte Carlo Simulationen MC1, MC2, MC3 und MC4 – Zeitliche Entwicklung der Gassättigung.....	79
Fig. 4-32:	Monte Carlo Simulationen MC1, MC2, MC3 und MC4 – Zeitliche Entwicklung der Temperatur	79
Fig. 5-1:	Generisches 2D-Modell: (a) Abstand 125 m, (b) Abstand 210 m	85
Fig. 5-2:	Generisches 2D-Modell mit Abstand 210 m: Kontur-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 200 Jahren, (b) nach 2'000 Jahren und (c) nach 20'000 Jahren.....	86
Fig. 5-3:	Generisches 2D-Modell mit Abstand 210 m: Zeitliche Entwicklung von Temperatur, Druck und Gassättigung.....	87
Fig. 5-4:	Generisches 2D-Modell: Vergleich der zeitlichen Entwicklung von Temperatur (oben) und Druck (unten) zwischen Rechnungen mit Abstand 125 m und 210 m.....	88
Fig. 5-5:	Semi-generisches 2D-Modell: (a) Abstand 125 m, (b) Abstand 210 m	90
Fig. 5-6:	Semi-generisches 2D-Modell mit Abstand 125 m: Kontur-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 200 Jahren, (b) nach 5'000 Jahren und (c) nach 20'000 Jahren.....	91
Fig. 5-7:	Semi-generisches 2D-Modell mit Abstand 125 m: Zeitliche Entwicklung von Temperatur, Druck und Gassättigung.....	92
Fig. 5-8:	Semi-generisches 2D-Modell mit Abstand 210 m: Kontur-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 200 Jahren, (b) nach 5'000 Jahren und (c) nach 20'000 Jahren.....	93
Fig. 5-9:	Semi-generisches 2D-Modell mit Abstand 210 m: Zeitliche Entwicklung von Temperatur, Druck und Gassättigung.....	94
Fig. 5-10:	Generisches 2D-Modell mit Abstand 125 m (ohne thermische Skalierung): zeitliche Entwicklung von Druck und Temperatur aus Monte-Carlo-Simulationen.....	97
Fig. 5-11:	Generisches 2D-Modell mit Abstand 210 m (ohne thermische Skalierung): zeitliche Entwicklung von Druck und Temperatur aus Monte-Carlo-Simulationen	97
Fig. 5-12:	Generisches 2D-Modell mit Abstand 125 m und 210 m: Skalierung der Temperatur in SMA-Kaverne aus Monte-Carlo-Simulationen	98

Fig. 5-13:	Semi-generisches 2D-Modell: Vergleich der zeitlichen Entwicklung von Temperatur für Abstand 125 m und 210 m unter der Annahme von lokalen Aquiferen direkt an der oberen und unteren Schichtgrenze des Wirtgesteins und unter Berücksichtigung der oberen und unteren Rahmengesteine.....	99
Fig. 6-1:	Illustration der Makroelement-Typen <i>Tunnel</i> , <i>Schacht</i> und <i>Kombi</i>	105
Fig. 6-2:	Referenzmodell mit Vergleichspunkten	107
Fig. 6-3:	Kombi-Makroelement für die Vergleichsrechnungen	108
Fig. 6-4:	Vergleich Temperatur, Druck und Gassättigung für die zentrale SMA- und HAA-Lagerkammer (Makroelement-Modell: jeweiliges Maximum aller Elemente, Referenzmodell: MORT1 bzw. PELL gemäss Fig. 6-2) sowie den Vergleichspunkt in deren Mitte.....	110
Fig. 6-5:	Vergleich Wasser- und Gasflüsse vom Wirtgestein in die AUZ der SMA-/HAA-Lagerkammern sowie vom HAA- zum SMA-Lagerteil durch die vertikale Fläche in der Mitte der beiden Lagerteile	111
Fig. 6-6:	Temperaturverlauf im Zentrum der dem HAA-Lagerteil nächstgelegenen SMA-Lagerkammer als Funktion des Abstands zwischen den Lagerteilen (d_{Kombi}) für die Situation mit allen HAA-Lagerkammern (Gen-200), die Konfiguration mit je 0.5 Lagerkammern (O1-200) und die Konfiguration mit je 1.5 Lagerkammern (O2-200)	113
Fig. 6-7:	Schematische Darstellung (nicht skalengetreu) des Kombi-Makroelements mit Illustration der Skalierungsfaktoren und Längen in axialer Richtung.....	113
Fig. 6-8:	Temperaturverlauf in der zentralen SMA-Lagerkammer (SMA C) als Funktion des Abstands zwischen den Lagerteilen (d_{Kombi}) für die Situation mit allen Lagerkammern (Gen-200) und das Kombi-Makroelement gemäss Fig. 6-7	114
Fig. 6-9:	Schematische Darstellung (nicht skalengetreu) des Makroelement-Modelllayouts für das gesamte generische Kombilager	115
Fig. 6-10:	Makroelement-(ME-)Modell vs. 3D-Modell: zeitlicher Verlauf von Temperatur, Druck und Gassättigung in den SMA- (links) und HAA-Lagerkammern (rechts) sowie den V3- und V4-Siegel (Mitte).....	125
Fig. 6-11:	Makroelement-(ME-)Modell vs. 3D-Modell: zeitlicher Verlauf der Gasflüsse über die V1-Siegel der SMA- (links) und HAA-Lagerkammern (rechts) sowie über das V3- und V4-Siegel (Mitte).....	126
Fig. 6-12:	Makroelement-(ME-)Modell vs. 3D-Modell: zeitlicher Verlauf des Gasvolumens sowie der Wasserstoffmasse im Gesamtmodell	126
Fig. 6-13:	Kombilager: Zeitlicher Verlauf von Druck, Temperatur und Gassättigung in den seitlichen und zentralen SMA- und HAA-Lagerkammern mit entsprechenden räumlichen Verteilungen zu unterschiedlichen Zeiten	135

Fig. 6-14:	Gasbildung in den SMA- (links) und HAA-Lagerkammern (rechts) mit jeweiligen Wasserstoffflüssen (Summe aus advektiven und diffusiven Wasserstoffflüssen in beiden Phasen) zu den V1-Siegeln und via AUZ ins Wirtgestein.....	136
Fig. 6-15:	Wasserstoffflüsse (links) und normierte Aktivitätsflüsse (rechts) über die Modellränder.....	136
Fig. 6-16:	Vergleich Kombilager vs. SMA-Lager: Druck (oben links) und Gassättigung (oben rechts) in den seitlichen und der zentralen SMA-Lagerkammer sowie Wasserstoffflüsse aus den Lagerkammern und über die Modellränder (unten links) sowie normierte Aktivitätsflüsse über die Modellränder (unten rechts)	137
Fig. 6-17:	Vergleich Kombilager vs. HAA-Lager: Druck (oben links) und Gassättigung (oben rechts) in den seitlichen und der zentralen HAA-Lagerkammer sowie Wasserstoffflüsse aus den Lagerkammern und über die Modellränder (unten links) sowie normierte Aktivitätsflüsse über die Modellränder (unten rechts)	137
Fig. 6-18:	Morris-Plot (μ vs σ der EE) für den Maximaldruck in den Lagerkammern (oben) sowie für das Verhältnis des Maximaldrucks zum lithostatischen Druck (unten) für SMA (links) und HAA (rechts)	139
Fig. 6-19:	Morris-Plot (μ vs σ der EE) für die Maximaltemperatur in den Lagerkammern (oben) sowie für die maximale Temperaturerhöhung im Vergleich zur in-situ Temperatur (unten) für SMA (links) und HAA (rechts)	140
Fig. 6-20:	Morris-Plot (μ vs σ der EE) für die maximalen normierten Aktivitätsflüsse über alle Ränder (oben links) und über die einzelnen Freisetzungspfade	142
Fig. 6-21:	Verteilung des zeitlichen Verlaufs der normierten Aktivitätsflüsse über alle Ränder (oben links) und über die einzelnen Freisetzungspfade.....	145
Fig. 6-22:	CCDF der maximalen normierten Aktivitätsflüsse über alle Ränder sowie über die einzelnen Freisetzungspfade.....	146
Fig. 6-23:	Scatterplot der maximalen normierten Aktivitätsflüsse über alle Ränder als Funktion des Auftretenszeitpunkts des Maximums. Das jeweilige Gasbildungsszenario (gas_Szenario) ist in Farbe dargestellt.....	147
Fig. 6-24:	Relative Häufigkeit (oben) und relative Häufigkeit pro Klasse (unten) der dominierenden Freisetzungspfade für unterschiedliche Klassen der maximalen normierten Aktivitätsflüsse über alle Ränder	148
Fig. 6-25:	Cobweb-Diagramm; Dominanter Pfad mit den zehn Parametern, die damit am stärksten korreliert sind (sortiert nach abnehmender Korrelation)	149
Fig. 6-26:	Scatterplot der maximalen normierten Aktivitätsflüsse über alle Ränder als Funktion des Auftretenszeitpunkts des Maximums. Der jeweilige dominante Transportpfad (Dom Pfad) der Rechenfälle ist in Farbe dargestellt.....	150

Fig. 6-27:	Cobweb-Diagramm; maximale normierte Aktivitätsflüsse über alle Ränder mit den zehn Parametern, die damit am stärksten korrelieren (sortiert nach abnehmender Korrelation).....	153
Fig. 6-28:	Scatterplot der maximalen normierten Aktivitätsflüsse über alle Ränder als Funktion der Permeabilität der Versiegelung in der Rampe (k_{V4}). Das jeweilige Gasbildungsszenario ($gas_Szenario$) der Rechenfälle ist in Farbe dargestellt.....	154
Fig. 6-29:	Scatterplot der maximalen normierten Aktivitätsflüsse über alle Ränder als Funktion der Permeabilität der Versiegelung in der Rampe (k_{V4} , x-Achse) und der Permeabilität der Versiegelung im Schacht (k_{V3} , in Farbe) ohne (oben) und mit Anwendung der im Text vorgeschlagenen Anforderung (unten).....	155
Fig. B-1:	Verteilung des zeitlichen Verlaufs des Drucks in den Lagerkammern (oben) sowie des Verhältnisses zum lithostatischen Druck (unten) für SMA (links) und HAA (rechts).....	B-11
Fig. B-2:	CCDF des Maximaldrucks in den Lagerkammern (links) sowie des Verhältnisses zum lithostatischen Druck (rechts).....	B-12
Fig. B-3:	Verteilung des zeitlichen Verlaufs der Temperatur in den Lagerkammern (oben) sowie der Differenz zur in-situ Temperatur (unten).....	B-13
Fig. B-4:	CCDF der Maximaltemperatur in den Lagerkammern (links) sowie der Differenz zur in-situ Temperatur (rechts).....	B-14

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
AUZ	Auflockerungszone (EDZ / Excavation Damaged Zone auf Englisch)
ASR	Auswahl Standorte für Vorbereitung Rahmenbewilligungsgesuch
ATA	Alphatoxische Abfälle
BE	abgebrannte Brennelemente
BFE	Bundesamt für Energie
EG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
EGTS	Engineered Gas Transport System
ELB	Endlagerbehälter
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
EP16	Entsorgungsprogramm 2016
EschT	(Internationale) Expertengruppe Schweizer Tiefenlager
gTL	geologische(s) Tiefenlager
HAA	hochaktive Abfälle
HEB	Haupterschliessungsbereich
JO	Standortgebiet Jura Ost
KEG	Kernenergiegesetz
KEV	Kernenergieverordnung
KNS	Eidgenössische Kommission für nukleare Sicherheit
LMA	Langlebige mittelaktive Abfälle
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NL	Standortgebiet Nördlich Lägern
OFA	Oberflächenanlage(n)
OPA	Opalinuston (Wirtgestein)
ORG	obere Rahmengesteine
PA	Performance assessment
RBG	Rahmenbewilligungsgesuch
RN	Radionuklid
SA	Safety assessment (Sicherheitsanalysen)
SG	Standortgebiet
SGT	Sachplan geologische Tiefenlager

SMA	schwach- und mittelaktive Abfälle
StSV	Strahlenschutzverordnung
SV	Sicherheitstechnischer Vergleich
THM-C	Thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemisch
URG	untere Rahmengesteine
WG	Wirtgestein
ZNO	Standortgebiet Zürich Nordost

1 Einleitung

1.1 Projektrahmen

Die Entwicklung und Dokumentation einer Methodik für die Definition des Mindestabstands zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen im Kombilager gilt im sicherheitstechnischen Vergleich als notwendiger Schritt zur Auswahl der Standorte bzw. des Lagertyps. Die Nagra tritt damit auf die Auflage 5.3 des Bundesrats zum Entsorgungsprogramm 2016 (Nagra 2016a) ein, welche besagt: *"Im Entsorgungsprogramm 2021 hat die Nagra die grundsätzlich bestehenden Varianten bei einer Kombilager-Lösung aufzuzeigen, um mögliche sicherheitsrelevante Beeinträchtigungen der einzelnen Lagerteile zu vermeiden. Ausserdem sollen der relative Platzbedarf und die sicherheitstechnisch anzustrebenden Varianten dokumentiert werden"*. Die im vorliegenden Bericht beschriebene Methodikentwicklung zur Kombilager-Lösung umfasst auch deren beispielhafte Anwendung im Rahmen der standortbezogenen Lagerprojekte, inkl. beispielhafte Ableitung des Mindestabstands und ggf. weiterer (Mindest-)Anforderungen. Darüber hinaus schliesst die Methodik die Analyse von Vorgaben, Anforderungen und bestehenden internen Festlegungen mit ein, sodass auch diesbezügliche Änderungen bei der Anwendung der Methodik berücksichtigt werden können.

Wesentlicher Bestandteil der Methodikentwicklung sind modellunterstützte Systemanalysen zur Langzeitsicherheit eines Kombilagere. Hierzu zählen (i) Analysen zur Identifikation von potenziell relevanten Entwicklungsszenarien inklusive der zu betrachtenden Prozesse und Parameter (phänomenologische Analysen), (ii) Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen zur Bewertung der Barrierenintegrität ("Performance Assessment" – PA) sowie (iii) System-, Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen zur Bewertung der resultierenden Radionuklidfreisetzung.

Für die phänomenologischen Systemanalyse und die Robustheitsanalysen zur Barrierenintegrität werden sowohl generische (d.h. standortunabhängige) als auch standortbezogene Bewertungsmodelle aus dem Modellportfolio des MARIE-Projekts ("Model based Assessment of Repository Induced Effects") verwendet und punktuell weiterentwickelt (Papafotiou & Namhata 2018). Bezüglich Radionuklidtransport werden die in den vergangenen Jahren erarbeiteten Modelle für die Analyse der Freisetzung von volatilen Radionukliden über die Zugangsbauwerke des SMA-Lagers für ein generisches Kombilager weiterentwickelt.

Als Bewertungsgrundlagen müssen die geologischen Verhältnisse in den Standortgebieten, die zu berücksichtigenden Lagerkonfigurationen und die abfallbezogenen Quellterme (Wärme, Gas und Radionuklide) spezifiziert werden. Im Rahmen der Methodik-Entwicklung und ihrer beispielhaften Anwendung in diesem Bericht erfolgen die entsprechenden Festlegungen auf der Grundlage der Referenzkonzepte aus der Etappe 2 des Sachplanverfahrens mittels sogenannter "provisorischer Objektdatensätze", die ausschliesslich für den vorliegenden Anwendungszweck gültig sind. Weitere Grundlagen bilden die Ergebnisse und Arbeitshypothesen, welche in der Vorbereitungsphase zum sicherheitstechnischen Vergleich erarbeitet wurden. Für die zukünftige Anwendung der entwickelten Methodik werden sowohl die Referenzkonzepte als auch die Objektdatensätze aufdatiert.

Der erforderliche Mindestabstand zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen und ggf. weitere Anforderungen bezüglich der gegenseitigen Anordnung der Lagerteile (z.B. Orientierung der Lagertunnel unter Berücksichtigung von lokalem Spannungsfeld und Schichtneigung) können mittels semi-generischer 2D- und 3D-Modelle für jeden Standort separat abgeleitet werden. Solche Modelle können auch für eine spätere Bewertung der sicherheitstechnischen Konsequenzen verwendet werden, welche sich für konkretere standortspezifische Konfigurationen eines Kombilagere ergeben (z.B. ausreichendes Platzangebot).

1.2 Ziele

Das Projekt "Methodik zur Definition des Mindestabstands HAA – SMA" liefert eine Methodik zur Ableitung von standortspezifisch zu erfüllenden sicherheitstechnischen Anforderungen bezüglich der Anordnung der HAA- und SMA-Lagerteile im Kombilager. Hierzu zählt insbesondere der zwischen den Lagerteilen einzuhaltende Mindestabstand, der gewährleistet, dass die möglichen THM-C-Wechselwirkungen zwischen den Lagerteilen über das Wirtgestein sowie allfällige radiologische Wechselwirkungen über das Wirtgestein oder entlang von Strecken und Schächten keine sicherheitsrelevante Beeinträchtigung darstellen. Darüber hinaus sollen standortspezifische Aspekte hinsichtlich der gegenseitigen Anordnung der Lagerteile (z.B. Ausrichtung der Lagerkammern, Varianten der SMA-Kavernenquerschnitte für moderate/grosse Überdeckungen) und die daraus resultierenden Auswirkungen auf das Platzangebot am Lagerstandort analysiert werden. Weitere Aspekte beziehen sich auf die möglichen THM-C-Wechselwirkungen entlang der Zugangsbauwerke zu den beiden Lagerteilen.

Konkret werden mit dem vorliegenden Bericht folgende Zielsetzungen verfolgt:

- Konsolidierung der externen Vorgaben, Erwartungen und Hinweise zum Kombilager
- Entwicklung der Methodik zur Ableitung von Anforderungen bezüglich der Anordnung der HAA- und SMA-Lagerteile im Kombilager
- beispielhafte Durchführung von THM-C-Systemanalysen zur Abschätzung des Mindestabstands zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen im Kombilager sowie ggf. weiterer (Mindest-)Anforderungen in den verbleibenden Standortgebieten. Die Analysen berücksichtigen standortspezifische Aspekte, wie z.B. die Position des HEB, die Schichtneigung, die Ausrichtung der Lagerkammern im lokalen Spannungsfeld sowie die standortbezogene Anordnung von Pilot- und Testlager.
- beispielhafte Durchführung von Radionuklidtransportrechnungen zur Identifikation allfälliger radiologischer Wechselwirkungen und die Erarbeitung/Konsolidierung von diesbezüglichen sicherheitstechnischen Anforderungen
- Bereitstellung eines modellunterstützten Workflows für die sicherheitstechnische Gesamtbewertung des Kombilagere (z.B. bezüglich Platzbedarf, jedoch ohne Betriebssicherheit; diese wird in einem separaten Bericht (Nagra 2020) behandelt) gegenüber zwei separaten Lagern für HAA und SMA in unterschiedlichen Standortgebieten gemäss Vorgaben durch die Behörden (ENSI 2018c)

1.3 Projektteam

Der vorliegende Bericht wurde vom Projektteam "Methodik zur Definition des Mindestabstands HAA – SMA" gemeinschaftlich verfasst. Mitwirkende und Verantwortlichkeiten:

- Projektkoordination: P. Marschall, P. Hunkeler (Kapitel 6), D. Pauling (alle Nagra)
- Gesetzliche Vorgaben: A. Poller (CSD)
- Systemanalysen zur Barrierenintegrität: A. Papafotiou, A. Namhata (beide Intera Swiss Branch)
- Systemanalysen zur Radionuklidfreisetzung: S. Diem, G. Mayer (beide CSD)

2 Vorgaben, Anforderungen und Festlegungen

2.1 Einordnung des Vorgehens im Rahmen der Sicherheitsbeurteilung

Vorschläge zur Methodik der Sicherheitsbeurteilung in Etappe 3 des Sachplanverfahrens wurden in verschiedenen internen Projektberichten entwickelt und werden in den Referenzberichten zum Rahmenbewilligungsgesuch dokumentiert. Die Ableitung von Anforderungen zur Langzeitsicherheit erfolgt, ausgehend von behördlichen Schutzziele und -kriterien sowie den übergeordneten Lager- und Sicherheitskonzepten durch Systemanalysen der Sicherheit (Fig. 2-1, linker Teil der Grafik). Im vorliegenden Fall gliedern sich diese Analysen in die Identifikation potenziell relevanter Wechselwirkungen in Bezug auf die Sicherheitsfunktionen ("*safety functions*") der einzelnen Lagerteile sowie des Gesamtlagers, in numerische Modellrechnungen zur Analyse der Entwicklung der einzelnen Lagerteile sowie des Gesamtlagers in Bezug auf bestehende Eignungsziele ("*performance targets*") sowie die Ableitung von allfälligen, potenziell standortspezifischen Mindestanforderungen bezüglich Anordnung und Auslegung der HAA- und SMA-Lagerteile im Kombilager ("*design requirements*"). Der Nachweis der Einhaltung der behördlich vorgegebenen sowie der abgeleiteten Anforderungen im Rahmen einer umfassenden Sicherheitsbeurteilung (rechter Teil der Grafik) für ein konkretes Lagersystem ist nicht Bestandteil des vorliegenden Projekts.

Die behördlichen Vorgaben zur geologischen Tiefenlagerung sind im KEG (2003), der KEV (2004) sowie in weiteren Behördendokumenten festgelegt (vgl. Kapitel 2.2). Für die gesetzeskonforme Umsetzung der Vorgaben wurde von der Nagra ein standortunabhängiges Langzeitsicherheitskonzept erarbeitet, welches auf den im Entsorgungsprogramm (Nagra 2016a) beschriebenen Sicherheits- und Barrierenkonzepten ("*system concept and safety concept*" in Fig. 2-1) beruht.

Bei der Realisierung der geologischen Tiefenlagerung in der Schweiz sind insbesondere die geologischen Standortverhältnisse zu berücksichtigen (Teil der "*design basis*" in Fig. 2-1). Die behördlichen Vorgaben zum Vorgehen bei der Standortwahl sind grundsätzlich im Sachplanverfahren festgelegt (BFE 2008, 2011) und wurden in den ENSI-Vorgaben zur Etappe 3 präzisiert (ENSI 2018c). Die geplante zeitliche Umsetzung der behördlichen Vorgaben ist im Rahmen der Mittelfristplanung der Nagra festgelegt und beinhaltet die Ausarbeitung standortspezifischer Lagerprojekte in den 3 verbleibenden Standortgebieten ("*repository configurations ZNO, JO, NL*" in Fig. 2-1). Die in vorliegendem Bericht vorgestellte Methodik nutzt analoge Bausteine, wie sie auch zur Ausarbeitung und Bewertung (PA in Fig. 2-1) dieser standortspezifischen Lagerprojekte verwendet werden.

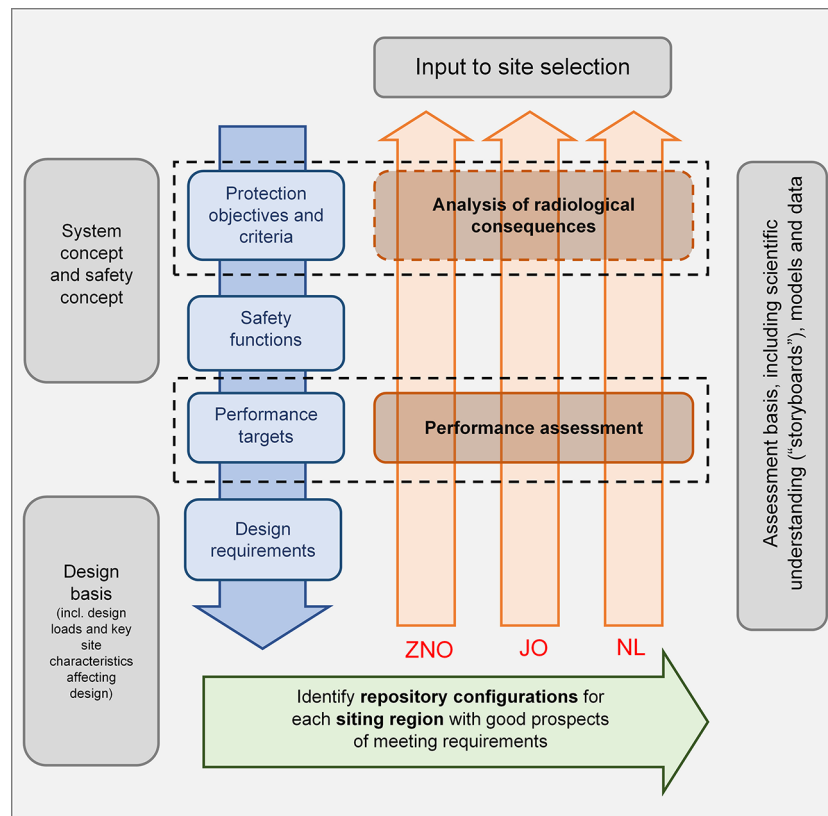


Fig. 2-1: Anforderungsbasierte Entwicklung der drei standortbezogenen Lagerprojekte und indikatorbasierte Bewertung ("Performance Assessment") im Rahmen des sicherheitstechnischen Vergleichs der Standorte

2.2 Externe Vorgaben

2.2.1 Definition des Begriffs "Kombilager"

Der Begriff "Kombilager" wird in verschiedenen Dokumenten der zuständigen Bundesbehörden (ENSI, BFE, KNS, Bundesrat) und der internationalen Expertengruppen im Sachplanverfahren (ESchT) leicht unterschiedlich verwendet. Im Glossar von ENSI (2018b) wird das Kombilager definiert als:

- *ein Lager, bestehend aus räumlich getrennten Lagerteilen für hochaktive, alphatoxische und schwach und mittelaktive Abfälle gemäss Art. 51 KEV im gleichen Standortgebiet*

Andere Definitionen für ein Kombilager finden sich auf der [Internetseite des BFE](#):

- *Erfüllt ein geologisches Standortgebiet sowohl die Anforderungen für ein HAA- als auch für ein SMA-Lager, kann das Auswahlverfahren zu einem gemeinsamen Standort für die Oberflächenanlagen für alle radioaktiven Abfälle führen (mit zwei separaten Lagern pro Abfallkategorie an diesem Standort, ein sogenanntes Kombilager).*

sowie in KNS (2018):

- Anordnung des HAA- und des SMA-Lagers am gleichen Standort

und ESchT (2018):

- *[Ein Lager] für alle Arten von untertägig zu entsorgenden Abfällen*

In der Neuausgabe Dezember 2020 der Richtlinie G03 (ENSI 2020) wird hinsichtlich der Anforderungen an ein geologisches Tiefenlager u.a. folgende Aussage getroffen:

- *Ein geologisches Tiefenlager ist so auszulegen, dass mögliche Wechselwirkungen zwischen verschiedenartigen Abfällen zu keiner sicherheitsrelevanten Beeinträchtigung führen.*

Es bestehen keine Widersprüche zwischen diesen Definitionen, d.h., es besteht Konsens darin, dass alle Arten von radioaktiven Abfällen zwar in einem Standortgebiet, aber untertags räumlich getrennt entsorgt werden. Der Anordnung der verschiedenen Untertagebauwerke und dem Zugang zu den räumlich getrennten Lagerteilen wird jedoch unterschiedliche Bedeutung zugemessen.

2.2.2 Überblick zu den Vorgaben

Es bestehen zahlreiche Vorgaben des ENSI und Hinweise weiterer Akteure (Bundesamt für Energie, Kommission für nukleare Sicherheit, Expertengruppe Schweizer Tiefenlager) mit explizitem Bezug zum Kombilager. Eine Übersicht zu den Vorgaben und Hinweisen (inkl. Quellenangaben) ist in Tab. 2-1 zusammengestellt und wird im Anhang A mit kurzen Zitaten der Originaltexte ausführlicher kommentiert. Die Vorgaben beziehen sich ausnahmslos auf die Projektierung des Kombilagers (inkl. Standortwahl), sie enthalten keine konkreten Anforderungen bezüglich der sicherheitstechnischen, bautechnischen und betrieblichen Auslegung des Kombilagers selbst.

Die im Anhang A zusammengestellten Vorgaben weisen einen unterschiedlichen Verbindlichkeitsgrad auf. Verbindliche Vorgaben werden hauptsächlich durch das ENSI in seinen Präzisierungen zur Etappe 3 (ENSI 2018c) zusammengefasst; daneben existieren noch wenige Auflagen, Hinweise und Empfehlungen zum Entsorgungsprogramm 2021 durch den Bundesrat sowie zur Etappe 3 durch das Bundesamt für Energie. Im Kapitel 2.2.3 sind die wichtigsten Vorgaben und Präzisierungen gemäss ENSI (2018b) aufgeführt, welche für die Ableitung von Mindestanforderungen bezüglich der Anordnung und Auslegung der HAA- und SMA-Lagerteile im Kombilager benötigt werden.

Tab. 2-1: Übersicht zu den externen Vorgaben zum Kombilager, ihren Quellen und ihrer Klassifizierung (vgl. auch Anhang A)

Nr.	Vorgabe/Quelle	Klassifizierung
1	ENSI (2018b), S. 21	Vorgabe
2	ENSI (2018a), S. 23	Vorgabe
3	ENSI (2018b), S. 23	Vorgabe
4	ENSI (2018b), S. 21	Vorgabe
5	ENSI (2018b), S. 21	Vorgabe
6	ENSI (2018b), S. 21	Vorgabe
7	ENSI (2018a), S. 31f.	Vorgabe
8	Bundesrat (2018), S. 21f.	Vorgabe (Auflage für EP21)
9	ENSI (2017a), S. 249	Vorgabe
10	KNS (2017), S. 38	Hinweis
11	BFE (2018), S. 15	Vorgabe (verbindliche Festlegung)
12	ENSI (2017b), S. 32	Hinweis
13	ENSI (2017b), S. 35	Empfehlung
14	ENSI (2017b), S. 48	Hinweis
15	ENSI (2018b), S. 21	Vorgabe
16	ENSI (2018a), S. 23	Hinweis
17	ENSI (2018a), S. 23	Vorgabe
18	ENSI (2018a), S. 23	Hinweis
19	ESchT (2017), S. 31	Hinweis
	ESchT (2017), S. 44f.	Empfehlung
21	ESchT (2017), S. 47	Empfehlung
22	ESchT (2017), S. 51	Empfehlung
23	G03 (ENSI 2020)	Vorgabe

2.2.3 Sicherheitstechnische Vorgaben des ENSI für SGT Etappe 3

Das ENSI präzisiert die sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager in ENSI-Aktennotiz ENSI (2018b). Im Hinblick auf die Realisierung eines Kombilagers werden im Abschnitt "Sicherheitstechnische Vorgaben für den Standortvergleich / Vergleichende Gesamtbewertung und Standortwahl" (Kapitel 4.6 in ENSI 2018c) folgende Vorgaben gemacht:

- *Aufgrund der strengeren Anforderungen an die geologischen Barrieren und des längeren Betrachtungszeitraums für ein HAA-Lager ist in einem ersten Schritt der Standort für das HAA-Lager zu wählen (Fig. 2-2a).*

- *Im zweiten Schritt wird der Standort für das SMA-Lager gewählt. Der gewählte EG des HAA-Lagers inklusive seiner für den Standortvergleich verwendeten Platzreserven steht nicht mehr für die Abgrenzung des EG für das SMA-Lager zur Verfügung (Fig. 2-2b).*
- *Bei der Abgrenzung des EG für das SMA-Lager im HAA-Standortgebiet ist zu erläutern, welche Konsequenzen sich aus der Realisierung eines Kombilagers für Bau-, Betriebs- und Langzeitsicherheit ergeben. Diese sind beim Vergleich mit den weiteren SMA-EGs zu berücksichtigen. Es ist sicherzustellen, dass die möglichen Wechselwirkungen zwischen dem SMA- und dem HAA-Lager eines Kombilagers keine sicherheitsrelevante Beeinträchtigung darstellen. Es ist aufzuzeigen, welche Mindestabstände zwischen den getrennten Lagerteilen für HAA und SMA einzuhalten sind. Der Einfluss auf die Bestimmung der Platzreserven und die Auswirkungen der lagerbedingten Einflüsse auf das SMA- als auch HAA-Lager sind aufzuzeigen.*
- *Anschliessend wird auf die gleiche Weise der sicherheitstechnisch bevorzugte EG für ein SMA-Lager ermittelt. Falls die gewählten EG des HAA- und des SMA-Lagers in einem Standortgebiet liegen, ist in den Sicherheitsnachweisen ein Kombilager zu betrachten (Fig. 2-2b).*



Fig. 2-2: Schematische Darstellung der Methodik für den Standortvergleich in Etappe 3 (vgl. ENSI 2018c)

(a) In einem ersten Schritt ist der Standort für das HAA-Lager zu wählen. (b) Im zweiten Schritt wird der Standort für das SMA-Lager gewählt. (c) Anschliessend wird auf die gleiche Weise der sicherheitstechnisch bevorzugte EG für ein SMA-Lager ermittelt.

2.3 Interne Vorgaben, Anforderungen und Festlegungen

Zur Ableitung von sicherheitstechnischen Mindestanforderungen an ein Kombilager sind ausserdem die im Entsorgungsprogramm dokumentierten Festlegungen zum Konzept des Kombilagere (Kapitel 2.3.1) sowie weitere Festlegungen und die internen Vorgaben bezüglich der Standortwahl zu berücksichtigen (Kapitel 2.3.2). Darüber hinaus sind auch die im bisherigen Standortwahlverfahren abgeleiteten Anforderungen an die Geologie anwendbar (vgl. Nagra 2008a, 2008b, 2014a).

2.3.1 Festlegungen zum Kombilager im Entsorgungsprogramm

Gemäss ihrem gesetzlichen Auftrag hat die Nagra in den letzten drei Jahrzehnten sowohl generische als auch standortbezogene Lagerkonzepte für die beiden Abfalltypen HAA und SMA entwickelt. Die gesetzeskonforme Umsetzung der sicherheits- und bautechnischen Vorgaben wurde durch Fachbehörden und Expertengremien begleitet und regelmässig geprüft. Die aktuell gültigen standortunabhängigen Referenz-Lagerkonzepte beruhen auf den im aktuellen Entsorgungsprogramm EP16 (Nagra 2016a) beschriebenen Sicherheits- und Barrierenkonzepten.

Konkret enthält das EP16 eine Beschreibung der grundlegenden Sicherheitskonzepte und der aktuell gültigen Auslegungskonzepte für ein HAA- und ein SMA-Lager samt einer Erfassung der konzeptuellen Vorgaben und Annahmen. Darüber hinaus wird für beide Lagertypen eine modellhafte Umsetzung der konzeptuellen Vorgaben und Annahmen präsentiert, und Varianten für die Lagerauslegung werden aufgezeigt. In Bezug auf das Kombilager findet sich in Nagra (2016a) folgende Definition:

- *Unter dem Begriff "Kombilager" wird ein Konzept beschrieben, bei dem das HAA- und das SMA-Lager beide am gleichen Standort angeordnet werden. Da es sich beim Kombilager um ein geologisches Tiefenlager handelt, wird von einem BE/HAA- und SMA/LMA¹-Lagerteil gesprochen. Die beiden Lagerteile sind räumlich getrennt und befinden sich entweder im gleichen oder aber in unterschiedlichen² Wirtgesteinen. Beim Kombilager können gewisse Elemente der Oberflächeninfrastruktur und zumindest ein Teil der Zugangsbauwerke nach unter Tag gemeinsam genutzt werden.*

Im vorliegenden Projekt wird auf die grundlegenden Sicherheitskonzepte und die aktuell gültigen Auslegungskonzepte aus dem EP16 zurückgegriffen, sofern nicht explizit im Rahmen des sicherheitstechnischen Vergleichs neue Vorgaben und Arbeitshypothesen festgelegt worden sind (vgl. Kapitel 2.3.2).

¹ Die Bezeichnung LMA (langlebige mittelaktive Abfälle als Teil des HAA-Lagers) wird zukünftig nicht mehr verwendet, da neu alle ATA/SMA dem SMA-Lager zugeteilt werden sollen. In den hier zitierten Quellen wird jedoch noch vorwiegend die alte Bezeichnung verwendet.

² In zukünftigen Entsorgungsprogrammen wird die Formulierung angepasst.

2.3.2 Weitere Festlegungen zum Kombilager und interne Vorgaben zur Standortwahl

"Dry-run" (2017 – 2018)

Zur Vorbereitung des sicherheitstechnischen Vergleichs wurden im sogenannten "Dry-run" verschiedene Arbeitshypothesen (d.h. provisorische Festlegungen) erstellt, welche in der hier vorgestellten Methodikentwicklung zum Mindestabstand zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen im Kombilager zu berücksichtigen sind. Es wurden insgesamt 11 Arbeitshypothesen formuliert, um das Spektrum der Varianten zur Lagerauslegung im Hinblick auf die Standortauswahl zu beschränken (Tab. 2-2). Die Hypothesen fliessen nicht nur in die Erarbeitung des Workflows für die Bewertung der 13 Kriterien zur Standortwahl ein, sie werden zum Teil auch für die vorliegende Methodikentwicklung benötigt. Eine detaillierte Begründung der einzelnen Hypothesen ist in ergänzenden (internen) Projektablagen zum "Dry-run" dokumentiert.

Tab. 2-2: Überblick zu den 11 Arbeitshypothesen aus dem "Dry-run"

Die Hypothesen beschränken die Varianten zur Lagerauslegung im Hinblick auf die Standortauswahl.

Nr.	Kurztitel	Arbeitshypothese
1	Alternative Lagerkonzepte	Gruppe 1 (<i>hydraulic cage, vertical emplacement tunnel.s, deep boreholes</i>): Nicht berücksichtigt für SV/RBG Gruppe 2 (<i>cement-based HLW nearfield</i>): Möglich für RBG, wird jedoch nicht betrachtet für SV (aber: Nachweis der Sicherheit im Rahmen des Bentonit-Konzepts). Gruppe 3 (<i>combi, tunnel liner etc</i>): Betrachtet für SV (und RBG).
2	Abfallzuteilung: ATA in SMA-Lager	Es wird angenommen, dass alle ATA dem SMA-Lager zugeteilt werden; das HAA Lager beschränkt sich ausschliesslich auf BE/HAA. Einlagerung von ATA und/oder SMA in das HAA-Lager wird für den SV nicht betrachtet.
3	BE/HAA-Behältermaterial	Für den SV wird angenommen, dass die BE/HAA-Endlagerbehälter aus geschmiedetem Stahl bestehen.
4	BE/HAA-Zwischensiegel	Für den SV wird angenommen, dass in den BE/HAA-Lagerstollen keine Zwischensiegel eingebaut werden.
5	Einlagerung eines Teils der SMA im Braunen Dogger	Für den SV wird angenommen, dass die Einlagerung der ATA/SMA im Opalinuston erfolgt; eine Einlagerung von SMA im Braunen Dogger ist nicht vorgesehen.
6	ATA/SMA-Kavernentyp	Für den SV werden die Kavernentypen K04a/K04 und K09 als Varianten betrachtet.
7	EGTS	Für den SV wird angenommen, dass technische Massnahmen getroffen werden, um den Gasdruck im SMA-Lager zu reduzieren ("Engineered Gas Transport System", EGTS).

Tab. 2-2: Fortsetzung

Nr.	Kurztitel	Arbeitshypothese
8	Hydraulische Trennung	Für den SV wird angenommen, dass die gemäss KEV (Art. 66, Ziffer 3.b) geforderte hydraulische Trennung zwischen Haupt- und Pilotlager durch Verzweigung auf Lagerebene (z.B. nach HEB) erfüllt wird; somit entfällt die erst im Rahmen des Sachplanverfahrens eingeführte mögliche Trennung auf Top EG/WG.
9	Orientierung der Lagerkammern	Für den SV wird angenommen, dass die ATA/SMA-Lagerkavernen möglichst horizontal und die BE/HAA-Lagerstollen möglichst schichtparallel, im Fallen und etwa in der Mitte des Opalinustons erstellt werden.
11	Richtwerte für Tunnelneigungen	Für den SV wird angenommen, dass spezifische Richtwerte für die Tunnelneigung nicht überschritten werden.

Bereitstellung der Methoden zum sicherheitstechnischen Vergleich (2019 – 2020)

Gemäss aktueller Planung zum sicherheitstechnischen Vergleich erfolgt nach Abschluss des Dry-runs (2017 – 2018) in den Jahren 2019 und 2020 die Bereitstellung der Methoden für die "Qualitative Bewertung der 13 Kriterien" und die "Gesamtbewertung – SMA in separatem SG vs. Kombilager im HAA-SG" vor (Fig. 2.-2c). Die Methoden werden ab 2021 als Teil eines integrierten Bewertungsverfahrens zur Auswahl der Standorte (ASR) eingesetzt, sobald belastbare neue geologische Datengrundlagen aus den Standorterkundungen der Etappe 3 sowie ein überarbeitetes Abfallinventar (MIRAM RBG) vorliegen.

Der generische Vergleich "SMA in separatem SG vs. Kombilager im HAA-SG" liefert die Bewertungsgrundlagen zu den Vor- und Nachteilen eines Kombilagere gemäß den im Kapitel 2.2 zusammengefassten externen Vorgaben der Behörden. Die Erarbeitung des entsprechenden Argumentariums wird in zwei unabhängigen Berichten dokumentiert. Im vorliegenden Bericht werden Aspekte zur Langzeitsicherheit behandelt:

- Die zu erfüllenden sicherheitstechnischen Anforderungen zur Platzierung eines SMA-Lagerteils neben dem HAA-Lagerteil (z.B. Mindestabstand wegen THM-C-Aspekten sowie all-fälliger radiologischer Beeinflussung; SMA neben HAA sicherheitstechnisch gleichwertig zu SMA am Standort in anderem Standortgebiet) werden gemeinsam von PA/SA erarbeitet.
- Die von SA und PA verwendeten Modellansätze verwenden den gleichen Code, brauchen aber eine unterschiedliche räumliche Auflösung, um die individuellen Fragestellungen zu beantworten. Mithilfe von Benchmark-Simulationen (Vergleichsrechnungen) wird sichergestellt, dass die verwendeten Modellabstraktionen nicht zu Inkonsistenzen zwischen den verschiedenen Systemanalyse führen.

Die Bautechnik liefert in einem separaten Bericht (Nagra 2020) zusätzliche Argumente und Bewertungsgrundlagen in Bezug auf die Vor- und Nachteile eines Kombilagere im Vergleich zu zwei Einzellagern (bautechnische und betriebliche Aspekte; Betriebssicherheit; Rückholung).

Die sicherheitstechnischen Betrachtungen (PA/SA) fokussieren auf die Bewertung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs je für den SMA- und den HAA-Lagerteil auf Basis der SGT-Kriterien-Gruppen 1, 2 und 3. Die bautechnischen Argumentarien umfassen einerseits die SGT-Kriterien-Gruppe 4 (Kriterium 4.1: EG; Kriterium 4.2: Zugangsbauwerke) und andererseits die Aspekte zur Oberflächeninfrastruktur (Fig. 2-3).

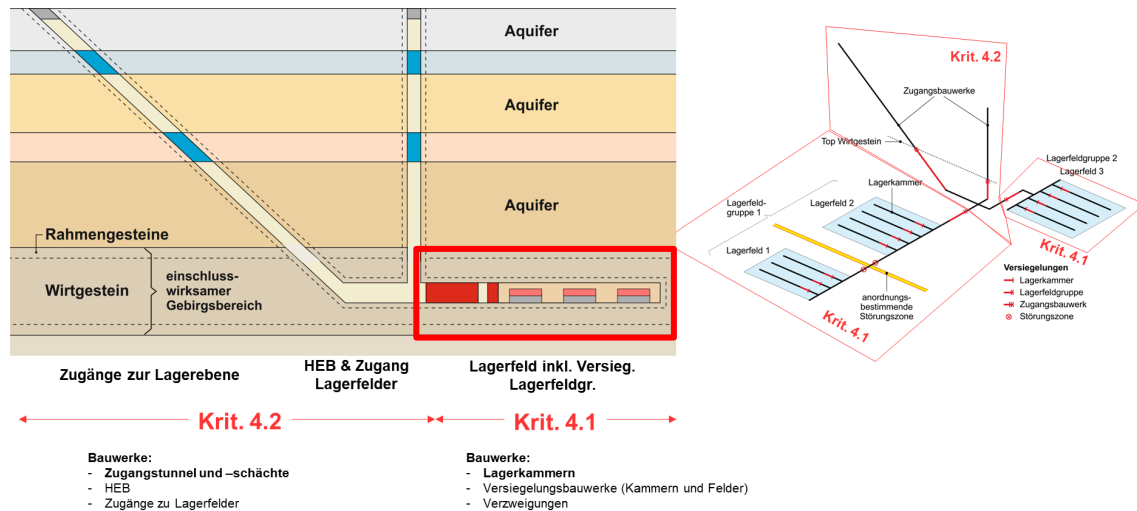


Fig. 2-3: Schematische Darstellung der Methodik für den Standortvergleich in Etappe 3

3 Methodik zur Definition des Mindestabstands HAA – SMA

3.1 Vorgehen

Die Festlegung von sicherheitstechnischen Mindestanforderungen zur Anordnung der HAA- und SMA-Lagerteile im Kombilager in einem der drei betrachteten Standortgebiete muss auf robusten und nachvollziehbaren Argumentarien beruhen. Dies gilt insbesondere hinsichtlich der geologischen Situation, da durch Erkundungsmassnahmen von der Oberfläche die verbleibenden Ungewissheiten bezüglich der geologischen Verhältnisse auf Lagerebene (inkl. lagerbedingte Einflüsse, geologische Langzeitentwicklung) nur in begrenztem Umfang verringert werden können. Es ist daher zweckmässig, die quantitative Formulierung der sicherheitstechnischen Anforderungen an ein Kombilager mittels numerischer Systemanalysen durchzuführen. Die wesentlichen Schritte eines solchen modellunterstützten Ansatzes sind:

- **Formulierung der Methodik:** betrachtete Sicherheitsfunktionen, relevante Lagerkomponenten (technische und geologische Barrieren), relevante Konfigurationen, Beurteilungskriterien gemäss ENSI-Anforderungen (ENSI 2018c), Beurteilungsaspekte, Indikatoren und Eignungskennzahlen
- **Durchführung der modellunterstützten Systemanalysen:** Bereitstellung geeigneter Bewertungsmodelle und Entwicklungsszenarien, phänomenologische Analysen des Systemverhaltens zur Identifikation der sicherheitsrelevanten Phänomene und Prozesse, Robustheitsanalysen zur Spezifikation der Mindestanforderungen in Bezug auf die Barrierenintegrität und die Radionuklidfreisetzung
- **Spezifikation der sicherheitstechnischen Anforderungen:** Synthese der Systemanalyse, Bezug weiterer Informationen, Spezifikation der Anforderungen und Dokumentation der Ergebnisse

3.2 Formulierung der Methodik

Wie im Entsorgungsprogramm (Nagra 2016a, Nagra 2021) erläutert, muss für ein geologisches Tiefenlager ein auf die Art der Abfälle abgestimmtes Sicherheitskonzept bereitgestellt werden, welches den dauernden Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet. Das gewählte Sicherheitskonzept definiert die Anforderungen an den Standort (geologische Barrieren) und an die Ausgestaltung des Lagers (technische Barrieren). Um die gesetzlich verankerten Schutzziele und -Kriterien einzuhalten, wird ein Sicherheitskonzept mit mehreren verschiedenartigen, passiven und zeitlich sich ergänzenden Barrieren verfolgt (Multibarrierenkonzept), welche zusammen die Gewährleistung der folgenden fünf Sicherheitsfunktionen des Tiefenlagersystems sicherstellen:

- Isolation der radioaktiven Abfälle von der Erdoberfläche
- Vollständiger Einschluss der Radionuklide für eine gewisse Zeit
- Immobilisierung, Rückhaltung und langsame Freisetzung der Radionuklide
- Kompatibilität der Elemente des Barrierensystems und der radioaktiven Abfälle untereinander und mit anderen Materialien³
- Langzeitstabilität des Barrierensystems bezüglich geologischer und klimatischer Langzeitentwicklungen

³ Dies schliesst auch die Aufrechterhaltung günstiger Prozesse und Eigenschaften des Barrierensystems mit ein (Aspekt der Schutzfunktion).

Im Hinblick auf die sicherheitstechnischen Mindestanforderungen an ein Kombilager ist der Nachweis zu erbringen, dass die genannten Sicherheitsfunktionen der verschiedenen Komponenten des Kombilagersystems durch Wechselwirkungen zwischen den SMA- und HAA-Lagerteilen nicht beeinträchtigt werden. Für die Isolation und den vollständigen Einschluss ergeben sich intuitiv keine Kombilager-spezifischen Mindestanforderungen und die Analysen können sich somit auf folgende zwei Kategorien der Sicherheitsfunktionen beschränken:

- Schutz der Abfälle und der Barrierensysteme vor lagerbedingten bzw. äusseren Einwirkungen (geologische Langzeitentwicklung, menschliche Einwirkungen)
- Rückhaltung und verzögerte Freisetzung der Radionuklide (wirksamer Einschluss)

Die Nachweisführung basiert auf einer modellunterstützten Indikatormethodik und umfasst folgende Schritte:

1. Tabellarische Zusammenstellung aller potenziell sicherheitsrelevanten Aspekte ("Phänomene und Prozesse") und der dazugehörigen Indikatoren, welche auf die Wechselwirkungen zwischen den Lagerteilen HAA und SMA zurückzuführen sind. Methodisch entspricht dies dem Vorgehen im Sachplanverfahren (BFE 2008, 2011), in dem für jedes der 13 Kriterien zur Standortwahl die "zu beurteilenden Aspekte" definiert werden.
2. Festlegung der mittels Systemanalyse zu beurteilenden Lagerkonfigurationen (Anordnung der SMA- und HAA-Lagerteile sowie der Zugangsbauwerke), der quantitativ zu erfassenden Indikatoren und der dazugehörigen Eignungskennzahlen
3. Durchführung der modellunterstützten Analysen der zu beurteilenden Lagerkonfigurationen, bestehend aus:
 - phänomenologische Systemanalysen (Sensitivitätsanalysen) zur Ermittlung der relevanten Entwicklungsszenarien und der relevanten Konfigurationen eines Kombilagers
 - Robustheitsanalysen zur Beurteilung der Barrierenintegrität ("Schutz der Abfälle und der Barrierensysteme")
 - System-, Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen zur Radionuklidfreisetzung ("Rückhaltung und verzögerte Freisetzung der Radionuklide")
4. Synthese der Systemanalyse und Formulierung der Mindestanforderungen an ein Kombilager für jedes der drei vorgeschlagenen Standortgebiete

Die modellunterstützte Indikatormethodik ist in Fig. 3-1 in Form eines Flussdiagramms grafisch aufbereitet und wird in den folgenden Abschnitten vertieft diskutiert.

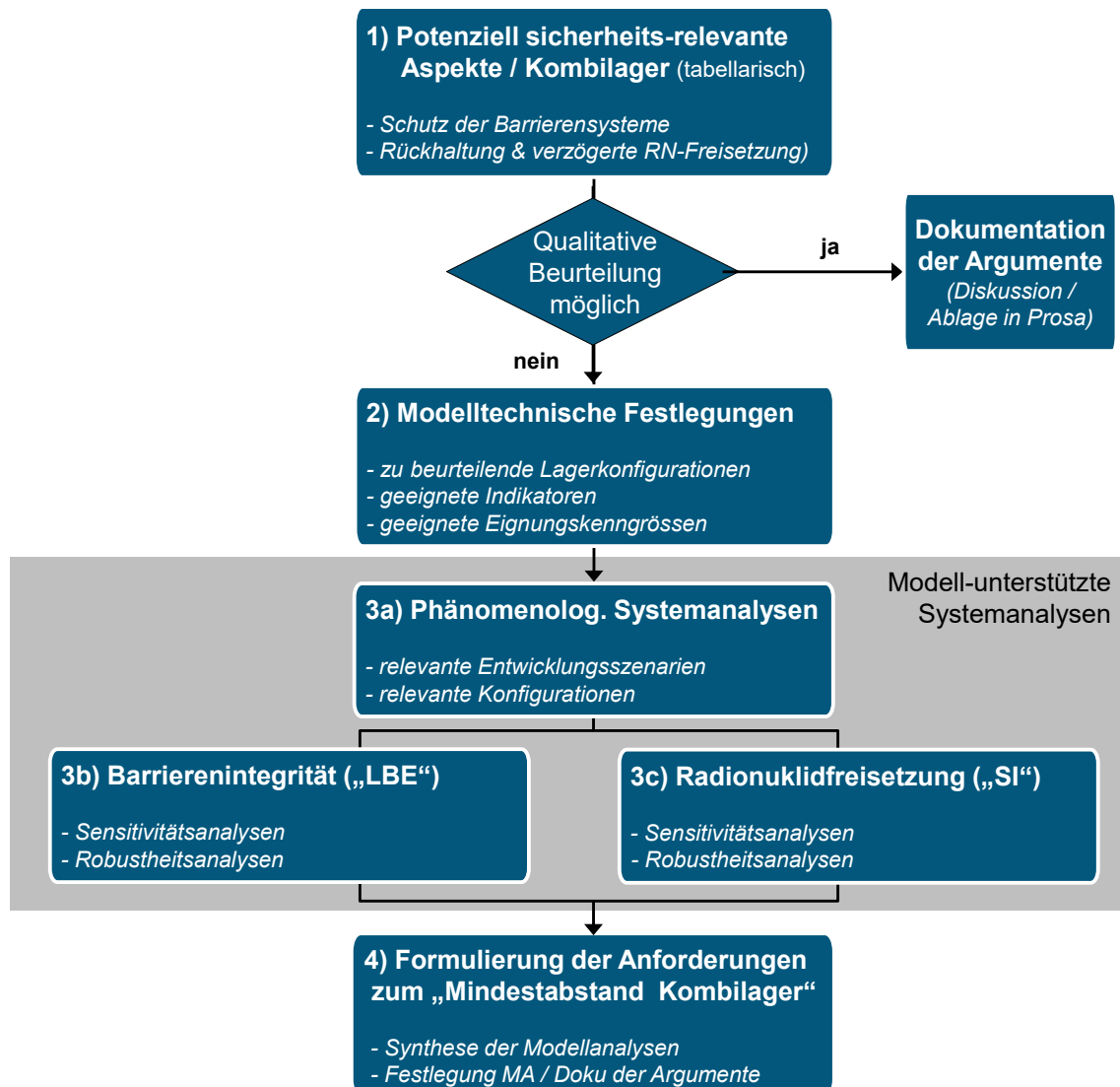


Fig. 3-1: Flussdiagramm zur modellunterstützten Indikatormethodik zur Festlegung des Mindestabstands zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen eines Kombilagers für jedes der drei vorgeschlagenen Standortgebiete

3.3 Schritt 1: Potenziell sicherheitsrelevante Aspekte

Nicht nur beim Bau, Betrieb und Verschluss des Kombilagers, sondern auch über den gesamten sicherheitstechnisch relevanten Betrachtungszeitraum nach Lagerverschluss (1 Mio. Jahre für HAA) können zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen Wechselwirkungen auftreten, welche einen ungünstigen Einfluss auf die Integrität der Barrierensysteme und/oder die Radionuklidrückhaltung in den Barrierensystemen haben könnten. In einem ersten Schritt gilt es, solche potenziell sicherheitsrelevante Aspekte zu identifizieren und die daraus resultierenden Beeinträchtigungen der Sicherheitsfunktionen des Multibarrierensystems zu spezifizieren. Zur Illustration der Methodik erfolgt dies hier über eine Experteneinschätzung basierend auf der Nagra FEP-Liste und den Erfahrungen aus früheren Projektschritten und Etappen des SGT. Danach erfolgt eine Einschätzung, ob die Aspekte qualitativ beurteilt werden können. Tab. 3-1 gibt einen beispielhaften Überblick über potentiell wichtige Wechselwirkungen und ihre mögliche sicherheitstechnische Relevanz. Für nicht qualitativ beurteilbare Aspekte werden zudem quantitative Indikatoren vorgeschlagen, die eine Beurteilung der Relevanz der sicherheitsrelevanten Aspekte erlauben.

Tab. 3-1: Überblick zu den potenziell sicherheitsrelevanten Aspekten und zugehörigen Wechselwirkungen zwischen den SMA- und HAA-Lagerteilen

Die Beschreibung und Beurteilung der Wechselwirkungen zu den einzelnen Aspekten erfolgt jeweils im Vergleich zu den jeweiligen Einzellagern bei ansonsten gleichen Bedingungen. Sie beschränkt sich auf die Darstellung von Einzeleffekten; allfällige kumulative Effekte werden nur teilweise erwähnt. Sie geht ausserdem davon aus, dass die Abstände zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen nicht deutlich kleiner sind als die Abstände zwischen Bauwerken innerhalb der HAA- oder SMA-Lagerteile.

Zu beurteilender Aspekt	Art der Wechselwirkung zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen	Mögliche Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen ⁴ des Multi-barrierensystems	Potenzielle Indikatoren
Auflockerungszone (AUZ)	Im transpressiven Spannungsregime ($S_v \sim S_H > S_h$) können um die HAA-Stollen bzw. SMA-Kavernen AUZ mit ausgeprägter horizontaler Erstreckung entstehen, welche die laterale Ausdehnung des intakten WG zwischen den Lagerteilen HAA und SMA effektiv reduzieren.	<i>Beeinträchtigung der Radionuklid-rückhaltung:</i> Die Verkürzung der lateralen Transportpfadlängen im intakten Wirtgestein kann im Zusammenwirken mit anderen LBE-Einflüssen dazu führen, dass RN aus den HAA-Stollen über die SMA-Kavernen ausgetragen werden können (und umgekehrt). <i>Beeinträchtigung der Schutzfunktionen der Barrierensysteme:</i> Aufgrund der horizontal ausgedehnteren AUZ kann sich die Anströmung der Lagerkammern ungünstig verändern und im Zusammenwirken mit anderen LBE-Einflüssen z.B. eine schnellere Degradation von Zementmaterialien im SMA-Nahfeld bewirken.	Radionuklidflüsse (bzw. Aktivitätsflüsse oder Dosisraten) aus AUZ, Wirt- und Rahmengesteinen sowie entlang der verfüllten Untertagebauwerke / Versiegelungsbauwerke inkl. deren AUZ. Gesamtwasserfluss durch an HAA-Lagerteil anliegende SMA-Kaverne Länge des Transportpfads aus an SMA-Lagerteil anliegenden HAA-Stollen bis zum Rand des Wirtgesteins

⁴ Mögliche Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen des Multibarrierensystems werden in folgende Kategorien eingeteilt: (i) Beeinträchtigung der mechanischen und hydrochemischen Schutzfunktionen und (ii) Beeinträchtigung von Radionuklidrückhaltefunktionen.

Tab. 3-1: Fortsetzung

Zu beurteilender Aspekt	Art der Wechselwirkung zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen	Mögliche Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen ⁵ des Multi-barrierensystems	Potenzielle Indikatoren
	Im Abschiebungsregime ($S_H > S_h > S_v$) können um die SMA-Kavernen AUZ mit ausgeprägter vertikaler Erstreckung entstehen.	<i>Beeinträchtigung der Radionuklid-rückhaltung:</i> Eine ausgeprägte vertikale Erstreckung der AUZ um die SMA-Kavernen kann im Zusammenwirken mit anderen LBE-Einflüssen zur erhöhten RN-Freisetzung führen (gelöste und volatile RN).	Radionuklidflüsse (bzw. Aktivitätsflüsse oder Dosisraten) aus AUZ, Wirt- und Rahmengesteinen sowie entlang der verfüllten Untertagebauwerke / Versiegelungsbauwerke inkl. deren AUZ.
	In der AUZ entlang der Versiegelungsstrecken (SMA & HAA) bzw. entlang der verfüllten HAA-Tunnels können durch die gegenseitige thermo-hydraulische Beeinflussung der Lagerteile HAA und SMA axiale Porenwasser- oder Gasflüsse verursacht werden (z.B. unterschiedliche zeitliche Entwicklung des Gasdruckaufbaus in den beiden Lagerteilen).	<i>Beeinträchtigung der Radionuklid-rückhaltung:</i> Die AUZ um die Versiegelungsstrecken stellt einen Freisetzungspfad für gelöste und volatile RN dar, dessen Bedeutung im Vergleich zu den HAA- und SMA-Einzellagern zu bewerten ist.	Radionuklidflüsse (bzw. Aktivitätsflüsse oder Dosisraten) aus AUZ, Wirt- und Rahmengesteinen sowie entlang der verfüllten Untertagebauwerke / Versiegelungsbauwerke inkl. deren AUZ.
Räumliche Variabilität der WG-Eigenschaften	Die ausgeprägte Schichtung des Opalinustons kann sich grossräumig durch Anisotropie der Gastransportkapazität und der Wärmeleitfähigkeit manifestieren.	Die effektive Anisotropie sicherheitsrelevanter Eigenschaften des EG (Wärmeleitfähigkeit, K-Wert, Diffusionskoeffizient) hat einen Einfluss auf die Reichweite der thermo-hydraulischen Wechselwirkungen zwischen den Lagerteilen HAA und SMA (Potenzial für wechselseitige Schädigung der geologischen Barrieren und der EBS sowie für Verringerung der RN-Rückhaltung).	Radionuklidflüsse (bzw. Aktivitätsflüsse oder Dosisraten) aus AUZ, Wirt- und Rahmengesteinen sowie entlang der verfüllten Untertagebauwerke / Versiegelungsbauwerke inkl. deren AUZ. Magnitude der thermischen und gasbedingten Überdrücke im WG

⁵ Mögliche Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen des Multibarrierensystems werden in folgende Kategorien eingeteilt: (i) Beeinträchtigung der mechanischen und hydrochemischen Schutzfunktionen und (ii) Beeinträchtigung von Radionuklidrückhaltefunktionen.

Tab. 3-1: Fortsetzung

Zu beurteilender Aspekt	Art der Wechselwirkung zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen	Mögliche Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen ⁶ des Multi-barrierensystems	Potenzielle Indikatoren
Gasakkumulation	Das in den verfüllten Lagerkammern akkumulierte Gas kann zu sicherheitstechnisch relevanten Wechselwirkungen zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen führen. Die Wechselwirkungen betreffen das intakte Wirtgestein (Gasdruck, gasinduzierter Porenwasserfluss, Gassättigung des Wirtgesteins) sowie die verfüllten Zugangs- und Verschlussbauwerke (Gasdruck, gasinduzierter Porenwasserfluss, Gassättigung).	<i>Beeinträchtigung der Radionuklidrückhaltung:</i> Verdrängung von im Porenwasser gelösten RN sowie Freisetzung volatiler RN (i) in das intakte WG und (ii) entlang der verfüllten Untertagebauwerke. Darüber hinaus kann die Entsättigung des WG im Umfeld der HAA-Lagerstollen als Folge der Gasfreisetzung aus dem SMA-Lagerteil zu einer Reduktion der effektiven Diffusionskonstante für gelöste RN führen (Verringerung des wassergefüllten Porenraums). <i>Beeinträchtigung der Schutzfunktionen der Barrierensysteme:</i> Schädigung der geologischen Barrieren im jeweils anderen Lagerteil: (i) Scherversagen des intakten Gebirges, (ii), Störungsaktivierung und (iii) fault leakage; die Folge ist in allen Fällen eine verminderte Radionuklidrückhaltung im WG.	Magnitude der gasbedingten Überdrücke im WG Gasdruck (und Gassättigung) in den beiden Lagerteilen Radionuklidflüsse (bzw. Aktivitätsflüsse oder Dosisraten) aus AUZ, Wirt- und Rahmengesteinen sowie entlang der verfüllten Untertagebauwerke / Versiegelungsbauwerke inkl. deren AUZ.

⁶ Mögliche Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen des Multibarrierensystems werden in folgende Kategorien eingeteilt: (i) Beeinträchtigung der mechanischen und hydrochemischen Schutzfunktionen und (ii) Beeinträchtigung von Radionuklidrückhaltefunktionen.

Tab. 3-1: Fortsetzung

Zu beurteilender Aspekt	Art der Wechselwirkung zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen	Mögliche Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen ⁷ des Multi-barrierensystems	Potenzielle Indikatoren
Wärmeeintrag	Der Wärmeeintrag der HAA kann zu sicherheitstechnisch relevanten Wechselwirkungen im SMA-Lagerteil führen. Die Wechselwirkungen betreffen das intakte Wirtgestein (Porenwasser-Überdrücke, thermisch bedingter Porenwasserfluss und Stofftransport) sowie die verfüllten SMA-Kavernen, Zugangs- und Verschlussbauwerke (Temperatureffekte, Porenwasser-/Gasdruck, thermisch induzierter Porenwasserfluss, Porenwasserchemie).	<i>Beeinträchtigung der Radionuklid-rückhaltung:</i> Temperatureffekte auf die Radionuklid-rückhaltung im Umfeld der SMA-Kavernen: (i) Mobilisierbarkeit/Löslichkeit der RN (Auflösung, Degradation und Korrosion von SMA-Bestandteilen), (ii) Temperaturabhängigkeit der Strömungs- und Transporteigenschaften von technischen Barrieren und EG (gelöste/volatile RN), (iii) erhöhte advective und diffusive RN-Transportraten <i>Beeinträchtigung der Schutzfunktionen der Barrierensysteme:</i> Schädigung der geologischen Barrieren im jeweils anderen Lagerteil durch thermische Porenwasser-Überdrücke: (i) Scherversagen des intakten Gebirges, (ii) Störungsaktivierung und (iii) fault leakage. Darüber hinaus können thermisch bedingte Ausfällungs- und Lösungsprozesse zu verschiedenen sicherheitsrelevanten Beeinträchtigungen der technischen Barrieren führen (beschleunigte Karbonatisierung/Alkali-Silika-Reaktion, Abdichtung EGTS etc).	Magnitude der thermisch bedingten Porenwasser-Überdrücke im WG Gasdruck in den beiden Lagerteilen Radionuklidflüsse (bzw. Aktivitätsflüsse oder Dosisraten) aus AUZ, Wirt- und Rahmengesteinen sowie entlang der verfüllten Untertagebauwerke / Versiegelungsbauwerke inkl. deren AUZ.

⁷ Mögliche Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen des Multibarrierensystems werden in folgende Kategorien eingeteilt: (i) Beeinträchtigung der mechanischen und hydro-chemischen Schutzfunktionen und (ii) Beeinträchtigung von Radionuklidrückhaltefunktionen.

Tab. 3-1: Fortsetzung

Zu beurteilender Aspekt	Art der Wechselwirkung zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen	Mögliche Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen ⁸ des Multi-barrierensystems	Potenzielle Indikatoren
Langzeitentwicklung: Eislasten	Zyklische Eislasten durch den Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten können zu Über- und Unterdrücken im SMA-Lagerteil führen und damit (wegen der Anisotropie der hydraulischen Durchlässigkeit des WG) zu einem verstärkten horizontalen Wasserfluss im HAA-Lagerteil	<i>Beeinträchtigung der Radionuklid-rückhaltung:</i> Der erhöhte horizontale Wasserfluss kann zu einer erhöhten Freisetzung gelöster RN aus dem HAA-Lagerteil führen und die hydrodynamische Dispersion verstärken. Potenziell erhöhte Austräge über den SMA-Lagerteil <i>Beeinträchtigung der Schutzfunktionen der Barrierensysteme:</i> Schädigung der geologischen/technischen Barrieren im HAA-Lagerteil durch auf-lastbedingte Porenwasser-Überdrücke: (i) Scherversagen des intakten Gebirges, (ii) Störungsaktivierung, (iii) fault leakage und (iv) Beeinträchtigung der HAA-Verschlusssysteme	Radionuklidflüsse (bzw. Aktivitätsflüsse oder Dosisraten) aus AUZ, Wirt- und Rahmengesteinen sowie entlang der verfüllten Untertagebauwerke / Versiegelungsbauwerke inkl. deren AUZ. Gasdruck in den Zugangsbauwerken der beiden Lagerteile

⁸ Mögliche Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen des Multibarrierensystems werden in folgende Kategorien eingeteilt: (i) Beeinträchtigung der mechanischen und hydro-chemischen Schutzfunktionen und (ii) Beeinträchtigung von Radionuklidrückhaltefunktionen.

Tab. 3-1: Fortsetzung

Zu beurteilender Aspekt	Art der Wechselwirkung zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen	Mögliche Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen ⁹ des Multi-barrierensystems	Potenzielle Indikatoren
Human Intrusion	Zukünftige (abgelenkte) Explorationsbohrungen in die noch gasgefüllten SMA-Kavernen können zu einer schlagartigen Herabsetzung des Porenwasserdrucks entlang der gemeinsam genutzten Zugangsbauwerke führen und damit erhöhte Porenwasserflüsse entlang der verfüllten Zugangsbauwerke bewirken.	<i>Beeinträchtigung der Radionuklidrückhaltung:</i> Der erhöhte horizontale Wasserfluss kann zu einer erhöhten Freisetzung gelöster/volatiler RN aus dem HAA-Lagerteil führen. <i>Beeinträchtigung der Schutzfunktionen der Barrierensysteme:</i> Schädigung der technischen Barrieren im HAA-Lagerfeld durch plötzliche Porenwasserdruck-Absenkung im SMA-Lagerteil.	Siehe Indikatoren zum Aspekt "Eislasten"

⁹ Mögliche Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen des Multibarrierensystems werden in folgende Kategorien eingeteilt: (i) Beeinträchtigung der mechanischen und hydrochemischen Schutzfunktionen und (ii) Beeinträchtigung von Radionuklidrückhaltefunktionen.

3.4 Schritt 2: Modelltechnische Festlegungen

Die in Tab. 3-1 genannten potenziell sicherheitsrelevanten Aspekte und die zugehörigen Wechselwirkungen zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen im Kombilager können mittels modellunterstützter Systemanalysen beurteilt werden. Hierzu ist es notwendig,

- die zu berücksichtigenden Lagerkonfigurationen (Anordnung der Lagerfelder und Zugangsbauwerke) vorgängig zu definieren
- die quantitativ zu erfassenden Indikatoren und die dazugehörigen Eignungskennzahlen anhand von geeigneten Modellvariablen (z.B. Temperatur, Gasdruck, Wassersättigung, spez. Fluss) zu formulieren

Zur Beurteilung der nach dem Verschluss des Kombilagere auftretenden Wechselwirkungen werden ungünstige Lagerkonfigurationen, ungünstige Entwicklungsszenarien und eine ausreichende Bandbreite bezüglich der geologischen Rand- und Anfangsbedingungen angenommen. Dadurch wird sichergestellt, dass robuste Mindestanforderungen an das Kombilager spezifiziert werden, die für die Gesamtheit der betrachteten Standortbedingungen und der jeweils möglichen Lagerkonfigurationen gültig sind.

Um den Aufwand der modellunterstützten Systemanalysen überschaubar zu halten, ist es notwendig, die zu berücksichtigenden Lagerkonfigurationen zu beschränken. Es werden deshalb einerseits Konfigurationen betrachtet, welche mittels des standortunabhängigen Lagerkonzepts analysiert werden können, und andererseits solche, für die standortspezifische Bedingungen zu berücksichtigen sind (z.B. Schichtneigung).

Gemäss generischem Lagerkonzept werden die Lagerkammern für HAA und SMA in Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannung (S_H) ausgerichtet. Es ist denkbar, wenn auch nicht unbedingt zweckmässig, dass die dazugehörigen Lagerfelder seitlich zueinander angeordnet sind (Fig. 3-2a). Eine solche Anordnung wird als ungünstig betrachtet, da die gegenseitige Beeinflussung der Lagerfelder in Bezug auf die in Tab. 3-1 genannten Beeinträchtigungen der Sicherheitsfunktionen maximal ist.

Im generischen Lagerkonzept für das Kombilager werden beide Lagerfelder jeweils mittels einer Doppelröhre, bestehend aus Bau- und Betriebstunnel, erschlossen (Fig. 3-2b). Für die Bewertung der Freisetzung volatiler Radionuklide werden entlang der Zugangsbauwerke ausserdem die Effekte von Strecken und Schächten ausserhalb der Lagerfelder und von Lagerverschlüssen berücksichtigt.

Je nach Standort sind aufgrund der Schichtneigung, der struktureologischen Verhältnisse oder der lokalen Gebirgsspannungsverhältnisse allenfalls standortspezifische Anpassungen der beschriebenen generischen Lagerkonfigurationen notwendig. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass das bautechnische Konzept aktuell eine horizontale Anordnung der SMA-Kavernen vorsieht (vgl. Tab. 2-2/"Arbeitshypothese 9"). Analog zum generischen Kombilagerkonzept werden als "ungünstige" standortspezifische Kombilagerkonfigurationen die in Fig. 3-3 gezeigten Anordnungen betrachtet. Dabei wird in der Konfiguration gemäss Fig. 3-3a die Bedeutung der Schichtneigung in Bezug auf die Schutzfunktionen des Wirtgesteins untersucht, während die Konfiguration Fig. 3-3b der Analyse der Gassättigungsverhältnisse entlang geneigter Zugangsbauwerke dient, die für die Freisetzung volatiler Radionuklide von Bedeutung sein könnten. Für die Systemanalysen zur Radionuklidfreisetzung werden weitere Vereinfachungen und Modellfestlegungen definiert, welche im Kapitel 6.2 erläutert werden.

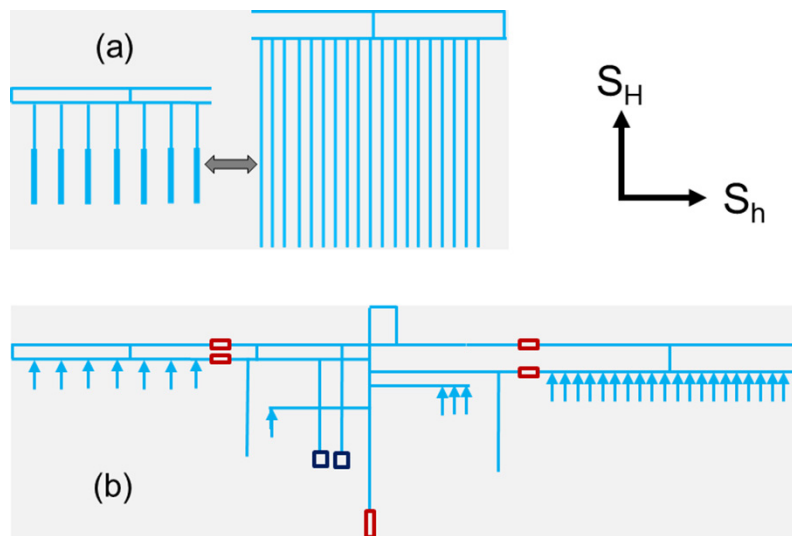


Fig. 3-2: Hypothetische (ungünstige) Anordnungen der SMA- und HAA-Lagerfelder im generischen (standortunabhängigen) Lagerkonzept
(a) seitliche Anordnung und (b) Anordnung der Betriebs- und Zugangsbauwerke

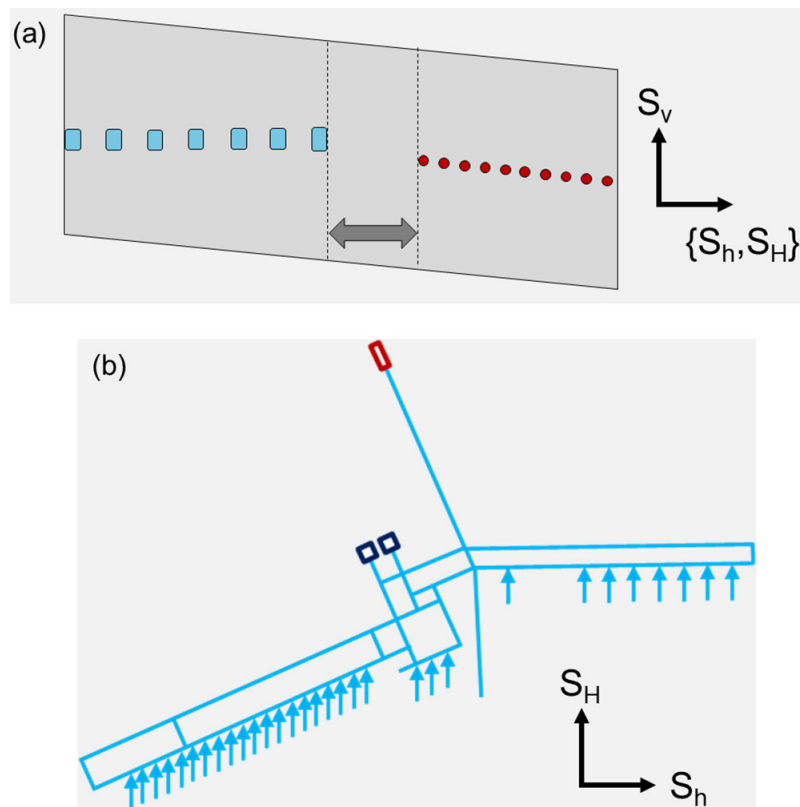


Fig. 3-3: Hypothetische (ungünstige) Anordnungen der SMA- und HAA-Lagerfelder zur beispielhaften Analyse der standortunabhängigen Lagerprojekte unter Berücksichtigung der standortspezifischen Mächtigkeit und Neigung des Wirtgesteins
(a) Vertikalschnitt durch die seitliche Anordnung der SMA- und HAA-Lagerfelder und
(b) Anordnung der Betriebs- und Zugangsbauwerke

In der letzten Spalte von Tab. 3-1 werden potenzielle Indikatoren für die modellunterstützte Bewertung der verschiedenen Wechselwirkungen zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen aufgeführt. Unter einem Indikator versteht man dabei eine mit dem numerischen Modell berechenbare Zustandsgrösse (Porenwasserdruck, Temperatur, Gebirgsspannung, Gassättigung) oder Prozessgrösse (Wärmefluss, Wasserfluss, Stofffracht, Aktivitätsfluss), mit der die sicherheitstechnische Wirksamkeit ("*performance*") der technischen und geologischen Barrieren des Lagersystems im Hinblick auf die ihnen zugeordneten Langzeitsicherheitsfunktionen zuverlässig beurteilt werden kann. Alle in Tab. 3-1 vorgeschlagenen Indikatoren können mithilfe von konventionellen Zweiphasenmodellen anhand von thermo-hydraulischen Simulationen der Lagerentwicklung hergeleitet werden. Tab. 3-2 gibt einen Überblick über die potenziellen Indikatoren und beschreibt deren Herleitung aus den entsprechenden thermo-hydraulischen Systemanalyse.

Tab. 3-2: Überblick über die potenziellen Indikatoren und deren Herleitung aus thermo-hydraulischen Systemanalyse

Indikator	Herleitung
Gasdruck P_g Porenwasserdruck P_w	P_g – Primärvariable aus thermo-hydraulischen Simulationen; $P_w(S_w) = P_g - P_c(S_w)$ mit: $P_c(S_w)$ – Kapillardruck-Sättigungsbeziehung
Wassersättigung S_w , Gassättigung S_g	S_w – Primärvariable aus thermo-hydraulischen Simulationen; $S_g = 1 - S_w$
Temperatur	T – Primärvariable aus thermo-hydraulischen Simulationen;
Spezifischer Wasserfluss q_w Spezifischer Gasfluss q_g (Gas als Phase)	q_w, q_g aus thermo-hydraulischen Simulationen $q_w _A = k \cdot k_{rw} \cdot \frac{\rho_w}{\mu_w} \cdot (\nabla P_w - \rho_w \cdot g)$ $q_g _A = k \cdot k_{rg} \cdot \frac{\rho_g}{\mu_g} \cdot A \cdot (\nabla P_g - \rho_g \cdot g)$ mit k – intrinsische Permeabilität k_{rw}, k_{rg} – relative Permeabilität von Wasser/Gas μ_w, μ_g – Viskosität von Wasser/Gas A – Bezugs-Fläche zur Normierung des spez. Fl. ρ_w, ρ_g – Dichte von Wasser/Gas g – Gravitationsvektor
Spezifischer Fluss einer (Gas-) Komponente, gelöst im Wasser $^g q_w$ Kumulierter Fluss einer (Gas-) Komponente gelöst im Wasser $\Sigma ^g q_w$	$^g q_w$ berechnet aus dem spezifischen Wasserfluss q_w $^g q_w = ^g \chi_w \cdot q_w$ $\Sigma ^g q_w = \int ^g \chi_w \cdot q_w \cdot dt$ mit $^g \chi_w$ – Massenanteil einer (Gas-)Komponente gelöst im Wasser
Effektive Länge des Transportpfads L (advektiv oder diffusiv)	Effektive Pfadlängen können indirekt durch <i>Post-processing</i> mittels <i>Particle-tracking</i> -Methoden oder direkt durch Lösen der Advektions-Diffusions-Gleichung ermittelt werden. Im vorliegenden Bericht wird dieser Indikator nicht verwendet.

3.5 Schritt 3: Durchführung der modellunterstützten Systemanalysen

Die Durchführung der modellunterstützten Systemanalysen erfolgt in zwei Schritten:

- Phänomenologische Systemanalysen dienen zur Abklärung der relevanten Entwicklungsszenarien, zur Identifikation der sicherheitsrelevanten Phänomene und Prozesse sowie zur Rechtfertigung der gewählten Modellabstraktionen für den darauffolgenden Schritt. Die Ergebnisse der phänomenologischen Systemanalysen stellen somit den Ausgangspunkt für gezielte Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen zur Barrierenintegrität und zur Radionuklidfreisetzung dar.
- Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen dienen der Spezifikation der sicherheitstechnischen Mindestanforderungen an das Kombilager hinsichtlich der Barrierenintegrität und der Radionuklidfreisetzung. Diese weiterführenden Analysen beschränken sich auf im Rahmen der phänomenologischen Analysen als relevant identifizierten Entwicklungsszenarien und Lagerkonfigurationen sowie auf die zulässigen Modellvereinfachungen.

Zweck, Umfang und Ergebnisse der phänomenologischen Systemanalysen werden im Kapitel 4 ausführlich diskutiert. Die Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen zur Barrierenintegrität im Kapitel 5 konzentrieren sich auf die Festlegung eines Mindestabstands zwischen den Lagerteilen SMA und HAA im Hinblick auf die sicherheitsrelevanten Aspekte. Die Systemanalysen zur Radionuklidfreisetzung im Kapitel 6 zeigen am Beispiel eines volatilen Radionuklids (C-14) für eine generische Lagerkonfiguration das Radionuklidrückhaltevermögen des Kombilagersystems im Vergleich zu den Einzellagern für HAA und SMA.

3.6 Schritt 4: Formulierung der Mindestanforderungen an ein Kombilager

Die Systemanalyse zur Barrierenintegrität (Kapitel 5) und zur Radionuklidfreisetzung (Kapitel 6) werden mit dem gleichen Code und vergleichbaren Modellansätzen durchgeführt. Die Modellimplementierung unterscheidet sich jedoch grundsätzlich in Bezug auf den geometrischen Detaillierungsgrad, die implementierten Strömungs- und Transportprozesse sowie die Umsetzung von Rand- und Anfangsbedingungen. Es ist daher notwendig, im Rahmen des Auswerte- und Syntheseprozesses auch die Konsistenz der verschiedenen Modellresultate zu überprüfen. Allfällige Differenzen werden identifiziert und ihre Bedeutung im Hinblick auf die sicherheitstechnischen Anforderungen an das Kombilager analysiert, sodass allenfalls Massnahmen zur Beseitigung der Differenzen getroffen werden können.

Der letzte Schritt im Syntheseprozess ist die Spezifikation der sicherheitstechnischen Mindestanforderungen an das Kombilager. Zur beispielhaften Anwendung der Methodik in diesem Bericht wird für eine exemplarische Kombilagerkonfiguration im Standortgebiet ZNO der Mindestabstand zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen abgeschätzt, und es wird überprüft, ob weitere sicherheitstechnische Mindestanforderungen im Hinblick auf die gemeinsame Nutzung der Zugangs- und Verschlussbauwerke zu treffen sind. Im Ausblick wird diskutiert, in welchem Umfang neue standortspezifische Bewertungsgrundlagen (neue Geodatenätze – GDS, überarbeitete Anlagen- und Betriebsdatenätze – ADS, überarbeitete Inventardatenätze – IDS/MIRAM21) die Schlussfolgerungen aus den vorliegenden Analysen modifizieren könnten.

4 Phänomenologische Systemanalysen

4.1 Zweck und verwendete Modellwerkzeuge

Zweck der phänomenologischen Systemanalysen ist die Identifikation potenziell sicherheitsrelevanter Wechselwirkungen zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen im Kombilager über den gesamten sicherheitstechnischen Betrachtungszeitraum (vgl. Tab. 3-1). Die überschlägige Abschätzung der sicherheitstechnischen Relevanz der dazugehörigen Phänomene und Prozesse erfolgt mittels numerischer Modellierungen mit Hilfe der in Tab. 3-2 beschriebenen Indikatoren. Im Kapitel 4.3 werden die auf der Stufe der phänomenologischen Systemanalysen untersuchten Wechselwirkungen und die daraus abgeleiteten Rechenfälle aufgeführt. Die Ergebnisse der phänomenologischen Analysen stellen den Ausgangspunkt für gezielte Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen zur Barrierenwirksamkeit (Kapitel 5) und zur Radionuklidfreisetzung (Kapitel 6) dar.

Ein weiterer wichtiger Zweck der phänomenologischen Systemanalysen ist die Rechtfertigung der gewählten Modellabstraktionen und die Validierung der implementierten Modellvarianten im Rahmen von Benchmarks. Insbesondere ist der Nachweis zu erbringen, dass die gewählten Vereinfachungen der untersuchten Lagerkonfigurationen und der betrachteten Entwicklungsszenarien die Ergebnisse der Systemanalyse nicht signifikant verfälschen. Folgende Vereinfachungen stellen potenzielle Fehlerquellen dar, die im Rahmen der phänomenologischen Analysen quantifiziert werden müssen:

- vereinfachte geometrische Darstellung der Lagerkonfigurationen in den Standortgebieten (Dimensionalität: 2D vs. 3D; vereinfachte Darstellung der Lagerkomponenten: HAA-Nahfeld, Verschluss- und Versiegelungsbauwerke; Schichtaufbau und Geometrie der Geologie)
- vereinfachte Darstellung der relevanten Prozesse (Multiphasen-/Multikomponenten-Transport; *equation of state*)
- Homogenisierung/Skalierung der THM-C-Materialeigenschaften der technischen und geologischen Barrieren sowie weiterer Lagerkomponenten
- vereinfachte Beschreibung der Rand- und Anfangsbedingungen sowie der Quellterme (Symmetrie-Hypothesen an Modellrändern; *pre-closure history*)

Das Portfolio der Modellvarianten umfasst generische und standortspezifische 2D- und 3D-Modelle der Lagerfelder mit und ohne Berücksichtigung der Zugangsbauteile. Die verschiedenen Modellvarianten und die betrachteten Entwicklungsszenarien werden im Kapitel 4.2 vorgestellt.

Die Ergebnisse der phänomenologischen Systemanalysen werden im Kapitel 4.4 diskutiert. Anhand der Auswertungen werden im Kapitel 4.5 die relevanten Wechselwirkungen zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen des Kombilagers identifiziert, welche zur Festlegung der sicherheitstechnischen Anforderungen im Hinblick auf die Barrierenwirksamkeit (Kapitel 5) und die Radionuklidrückhaltung (Kapitel 6) notwendig sind.

Für die Durchführung der im vorliegenden Bericht gezeigten Systemanalyse wird der Mehrphasenfluss-Code TOUGH3 (Jung et al. 2018) verwendet. Die Modellierung des nicht-isothermen Zweiphasenflusses in den Untertagebauwerken und im Opalinuston erfolgt mit dem Modul EOS5 für Wasser und Wasserstoff. Zusätzliche Rechenfälle zur Bestimmung der Stofffracht durch die Barriere werden mit dem EOS7R-Modul für Luft, Wasser und zwei Radionuklide durchgeführt.

4.2 Implementierte Modellkonfigurationen und Entwicklungsszenarien

Zur sicherheitstechnischen Beurteilung der zwischen den einzelnen Lagerteilen des Kombilagers auftretenden Wechselwirkungen werden die betrachteten Anordnungen gemäss Fig. 3-2 und 3-3 implementiert. Im numerischen Modell werden die verschiedenen Lagerkomponenten in stark vereinfachter Form dargestellt, um den Aufwand der modellunterstützten Systemanalysen überschaubar zu halten:

- **Generisches Modell der HAA- und SMA-Lagerteile (Fig. 3-2a):** Umsetzung mittels vertikal-ebenem 2D-Schnitt durch die HAA- und SMA-Lagerkammern senkrecht zur Tunnelachse (i.e. parallel zur maximalen horizontalen Hauptspannung S_H). In den verschiedenen Modellvarianten werden jeweils 1.5 oder 3.5 Lagerkammern abgebildet (vgl. Kapitel 4.2.1).
- **Generisches Modell der Zugangs- und Verschlussbauwerke der HAA- und SMA-Lagerteile (Fig. 3-2b):** Diese Konfiguration wird nur für die Systemanalysen zur Radionuklidfreisetzung verwendet (vgl. Kapitel 6). Für die phänomenologischen Analysen der Wechselwirkungen entlang der Zugangs- und Verschlussbauwerke wird auf das im Kapitel 4.2.3 beschriebene semi-generische Modell (Fig. 2-3b) zurückgegriffen.
- **Semi-generisches Modell der HAA- und SMA-Lagerteile (Fig. 3-3a):** Umsetzung mittels vertikal-ebenem 2D-Schnitt durch die HAA- und SMA-Lagerkammern senkrecht zur Tunnelachse. Als Grundlage dient eine der Etappe 2 entwickelte Kombilagervariante für das Standortgebiet ZNO, bei der die standortspezifische Mächtigkeit und das Einfallen des Wirtgesteins sowie die standortspezifische Schichtmächtigkeit der oberen und unteren Rahmengesteine explizit berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 4.2.2).
- **Semi-generisches Modell der Zugangs- und Verschlussbauwerke der HAA- und SMA-Lagerteile (Fig. 3-3b):** Umsetzung durch ein 3D-Modell der HAA- und SMA-Lagerfelder mit Zugangs- und Verschlussbauwerken, basierend auf eine in der Etappe 2 entwickelte Kombilagervariante für das Standortgebiet ZNO, bei der die standortspezifische Mächtigkeit und das Einfallen des Wirtgesteins sowie die standortspezifische Schichtmächtigkeit der oberen und unteren Rahmengesteine explizit berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 4.2.3).

In den folgenden Abschnitten wird der für die betrachtenden Lagerkonfigurationen entwickelte Modellaufbau samt Modellvarianten beschrieben (Kapitel 4.2.1 bis 4.2.3). Darüber hinaus werden die für die Analyse der sicherheitsrelevanten Wechselwirkungen massgebenden (d.h. ungünstigen) Entwicklungsszenarien aufgeführt (Kapitel 4.2.4).

4.2.1 Generisches 2D-Modell der Lagerkammern

Gemäss generischem Lagerkonzept sind die HAA- und SMA-Lagerteile des Kombilagers so anzuordnen, dass die Achsen der Lagerkammern in Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannung (S_H) ausgerichtet sind (Fig. 3-3a). Wie im Kapitel 2.5 ausgeführt, sind für die Festlegung des Mindestabstands zwischen diesen Lagerteilen "ungünstige" Konfigurationen zu betrachten, bei denen sich die THM-Effekte der HAA- und SMA Lagerteile so überlagern, dass sie zu einer signifikanten Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen des Multibarrierensystems führen. Eine ungünstige Anordnung ist gegeben, wenn die SMA- und HAA-Lagerkammern Seite an Seite ausgerichtet sind, so dass die Mittelachsen der Lagerbereiche zur Deckung kommen (vgl. Fig. 3-3a).

Die Umsetzung des generischen Referenzkonzepts erfolgt mittels eines 2D-Modells der HAA- und SMA-Lagerkammern im vertikal-ebenen Schnitt. Als minimaler Basisabstand zwischen SMA- und HAA-Lagerkammern wird eine Distanz von 125 m angenommen (Fig. 4-1a); der Abstand ist im Rahmen der Sensitivitätsanalysen veränderbar. Die Lagerkammern selbst werden

ebenfalls in vereinfachter geometrischer Form implementiert (Fig. 4-1b,c); sie sind umgeben von einer jeweils 1 m mächtigen Auflockerungszone. Eine weitere Modellabstraktion betrifft die lateralen und vertikalen Modellränder. Unter Ausnutzung von (näherungsweise gültigen) Symmetrieeigenschaften werden als laterale Modellrandbedingung für den Porenwasserfluss und den Wärmefluss No-Flow-Randbedingungen gewählt. Um den Effekt der lateralen Randbedingungen zu quantifizieren, werden Modellimplementierungen mit jeweils 1.5 und 3.5 Lagerkammern getestet (vgl. Fig. 4-1 und 4-2).

Die vertikalen Modellränder werden in stark vereinfachter Form durch die obere und untere Schichtgrenze des Wirtgesteins dargestellt. Im Rahmen der Sensitivitätsanalysen werden auch Varianten untersucht, bei denen die vertikale Modellerstreckung durch die Berücksichtigung der Rahmengesteine und regionalen Aquifere mittels 1-D Elementen erweitert wird (vgl. Kapitel 4.2.4).

Darüber hinaus werden für das Umfeld der Lagerkammern verschiedene Netzverfeinerungen implementiert, um die für die jeweiligen Wechselwirkungen charakteristischen Diskretisierungsfehler zu quantifizieren (Fig. 4-1b und 4-2b).

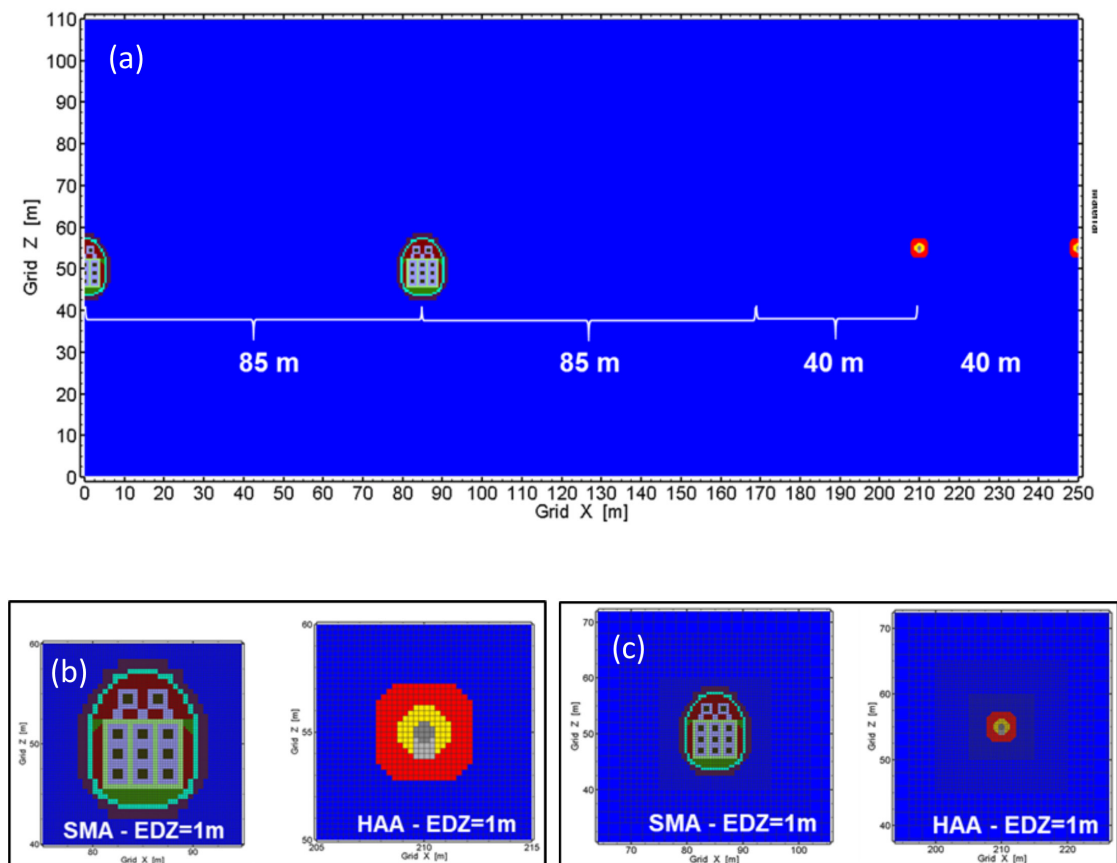


Fig. 4-1: Generisches 2D-Modell der Lagerkammern eines Kombilagers im vertikal-ebenen Schnitt

Als Basisabstand zwischen den benachbarten HAA und SMA-Lagerkammern wird eine Distanz von 125 m gewählt. (a) Gesamtmodell, bestehend aus jeweils 1.5 Lagerkammern für HAA und SMA. (b) Basis-Gitter für die Lagerkammern HAA und SMA (c) Verfeinertes Gitter für die Lagerkammern HAA und SMA

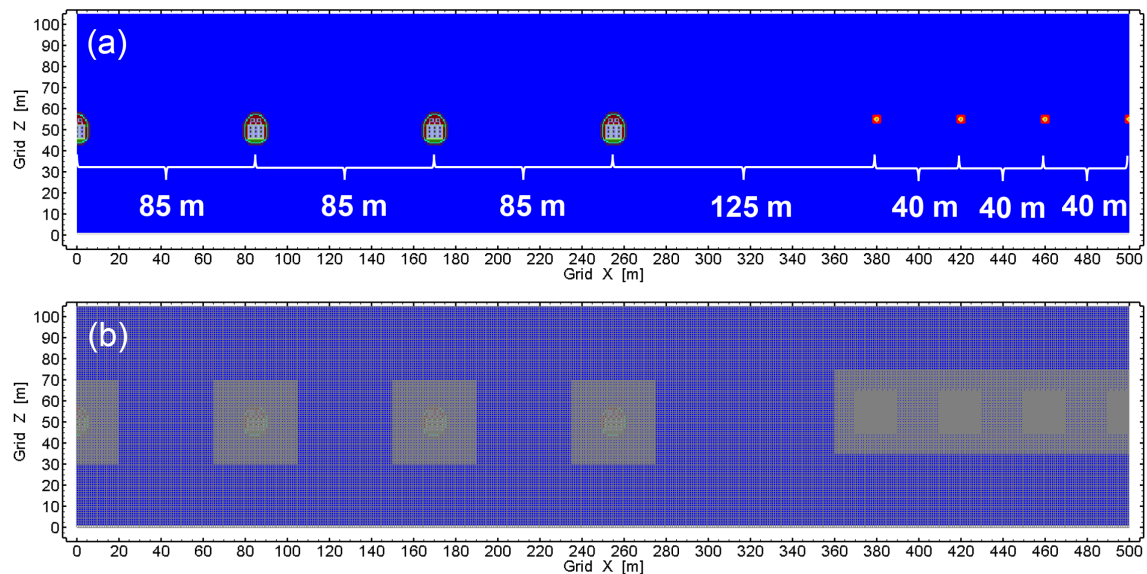


Fig. 4-2: Variante des generischen 2D-Modells der Lagerkammern eines Kombilagers im vertikal-ebenen Schnitt

(a) Gesamtmodell, bestehend aus jeweils 3.5 Lagerkammern für HAA und SMA. (b) Gitter-Verfeinerungen für die Lagerkammern HAA und SMA

4.2.2 Semi-generisches 2D-Modell der Lagerkammern

Für die Erstellung des semi-generischen 2D-Modells der Lagerkammern wird auf eine in der Etappe 2 entwickelte Kombilagervariante für das Standortgebiet ZNO zurückgegriffen (vgl. Fig. 3-3a). Dabei werden im vertikal-ebenen Schnitt durch die HAA- und SMA-Lagerkammern die standortspezifische Mächtigkeit und das Einfallen des Wirtgesteins sowie die Schichtmächtigkeit der oberen und unteren Rahmengesteine explizit berücksichtigt (Fig. 4-3).

Der Abstand zwischen den nächstgelegenen SMA- und HAA-Lagerkammern beträgt im Basisfall 125 m und wird im Rahmen der Systemanalysen zur Barrierenintegrität (Kapitel 5) verändert. Die Lagerkammern werden in vereinfachter geometrischer Form identisch mit dem generischen 2D-Modell implementiert und sind ebenso von einer jeweils 1 m mächtigen Auflockerungszone umgeben (Fig. 4-1b,c). Unter Annahme von Symmetrieeigenschaften werden die lateralen Modellrandbedingungen als *No-Flow*-Randbedingungen gewählt. Die oberen und unteren Rahmengesteine sowie die regionalen Aquifere werden in vereinfachter Form als Schichtstapel berücksichtigt (Muschelkalk, Lias-Keuper, Passwang-Formation/Brauner Dogger, Oberer Dogger, Malm und Untere Süßwassermolasse).

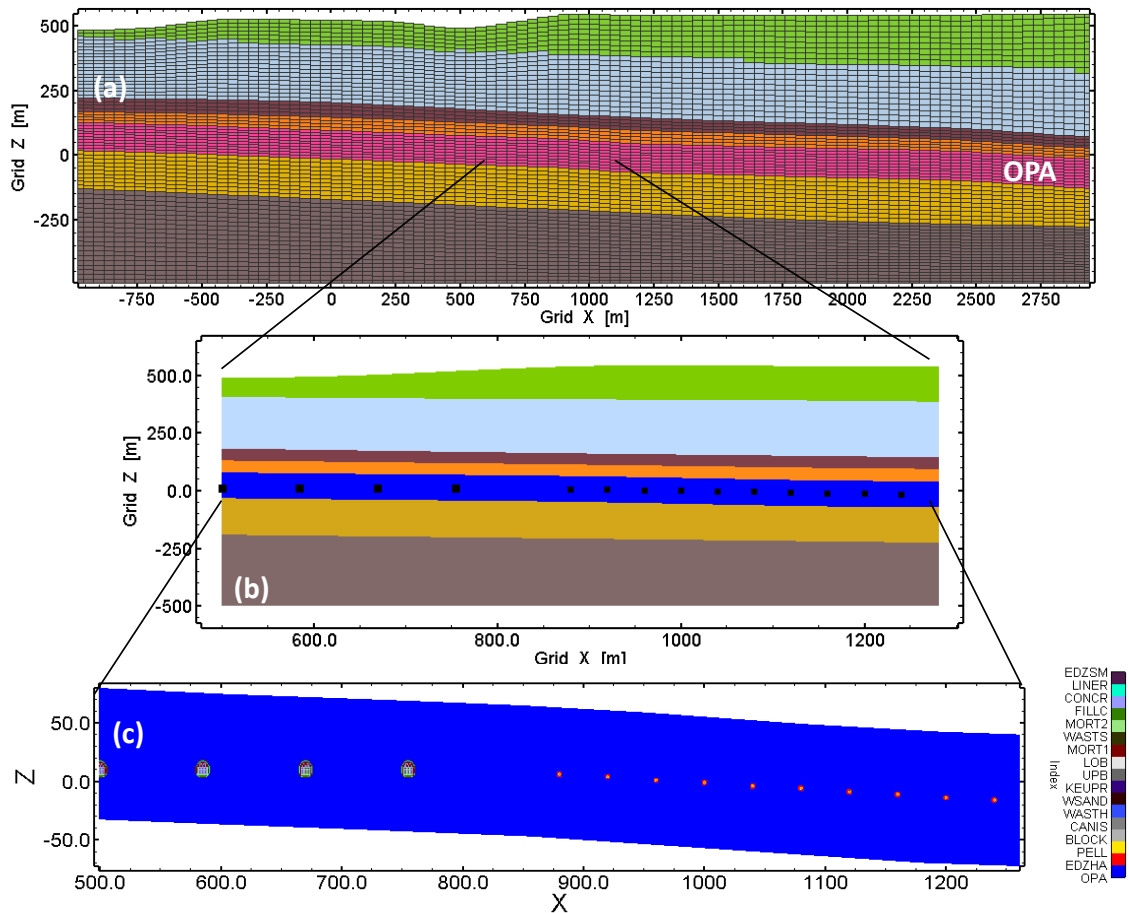


Fig. 4-3: Semi-generisches 2D-Modell der Lagerkammern eines Kombilagers im vertikal-ebenen Schnitt für das Standortgebiet ZNO

Als Abstand zwischen den benachbarten HAA und SMA-Lagerkammern wird im Basisfall eine Distanz von 125 m gewählt. (a) Basismodell, verwendet für die Entnahme der Schichtung und das Einfallen der geologischen Formationen. (b) Modellgebiet inkl. obere und untere Rahmengesteine und Aquifere. (c) Auszug des Opalinustons mit 3.5 SMA- und 10 HAA-Lagerkammern

4.2.3 Semi-generisches 3D-Modell der Zugangsbauwerke

Das semi-generische 3D-Modell der HAA- und SMA-Lagerteile mit Zugangs- und Verschlussbauwerken wird auf der Basis einer in der Etappe 2 entwickelten Kombilagervariante für das Standortgebiet ZNO erstellt. Dabei werden die Bauwerke des Kombilagers als stilisierte/abstrahierte Darstellungen der jeweiligen Systemkomponenten (inkl. Auflockerungszone) zusammen mit der standortspezifischen Mächtigkeit und dem Einfallen des Wirtgesteins implementiert, unter der Annahme, dass die HAA-Lagerkammern geneigt und parallel zum Einfallen gerichtet sind. Im 3D semi-generischen Modell werden die oberen und unteren Rahmengesteine nicht explizit berücksichtigt (Fig. 4-4).

Bei der Einteilung der Lagerkammern und Bauwerke in verschiedene Materialienklassen wird auf eine volumentreue Implementierung der einzelnen Lagerkomponenten geachtet. Die Zuweisung der thermo-hydraulischen Eigenschaften (z.B. Porosität, Permeabilität, Wärmeleitfähigkeit) basiert auf den THM-Referenzdatensätzen aus Etappe 2. Explizit werden im semi-generischen 3D-Modell die folgenden Bauwerke berücksichtigt (Fig. 4-4):

- Zugangstunnel zum zentralen Bereich des Kombilagers
- zentraler Bereich und Felslabor
- zwei bzw. vier Schächte (jeweils zwei Bauschächte und zwei Lüftungsschächte; in den Benchmarksimulationen wurden aus numerischen Gründen nur 2 Schächte aktiviert)
- Betriebstunnel und Bautunnel im SMA- und HAA-Lagerteil
- SMA Pilotlager inkl. Kontrollstollen
- sieben Lagerkammern für SMA
- drei und siebzehn Lagerkammern jeweils für HAA und BE
- Abzweigertunnel zum Anschluss der Lagerkammern mit dem Betriebstunnel
- V5 bzw. V1 Verschlüsse der Lagerkammern
- V2 Siegel in den Betriebs- und Bautunnels
- V3 Siegel (Schächte)
- V4 Siegel (Rampe)

In der vorliegenden Kombilagervariante beträgt der kleinste Abstand zwischen SMA- und HAA-Lagerkammern somit ca. 700 m. Unter Annahme von Symmetrieeigenschaften werden alle lateralen Modellrandbedingungen als *No-Flow*-Randbedingungen gewählt. Die vertikalen Modellränder werden durch die obere und untere Schichtgrenze des Wirtgesteins dargestellt.

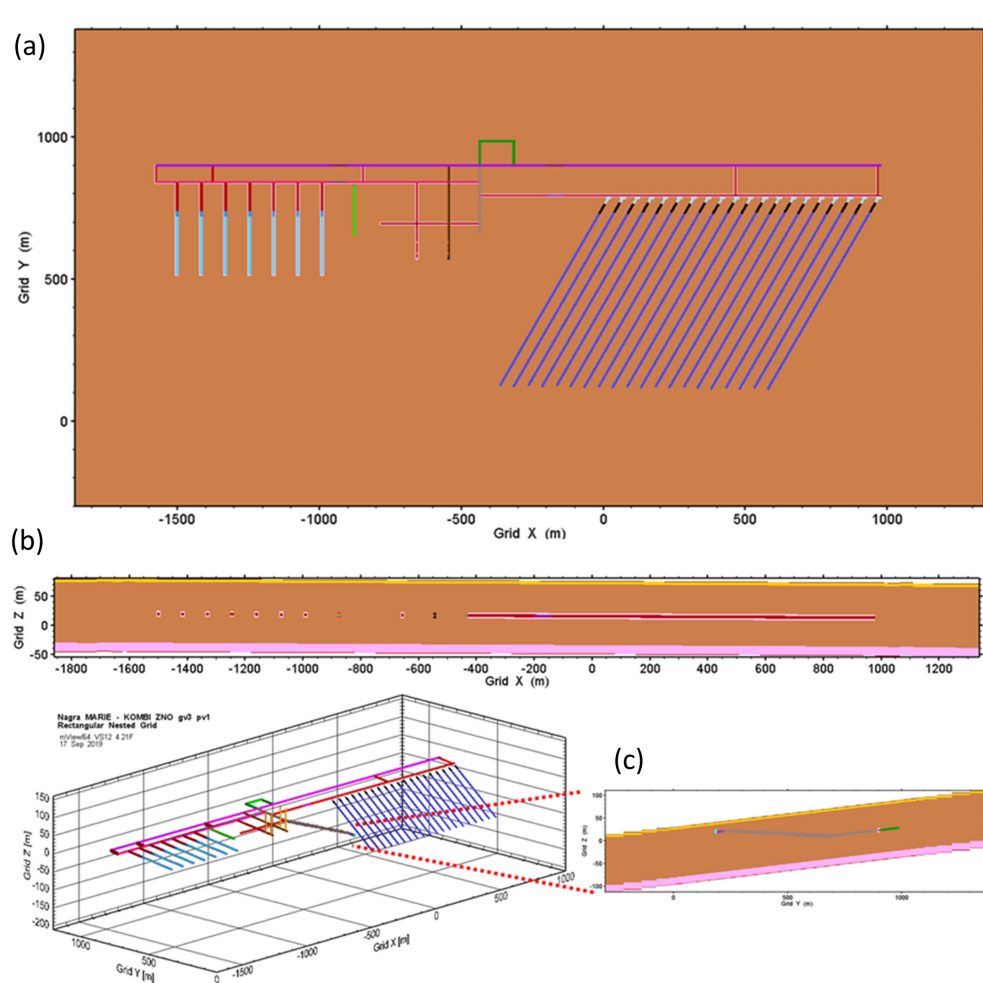


Fig. 4-4: Semi-generisches 3D-Modell der Lagerkammern eines Kombilagers mit Zugangs- und Verschlussbauwerken für das Standortgebiet ZNO

Die Zugangsbauwerke befinden sich zwischen den benachbarten HAA- und SMA-Lagerfeldern. (a) XY-Schnitt des Modells mit 7 SMA-Lagerkammern, 20 HAA/BE-Lagerkammern, Betriebs- und Bautunnel, Felslabor, und Pilotlager. (b) XZ-Schnitt des Modells mit dem Betriebstunnel im HAA-Lager (rechts) und den SMA-Lagerkammern (links). (c) YZ-Schnitt des Zugangstunnels (Mitte bis oberer Teil des Opalinustons)

4.2.4 Betrachtete Entwicklungsszenarien

Wie im Kapitel 3.5 erläutert, sind für die Beurteilung der sicherheitstechnischen Relevanz verschiedener Wechselwirkungen zwischen den HAA- und SMA Lagerteilen eines Kombilagers solche Szenarien massgebend, die zu einer signifikanten Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen des Multibarrierensystems führen können. Ein Entwicklungsszenario wird dabei durch eine Kombination derjenigen Phänomene und Prozesse definiert, welche die zeitliche Entwicklung des Kombilagers übergeordnet und massgeblich beeinflussen. Hierzu zählen:

- die THM-Anfangsbedingungen zu Beginn des Betrachtungszeitraums unter Berücksichtigung der Verhältnisse während der Bau- und Betriebsphase (Exkavationssequenzen, Ventilationsverhältnisse)
- die THM-Randbedingungen der oberen und unteren Modellränder unter Berücksichtigung allfälliger Ereignisse im Rahmen der Langzeitentwicklung (Eisauflast, Tektonik)
- die thermischen und gasbezogenen Quellterme
- die THM-Eigenschaften der einzelnen Komponenten des Kombilager. Hierbei ist insbesondere auch die räumliche Variabilität der THM-Eigenschaften des Wirtgesteins und der Auflockerungszone zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind verschiedene Szenarien zur Funktion der Verschluss- und Versiegelungssysteme mit einzubeziehen (z.B. Versagen des gasdurchlässigen Verschlusses im SMA-Lagerteil).

Die massgebenden Entwicklungsszenarien werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

THM-Anfangsbedingungen zu Beginn des Betrachtungszeitraums

In MARIE wurden auf Grundlage der zu erwartenden standortspezifischen Bedingungen zu Beginn des Betrachtungszeitraums entsprechende Anfangsbedingungen für die Simulationen abgeleitet (Namhata et al. 2018). In den vorliegenden phänomenologischen Systemanalysen (Kapitel 4) und den Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen zur Barrierenintegrität (Kapitel 5) wird auf diese Vorarbeiten zurückgegriffen.

Zu Beginn der Bau- und Betriebsphase ergibt sich die Temperaturverteilung im Wirtgestein aus einem geothermischen Gradienten von 0.043 °C/m und einer Temperatur von 10 °C an der Oberfläche bzw. am oberen Rand der Unteren Süsswassermolasse.

Es wird davon ausgegangen, dass der hydraulische Formationsdruck im Wirtgestein sowie in den oberen und unteren Rahmengesteinen und den Aquiferen am Anfang der Bau- und Betriebsphase hydrostatisch ist. Ausserdem sind alle hydrogeologischen Einheiten initial vollständig wassergesättigt. Für die Festlegung der standortspezifischen Spannungsverhältnisse wird auf den finalen Geodatensatz der Etappe 2 zurückgegriffen (Nagra 2014b), in dem drei abdeckende Referenz-Spannungsregimes S_{ref} , S_{min} und S_{max} definiert wurden (Fig. 4-5).

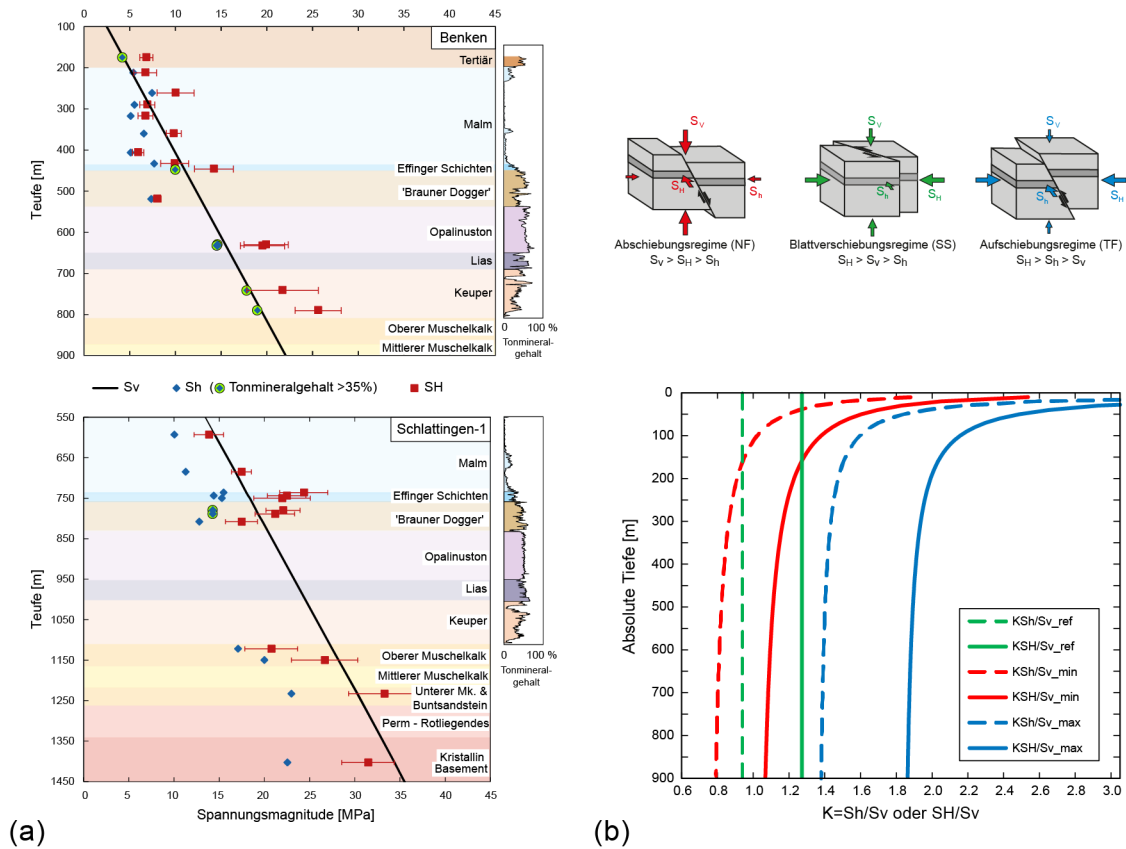


Fig. 4-5: Spannungsregime in der Nordschweiz und abgeleitete Referenz-Spannungsregimes Nagra (2014b)

(a) Spannungsmagnitude aus in-situ Messungen in Benken und Schlattigen. (b) Referenz-Spannungsregime S_{min} , S_{ref} und S_{max} für die Standortgebiete JO, NL, ZNO

Die Anfangsbedingungen zu Beginn des sicherheitstechnischen Betrachtungszeitraums (d.h. nach dem vollständigen Verschluss des Kombilaggers) werden vor allem durch die Ventilationsbedingungen während der Bau- und Betriebsphase festgelegt. Im Rahmen der vorliegenden Studie wird eine sehr vereinfachte Darstellung des Betriebszustands des Kombilaggers gewählt (Tab. 4-1), indem die HAA-Stollen über einen Zeitraum von 2 Jahren und die SMA-Kavernen 23 Jahre lang offengehalten werden. Während dieser Zeit herrscht in allen offenen Untertagebauwerken eine Luftfeuchtigkeit von 60 % und eine Temperatur von 28°C, wodurch eine Porenwasserdruckabsenkung, eine Austrocknung der konturnahen Bereiche sowie eine Auskühlung des Gebirges bewirkt werden.

Tab. 4-1: Vereinfachte Darstellung des Betriebszustands des Kombilagers in der Bau- und Betriebsphase sowie nach Lagerverschluss

Phase	Status Bauwerke	Bemerkungen
Betriebsphase 1 (0 – 2 Jahre)	• SMA-Kavernen offen und belüftet • HAA-Stollen offen und belüftet	Tunnelbelüftung aktiv: rH = 60 % Temperatur: 28 °C Atmosphärischer Druck in den Untertagebauwerken
Betriebsphase 2 (2 – 23 Jahre)	• SMA-Kavernen offen und belüftet • HAA-Stollen verfüllt	Initiale Wassersättigung des Bentonit-Granulats: 20 % wt Bentonit-Blöcke: 63 % wt Einbau bei atmosphärischem Druck Beginn der Wärme- und Gasproduktion in HAA-Stollen
Nachbetriebsphase (23 – 1 Mio Jahre)	• SMA-Kavernen verfüllt • HAA-Stollen verfüllt	Anfangssättigung der verfüllten SMA-Kavernen: 50 % bei atmosphärischem Druck Beginn der Wärme- und Gasproduktion in SMA-Kavernen

TH-Randbedingungen der oberen und unteren Modellränder

Im Rahmen der phänomenologischen Analysen werden verschiedene Varianten der thermohydraulischen Randbedingungen der oberen und unteren Modellränder betrachtet. Die erste Variante repräsentiert einen hypothetischen, hochdurchlässigen lokalen Aquifer (z.B. Wedelsandstein oberhalb des Wirtgesteins) direkt an der oberen und unteren Schichtgrenze des Wirtgesteins. Aufgrund der gegenüber dem Wirtgestein um Grössenordnungen erhöhten hydraulischen Durchlässigkeit der lokalen Aquifere wird postuliert, dass an den oberen/unteren Rändern des Opalinustons konstante Druck- und Temperaturverhältnisse gültig sind. Diese werden aus der hydrostatischen Druckverteilung bzw. dem geothermischen Gradienten abgeleitet. Die erste Modellvariante dient hauptsächlich zur Analyse von Nahfeldprozessen in der frühen Aufsättigungsphase, in der die äusseren Modellränder keine wesentliche Rolle spielen.

In der zweiten Variante werden die Modelle in ihrer vertikalen Ausdehnung erweitert, um den Einfluss der Rahmengesteine und regionale Aquifere auf die Entwicklung der lagerbedingten Effekte (Wärmefreisetzung, Porendruckentwicklung, Lageraufsättigung) explizit berücksichtigen zu können. Im generischen 2D-Modell (Kapitel 4.2.1) werden diese als 1D-Elemente dargestellt. Die 1D-Elemente werden, wie in Fig. 4-6a dargestellt, sequenziell an die oberen und unteren Ränder des Opalinustons angeschlossen. Die angenommene Mächtigkeit der Rahmengesteine entstammt dem geologischen Schichtmodell des Standortgebiets ZNO gemäss dem Geodatensatz der Etappe 2 (Nagra 2014b). Die 1D-Elemente der Malm- und Muschelkalk-Formationen werden durch Zuweisung konstanter TH-Randbedingungen in vereinfachter Form als regionale Aquifere dargestellt. Im semi-generischen 2D-Modell (Kapitel 4.2.2) werden die Rahmengesteine und die regionalen Aquifere explizit als 2D-Schichtstrukturen implementiert (Fig. 4-6b), und konstante Druck- und Temperaturrandbedingungen entsprechend am oberen Rand der USM bzw. am unteren Rand des Muschelkalks spezifiziert. Für zukünftige standortspezifische Betrachtungen müssen diese Annahmen anhand der aktuellen standortspezifischen Geodatensätze überprüft werden.

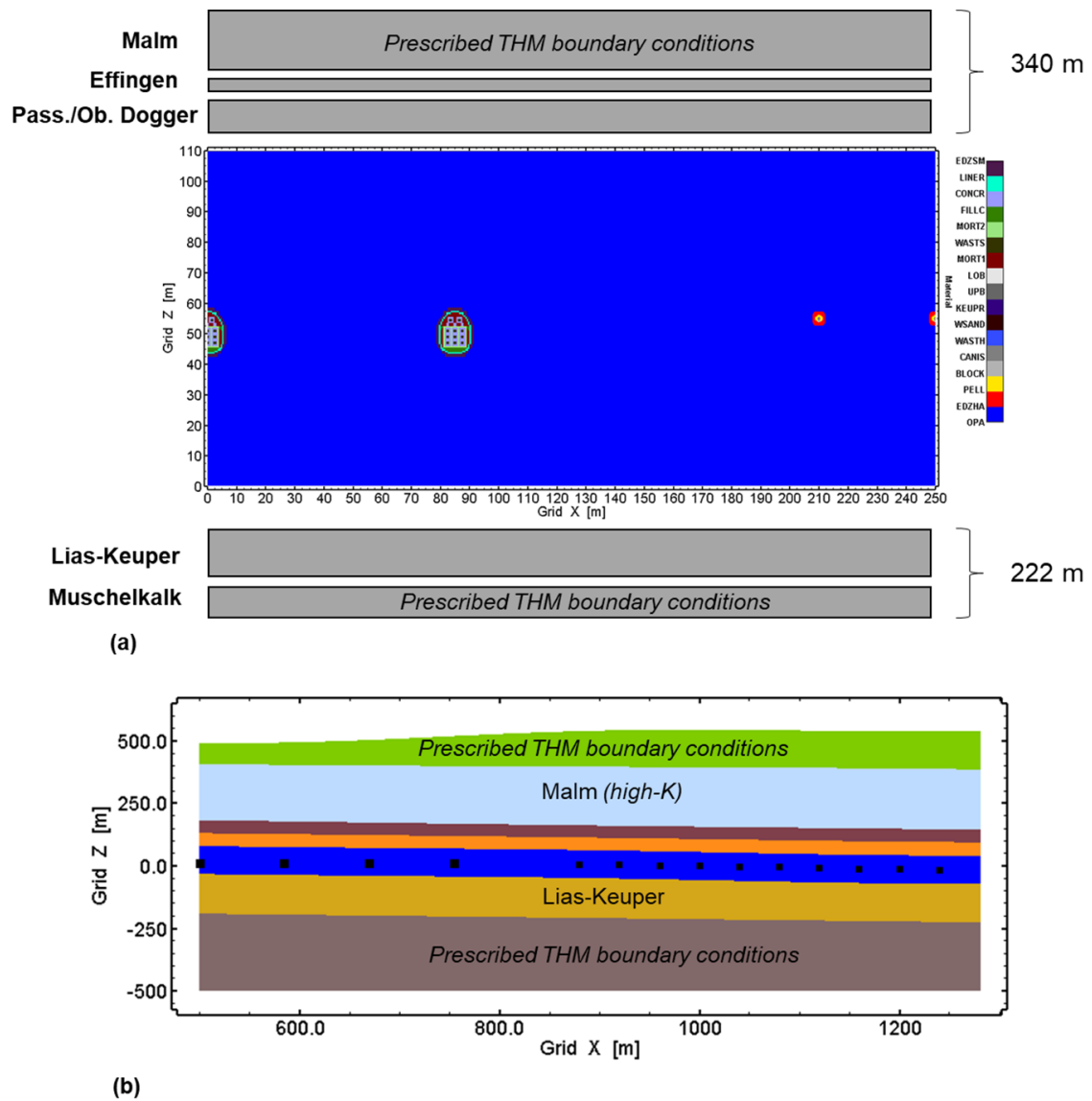


Fig. 4-6: Darstellung der Implementierung der oberen und unteren Rahmengesteine und der thermo-hydraulischen Randbedingungen an der Modellober- und -untergrenze

(a) Generisches 2D-Modell. (b) Semi-generisches 2D-Modell

Thermische und gasbezogene Quellterme

Für die phänomenologischen Systemanalysen werden zwei Varianten zum thermischen Quellterm der BE/HAA verwendet:

- ein Referenz-Quellterm unter der Annahme, dass die verschiedenen BE/HAA gleichmässig über die Lagerkammern verteilt sind. Somit ist es möglich, einen gemittelten Quellterm zu verwenden (Anfangsleistung: ca. 1'300 W).
- ein oberer Eckwert des Quellterms, entsprechend den MOX/ UO_2 -Endlagerbehältern mit der höchsten Leistung im Inventar (Anfangsleistung: ca. 1'500 W)

Für die phänomenologischen Analysen werden zwei Varianten zur Gasbildung verwendet:

- ein Referenz-Quellterm unter Berücksichtigung der Gasgeneration aus (i) HAA (nur H_2), (ii) SMA (Summe aus H_2 und CH_4 ; Annahme: Gas hat Eigenschaften von H_2), (iii) Baumaterialien in den SMA-Lagerkammern (Annahme: Kavernentyp K09)
- ein skaliertes Quellterm, der eine teilweise Freisetzung des in den SMA-Kavernen generierten Gases entlang des EGTS vereinfacht abbildet (z.B. 50 % Gasfreisetzung ins WG; vgl. Rechenfall C6* in Tab. 4-6). Der Skalierungs-Ansatz wird in Papafiotou & Namhata (2018) detailliert beschrieben und begründet.

TH-Eigenschaften der einzelnen Komponenten

Die hydraulischen und thermischen Eigenschaften der im HAA- und SMA-Lagerteil vorhandenen Materialien sind in Tab. 4-2 aufgeführt und entsprechen den thermo-hydraulischen Referenzdaten aus der Etappe 2 (Nagra 2014b). Diese Werte werden in den generischen und semi-generischen 2D-Modellen verwendet, deren relativ feine Diskretisierung die explizite Darstellung dieser Materialien erlaubt. In den semi-generischen 3D-Modellen mit Zugangs- und Verschlussbauwerken werden diese Materialien durch homogenisierte Komponenten mit effektiven hydraulischen und thermischen Eigenschaften ersetzt, wie in Tab. 4-2 dargestellt.

Die Auflockerungszone wird in den Simulationen des Basisfalles als jeweils 1 m mächtiges homogenisiertes Material mit isotropen Eigenschaften dargestellt (Tab. 4-2). Darüber hinaus werden bei ausgewählten Modellvarianten auch heterogene Realisationen der Auflockerungszone implementiert, um standortspezifischen Unterschieden aufgrund der lokalen Gebirgsspannungsverhältnisse und der unterschiedlichen Lagertiefe Rechnung zu tragen (Alcolea 2018). Die entsprechenden Varianten der Permeabilitätsverteilung in der Auflockerungszone sind in Fig. 4-7 dargestellt.

Darüber hinaus wird im Rahmen der phänomenologischen Analysen auch die räumliche Variabilität der sicherheitstechnisch relevanten Wirtgesteinsseigenschaften berücksichtigt. Zu diesem Zweck wird ein im MARIE-Projekt entwickelter Ansatz zur Erzeugung von Porositäts- und Permeabilitäts-Feldern verwendet. Dieser erlaubt es, anhand von empirischen Korrelationen die räumliche Verteilung der Wirtgesteinsseigenschaften mit den in Tiefbohrungen gemessenen Tongehalts-Profilen zu konditionieren (NIB 17-31). Im vorliegenden Bericht werden diese Felder exemplarisch mit Daten aus der Benken-Bohrung konditioniert und in den 2D-Modellen implementiert (Fig. 4-8).

Tab. 4-2: Referenzwerte der thermo-hydraulischen Eigenschaften der betrachteten Materialien für die phänomenologischen Systemanalysen

Parameter	Material													
	OPA	UPB	LOB	AUZSM	AUZHA	WASTS	MORT1	MORT2	CONCR	FILLC	LINER	PELL	BLOCK	CANIS
Korndichte (kg/m ³)	2'700	2'650	2'650	2'650	2'650	2'650	2'650	2'650	2'650	2'650	2'650	2'699	2'699	7'850
Porosität (-)	0.12	0.12	0.12	0.14	0.14	0.40	0.30	0.10	0.20	0.20	0.25	0.45	0.33	1.E-04
Intrinsische Permeabilität k_{XY} (m ²)	1.E-20	1.E-15	1.E-15	1.E-19	1.E-19	1.E-19	1.E-14	1.E-15	1.E-19	1.E-19	1.E-17	3.5E-20	2.5E-21	1.E-20
Intrinsische Permeabilität k_Z (m ²)	2.E-21	1.E-15	1.E-15	1.E-19	1.E-19	1.E-19	1.E-14	1.E-15	1.E-19	1.E-19	1.E-17	3.5E-20	2.5E-21	1.E-20
Wärmeleitfähigkeit, feucht (W/m °C)	1.55	2.50	2.50	1.55	1.55	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	1.00	1.00	52.50
Wärmeleitfähigkeit, trocken (W/m °C)	1.55	2.50	2.50	1.55	1.55	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	0.30	0.30	52.50
Wärmekapazität (J/kg °C)	995.0	995.0	995.0	995.0	995.0	905.5	905.5	905.5	905.5	905.5	905.5	893.0	1'058.0	440.0
Porenkompressib. (Pa ⁻¹)	1.7E-09	1.E-09	1.E-09	1.7E-09	1.7E-09	5.E-10	2.86E-10	2.86E-10	6.67E-10	2.86E-10	2.86E-10	3.70E-09	3.E-09	-
Therm. Expansion (1/°C)	1.7E-05	3.47E-05	3.47E-05	3.47E-05	3.47E-05	1.5E-05	1.5E-05	1.5E-05	1.5E-05	1.5E-05	1.5E-05	2.5E-05	2.5E-05	1.2E-05
van Genuchten Formfaktor (-)	1.60	1.67	1.67	1.60	1.60	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.67	1.42	2.00
van Genuchten Gaseindringdruck P_0 (Pa)	3.4E+07	1.8E+06	1.8E+06	1.8E+07	1.8E+07	2.E+06	500	500	2.E+06	2.E+06	2.E+06	1.E+07	2.2E+07	1.E+07
Residuale Wassersättigung S_{lr} (-)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.05	0.30	0.30	0.05	0.30	0.30	0.10	0.10	0.01

4.3 Untersuchte Wechselwirkungen und abgeleitete Rechenfälle

Über den gesamten sicherheitstechnisch relevanten Betrachtungszeitraum nach Lagerverschluss können zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen eines Kombilagers Wechselwirkungen auftreten, welche einen ungünstigen Einfluss auf die Wirksamkeit der Barrierensysteme und/oder die Radionuklidrückhaltung in den Lagerteilen haben. Die im Rahmen der vorliegenden Studie identifizierten potenziell sicherheitsrelevanten Wechselwirkungen werden in Tab. 2-1 vorgestellt. Phänomenologische Systemanalysen dienen dazu, die Bedeutung der verschiedenen Wechselwirkungen durch numerische Simulationen quantitativ abzuschätzen und einzuordnen. Dazu wird die Relevanz folgender Aspekte mittels modellbasierter Indikatoren beurteilt:

- Auflockerungszone
- räumliche Variabilität der Wirtgesteinsseigenschaften
- Gasakkumulation (SMA- und HAA-Lagerteile)
- Wärmeeintrag aus dem HAA-Lagerteil in das geologische Umfeld des Kombilagers und insbesondere in den SMA-Lagerteil

Die untersuchten Wechselwirkungen, die dazugehörigen Indikatoren und die aus den Entwicklungsszenarien abgeleiteten Rechenfälle werden in den folgenden Abschnitten erörtert.

Nicht analysiert werden im Rahmen der beispielhaften Anwendung der Methodik die Effekte der Langzeitentwicklung (Eislasten) und die Auswirkungen allfälliger menschlicher Eingriffe. Falls notwendig, können die genannten Aspekte zu einem späteren Zeitpunkt eingehenderen numerischen Analysen unterzogen werden.

4.3.1 Zu beurteilende Aspekte, Wechselwirkungen und Indikatoren

Auflockerungszone

In den drei verbleibenden Standortgebieten unterscheiden sich die geomechanischen Verhältnisse auf Lagerebene signifikant. Einerseits werden aufgrund der unterschiedlichen Tiefenlagen und des unterschiedlichen tektonischen Regimes unterschiedliche Gebirgsspannungen erwartet. Andererseits ist wegen der unterschiedlichen Konsolidierung des Opalinustons auch mit Unterschieden in der Gebirgsfestigkeit zu rechnen. In der Etappe 2 des Sachplanverfahrens wurden für alle 3 Standortgebiete typische Auflockerungszonen für die SMA-Kavernen und die HAA-Stollen hergeleitet, welche die Bandbreite der erwarteten Spannungsverhältnisse und die Ungewissheiten bezüglich der Festigkeit und Steifigkeit des Opalinustons berücksichtigen (Geomechanica 2018, Alcolea 2018).

Auflockerungszonen mit ausgedehnter vertikaler bzw. horizontaler Erstreckung können hauptsächlich zur Beeinträchtigung der Radionuklidrückhaltung im Kombilager führen (vgl. Tab. 2-1). Der Einfluss der Auflockerungszone auf die Strömungs- und Transportverhältnisse im Umfeld des Kombilagers wird im Rahmen der phänomenologischen Systemanalysen mit dem generischen 2D-Modell der HAA- und SMA-Lagerkammern untersucht (vertikal-ebener 2D-Schnitt durch die Lagerkammern HAA und SMA senkrecht zur Tunnelachse; vgl. Kapitel 4.2). Als Indikatoren zur Überprüfung eignen sich der spezifische Wasser- bzw. Gasfluss im Lagerumfeld sowie die Länge des Transportpfads im intakten Wirtgestein.

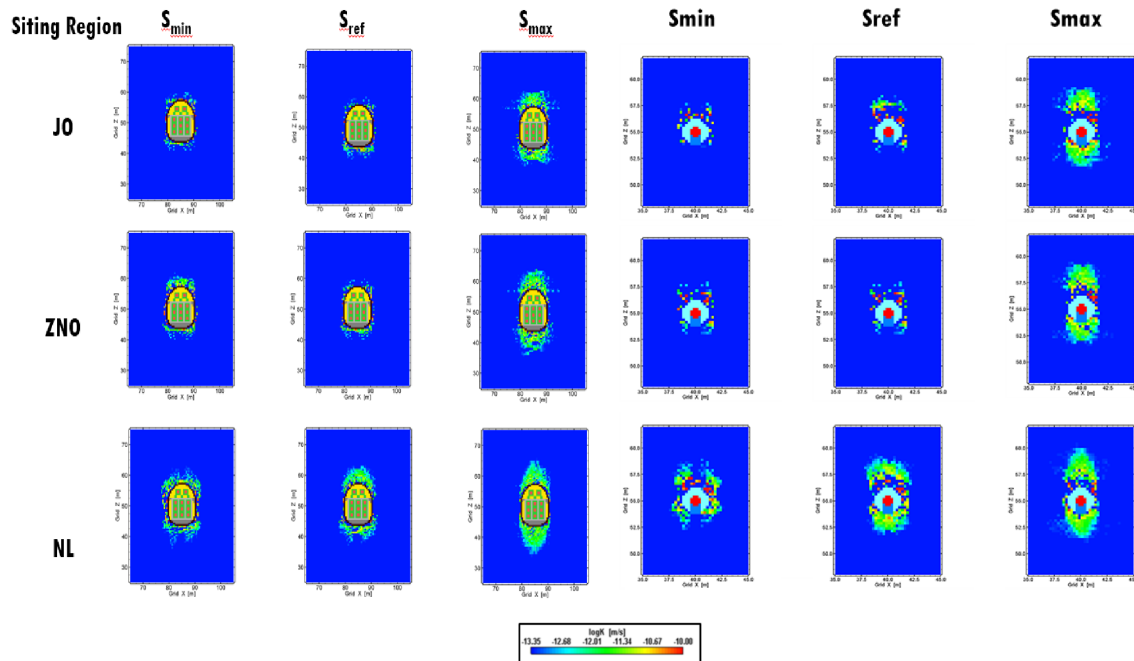


Fig. 4-7: Typische Auflockerungszonen um die SMA- und HAA-Lagerkammern in den Standortgebieten JO, NL und ZNO

Alcolea (2018)

Räumliche Variabilität der Wirtgesteinseigenschaften

Der Opalinuston als Wirtgestein zeichnet sich durch die relativ geringe laterale Variabilität der mineralogischen und petrophysikalischen Eigenschaften aus. Mikrostrukturell ist er gekennzeichnet durch eine ausgeprägte Schichtung, die makroskopisch durch anisotrope Gesteinseigenschaften ausgedrückt werden kann. Hinsichtlich der sicherheitsrelevanten Wirtgesteinseigenschaften (hydraulische Durchlässigkeit, Diffusionskoeffizient, thermische Leitfähigkeit, Gaseintrittsdruck) ist zu berücksichtigen, dass selbst kleine räumliche Unterschiede die Langzeitsicherheitsfunktionen der geologischen und technischen Barrieren merklich beeinträchtigen können.

In den drei Standortgebieten unterscheiden sich die Tiefenlagen der potenziellen HAA- und SMA-Lagerebenen deutlich, sodass aufgrund der unterschiedlichen Überlagerung mit einer gewissen Tiefenabhängigkeit der Porosität und anderer petrophysikalischer Eigenschaften zu rechnen ist. Auch ist nicht auszuschliessen, dass aufgrund standortspezifischer Unterschiede in den Ablagerungsverhältnissen die mineralogische Zusammensetzung des Wirtgesteins variiert und somit allenfalls auch einen Einfluss auf dessen petrophysikalische Eigenschaften sowie auf die Rückhalteeigenschaften hat. Anhand der verfügbaren geophysikalischen Logging-Daten und des Kernmaterials kann die standortspezifische Variabilität der Wirtgesteinseigenschaften mittels Variogrammanalyse abgeschätzt und durch geostatistische Modelle nachgebildet werden. Im Rahmen des vorliegenden Berichts werden exemplarisch mit den aus der Tiefbohrung Benken vorliegenden Loggingdaten experimentelle Variogramme ermittelt und durch Modellvariogramme vom Typ "*gaussian with hole effect*" angepasst. Mit den so kalibrierten Modellvariogrammen werden dann für das semi-generische 2D-Modell für das Standortgebiet ZNO

(vertikal-ebener 2D-Schnitt durch die Lagerkammern; vgl. Kapitel 4.2) Realisationen der Parameterverteilungen erzeugt (Porosität, hydraulische Durchlässigkeit, Gaseintrittsdruck¹⁰). Tab. 4-3 gibt einen Überblick über die verwendeten Modellvariogramme inklusive der dazugehörigen Parametrisierung. Fig. 4-8 zeigt beispielhaft die entsprechenden Durchlässigkeitsverteilungen, welche für die thermo-hydraulischen Simulationen im Rahmen der phänomenologischen Systemanalysen verwendet werden.

Tab. 4-3: Verwendete Modellvariogramme zur Erzeugung von räumlichen Verteilungen der Wirtgesteinsseigenschaften (Porosität, hydraulische Durchlässigkeit, Wärmeleitfähigkeit) für die thermo-hydraulischen Systemanalysen im Standortgebiet ZNO

Modellvariogramm-Typ	"Gaussian and Hole-effect"
Mittelwert log K [m/s]	-13.82
Varianz log K [m/s]	0.011
Vertikale Korrelationslänge [m]	18.0 (Gaussian) und 10.0 (Hole-Effect)
Horizontale Korrelationslänge [m]	50/5'000
Nugget-Parameter [-]	0.02
Sill-Parameter [-]	0.9, 0.2

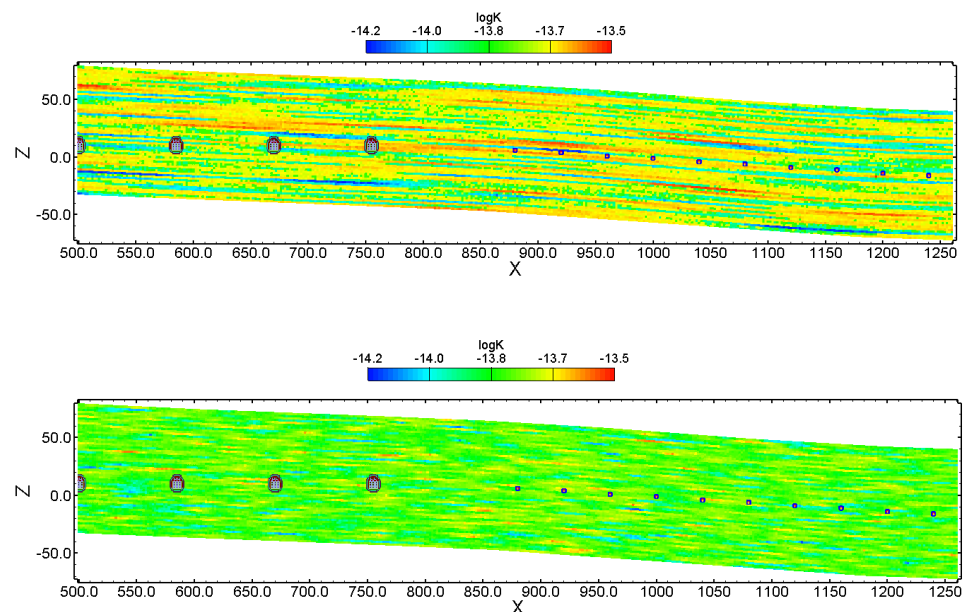


Fig. 4-8: Realisationen der hydraulischen Durchlässigkeitsverteilung im semi-generischen 2D-Modell ZNO

Vertikal-ebener 2D-Schnitt durch die HAA- und SMA-Lagerkammern: (a) horizontale/vertikale Korrelationslängen $\lambda_h = 5'000$ m, $\lambda_v = 18/10$ m, (b) $\lambda_h = 50$ m und $\lambda_v = 18/10$ m

¹⁰ Die räumliche Variabilität der thermischen Eigenschaften wird als von untergeordneter Bedeutung eingestuft.

Die ausgeprägte Schichtung des Opalinustons kann sich grossräumig durch eine Anisotropie seiner Eigenschaften manifestieren und somit die laterale Reichweite der thermo-hydraulischen Wechselwirkungen (Gasakkumulation, Wärmeeintrag; vgl. Tab. 2-1) deutlich erhöhen. Als Indikatoren zur Überprüfung eignen sich der spezifische Wasser- bzw. Gasfluss im Wirtgestein sowie die Magnitude der thermischen und gasbedingten Überdrücke im Wirtgestein.

Wärmeeintrag aus dem HAA-Lagerteil

Der Wärmeeintrag durch die hochaktiven Abfälle kann die Radionuklidrückhaltung im Umfeld der SMA-Kavernen in Form erhöhter advektiver und diffusiver Radionuklidtransportraten direkt beeinflussen (z.B. thermisch induzierte Porenwasserüberdrücke, erniedrigte Viskosität oder Auftriebseffekte). Solche Einflüsse sind mit den thermo-hydraulischen Systemanalysen durch Abschätzung des advektiven und diffusiven Flusses an charakteristischen Modellquerschnitten quantifizierbar (vgl. Kapitel 4.3.2). Darüber hinaus können auch indirekte Effekte zum Tragen kommen, falls die Temperaturerhöhung in den SMA-Kavernen die Mobilisierbarkeit bzw. Löslichkeit der Radionuklide erhöht¹¹. Sofern der Temperatureffekt des HAA-Lagerteils auf den SMA-Lagerteil nicht deutlich höher als +10°C ist, sind temperaturabhängige Löslichkeiten im SMA-Lagerteil nicht zu betrachten (vgl. auch Leupin et al. 2016).

Als mögliche Beeinträchtigungen der Schutzfunktionen des Multibarrierensystems des SMA-Lagerteils kommen vor allem thermisch bedingte Ausfällungs- und Lösungsprozesse in Frage, die zu einer beschleunigten Degradation der zementbasierten Verfüllungen bzw. zum Verlust ihrer Langzeitsicherheitsfunktionen führen können (inkl. Karbonatisierung, Alkali-Silikat-Reaktion). Darüber hinaus können Ausfällungsprozesse am Übergang von den zementbasierten Verfüllmaterialien zum Sand/Bentonit-Siegel dessen Gastransportkapazität beeinträchtigen. Quantitativ sind solche Beeinträchtigungen schwer zu erfassen, da die notwendigen experimentellen Grundlagen fehlen (thermische Langzeitexperimente über viele Jahrzehnte). Es ist daher anzustreben, dass der Temperatureffekt des HAA-Lagerteils auf den SMA-Lagerteil die natürlichen langfristigen Schwankungsbreite nicht wesentlich überschreitet (Annahme: $\Delta T < 5\text{ °C}$ über einen Zeitraum von mehreren 1'000 Jahren).

Gasakkumulation

Die Gasbildung und Gasakkumulation in den HAA- und SMA-Lagerkammern ist mit verschiedenen wechselseitigen Beeinflussungen der Lagerteile verbunden. Erhöhte Gasdrücke in den Lagerkammern führen zur Verdrängung von Porenwasser aus den Verfüllungen beider Lagerteile und damit zu relativ grossen hydraulischen Gradienten im umgebenden Wirtgestein, die das diffusive Transportregime für einen Zeitraum von mehreren 10'000 Jahren überlagern. Ob sich solche Verdrängungseffekte nachteilig auf die Radionuklidfreisetzung auswirken, wird mit Hilfe von Zweiphasenfluss-Modellierungen analysiert, indem der Porenwasserfluss und der Massenfluss von im Porenwasser gelösten Stoffen (z.B. Wasserstoff) an charakteristischen Modellquerschnitten quantitativ ermittelt wird. Darüber hinaus kann eine durch die Gasfreisetzung aus dem SMA-Lagerteil verstärkte Entsättigung des Wirtgesteins im Umfeld der HAA-Lagertunnel dazu beitragen, dass sich die Strömungs- und Transportverhältnisse im geologischen Umfeld des HAA-Lagerteils über einen Zeitraum von mehreren 100'000 Jahren (geringfügig) verändern. Dieser Effekt kann sich allenfalls sogar günstig auf die Radionuklidrückhaltung auswirken, da er einerseits mit einer Reduktion der effektiven Diffusionskonstante verbunden ist und andererseits

¹¹ Zu beachten: Für die standortspezifischen Projekte eines SMA-Einzellagers sind wegen der unterschiedlichen Lagertiefen Temperaturunterschiede von mehr als 10°C zu erwarten. In der Beurteilung der SMA-Lagerprojekte wird die Temperatur auf Lagerebene nicht als sicherheitsrelevanter Aspekt betrachtet (vgl. Leupin et al. 2016).

aufgrund des Kapillardrucks zu einem, wenn auch geringfügigen, Zufluss von Porenwasser aus den Rahmengesteinen ins Wirtgestein führt. Im Rahmen der phänomenologischen Systemanalysen werden auch diese Wechselwirkungen mit Hilfe von Zweiphasenfluss-Modellierungen analysiert, indem der Porenwasserfluss und der Massenfluss von im Porenwasser gelösten Stoffen (z.B. Wasserstoff) an charakteristischen Modellquerschnitten quantitativ ermittelt wird.

4.3.2 Sicherheitstechnische Bewertung der Wechselwirkungen

Zur Beurteilung der sicherheitstechnischen Relevanz der Wechselwirkungen zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen des Kombilagers werden mit dem in den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.3 beschriebenen Modellportfolio thermo-hydraulische Simulationen durchgeführt. Dabei wird bezüglich der Rand- und Anfangsbedingungen und der Quellterme auf ungünstige Annahmen zurückgegriffen, die zu einer Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen des Multibarrierensystems führen können (vgl. Kapitel 4.2.4). Mit den thermo-hydraulischen Simulationen wird überprüft, ob die gewählten Indikatoren (Tab. 3-2) einen Systemzustand des Kombilagers anzeigen, der gegenüber der Situation von zwei getrennten Lagern für HAA und SMA aus sicherheitstechnischer Sicht gleichwertig oder günstiger ist. Sofern dies der Fall ist, kann das Kombilager als sicherheitstechnisch bevorzugte Variante angesehen werden. Tab. 4-4 gibt einen Überblick über die verwendeten Indikatoren und die sicherheitstechnischen Kriterien zur Bewertung der Wechselwirkungen.

Tab. 4-4: Überblick über die potenziellen Indikatoren und deren Herleitung aus thermo-hydraulischen Systemanalysen

Indikator	Kriterien zur Bewertung der Wechselwirkungen
Gasdruck P_g bzw. Porenwasserdruck P_w	P_g bzw. P_w darf im Umfeld des Kombilagers zu keinem Zeitpunkt deutlich grösser sein als im Umfeld der getrennten Lager HAA und SMA.
Gassättigung S_g	S_g darf im Umfeld des HAA-Lagerteils eines Kombilagers nicht deutlich grösser sein als im Umfeld des HAA-Einzellagers.
Temperatur T	T darf im Umfeld des SMA-Lagerteils eines Kombilagers nicht deutlich grösser sein als im Umfeld des SMA-Einzellagers.
Spezifischer Wasserfluss q_w /spezifischer Gasfluss q_g /spezifischer Fluss einer (Gas-)Komponente, gelöst im Wasser gq_w /Kumulierter Fluss einer (Gas-)Komponente, gelöst im Wasser $\Sigma ^gq_w$	q_w , q_g , gq_w , $\Sigma ^gq_w$ an den Grenzen des einschliessungswirksamen Gebirgsbereichs dürfen für ein Kombilager zu keinem Zeitpunkt deutlich grösser sein als für die getrennten Lager für HAA und SMA.

Die sicherheitstechnische Bewertung der Wechselwirkungen zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen erfolgt über den gesamten Betrachtungszeitraum von 1'000'000 Jahren. In den phänomenologischen Systemanalysen wird zu diesem Zweck die zeitliche Entwicklung der verwendeten Indikatoren an ausgewählten Lokationen im thermo-hydraulischen Modell ausgewertet. Fig. 4-11a zeigt für das generische 2D-Modell die Lokationen, welche zur Auswertung der thermo-hydraulischen Wechselwirkungen herangezogen werden. Die entsprechenden Beobachtungspunkte des semi-generischen 3D-Modells sind in Fig. 4-9b dargestellt.

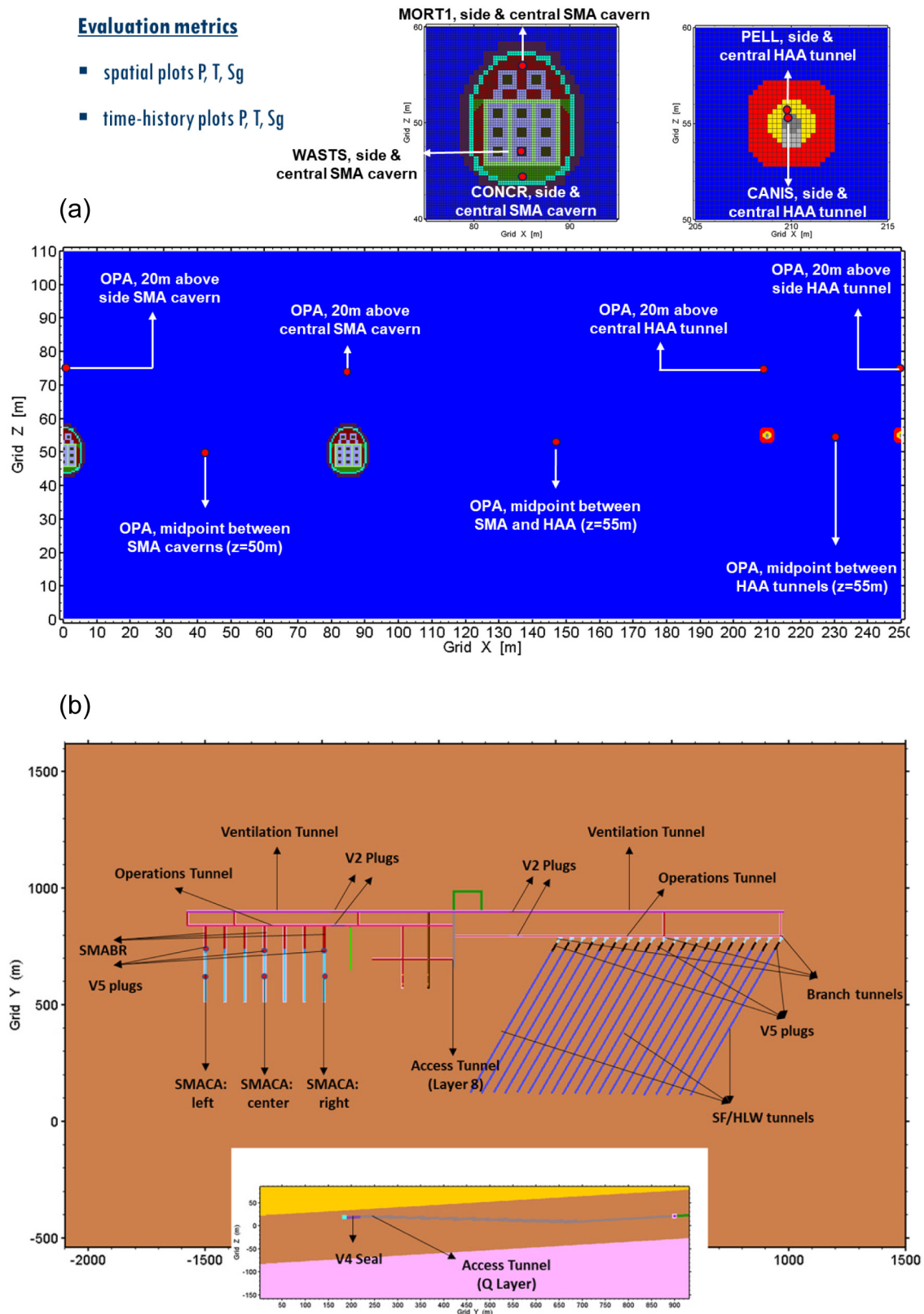


Fig. 4-9: Betrachtete Lokationen zur Auswertung der thermo-hydraulischen Wechselwirkungen

(a) Generisches 2D-Modell. (b) Semi-generisches 3D-Modell

4.3.3 Abgeleitete Rechenfälle

Im Rahmen der phänomenologischen Systemanalysen werden die im Kapitel 4.3.1 aufgeführten Wechselwirkungen mittels thermo-hydraulischen Simulationen anhand folgender Rechenfallkategorien untersucht:

A: Rechenfälle zur Auflockerungszone

B: Rechenfälle zur räumlichen Variabilität der Wirtgesteinseigenschaften

C: Rechenfälle zur Gasakkumulation

D: Rechenfälle zum Wärmeeintrag

Eine Übersicht über die durchgeführten Rechenfälle ist in Tab. 4-5 aufgeführt.

Tab. 4-5: Übersicht über die im Rahmen der phänomenologischen Analysen durchgeführten Rechenfälle

Bezeichnung	Verwendetes Modell	Parametersatz	Bemerkungen
Basisfall/ <i>Base_Case</i>	2D generisch	Referenzdatensatz	OPA und AUZ homogen. Quellterme Gas: Referenzfall. Thermischer Quellterm: BE-D-2
A1	2D generisch	AUZ heterogen, Variante 1	ZNO $S_{\max}$
A2	2D generisch	AUZ heterogen, Variante 2	ZNO S_{ref}
A3	2D generisch	AUZ heterogen, Variante 3	ZNO $S_{\min}$
B1, C1b	2D semi-generisch	Referenzdatensatz, WG homogen; 100 % Gasfreisetzung ins WG; Frage nach thermischem Auftrieb im WG	OPA Mächtigkeit & Einfallen: ZNO. Annahme: lokaler Aquifer direkt an der oberen/unteren Schichtgrenze des Wirtgesteins. Schichtgrenzen geneigt ($\rightarrow$ mögliche Auftriebseffekte in <i>late times</i>)
B2	2D semi-generisch	WG heterogen, Variante 1	Horizontale Korrelationslänge: 50 m
B3	2D semi-generisch	WG heterogen, Variante 2	Horizontale Korrelationslänge: 5'000 m
C1	2D generisch	100 % Gasfreisetzung ins WG	Nicht-funktionierendes EGTS
C2	3D semi-generisch	Referenzdatensatz, Dichte-Effekte in den Zugangs- Bauwerken berücksichtigt	OPA Mächtigkeit & Einfallen: ZNO, inkl. Zugangs- und Verschlussbauwerken geneigt ($\rightarrow$ mögliche Auftriebseffekte in <i>late times</i>)
C3	3D semi-generisch	$K_{V3}=5E-18 \text{ m}^2$ (unverändert) $K_{V4}=1E-16 \text{ m}^2$	Hoch durchlässige-Siegel in Rampe und Schacht (V4)
C4*	2D semi-generisch	100 % Gasfreisetzung ins WG, Dichte-Effekte im WG	OPA Mächtigkeit and Einfallen ZNO ($\rightarrow$ Auftriebseffekte)
C5*	2D semi-generisch	100 % Gasfreisetzung ins WG, Dichte-Effekte im WG, Randbedingung-Variante 1	OPA Mächtigkeit & Einfallen ZNO, inkl. ORG, URG, regionalen Aquifere ($\rightarrow$ Auftrieb)
C6*	2D generisch	50 % Gasfreisetzung ins WG	Teilweise funktionierendes EGTS

Tab. 4-5: Fortsetzung

Bezeichnung	Verwendetes Modell	Parametersatz	Bemerkungen
D1	2D generisch	Keine Wärmeerzeugung durch HAA	Thermische Quellterme ausgeschaltet
D2	2D generisch	WLFVariante 1	Reduzierte Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{OPA} = \lambda_{UCU} = \lambda_{LCU} = 1.30 \text{ W/m K}$
D3*	2D generisch	Therm. Quellterm Variante 1	Referenzfall thermische Quellterme (Fig. 4-7)
D4*	2D generisch	Therm. Quellterm Variante 2	Thermische Quellterme BE-D-2
D5*	2D generisch	Therm. Quellterm Variante 3	Inkl. therm. Quellterme im SMA (Abbindewärme Zement)
D6*	2D generisch	Referenzdatensatz: Variante 1	$K_{z,OPA} = 1.e-21 \text{ m}^2$, $K_{z,AUZ} = 1.e-20 \text{ m}^2$, $\lambda_{OPA} = \lambda_{UCU} = \lambda_{LCU} = 1.55 \text{ W/m K}$
D7*, C7*	2D generisch	Randbedingung: Variante 1	Annahme: lokaler Aquifer direkt an der oberen und unteren Schichtgrenze des Wirtgesteins
MC1	2D generisch	Referenzdatensatz	Monte Carlo mit Perturbation der TH-Eigenschaften
MC2	2D generisch	50 % Gasfreisetzung ins WG	Monte Carlo mit Perturbation der TH-Eigenschaften
MC3	2D generisch	Kein SMA-Lagerteil	Monte Carlo mit Perturbation der TH-Eigenschaften
MC4	2D generisch	Kein HAA-Lagerteil	Monte Carlo mit Perturbation der TH-Eigenschaften

* Simulationen durchgeführt; die Resultate werden im vorliegenden Bericht jedoch nicht diskutiert.

4.4 Ergebnisse

4.4.1 Basisfall (*Base Case*)

Die *Base-Case*-Simulation mit dem generischen 2D-Modell werden mit den Referenzwerten der thermo-hydraulischen Parameter durchgeführt. Die Temperatur-, Druck- und Gas-Sättigungsverteilung im Lagerumfeld am Ende der Betriebsphasen 1 und 2 (nach 2 bzw. 23 Jahren) sind in Fig. 4-10 dargestellt. Nach einer zweijährigen Ventilationsphase (Lüftungstemperatur 28 °C, relative Luftfeuchtigkeit: 60 % in den Lagerkammern) wird im Bereich der Auflockerungszone eine deutliche Auskühlung des Gebirges um bis zu 6 °C gegenüber dem ungestörten Wirtgestein (auf Lagerebene: 36 °C) beobachtet. Gleichzeitig wird die Auflockerungszone teilweise entsättigt, und der Porenwasserdruck sinkt in der Umgebung der Tunnelwände aufgrund der Drainagewirkung der ventilierten Untertagebauwerke bis auf Atmosphärendruck ab. Am Ende der Betriebsphase 1 werden die HAA-Behälter eingelagert und die HAA-Tunnel mit Bentonit verfüllt. Nach 23 Jahren (d.h. 21 Jahre nach der Einlagerung der HAA-Behälter) steigt die Temperatur in den verfüllten HAA-Lagerräumen und im umliegenden Wirtgestein aufgrund des Wärmeeintrags durch die hochaktiven Abfälle an (Fig. 4-10b). Der Temperaturanstieg im Wirtgestein führt zu erhöhten Porenwasserdrücken, die im Abstand von ca. 10 – 30 m oberhalb und unterhalb der HAA-Lagerkammern am ausgeprägtesten sind. In der Umgebung des

SMA Lagerfelds und insbesondere in der Auflockerungszone setzen sich Porenwasserdruckabsenkung und Entsättigung des Gebirges fort, während die verfüllten SMA-Lagerkammern langsam aufsättigen.

Nach 100 Jahren sinkt die Temperatur im HAA-Lagerbereich stetig, während sich die thermisch-induzierten Überdrücke im Wirtgestein weiter ausbreiten (Fig. 4-11a). Im SMA-Lager steigt der Druck innerhalb der SMA-Kavernen aufgrund der Gasgeneration an. Der Druck in der Auflockerungszone und im direkt umliegenden Wirtgestein bleibt weiterhin deutlich unterhalb des hydrostatischen Niveaus. Der zunehmende Einfluss der Gasakkumulation und die Ausbreitung des thermisch-induzierten Porenwasserdruck-Pulses nach 500 Jahren sind in den entsprechenden Kontour-Plots in Fig. 4-11b dargestellt. Nach 5'000 Jahren sind die thermischen Effekte nicht mehr von Relevanz, wohingegen der Gasdruckaufbau sowie die Freisetzung der Gasphase ins Wirtgestein im Umfeld des SMA-Lagerfelds immer ausgeprägter werden (Fig. 4-12a). Die Gasphase breitet sich um die SMA-Kavernen zuerst radial und dann zunehmend elliptisch aus, was vorwiegend auf die Anisotropie der hydraulischen Durchlässigkeit zurückzuführen ist. Nach 20'000 Jahren gehen der Gasdruck und die Gassättigung im Umfeld des SMA-Lagerfelds langsam zurück; dies ist im Wesentlichen auf die Abnahme der Gasproduktion (Fig. 4-12b) sowie den verstärkten Einfluss von Löslichkeit und Diffusion des Wasserstoffs im Porenwasser des Wirtgesteins zurückzuführen. Im Nahfeld des HAA-Lagerfelds erhöhen sich der Gasdruck und die Gassättigung aufgrund der Gasakkumulation (Fig. 4-12b). Nach 100'000 Jahren ist der Druck im Wirtgestein wieder hydrostatisch, während sich die Wiederaufsättigung der SMA-Kavernen weiter fortsetzt (Fig. 4-13).

Die zeitlichen Entwicklungen von Temperatur, Druck, und Gassättigung sind in Fig. 4-14 dargestellt. Die maximale Temperatur am HAA-Behälter beträgt nach 8 Jahren ca. 132 °C. Die entsprechende maximale Temperatur in der Mitte der Bentonitverfüllung zwischen HAA-Behälter und Stollenwand beträgt ca. 118 °C. Die maximale Temperatur auf Lagerebene im Wirtgestein zwischen benachbarten HAA-Stollen liegt bei 63 °C und bei ca. 58 °C in einer Distanz von 20 m oberhalb der HAA-Lagerkammern. Der maximale Temperaturanstieg in den SMA-Kavernen erreicht ca. 5 °C. Im oberen Teil der SMA-Kaverne steigt die Gassättigung im Verfüllmörtel bis zum Ende der Simulation auf ca. 68 %, während sich der untere Teil der Kaverne mit Porenwasser schneller aufsättigt und nach 30'000 Jahren schliesslich 100 % Wassersättigung erreicht. Die SMA-Abfallgebinde erreichen den Zustand der Vollsättigung nach ca. 80'000 Jahren. In den HAA-Lagerkammern bleibt die Gassättigung in den ersten Jahren fast unverändert hoch und nimmt dann stetig ab, bis schliesslich nach 100 Jahren das HAA-Nahfeld vollständig wassergesättigt ist. Aufgrund der Gasbildung durch die Korrosion der HAA-Behälter steigt die Gassättigung anschliessend wieder auf ca. 2 %. Der maximale Porenwasserdruck im Wirtgestein infolge des Wärmeeintrags der hochaktiven Abfälle wird nach 80 Jahren erreicht und beträgt ca. 10 MPa. Der maximale Druck aufgrund der Gasfreisetzung durch die Korrosion der HAA-Behälter erreicht einen Wert von 8.7 MPa im HAA-Lagerfeld nach 10'000 Jahren und 7 MPa im Wirtgestein zwischen den beiden Lagerfeldern nach 40'000 Jahren. Der maximale Druck im SMA-Lagerfeld aufgrund der Gasakkumulation beträgt ca. 7 MPa nach 3'000 Jahren.

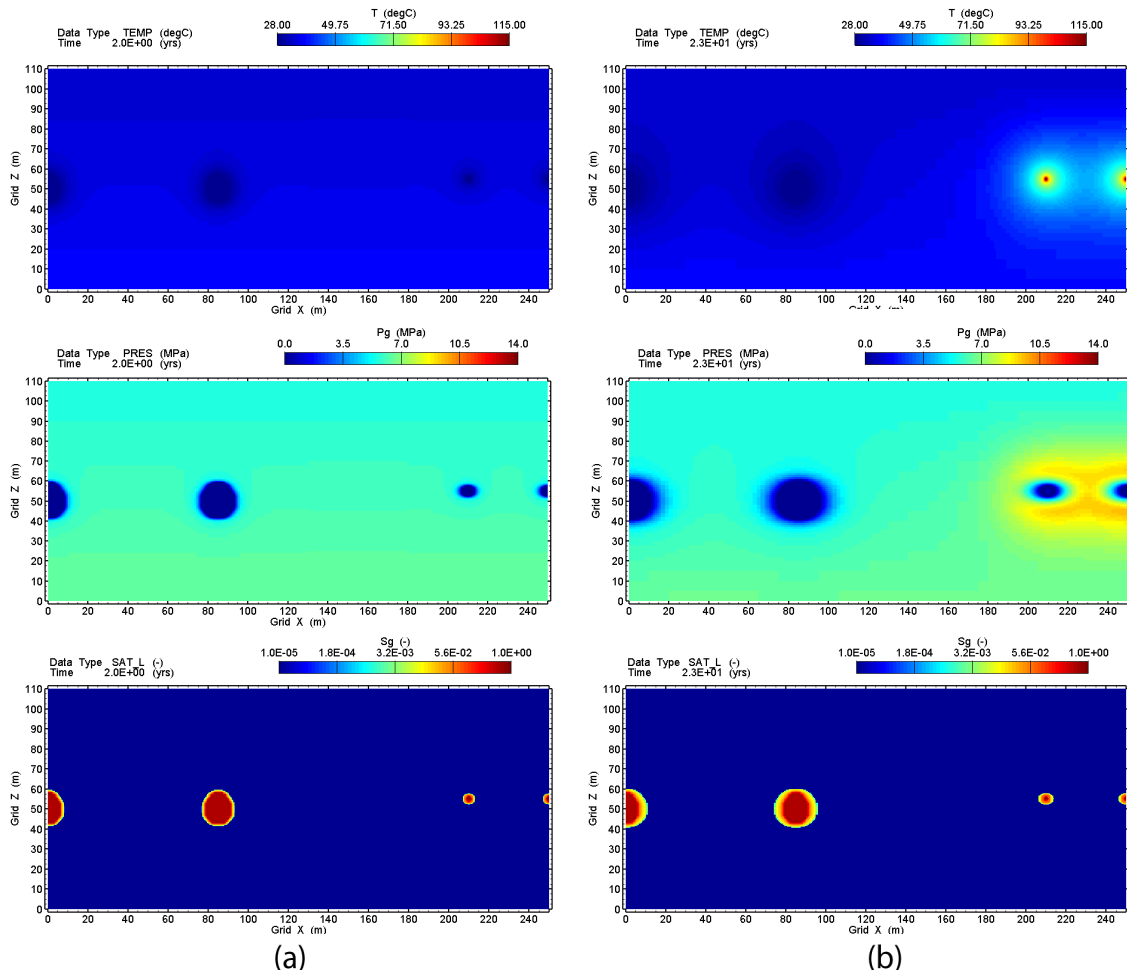


Fig. 4-10: Basisfall: Kontour-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 2 Jahren (Ende der Betriebsphase 1) und (b) nach 23 Jahren (Ende der Betriebsphase 2)

In Bereichen mit Wassersättigung ist in dieser Abbildung und in allen analogen Abbildungen der Wasserdruck und nicht der Gasdruck abgebildet.

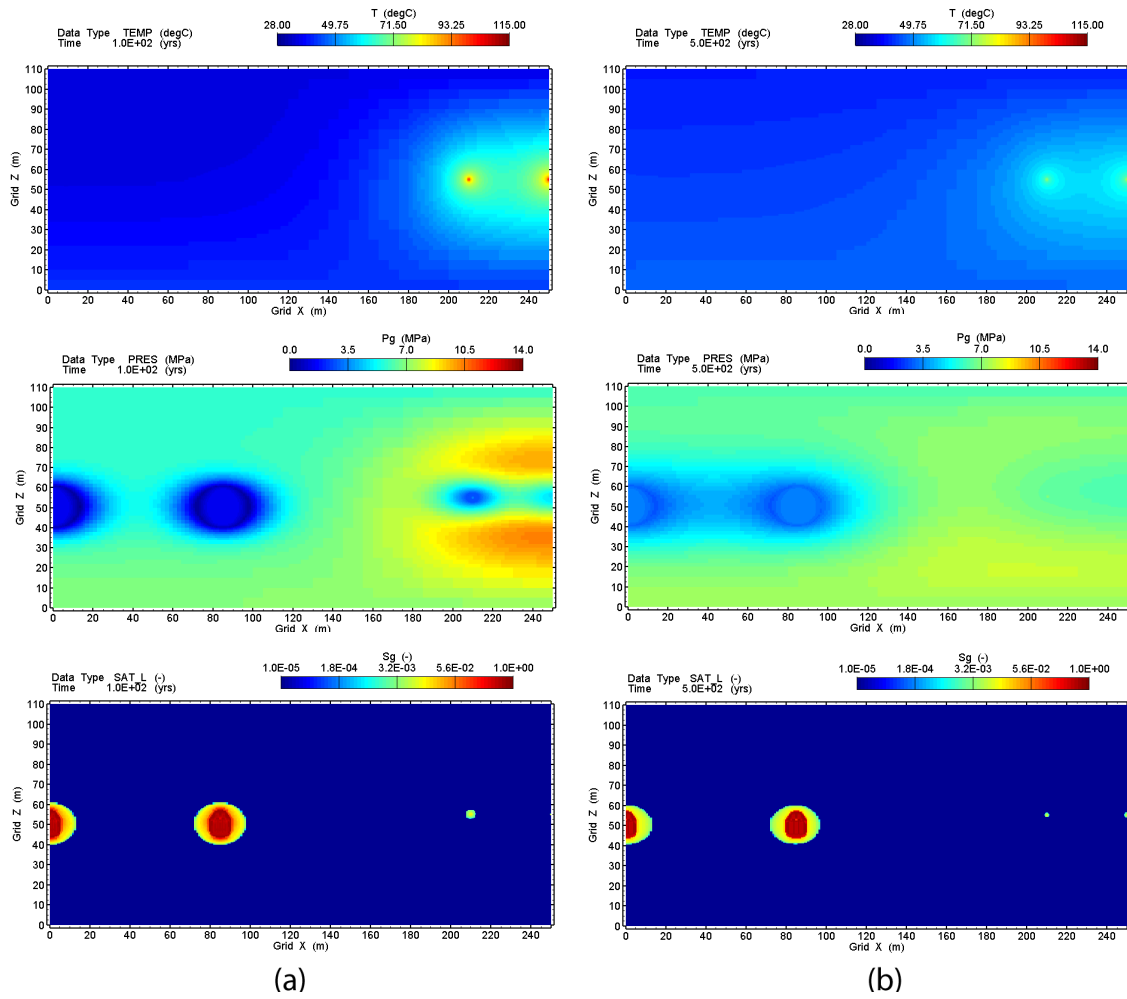


Fig. 4-11: Basisfall: Kontour-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 100 Jahren und (b) nach 500 Jahren

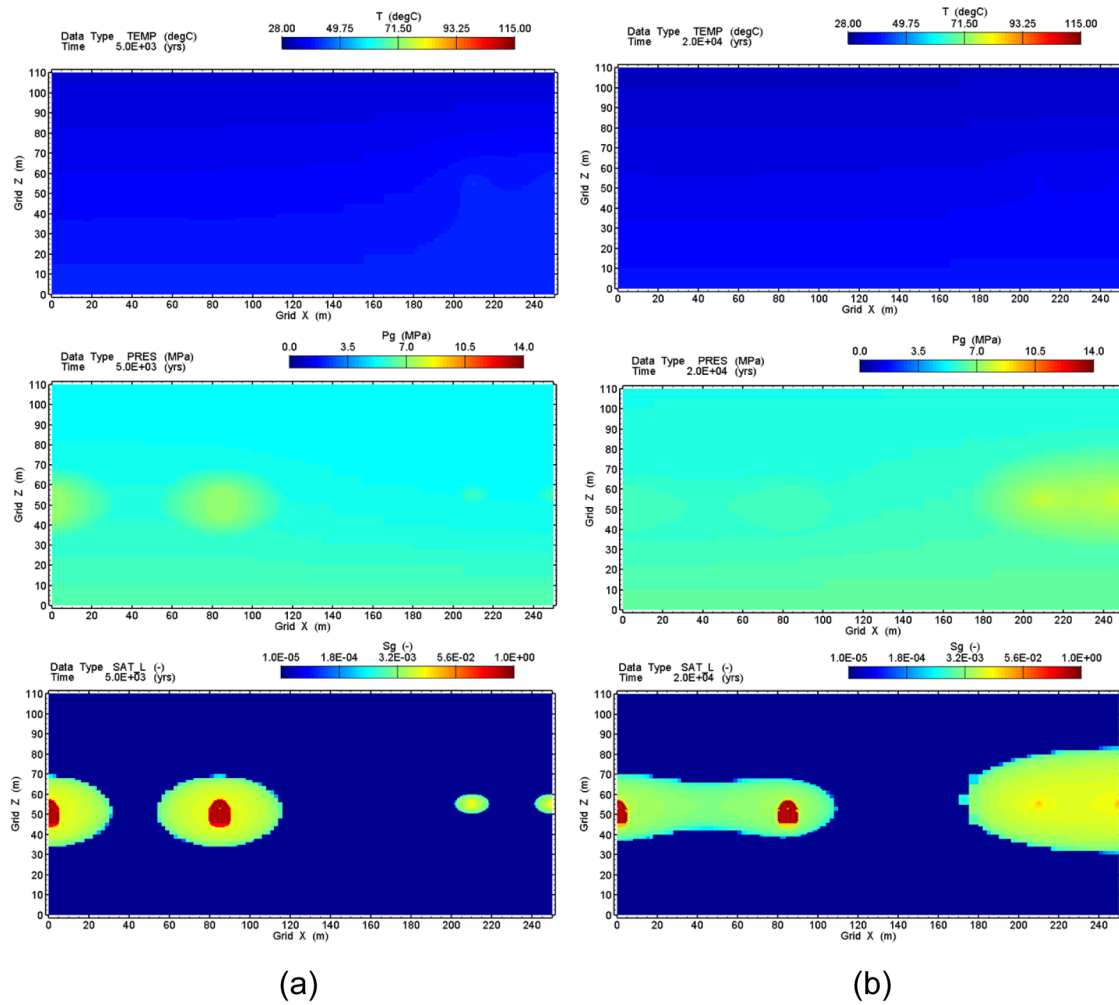


Fig. 4-12: Basisfall: Kontour-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 5'000 Jahren und (b) nach 20'000 Jahren

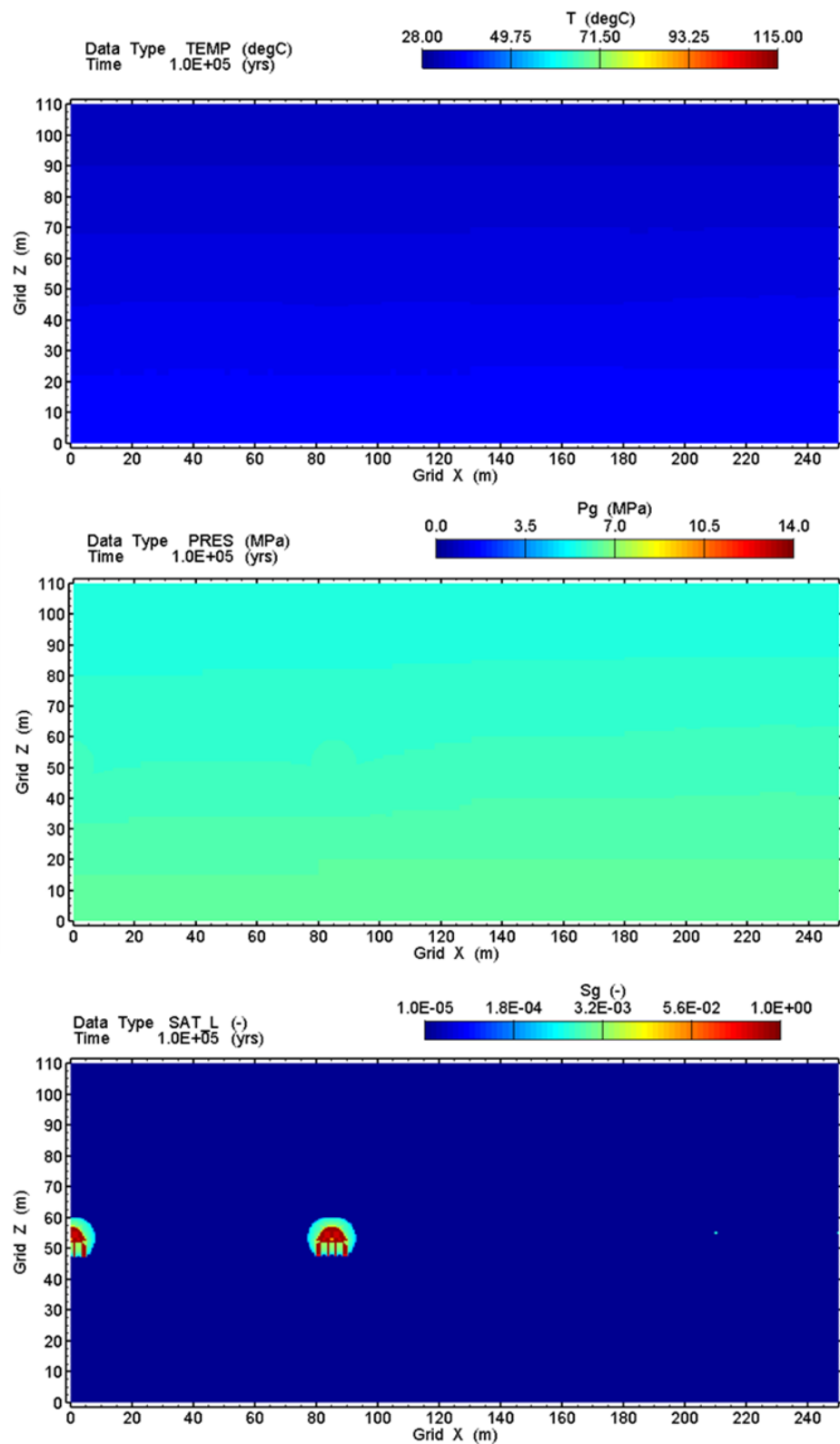


Fig. 4-13: Basisfall: Kontour-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung nach 100'000 Jahren

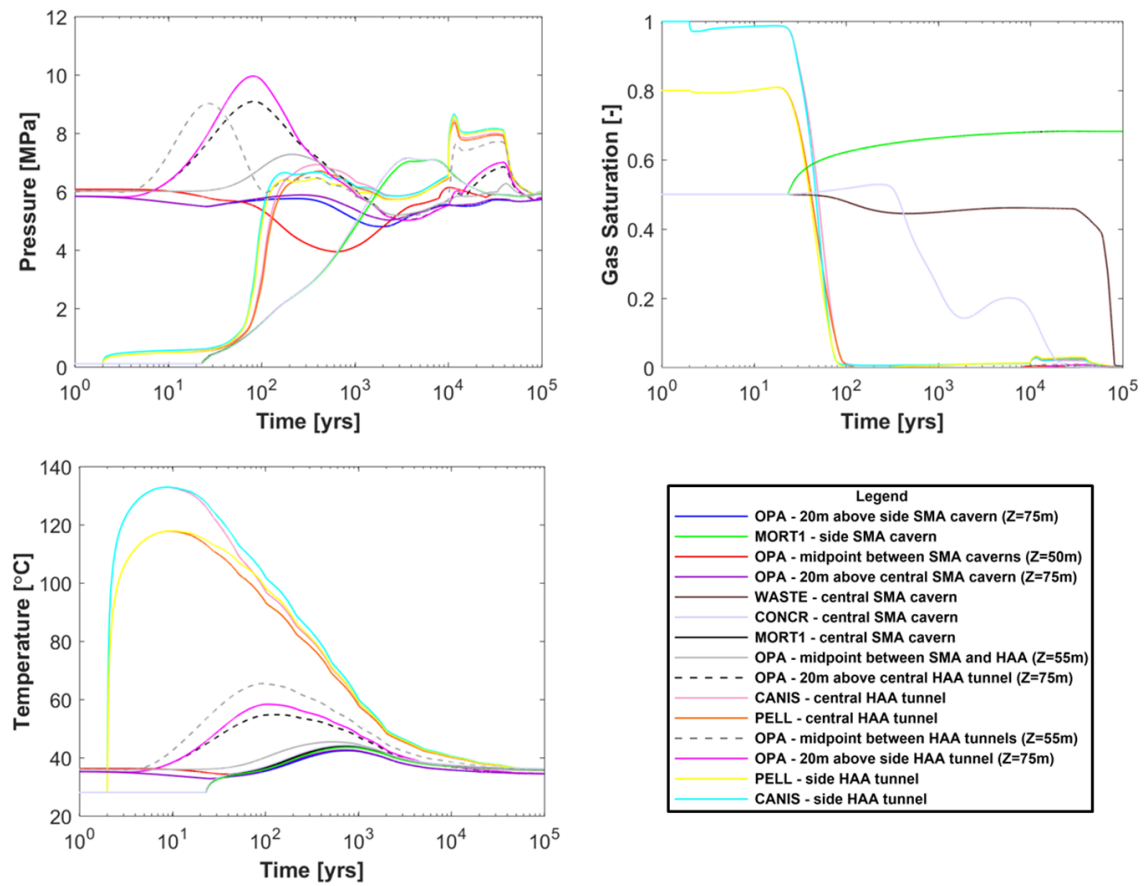


Fig. 4-14: Zeitliche Entwicklung von Temperatur, Druck und Gassättigung im Basisfall

4.4.2 Rechenfälle zur Auflockerungszone

Wegen der unterschiedlichen geomechanischen Verhältnisse in den drei Standortgebieten ist damit zu rechnen, dass sich die Auflockerungszonen um die Lagerkammern für SMA und HAA von Standort zu Standort markant unterscheiden (vgl. Kapitel 4.2.4). Darüber hinaus gibt es auch innerhalb der Standorte erhebliche Ungewissheiten über die Form und Ausdehnung der Auflockerungszonen. Typische Varianten von Auflockerungszonen für beide Lagertypen wurden in Alcolea (2018) für alle drei Standortgebiete bereitgestellt (vgl. Fig. 4-9). In Fig. 4-15 werden drei Realisationen von Auflockerungszonen um die SMA- und HAA-Lagerkammern in Form von heterogenen Durchlässigkeitsverteilungen dargestellt, die als repräsentativ für die in Etappe 2 betrachteten Spannungsregimes S_{ref} , S_{min} und S_{max} am Standort ZNO (vgl. Fig. 4-5) angesehen werden. Die drei Durchlässigkeitsverteilungen werden im 2D generischen Modell implementiert, um die Auswirkungen der Gasfreisetzung mittels thermo-hydraulischer Simulationen zu untersuchen.

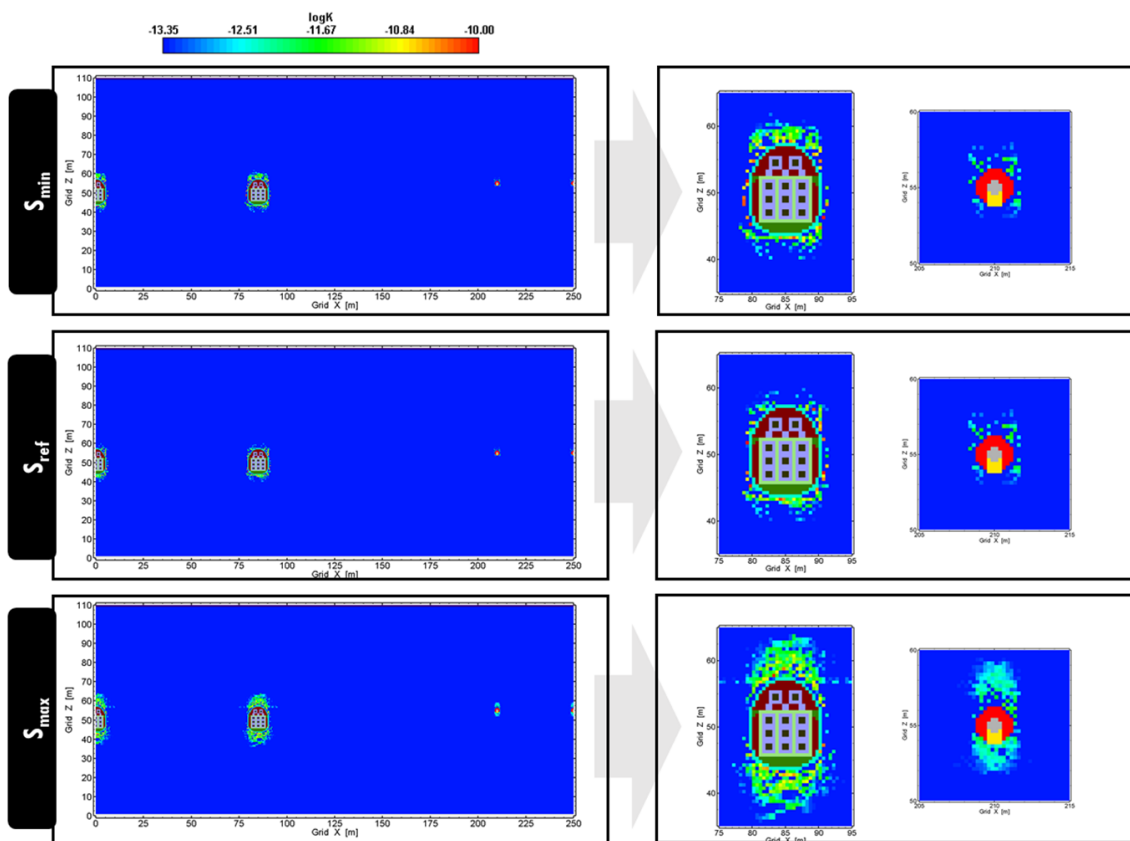


Fig. 4-15: Realisationen von Auflockerungszonen um die SMA- und HAA-Lagerkammern in Form von heterogenen Durchlässigkeitsverteilungen

Die Realisationen sind repräsentativ für die in Etappe 2 betrachteten Spannungsregimes S_{ref} , S_{min} und S_{max} im Standortgebiet ZNO.

Rechenfall A1 – AUZ Variante 1 (ZNO $S_{\max}$)

Der erste Rechenfall der implementierten Varianten der Auflockerungszone geht vom Referenz-Spannungsregime $S_{\max}$ aus. Die entsprechenden Permeabilitätsverteilungen in der Auflockerungszone um die SMA- und HAA-Lagerkammern sind in Fig. 4-17 (unten) dargestellt. Die aus der numerischen Simulation resultierende Verteilungen des Massenanteils von Wasserstoff in Porenwasser, des Porenwasserdrucks und der Gassättigung nach 500, 5'000 und 20'000 Jahren sind in Fig. 4-16 dargestellt.

Bereits nach 500 Jahren ist ein Effekt der Heterogenität der Auflockerungszone zu erkennen. Die Gasausbreitung um die SMA-Kaverne folgt der Kontur der Auflockerungszone und unterscheidet sich daher gegenüber der elliptischen Ausbreitung, die in der *Base-Case* Simulation ermittelt wird. Auch zu späteren Zeiten wird die Gasausbreitung im Umfeld der Lagerkammern von der Form der Auflockerungszone noch deutlich beeinflusst. Die Magnitude der Gassättigung und des entsprechenden Gasdruckes bleibt allerdings im Vergleich zum *Base-Case* praktisch unverändert.

Der zeitliche Verlauf und die Maximalwerte von Druck und Temperatur sind vergleichbar mit den Ergebnissen der *Base-Case* Simulation. Das Sättigungsverhalten im SMA-Lager deutet allerdings eine schnellere Wiederaufsättigung im Rechenfall A1 an. So ist beispielsweise der untere Teil der SMA-Kaverne schon nach 10'000 Jahren (30'000 Jahre im *Base-Case*) wassergesättigt, während die SMA-Gebinde im Zentrum der Kaverne nach ca. 55'000 Jahren den vollgesättigten Zustand erreichen (80'000 Jahre im *Base Case*). Der Prozess der Wiederaufsättigung wird für die verschiedenen Varianten der Auflockerungszone (Fälle A2 und A3) anhand des zeitlichen Verlaufs der Massenflüsse eingehender untersucht.

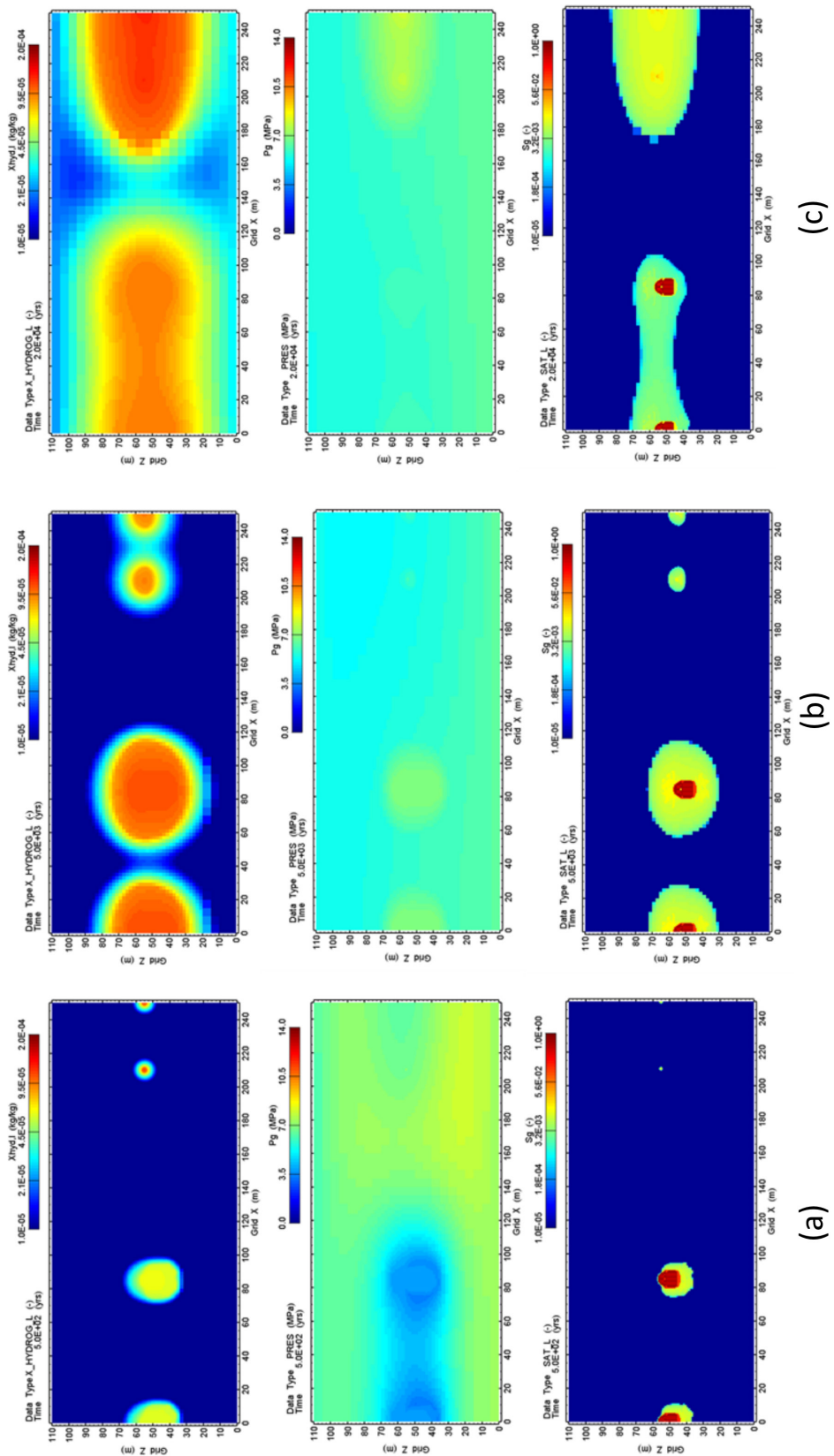


Fig. 4-16: Rechenfall A1: Kontur-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 500 Jahren, (b) nach 5'000 Jahren und (c) nach 20'000 Jahren

Rechenfälle A2, A3 – AUZ Varianten 2&3 (ZNO S_{ref} , S_{min})

In den Rechenfällen A2 und A3 werden repräsentative Varianten der Auflockerungszone für die beiden Spannungsregimes S_{ref} und S_{min} in ZNO implementiert (vgl. Fig. 4-5). Die entsprechenden Permeabilitätsverteilungen sind in Fig. 4-17 (oben und Mitte) dargestellt. Um relevante Aufsättigungseffekte darzustellen, werden diese Rechenfälle anhand von Massenflüssen (Gas, Wasser) im Vergleich mit dem *Base Case* und den Rechenfall A1 diskutiert. Für alle 4 Rechenfälle stellt Fig. 4-17 die zeitliche Entwicklung der Massenflüsse von Gas und Porenwasser an verschiedenen Grenzflächen dar, nämlich (i) am Übergang zwischen dem Wirtgestein und der Auflockerungszone um die HAA-Stollen, (ii) am Übergang zwischen dem Wirtgestein und der Auflockerungszone um die SMA-Kavernen und (iii) im Wirtgestein durch eine senkrechte Fläche zwischen den Lagerteilen HAA und SMA.

Der zeitliche Verlauf der Porenwasserflüsse ist für die verschiedenen Varianten der Auflockerungszone sehr ähnlich. Die in der *Base-Case-Simulation* verwendete homogenisierte Darstellung der Auflockerungszone führt nur zu geringfügigen Unterschieden bezüglich der Porenwasserflüsse in die SMA-Kaverne; generell erscheint die Verwendung einer als homogen angenommenen Auflockerungszone im Hinblick auf die Wasserflüsse gerechtfertigt.

Der zeitliche Verlauf der Gasflüsse zeigt im direkten Umfeld der beiden Lagerteile HAA und SMA deutlich grössere Unterschiede. Insbesondere im Umfeld der SMA-Kavernen scheint im Fall S_{max} die grössere Erstreckung der Auflockerungszone über einen Zeitraum von mehreren hundert Jahren zu verstärkten Gasflüssen ins Wirtgestein zu führen. Zu späteren Zeiten gleichen sich die Gasflüsse der verschiedenen Rechenfälle an. Die Gas- und Porenwasserflüsse zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen zeigen ebenfalls keine deutlichen Unterschiede.

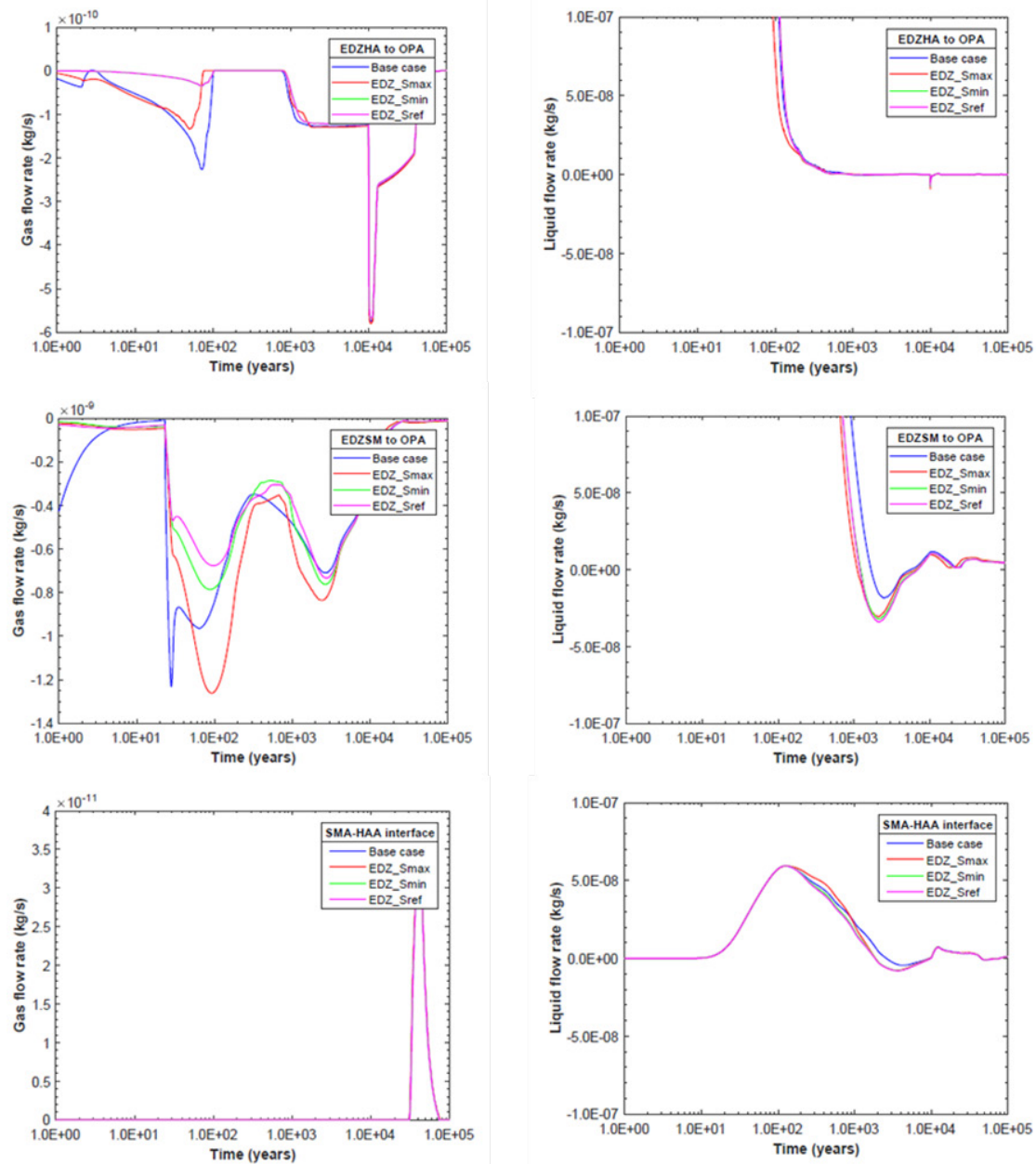


Fig. 4-17: Zeitliche Entwicklung von Gasfluss und Wasserfluss in den Rechenfällen A1, A2, A3 sowie im *Base Case*

Dargestellt sind die Massenflüsse von Gas und Porenwasser an verschiedenen Grenzflächen, nämlich (oben) am Übergang zwischen dem Wirtgestein und der Auflockerungszone um die HAA-Tunnel, (Mitte) am Übergang zwischen dem Wirtgestein und der Auflockerungszone um die SMA-Kaverne und (unten) im Wirtgestein durch eine senkrechte Fläche zwischen den Lagerteilen HAA und SMA.

Wie im Rechenfall A1 bereits festgestellt, hat die Auflockerungszone möglicherweise einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Gasfreisetzung ins Wirtgestein und somit auch auf die Massenflüsse von im Porenwasser gelösten Gaskomponenten (z.B. Wasserstoff). Die zeitlichen Verläufe des Wasserstoffflusses sowie der kumulativen Massenflüsse des im Porenwasser gelösten Wasserstoffs an der Grenze zwischen dem intakten Wirtgestein und der Auflockerungszone um die SMA-Kaverne sind in Fig. 4-18 dargestellt. Der Vergleich zwischen dem *Base Case* und den Rechenfällen A1, A2, und A3 zeigt grundsätzlich ein ähnliches Verhalten. Allerdings zeigt der erhöhte kumulative Massenfluss, dass allenfalls ein Bedarf besteht, die homogenisierte Darstellung der Auflockerungszone zu kalibrieren, um lokale Effekte im SMA-Nahfeld realistischer abzubilden.

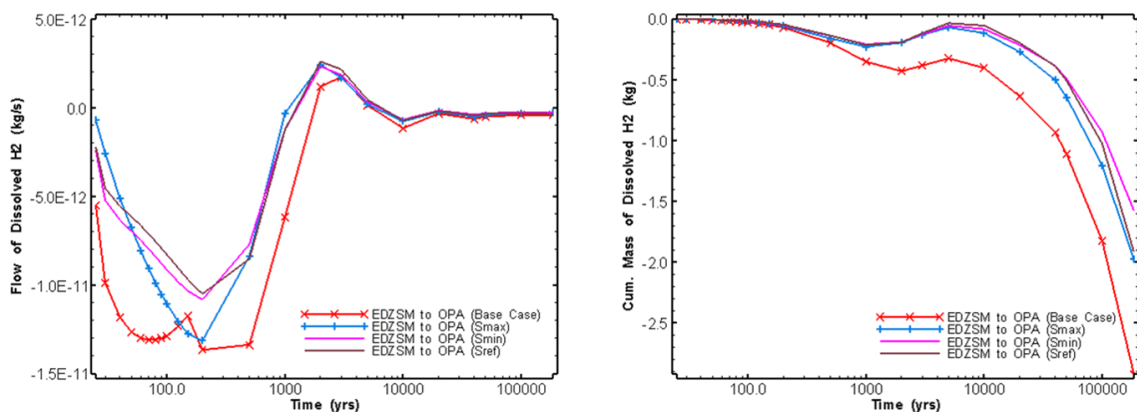


Fig. 4-18: Rechenfälle A1, A2, A3 und *Base Case*: Zeitliche Entwicklung von Massenfluss (links) und kumulativem Massenfluss (rechts) des im Wasser gelösten Wasserstoffs an der Grenzfläche AUZ-SMA zum intakten Wirtgestein

4.4.3 Rechenfälle zur räumlichen Variabilität der Wirtgesteinseigenschaften

Die Rechenfälle zur räumlichen Variabilität der Wirtgesteinseigenschaften werden mit dem semi-generischen 2D-Modell durchgeführt. Es wird ein Rechenfall mit homogenem und anisotropem Wirtgestein durchgeführt (B1) sowie zwei Rechenfälle unter Betrachtung von räumlichen Verteilungen der hydraulischen Eigenschaften des Wirtgesteins (B2 und B3). Bei den heterogenen Permeabilitätsverteilungen wird dabei eine horizontale Korrelationslänge von 50 m (B2), bzw. 5'000 m (B3) angenommen. Dabei entsprechen die Mächtigkeit und das Einfallen des Wirtgesteins den Gegebenheiten im Standortgebiet ZNO. Alle Rechenfälle mit dem semi-generischen 2D-Modell werden unter der Annahme durchgeführt, dass die gesamte Menge an gebildetem Gas nur in das Wirtgestein freigesetzt wird (nicht funktionierendes EGTS).

Rechenfall B1 – Homogenes Wirtgestein mit Mächtigkeit und Einfallen ZNO

Im Rechenfall B1 entsprechen die Wirtgesteinseigenschaften den Referenzwerten des Opalinus-tons für eine Lagertiefe von ca. 600 m u.T. Die aus der numerischen Simulation resultierenden Temperatur-, Druck- und Gassättigungsverteilungen nach 50, 5'000, 20'000 und 100'000 Jahren sind in Fig. 4-19 und 4-20 dargestellt.

Nach 50 Jahren führt der Wärmeeintrag der HAA zur Erhöhung der Temperatur und des Porenwasserdrucks im Umfeld der HAA-Lagerkammern (Fig. 4-19, links). Die thermo-hydraulischen Effekte sind fast identisch mit den entsprechenden Resultaten des *Base Case*. Insbesondere zeigen

die Rechnungen mit dem semi-generischen Modell, dass der Wärmeeintrag der HAA aufgrund der geringen Durchlässigkeit des Wirtgesteins zu keinen nennenswerten Auftriebseffekten im Wirtgestein führt. Auch die Schichtneigung hat keinen Einfluss auf die Ausbreitung der thermohydraulischen Störung um das HAA-Lagerfeld.

Nach 5'000 Jahren zeigt Rechenfall B1 aufgrund der Gasfreisetzung (Fig. 4-19 rechts) einen erheblichen Anstieg des Gasdrucks im SMA-Lager. Der verstärkte Druckaufbau im Vergleich zur *Base-Case-Simulation* ist darauf zurückzuführen, dass in dieser Simulation angenommen wird, dass die Gasabführung ausschliesslich über das Wirtgestein erfolgt (nicht-funktionierendes EGTS). Darüber hinaus zeigt Rechenfall B1, dass die Schichtneigung keinen signifikanten Einfluss auf die Gasausbreitung im Wirtgestein im Umfeld des SMA-Lagerfelds hat. Insbesondere spielen Auftriebseffekte aufgrund der geringen Durchlässigkeit des Wirtgesteins praktisch keine Rolle bei der Gasausbreitung im Wirtgestein.

Auch nach 20'000 Jahren werden im SMA-Lagerteil aufgrund der anhaltenden Gasproduktion noch markant höhere Gasdrücke beobachtet (Fig. 4-20 links). Zudem entwickelt sich eine zusammenhängende Gasphase über den gesamten Bereich der SMA- und HAA-Lagerfelder. Der Druck im äussersten HAA-Lagerstollen ist leicht höher im Vergleich zu den restlichen HAA-Lagerstollen, was möglicherweise auf den Gasfluss aus dem SMA-Lagerteil zurückzuführen ist.

Generell führt die im Rechenfall B1 zugrunde gelegte Annahme eines nicht-funktionierenden EGTS zu einem relativ hohen maximalen Gasdruck im SMA-Lager mit ca. 14 MPa in der SMA-Kaverne im Zentrum des SMA-Lagerfelds. In der dem HAA-Lagerteil nächstgelegenen SMA-Kaverne liegt der maximale Druck nur bei 12.2 MPa. Dieser Unterschied ist allerdings nicht auf den Einfluss des HAA-Lagerteils zurückzuführen, sondern wird auch im SMA-Einzellager beobachtet. Der maximale Gasdruck im äussersten HAA-Lagerstollen liegt über eine längere Zeit um ca. 9 MPa und ist damit ungefähr vergleichbar mit dem maximalen Wert aus der *Base-Case-Simulation* (8.7 MPa). Die maximale Gassättigung im HAA-Lagerstollen nach 30'000 Jahren ist dabei gegenüber dem *Base Case* etwas erhöht (4 % gegenüber 2 % im *Base Case*). Auch beim Vergleich der Gassättigungen nach 100'000 Jahren ist ersichtlich, dass die SMA-Kaverne im Rechenfall B1 weniger schnell aufsättigt als im *Base Case*.

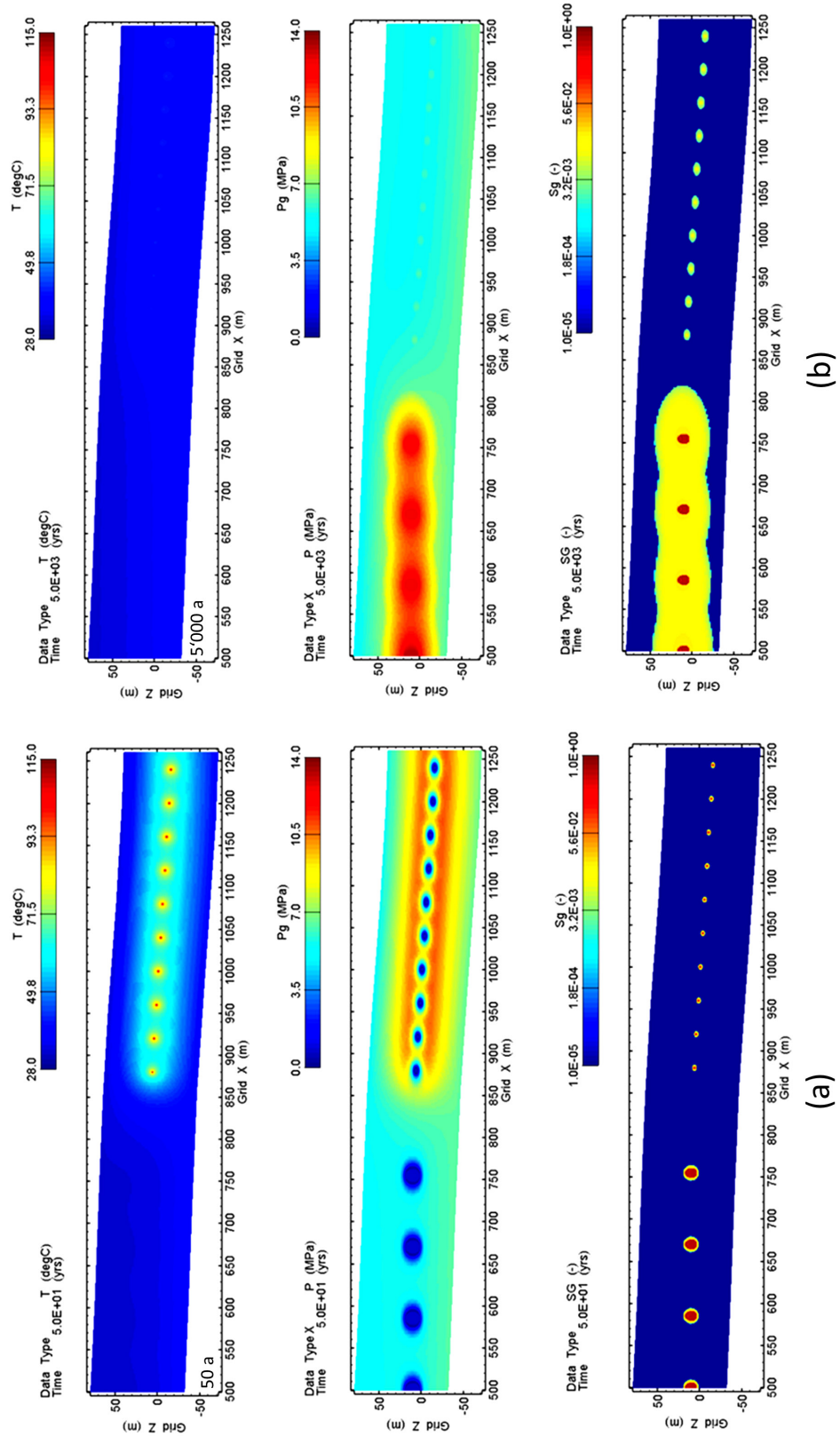


Fig. 4-19: Rechenfall B1: Kontour-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 50 Jahren und (b) nach 5'000 Jahren

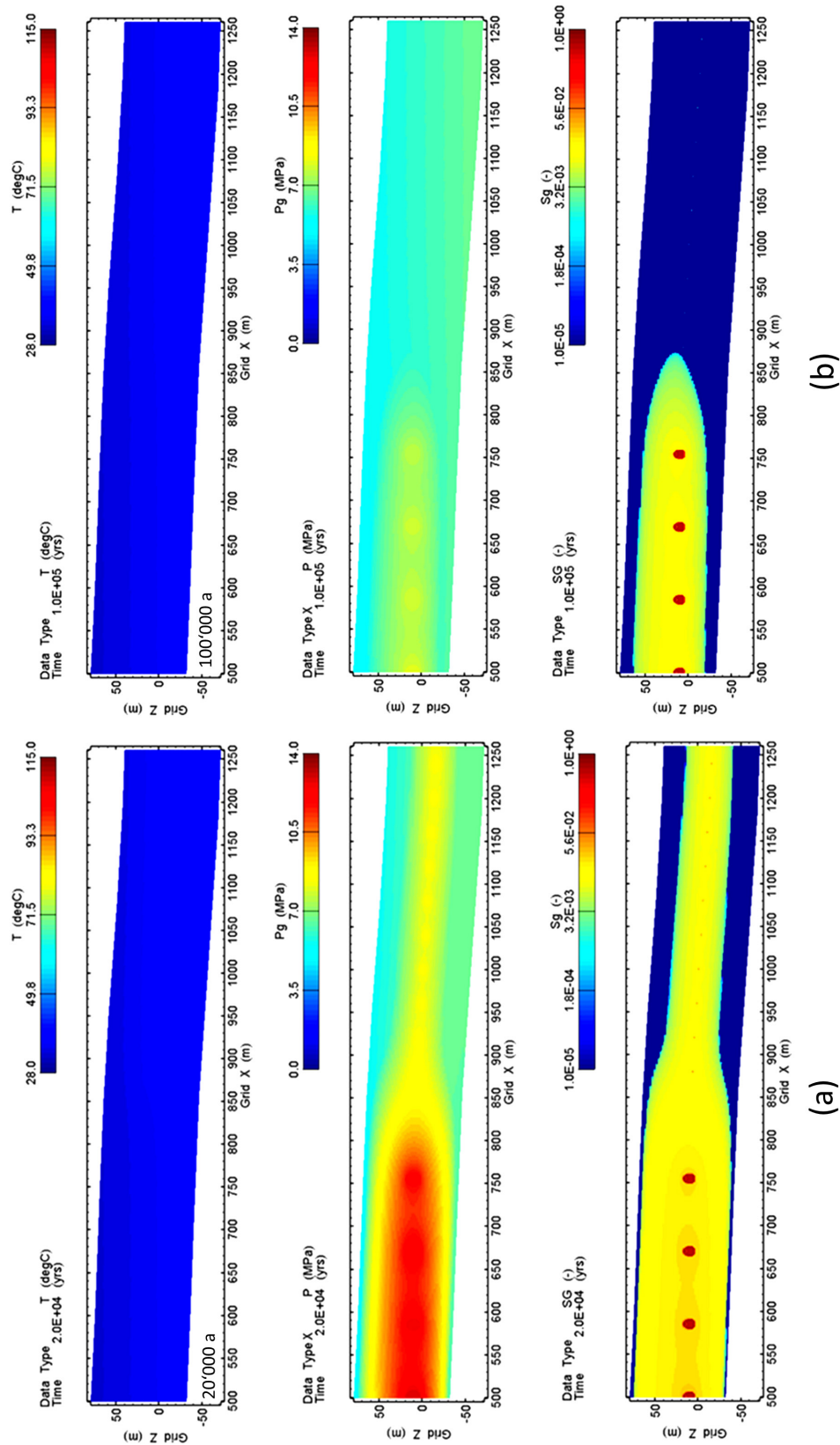


Fig. 4-20: Rechenfall B1: Kontour-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 20'000 Jahren und (b) nach 100'000 Jahren

Rechenfälle B2, B3 – Heterogenes Wirtgestein mit hor. Korrelationslängen 50 m und 5'000 m

Bei den Rechenfällen B2 und B3 werden heterogene Permeabilitätsverteilungen mit horizontalen Korrelationslängen von 50 m bzw. 5'000 m implementiert (vgl. Fig. 4-10). Die resultierenden Temperatur-, Druck- und Gassättigungsverteilungen nach 20'000 Jahren sind jeweils in Fig. 4-21 dargestellt. Gegenüber dem Rechenfall B1 sind die Unterschiede in der räumlichen Ausbreitung der Gasphase gering, so dass auf dem gegebenen Massstab die Annahme einer homogenen (aber anisotropen) intrinsischen Permeabilität gerechtfertigt ist. Durch den Vergleich der zeitlichen Entwicklungen von Druck und Gassättigung an charakteristischen Beobachtungspunkten kann gezeigt werden, dass die Verwendung einer homogenen (aber anisotropen) intrinsischen Permeabilität gerechtfertigt ist.

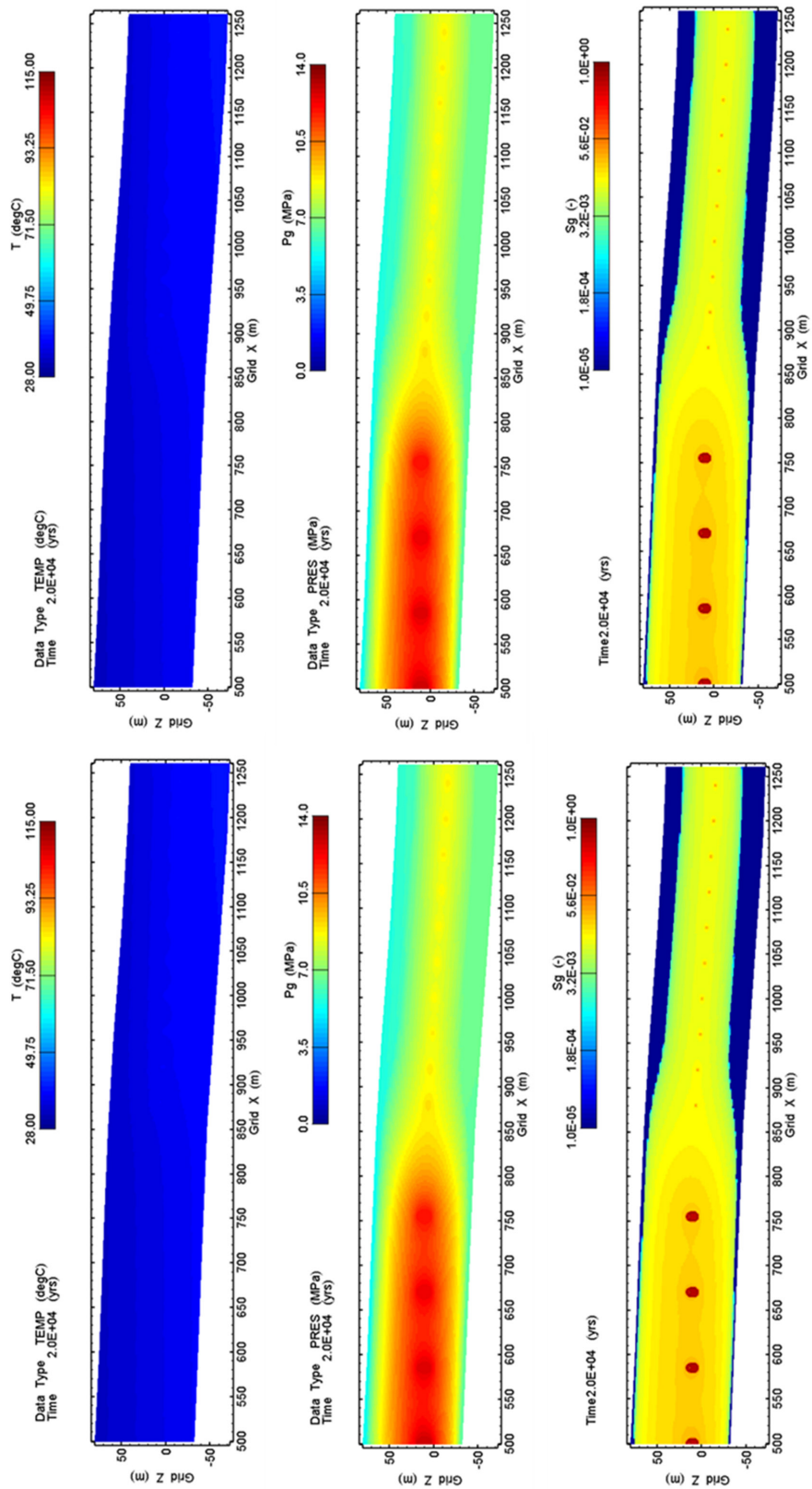


Fig. 4-21: Kontur-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) für Rechenfall B2 und (b) Rechenfall B3 jeweils nach 20'000 Jahren

4.4.4 Rechenfälle zur Gasakkumulation

Die übergeordneten Einflüsse der Gasakkumulation wurden bereits mit den bisher beschriebenen Rechenfällen untersucht. Im Folgenden werden zusätzliche Analysen diskutiert, deren Schwerpunkt auf dem Gastransport entlang der Zugangs- und Verschlussbauwerke liegt. Zwei mit dem semi-generischen 3D-Modell durchgeführte Rechenfälle sind den gasbezogenen Phänomenen und Prozessen in den Zugangsbauwerken gewidmet. Im Rechenfall C2 wird dem Verschlussbauwerk der Rampe (V4) und jenem des Schachts (V3) eine intrinsische Permeabilität von $5.0\text{E-}18 \text{ m}^2$ zugeordnet. Im Rechenfall C3 werden die entsprechenden Permeabilitäten um mehr als eine Grössenordnung auf $1.0\text{E-}16 \text{ m}^2$ erhöht.

Rechenfall C2 – Dichte-Effekte in den Zugangs- und Verschlussbauwerken

Die für den Rechenfall C2 berechneten Temperatur-, Druck-, und Gassättigungsverteilungen nach 100, 500, 5'000, 20'000 und 100'000 Jahren sind in Fig. 4-22 abgebildet. Die Kontur-Plots stellen die modellierten Zustandsgrössen auf dem Niveau der jeweiligen Lagerebene etwa im unteren Teil der Bauwerke dar.

Nach 100 Jahren treten im HAA-Lagerteil Temperaturen von maximal 100°C auf (Fig. 4-22a, oben), verbunden mit einem Druckaufbau im umliegenden Wirtgestein (Fig. 4-27a, Mitte). Infolge der vorausgehenden Ventilationsphase und des grossen Porenvolumens der Verfüllungen (Annahme: initiale Sättigung 50 %, vgl. Tab. 4-1) liegt der Druck in den restlichen Zugangs- und Verschlussbauwerken noch deutlich unterhalb des hydrostatischen Drucks. Die Gasakkumulation führt zusammen mit der voranschreitenden Aufsättigung aufgrund des Porenwasserzuflusses aus dem Wirtgestein zu einem stetigen Druckanstieg in den Bauwerken, bis schliesslich das hydrostatische Niveau nach ca. 5'000 Jahren erreicht wird (Fig. 4-22c, Mitte). Gleichzeitig akkumuliert das Gas in den SMA- und HAA-Lagerkammern und dem umliegenden Wirtgestein, was in den beiden Lagerfeldern zu einer erhöhten Gassättigung führt (Fig. 4-22a–c, unten). Die zeitliche Entwicklung der Gassättigung verläuft in den beiden Lagerteilen aufgrund der höheren Gasquellterme im SMA-Lagerteil unterschiedlich. Während die Gassättigung in den Kavernen und den Zugangsbauwerken des SMA-Lagerteils von Beginn der Nachbetriebsphase an relativ hoch bleibt (ca. 50 – 60 %) bleibt und somit eine hohe Gastransportkapazität des EGTS sicherstellt, ist in den Zugangsbauwerken des HAA-Lagerteils bis in ca. 1'000 Jahren eine zunehmende Aufsättigung zu beobachten. In den HAA-Lagerkammern baut sich nach 20'000 Jahren ein markanter Gasdruck auf (Fig. 4-2 d). Die Gasfreisetzung erfolgt über das Wirtgestein sowie durch das EGTS, da die Zugangs- und Verschlussbauwerke des HAA-Lagers selbst nach 50'000 Jahren nur teilweise wassergesättigt sind und daher eine genügende effektive Gaspermeabilität besitzen (Fig. 4-22e, unten).

Detaillierte Vertikalschnitte mit Druck- und Sättigungsverteilung entlang des SMA-Betriebstunnels nach 200, 3'000 und 5'000 Jahren sind in Fig. 4-23 dargestellt. Sie zeigen eine relativ konstante Gassättigung entlang des Betriebstunnels, wohingegen der Gasdruck vom V2-Siegel hin zur äussersten SMA-Kaverne leicht ansteigt. Die Druckdifferenz zwischen den V2-Siegeln und dem Abzweiger zur äussersten SMA-Kaverne variiert zeitlich zwischen 0.1 und 0.5 MPa und ist darüber hinaus abhängig von den Zweiphasenparametern des Verfüllmaterials (vgl. auch Rechenfall C3).

Analog ist in Fig. 4-24 die Sättigungsverteilung entlang des HAA-Betriebstunnels nach 10'000, 20'000, 40'000 und 50'000 Jahren dargestellt. Diese zeigt eine relativ gleichmässige Sättigung entlang des Tunnels aufgrund des Zuflusses von Gas aus den HAA-Lagerkammern. Wie für das Sättigungsverhalten im SMA-Betriebstunnel gilt auch für den HAA-Betriebstunnel, dass die Modellergebnisse bezüglich der Permeabilität und den Zweiphasenparametern des Verfüllmaterials (vgl. auch Rechenfall C3) sensitiv sind.

Die Druck- und Sättigungsverteilung entlang des Zugangstunnels nach 1'000 und 20'000 Jahren ist in Fig. 4-25 dargestellt. Aufgrund der Randbedingung an der Zugangsrampe im obersten Teil des Wirtgesteins (hydrostatische Bedingungen) nimmt nach 1'000 Jahren die Wassersättigung innerhalb des Zugangstunnels vom zentralen Bereich in Richtung zum V4-Siegel zu. Die Wassersättigung innerhalb des Zugangstunnels erreicht schliesslich 100 % im höheren Teil des Tunnels und beträgt ca. 40 % im zentralen Bereich. Der Druck entlang des Zugangstunnels (d.h. in axialer Richtung) ist relativ homogen. Nach 20'000 Jahren nimmt die Gassättigung im Zugangstunnel aufgrund des Zuflusses von Gas aus den Verschlussbauwerken des HAA-Lagerteils zu. Die Gassättigung in axialer Richtung entlang des Zugangstunnels ist relativ homogen, zeigt aber innerhalb des Tunnelquerschnitts eine gravitative Differenzierung um ca. 2 Grössenordnungen.

Die Entwicklung von Druck und Gassättigung innerhalb des HAA-Lagerteils in den ersten 1'000 Jahren zeigt, dass sich die Höchstwerte der Zustandsgrössen je nach Position im Lager unterscheiden können. Die Aufsättigung der HAA-Lagerkammern erfolgt nach ca. 200 Jahren, während die Zeitdauer zur Aufsättigung der V5-Siegel zwischen ca. 500 und 700 Jahre beträgt. Die Gassättigung der verschiedenen Untertagebauwerke des HAA-Lagerteils am Ende des Modellierzeitraums variiert erheblich zwischen ca. 0 % und 60 %.

Die zeitlichen Entwicklungen von Druck und Gassättigung im SMA-Lagerteil zeigen einen relativ gleichmässigen Druckaufbau in den SMA-Lagerkammern. Die Lagerkammern, das V5-Siegel und der Abzweiger werden ebenfalls gleichmässig aufgesättigt.

Die Entwicklung von Druck und Sättigung in den verfüllten Zugangs- und Betriebsbauwerken wird durch den Zufluss von Porenwasser aus dem Wirtgestein und durch die Gasfreisetzung kontrolliert. In den Betriebs- und Bautunneln der beiden Lagerteile existiert über einen Zeitraum von mehr als 100'000 Jahren eine freie Gasphase. Hingegen wird der Zugangstunnel in der Nähe des V4-Siegels zwischen ca. 100 und 3'000 Jahren vollständig aufgesättigt.

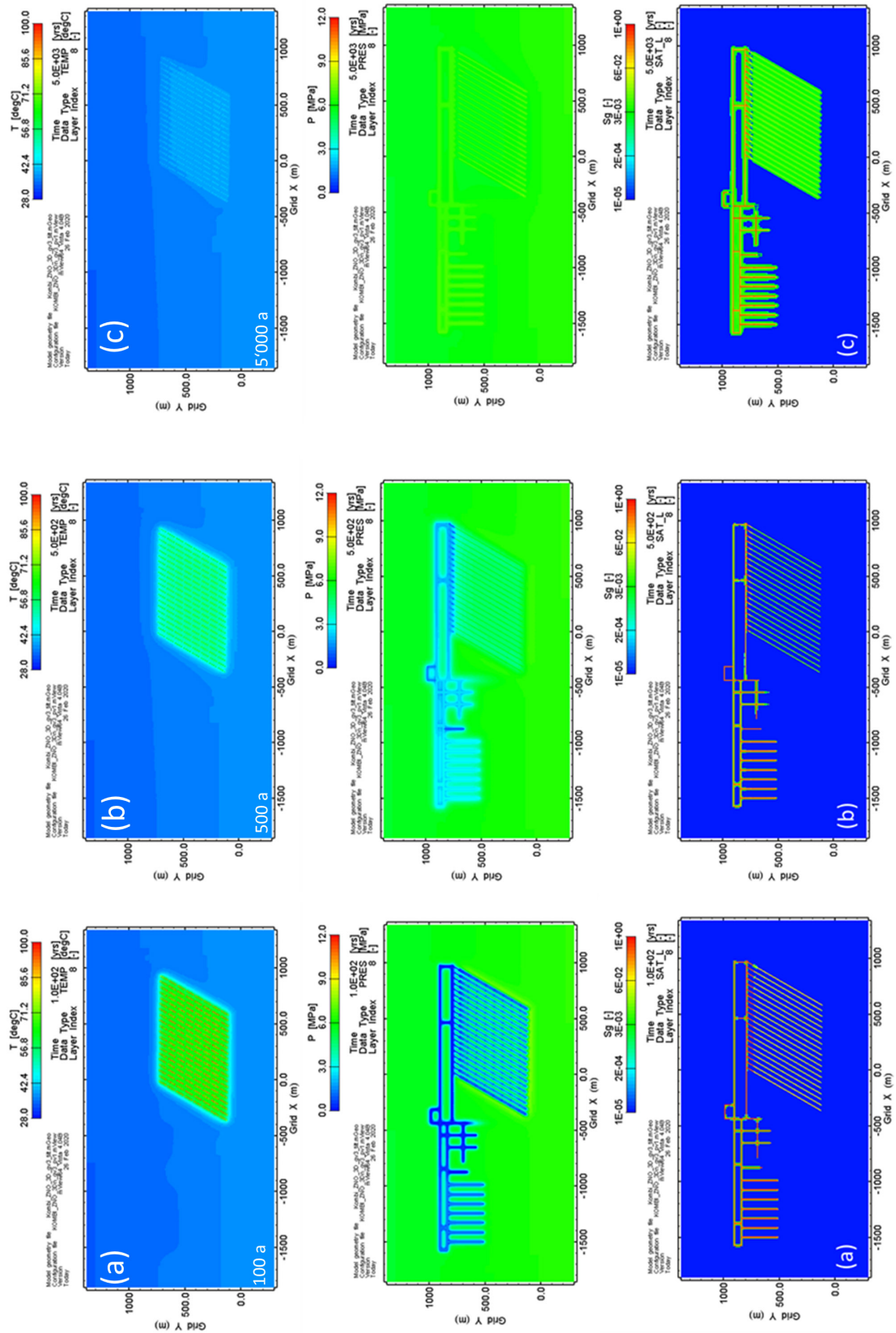


Fig. 4-22: Rechenfall C2: Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 100 Jahren, (b) 500 Jahren und (c) nach 5'000 Jahren

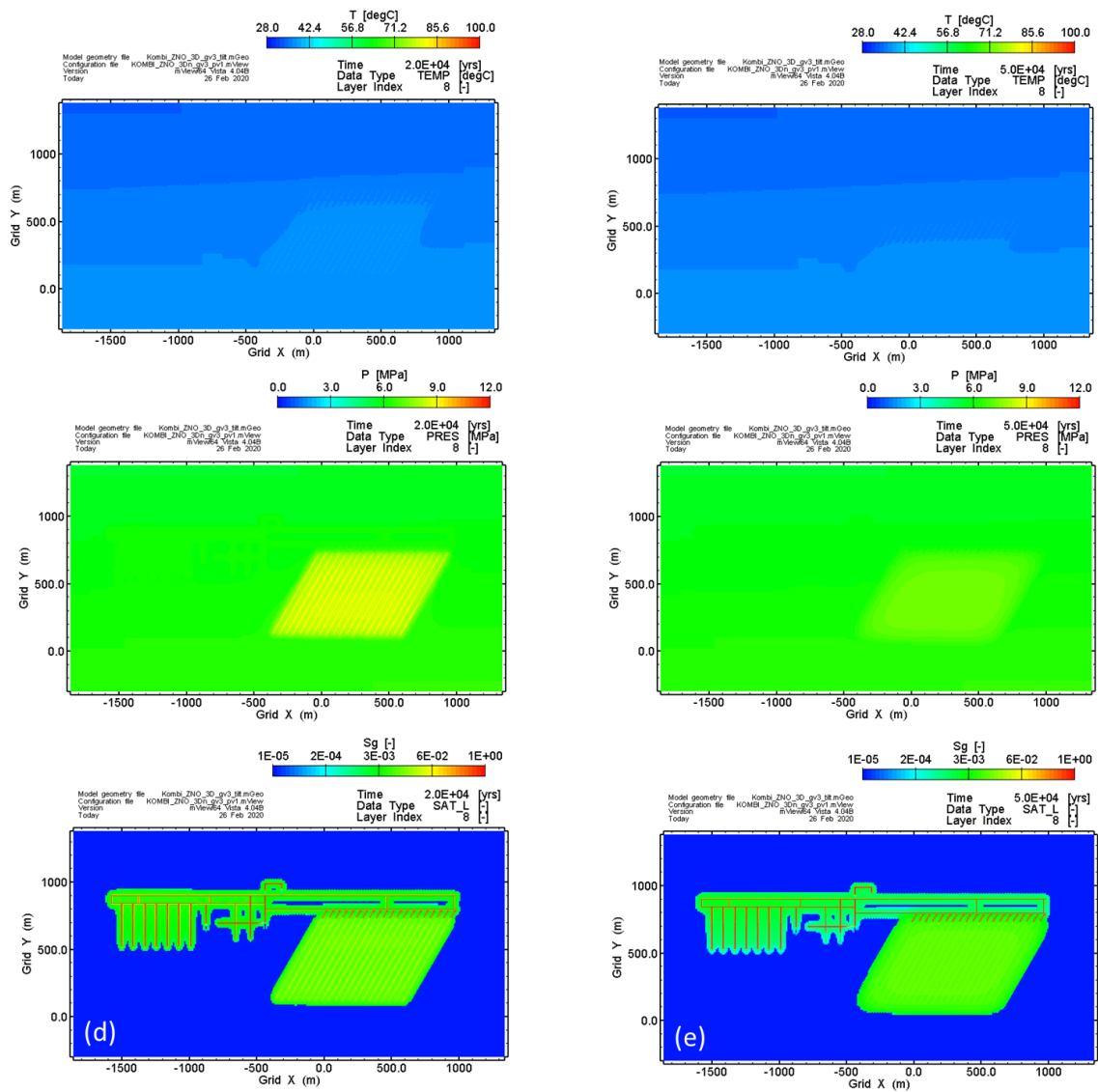


Fig. 4-22: Fortsetzung - (d) nach 20'000 Jahren und (e) nach 50'000 Jahren

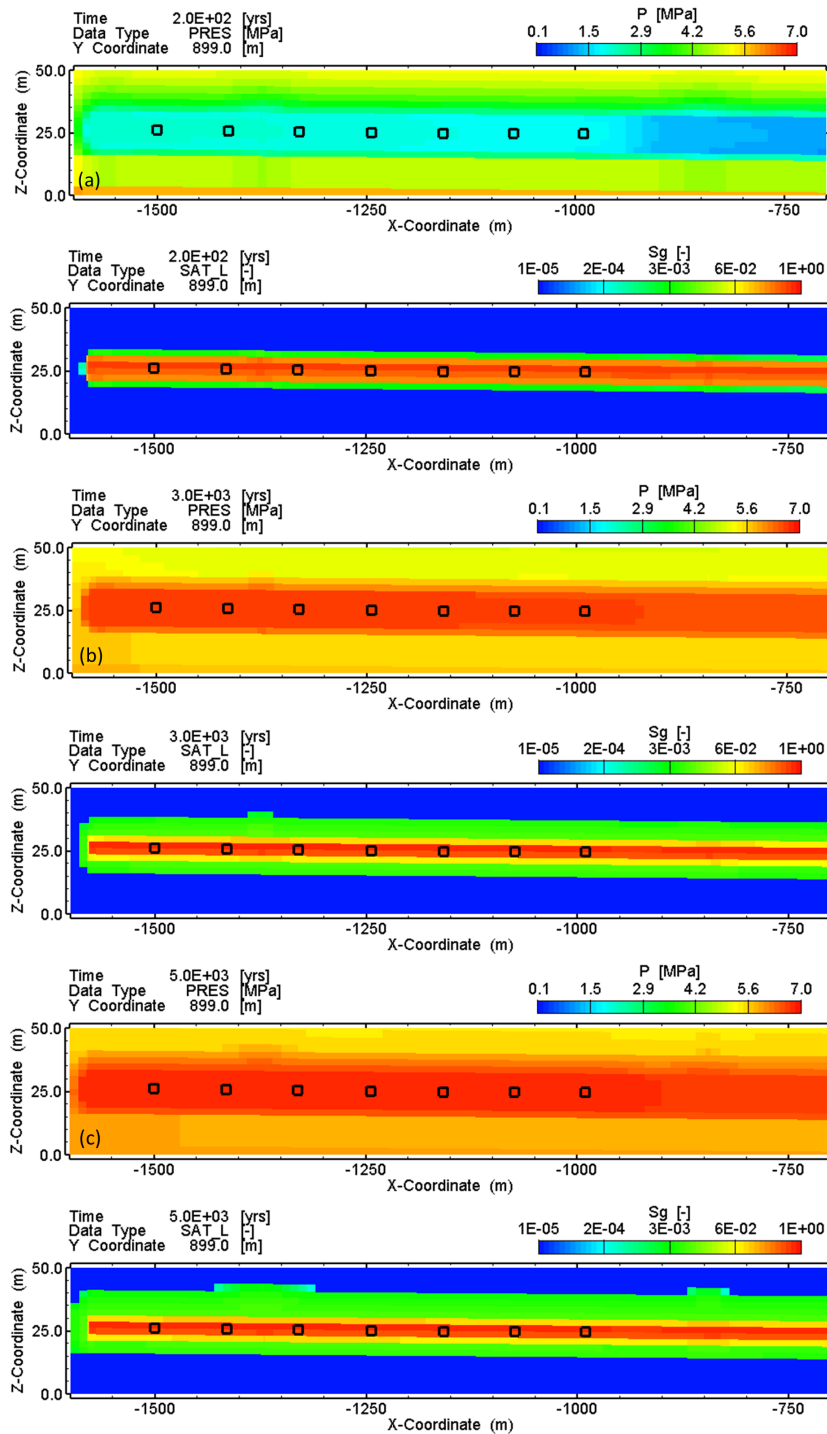


Fig. 4-23: Rechenfall C2 – Kontur-Darstellungen von Druck und Gassättigung im Umfeld des SMA-Betriebstunnels (a) nach 200 Jahren, (b) nach 3'000 Jahren und (c) nach 5'000 Jahren

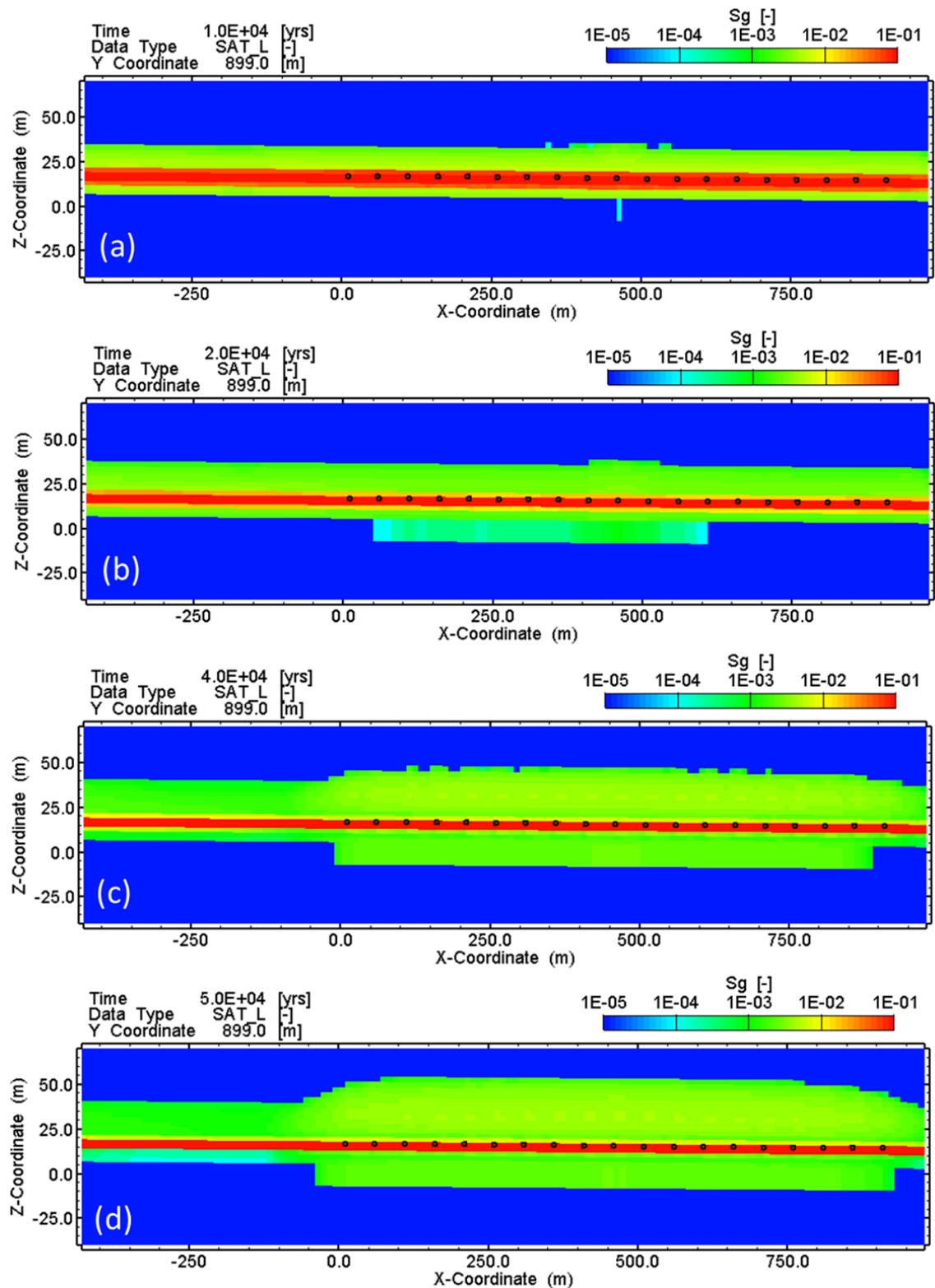


Fig. 4-24: Rechenfall C2 – Kontur-Darstellungen der Gassättigung im Umfeld des HAA-Betriebstunnels (a) nach 10'000 Jahren, (b) nach 20'000 Jahren, (c) nach 40'000 Jahren und (d) nach 50'000 Jahren

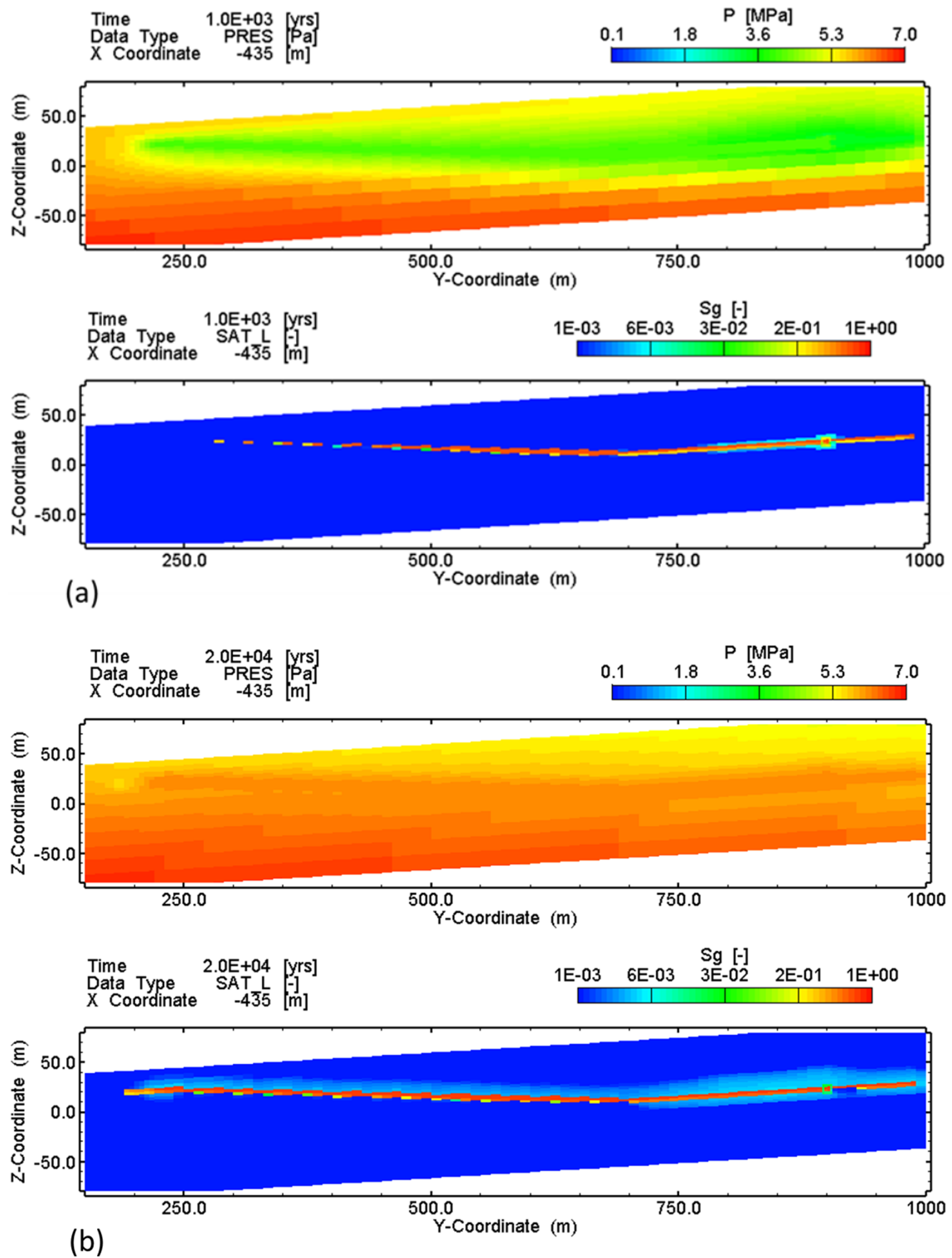


Fig. 4-25: Rechenfall C2 – Kontur-Darstellungen von Drucks und Gassättigung im Umfeld des Zugangstunnels (a) nach 5'000 Jahren und (b) nach 20'000 Jahren

Platzierung der Verschlussbauwerke und Siegel gemäss Fig. 4-11.

Rechenfall C3 – Durchlässige Siegel

Im Rechenfall C3 werden die Versiegelungsbauwerke des Kombilagers als vergleichsweise durchlässig angenommen. In Fig. 4-26 sind die berechneten Druck- und Gassättigungsverteilungen nach 5'000 und 40'000 Jahren dargestellt. Die Konturplots zeigen die betrachteten Zustandsgrößen auf Lagerniveau (unterer Teil der verfüllten Lagerbauwerke).

Im Vergleich zu Rechenfall C2 sind die Gasdrücke nach 5'000 Jahren im SMA-Lagerteil aufgrund des hochdurchlässigen Lagersiegels am Übergang zu den oberen Rahmengesteinen deutlich niedriger. Die Zugangs- und Betriebsbauwerke sind nach 40'000 Jahren teilweise aufgesättigt. Ausserdem ist zu erkennen, dass die SMA-Lagerkammern im Vergleich zu Rechenfall C2 viel schneller mit Porenwasser aufsättigen, während die Resultate für die HAA-Lagerkammern aufgrund der geringdurchlässigen V1-Siegel vergleichbar sind.

Fig. 4-27 stellt eine detaillierte Ansicht der Druck- und Gassättigungsverteilung entlang des SMA-Betriebstunnels nach 5'000 und 40'000 Jahren dar. Die Unterschiede entlang des Tunnels sind generell gering und betragen maximal ca. 0.2 MPa. Die Sättigungsverteilung im Betriebs-tunnel zeigt eine ausgeprägte Schichtung mit hoher Wassersättigung im unteren Teil des Tunnel-querschnitts und einer durchgängigen Zone hoher Gassättigung im oberen Teil des Betriebs-tunnel. Hierdurch wird eine effiziente Abführung der in den SMA-Lagerkammern gebildeten Korrosions- und Degradationsgase ermöglicht.

Die Sättigungsverteilung entlang des HAA-Betriebstunnels nach 10'000, 20'000, 40'000 und 50'000 Jahren ist in Fig. 4-28 dargestellt. Es ergibt sich eine relativ gleichmässige Sättigung entlang des Tunnels nach 10'000 Jahren; dies ändert sich allerdings zu späteren Zeiten aufgrund des Zuflusses von Gas aus den HAA-Lagerkammern. Nach '000 Jahren ist die Gassättigung an den Verzweigungen zu den zentralen und äusseren HAA-Lagerstollen um ca. eine Grössenordnung höher als im Bereich des HAA-Lagerfeldsiegels, d.h., der Betriebstunnel ist in diesem Bereich praktisch voll wassergesättigt. Generell nimmt die Gassättigung im HAA-Betriebstunnel mit zunehmender Entfernung zum Lagerfeldsiegel V2 ab, wobei eine zunehmende Differenzierung der Gassättigung entlang der Tunnelachse zu beobachten ist. Nach 40'000 und 50'000 Jahren ist die Gassättigung im zentralen Teil des HAA-Betriebstunnels weiterhin ca. eine Grössenordnung höher als im Bereich des HAA-Lagerfeldsiegels.

Die Druck- und Sättigungsverteilung entlang des Zugangstunnels nach 1'000 und 20'000 Jahren entwickelt sich gegenüber Rechenfall C2 erwartungsgemäss (Fig. 4-29): Aufgrund der erhöhten Durchlässigkeit des Lagersiegels V4 nimmt die Gassättigung innerhalb des Zugangstunnels vom zentralen Bereich in Richtung Siegel ab. Der Zugangstunnel wird nach 1'000 Jahren durch den Zufluss von Porenwasser über das V4-Siegel vollständig aufgesättigt. Nach 20'000 Jahren nimmt die Gassättigung im Zugangstunnel aufgrund des Zuflusses von Gas aus dem HAA-Lagerteil ähnlich zum Rechenfall C2 zu.

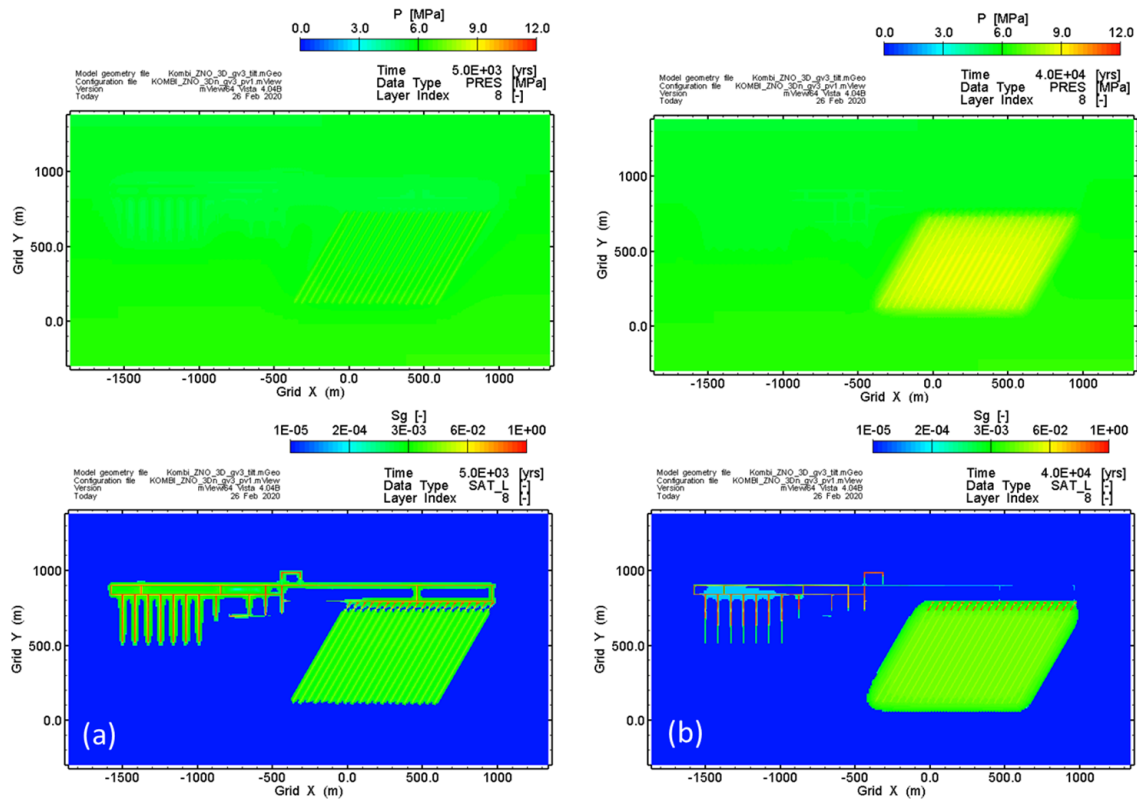


Fig. 4-26: Rechenfall C3 – Druck und Gassättigung auf Lagerebene (a) nach 5'000 Jahren, (b) 40'000 Jahren

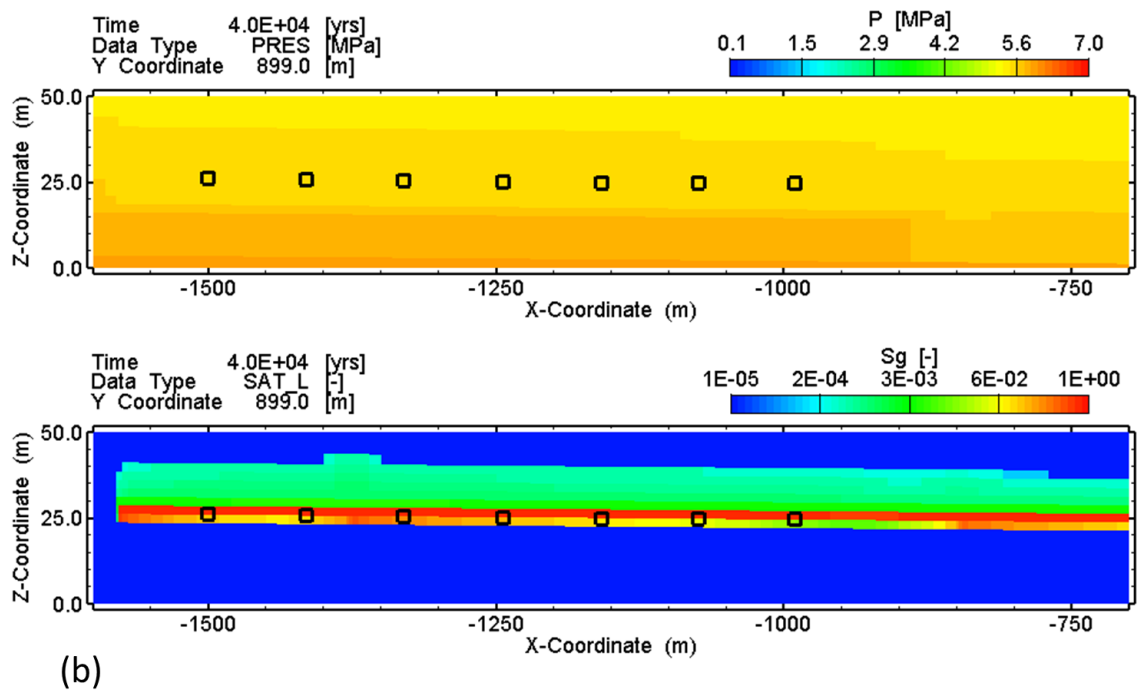


Fig. 4-27: Rechenfall C3 – Kontur-Darstellungen von Druck und Gassättigung im Umfeld des SMA-Betriebstunnels nach 5'000 Jahren.

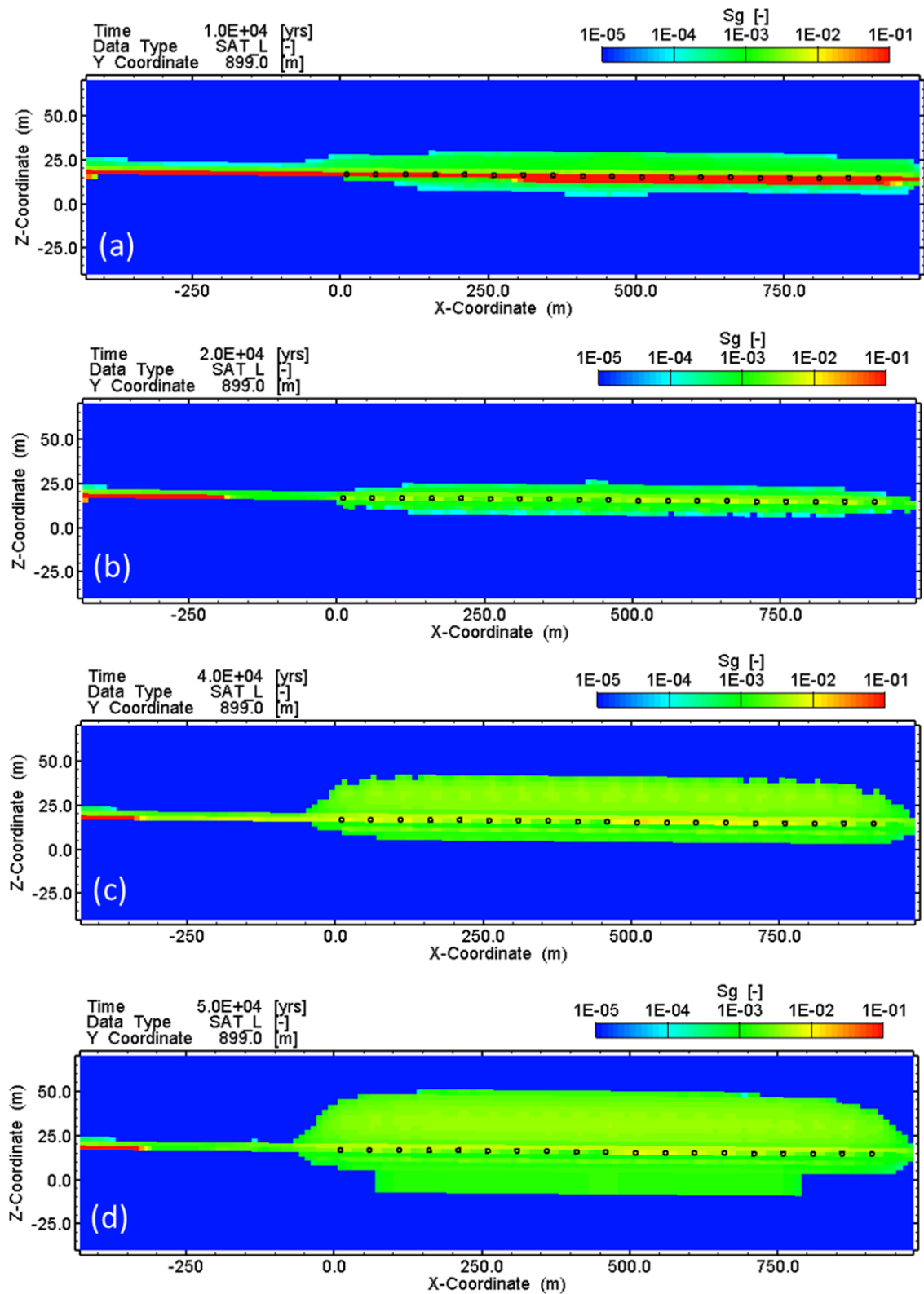


Fig. 4-28: Rechenfall C3 – Kontur-Darstellungen der Gassättigung im Umfeld des HAA-Betriebstunnels (a) nach 10'000 Jahren, (b) nach 20'000 Jahren, (c) nach 40'000 Jahren und (d) nach 50'000 Jahren

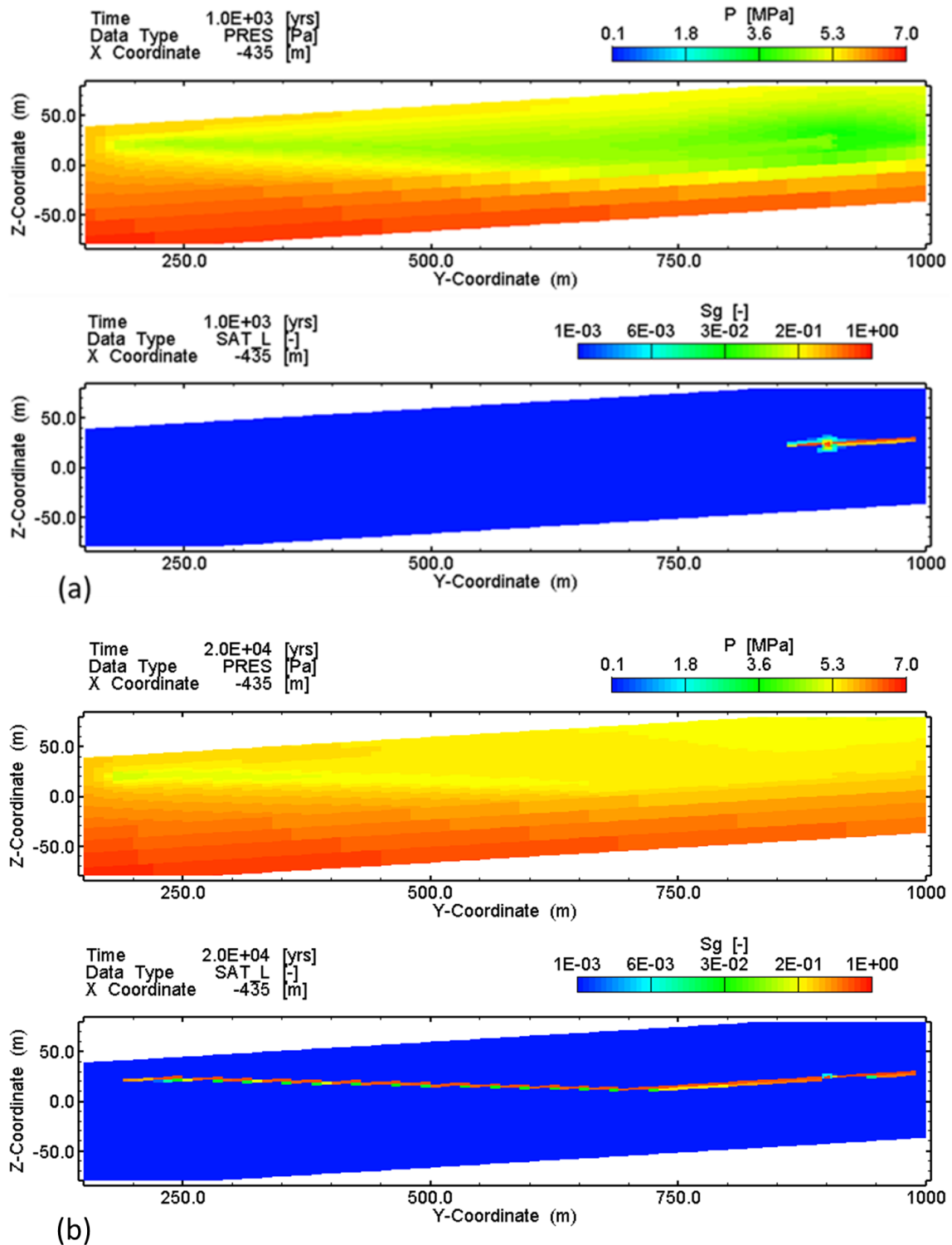


Fig. 4-29: Rechenfall C3 – Kontur-Darstellungen von Druck und Gassättigung im Umfeld des Zugangstunnels nach (a) 1'000 Jahren und (b) 20'000 Jahren

4.4.5 Rechenfälle zum Wärmeeintrag

Die sicherheitsrelevanten Einflüsse des von den hochaktiven Abfällen verursachten Wärmeeintrags beschränkten sich auf einen Zeitraum von mehreren tausend Jahren nach Lagerverschluss. In diesem Zeitfenster kann die Systemanalyse mit den generischen 2D-Modellen durchgeführt werden, da insbesondere die Schichtneigung noch keinen wesentlichen Einfluss auf die Porenwasserbewegung im Lagerumfeld hat (z.B. thermisch bedingte Dichteströmungen). Zu beachten ist allerdings, dass mit der 2D-Modellgeometrie (Annahme einer unendlich ausgedehnten thermischen Linienquelle) der totale Wärmeeintrag gegenüber dem 3D-Modell mit einer endlichen Länge der HAA-Lagerstollen überschätzt wird. Im 2D-Modell kann diesem Effekt durch eine entsprechende Reduzierung des thermischen Quellterms Rechnung getragen werden (vgl. Kapitel 5.2.3, Skalierung des thermischen Quellterms).

Rechenfall D1 – Kein Wärmeeintrag durch HAA

Im Rechenfall D1 wird die thermo-hydraulische Entwicklung des Lagerumfelds ohne den Wärmeeintrag durch die hochaktiven Abfälle simuliert, um diesen Effekt von anderen Einflüssen zu separieren (z.B. Einfluss der Tunnelventilation). Während der Ventilation der SMA-Lagerkammern über einen Zeitraum von 23 Jahren sinkt die Temperatur im umliegenden Wirtgestein ab. Im Vergleich zum *Base Case* sind während dieser Zeit praktisch keine Unterschiede zu erkennen. Allerdings steigt im Rechenfall D1 die Temperatur nach Lagerverschluss nur bis zum thermischen Gleichgewichtszustand, der sich entsprechend dem geothermischen Gradienten auf Lagerebene bei ca. 36 °C einstellt. Der zeitliche Verlauf der Gassättigung in den SMA-Kavernen ist vergleichbar mit den Ergebnissen der *Base-Case* Simulation. Dort erfolgt die Aufsättigung der HAA-Lagerstollen jedoch schneller, was auf die thermisch-induzierten Überdrücke im umliegenden Wirtgestein, die Erniedrigung der Viskosität und den daraus resultierenden erhöhten Porenwasserfluss in die verfüllten Lagerbauwerke zurückzuführen ist. Die Drainagewirkung der ventilierten Untertagebauwerke ist im Rechenfall D1 ausgeprägter, sodass der Porenwasserdruck im Opalinuston zwischen den HAA-Lagerkammern im Rechenfall D1 bis auf ca. 1.5 MPa abfällt. Der anschliessende Druckaufbau infolge der Gasproduktion bleibt in beiden Lagerteilen des Kombilagers im Vergleich zur *Base-Case*-Simulation unverändert.

Rechenfall D2 – Reduzierte Wärmeleitfähigkeit in OPA, UCU, LCU

Der Wärmetransport durch das Gebirge wird stark von der Wärmeleitfähigkeit der umgebenden Gesteine beeinflusst. Die Wärmeleitfähigkeiten des Wirtgesteins und der Rahmengesteine unterscheiden sich je nach mineralogischer Zusammensetzung und lithologischem Aufbau markant. In der Bewertung der Auswirkungen des Wärmeeintrags auf die Barrierensysteme des Tiefenlagers stellt die erwartete Bandbreite der thermischen Gesteinseigenschaften daher eine erhebliche Ungewissheit dar. In der *Base-Case*-Simulation werden für den Opalinuston und die Formationen des Oberen Doggers und der Lias-Keuper-Abfolge die in der Etappe 2 verwendeten Referenzwerte für Standort ZNO zugeordnet (Opalinuston: 1.55 W/m K; Passwang-Formation/Brauner Dogger: 2.0 W/m K; Lias-Keuper: 2.14 W/m K; siehe auch Papafiotiou & Senger 2013a, 2013b, 2013c). Im Rechenfall D2 wird die Wärmeleitfähigkeit der entsprechenden Gesteine einheitlich auf 1.30 W/m K reduziert. Alle Rechnungen werden unter der Annahme durchgeführt, dass die Wärmeleitfähigkeit isotrop ist.

Analog zum *Base Case* (Fig. 4-14) wurden die zeitlichen Entwicklungen von Temperatur, Druck und Gassättigung berechnet. Am HAA-Behälter beträgt die maximale Temperatur ca. 138 °C nach 10 Jahren (132 °C nach 8 Jahren im *Base Case*). Auch in der Mitte der Bentonitverfüllung zwischen HAA-Behälter und Tunnelwand werden geringfügig höhere Maximalwerte berechnet

(ca. 122 °C gegenüber 118 °C im *Base Case*). Die maximalen Temperaturen im Wirtgestein (auf Lagerebene zwischen benachbarten HAA-Tunneln sowie in einem Abstand von m oberhalb der HAA-Lagerkammern) sind im Vergleich zur *Base-Case-Simulation* ebenfalls um ca. 2 – 3 °C höher. Hingegen sind in den SMA-Kavernen praktisch keine Unterschiede in der Maximaltemperatur zu erkennen, und auch der zeitliche Verlauf der Gassättigung weist gegenüber dem *Base Case* keine signifikanten Abweichungen auf. Gleiches gilt auch für die Aufsättigung des HAA-Lagerfelds. Der maximale Porenwasserdruck im Wirtgestein infolge des Wärmeeintrags der hochaktiven Abfälle wird nach 90 Jahren erreicht und beträgt ca. 10.7 MPa (im Vergleich zu 10 MPa nach 80 Jahren im *Base Case*). Aufgrund des reduzierten Wärmetransports durch das Gebirge nehmen die Überdrücke im Rechenfall D2 auch innerhalb der HAA-Lagerstollen zu und erreichen somit ca. 7.8 MPa nach 140 Jahren. Der maximale Druck aufgrund der Gasfreisetzung bleibt in beiden Lagertypen im Vergleich zur *Base-Case-Simulation* vergleichbar.

4.4.6 Probabilistische Simulationen

Die Ergebnisse der gezeigten deterministischen Rechenfälle machen deutlich, dass die thermo-hydraulischen Parameter des Wirtgesteins und der Verfüllmaterialien massgeblichen Einfluss auf die Gasfreisetzung und den Wärmetransport im Umfeld des Kombilagers haben. Demzufolge werden Prognosen zu den erwarteten Auswirkungen der Gas- und Wärmefreisetzung auf die Sicherheitsfunktionen der technischen und geologischen Barrieren des Lagersystems erheblich von den Bandbreiten der im numerischen Modell abgebildeten thermo-hydraulischen Parameter bestimmt. Um die Ungewissheit zum Systemverhalten der einzelnen Lagerkomponenten sowie des Gesamtsystems abzuschätzen, werden üblicherweise probabilistische Verfahren eingesetzt. Beispielsweise kann mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen das Spektrum der Modellprognosen für die Bandbreiten der relevanten Parameter systematisch quantifiziert werden. Die Zuweisung der Eingabeparameter erfolgt dabei meist mittels statistischer Verteilungsfunktionen auf der Grundlage experimenteller Untersuchungen auf dem Labor- oder In-situ Massstab. Eine mögliche gegenseitige Abhängigkeit der Parameter und die diesbezüglich Ungewissheit wird dabei jedoch zur Vereinfachung nicht berücksichtigt.

Um das Spektrum der erwarteten Druck-, Sättigungs- und Temperaturentwicklung im Umfeld des Kombilagers für die bestehenden Parameterungewissheiten quantitativ abzuschätzen, werden vier Serien von Monte-Carlo-Simulationen MC1 – MC4 implementiert. Die MC-Simulationen erfolgen jeweils mit dem generischen 2D-Modell. Die verwendeten Verteilungen der thermo-hydraulischen Parameter sind identisch mit den Verteilungen aus Papafiotiou et al. (2017a, 2017b; vgl. auch Anhang B). Die Rechenfall-Serie MC1 besteht aus 100 Simulationen und wird analog zur *Base-Case-Simulation* durchgeführt, indem die thermo-hydraulischen Parameter des Gebirges und der Verfüllmaterialien um die jeweiligen Referenzwerte variiert werden. Dabei wird von einem funktionierenden EGTS ausgegangen, welches einen Grossteil des in den Einlagerungsräumen produzierten Gases entlang der verfüllten Untertagebauwerke abführt ("*skalierter Quellterm*"; vgl. Kapitel 4.2.4). Für die Rechenfall-Serie MC2 wird die Annahme getroffen, dass 50 % der Gasfreisetzung im SMA-Lagerteil entlang des EGTS erfolgen; dies entspricht einer reduzierten Abführung des Gases entlang der verfüllten Untertagebauwerke und somit einer verstärkten Gasfreisetzung über das Wirtgestein. In der Rechenfall-Serie MC3 wird nur der HAA-Lagerteil betrachtet, indem die SMA-Kavernen mit Opalinuston ersetzt werden und die entsprechende Gasproduktion aus den SMA ausgeschaltet wird. Analog wird in der Rechenfall-Serie MC4 nur der SMA-Lagerteil betrachtet, indem die HAA-Lagerkammern durch Opalinuston ersetzt werden und die entsprechende Gas- und Wärmeproduktion ausgeschaltet wird.

Der zeitliche Verlauf des Drucks an drei Lokationen im vertikal-ebenen 2D-Modell, nämlich im unteren Teil der SMA-Kaverne, direkt am HAA-Behälter, und im Opalinuston in der Mitte zwischen den beiden zwei Lagern auf Lagerebene, ist für die Rechenfall-Serien MC1, MC2, MC3, und MC4 in Fig. 4-30 dargestellt. In den Rechenfall-Serien MC1 und MC4 variiert der maximale Druck in der SMA-Kaverne nach 8'000 Jahren zwischen ca. 6.5 und 8.5 MPa (Fig. 4-30 oben); die Druckunterschiede werden durch die Unterschiede in den hydraulischen Parametern von Wirtgestein und Verfüllmaterialien verursacht. In der Serie MC4 ist der Druckaufbau im Vergleich zur Serie MC1 am Ende der Ventilationsphase leicht erhöht. Noch stärker variieren die Drücke in der Serie MC2 wegen der höheren Gasfreisetzungsrates in das Wirtgestein mit Maximalwerten bis 13 MPa. In der Serie MC3 ("kein SMA-Lagerteil") wird an der gleichen Lokation (Fig. 4-30, oben) der maximale Porenwasserdruck nach ca. 500 Jahren beobachtet. Er liegt ca. 1.5 MPa über dem hydrostatischen Druck und wird durch den Wärmeeintrag der HAA verursacht. Analog verhalten sich die Drücke im Opalinuston zwischen den SMA- und HAA-Lagerteilen (Fig. 4-30, Mitte) mit Maximalwerten von ca. 10 MPa für einige wenige Fälle der Serie MC2. Die grössten Magnituden werden allerdings in unmittelbarer Umgebung der HAA-Behälter gemessen (Fig. 4-30, unten) mit einem thermischen Peak nach ca. 200 Jahren (max. 9.5 MPa) und einem gasbedingten Peak nach ca. 10'000 Jahren (Magnituden zwischen 7 und 12 MPa).

An den gleichen Lokationen ist die zeitliche Entwicklung der Gassättigung in Fig. 4-31 für Rechenfälle der Serien MC1, MC2, MC3 und MC4 dargestellt. Wie zu erwarten, zeigen die Resultate eine starke Sensitivität beim Aufsättigungsverhalten der SMA-Kaverne (Fig. 4-31 oben) hinsichtlich der hydraulischen Durchlässigkeit des Wirtgesteins. In den Rechenfällen der Serie MC2 sind höhere Gassättigungen bzw. längere Aufsättigungszeiten auf die verstärkte Gasfreisetzung in das Wirtgestein ("50 % Gasfreisetzung ins WG") zurückzuführen. In der Serie MC4 sättigt sich die betrachtete SMA-Kaverne deutlich schneller auf als in den anderen Rechenfällen. Dieser Effekt ist auf den fehlenden Einfluss des HAA-Lagerteils zurückzuführen (Drainagewirkung der HAA-Lagerbauwerke, verstärkt durch die Anisotropie der hydraulischen Durchlässigkeit), der in den Simulationen M1 – M3 zu einer markanten Druckabsenkung im Wirtgestein führt (s. auch Fig. 4-30 oben). Für die Simulationen M1 – M3 variiert die Zeitdauer bis zur vollständigen Aufsättigung der HAA Lagerkammern zwischen 30 und 500 Jahren.

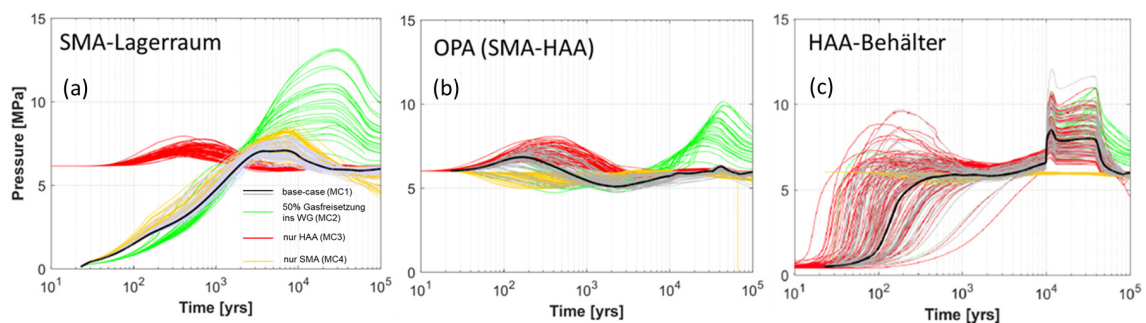


Fig. 4-30: Monte Carlo Simulationen MC1, MC2, MC3 und MC4 – Zeitliche Entwicklung des Drucks

(a) im SMA-Lagerraum, (b) im Opalinuston auf Lagerebene zwischen SMA- und HAA-Lagerteil und (c) am HAA-Behälter

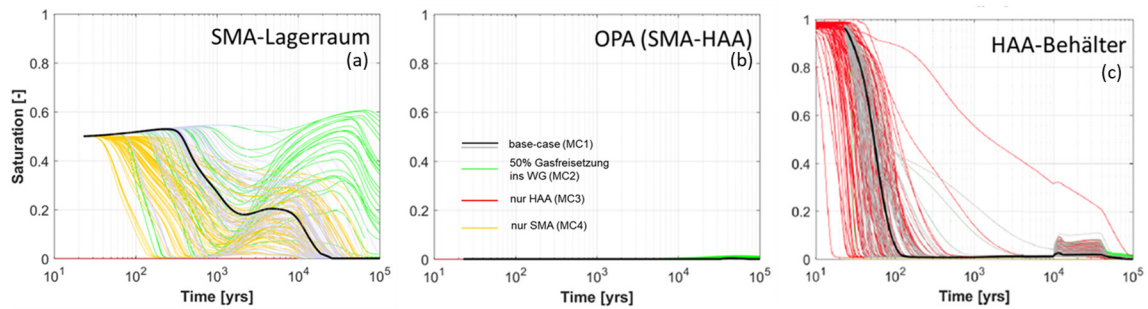


Fig. 4-31: Monte Carlo Simulationen MC1, MC2, MC3 und MC4 – Zeitliche Entwicklung der Gassättigung

(a) im SMA-Lagerraum, (b) im Opalinuston auf Lagerebene zwischen SMA- und HAA-Lagerteil, und (c) am HAA-Behälter

Die entsprechenden Transienten der Temperatur für die Serien MC1, MC2, MC3 und MC4 sind in Fig. 4-32 dargestellt. Die Abweichung der maximalen Temperatur im SMA-Lagerraum liegt bei ca. 5 °C in den Serien MC1 und MC3. Im Opalinuston zwischen den beiden Lagerteilen variieren die Temperaturen maximal um ca. 6 °C. In den Rechenfällen der Serien MC1, MC2, und MC3 beträgt die maximale Temperatur am HAA-Behälter zwischen 110 °C und 160 °C.

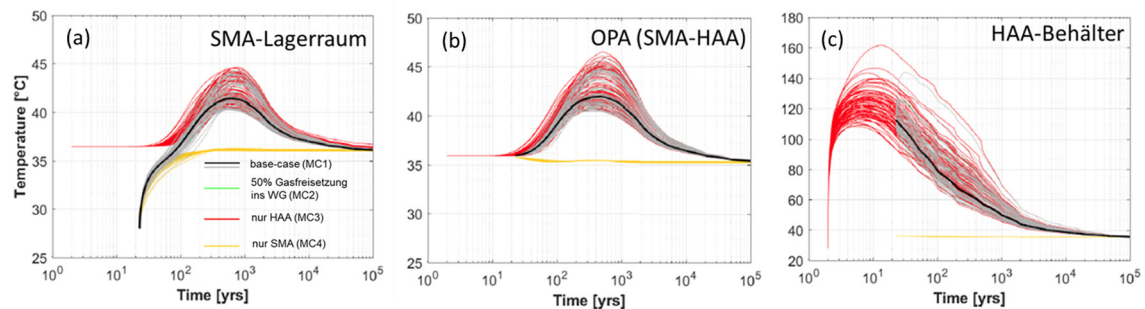


Fig. 4-32: Monte Carlo Simulationen MC1, MC2, MC3 und MC4 – Zeitliche Entwicklung der Temperatur

(a) im SMA-Lagerraum, (b) im Opalinuston auf Lagerebene zwischen SMA- und HAA-Lagerteil und (c) am HAA-Behälter

4.5 Synthese der Ergebnisse

Zweck der phänomenologischen Systemanalysen ist die Identifikation potenziell sicherheitsrelevanter Wechselwirkungen zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen im Kombilager. Die Ergebnisse der phänomenologischen Analysen stellen den Ausgangspunkt für detailliertere Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen zur Barrierenintegrität (Kapitel 5) und zur Radionuklid-freisetzung (Kapitel 6) dar. Darüber hinaus spielen die phänomenologischen Systemanalysen eine wichtige Rolle hinsichtlich der Rechtfertigung der gewählten Modellabstraktionen und der Validierung der implementierten Modellvarianten im Rahmen von Benchmarks.

Rechtfertigung der Modellabstraktionen und Modellvalidierung

Mit den phänomenologischen Systemanalysen wurde überprüft, inwieweit die vereinfachte Implementierung der Lagerkonfigurationen und die Auswahl der Entwicklungsszenarien die Ergebnisse der Systemanalyse beeinflussen und allenfalls zu falschen Aussagen bezüglich des Mindestabstands zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen führen können. Zu diesem Zweck wurden mit einem umfangreichen Modell-Portfolio systematische Vergleichsrechnungen ("Benchmarks") durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Modellabstraktionen zu quantifizieren. Folgende vorläufige Schlussfolgerungen ergeben sich:

- Die vereinfachte geometrische Darstellung der möglichen Lagerkonfigurationen in den Standortgebieten hat einen wesentlichen Einfluss auf die Modellergebnisse. Im Rahmen von Benchmarks muss daher sichergestellt werden, dass die implementierten geometrischen Vereinfachungen nicht zu systematischen Verfälschungen der Simulationsergebnisse führen. Durch schrittweise Modellverfeinerungen (vgl. Fig. 4-1) konnten die geometrischen Abstraktionsfehler soweit reduziert werden, dass sie für die Schlussfolgerungen zum Mindestabstand nicht verfälschen und andererseits den Simulationsaufwand in Grenzen halten.
- Die Bedeutung der gewählten TH-Anfangsbedingungen ist beschränkt auf die frühe Nachverschlussphase. Die Vereinfachung der Randbedingungen kann hingegen einen signifikanten Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben und muss daher im Rahmen von Sensitivitätsanalysen unter Berücksichtigung der standortspezifischen Verhältnisse (aktualisierte standortspezifische Geodatenätze und standortspezifische Lagerkonfigurationen) überprüft werden. Durch geeignete Modifikation der thermischen und gasbezogenen Quellterme konnten die systematischen Fehler von Symmetrie-Hypothesen an den lateralen Modellrändern reduziert werden.

Identifikation der potenziell sicherheitsrelevanten Wechselwirkungen

Die phänomenologischen Systemanalysen dienten dazu, diejenigen potenziell sicherheitsrelevanten Wechselwirkungen zwischen den Lagerteilen HAA und SMA eines Kombilagers für den gesamten sicherheitstechnischen Betrachtungszeitraum zu identifizieren, welche für die Festlegung der Mindest-Anforderungen aus Sicht Barrierenintegrität (Kapitel 5) und Radionuklid-rückhaltung (Kapitel 6) zu berücksichtigen sind. Als Ausgangskonfiguration wurde die in Fig. 3-2 dargestellte hypothetische Anordnung mit einem Abstand der SMA- und HAA-Lagerfelder von 125 m gewählt. Noch geringere Abstände zwischen den Lagerteilen erscheinen aus bautechnischen und betrieblichen Gründen (z.B. Bedürfnisse aus Logistik, Fahrzeuge, ...) nicht sinnvoll, denn Erfahrungen aus dem Felslabor Mont Terri zeigen, dass bedeutsame hydro-mechanische Wechselwirkungen als Folge der Bau- und Betriebsabläufe sonst nicht ausgeschlossen werden können.

Die umfangreichen phänomenologischen Systemanalysen zeigen, dass voraussichtlich keine der in Tab. 3-1 aufgeführten Wechselwirkungen mit eindeutigen sicherheitstechnischen Nachteilen eines Kombilagers gegenüber zwei getrennten Tiefenlagern für HAA und SMA verbunden ist. Einzig die Temperaturentwicklung im Umfeld des HAA-Lagerfelds hat das Potenzial, innerhalb der ersten 1'000 Jahre nach Lagerverschluss deutlich messbare Temperaturerhöhungen im SMA-Lagerfeld von maximal 5 – 8 °C zu erzeugen. Ob solche Temperatureffekte für die Langzeitsicherheit des SMA-Lagers tatsächlich relevant sind, ist ohne weitere technische Abklärungen nicht eindeutig zu beantworten. Denkbar wären beispielsweise beschleunigte hydrochemische Prozesse im Zementnahfeld der SMA Kavernen. Um solche potenziell relevanten Effekte auszuschliessen, ist es daher sinnvoll, den Mindestabstand zwischen den Lagerfeldern HAA und SMA so zu wählen, dass die von den HAA verursachten Temperatureffekte in den SMA-Kavernen im Bereich der langjährigen natürlichen Schwankungsbreite des Temperaturfelds liegen. Dabei kann, je nach Referenztiefe des SMA-Lagers, für einen ca. 1'000-jährigen Betrachtungszeitraum die durch klimatische Ungewissheiten bedingte Schwankungsbreite des natürlichen Temperaturfelds mit 2 – 4 °C angenommen werden (vgl. auch Papafotiou & Senger 2013a, 2013b, 2013c).

Neben den Temperatureffekten wurden keine weiteren Wechselwirkungen identifiziert, welche möglicherweise zu sicherheitstechnischen Nachteilen eines Kombilagers gegenüber zwei getrennten Tiefenlagern für HAA und SMA führen. Hingegen zeigen die phänomenologischen Analysen, dass ein Kombilager hinsichtlich des Gasdrucks in den SMA-Kavernen günstiger abschneidet als ein separates SMA-Lager.

5 Systemanalysen zur Barrierenintegrität

5.1 Zweck und Umfang der Analysen

Die Systemanalysen zur Bewertung der Integrität der technischen und geologischen Barrieren eines Kombilagers (im Vergleich zu zwei getrennten Lagern für HAA und SMA) beschränken sich auf die Festlegung eines Mindestabstands zwischen den Lagerteilen SMA und HAA mittels probabilistischer Robustheitsanalysen. Wie in den phänomenologischen Analysen gezeigt, sind keine spezifischen Anforderungen für Zugangs- und Verschlussbauwerke notwendig, um die strukturelle Integrität (d.h. die mechanische Stabilität) der technischen und geologischen Barrieren eines Kombilagers zu gewährleisten¹² (Kapitel 4.5).

5.2 Modellaufbau und Skalierung des thermischen Quellterms

Die Umsetzung der Systemanalysen zur Barrierenintegrität erfolgt mittels einer Erweiterung der generischen und semi-generischen 2D-Modelle der HAA- und SMA-Lagerkammern im vertikalen Schnitt. Der modifizierte Modellaufbau und die dazugehörigen Simulationen werden im Folgenden beschrieben.

5.2.1 Generisches 2D-Modell

Der Aufbau des generischen 2D-Modells ist identisch mit der Implementierung in den phänomenologischen Analysen, wobei die Lagerkammern von einer jeweils 1 m mächtigen Auflockerungszone umgeben sind. Wie im Kapitel 4 beschrieben, berücksichtigt das Modell in der vertikalen Erstreckung die Rahmengesteine und regionale Aquifere mit Hilfe von 1D-Elementen, welche sequenziell an die Ränder des Opalinustons angeschlossen sind.

Darüber hinaus wird das generische 2D-Modell in seiner lateralen Erstreckung so erweitert, dass insgesamt 3.5 HAA-Lagerkammern und 2.5 bzw. 3.5 SMA-Lagerkammern explizit dargestellt werden können (Fig. 5-1a & b). Die beiden Varianten unterscheiden sich dadurch, dass in Fig. 5-1b die dem HAA-Lagerfeld nächste SMA-Kaverne "entfernt" wird, indem den entsprechenden Gitterelementen die Materialeigenschaften des Opalinustons zugewiesen werden und die entsprechenden Quellterme entfallen. Die Modellvarianten entsprechen somit einem Abstand zwischen SMA- und HAA-Lagerkammern von mindestens 125 m (3.5 SMA-Lagerkammern) bzw. 210 m (3.5 SMA-Lagerkammern).

Die Modellvariante mit 3.5 SMA-Lagerkammern (Abstand von 125 m zwischen den nächsten Lagerkammern des HAA-/SMA-Lagerfelds) entspricht dem Basisfall der phänomenologischen Analysen (Kapitel 4.4.1). Allerdings wurde die *Base-Case*-Simulation nur mit 1.5 SMA-Lagerkammern durchgeführt. Wegen der höheren Anzahl von Lagerkammern und der lateralen *No-flow*-Modellrandbedingung für den Porenwasserfluss und den Wärmefluss wird das gemäss Fig. 5-1a implementierte Modell als konservativ betrachtet (d.h., die Temperatur- und Druckentwicklung im Lagerumfeld wird überschätzt). Zusätzliche Analysen zum Effekt der lateralen Randbedingungen auf den Wärmefluss und die Temperaturverteilung im Umfeld der SMA-Lagerkammern sind im Kapitel 5.2.3 zu finden.

¹² Zu beachten: Im Hinblick auf die Radionuklidfreisetzung (Kapitel 6) zeigt sich hingegen, dass die Designspezifikationen der Verschlussbauwerke eines Kombilagers (wie auch bei einem SMA-Einzellager) einen wichtigen Einfluss auf die Freisetzung von C-14 über die Gasphase haben.

Im Folgenden werden für die Modellvariante mit 2.5 SMA-Lagerkammern (Abstand 210 m) die Ergebnisse der TH-Simulationen beispielhaft diskutiert. Die aus der numerischen Simulation resultierenden Verteilungen der Temperatur, des Drucks und der Gassättigung nach 200, 2'000 und 20'000 Jahren sind in Fig. 5-2 dargestellt. Generell entwickelt sich in diesem Rechenfall die räumliche Ausbreitung des Gas- und Wärmeeintrags ähnlich wie beim *Base Case* der phänomenologischen Analysen im Kapitel 4. Die zeitlichen Entwicklungen von Temperatur, Druck und Gassättigung sind in Fig. 5-3 dargestellt. Gegenüber der *Base-Case*-Simulation zeigen diese leicht erhöhte Drücke aufgrund der höheren Zahl an berücksichtigten Lagerkammern (2.5 statt 1.5 SMA-Lagerkammern und 3.5 statt 1.5 HAA-Lagerkammern).

Die beiden Modellvarianten (125 m/210 m Abstand) werden in Fig. 5-4 im Hinblick auf die zeitlichen Entwicklungen von Druck und Temperatur an charakteristischen Beobachtungspunkten miteinander verglichen. Maximale Temperatur und maximaler Druck in der betrachteten SMA-Lagerkammer unterscheiden sich kaum. Im Opalinuston hingegen treten im Fall eines Abstands von 125 m im Umfeld des HAA-Lagerteils geringere Porenwasserüberdrücke auf, die nach Überschreiten des Maximums auch deutlich rascher abklingen. Diese Beobachtung lässt sich durch die Drainagewirkung des ungesättigten SMA-Lagerfelds erklären.

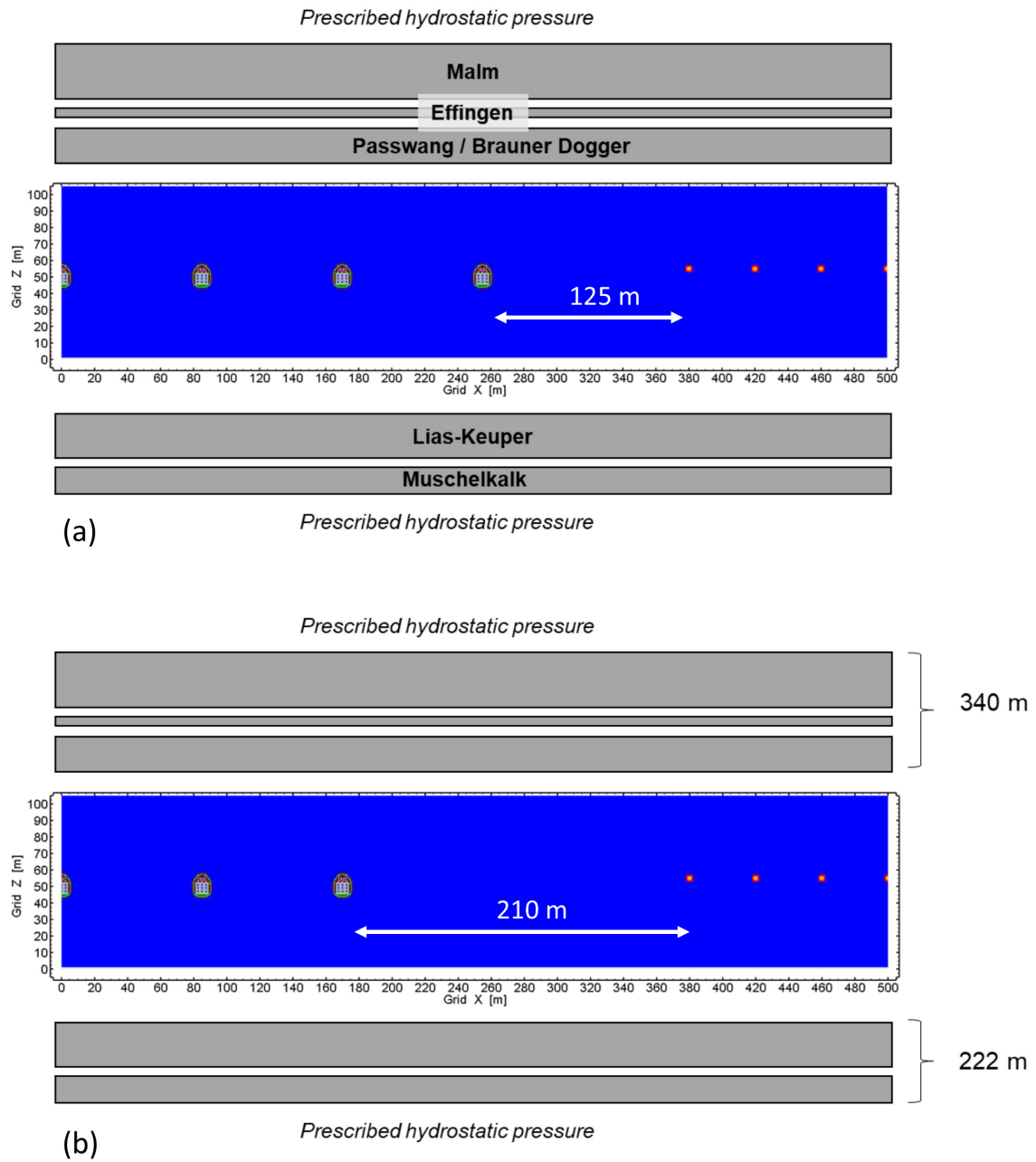


Fig. 5-1: Generisches 2D-Modell: (a) Abstand 125 m, (b) Abstand 210 m

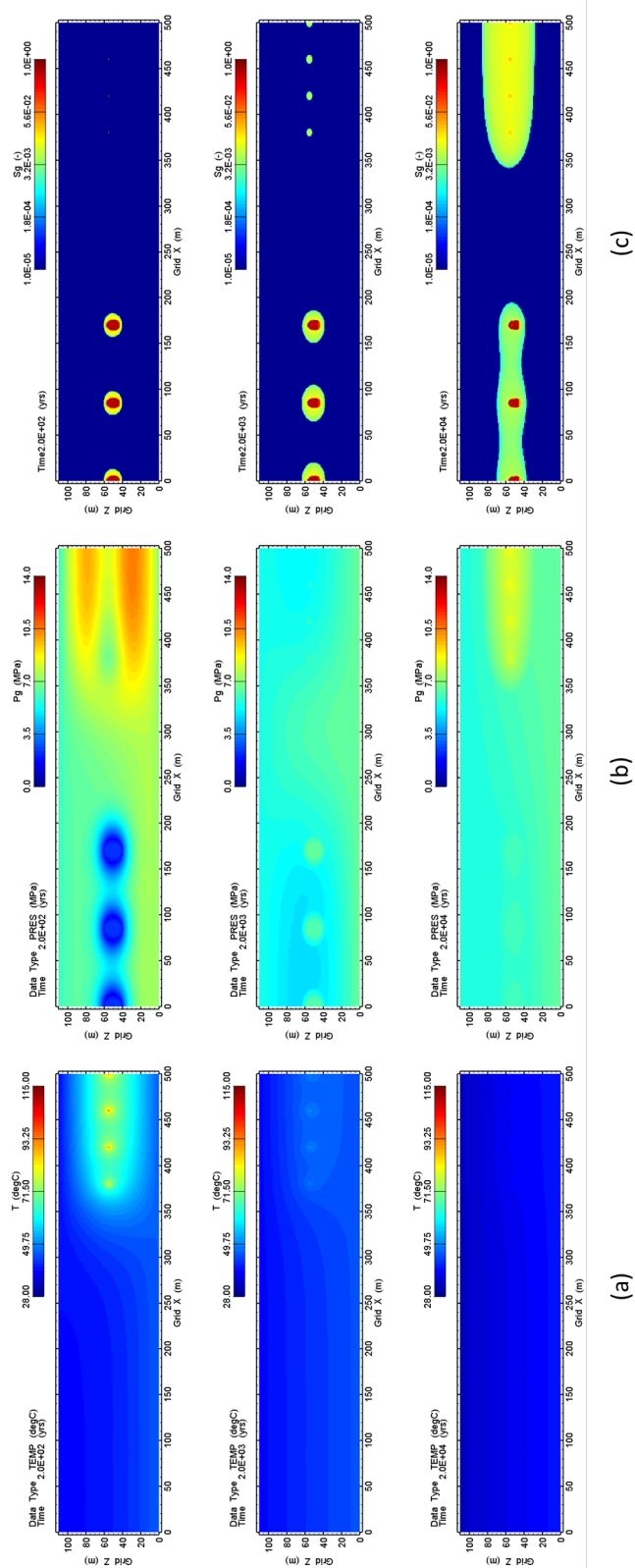


Fig. 5-2: Generisches 2D-Modell mit Abstand 210 m: Kontur-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 200 Jahren, (b) nach 2'000 Jahren und (c) nach 20'000 Jahren

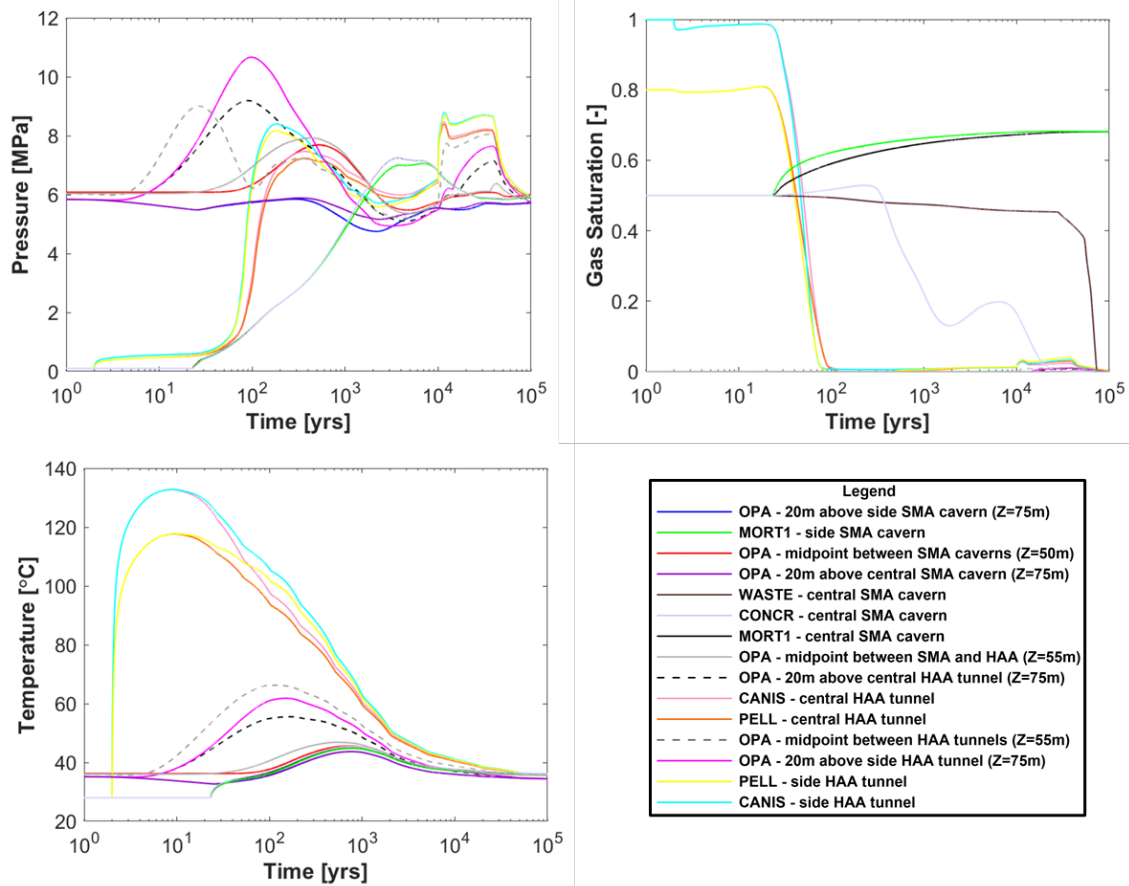


Fig. 5-3: Generisches 2D-Modell mit Abstand 210 m: Zeitliche Entwicklung von Temperatur, Druck und Gassättigung

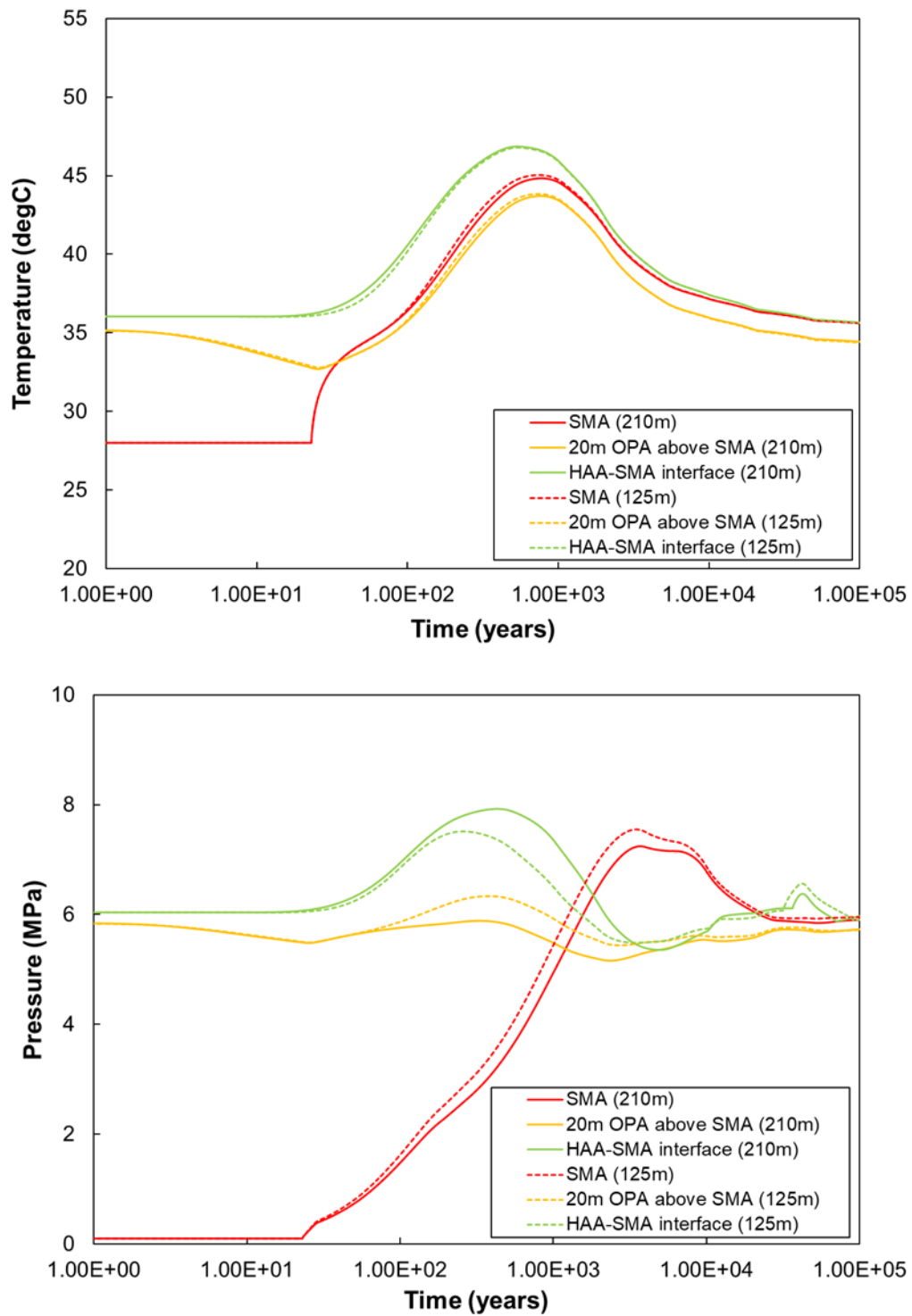


Fig. 5-4: Generisches 2D-Modell: Vergleich der zeitlichen Entwicklung von Temperatur (oben) und Druck (unten) zwischen Rechnungen mit Abstand 125 m und 210 m

5.2.2 Semi-generisches 2D-Modell

Das für die Analysen zur Barrierenintegrität verwendete semi-generische 2D-Modell wird im gleichen vertikal-ebenen Schnitt implementiert wie das entsprechende Modell aus den phänomenologischen Analysen (vgl. Kapitel 4.2.2). Mächtigkeit und Einfallen des Wirtgesteins entsprechen der angenommenen Kombilagervariante für das Standortgebiet ZNO. Gleiches gilt für die Schichtmächtigkeiten und das Einfallen der oberen und unteren Rahmengesteine.

Analog zum generischen 2D-Modell wird das semi-generische 2D-Modell gegenüber den phänomenologischen Analysen im Kapitel 4 in seiner lateralen Erstreckung modifiziert. Es werden insgesamt 10 HAA-Lagerkammern und 2.5 bzw. 3.5 SMA-Lagerkammern betrachtet (Fig. 5-5). Diese zwei Varianten entsprechen somit einem Abstand zwischen den SMA- und HAA-Lagerkammern von 125 m (3.5 SMA-Lagerkammern) bzw. 210 m (3.5 SMA-Lagerkammern). Die Modellvariante mit 3.5 SMA-Lagerkammern (Abstand 125 m) entspricht dem Rechenfall B1 der phänomenologischen Analysen (Kapitel 4.4.3). Allerdings wird im Rechenfall B1 angenommen, dass die lokalen Aquifere direkt an der oberen und unteren Schichtgrenze des Wirtgesteins wirken. Für die Systemanalysen zur Barrierenintegrität werden die Simulationen hingegen unter Berücksichtigung der oberen und unteren Rahmengesteine sowie der regionalen Aquifere durchgeführt (Fig. 5-5). Die Ergebnisse der Simulationen der beiden Varianten des semi-generischen 2D-Modells mit Abstand von 125 m bzw. 210 m (inkl. obere/untere Rahmengesteine) werden im Folgenden diskutiert.

In Fig. 5-6 sind die räumlichen Verteilungen von Temperatur, Druck und Gassättigung im Lagerumfeld beispielhaft für einen Abstand von 125 m dargestellt. Die entsprechenden zeitlichen Entwicklungen von Temperatur, Druck, und Gassättigung sind in Fig. 5-7 zu finden. Gegenüber Rechenfall B1 ergeben sich leicht erhöhte wärmeinduzierte Überdrücke, die im Wesentlichen auf die Berücksichtigung der oberen und unteren Rahmengesteine zurückzuführen sind (reduzierte vertikale Wärmeabführung gegenüber Rechenfall B1).

Die räumlichen Verteilungen von Temperatur, Druck und Gassättigung nach 200, 2'000 und 20'000 Jahren für einen Abstand von 210 m sind in Fig. 5-8 dargestellt. Die entsprechenden zeitlichen Entwicklungen der gleichen Parameter sind in Fig. 5-9 zu finden. Gegenüber dem Rechenfall mit einem Abstand von 125 m ergeben sich leicht reduzierte Temperaturen in der betrachteten SMA-Kaverne und im Wirtgestein zwischen den SMA- und HAA-Lagerkammern. Die Entwicklung von Druck und Gassättigung zeigt keine merklichen Effekte im Hinblick auf die Festlegung des Mindestabstands zwischen den SMA- und HAA-Lagerkammern.

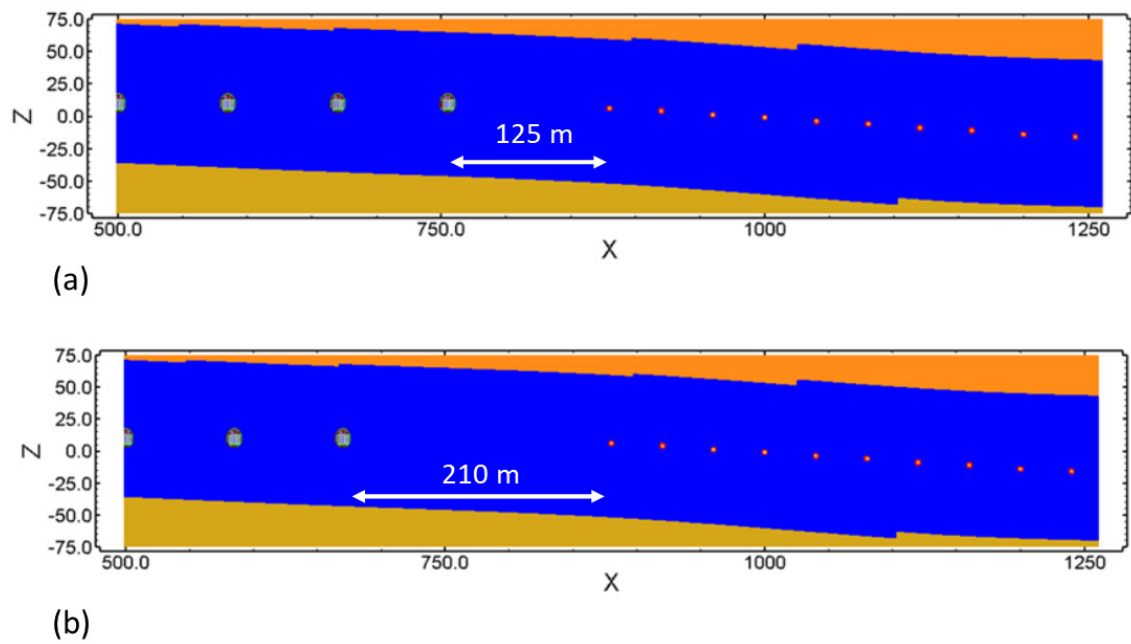


Fig. 5-5: Semi-generisches 2D-Modell: (a) Abstand 125 m, (b) Abstand 210 m

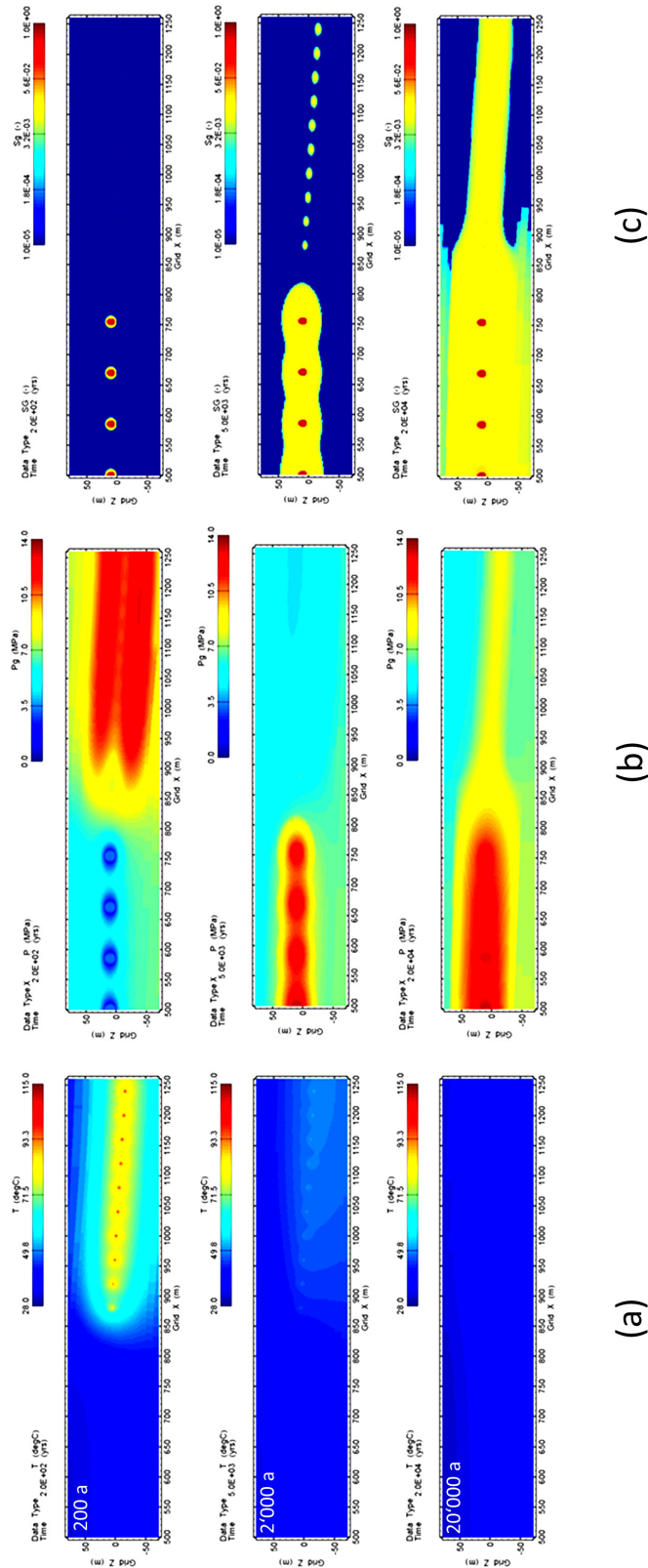


Fig. 5-6: Semi-generisches 2D-Modell mit Abstand 125 m: Kontur-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 200 Jahren, (b) nach 5'000 Jahren und (c) nach 20'000 Jahren

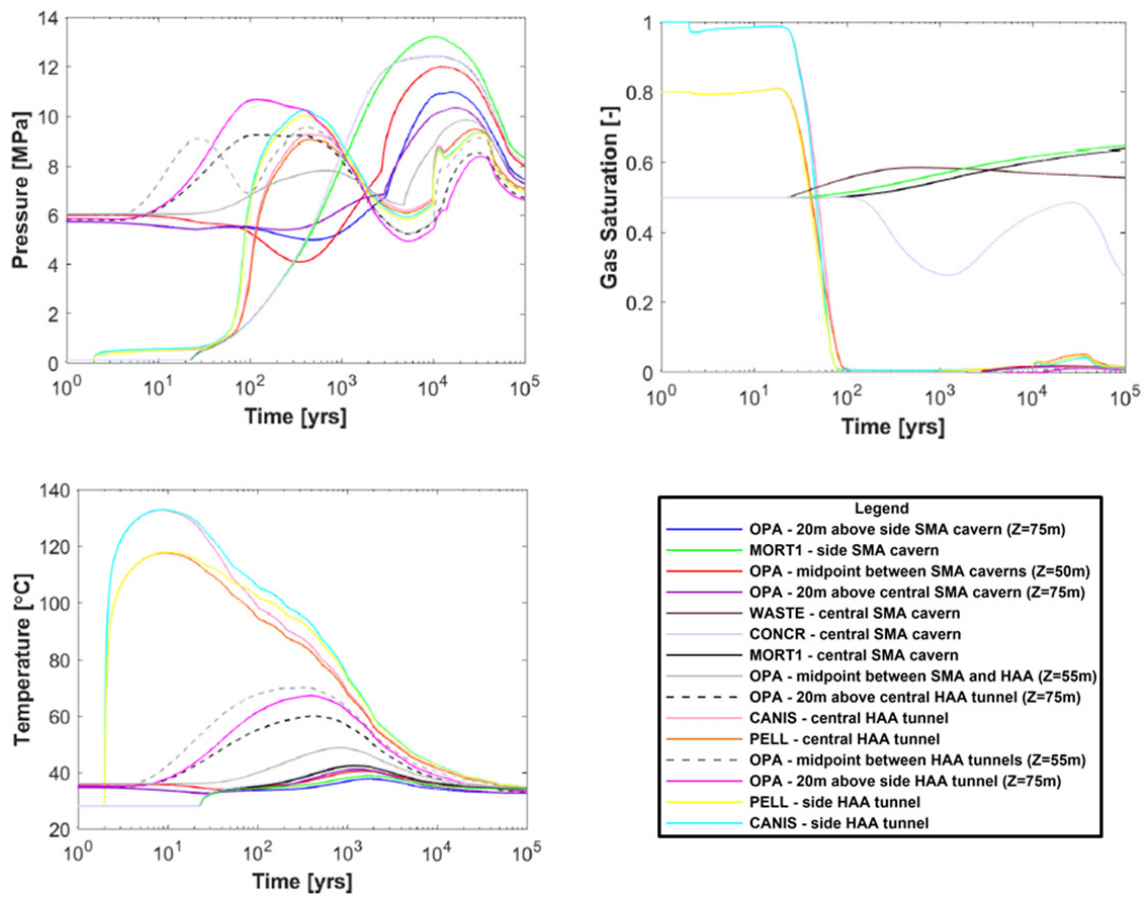


Fig. 5-7: Semi-generisches 2D-Modell mit Abstand 125 m: Zeitliche Entwicklung von Temperatur, Druck und Gassättigung

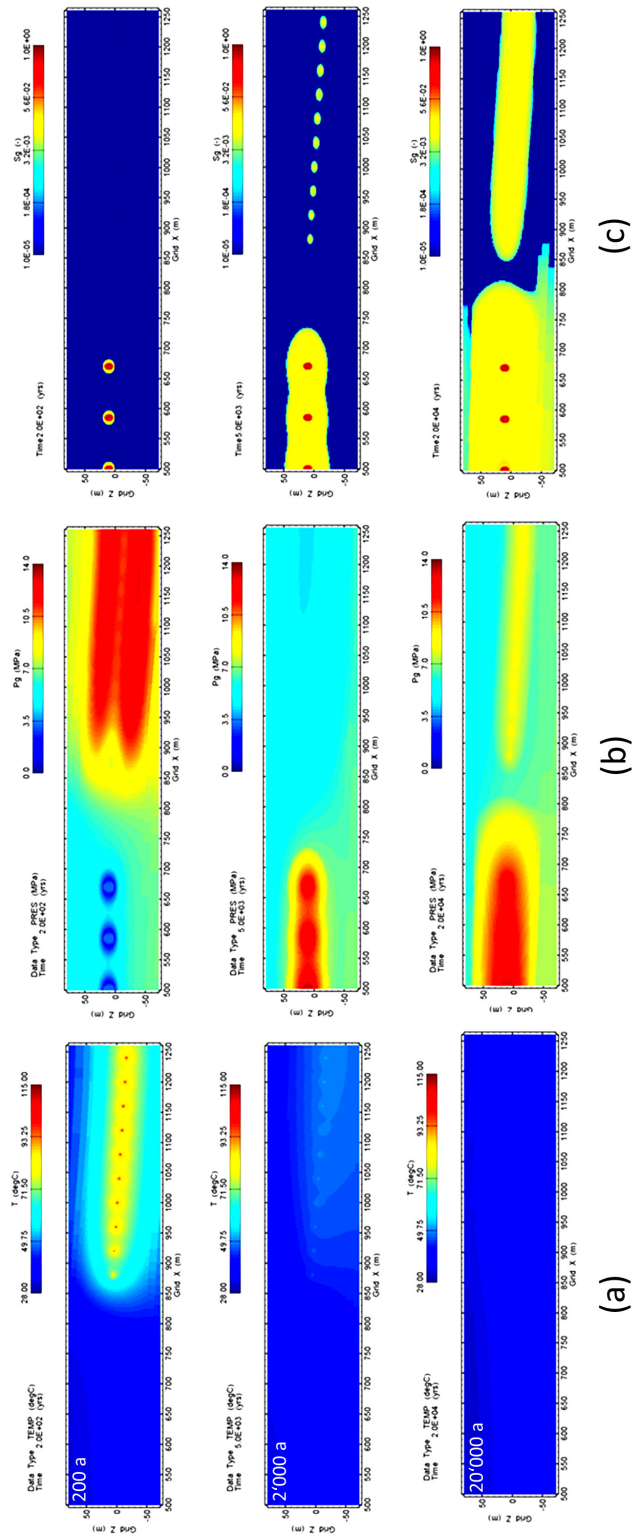


Fig. 5-8: Semi-generisches 2D-Modell mit Abstand 210 m: Kontur-Darstellungen von Temperatur, Druck und Gassättigung (a) nach 200 Jahren, (b) nach 5'000 Jahren und (c) nach 20'000 Jahren

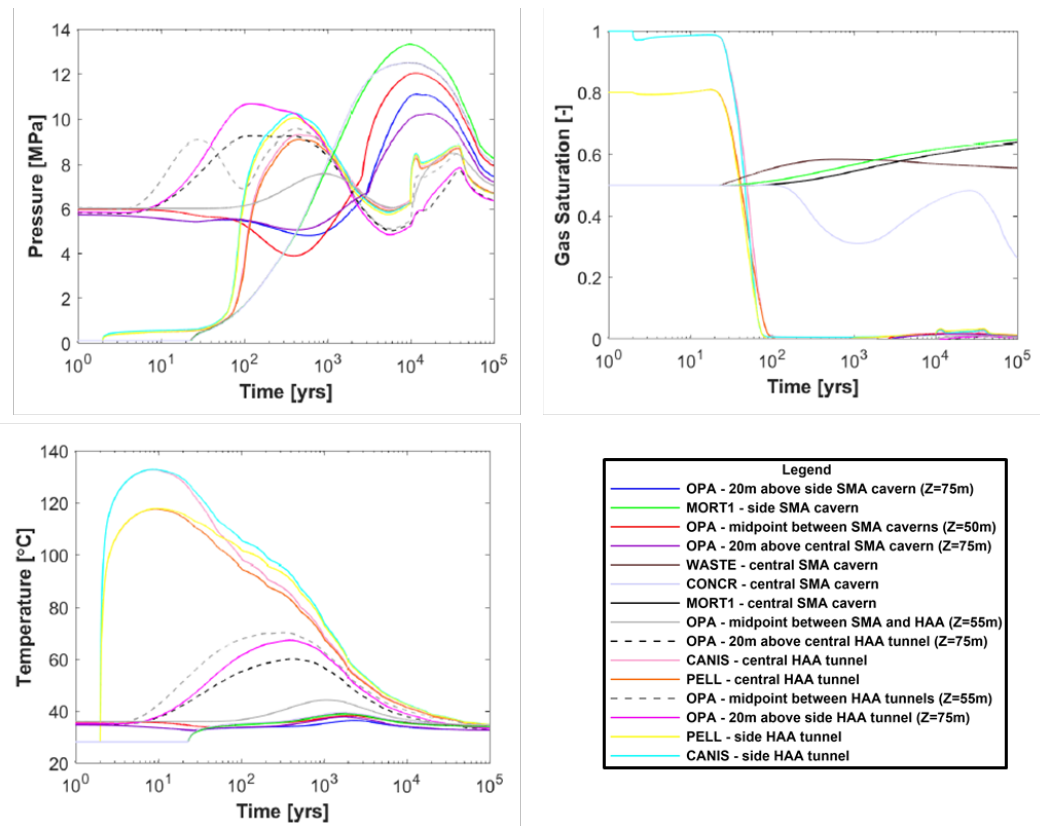


Fig. 5-9: Semi-generisches 2D-Modell mit Abstand 210 m: Zeitliche Entwicklung von Temperatur, Druck und Gassättigung

5.3 Rechenfälle und Ergebnisse

5.3.1 Probabilistische Robustheitsanalysen (generisches 2D-Modell)

Die Systemanalysen zur Barrierenintegrität im Hinblick auf die Festlegung eines Mindestabstands zwischen den Lagerteilen SMA und HAA erfolgt im Rahmen von probabilistischen Robustheitsanalysen. Diese werden mit dem generischen 2D-Modell durchgeführt, wobei beide Modellvarianten gemäss Fig. 5-1 (Abstand 125 m bzw. 210 m) eingesetzt werden. Für beide Modellvarianten wird jeweils eine Serie von Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt, um das Spektrum der erwarteten Druck-, Sättigungs- und Temperaturentwicklungen im Umfeld des Kombilagers für die bestehenden Parameterungewissheiten quantitativ abzuschätzen. Die Monte-Carlo-Serien wurden analog zu den im Kapitel 4.4.6 dargestellten Simulationen umgesetzt, indem die thermo-hydraulischen Parameter des Gebirges und der Verfüllmaterialien um die jeweiligen Referenzwerte stochastisch variiert werden. Die verwendeten Verteilungen der thermo-hydraulischen Parameter sind dabei identisch mit den Verteilungen aus den phänomenologischen Analysen.

Die zeitlichen Entwicklungen von Druck und Temperatur für den Abstand 125 m werden an charakteristischen Beobachtungspunkten in Fig. 5-10 dargestellt, nämlich (a) im unteren Teil der SMA-Kaverne, (b) im Opalinuston in der Mitte zwischen den zwei Lagerteilen auf Lagerebene und (c) direkt am HAA-Behälter. Der maximale Druck in der SMA-Kaverne variiert zwischen 6.5 und 8.0 MPa, während die maximale Temperatur an der gleichen Stelle zwischen 40 und 43 °C variiert. Der maximale Porenwasserdruck zwischen den beiden Lagern wird nach ca. 300 Jahren beobachtet und liegt bis zu 1.5 MPa über dem hydrostatischen Druck. Die grössten Magnituden werden in unmittelbarer Umgebung der HAA-Behälter beobachtet mit einem thermischen Peak von 9.5 MPa und einem gasbedingten Peak von 12 MPa. Die Ergebnisse aus dieser Serie sind praktisch unverändert im Vergleich zur Serie MC1 aus den phänomenologischen Analysen (*Base Case*: gleicher Abstand von 125 m, jedoch jeweils 1.5 SMA- und HAA-Lagerkammern im Modell).

Die zeitlichen Entwicklungen von Druck und Temperatur für den Abstand 210 m sind an charakteristischen Beobachtungspunkten in Fig. 5-11 dargestellt. Aus dem Vergleich der Ergebnisse mit den Resultaten für den Abstand von 125 m (Fig. 5-10) kann gefolgert werden, dass eine Veränderung des Abstands in der betrachteten Bandbreite keine wesentlichen Einflüsse auf den Verlauf des Drucks und der Temperatur im Umfeld der SMA- und HAA-Lagerkammern verursacht.

In den Simulationen wird allerdings angenommen, dass aufgrund der lateralen *No-flow*-Modellrandbedingung kein Wärmetransport durch die lateralen Ränder des Modellgebiets stattfindet. Dies führt besonders im SMA-Lagerteil zu einer deutlichen Überschätzung der tatsächlich zu erwartenden Temperaturen. Nachfolgend werden daher die aus den Monte-Carlo-Simulationen berechneten Temperaturen anhand der analytischen Lösung von Heierli (2016) durch einen einfachen Skalierungsprozess modifiziert. Die korrigierten Temperaturen stellen dann eine verbesserte Abschätzung der Temperaturverhältnisse im SMA-Lagerteil dar. Die resultierenden Temperaturen in der betrachteten SMA-Kaverne sind in Fig. 5-12 dargestellt und zeigen die Bandbreite der Temperaturen, die mit zunehmendem Abstand deutlich abnehmen.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen:

- Die maximalen Porenwasserdrücke unterscheiden sich zwischen den Rechenfällen mit Abstand von 125 m und 210 m nicht massgeblich.

- Unter Annahme von thermischen *No-flow*-Randbedingungen beträgt der maximale Temperaturanstieg im SMA-Lagerteil im Vergleich zur Temperatur des ungestörten Wirtgesteins auf Lagerebene maximal 7 °C. Realistischere Abschätzungen mit maximalen Temperaturerhöhungen von 4 °C bzw. 3 °C bei einem Abstand von 125 m bzw. 210 m ergeben sich, wenn die Temperaturen anhand einer analytischen Lösung modifiziert werden.
- Die gegenseitige Beeinflussung der beiden Lagerteile des Kombilagers hinsichtlich der Porenwasserdruck- und Temperaturverhältnisse ist bereits bei einem Abstand von 125 m relativ gering, so dass keine massgeblichen Effekte in Bezug auf die Integrität der technischen und geologischen Barrieren erwartet werden.

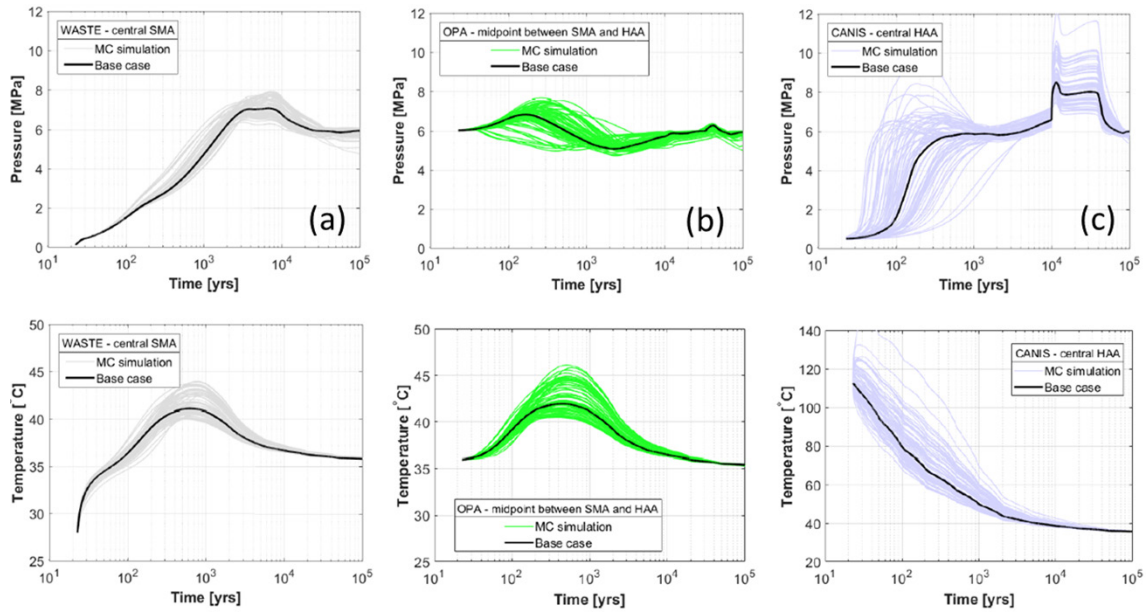


Fig. 5-10: Generisches 2D-Modell mit Abstand 125 m (ohne thermische Skalierung): zeitliche Entwicklung von Druck und Temperatur aus Monte-Carlo-Simulationen

(a) in SMA-Kaverne, (b) im Opalinuston auf Lagerebene zwischen den SMA- und HAA-Lagerteilen und (c) am HAA-Behälter

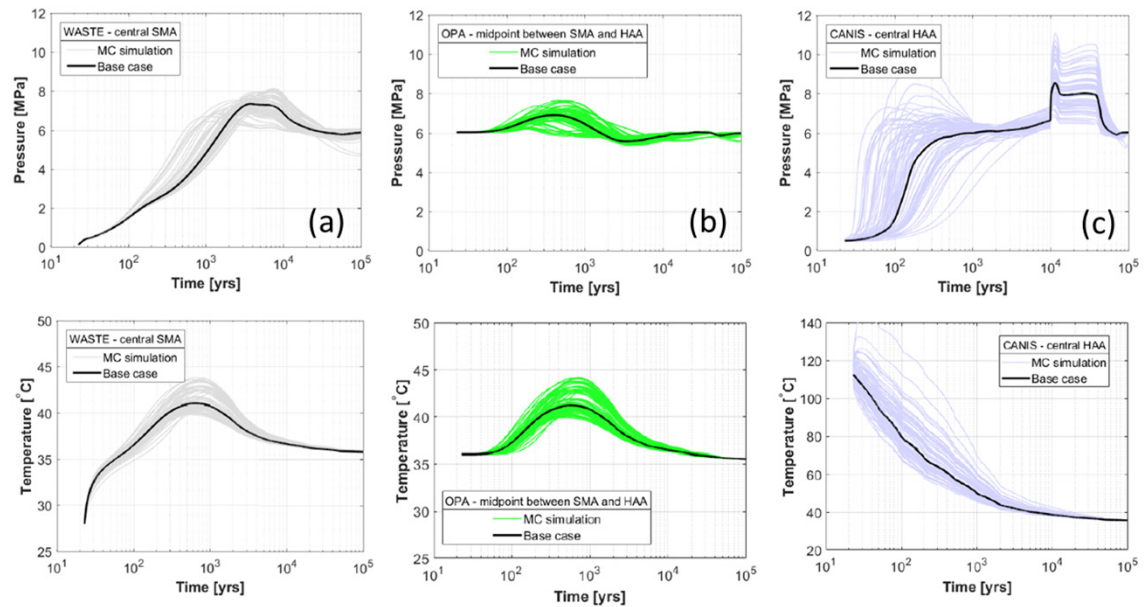


Fig. 5-11: Generisches 2D-Modell mit Abstand 210 m (ohne thermische Skalierung): zeitliche Entwicklung von Druck und Temperatur aus Monte-Carlo-Simulationen

(a) in SMA-Kaverne, (b) im Opalinuston auf Lagerebene zwischen den SMA- und HAA-Lagerteilen und (c) am HAA-Behälter

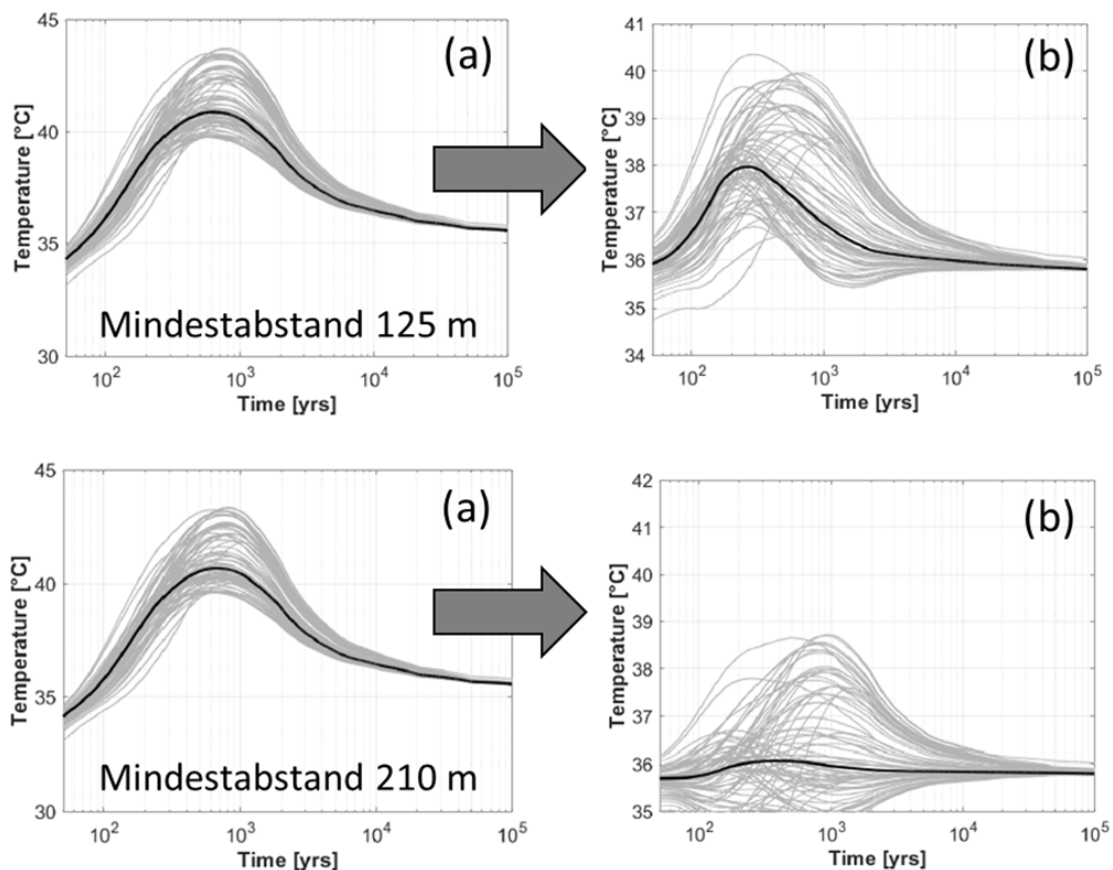


Fig. 5-12: Generisches 2D-Modell mit Abstand 125 m und 210 m: Skalierung der Temperatur in SMA-Kaverne aus Monte-Carlo-Simulationen

(a) berechnet mit lateralen *No-flow*-Randbedingungen für den Wärmetransport, (b) skaliert mittels analytischer Lösung (s. Text)

5.3.2 Ergänzende deterministische Simulationen (semi-generisches 2D-Modell)

In den bisherigen Analysen wurde der Einfluss des Abstands auf die Entwicklung von Temperatur-, Druck- und Gassättigungsverteilung im Umfeld eines Kombilagers mit Hilfe einer vereinfachten 1D-Darstellung der oberen und unteren Rahmengesteine sowie der regionalen Aquifere untersucht. Im Folgenden werden ergänzende Analysen durchgeführt, welche die standortspezifischen Verhältnisse in grösserem Detaillierungsgrad abbilden (Schichtneigung, Mächtigkeit, Abfolge der oberen/unteren Rahmengesteine).

Für die entsprechenden Rechenfälle werden die in Fig. 5-5 dargestellten Varianten des semi-generischen 2D-Modells mit einem Abstand von 125 m bzw. 210 m verwendet. Der Vergleich der berechneten Temperaturen zu den Simulationen aus Kapitel 5.2.2 (bzw. inklusiv von oberen und unteren Rahmengesteinen) ist in Fig. 5-13 an charakteristischen Beobachtungspunkten dargestellt. Der Temperaturunterschied ist abhängig von den gewählten Annahmen bezüglich der oberen und unteren Randbedingung und liegt für die betrachteten Lokationen bei ca. 3 °C (SMA-Kaverne) und 4 °C (Opalinuston auf Lagerebene zwischen den SMA- und HAA-Lagerteilen). In allen Rechenfällen beträgt der maximale Temperatureffekt in der betrachteten SMA-Kaverne weniger als 7 °C gegenüber den Verhältnissen auf Lagerebene im ungestörten Wirtgestein.

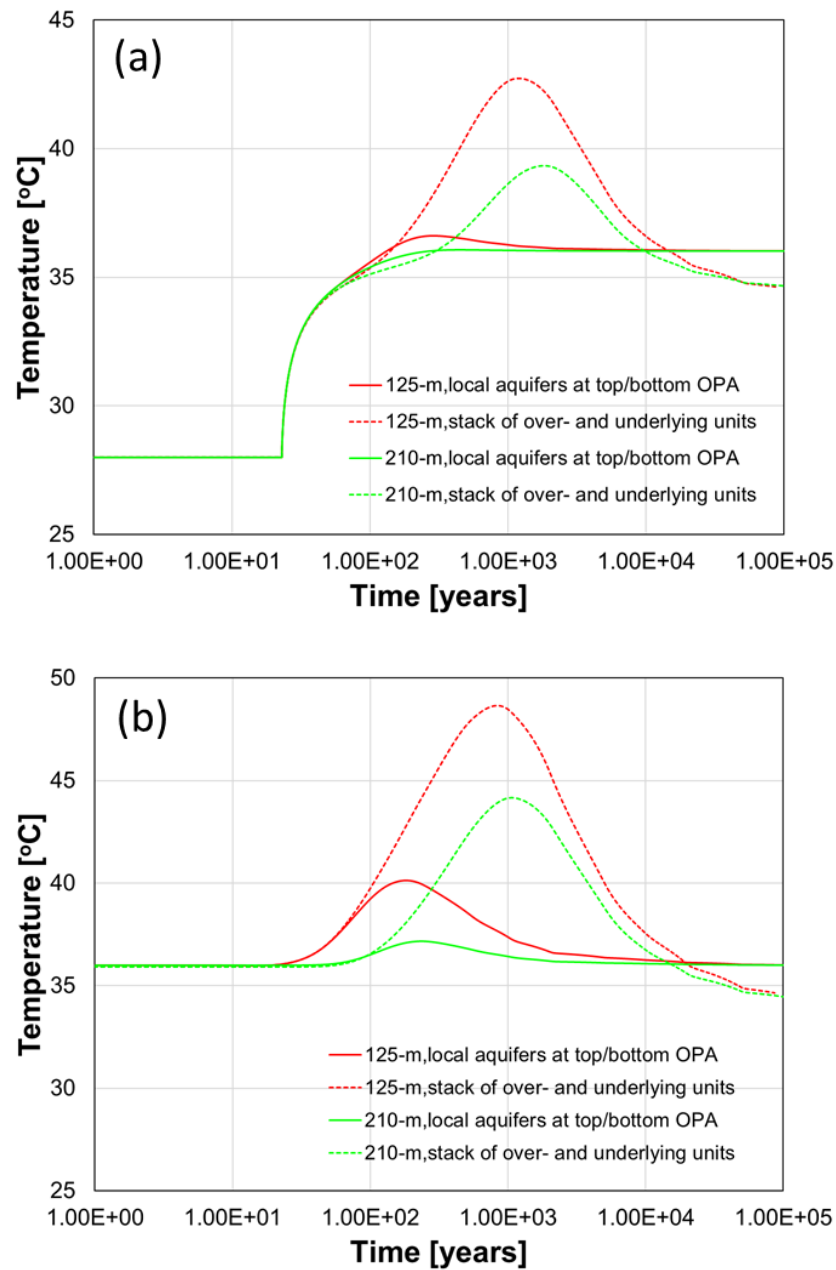


Fig. 5-13: Semi-generisches 2D-Modell: Vergleich der zeitlichen Entwicklung von Temperatur für Abstand 125 m und 210 m unter der Annahme von lokalen Aquiferen direkt an der oberen und unteren Schichtgrenze des Wirtgesteins und unter Berücksichtigung der oberen und unteren Rahmengesteine

(a) in SMA-Kaverne, (b) im Opalinuston auf der Lagerebene zwischen dem SMA- und HAA-Lagerteil

5.4 Synthese der Ergebnisse

Zweck der Systemanalysen zur Barrierenintegrität ist die Festlegung eines Mindestabstands zwischen den Lagerteilen SMA und HAA mittels probabilistischer Robustheitsanalysen. Mit einer Indikatormethodik zur Lageroptimierung werden die Temperatur und der Porenwasserdruck als Indikatoren verwendet; als Eignungskennwerte gelten die Temperaturen im Bentonitbuffer ($< 150\text{ °C}$) und im Wirtgestein (kleiner als die Paläotemperatur des Opalinustons im Standortgebiet) sowie der Porenwasserdruck im Wirtgestein (kleiner als die Magnitude der minimalen Hauptspannung im Lagerumfeld). Mittels der phänomenologischen Analysen kann gezeigt werden, dass selbst bei einem Abstand von 125 m zwischen den Lagerteilen SMA und HAA keine kritischen Systemzustände im Hinblick auf die mechanische Integrität der technischen und geologischen Barrieren zu erwarten sind. Weder die thermischen noch die gasbedingten Wechselwirkungen scheinen die Langzeitsicherheitsfunktionen der Barriersysteme negativ zu beeinflussen. Auf rigorose Robustheitsanalysen bezüglich der oben genannten Eignungskennzahlen wird daher in der vorliegenden Studie verzichtet.

Thermo-chemische Kopplungen stellen eine Kategorie von lagerbedingten Effekten dar, welche in getrennten Einzellagern für HAA und SMA nicht relevant sind. Im HAA-Lager werden in der frühen nicht-isothermen Phase nach Lagerverschluss noch keine Radionuklide freigesetzt, während im SMA-Lager der Wärmeeintrag durch das Abbinden der Zementverfüllung gering ist. Im Kombilager hingegen ist zu erwarten, dass die laterale Wärmeausbreitung aus dem HAA-Lagerteil in das SMA-Lager schon zu einem relativ frühen Zeitpunkt zu Wechselwirkungen führen kann. Die erhöhten Temperaturen in den SMA-Kavernen können Löslichkeit und Mobilität des Radionuklidinventars beeinflussen und darüber hinaus auch hydro-chemische Interaktionen der zementhaltigen Barrieren beschleunigen (z.B. beschleunigte Karbonatisierung/Alkali-Silika-Reaktion, Abdichtung EGTS etc.). Als Indikator für potenzielle hydro-chemische Interaktionen wird in der vorliegenden Methodikentwicklung die Temperatur verwendet. Als heuristischer Eignungskennwert wird die Differenztemperatur gegenüber den "ungestörten" Verhältnissen¹³ festgelegt, bei der sicherheitstechnische Beeinträchtigungen der Barriersysteme nicht a-priori ausgeschlossen werden können. Im Rahmen des vorliegenden Methodik-Berichts wird die natürliche langjährige Schwankungsbreite der Temperaturverhältnisse auf Lagerebene in der Größenordnung von 2 – 3 °C (Temperatureffekte im tiefen Untergrund als Folge von Klimaschwankungen; siehe auch Papafiotou et al. 2013a, 2013b, 2013c) als plausibler heuristischer Eignungskennwert verwendet.

Die probabilistischen Analysen zur Barrierenintegrität zeigen, dass selbst bei einem Abstand von 125 m zwischen den Lagerteilen SMA und HAA die Temperaturen im Bentonitbuffer und im Wirtgestein sowie der Porenwasserdruck im Wirtgestein weit unterhalb der kritischen Eignungskennwerte liegen und somit nicht zur Begründung eines Mindestabstands zwischen den beiden Lagerteilen geeignet sind. Die Simulationen zeigen sogar, dass die erwartete Entwicklung der gasbedingten Überdrücke im SMA-Lagerteil eines Kombilagerns gegenüber dem SMA-Einzelager eher günstig ist.

Als einzige Wechselwirkung mit potenziell sicherheitstechnischer Relevanz wird daher die Kategorie der thermo-hydro-chemischen Interaktionen betrachtet. Die skalierten Simulationen (Fig. 5-12b) zeigen, dass bei einem Abstand von 210 m selbst für ungünstige Parametervarianten die Maximaltemperaturen in den SMA-Kavernen weniger als 3 °C von der ungestörten Gebirgstemperatur auf Lagerebene abweichen. Bei einem Abstand von 125 m werden hingegen in ungünstigen Fällen Temperaturdifferenzen von 4 – 5 °C festgestellt. Auch die ergänzenden deterministischen Simulationen mit dem semi-generischen Modell (Berücksichtigung der oberen und

¹³ Als "ungestört" werden die natürlichen Verhältnisse ohne Wechselwirkung zwischen den beiden Lagerteilen HAA und SMA bezeichnet.

unteren Rahmengesteine mit geringer Wärmeleitfähigkeit) zeigen, dass bei einem Abstand von 125 m in den SMA-Kavernen mit deutlich höheren Temperaturen gerechnet werden muss (max. Temperaturdifferenz ca. 14 °C gegenüber 9° C bei einem Abstand von 210 m; vgl. Fig. 5-13). Qualitativ erscheint daher ein Mindestabstand von 210 m zwischen den Lagerteilen HAA und SMA im Hinblick auf mögliche sicherheitstechnische Beeinträchtigungen des SMA-Lagers durch hydro-chemische Wechselwirkungen signifikant günstiger, wenn die natürliche langjährige Schwankungsbreite der Temperaturverhältnisse auf Lagerebene als Eignungskriterium verwendet wird.

6 Systemanalysen zur Radionuklidfreisetzung

6.1 Zweck und Umfang der Analysen

Ziel der Systemanalysen in diesem Kapitel ist es, allfällige Auswirkungen eines Kombilagers im Vergleich zu zwei Einzellagern auf die Radionuklidfreisetzung (RN-Freisetzung) zu analysieren. Im Besonderen betrifft dies allfällige Auswirkungen von Wechselwirkungen zwischen den SMA- und HAA-Lagerteilen auf die Radionuklidfreisetzung, welche a priori zu Kombilager-spezifischen sicherheitstechnischen Anforderungen – insbesondere eine Anforderung an den Mindestabstand – führen könnten.

Die den Systemanalysen zu Grunde liegende Methodik ist allerdings übergeordnet: Sie erlaubt die Ermittlung der Sensitivitäten einer beliebigen Lagerkonfiguration bezogen auf die RN-Freisetzung und die Ableitung von entsprechenden Anforderungen bezogen auf beliebige – vorzugsweise sensitive – Parameter, zum Beispiel zwecks Optimierung der Lagerkonfiguration und Lagerkomponenten im Allgemeinen.

Grundlage der Systemanalysen zur RN-Freisetzung bildet das sogenannte Makroelement-Modellierungskonzept. Dieses stellt ein Bindeglied zwischen (semi-)analytischen und komplexen numerischen 3D-Modellen dar und profitiert so von den Vorteilen beider Seiten: Ein schlanker Modellaufbau, der kurze Rechenzeiten und insbesondere geometrische Flexibilität ermöglicht, auf der einen Seite und auf der anderen Seite die Nutzung eines *"State-of-the-Art"* Codes (TOUGH3), der die wesentlichen Prozesse abbildet (Mehrphasenströmung, Diffusion, radio-aktiver Zerfall).

Die Systemanalysen zur RN-Freisetzung umfassen:

- die Entwicklung der Modellwerkzeuge (Makroelement-Modelle) und deren Validierung,
- die Bereitstellung einer Simulationsumgebung zur Durchführung von probabilistischen Systemanalysen (Sensitivitäts- und Ungewissheits-/Robustheitsanalysen),
- die Entwicklung einer Methodik zur Optimierung der Lagerkonfiguration und Lagerkomponenten mittels Ableitung von Anforderungen auf Grundlage obiger probabilistischer Analysen sowie
- die beispielhafte Anwendung der Modellwerkzeuge und Methodik für ein generisches Kombilager (vgl. Kapitel 3.4 und 4.2).

Während eine mögliche RN-Freisetzung in die Biosphäre sowohl durch die geologischen Barrieren (Wirt- und Rahmengesteine) als auch entlang der Untertagebauwerke erfolgen kann, ist bezogen auf mögliche Unterschiede zwischen Einzel- und Kombilagern v.a. letzteres relevant. Da zudem für den potenziellen Transportpfad entlang der Untertagebauwerke der RN-Transport in der Flüssigphase gegenüber jenem in der Gasphase von untergeordneter Bedeutung ist (Nagra 2014d), wird für die beispielhafte Anwendung der Modellwerkzeuge und Methodik das volatile Radionuklid C-14 in Form von Methan (CH₄) betrachtet.

Als Indikator für die Freisetzung des volatilen C-14 werden für die vorliegenden beispielhaften Systemanalysen normierte Aktivitätsflüsse¹⁴ aus dem Tiefenlagersystem herangezogen. Da der Transport des volatilen C-14 wesentlich an das Zweiphasenflussverhalten gekoppelt ist bzw. von diesem abhängt, werden zudem auch ausgewählte Indikatoren zum Zweiphasenflussverhalten an

¹⁴ Der normierte Aktivitätsfluss trägt die Einheit [1/Jahr] und entspricht dem Anteil der Aktivität des volatilen C-14 Anfangsinventars, der pro Jahr über eine gegebene Fläche fließt.

sich verwendet (u.a. Druck, Temperatur, Gassättigung, Gasflüsse; vgl. Tab. 3-1). Dies erlaubt zusätzlich eine Konsistenzprüfung zwischen den phänomenologischen Analysen (Kapitel 4 und 5) und den im Folgenden präsentierten Resultaten in Bezug auf die wesentlichen Charakteristiken im Systemverhalten.

Das restliche Kapitel ist wie folgt strukturiert: Kapitel 6.2 beschreibt die entwickelten Modellwerkzeuge und deren Validierung sowie den Makroelement-Modellaufbau eines generischen Kombilagers. Die deterministischen (Basisfall Kombilager und Vergleich zu SMA-/HAA-Einzellager) und probabilistischen Systemanalysen (Sensitivitäts- und Ungewissheitsanalyse) mit entsprechender Parametrisierung (Referenzwerte, Bandbreiten und Verteilungen) werden im Kapitel 6.3 festgelegt. Die Resultate werden im Kapitel 6.4 dargelegt. Im Besonderen wird im Kapitel 6.4.4 die auf einer Robustheitsanalyse basierende beispielhafte Optimierung von Lagerkomponenten bzw. Herleitung von sicherheitstechnischen Anforderungen illustriert. Kapitel 6.5 zieht die wesentlichen Schlussfolgerungen aus den gewonnenen Erkenntnissen und bewertet die entwickelte Methodik.

6.2 Modellwerkzeuge

6.2.1 Makroelement-Modellierungskonzept

Das Makroelement-Modellierungskonzept sieht die Unterteilung bzw. Zusammenfassung der Lagerbauwerke in repräsentativen Lagerstrukturen (z.B. Lagerkammern, Betriebs-/Bautunnel, Schächte) vor, wobei (ggf. approximierte) Symmetrien im Layout und im Systemverhalten ausgenutzt werden. Jede solche Lagerstruktur wird in einem sog. Makroelement abgebildet, welches sowohl die (verfüllte) Lagerstruktur als auch die angrenzende AUZ und Geosphäre (Wirt- und Rahmengesteine) umfasst. Extensive Parameter (Volumen, Flächen, Quellterme) werden gemäss der modellierten Symmetrie skaliert, intensive Parameter (Transportdistanzen, Materialeigenschaften, Zustandsparameter) bleiben unverändert. Die Verbindung und damit die Wechselwirkung zwischen den Makroelementen erfolgt über die abgebildeten Lagerstrukturen und die AUZ; Wechselwirkungen über die ungestörten geologischen Barrieren werden zwischen den Makroelementen nicht abgebildet.

Das Makroelement-Modellierungskonzept gründet auf der Annahme von symmetrischen Geometrien. "Symmetribrüche" können nicht oder nur beschränkt abgebildet werden; z.B. werden 3D-Effekte an den äusseren Lagerkammern in lateraler Richtung sowie an den Enden jeder Lagerkammer in axialer Richtung nicht berücksichtigt. Durch Vergleichsrechnungen gegenüber 3D-Modellrechnungen für ein SMA-Lager (Nagra 2016b) konnte jedoch gezeigt werden, dass die wesentlichen Charakteristiken des Systemverhaltens hinsichtlich Druck, Gassättigung sowie Wasser- und Gasflüssen mit dem Makroelement-Modellierungsansatz verlässlich erfasst werden können¹⁵. Da Validierungsrechnungen stets zweckgebunden und nur innerhalb des betrachteten Modellkonzepts und Parametervektors gültig sind, werden die im Rahmen der vorliegenden Methodik entwickelten Makroelement-Modelle für Systemanalysen zur RN-Freisetzung in einem Kombilager erneut einer Validierung unterzogen (s. Kapitel 6.2.3 und 6.2.6).

6.2.2 Toolbox und Makroelement-Typen

Die Abbildung von Lagerstrukturen und deren Umfeld mittels Makroelementen erfolgt mit einer eigens dafür entwickelten Toolbox. Die Funktionalitäten umfassen u.a. die flexible Erzeugung

¹⁵ Unter dem Begriff "verlässlich" ist dabei zu verstehen, dass die durch das Makroelement-Modell bzw. dessen geometrische Vereinfachungen verursachten Abstraktionsfehler quantitativ abschätzbar sind.

eines Gitternetzes (Mesh) pro Makroelement (mit Lagerstruktur, AUZ, Wirt- und Rahmengesteine), die Zuweisung und Parametrisierung von Materialien, die Skalierung der extensiven Grössen (Volumen, Flächen, Quellterme) gemäss der abgebildeten Symmetrie sowie die Verbindung der Makroelemente untereinander via Lagerstruktur und AUZ.

Die Toolbox sieht drei Typen von Makroelementen vor, die in Fig. 6-1 illustriert sind. Der Typ "*Tunnel*" ist für horizontale Lagerstrukturen mit einer Spiegelsymmetrie ausgelegt, während der Typ "*Schacht*" vertikale Lagerstrukturen mit einer Rotationssymmetrie abbildet. Im Gegensatz dazu erlaubt der Typ "*Kombi*", mehrere Tunnelstrukturen (z.B. SMA- und HAA-Lagerkammern) an beliebigen Positionen im Querschnitt eines Makroelements einzubetten. Er stellt damit eine generalisierte Form des Typs *Tunnel* dar. Jede einzelne Tunnelstruktur (inkl. AUZ) kann separat mit beliebigen anderen Makroelementen (z.B. Siegel, Betriebs-/Bautunnel) verknüpft werden. Zudem können unterschiedliche Skalierungsfaktoren (unterschiedliche Anzahl abzubildender Tunnel) sowie unterschiedliche Dehnungsfaktoren (unterschiedliche Längen der abzubildenden Tunnel) verwendet werden.

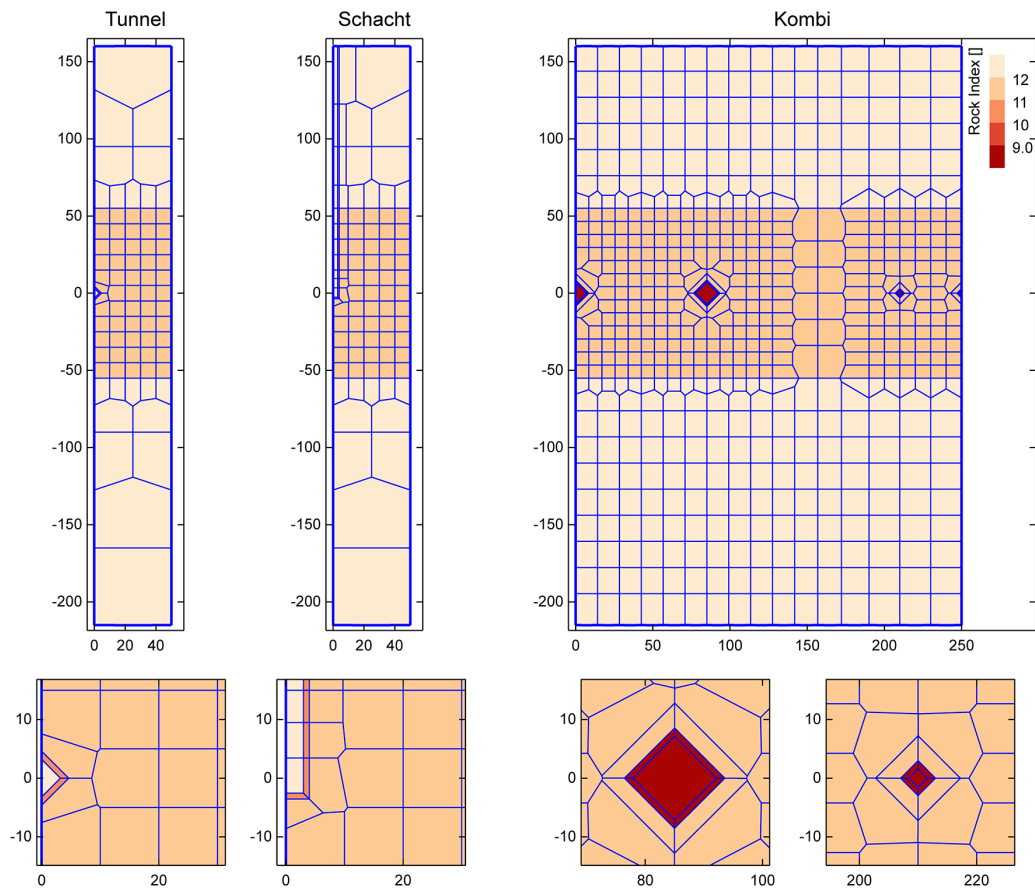


Fig. 6-1: Illustration der Makroelement-Typen *Tunnel*, *Schacht* und *Kombi*

Farbig dargestellt ist der Index des Materials. Unten sind die Tunnel-/Schachtstrukturen vergrössert dargestellt. Die Horizontal- und Vertikalkoordinaten sind in Metern angegeben.

6.2.3 Vergleichsrechnungen für das Kombi-Makroelement

Für die Abbildung der SMA- und HAA-Lagerkammern wird der Makroelement-Typ *Kombi* gewählt (Fig. 6-1). Damit können die Wechselwirkungen zwischen den beiden Lagerteilen sowohl über das Wirtgestein als auch die damit verbundenen Lagerstrukturen erfasst werden. Das entsprechende Makroelement (fortan "Kombi-Makroelement" genannt) bildet somit ein zentraler Baustein im Makroelement-Modell des generischen Kombilagers, welches wiederum die Grundlage für die Systemanalysen zur RN-Freisetzung bildet.

Im Kombi-Makroelement werden im Sinne des Makroelement-Modellierungskonzepts Vereinfachungen getroffen:

1. Die Tunnelstrukturen werden geometrisch vereinfacht und deren Verfüllung durch ein homogenes Material mit effektiven Eigenschaften des Tunnelinhalts beschrieben. Zudem wird generell eine relativ grobe Diskretisierung des Querschnitts gewählt.
2. Es werden nicht alle SMA- und HAA- Lagerkammern abgebildet; Symmetrien sollen durch entsprechende Skalierung weitmöglichst ausgenutzt werden. Es ist dabei sicherzustellen, dass der gegenseitigen Beeinflussung konservativ Rechnung getragen wird.

Das nachfolgende Kapitel 6.2.4 widmet sich der adäquaten Dimensionierung des Kombi-Makroelements (Anzahl der Lagerkammern und Skalierung) gemäss Punkt 2. In diesem Kapitel werden die unter Punkt 1 genannten Vereinfachungen mittels Vergleichsrechnungen gegenüber den generischen 2D-Modellen der phänomenologischen Systemanalysen überprüft. Die wesentlichen Eckpunkte zum Aufbau und den Ergebnissen der Vergleichsrechnungen werden im Folgenden beschrieben.

Als Referenzmodell dient das generische 2D-Modell mit je 1.5 Lagerkammern, das im Kapitel 4.2.1 beschrieben ist. Das Makroelement-Modell wird bezüglich Modellausdehnung, Position der Lagerkammern, Anfangs- und Randbedingungen sowie Quellterme (Wasserstoff und Wärme) identisch aufgebaut. Die Materialparameter für das Wirtgestein und die AUZ werden ebenfalls unverändert aus dem Referenzmodell übernommen. Die Modelle unterscheiden sich bezüglich folgender Aspekte:

- Mesh:

Das Referenzmodell verwendet einen Quadtree-Ansatz für die räumliche Diskretisierung. Insgesamt werden 49'000 quadratische Elemente verwendet. Im Wirtgestein wird eine Gitterauflösung von 2 m und für die Lagerkammern und deren nähere Umgebung eine Gitterauflösung von 0.25 m verwendet (Fig. 6-2).

Das Mesh des Makroelement-Modells besteht aus ca. 1'000 Voronoi-Elementen (Polyeder). Es wird überwiegend eine Elementgrösse von ca. 5 m verwendet, innerhalb der HAA-Lagerkammern von ca. 1 m und am oberen und unteren Modellrand von ca. 10 m (Fig. 6-3).

- Abbildung der Lagerkammern:

Im Referenzmodell wird der ovale K09-Querschnitt der SMA-Lagerkammern weitgehend nachgebildet. Im Makroelement-Modell wird dafür ein regelmässiges 8-Eck verwendet, wobei die Querschnittsfläche des Tunnelkerns demjenigen des Referenzmodells entspricht.

Der runde F-Querschnitt der HAA-Lagerkammern wird im Makroelement-Modell ebenfalls durch ein 8-Eck mit identischer Querschnittsfläche approximiert.

- Parametrisierung der Lagerkammer-Verfüllung:

Die Kerne der HAA- und SMA-Lagerkammern werden im Makroelement-Modell jeweils durch homogene Bereiche repräsentiert, deren Fluid- und Wärmespeichervermögen denjenigen des Referenzmodells entsprechen. Hierzu werden Porosität, Porenkompressibilität und die Porenexpansivität als volumengewichtete Mittel aus den Bestandteilen des detaillierten 2D-Modells ermittelt. Für die Herleitung der spezifischen Wärmekapazität wird mit der Trockenmasse gewichtet. Die mittlere Korndichte ergibt sich aus der Summe der Trockenmassen der Bestandteile, geteilt durch das gesamte Skelettvolumen.

Bei der absoluten/relativen Permeabilität, Kapillardruckfunktion und Wärmeleitfähigkeit für die SMA-Lagerkammern werden vereinfachend die Parameter des Verfüllmörtels (MORT1) übernommen. Bei den HAA-Lagerkammern werden diejenigen der Bentonit-Pellets übernommen (PELL).

Die zeitlichen Verläufe für Temperatur, Druck und Gassättigung werden in Fig. 6-4 exemplarisch für die zentrale¹⁶ (d.h. dem jeweils anderen Lagerteil nächstgelegene) SMA- und HAA-Lagerkammer (SMA C, HAA C) sowie für den Punkt in deren Mitte (Midpoint SMA/HAA) verglichen. Fig. 6-5 vergleicht die zeitlichen Verläufe der Wasser- und Gasflüsse vom Wirtgestein in die AUZ (OPA > EDZ SMA/HAA) sowie vom HAA- zum SMA-Lagerteil (HAA > SMA) durch die vertikale Fläche in der Mitte der beiden zentralen Lagerkammern.

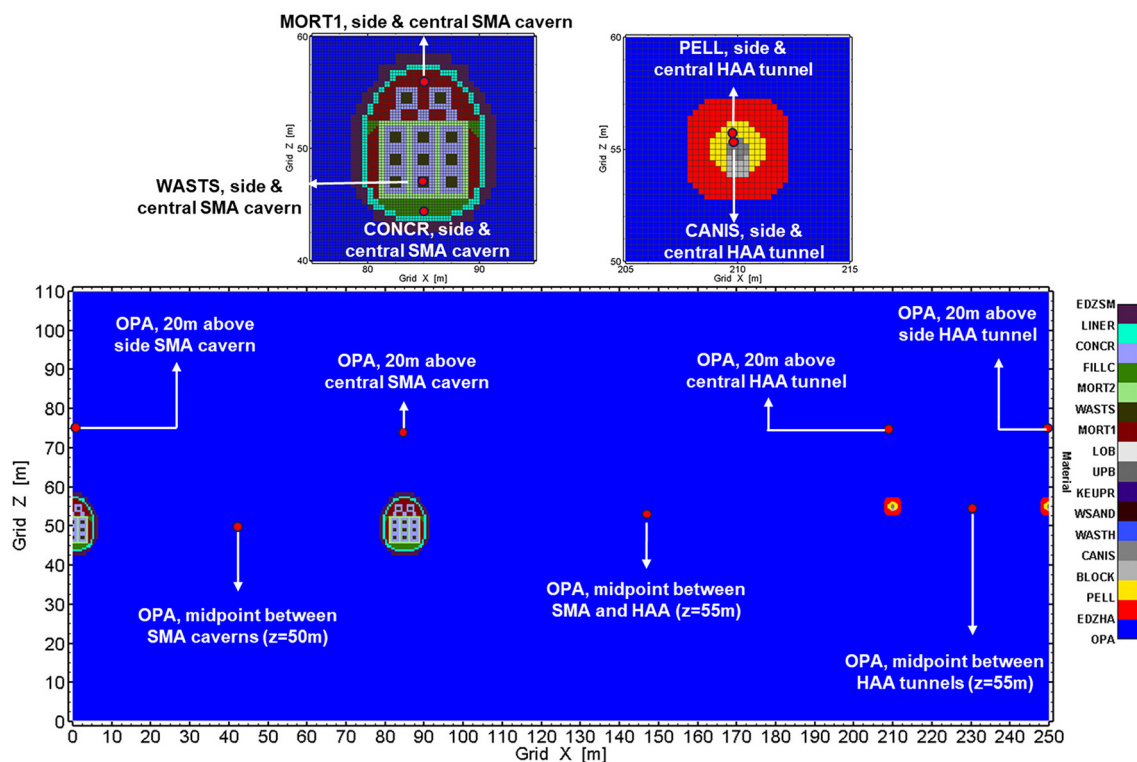


Fig. 6-2: Referenzmodell mit Vergleichspunkten

¹⁶ Die beschriebenen Ergebnisse sind auf die seitlichen (bzw. vom jeweils anderen Lagerteil entferntesten) Lagerkammern übertragbar.

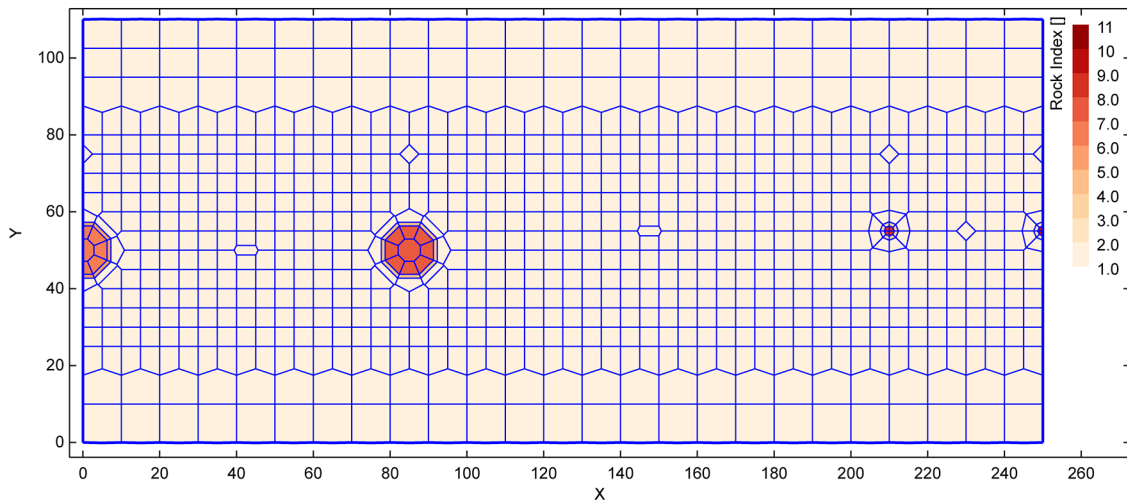


Fig. 6-3: Kombi-Makroelement für die Vergleichsrechnungen

Die Horizontal- und Vertikalkoordinaten sind in Metern angegeben.

Die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen in Fig. 6-4 und 6-5 lassen sich wie folgt umschreiben:

- Temperatur:

Ausserhalb der Lagerkammern im Wirtgestein zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der simulierten Temperaturverläufe.

Bei den SMA-Lagerkammern (exemplarisch gezeigt für SMA C) treten Unterschiede von weniger als 0.5 K auf, die durch die unterschiedlichen Vergleichsorte erklärt werden: Während für das Referenzmodell in Fig. 6-4 der Vergleichsstandort MORT1 dargestellt ist, wird für das Makroelement-Modell der zeitliche Verlauf der maximalen Temperatur aller Elemente der Lagerkammer ausgewertet. Wird für das Referenzmodell hingegen der Vergleichsort CONCR, welcher die kleinste Distanz zum Wirtgestein und damit die höchsten Temperaturen innerhalb der Lagerkammer aufweist, herangezogen, so zeigt sich eine noch bessere Übereinstimmung mit dem Makroelement-Modell.

Bei den HAA-Lagerkammern (exemplarisch gezeigt für HAA C) treten erhebliche Unterschiede zwischen den beiden Modellen bezüglich des Temperaturverlaufs auf. Gemäss ergänzenden Modellrechnungen sind diese auf die unterschiedliche räumliche Zuweisung des Wärmequellterms zurückzuführen: Im Makroelement-Modell wird der Wärmequellterm über den gesamten Lagerkammerquerschnitt verteilt, während er im Referenzmodell nur dem Kanister (Material CANIS, Fig. 6-2) zugeordnet ist.

- Druck:

Es resultiert eine gute Übereinstimmung für die Druckverläufe in der HAA-Lagerkammer und deren Umgebung. Bei den SMA-Lagerkammern und deren Umgebung wird der Druck im Makroelement-Modell hingegen um bis zu ca. 0.5 MPa überschätzt. Ergänzende Modellrechnungen zeigen, dass die Unterschiede auf die im Makroelement-Modell homogenisierten Transporteigenschaften, insbesondere die Zweiphasenparameter, zurückzuführen sind. Letztere werden im Makroelement-Modell vom Material MORT1 aus dem Referenzmodell übernommen, welches einen relativ niedrigen Kapillardruck von 5E2 Pa aufweist. Im Referenzmodell steht das Wirtgestein hingegen im Kontakt mit einer Betonauskleidung (CONCR), deren Kapillardruck mit 2E6 Pa wesentlich höher liegt und zu einer stärkeren Druckabsenkung im Wirtgestein während der frühen Aufsättigungsphase (bis ca. 1'000 Jahre) führt.

- Gassättigung:

An den Vergleichsorten innerhalb des Wirtgesteins, sowohl im Umfeld der SMA- als auch der HAA-Lagerkammern, zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung bezüglich der Gassättigung. In den SMA-Lagerkammern stimmt der Vergleichsort MORT1 im Referenzmodell gut mit der maximalen Gassättigung des Makroelement-Modells überein, da letzterem der Kapillardruck des MORT1 zugrunde liegt (siehe oben). An anderen Vergleichsorten innerhalb der SMA-Lagerkammer des Referenzmodells sind die Abweichungen je nach Material und zugehöriger Kapillardruckkurve grösser. Die auftretenden Unterschiede in den HAA-Lagerkammern sind durch die Homogenisierung der Anfangssättigung und der Kapillardruckbeziehung im Makroelement-Modell erklärbar.

- Wasserfluss:

Es zeigt sich tendenziell eine Unterschätzung der Wasserflüsse vom Wirtgestein in die AUZ der SMA-Lagerkammern sowie vom HAA- zum SMA-Lagerteil, die wiederum zurückzuführen ist auf die geringeren Kapillardrucke der SMA-Verfüllung im Vergleich zum Referenzmodell, wie ergänzende Rechenfälle zeigen. Bei den HAA-Lagerkammern treten aufgrund der homogenisierten Anfangssättigung und Kapillardruckbeziehung zu frühen Zeiten (bis 30 Jahre) Unterschiede auf. Danach gleichen sich die Wasserflüsse vom Wirtgestein in die AUZ aber weitgehend an.

- Gasfluss:

Der Gasfluss vom HAA- zum SMA-Lagerteil wird im Makroelement-Modell sehr gut wiedergegeben. Unterschiede zum Referenzmodell treten bei den Gasflüssen vom Wirtgestein in die AUZ der SMA-/HAA-Lagerkammern auf, die in der Homogenisierung der Lagerkammervorfüllung und der entsprechenden Parametrisierung, insbesondere der Transporteigenschaften, begründet sind.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei Verwendung von homogenen effektiven Parametern für die Tunnelverfüllung und eines grösseren Meshs die wesentlichen Ergebnisse zu Druck, Temperatur, Gassättigung sowie Gas- und Wasserflüssen im Vergleich zu den Simulationen im Rahmen der phänomenologischen Systemanalysen (Kapitel 4.4) sehr gut reproduziert werden können. Nur im unmittelbaren Umfeld der Lagerkammern treten erkennbare Unterschiede auf, die aber für die gegenseitige Beeinflussung von untergeordneter Bedeutung sind.

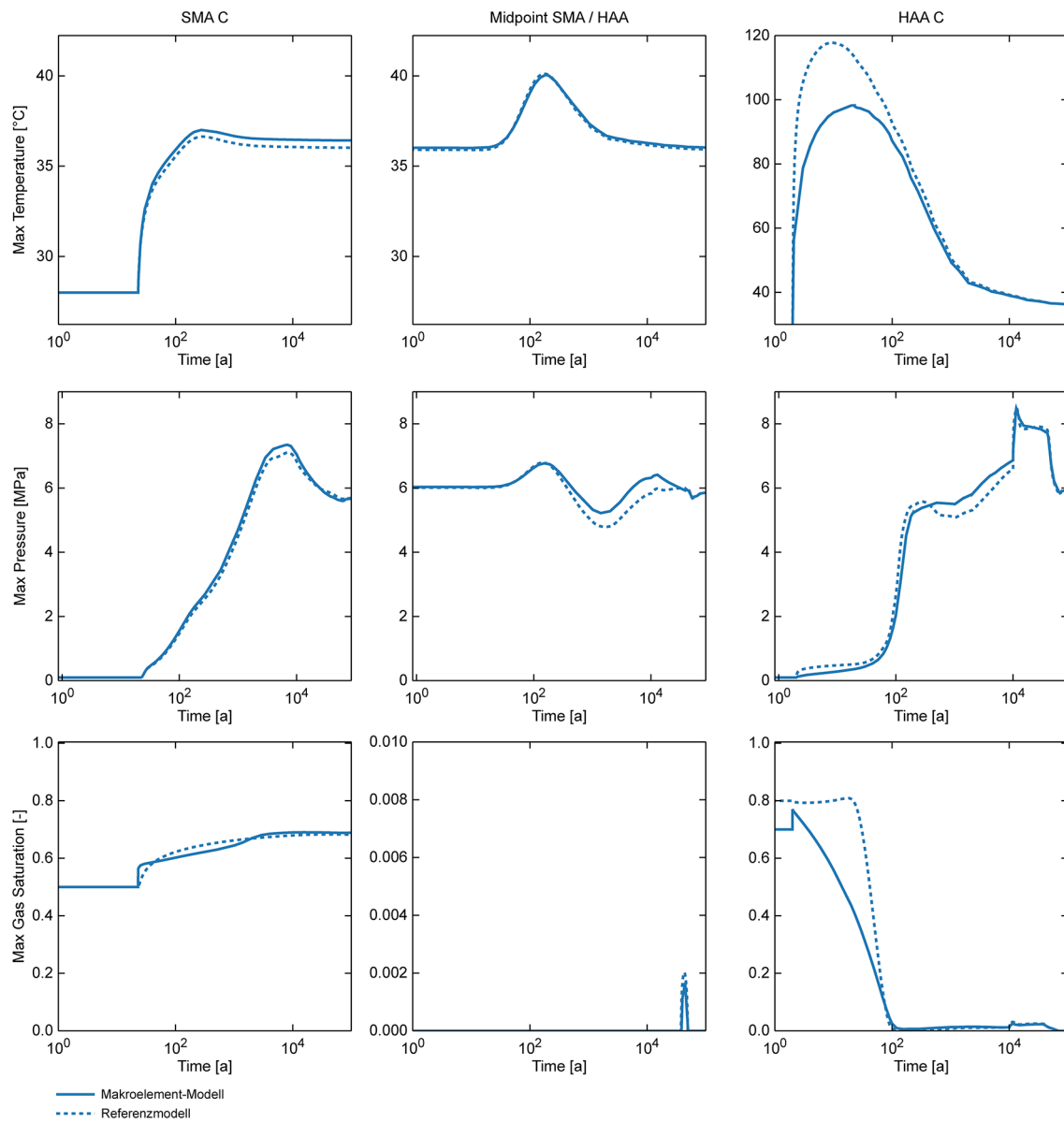


Fig. 6-4: Vergleich Temperatur, Druck und Gassättigung für die zentrale SMA- und HAA-Lagerkammer (Makroelement-Modell: jeweiliges Maximum aller Elemente, Referenzmodell: MORT1 bzw. PELL gemäss Fig. 6-2) sowie den Vergleichspunkt in deren Mitte

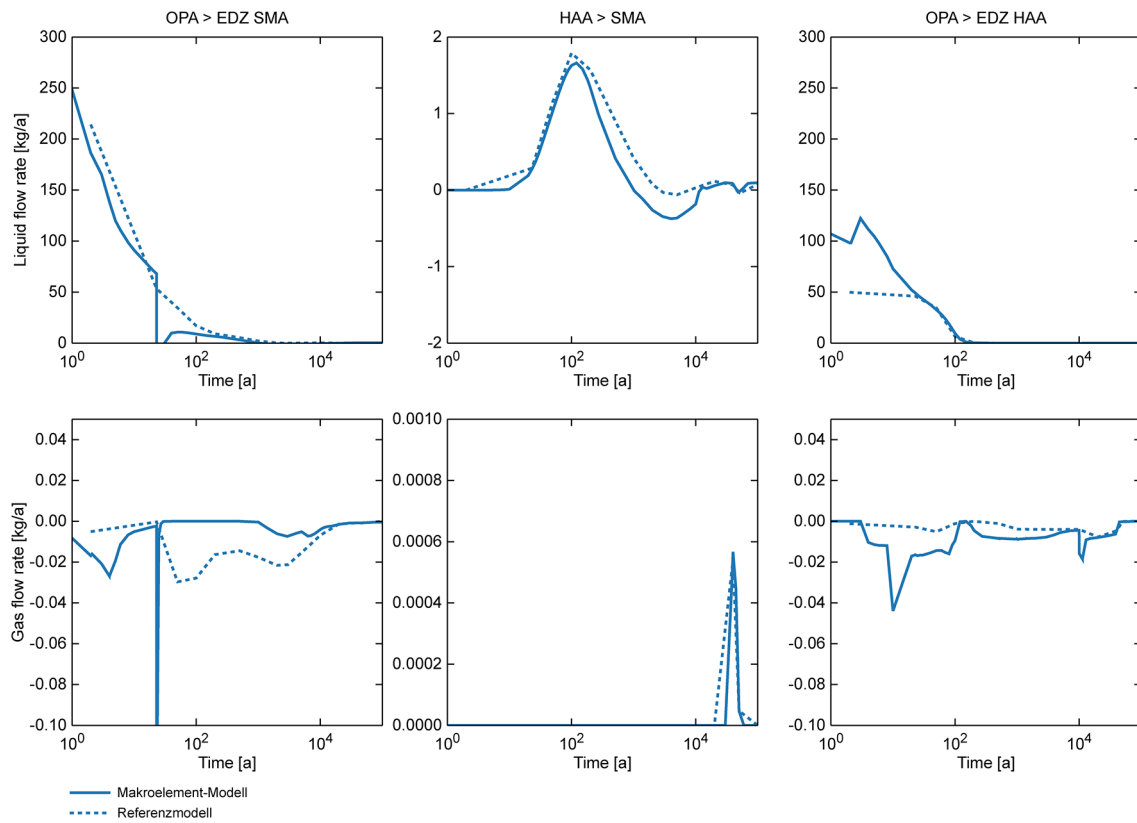


Fig. 6-5: Vergleich Wasser- und Gasflüsse vom Wirtgestein in die AUZ der SMA-/HAA-Lagerkammern sowie vom HAA- zum SMA-Lagerteil durch die vertikale Fläche in der Mitte der beiden Lagerteile

6.2.4 Dimensionierung des Kombi-Makroelements

Wie bereits im vorangehenden Kapitel 6.2.3 erwähnt, werden im Kombi-Makroelement zugunsten eines schlanken Modellaufbaus nicht alle Lagerkammern abgebildet; Symmetrien sollen im Sinne des Makroelement-Modellierungskonzepts weitmöglichst genutzt werden, während die gegenseitige Beeinflussung zwischen den Lagerteilen konservativ erfasst wird. In diesem Kapitel wird die Dimensionierung des Kombi-Makroelements (Anzahl abgebildeter Lagerkammern und deren Skalierung) präsentiert, die diesen Anforderungen genügen.

Analytische Berechnungen haben gezeigt, dass bei Abbildung von lediglich je 0.5 (Konfiguration O1-200¹⁷) oder 1.5 Lagerkammern (Konfiguration O2-200) die Temperatur bei der nächstgelegenen SMA-Lagerkammer im Vergleich zur Situation mit allen HAA-Lagerkammern (Gen-200) deutlich unterschätzt wird, da nur ein Teil der gesamthaft im HAA-Lagerteil gebildeten Wärme erfasst wird. Die relative Unterschätzung nimmt dabei mit zunehmendem Abstand zwischen den Lagerteilen zu (Fig. 6-6). Auf der anderen Seite nimmt die Unterschätzung mit zunehmender Anzahl abgebildeter Lagerkammern ab, die Modellgrösse und damit der numerische Aufwand aber zu.

Um einerseits die Quellterme aller Lagerkammern zu berücksichtigen und andererseits das Modell schlank zu halten, wird das Kombi-Makroelement deshalb gemäss Skizze in Fig. 6-7 und folgender Beschreibung dimensioniert:

- Abgebildet werden je 1.5 Lagerkammern. Die zentralen Lagerkammern (SMA C, HAA C) verbleiben ohne Skalierung, während die seitlichen Lagerkammerhälften (SMA S, HAA S) zur Berücksichtigung aller übrigen Lagerkammern und der Symmetrieebene mit einem Faktor von $(n_{\text{SMA/HAA}}-1)*2$ skaliert werden. Die Skalierung betrifft alle extensiven Grössen, d.h. Volumen, Flächen und Quellterme. Somit werden die Quellterme (Gas und Wärme) aller Lagerkammern vollumfänglich erfasst.
- Wie im Kapitel 6.2.2, erwähnt, lassen sich mittels Dehnungsfaktoren auch die unterschiedlichen Längen der Lagerkammern (in axialer Richtung) vereinfacht abbilden. Die unterschiedlichen Längen zwischen den Lagerteilen werden linear angeglichen.

Vergleichsrechnungen haben gezeigt, dass diese Konfiguration im Vergleich zur Situation mit Abbildung aller Lagerkammern die Wechselwirkung zwischen den Lagerteilen im Hinblick auf die Wärmeausbreitung sowie anderen diffusiven Prozessen konservativ überschätzt (Fig. 6-8).

¹⁷ Die Zahl 200 entspricht der angenommenen Distanz zur einseitigen Dirichlet-Randbedingung mit konstanter Temperatur.

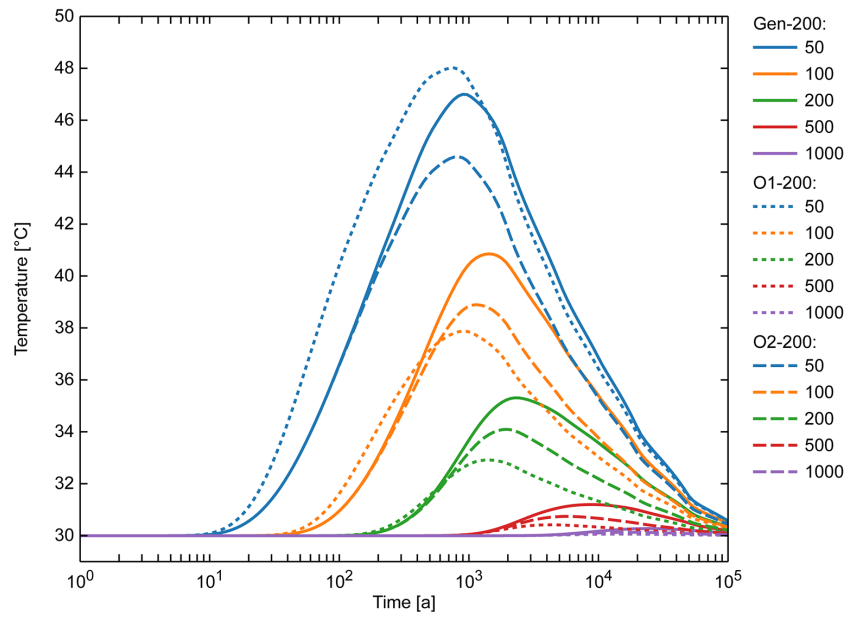


Fig. 6-6: Temperaturverlauf im Zentrum der dem HAA-Lagerteil nächstgelegenen SMA-Lagerkammer als Funktion des Abstands zwischen den Lagerteilen (d_{Kombi}) für die Situation mit allen HAA-Lagerkammern (Gen-200), die Konfiguration mit je 0.5 Lagerkammern (O1-200) und die Konfiguration mit je 1.5 Lagerkammern (O2-200)

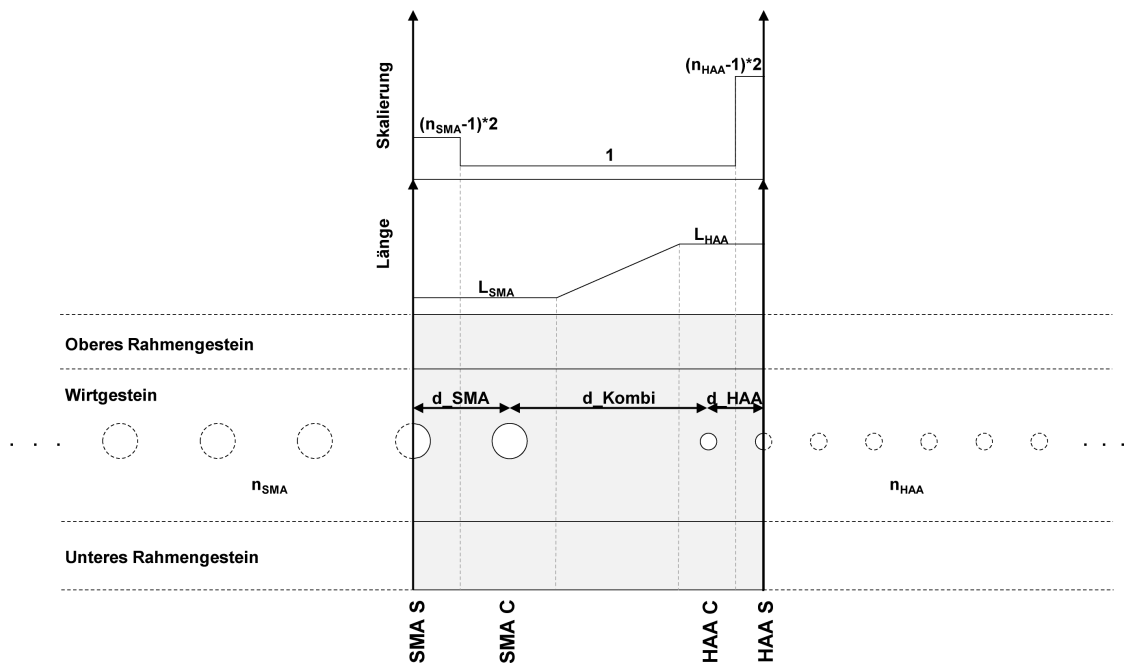


Fig. 6-7: Schematische Darstellung (nicht skalengetreu) des Kombi-Makroelements mit Illustration der Skalierungsfaktoren und Längen in axialer Richtung

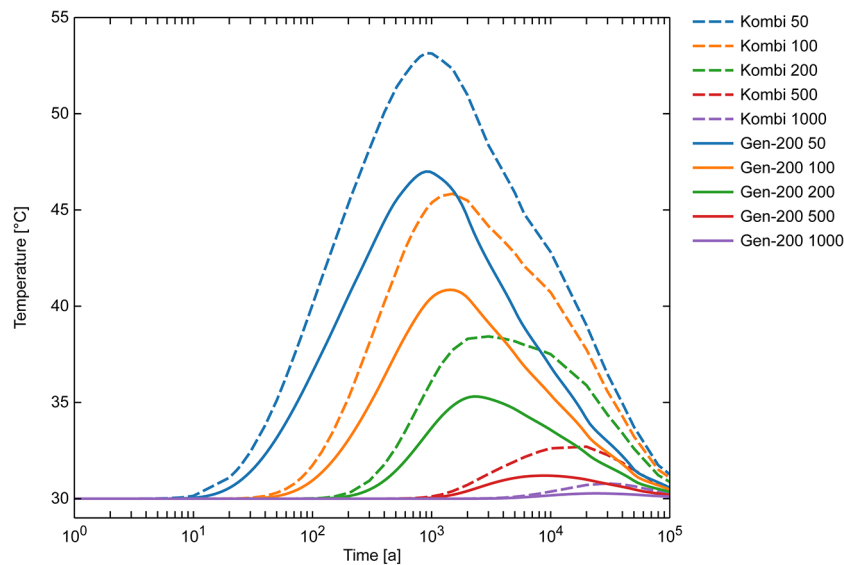


Fig. 6-8: Temperaturverlauf in der zentralen SMA-Lagerkammer (SMA C) als Funktion des Abstands zwischen den Lagerteilen (d_{Kombi}) für die Situation mit allen Lagerkammern (Gen-200) und das Kombi-Makroelement gemäss Fig. 6-7

6.2.5 Makroelement-Modell des gesamten Kombilagers

6.2.5.1 Makroelement-Layout und -Geometrien

Das Layout des erstellten Makroelement-Modells für das gesamte generische Kombilager bzw. die Anordnung und Verbindung der Makroelemente ist in Fig. 6-9 dargestellt. Angegeben wird zudem die Skalierung infolge Symmetrie und repetitiver/zusammengefasster Elemente.

Das umgesetzte Layout orientiert sich an der Beschreibung bzw. Skizzierung eines generischen Kombilager-Layouts auf der Grundlage bestehender Einzellager-Konzepte der Nagra gemäss NTB 16-01 (Nagra 2016a) und den Annahmen in den Arbeiten zum Gastransport aus der Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager (Nagra 2016b, d, e). Die geometrischen Eigenschaften der berücksichtigten Bauwerke sowie der im Modell abgebildeten Lagerstrukturen und deren Zuordnung zu den Makroelementen und Verfüllmaterialien sind in Tab. B-1 und B-2 aufgeführt.

Im Layout nicht berücksichtigt sind die Pilotlager beider Lager. Bei Bauwerken, die in beiden Einzellagern vorhanden sind, im Kombilager jedoch nur einfach geführt werden (Observation Gallery¹⁸, Test Facility, Access Tunnel, Shaft/V3, V4; nicht eingefärbt in Tab. B-1), werden die geometrischen Eigenschaften des HAA-Lagers übernommen (Nagra 2016e).

¹⁸ Siehe Fussnote c zu Tab. B-2 (Anhang B.1).

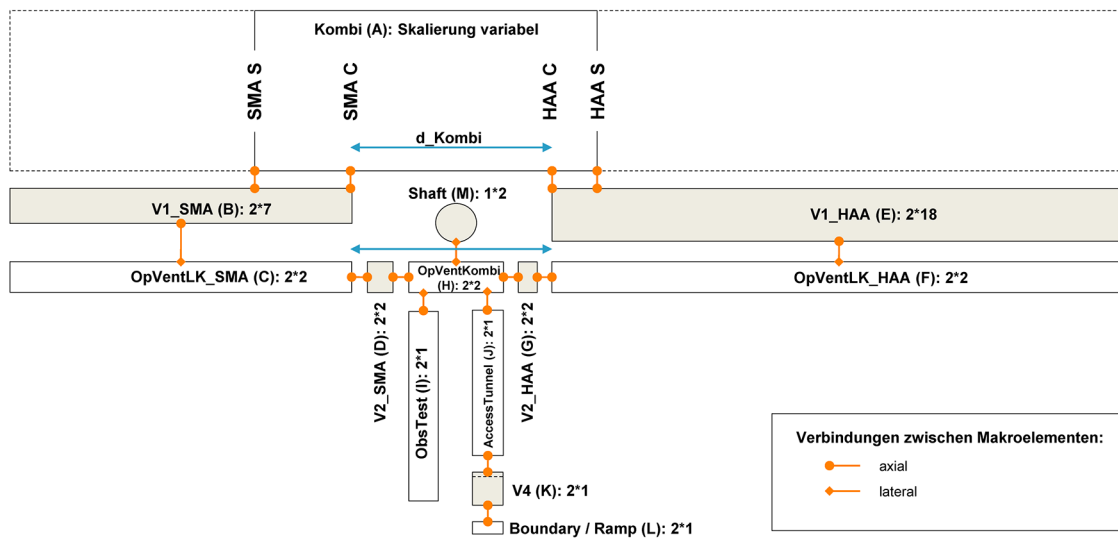


Fig. 6-9: Schematische Darstellung (nicht skalengetreu) des Makroelement-Modelllayouts für das gesamte generische Kombilager

Für jede Lagerstruktur im Modell sind der Makroelement-Name, der Makroelement-Buchstabe und die Skalierung infolge Symmetrie und repetitiver Elemente angegeben. Die partielle Skalierung des Kombi-Makroelements ist mit gestrichelten Linien angedeutet (detaillierte Darstellung der Skalierung in Fig. 6-7). Die vorgenommene axiale Diskretisierung im V4-Siegel zur Vermeidung von Artefakten aufgrund des "Upstream-Weighting" ist ebenfalls als gestrichelte Linie illustriert.

Kernstück des Modells bildet das Kombi-Makroelement A, welches sowohl die SMA- als auch die HAA-Lagerkammern umfasst und deren Wechselwirkung über das Wirtgestein abbildet. Dessen Konfiguration und Skalierung ist bereits im vorangehenden Kapitel 6.2.4 beschrieben und in Fig. 6-7 illustriert. Es werden gesamthaft 7 SMA- und 18 HAA-Lagerkammern¹⁹ berücksichtigt ($n_{\text{SMA/HAA}}$ in Fig. 6-7). Die SMA-Lagerkammern weisen im Basisfall einen axialen Abstand von 85 m (d_{SMA}), die HAA-Lagerkammern einen axialen Abstand von 40 m (d_{HAA}) auf. Der Abstand zwischen den SMA- und HAA-Lagerteilen beträgt im Basisfall 125 m (d_{Kombi}). Die Länge des Kombi-Makroelements in axialer Richtung beträgt für den SMA-Lagerteil 200 m und für den HAA-Lagerteil 800 m. Zwischen den beiden Lagerteilen wird die Länge linear interpoliert.

Ausgehend von den Lagerkammern folgen für jeden Lagerteil die jeweiligen V1-Siegel, der Betriebs-/Bautunnel mit den V2-Siegeln, welche jeweils in den gemeinsamen Betriebs-/Bautunnel münden. Dieser ist verbunden mit dem Schacht, der *Observation Gallery/Test Area* und dem Zugangstunnel, welcher wiederum über das V4-Siegel zur Rampe (Randbedingung) führt.

¹⁹ Da in der vorliegenden Studie nur die Brennelemente (ohne verglaste Abfälle) berücksichtigt werden, werden in dieser generischen Studie nur 18 von insgesamt 20 HAA-Lagerkammern abgebildet (vgl. Nagra 2016a).

Die vertikale Ausdehnung aller Makroelemente ist definiert durch die Stratigraphie, welche im Basisfall nebst dem 110 m mächtigen Opalinuston auch 105 m obere Rahmengesteine (ORG) und 160 m untere Rahmengesteine (URG) umfasst. Die Lagerebene bzw. die Höhe der Tunnelachse liegt für alle Lagerstrukturen in der Mitte des OPA. Die Mächtigkeit der AUZ wird einheitlich zu 1 m angenommen. Die laterale Ausdehnung der Makroelemente beträgt beim Kombi-Makroelement im Basisfall 250 m, bei den übrigen Tunnel-Makroelementen und im Schacht-Makroelement 50 m.

Die Diskretisierung der verschiedenen Makroelemente und der dazugehörigen Tunnelelemente ist exemplarisch in Fig. 6-1 visualisiert. Dem Makroelement "Kombi" liegt der Typ *Kombi* zugrunde, dem Makroelement "Shaft" der Typ *Shaft* und den übrigen Makroelementen der Typ *Tunnel* (Kapitel 6.2.2). Die Tunnel der SMA- und HAA-Lagerkammern sowie alle übrigen Tunnelbauwerke werden als Viereck (Rhombus) diskretisiert. Die Elementgrösse im Kombi-Makroelement beträgt im Opalinuston ca. 10 m und in den Rahmengesteinen ca. 20 m. Bei den übrigen Makroelementen wird eine Elementgrösse von ca. 10 m im Opalinuston vorgegeben, ausserhalb ca. 20 m. Ab einer vertikalen Distanz zur Lagerebene von mehr als 150 m beträgt die Elementgrösse rund 40 m.

Eine axiale Diskretisierung wurde im Sinne einer Optimierung der Modellgrösse und -laufzeit nur im Makroelement des V4-Siegels vorgenommen. Vorbereitende Studien haben gezeigt, dass Artefakte aufgrund des "*Upstream-Weighting*" vorwiegend beim Abfluss über das V4-Siegel einen relevanten Einfluss auf das Ergebnis haben können. Der Schacht inkl. V3-Siegel weist aufgrund der Rotationssymmetrie und der vertikalen Ausrichtung ohnehin eine axiale Diskretisierung auf.

Das Modell besteht im Basisfall insgesamt aus 1'736 Elementen und führt zu einer Rechenzeit von rund 7 Minuten (mit einem einzelnen Prozessor Intel Xeon-Gold 6136 3.0 GHz gerechnet).

6.2.5.2 Anfangs- und Randbedingungen

In einem Modelldurchlauf werden vier Phasen simuliert, wobei das Ergebnis der vorangehenden Phase als Anfangszustand der folgenden Phase übernommen wird:

- **Initialisierung:** Stationäres, hydrostatisches Druckprofil, mit einem Druck auf Lagerebene (600 m) von 5.97 MPa im Basisfall. Stationäres Temperaturprofil mit einem durchschnittlichen Gradienten von 0.043 K/m und einer Temperatur auf Lagerebene von 35.8°C. Druck und Temperatur werden am oberen und unteren Rand fortan festgehalten.
- **Betriebsphase 1 (0 – 2 Jahre):** Alle Lagerstrukturen sind belüftet (60 % relative Feuchte, 1 bar, 28 °C)
- **Betriebsphase 2 (2 – 50 Jahre):** Die HAA-Lagerkammern (Anfangssättigung 23 %, 1 bar, 28 °C) sowie zugehörige Bauwerke (V1_HAA, OpVentLK_HAA, V2_HAA; Anfangssättigung 50 %, 1 bar, 28 °C) sind verfüllt. Die SMA-Lagerkammern und die übrigen Bauwerke bleiben belüftet.
- **Nachverschlussphase (50 – 100'000 Jahre):** Die SMA-Lagerkammern und alle übrigen Bauwerke sind verfüllt (Anfangssättigung 50 %, 1 bar, 28 °C).

Mit der Verfüllung der Lagerbauwerke setzt jeweils auch die Gas- und Wärmebildung ein (siehe Kapitel 6.2.5.3).

Wie erwähnt, wird der obere und untere Modellrand durch eine konstante Druck- und Temperaturrandbedingung beschrieben. Zudem wird die Konzentration aller Komponenten bei

Null festgehalten. Die lateralen Randbedingungen entsprechen bei allen Makroelementen einer *No-flow*-Randbedingung. Im Kombi-Makroelement (A) ist diese aufgrund der Skalierung der seitlichen Lagerkammern in Bezug auf die gegenseitige Wechselwirkung zwischen den Lager teilen allerdings nur beschränkt wirksam.

Es wird angenommen, dass die Lagerbauwerke (ausgenommen Schacht) horizontal auf Lager ebene verlaufen (im Basisfall 600 m unter Terrain). Tatsächlich ist der Zugangstunnel jedoch geneigt (Rampe), und das V4-Siegel befindet sich an der Obergrenze des Wirtgesteins (Übergang OPA/ORG, Tiefe 545 m). Den damit verbundenen hydraulischen Effekten wird mittels einer entsprechenden Druckrandbedingung ausserhalb des V4-Siegels (Makroelement L) Rechnung getragen (5.43 MPa; 55 m über Lagerebene, 545 m Tiefe).

6.2.5.3 Quellterme

Tab. 6-1 gibt eine Übersicht über die Quellterme im Modell mit Beschreibung und Referenz.

Tab. 6-1: Übersicht über die im Modell vorhandenen Quellterme mit Beschreibung und Referenz gemäss den prov. Objektdatensätzen

Quellterm	Bechreibung	Referenz
Gasbildung in Tunnelbauwerken	Gemäss Profiltyp und Länge der berücksichtigten Bauwerke (Tab. B-1). Referenz-Gasbildungsraten im Basisfall	MIRAM 14 (Nagra 2014c, Nagra 2016c)
Gasbildung SMA/ATA	Gesamtes SMA- und ATA-Inventar. Referenz-Gasbildungsraten im Basisfall	MIRAM 14 (Nagra 2014c, Nagra 2016c)
Gasbildung HAA	Nur Brennelemente. Referenz-Gasbildungsraten im Basisfall	MIRAM 14 (Nagra 2014c, Nagra 2016c)
Wärmeleistung SMA/ATA	Excel-Tool Wärmeleistung MIRAM 14 (SMA und ATA)	MIRAM 14 (Nagra 2014c, Nagra 2016c)
Wärmeleistung HAA	Wärmeleistung pro Behälter und Behälter-Typ. Verwendet wird der gewichtete Mittelwert aller Behälter-Typen (BE-S-1, BE-D-2 und BE-D-3), welcher dann mit der Gesamtzahl der Behälter (1894) multipliziert wird.	Analog Kapitel 4 und 5
C-14 SMA	C-14 _{org,congr.rel.} Inventar gemäss NTB 14-03 für SMA und ATA mit einer Freisetzungsrates von 1E-4 1/a. Annahme einer IRF (instant release fraction) von 20 % mit Freisetzung über 10 a (entspricht Freisetzungsrates von 1E-1 1/a).	NTB 14-03 (Nagra 2014b), Capouet et al. (2018)
C-14 HAA	C-14 _{org} Inventar gemäss NTB 14-03 für Brennstoffmatrix, Hüllrohre und IRF mit Freisetzungsrates von 1E-7 1/a (Brennstoffmatrix) und 3.3E-5 1/a (Hüllrohre). Für die IRF wird eine Freisetzung über 10 a angenommen (entspricht Freisetzungsrates von 1E-1 1/a).	NTB 14-03 (Nagra 2014b)

6.2.5.4 Code

Alle Berechnungen werden mit TOUGH3 unter Nutzung des Moduls EOS75r durchgeführt. Letzteres stellt eine modifizierte Form des Moduls EOS7r dar, in welcher Komponente 5 (ursprünglich Luft) die Eigenschaften von Wasserstoff zugewiesen werden, analog der Beschreibung in Kämpfer et al. (2014). Die übrigen vier Komponenten des Moduls EOS7r (Wasser, Brine, Radionuklid 1, Radionuklid 2) werden in EOS75r unverändert übernommen.

C-14 wird über die Komponente 3 (Radionuklid 1) modelliert, welche mit einer Rate erster Ordnung bzw. einer Halbwertszeit von 5'730 Jahre zerfällt und die Löslichkeit von Methan aufweist (Henry Koeffizient von 0.0014 mol/kg/bar).

Mit dem verwendeten Code werden thermo-hydraulische Zweiphasenströmung (Gas-/Fluidphase) und Komponententransport (in den beiden Phasen transportiertes Radionuklid) vollgekoppelt berücksichtigt. Nicht berücksichtigte Prozesse sind:

- Anisotropie des Diffusionskoeffizienten und der Wärmeleitfähigkeit von technischen und geologischen Barrieren
- Temperaturabhängigkeit der Diffusion in flüssiger Phase
- mechanische Effekte inkl. Pathway dilation²⁰

6.2.6 Vergleichsrechnungen für das Makroelement-Modell des gesamten Kombilagers

6.2.6.1 Einordnung und Zielsetzung

Die im Kapitel 6.2.3 durchgeführten Vergleichsrechnungen beschränken sich auf das Kombi-Makroelement der SMA- und HAA-Lagerkammern und damit auf die gegenseitige Beeinflussung zwischen den Lagerteilen über das Wirtgestein. Im Folgenden wird das im vorangehenden Kapitel beschriebene Makroelement-Modell des gesamten Kombilagers, das nebst den Lagerkammern auch den Zugangsbauwerken und den darüber erfolgenden Wechselwirkungen Rechnung trägt, ebenfalls einer Validierung unterzogen, wobei als Referenzmodell das semi-generische 3D-Modell aus Kapitel 4.2.3 dient.

Ziel der Vergleichsrechnung ist es, aufzuzeigen, dass einerseits mit den gewählten Vereinfachungen im Makroelement-Modell die wesentlichen Charakteristiken im Systemverhalten erfasst und andererseits allfällige Abstraktionsfehler quantifiziert werden können. Die gewählten Vereinfachungen im Makroelement-Modell umfassen insbesondere:

- die Zusammenfassung von repetitiven Lagerbauwerken in Lagerstrukturen/Makroelementen unter Ausnutzung/Annahme von Symmetrien;
- Verbindung der Makroelemente ausschliesslich via Lagerstruktur (Tunnel/Schacht) und AUZ.

Voraussetzung für die Validierung ist, dass die beiden Modelle von der gleichen Datengrundlage, dem gleichen Modellkonzept und kompatiblen modelltechnischen Umsetzungen ausgehen bzw. sich die Unterschiede zwischen den Modellen ausschliesslich auf die unterschiedlichen

²⁰ Pathway dilation könnte in vereinfachter Form berücksichtigt werden. Da dieser Prozess in der vorliegenden Studie aber nicht belastet werden soll, wird darauf verzichtet.

Abstraktionslevels beschränken. Dies wurde für die vorliegende Vergleichsrechnung sichergestellt. Da zwecks effizienter Methodikentwicklung gewisse Abweichungen ausserhalb der Vergleichsrechnung hingenommen werden mussten, unterscheidet sich das im Kapitel 6.2.5/6.3.2 beschriebene Makroelementmodell des Basisfalls (für die Systemanalysen zur RN-Freisetzung) von jenem für die in diesem Kapitel 6.2.6 beschriebenen Vergleichsrechnung. Die vorgenommenen Anpassungen am Makroelement-Modell des Basisfalls zur Bereinigung dieser Unterschiede sind im Anhang B.5 dokumentiert.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Vergleichsrechnung dargestellt und diskutiert, und auf deren Grundlage die wesentlichen Schlussfolgerungen gezogen.

6.2.6.2 Ergebnisse der Vergleichsrechnung

Der Vergleich zwischen den Modellen erfolgt für die Zustandsgrössen Druck (P), Temperatur (T) und Gassättigung (Sg) sowie für die Gasflüsse, wobei letztere für den Transport volatiler RN von besonderer Relevanz sind. Die Zustandsgrössen sind in Fig. 6-10, die Gasflüsse in Fig. 6-11 gegenübergestellt. Darüber hinaus wird auch das Gasvolumen und die Wasserstoffmasse im Gesamtmodell verglichen (Fig. 6-12).

Die Zustandsgrössen und Gasflüsse werden jeweils an mehreren Vergleichsorten evaluiert. Die Vergleichsorte mit deren Bezeichnung im Makroelement- und 3D-Modell sind in Tab. 6-2 zusammengestellt; die räumliche Lage ist in Fig. 6-9 für das Makroelement-Modell und Fig. 4-9 für das 3D-Modell dargestellt. Tab. 6-2 folgt derselben Logik wie die dargestellten Ergebnisse in Fig. 6-10 und 6-11:

- Die äusseren Spalten beinhalten die Zustandsgrössen der SMA- (Spalte 1) und HAA-Lagerkammern (Spalte 3) sowie die Gasflüsse über deren V1-Siegel.
- Die mittlere Spalte (Spalte 2) enthält die Zustandsgrössen in den bzw. die Gasflüsse über die V3- und V4-Siegel.

Die Evaluation der Zustandsgrössen erfolgt im Makroelement- und 3D-Modell unterschiedlich. Im 3D-Modell werden die Zustandsgrössen einzelnen Elementen entnommen, die sich jeweils axial in der Mitte und vertikal im unteren Bereich des Bauwerks befinden. Im Makroelement-Modell werden die Zustandsgrössen über alle Elemente einer Lagerstruktur (Tunnel/Schacht) gemittelt. Da die Tunnel aber meist durch nur 1 Element diskretisiert werden, entspricht der Mittelwert ungefähr dem Wert im axialen und vertikalen Zentrum der Lagerstruktur und ist damit gut vergleichbar mit den Zustandsgrössen des 3D-Modells, mindestens für Druck und Temperatur. Bei der Gassättigung können sich, insbesondere bei Verfüllmaterialien mit geringem Kapillardruck, Unterschiede infolge Gravitation ergeben. Der Schacht besitzt im Makroelement-Modell eine Radialsymmetrie und wird axial durch mehrere Elemente diskretisiert; der Mittelwert der Zustandsgrössen kann vom Wert des mittleren Elements abweichen. Darüber hinaus sei auf folgende Besonderheiten hingewiesen:

- Die zentralen Lagerkammern des Makroelement-Modells (A-SMAC/A-HAAC) entsprechen den dem jeweils anderen Lagerteil nächstgelegenen Lagerkammern und sind mit den entsprechenden Lagerkammern des 3D-Modells zu vergleichen: SMACA: right²¹, HAACA: left.

²¹ Da diese Ausgabe nicht verfügbar ist, wird stellvertretend der Vergleichsort SMACA: left herangezogen.

- Die seitlichen Lagerkammern des Makroelement-Modells (A-SMAS/A-HAAS) entsprechen den übrigen n-1 Lagerkammern (Fig. 6-7/6-9) und sind am ehesten mit den mittleren Lagerkammern des 3D-Modells zu vergleichen: SMACA: center, HAACA: center.

Die Evaluation der Gasflüsse erfolgt sowohl im Makroelement- als auch im 3D-Modell kumuliert über alle repetitiven Elemente; beispielsweise werden die Flüsse über alle 7 V1-Siegel der SMA-Lagerkammern summiert.

Die Ergebnisse im 3D-Modell liegen nur bis zu einer Simulationszeit von 62'000 Jahren vor. Im Falle des V3-Siegels weisen die Ergebnisse der Zustandsgrößen eine reduzierte zeitliche Auflösung auf.

Tab. 6-2: Zusammenstellung der Vergleichsorte für die Zustandsgrößen und Gasflüsse mit der jeweiligen Bezeichnung im Makroelement-(ME-) und 3D-Modell (3D), wie sie in Fig. 6-10/6-11 verwendet werden

Beim Makroelementmodell werden die Vergleichsorte der Zustandsgrößen durch eine Kombination aus dem Makroelement-Buchstaben (z.B. A) und dem Verfüllmaterial der Lagerstruktur (z.B. SMAS) beschrieben. Die Gasflüsse werden an Grenzflächen zweier Materialien abgegriffen (z.B. V4>V4BND), wobei das Symbol ">" die Richtung des Flusses angibt.

Zustandsgrößen (P, T, Sg)		SMA-Lagerkammern randlich/mittig	V3 V4	HAA-Lagerkammern randlich/mittig
	ME	A-SMAC/ A-SMAS	M-V3 K-V4	A-HAAC/ A-HAAS
	3D	SMACA: left/ SMACA: center	V3: left V4ACT: V4 Seal	HAATU: left/ HAATU: center
Gasflüsse		Via V1 SMA	Via V3 Via V4	Via V1 HAA
	ME	V1SMA>RestS	V3>RestM V4>V4BND	V1HAA>RestH
	3D	V1_to_SMABR	V3_to_SHFT V4_to_RAMP	V1_to_HAABR

Die Gesamtansicht der Ergebnisse in Fig. 6-10 bis 6-12 macht bereits deutlich, dass die wesentlichen Charakteristiken im Systemverhalten mit dem Makroelement-Modell sowohl qualitativ als auch quantitativ sehr gut erfasst werden. Diese werden im Folgenden beschrieben und diskutiert.

Die Temperaturverläufe zeigen gesamthaft ein konsistentes Bild zwischen den beiden Modellen:

- In den SMA-Lagerkammern und den V3-/V4-Siegeln stimmen die Temperaturverläufe sehr gut überein. Die Charakteristik ist geprägt durch die Angleichung an den geothermischen Gradienten nach Abschluss der Belüftungsphase bei 28°C. Geringe Unterschiede im stationären Zustand sind auf die unterschiedliche Tiefenlage der Tunnel im 3D-Modell zurückzuführen, die sich durch deren Neigung ergibt (insbesondere V4-Siegel). Die

Beeinflussung durch die Wärmeentwicklung der HAA ist (ausser in den HAA-Lagerkammern selbst) in beiden Fällen nicht zu erkennen.

- Die Temperaturverläufe in den HAA-Lagerkammern liegen im 3D-Modell deutlich unter jenen des Makroelement-Modells. Der Grund dafür liegt in der Kombination zwischen der Verteilung der Wärmequellterme und der Position des Beobachtungspunktes. Im 3D-Modell sind die Wärmequellen diskret auf einzelne Elemente der HAA-Lagerkammern verteilt, wobei die Temperaturen in Elementen dazwischen (ohne Wärmequellterm) abgegriffen werden. Im Gegensatz dazu ist der Wärmequellterm im Makroelement-Modell homogen über die gesamte Länge der Lagerkammern verteilt. Die resultierenden Temperaturen im Makroelement-Modell liegen damit höher als in den Elementen zwischen den bzw. ohne Wärmequellen.

Der Druckverlauf zeigt drei unterschiedliche Charakteristiken, die in beiden Modellen konsistent erfasst werden:

- SMA-Charakteristik: Der Druckverlauf in den SMA-Lagerkammern wird im Wesentlichen gesteuert durch die Gasbildung und das Gasspeichervolumen, nach Überschreiten des hydrostatischen Drucks an der Rampe auch durch den Gasabfluss über das V4-Siegel. Eine Differenzierung zwischen den randlichen (A-SMAC/SMACA: left) und den mittleren (A-SMAS/SMACA: center) SMA-Lagerkammern ist in beiden Modellen nicht zu beobachten.

Insbesondere in der Phase des Druckaufbaus lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Druckverläufe feststellen. Dies ist einerseits ein klares Indiz dafür, dass die Gasvolumina sowie die Gasbildungsraten in den Modellen konsistent abgebildet werden, was der direkte Vergleich bestätigt (Fig. 6-12). Andererseits zeigt dies auch, dass die Druckverläufe innerhalb des Lagers trotz der (axial) groben Auflösung im Makroelement-Modell gut wiedergegeben werden können.

Aufgrund des früher einsetzenden Gasabflusses über das V4-Siegel flacht der Druckanstieg im Makroelement-Modell früher ab, während der Druck im 3D-Modell weiter ansteigt. Der Maximaldruck liegt sodann rund 0.2 MPa (3 %) höher als im Makroelement-Modell. Mit abfallendem Druck gleichen sich die Verläufe der beiden Modelle dann wieder weitgehend an.

- V3/V4-Charakteristik: Die Druckverläufe im V3- und V4-Siegel sind anfänglich geprägt durch die rasche Aufsättigung seitens der Randbedingungen oberhalb des ORG bzw. ausserhalb des V4-Siegels (Rampe), die sich in einem raschen Druckanstieg niederschlägt. Danach folgt der Druckverlauf der oben beschriebenen SMA-Charakteristik, allerdings in gedämpfter Form aufgrund der Nähe zur Randbedingung mit konstantem Druck.

Der anfängliche Druckaufbau im V3-Siegel geht im 3D-Modell gegenüber dem Makroelement-Modell langsamer, jener im V4-Siegel schneller vonstatten. Diese Abweichungen dürften durch die unterschiedliche Evaluation der Vergleichsgrössen (Mittelung vs. Einzelvolumina) und/oder Randeffekte bzw. eine unterschiedliche modelltechnische Umsetzung der Randbedingung²² hervorgerufen werden. Die Maximaldrücke unterscheiden sich indes um nur 0.2 bzw. <0.1 MPa.

- HAA-Charakteristik: Die HAA-Lagerkammern sind durch die dichte Bentonitverfüllung vom übrigen Bereich des Kombilagers weitgehend entkoppelt und zeigen eine eigene Charakteristik im Druckverlauf. Diese ist geprägt durch zwei Druckpeaks. Der erste wird durch die rasche Aufsättigung sowie die Wärmeentwicklung bzw. den thermohydraulischen Druckpuls

²² Im Makroelement-Modell wird die Druck-Randbedingung über ein Element mit sehr grossem Volumen, jedoch sehr kleiner Distanz zum Interface implementiert.

im Wirtgestein induziert. Der zweite Druckpeak wird durch die ab 10'000 a markant ansteigende Gasbildung hervorgerufen. Zudem wird dieser massgeblich durch den radialen Gasabfluss ins Wirtgestein gesteuert, welcher den weitaus grössten Teil des Gesamtabflusses darstellt; der Gasabfluss in axialer Richtung über das V1-Siegel macht weniger als 1 % davon aus.

Zwischen den randlichen und mittleren Lagerkammern zeigt sich eine Differenzierung des Druckverlaufs, die ebenfalls konsistent erfasst wird: In den mittleren Lagerkammern (A-HAAS/HAATU: center) steigt der erste Druckpuls schneller an und das zweite Druckmaximum liegt höher als in den randlichen Lagerkammern (A-HAAC/HAATU: left). Das Maximum des zweiten Druckpeaks liegt im 3D-Modell rund 0.7 MPa (8 %) höher als im Makroelement-Modell.

Auch in Bezug auf die Gassättigung werden die Charakteristiken in den beiden Modellen übereinstimmend abgebildet:

- Die Entwicklung der Gassättigung in den SMA-Lagerkammern ist geprägt durch eine Ent-sättigung, die bis ca. 1'000 a durch die hohen Kapillardrücke in der durch die Belüftung entsättigten AUZ, danach durch den Druckaufbau angetrieben wird. Erst nach ca. 50'000 a, sobald der Gasdruck unter das hydrostatische Niveau der Lagerebene fällt, setzt die Auf-sättigung ein.

Die scheinbare Aufsättigung im 3D-Modell direkt zu Beginn der Nachbetriebsphase ist auf die unterschiedliche Evaluation der Gassättigung zurückzuführen: Im 3D-Modell werden die Tunnel im Querschnitt durch 4 Elemente diskretisiert (ausser HAA-Tunnel), wobei die Gas-sättigung (wie auch die anderen Zustandsgrössen) in einem der unteren Elemente abgegriffen wird. Die gravitative Umlagerung des anfänglich homogen verteilten Porenwassers bei den kleinen Kapillardrücken der Tunnelverfüllung wird damit räumlich aufgelöst und führt in den unteren Elementen zu einer Abnahme der Gassättigung. Gemittelt über alle Elemente nimmt die Gassättigung gemäss dem oben beschriebenen Verhalten jedoch zu.

- Im V4-Siegel wird die Charakteristik des Gassättigungsverlaufs grundsätzlich konsistent erfasst. Diese ist zu Beginn durch die rasche und vollständige Aufsättigung geprägt. Nach der Druckumkehr setzt dann die Ent-sättigung ein. Auffällig ist, dass diese im 3D-Modell später einsetzt, sich danach aber schneller entwickelt; die Gassättigung im unteren Element steigt etwa doppelt so hoch an wie im Makroelement-Modell.
- Die V3-Siegel zeigen in beiden Modellen eine rasche Aufsättigung durch einerseits die hohen Zuflüsse vom oberen Modellrand und andererseits den hohen Kapillardruck des V3-Siegels. Im 3D-Modell erfolgt die Aufsättigung jedoch deutlich langsamer als im Makroelement-Modell, was vermutlich auf die unterschiedliche Evaluation der Vergleichsgrössen und/oder Randeffekte bzw. eine unterschiedliche modelltechnische Umsetzung der Randbedingung zurückgeführt werden kann.
- Die HAA-Lagerkammern zeigen in beiden Modellen eine schnelle Aufsättigung, die durch den hohen Kapillardruck der Bentonitverfüllung in Kombination mit dem thermo-hydraulischen Druckpuls im Wirtgestein zustande kommt. Der Druckanstieg infolge Gasbildung führt aufgrund des hohen Kapillardrucks sowie der geringen Permeabilität nur zu einer geringen Ent-sättigung, die in den beiden Modellen mit nahezu perfekter Übereinstimmung abgebildet wird.

Die Gasflüsse mit ihren unterschiedlichen Charakteristiken werden in den beiden Modellen konsistent erfasst:

- Die Gasflüsse über die Modellränder bzw. das V4- und V3-Siegel sind für die Freisetzung volatiler Radionuklide von besonderer Relevanz. Diese werden in beiden Modellen dominiert durch den Gasfluss über das V4-Siegel, welcher sich nach Erreichen des Maximaldrucks der Gasbildungsrate und somit einem quasi-stationären Zustand angleicht. Demgegenüber spielt der Gasfluss über das V3-Siegel, welcher um rund zwei Grössenordnungen tiefer liegt, eine untergeordnete Rolle. Dies aufgrund des höheren Kapillardrucks im Vergleich zum V4-Siegel, der zu kleineren Gassättigungen und damit zu einem höheren effektiven Widerstand führt.

Auffällig ist, dass der Gasfluss über das V4-Siegel im 3D-Modell zwar ca. 1'000 a später einsetzt, danach aber stärker ansteigt als im Makroelement-Modell. Der Gasfluss verhält sich damit analog zur Gassättigung des V4-Siegels; die Entsättigung setzt zwar später ein, schreitet dann aber schneller voran als im Makroelement-Modell. Der maximale Gasfluss über das V4-Siegel liegt ca. 30 % höher und wird rund 2'000 a früher erreicht als im Makroelement-Modell.

Der Gasfluss über das V3-Siegel ist in gutem Einklang mit dem 3D-Modell. Der auf-sättigungsbedingte Abfluss nach 100 a bleibt im Makroelement-Modell zwar aus, der gasbildungsinduzierte Abfluss setzt in beiden Modellen aber praktisch zeitgleich ein und die maximalen Gasflüsse liegen innerhalb von ca. 10 %.

- Die Gasflüsse innerhalb des Lagers (via V1-Siegel) stimmen im SMA-Bereich sehr gut überein (Abweichungen meist < 20 %) und gehen in beiden Modellen nach einer transienten Anfangsphase in einen quasi-stationären Zustand über, wo die Gasflüsse der Gasbildungsrate entsprechen.

Im HAA-Bereich sind die Abweichungen jedoch grösser. Die Gasflüsse via V1-Siegel setzen im 3D-Modell früher ein und das Maximum liegt um bis zu einem Faktor 3 höher. Eine plausible Erklärung für diese Unterschiede konnte bislang nicht gefunden werden²³. Es ist allerdings zu bedenken, dass die Gasflüsse aus den HAA-Lagerkammern via V1-Siegel gesamthaft von untergeordneter Relevanz sind. Der weitaus grösste Teil des gebildeten Gases in den HAA-Lagerkammern fliesst über das Wirtgestein ab. Diese wesentliche Charakteristik wird in den beiden Modellen konsistent erfasst.

²³ Weitere modelltechnische Inkonsistenzen zwischen den Modellen sind nicht bekannt, können allerdings auch nicht vollständig ausgeschlossen werden.

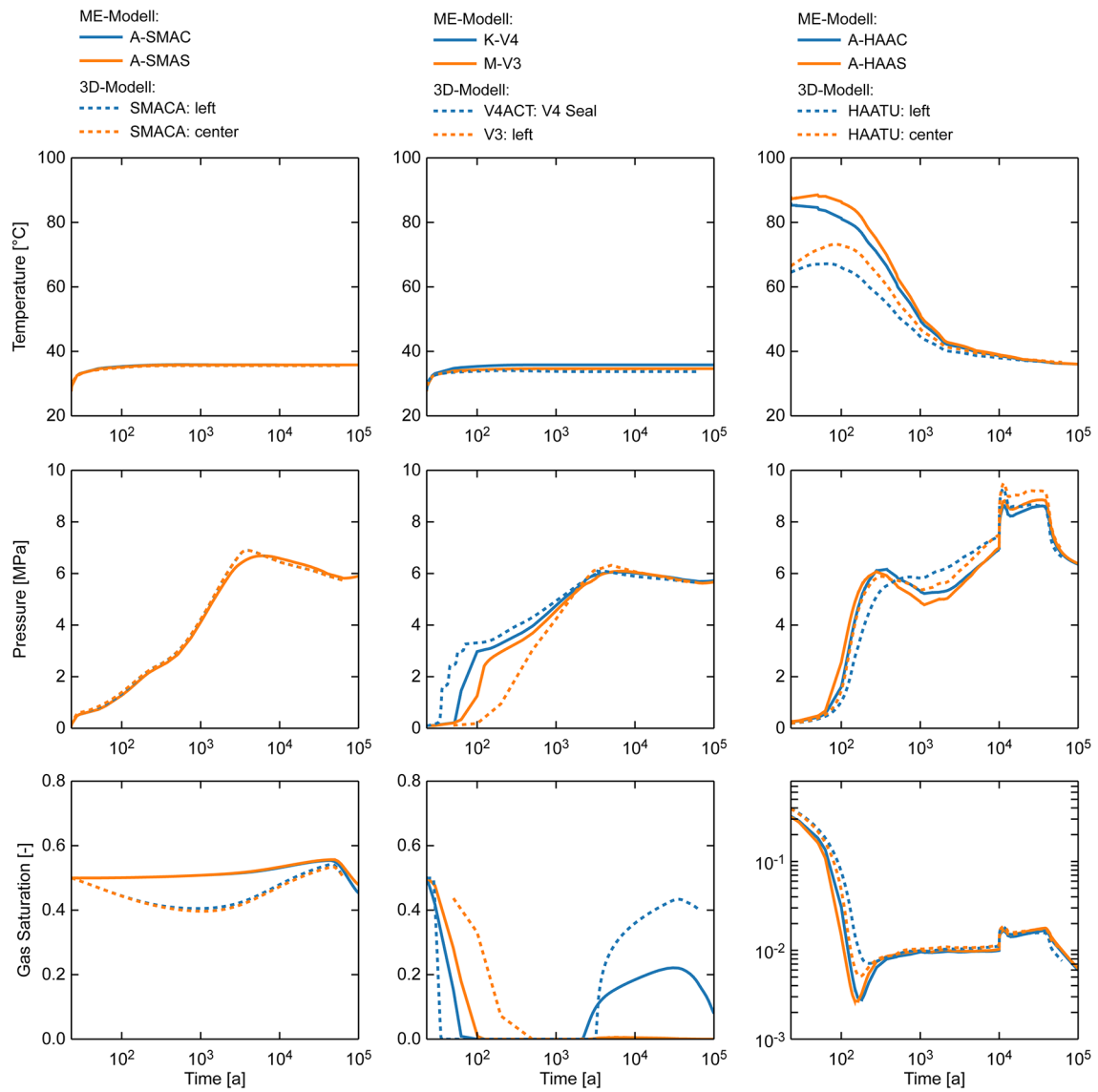


Fig. 6-10: Makroelement-(ME-)Modell vs. 3D-Modell: zeitlicher Verlauf von Temperatur, Druck und Gassättigung in den SMA- (links) und HAA-Lagerkammern (rechts) sowie den V3- und V4-Siegel (Mitte)

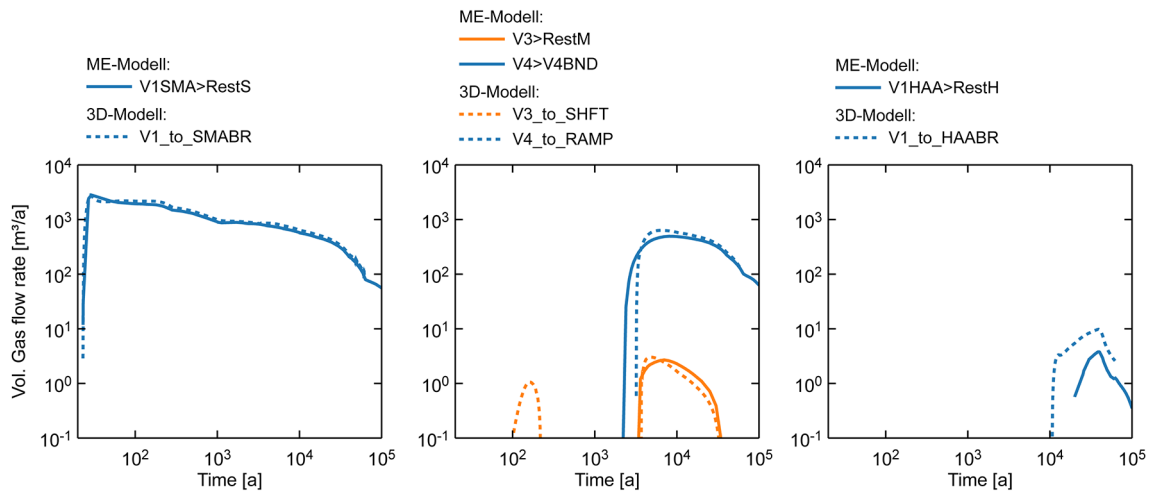


Fig. 6-11: Makroelement-(ME-)Modell vs. 3D-Modell: zeitlicher Verlauf der Gasflüsse über die V1-Siegel der SMA- (links) und HAA-Lagerkammern (rechts) sowie über das V3- und V4-Siegel (Mitte)

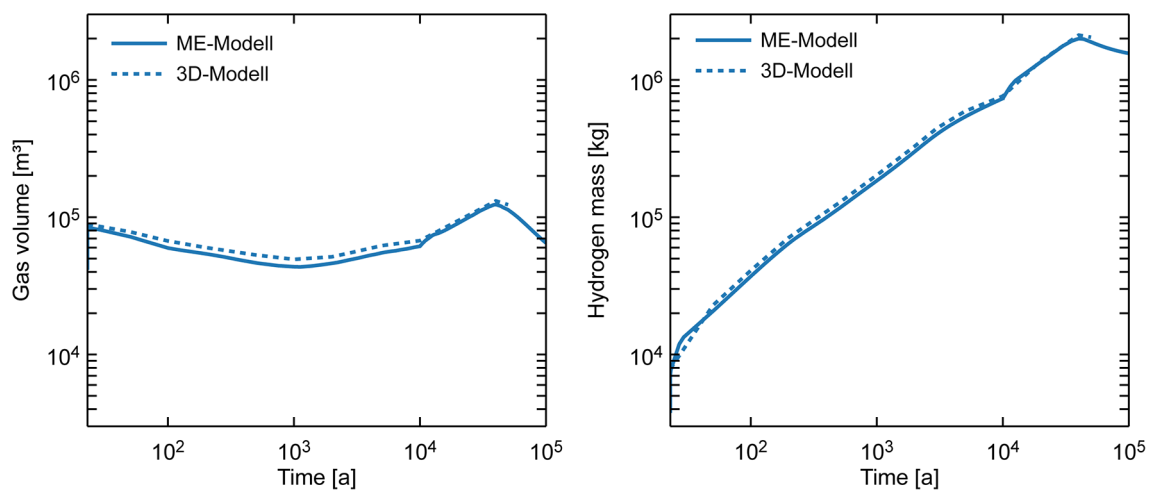


Fig. 6-12: Makroelement-(ME-)Modell vs. 3D-Modell: zeitlicher Verlauf des Gasvolumens sowie der Wasserstoffmasse im Gesamtmodell

6.2.6.3 Schlussfolgerungen

Die durchgeführte Vergleichsrechnung zwischen dem Makroelement-Modell des gesamten Kombilagers und dem semi-generischen 3D-Modell hat gezeigt, dass – nach Bereinigung der Datengrundlage, des Modellkonzepts und dessen modelltechnischer Umsetzung – die wesentliche Charakteristik des Systemverhaltens bezüglich Druck, Temperatur, Gassättigung und insbesondere Gasfluss mit dem Makroelement-Modell sowohl qualitativ als auch quantitativ verlässlich erfasst wird. Die Abstraktionsfehler lassen sich folgendermassen beziffern:

- Maximaldrücke in SMA-/HAA-Lagerkammern: innerhalb 10 %
- maximale Gasflüsse via V4-/V3-Siegel sowie V1-Siegel SMA: innerhalb 30 %
- maximale Gasflüsse via V1-Siegel HAA (von untergeordneter Relevanz): innerhalb Faktor 3

Diese Abstraktionsfehler insbesondere der Gasflüsse über die Modellränder sind im Vergleich zu anderen Unsicherheiten der Modellparametrisierung als gering zu werten. Entsprechend führen die getroffenen Vereinfachungen zu keiner signifikanten Verfälschung der Ergebnisse, was die Anwendung des Makroelementmodells für Systemanalysen zur RN-Freisetzung im Rahmen der vorliegenden Methodikentwicklung validiert.

6.3 Systemanalysen

Wie eingangs von Kapitel 6 erwähnt, liegt der Fokus der im Folgenden präsentierten Systemanalysen auf Aspekten der Lagerkonfiguration, welche die RN-Freisetzung beeinflussen. Dies sind v.a. Aspekte, die den Transport volatiler Radionuklide über den Gaspfad entlang der Untertagebauwerke beeinflussen. Die Systemanalysen fokussieren deshalb sowohl auf normierte Aktivitätsflüsse als direkter Indikator der RN-Freisetzung, wie auch auf die in den vorherigen Kapiteln schon verwendeten Grössen Druck, Temperatur und Gassättigung sowie Gasflüsse, die sich auf das Zweiphasenflussverhalten per se beziehen (siehe auch Kapitel 6.3.1).

Die Systemanalysen umfassen sowohl deterministische wie auch probabilistische Betrachtungen, deren wichtigste Merkmale und Ziele im Folgenden erläutert werden:

Deterministische Betrachtungen

- Basisfall (Kapitel 6.3.2):
Der Basisfall gründet auf den Referenzwerten aller Modellparameter und repräsentiert damit das erwartete Systemverhalten des (generischen) Kombilagers.
- Vergleich Kombilager mit Einzellager (Kapitel 6.3.2):
Das Kombilager wird zu je einem SMA- und HAA-Lager reduziert, indem der jeweils andere Lagerteil weggelassen wird. Die Parametrisierung der beibehaltenen Lagerstrukturen entspricht unverändert den Referenzwerten. Damit lässt sich das Systemverhalten der Lagerteile in einem Kombilager mit jenem der jeweiligen Einzellager vergleichen.

Probabilistische Betrachtungen

- Globale Sensitivitätsanalyse (Kapitel 6.3.3):

Die Sensitivitätsanalyse dient der Evaluation der Sensitivität ausgewählter Indikatoren auf die Modellparameter und erlaubt, eine Rangierung (Ranking) bezüglich deren Einfluss zu erstellen. Bei einer globalen Sensitivitätsanalyse wird die Parametersensitivität nicht nur an einem bestimmten Punkt im Parameterraum, sondern verteilt über die ganze Bandbreite aller Parameter erfasst.

- Ungewissheitsanalyse (Kapitel 6.3.4):

Die Ungewissheitsanalyse übersetzt die Ungewissheit der (sensitivsten) Modellparameter in eine Ungewissheit der Systemantwort bezüglich ausgewählter Indikatoren. Auf dieser Grundlage lassen sich im Sinne einer Robustheitsanalyse Rechenfälle bzw. Parameterkombinationen identifizieren und analysieren, die zu ungünstigen Situationen führen können (z.B. zu hohen Drücken oder höheren RN-Freisetzen). Auf dieser Grundlage können sicherheitstechnische Optimierungen durchgeführt oder – sollten definierte Grenzwerte (performance targets; z.B. ein Maximaldruck) überschritten werden – sicherheitstechnische Anforderungen abgeleitet werden.

6.3.1 Variierte Parameter und ausgewertete Indikatoren

Zur Simulation des Basisfalls und zum Vergleich des Kombi- mit zwei Einzellagern werden Referenzwerte für die Gesamtheit der Modellparameter festgelegt (siehe Anhang B.3).

Bei den probabilistischen Betrachtungen sind zudem für die zu variierenden Modellparameter die angenommene Verteilung (für die vorliegende exemplarische Anwendung der Methodik: Gleich-Verteilung, Log-Gleich-Verteilung und diskrete Verteilung sowie abgeleitete Größen²⁴) sowie die entsprechende Bandbreite (oberer und unterer Eckwert) zu definieren. Tab. 6-3 gibt einen Überblick über die im Zuge der probabilistischen Sensitivitäts- und Ungewissheitsanalyse variierten Parameter (insgesamt 94 Parameter). Die entsprechenden Parameterbandbreiten und -verteilungen sind im Anhang B.2 (Tab. B-3) zusammen mit dem jeweiligen Referenzwert (für den Basisfall) zusammengestellt.

Zur Analyse des Systemverhaltens im Basisfall und zum Vergleich des Kombi- mit zwei Einzellagern (Kapitel 6.3.2) werden die eingangs Kapitel 6 erwähnten Indikatoren in Bezug auf die RN-Freisetzung und das Zweiphasenflussverhalten herangezogen.

Zur Beurteilung der sicherheitstechnischen Wirksamkeit der technischen und geologischen Barrieren im Hinblick auf die ihnen zugeordneten Langzeitsicherheitsfunktionen im Rahmen der probabilistischen Systemanalysen (Kapitel 6.3.3 und 6.3.4) wird ein Teil der in Tab. 3-1 spezifizierten Indikatoren verwendet. Tab. 6-4 gibt einen Überblick zu den ausgewerteten Indikatoren und den dazugehörigen Lokationen im numerischen Modell.

²⁴ D.h., der Parameter hängt über eine definierte Beziehung von einem anderen Parameter ab.

Tab. 6-3: Überblick über die im Rahmen der probabilistischen Sensitivitäts- und Ungewissheitsanalyse variierten Parameter

Kategorie	Varierte Parameter
Materialeigenschaften Gestein, Siegel, Verfüllung	• TH-Eigenschaften (Zweiphasenparameter, Anisotropie für Permeabilität) • RN-Transporteigenschaften (Diffusion, Porosität)
Systemeigenschaften	• Mächtigkeit Wirt- und Rahmengesteine • Distanz zwischen Lagerkammern^a und Lagerteilen^b • Tiefe Lagerebene • Länge der Siegel • Einschlusszeit für C-14 • Dauer Belüftung, relative Feuchte • Gasbildung SMA/ATA, HAA, Tunnel • Wärmeleistung HAA

^a Die Distanz zwischen den SMA- bzw. HAA-Lagerkammern ($d_{\text{SMA}}/d_{\text{HAA}}$) beeinflusst auch die Länge der entsprechenden Betriebs-/Bautunnel (OpVentLK_SMA bzw. OpVentLK_HAA, siehe Fig. 6-9).

^b Die Distanz zwischen den SMA- und HAA-Lagerteilen (d_{Kombi}) beeinflusst auch die Länge des gemeinsamen Betriebs-/Bautunnels (OpVentKombi, siehe Fig. 6-9).

Tab. 6-4: Überblick zu den ausgewerteten Indikatoren im Rahmen der probabilistischen Sensitivitäts- und Ungewissheitsanalyse mit den dazugehörigen Lokationen im numerischen Modell.

Das Symbol ">" gibt die Richtung des Flusses an. Beispiel: AUZ > OPA beschreibt den Fluss von der AUZ ins Wirtgestein (Opalinuston).

Betrachtete Sicherheitsfunktion	Indikator/Lokation
Potenzielle Beeinträchtigung der Radionuklidrückhaltung	Maximale normierte Aktivitätsflüsse • SMA/HAA-Lagerkammer > Siegel V1 • AUZ > OPA (Wirtgestein) • OPA > RG (Rahmengesteine), OPA > ORG (obere Rahmengesteine), OPA > URG (untere Rahmengesteine) • ORG > UB (oberer Modellrand), URG > LB (unterer Modellrand), RG > Bound (Flüsse aus den Rahmengesteinen) • Schacht > UB • Siegel V4 > Rampe • über alle Ränder (> Bound)
Potenzielle Beeinträchtigung der Barrierenwirksamkeit	Maximaldruck, -temperatur sowie Verhältnis Maximaldruck zum lithostatischen Druck und maximale Temperaturänderung im Vergleich zur in-situ Temperatur • SMA S/C • HAA S/C

6.3.2 Basisfall Kombilager und Vergleich mit Einzellagern

Für den Basisfall werden die Referenzwerte aus Tab. B-3 benutzt. Diese sind, zusammen mit den nicht variierten Grössen, in Tab. B-4 zusammengestellt (Anhang B.3).

Um das Verhalten des Kombilagere mit jenem eines separaten HAA- und SMA-Lagers vergleichen zu können, wird der Basisfall des Kombilagermodells in zwei Rechenfällen zu einem reinen SMA- bzw. HAA-Lager reduziert. Technisch werden dazu die Lagerstrukturen des jeweils anderen Lagerteils inkl. AUZ mit Opalinuston (OPA) verfüllt.

6.3.3 Globale Sensitivitätsanalyse (Morris OAT)

Die globale Sensitivitätsanalyse erfolgt nach der Methode von Morris (1991), welche konzeptionell folgendermassen beschrieben werden kann:

1. Für jeden zu untersuchenden Modellparameter k wird dessen Bandbreite in p äquidistante normierte Werte $x_{k,norm}$ unterteilt: $x_{k,norm} \in \{0, \frac{1}{p-1}, \frac{2}{p-1}, \dots, 1\}$.
2. Für jeden Parameter wird zufällig ein Startwert für $x_{k,norm}$ bestimmt und auf dessen realen Wert $x_{k,real}$ gemäss seiner Bandbreite bzw. Verteilung übertragen. Es erfolgt die Evaluation des Modells bzw. Indikators $y(x_{k,real})$.
3. In zufälliger Reihenfolge wird jeder Parameter k um eine Stufe geändert $x_{k,norm} + \Delta$, wobei Δ ein Ein- oder Mehrfaches von $\frac{1}{p-1}$, bezogen auf die normierten Werte, ist. Es wird jeweils nur ein Parameter geändert (one-step-at-a-time: OAT). Die Änderungen erfolgen kumulativ, d.h. werden im weiteren Verlauf beibehalten.
4. Die Schritte 2 und 3 werden r mal wiederholt, typischerweise 10- bis 20-mal.

Für jede Parameteränderung Δ in Schritt 3 lässt sich der sog. Elementare Effekt EE des Parameters k auf den Indikator y bestimmen:

$$EE_{y,k,r} = \frac{y(x_{k,norm} + \Delta_r) - y(x_{k,norm})}{\Delta_r}$$

Dieser Wert drückt die erwartete Änderung der modellierten Indikatorgrösse y über die betrachtete Bandbreite des Parameters k aus.

Für eine gegebene Indikatorgrösse y lässt sich für jeden Parameter k pro Wiederholung (bzw. Startwert) r ein EE bestimmen. Die entsprechende Verteilung der EE pro Parameter wird durch deren Mittelwert μ und Standardabweichung σ beschrieben. Bei nicht-monotonen Modellen können sich positive und negative EE gegenseitig auslöschen. Es wird daher zusätzlich ein Mittelwert der Absolutwerte der EE μ^* ermittelt, was ein Ranking der Parameter hinsichtlich der Sensitivität auf eine bestimmte Indikatorgrösse erlaubt²⁵.

$$\mu = \text{mean}(EE)$$

$$\sigma = \text{std}(EE)$$

$$\mu^* = \text{mean}(|EE|)$$

In der vorliegenden Morris-Studie liegen 94 zu variierende Parameter (k) vor. Jeder Parameter wird in $p = 6$ diskrete Werte unterteilt (ausser Gasbildungsraten und Wärmeleistungen $p = 3$), die Schrittweite Δ beträgt demnach 0.2 (bzw. 0.5). Es werden $r = 20$ Startwerte bestimmt mit jeweils k Parametervariationen. Die Anzahl benötigter Modellrechnungen beträgt somit $r * (k + 1) = 1'900$.

²⁵ Zu beachten: Die Elementaren Effekte und damit das μ und μ^* hängen von der gewählten Parameterbandbreite ab.

Einige wenige Modellrechnungen weisen numerische Schwierigkeiten auf; die Anzahl der erfolgreich durchgeführten Modellrechnungen beträgt 1'876 (99 %), die Aussagekraft der Sensitivitätsanalyse ist also gewährleistet.

6.3.4 Monte-Carlo-Ungewissheitsanalyse

Bei der Monte-Carlo-Ungewissheitsanalyse werden r Realisationen aller k Parameter mittels Latin-Hypercube-Sampling generiert, unter Berücksichtigung der jeweiligen Parameterverteilung und -bandbreite. Im vorliegenden Fall werden $r = 5'000$ Realisationen generiert, wovon 4'909 Modellrechnungen (98 %) erfolgreich abgeschlossen werden konnten.

Im vorliegenden Fall werden ausschliesslich gleich, log-gleich und diskrete Verteilungen angenommen. Die Methodik ist aber mittels Transformationen auf beliebige Verteilungen (normal, log-normal, ...) übertragbar.

Das Sampling wird häufig nicht für alle variablen Parameter (wie im vorliegenden Fall), sondern nur für eine Auswahl derselben durchgeführt. Letztere wird zum Beispiel über die 10 sensitivsten Parameter gemäss dem Ranking aus der globalen Sensitivitätsanalyse festgelegt. Dies hat den Vorteil, dass für die weniger sensitiven Parameter, mit Ausnahme der für die globale Sensitivitätsanalyse benötigten Bandbreiten, keine Verteilungsfunktion definiert und begründet werden muss. Während diese Vorteile für die spätere standortbezogene Anwendung der Methodik relevant sein können, sind sie für die beispielhafte Anwendung in dieser Studie von untergeordneter Bedeutung. Es wird deshalb im vorliegenden Fall auf eine Einschränkung der variablen Parameter verzichtet.

6.4 Resultate und Diskussion

6.4.1 Basisfall Kombilager und Vergleich mit Einzellagern

Der Basisfall mit den in Anhang B.1, B.2 und B.3 spezifizierten Parameterwerten repräsentiert das erwartete Verhalten des Systems. Fig. 6-13 zeigt die simulierten Druck-, Temperatur- und Gassättigungsverläufe in den seitlichen und zentralen SMA- und HAA-Lagerkammern²⁶ des generischen Kombilagern mit entsprechenden Querschnittsdarstellungen des Kombi-Makroelements zu unterschiedlichen Zeiten. Es lassen sich folgende Beobachtungen festhalten:

- 100 a: In den HAA-Lagerkammern klingt die Temperatur zwar bereits ab, in deren Umfeld breitet sich der Wärmepuls aber weiterhin aus und induziert dort einen thermohydraulischen Druckpuls. Letzterer beschleunigt zu einem gewissen Grad die sowieso schon schnelle Aufsättigung der HAA-Lagerkammern aufgrund der temperaturbedingten Verringerung der Viskosität des Porenwassers und der hohen Kapillardrücke in der Bentonitverfüllung.
- 500 a: Der Wärmepuls erreicht die zentrale SMA-Lagerkammer (A-SMAC) mit Maximaltemperaturen von 41.8 °C (35.8 °C ungestört, +6 °C). Bei den seitlichen SMA-Lagerkammern (A-SMAS) fällt die Temperaturerhöhung später und geringer aus (+2 °C). Die höheren Temperaturen bei der zentralen SMA-Lagerkammer und insbesondere auch die höheren Druckgradienten führen im Vergleich zu den seitlichen SMA-Lagerkammern zu einer beschleunigten Aufsättigung.

²⁶ In der Legende bezeichnet als A-SMAS/A-SMAC bzw. A-HAAS/A-HAAC; eine Kombination aus Makroelement-Buchstabe (A) und Verfüllmaterial der Lagerstruktur (z.B. SMAS).

- 5'000 a: Infolge Gasbildung in den SMA-Lagerkammern steigt der Druck über hydrostatische Bedingungen und erreicht zu diesem Zeitpunkt das Druckmaximum. Es lässt sich ein Gasfluss von den SMA-Lagerkammern in das Wirtgestein feststellen, die Eindringtiefe ist wegen der moderaten Überdrücke im SMA-Lagerfeld allerdings gering.
- 20'000 a: Die Gasbildung in den HAA-Lagerkammern steigt nach 10'000 Jahren stark an und damit auch der Druck. Die Folge ist ein Gasfluss ins Wirtgestein, dessen Eindringtiefe wesentlich höher ist als jene bei den SMA-Lagerkammern²⁷. Dieser Gasfluss führt auch zu einer Verdrängung von Porenwasser in Richtung der SMA-Lagerkammern, welche für das frühzeitige Einsetzen der Wiederaufsättigung der zentralen SMA-Lagerkammer mitverantwortlich ist.
- 50'000 a: Die Wiederaufsättigung setzt auch bei den seitlichen SMA-Lagerkammern ein (Druck fällt unter hydrostatisches Niveau). Die Gasfront der HAA-Lagerkammern erreicht indes die zentrale SMA-Lagerkammer sowie das ORG und das URG. Da im URG die nach unten zunehmenden hydrostatischen Drücke sowie der Auftrieb der Gasphase einer nach unten gerichteten Ausbreitung entgegenwirken, findet der Gastransport im URG dominant in horizontaler Richtung statt. Da dieser allerdings aufgrund der höheren Permeabilitäten im URG schneller ist als im OPA, dehnt sich die Gasfront im URG entsprechend lateral schneller aus und überholt gar jene im angrenzenden OPA.

Die Wasserstoffflüsse²⁸ aus den SMA- und HAA-Lagerkammern über die beiden Hauptpfade via V1-Siegel in das EGTS und via AUZ ins Wirtgestein zeigt Fig. 6-14. Bei den SMA-Lagerkammern dominiert der Gasfluss in das EGTS, während der Fluss in das Wirtgestein eine untergeordnete Rolle spielt. Dies erklärt auch die geringe Eindringtiefe der Gasphase ins Wirtgestein (Fig. 6-13). In den HAA-Lagerkammern hingegen dominiert der Gasfluss über die AUZ ins Wirtgestein bei Weitem; nur ein marginaler Anteil fliesst über das V1-Siegel ab. Dies erklärt analog die viel grössere Eindringtiefe der Gasphase um die HAA-Lagerkammern (Fig. 6-13). Grund für das unterschiedliche Verhalten ist die unterschiedliche Verfüllung: Die Verfüllung der SMA-Lagerkammern ist sehr gut gasdurchlässig, und der axiale Abfluss über das EGTS stellt den geringsten Widerstand dar. Die Verfüllung der HAA-Lagerkammern ist hingegen sehr gering permeabel, wodurch der radiale Abfluss ins Wirtgestein (mit sehr grosser Kontaktfläche) in diesem Fall den geringsten Widerstand aufweist.

Fig. 6-15 zeigt die Wasserstoff- und normierte Aktivitätsflüsse über die Modellränder. Die Wasserstoffflüsse werden dominiert durch den Abfluss über das V4-Siegel, welcher hauptsächlich durch die SMA-Lagerkammern gespeist wird. Zu späten Zeiten (ab 50'000 a) nimmt der Abfluss über das ORG, welcher primär von den HAA-Lagerkammern gespeist wird, stark zu, liegt aber stets unter dem Abfluss über das V4-Siegel. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch für die Aktivitätsflüsse, wobei der Unterschied zwischen den maximalen Flüssen über die beiden Freisetzungspfade aufgrund der zunehmenden Wirksamkeit des Zerfalls zu späteren Zeiten wesentlich ausgeprägter ist.

²⁷ Beachte: Im Basisfall wird angenommen, dass das gasdurchlässige V4-Siegel signifikant zur Reduktion des Gasdrucks in den SMA-Lagerkammern beiträgt. In den Analysen zur Barrierenintegrität (Kapitel 4 und 5) wird hingegen u.a. der ungünstige Fall angenommen, in dem das V4-Siegel geringdurchlässig ist. Dadurch entstehen hohe Gasdrücke in den SMA-Lagerkammern (sowie den übrigen Lagerbauwerken), welche zu einem erhöhten Gasfluss durch das Wirtgestein in Richtung HAA-Lagerfeld führen.

²⁸ Wasserstoff bildet die Hauptkomponente der Gasphase und wird auch hauptsächlich darin transportiert. Entsprechend stellen die Wasserstoffflüsse bei Zweiphasenbedingungen eine gute Näherung der gesamten Gasflüsse dar.

Die Unterschiede zwischen dem generischen Kombilager und den generischen SMA- bzw. HAA-Einzellagern zeigen Fig. 6-16 bzw. 6-17 jeweils hinsichtlich Druck, Gassättigung sowie Wasserstoff- und normierten Aktivitätsflüssen.

Im Falle eines separaten SMA-Lagers liegt das Druckmaximum in den Lagerkammern etwas höher, da nun Speichervolumen fehlt (v.a. OpVentLK_HAA), welches im Kombilager für das Gas des SMA-Lagerteils zugänglich ist (Fig. 6-16). Zudem bleibt die schnellere Aufsättigung zu frühen und späten Zeiten aus. Dieser Effekt ist demnach auf die Wechselwirkung mit den HAA-Lagerkammern bzw. die Kopplung über das Wirtgestein im Kombilager zurückzuführen (siehe oben). Die Wasserstoff- und Aktivitätsflüsse nehmen aufgrund des reduzierten Speichervolumens im Allgemeinen ebenfalls leicht zu. Einzig zu späten Zeiten ist der Wasserstofffluss über das ORG erwartungsgemäss deutlich kleiner, da dieser im Kombilager primär durch die HAA-Lagerkammern gespeist wird, was sich auch in geringeren Aktivitätsflüssen zu späten Zeiten manifestiert.

Im Falle eines separaten HAA-Lagers bleiben die Drücke und Gassättigungen unverändert (Fig. 6-17). Das HAA-Lager verhält sich demnach als nahezu unabhängiges System und wird von der Existenz/Inexistenz eines SMA-Lagerteils kaum beeinflusst. Grund dafür ist v.a. die sehr dichte Bentonitverfüllung, welche die HAA-Lagerkammern gegenüber den übrigen Lagerbauwerken weitgehend abschottet. Die Wasserstoffflüsse bleiben ebenfalls praktisch unverändert. Eine Ausnahme bildet der Wasserstofffluss über das V4-Siegel, welcher im Kombilager primär durch die SMA-Lagerkammern gespeist wird. Diese Charakteristik ist auch für die Aktivitätsflüsse deutlich sichtbar. Trotzdem dominiert der Pfad über das V4-Siegel zu frühen Zeiten den Wasserstoff- und Aktivitätsfluss über alle Modellränder; erst ab ca. 50'000 a trägt der Abfluss über das ORG sichtbar bei.

Obige Resultate bezogen auf das Mehrphasenflussverhalten und die Temperaturen sind konsistent mit den entsprechenden Ergebnissen der Systemanalysen zur Barrierenintegrität (Kapitel 5.3) und stützen somit die dort diskutierten wesentlichen Charakteristiken des Systemverhaltens. Die numerischen Abweichungen der Resultate begründen sich mit den – und beschränken sich auf die – in Kapitel 6.2.6 diskutierten Aspekte bezogen auf die unterschiedlichen Modellkonzepte.

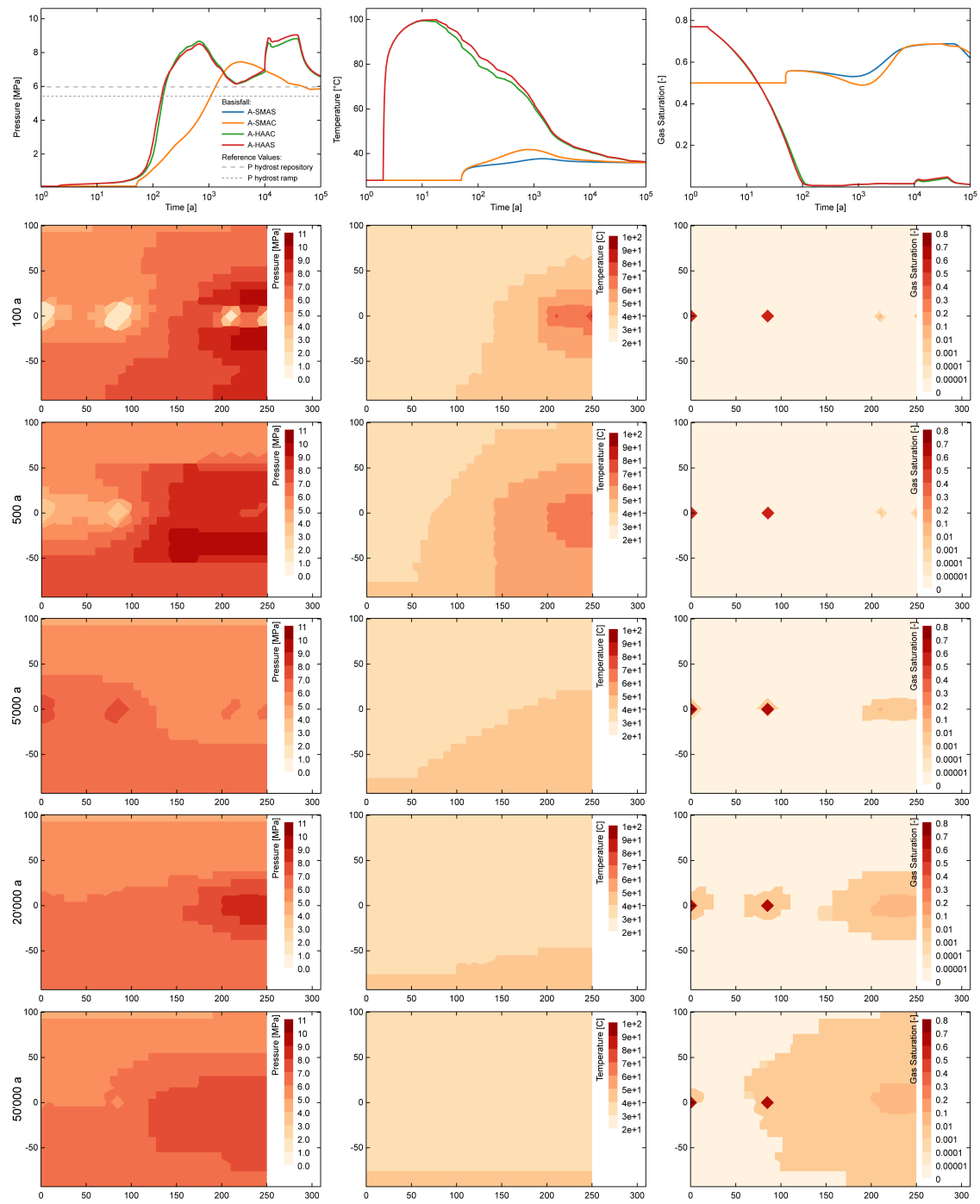


Fig. 6-13: Kombilager: Zeitlicher Verlauf von Druck, Temperatur und Gassättigung in den seitlichen SMA- und HAA-Lagerkammern mit entsprechenden räumlichen Verteilungen zu unterschiedlichen Zeiten

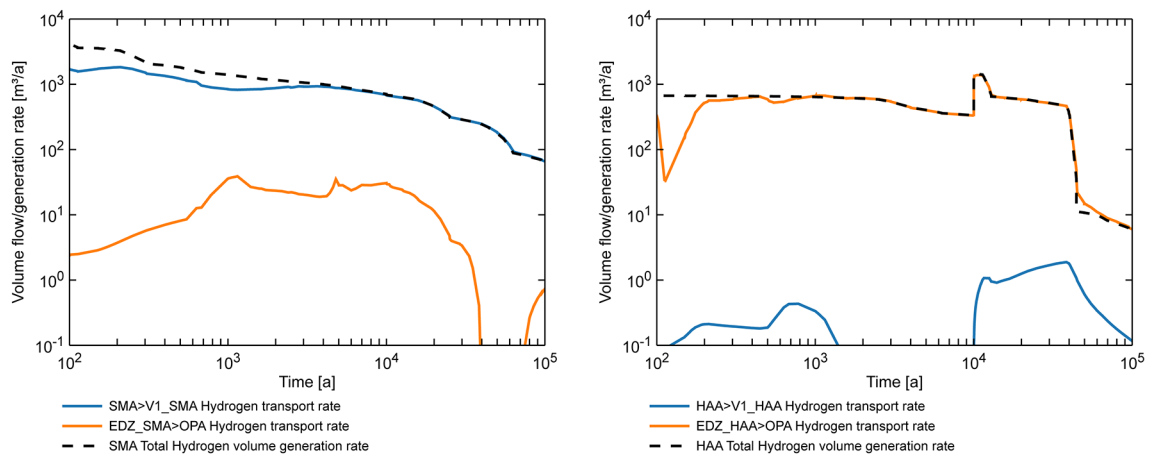


Fig. 6-14: Gasbildung in den SMA- (links) und HAA-Lagerkammern (rechts) mit jeweiligen Wasserstoffflüssen (Summe aus advektiven und diffusiven Wasserstoffflüssen in beiden Phasen) zu den V1-Siegeln und via AUZ ins Wirtgestein

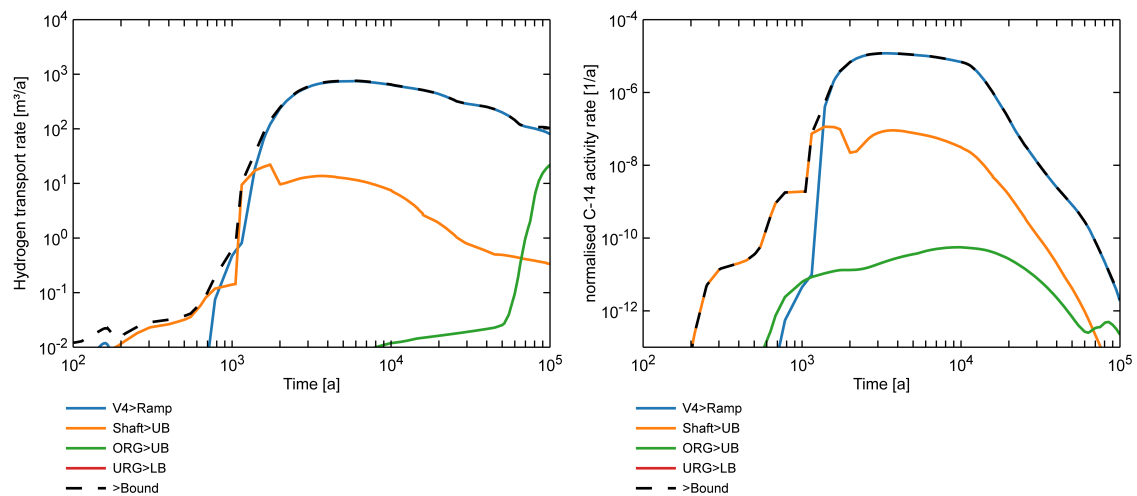


Fig. 6-15: Wasserstoffflüsse (links) und normierte Aktivitätsflüsse (rechts) über die Modellränder

Die Wasserstoff- und normierten Aktivitätsflüsse entsprechen jeweils der Summe aus advektiven und diffusiven Flüssen in beiden Phasen.

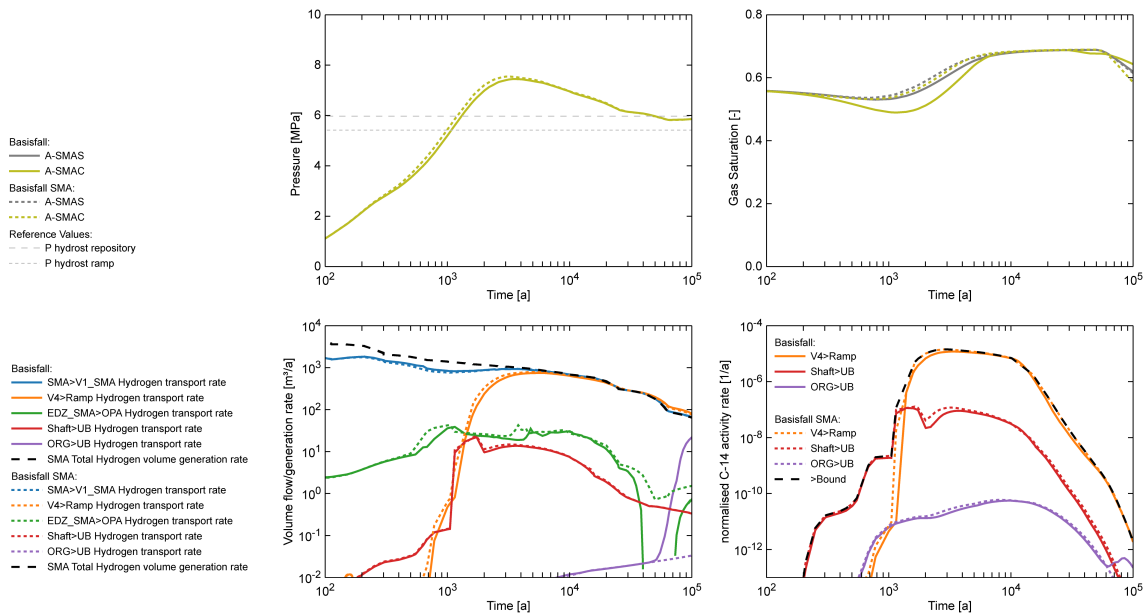


Fig. 6-16: Vergleich Kombilager vs. SMA-Lager: Druck (oben links) und Gassättigung (oben rechts) in den seitlichen und der zentralen SMA-Lagerkammer sowie Wasserstoffflüsse aus den Lagerkammern und über die Modellränder (unten links) sowie normierte Aktivitätsflüsse über die Modellränder (unten rechts)

Die Wasserstoff- und normierten Aktivitätsflüsse entsprechen jeweils der Summe aus advektiven und diffusiven Flüssen in beiden Phasen.

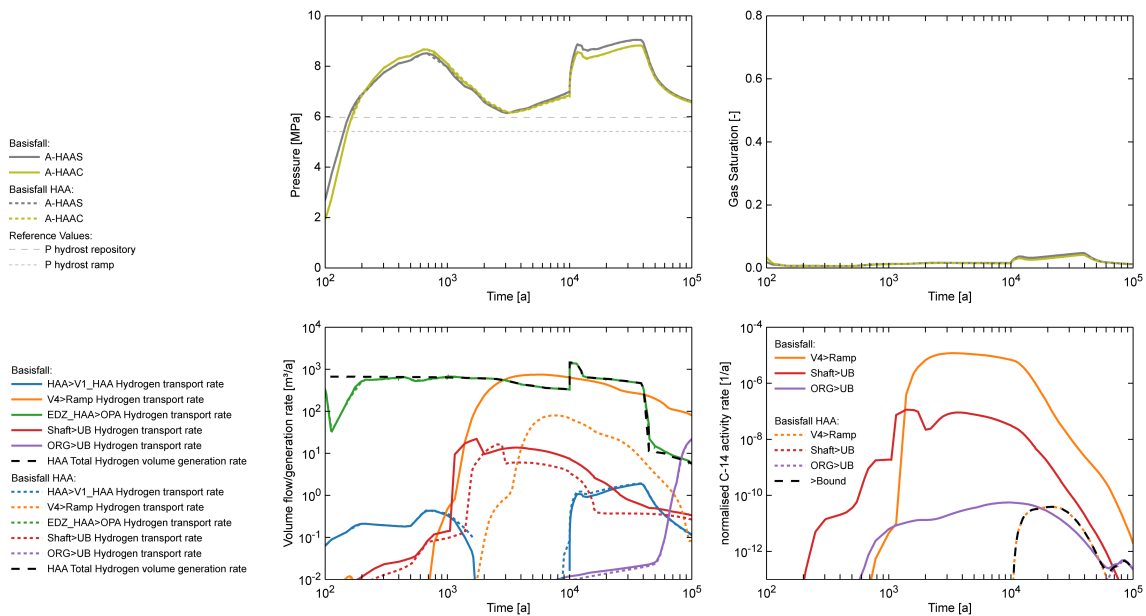


Fig. 6-17: Vergleich Kombilager vs. HAA-Lager: Druck (oben links) und Gassättigung (oben rechts) in den seitlichen und der zentralen HAA-Lagerkammer sowie Wasserstoffflüsse aus den Lagerkammern und über die Modellränder (unten links) sowie normierte Aktivitätsflüsse über die Modellränder (unten rechts)

Die Wasserstoff- und normierten Aktivitätsflüsse entsprechen jeweils der Summe aus advektiven und diffusiven Flüssen in beiden Phasen.

6.4.2 Globale Sensitivitätsanalyse (Morris OAT)

In den probabilistischen Sensitivitäts- und Ungewissheitsanalysen liegt der Fokus auf der sicherheitstechnischen Wirksamkeit der technischen und geologischen Barrieren im Hinblick auf die ihnen zugeordneten Langzeitsicherheitsfunktionen für ein Kombilager (vgl. Tab. 6-4). Entsprechend werden im Folgenden die Sensitivitäten des Maximaldrucks und der Maximaltemperatur in den Lagerkammern sowie der maximalen normierten Aktivitätsflüsse über alle Modellränder und die einzelnen Pfade dargestellt und diskutiert.

Die Darstellung erfolgt mittels Morris-Plots: Mittelwert μ vs. Standardabweichung σ der Elementaren Effekte eines Parameters. Dargestellt werden jene Parameter, deren μ^* mindestens 10 % des sensitivsten Parameters beträgt, maximal jedoch zehn Parameter. Zusätzlich immer dargestellt ist der Abstand zwischen SMA-/HAA-Lagerteilen (d_Kombi). In den Plots sind Linien mit Steigung 1 bzw. -1 eingezeichnet, zur Orientierung und Einordnung:

- Unterhalb der Linien: $|\mu| > \sigma$, d.h., Sensitivität ist tendenziell linear bzw. ändert sich in der betrachteten Parameterbandbreite wenig.
- Oberhalb der Linien: $|\mu| < \sigma$, d.h., Sensitivität ist tendenziell nicht-linear bzw. hängt vom Parameter selbst oder zusätzlich von anderen Parametern ab.

6.4.2.1 Sensitivität des Maximaldrucks in den Lagerkammern

Der Maximaldruck in den SMA- und HAA-Lagerkammern (Fig. 6-18, oben) zeigt eine ausgeprägte positive Sensitivität auf die Tiefe (depth) aufgrund der zunehmenden hydrostatischen Drücke sowie auf die Gasbildungsrate (gas_Szenario). Bei den HAA-Lagerkammern weist der Maximaldruck zudem eine starke Sensitivität auf die Permeabilität des Wirtgesteins (k_{OPA}) auf, da das gebildete Gas fast ausschliesslich über das Wirtgestein abfließt (siehe Kapitel 6.4.1). Bei den SMA-Lagerkammern spielt darüber hinaus auch die Permeabilität des V4-Siegels (k_{V4}) eine wichtige Rolle bezüglich des Maximaldrucks, da der dominante Gasabfluss via EGTS über das V4-Siegel erfolgt (siehe Kapitel 6.4.1).

Das Verhältnis des Maximaldrucks zum lithostatischen Druck (Fig. 6-18, unten) verhält sich analog wie das Verhältnis zum hydrostatischen Druck und lässt sich als Mass für den maximal herrschenden Überdruck auffassen. Dessen Sensitivitäten weisen erwartungsgemäss ein ähnliches Bild auf. Ausnahme ist die Tiefe der Lagerebene (depth), die bezüglich der Sensitivität das Vorzeichen wechselt. Während der absolute Maximaldruck mit zunehmender Tiefe zunimmt (positive Sensitivität), nimmt der maximale Überdruck mit zunehmender Tiefe ab (negative Sensitivität). Dieser nicht ganz intuitive Sachverhalt lässt sich folgendermassen erklären: In grösserer Tiefe herrschen höhere hydrostatische Drücke, d.h. es sind höhere Gasdrücke erforderlich, um einen Gasabfluss (in das Wirtgestein oder über das V4-Siegel) zu ermöglichen. Bei höheren Gasdrücken ist jedoch gleichzeitig das Speichervermögen bzw. die Gasdichte höher, womit kleinere Druckgradienten bzw. Überdrücke notwendig sind, um eine bestimmte Gasmenge abzuführen.

Die Sensitivität des Maximaldrucks auf den Abstand zwischen SMA- und HAA-Lagerteilen (d_Kombi) liegt beim SMA-Lagerteil auf Rang 11 und beim HAA-Lagerteil auf Rang 26.

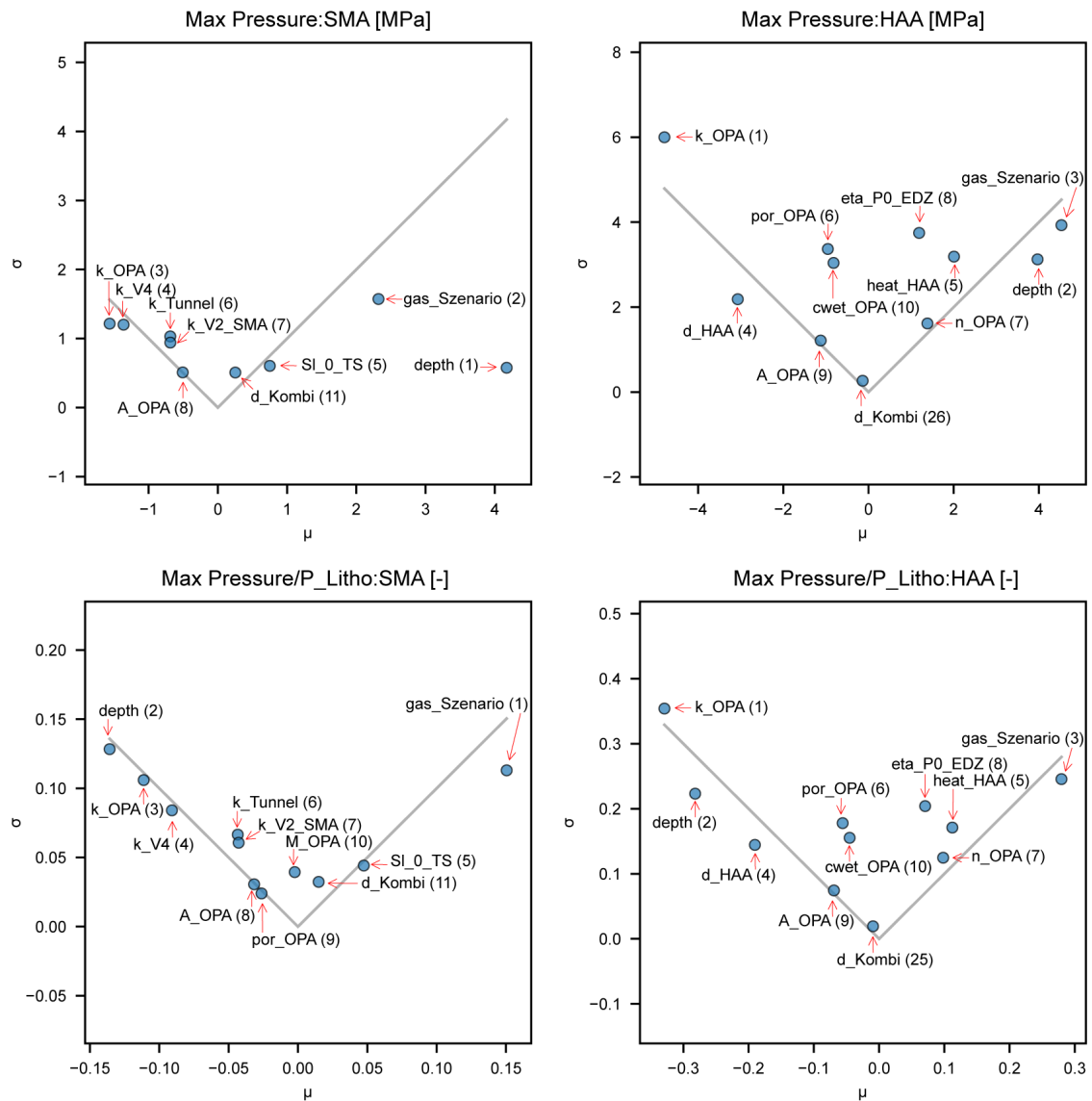


Fig. 6-18: Morris-Plot (μ vs σ der EE) für den Maximaldruck in den Lagerkammern (oben) sowie für das Verhältnis des Maximaldrucks zum lithostatischen Druck (unten) für SMA (links) und HAA (rechts)

In Klammern angegeben ist der Rang bez. μ^* . Die roten Pfeile dienen ausschliesslich der eindeutigen Beschriftung. Evaluiert wird jeweils der Maximaldruck sowohl über die seitliche als auch die zentrale Lagerkammer.

6.4.2.2 Sensitivität der Maximaltemperatur in den Lagerkammern

Die Sensitivität der Maximaltemperatur (Fig. 6-19, oben) wird in beiden Fällen (SMA/HAA) aufgrund des geothermischen Gradienten durch die Tiefe dominiert.

Die maximale Temperaturerhöhung (Fig. 6-19, unten) wird bei der SMA-Lagerkammer am stärksten durch den Abstand zwischen den Lagerteilen (d_Kombi) beeinflusst, allerdings ausgeprägt nicht-linear (vergleichsweise hohes σ); bei kleinen Abständen ist die Sensitivität grösser

als bei grossen Abständen. Bei den HAA-Lagerkammern zeigt die maximale Temperaturerhöhung die grösste Sensitivität bezüglich der Wärmeleistung der Kanister (heat_HAA) und dem Abstand zwischen den einzelnen HAA-Lagerkammern (d_HAA).

Wiederum stützen sich bezüglich Sensitivität die in Kapitel 5.3.1 aus den probabilistischen Robustheitsanalysen zur Barrierenintegrität abgeleiteten Aussagen und die in den Kapiteln 6.4.2.1 und 6.4.2.2 präsentierten Resultate gegenseitig. Während im Rahmen der betrachteten Bandbreiten der Maximaldruck wenig sensitiv auf den Abstand zwischen den Lagerteilen ist, wird die Temperatur massgeblich von diesem beeinflusst.

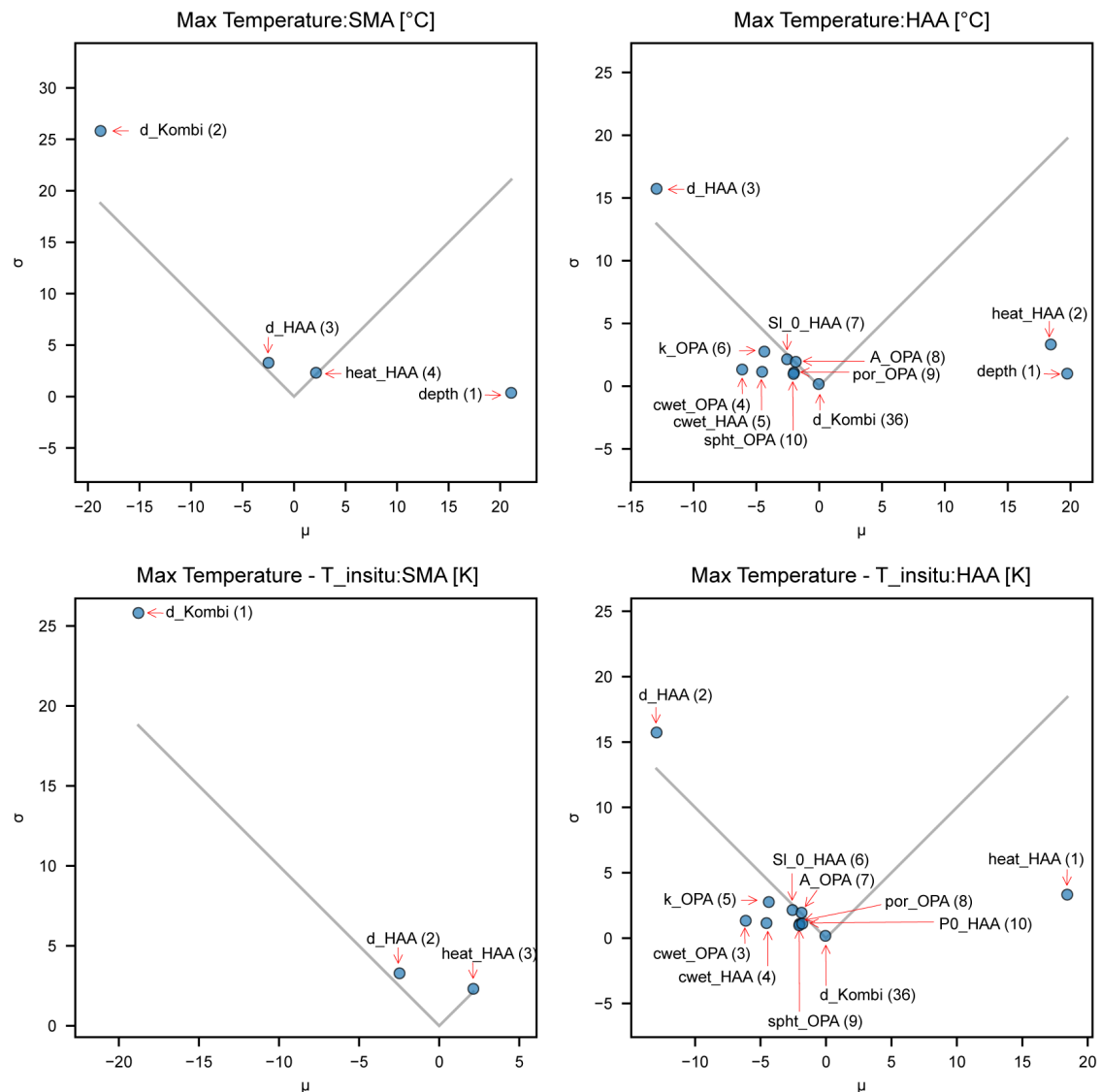


Fig. 6-19: Morris-Plot (μ vs σ der EE) für die Maximaltemperatur in den Lagerkammern (oben) sowie für die maximale Temperaturerhöhung im Vergleich zur in-situ Temperatur (unten) für SMA (links) und HAA (rechts)

In Klammern angegeben ist der Rang bez. μ^* . Die roten Pfeile dienen ausschliesslich der eindeutigen Beschriftung. Evaluiert wird jeweils die Maximaltemperatur sowohl über die seitliche als auch die zentrale Lagerkammer.

6.4.2.3 Sensitivität der maximalen normierten Aktivitätsflüsse

Der maximale normierte Aktivitätsfluss kumuliert über alle Modellränder bzw. alle Freisetzungspfade (Fig. 6-20, oben links) ist am stärksten sensitiv auf die Gasbildungsraten (gas_Szenario) und die Permeabilität des V4-Siegels (k_{V4}). Auf den Rängen 3 bis 10 folgen Parameter, die sich mehrheitlich entweder auf Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. der Geologie oder der Verfüll- und Versiegelungsbauwerke beziehen. Die Sensitivität auf den Abstand zwischen den Lagerteilen (d_{Kombi}) ist schwach und liegt auf Rang 13. Die leicht negative Sensitivität dürfte dem zunehmenden Speichervolumen bei zunehmendem Abstand geschuldet sein.

Die hohe Sensitivität bezüglich des V4-Siegels liegt darin begründet, dass der Freisetzungspfad via V4-Siegel die Gesamtfreisetzung grösstenteils dominiert (siehe auch Kapitel 6.4.1). Entsprechend weisen auch die maximalen normierten Aktivitätsflüsse über das V4-Siegel (Fig. 6-20, oben rechts) sehr ähnliche Sensitivitäten auf wie jene über alle Modellränder. Der maximale normierte Aktivitätsfluss via Schacht (Fig. 6-20, unten rechts) ist hauptsächlich sensitiv auf die Permeabilität des V3-Siegels (k_{V3}) und die Gasbildungsraten (gas_Szenario), während jener über die Rahmengesteine primär von der Porosität des Wirtgesteins (por_{OPA}) sowie vom Abstand zwischen den HAA-Lagerkammern (d_{HAA}) abhängt. In beiden Fällen ist die Sensitivität aber stark nicht-linear (σ wesentlich grösser als μ). Die Sensitivität auf den Abstand zwischen den Lagerteilen (d_{Kombi}) folgt für die drei Freisetzungspfade auf Rang 12 (V4), 10 (Schacht) bzw. 33 (ORG).

Aufgrund obiger Resultate kann gefolgert werden, dass – im Rahmen der hier betrachteten Abstände – bezogen auf die maximalen normierten Aktivitätsflüsse und somit bezogen auf die C-14-Freisetzung, eine Anforderung an den Abstand zwischen den SMA- und HAA-Lagerteilen eines Kombilagers kaum sinnvoll ist bzw. gestellt werden muss. Allfällige Optimierungen der Freisetzung über die Gasphase wären z.B. effizienter umsetzbar über Anforderungen an die Versiegelungen (siehe hierzu auch Kapitel 6.4.4).

Erwähnenswert ist die Sensitivität der maximalen normierten Aktivitätsflüsse auf die Tiefe (zwischen Rang 5 bis 8 je nach Freisetzungspfad; Rang 9 über alle Freisetzungspfade kumuliert). Diese fällt, ähnlich wie beim maximalen Überdruck im SMA-Lagerteil (Kapitel 6.4.2.1), negativ aus, d.h. die Flüsse nehmen mit zunehmender Tiefe tendenziell ab. Die Begründung knüpft an jene des maximalen Überdrucks an: Bei höherem Druckniveau ist das Speichervermögen grösser. Insbesondere in der Phase des Druckaufbaus muss dadurch weniger Gas abgeführt werden, d.h. die Gasflüsse und schliesslich auch die Aktivitätsflüsse sind kleiner.

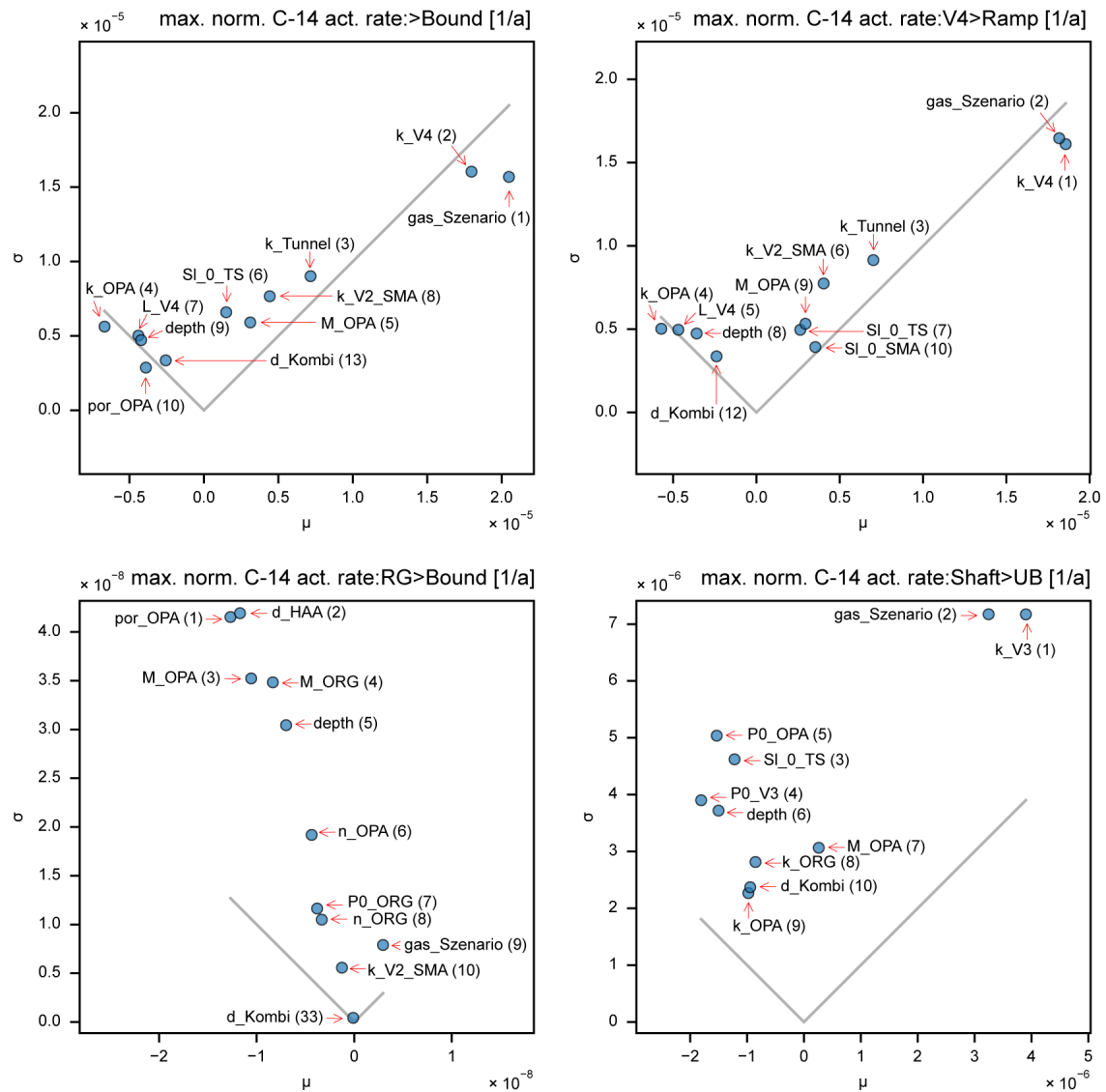


Fig. 6-20: Morris-Plot (μ vs σ der EE) für die maximalen normierten Aktivitätsflüsse über alle Ränder (oben links) und über die einzelnen Freisetzungspfade

In Klammern angegeben ist der Rang bez. μ^* . Die roten Pfeile dienen ausschliesslich der eindeutigen Beschriftung.

6.4.3 Monte-Carlo-Ungewissheitsanalyse

Die Auswertung der Monte-Carlo-Ungewissheitsanalyse konzentriert sich auf die normierten Aktivitätsflüsse über alle Modellränder und über die einzelnen Freisetzungspfade. Gestützt auf die Sensitivitätsanalysen wird im Besonderen die Rolle der Versiegelungen vertieft diskutiert.

Hierzu werden folgende Darstellungen herangezogen:

- Verteilung des zeitlichen Verlaufs: Median, 84/16-Perzentile (ca. $\pm 1 \sigma$), 95/5-Perzentile (ca. $\pm 2 \sigma$), Min/Max. Zudem wird der entsprechende Verlauf im Basisfall dargestellt.
- CCDF (complementary cumulative distribution function) der Maxima.
- Cobweb Diagramme: Stellen jeden Rechenfall als "Faden" dar, der den resultierenden Indikatorwert mit den zugrundeliegenden Parameterwerten verbindet. Die Parameter werden nach abnehmendem Absolutwert der Korrelation mit dem Indikator sortiert.
- Scatter Plots

Die normierten Aktivitätsflüsse streuen relativ breit (Fig. 6-21, Fig. 6-22), sowohl in der Zeit wie auch der Magnitude, wobei der maximale normierte Aktivitätsfluss eine klar zunehmende Tendenz zeigt, je früher das Maximum erreicht wird. Diese Tendenz resultiert aus einer Kombination zwischen den Gasbildungsrate und der Wirksamkeit des Zerfalls (Fig. 6-23): Je höher die Gasbildung, desto schneller der Druckaufbau, desto früher setzt der Gasabfluss über die Rampe (V4-Siegel) bzw. den Schacht (V3-Siegel) ein. Kombiniert mit der relativ kurzen Halbwertszeit von 5730 Jahren für C-14 führt dies zu höheren maximalen normierten Aktivitätsflüssen.

Die normierten Aktivitätsflüsse via V4-Siegel zeigen ein sehr ähnliches Bild wie jene über alle Ränder, während die Flüsse über den Schacht und insbesondere über die Rahmengesteine von jener über alle Modellränder deutlich abweichen (Fig. 6-21, Fig. 6-22). Dies legt wiederum nahe, dass die Maximalflüsse über alle Modellränder zum Grossteil durch den Pfad über das V4-Siegel dominiert werden.

Eine genauere Analyse der drei Freisetzungspfade (Fig. 6-24) zeigt, dass in 90 % der Fälle die Freisetzung über das V4-Siegel und in 10 % der Fälle die Freisetzung über den Schacht dominiert, wobei der Pfad über den Schacht mit zunehmenden Maxima der normierten Aktivitätsflüsse an Bedeutung gewinnt. Die Freisetzung über die Rahmengesteine dominiert in weniger als 0.1 % der Fälle und nur bei niedrigen Maxima. Die zunehmende Wichtigkeit der Freisetzung über den Schacht mit zunehmenden Maxima lässt sich wie folgt erklären: Im Basisfall weisen das V3- und V4-Siegel zwar dieselbe Permeabilität auf, der Kapillardruck ist im V3-Siegel jedoch um ca. vier Grössenordnungen höher²⁹. Das V3-Siegel sättigt dadurch innerhalb weniger hundert Jahre nahezu auf, womit der Pfad über den Schacht weitgehend unterbunden wird und der Gasabfluss und damit die Freisetzung von C-14 hauptsächlich über das V4-Siegel erfolgt. Damit der Pfad über den Schacht den Gasabfluss und die Aktivitätsflüsse dominieren kann, müssen besondere Bedingungen erfüllt sein, wie das Cobweb-Diagramm (Fig. 6-25) aufzeigt:

- Die Permeabilität des V3-Siegels (k_{V3}) muss eher hoch sein und insbesondere über der Permeabilität des V4-Siegels (k_{V4}) liegen. Ist hingegen die Permeabilität des V4-Siegels höher als jene des V3-Siegels, erfolgt der Gasabfluss tendenziell darüber.
- Die Permeabilität des Wirtgesteins muss eher gering sein, was die Aufsättigung des V3-Siegels verzögert, so dass der Pfad über den Schacht länger bestehen bleibt.

²⁹ Im Schacht ist eine bessere Verdichtung des Bentonits möglich (und erwünscht).

- Die Gasbildung muss eher hoch sein, wodurch der Gasabfluss früher einsetzt und so der Auf-sättigung des V3-Siegels "zuvorkommt".

Die genannten Faktoren führen dazu, dass der Pfad über den Schacht tendenziell zu frühen Zeiten aktiv bzw. dominierend ist, solange das V3-Siegel noch nicht aufgesättigt ist, was durch Fig. 6-26 bestätigt wird. Maximale Flüsse über diesen Pfad werden also eher zu frühen Zeiten erreicht und fallen damit, wie bereits oben gesehen (Fig. 6-23), eher hoch aus.

Nebst Analysen zu den normierten Aktivitätsflüssen sind mit vorliegendem Modell auch Aussagen zum Zweiphasenflussverhalten möglich. Die wesentlichen Ergebnisse zu Druck und Temperatur in den SMA- und HAA-Lagerkammern sind im Anhang B.4 dargestellt. Da die im Kapitel 6 verwendeten Parameterbandbreiten (insbesondere für den Abstand zwischen den Lagerteilen) zwecks Überprüfung der Methodik bewusst gross gewählt wurden und von jenen im Kapitel 4 und 5 abweichen, sind die Resultate nicht direkt vergleichbar und es wird im Rahmen dieses Methodikberichts auf eine vertiefere Diskussion verzichtet.

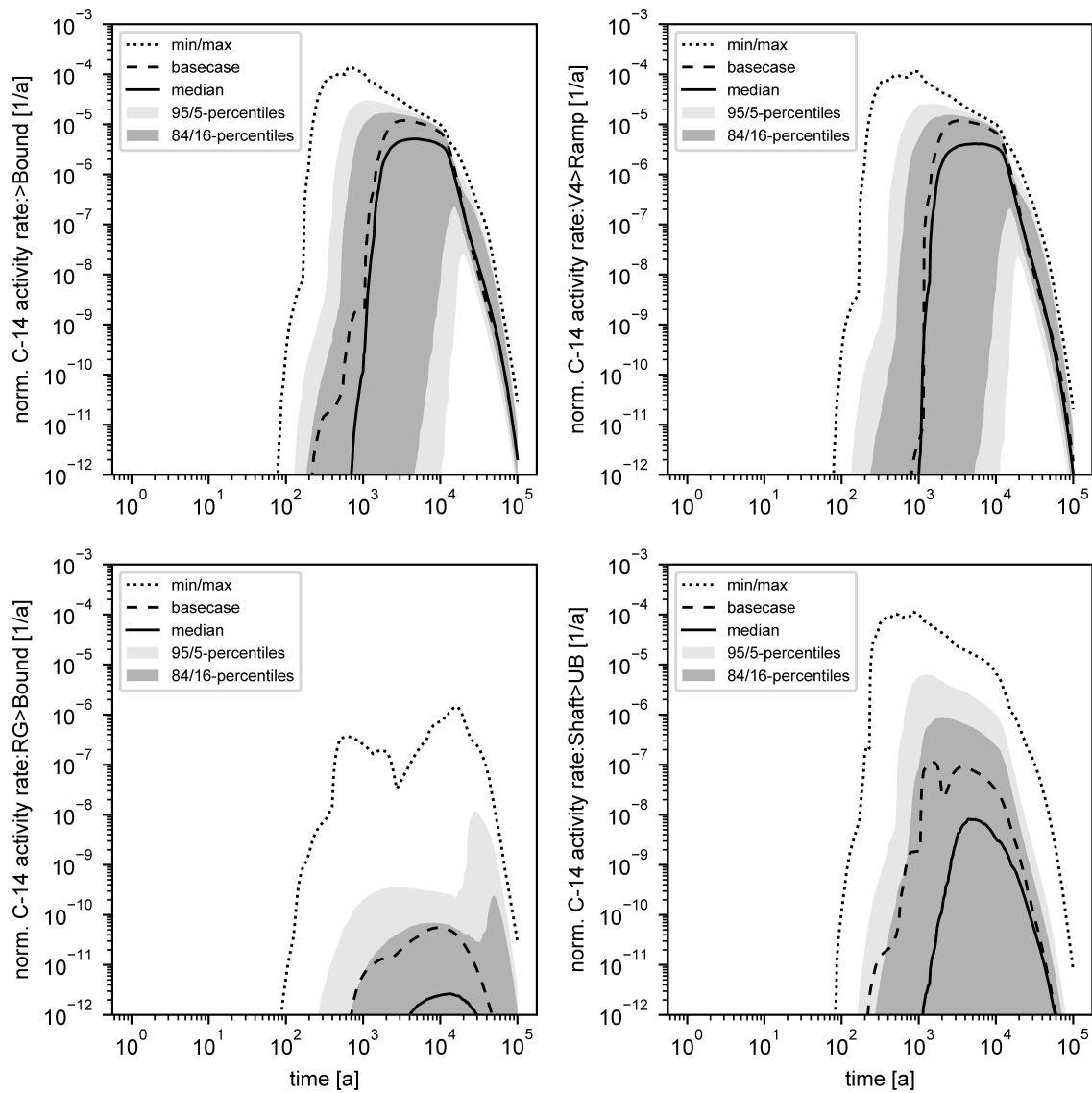


Fig. 6-21: Verteilung des zeitlichen Verlaufs der normierten Aktivitätsflüsse über alle Ränder (oben links) und über die einzelnen Freisetzungspfade

Die minimalen normierten Aktivitätsflüsse aller Rechenfälle (min) liegen unterhalb von $1\text{E-}12$ 1/a.

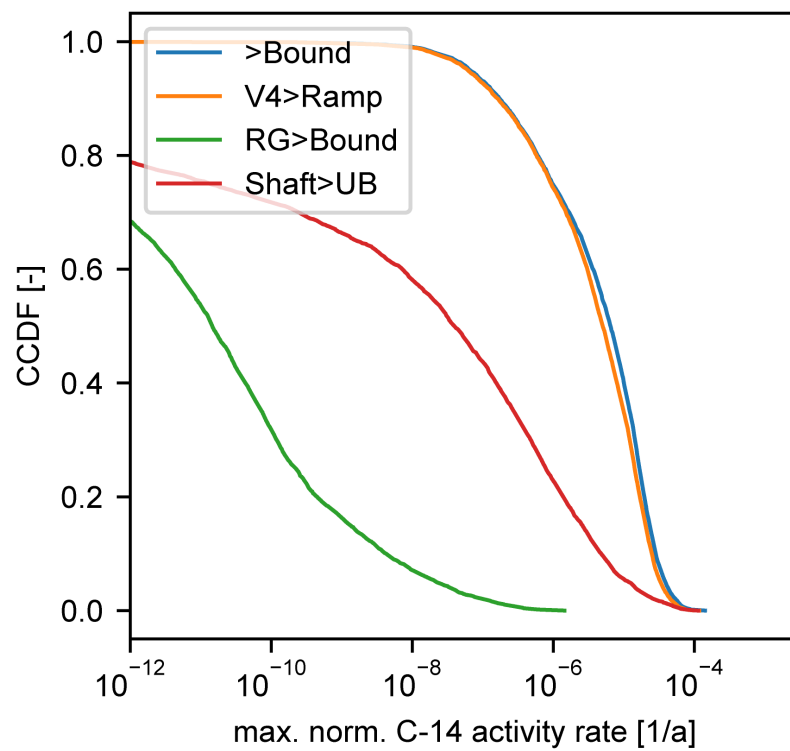


Fig. 6-22: CCDF der maximalen normierten Aktivitätsflüsse über alle Ränder sowie über die einzelnen Freisetzungspfade

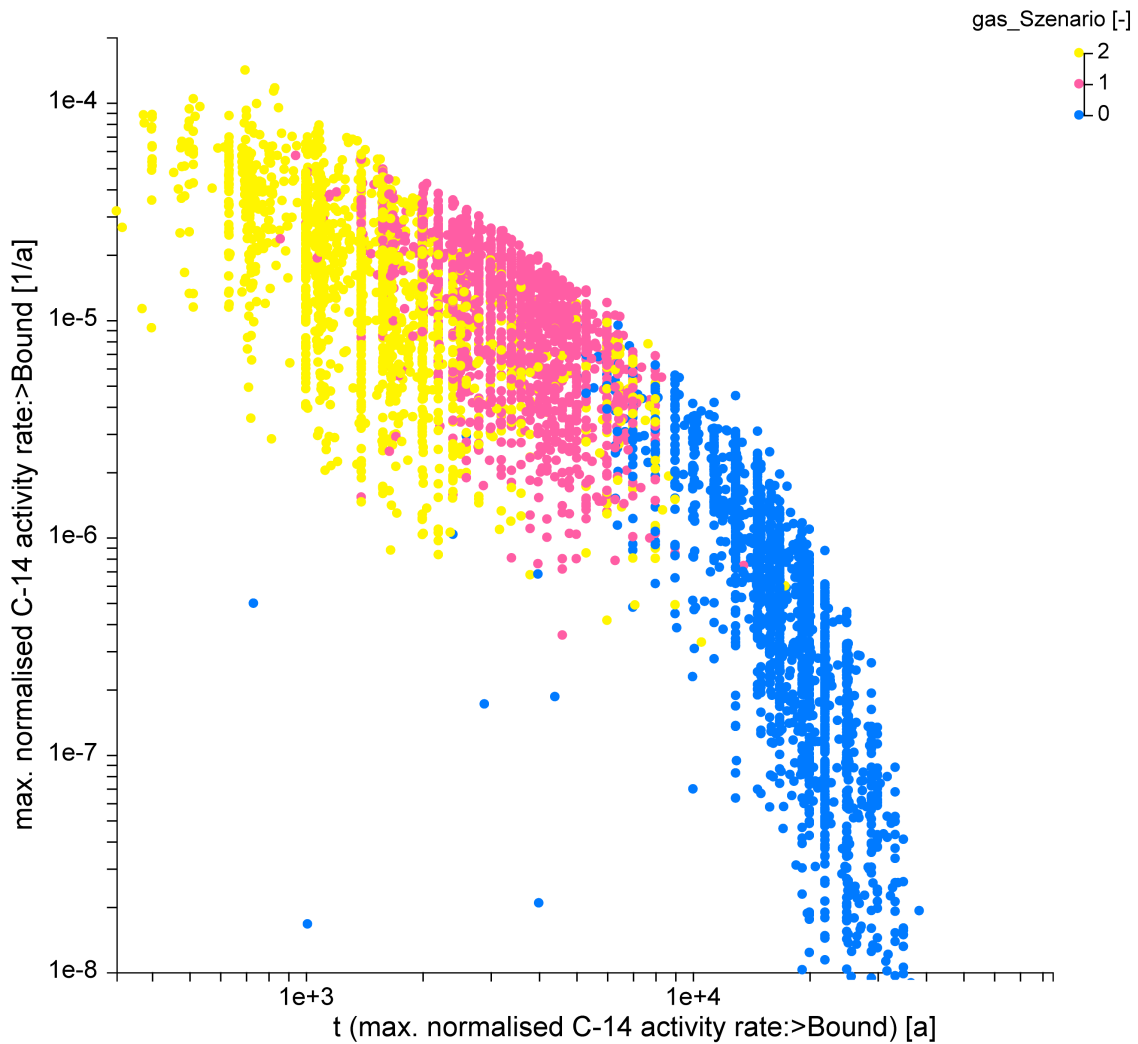


Fig. 6-23: Scatterplot der maximalen normierten Aktivitätsflüsse über alle Ränder als Funktion des Auftretenszeitpunkts des Maximums. Das jeweilige Gasbildungsszenario (gas_Szenario) ist in Farbe dargestellt.

0: Unterer Eckwert der Gasbildungsrate, 1: Referenz-Gasbildungsrate, 2: Oberer Eckwert der Gasbildungsrate

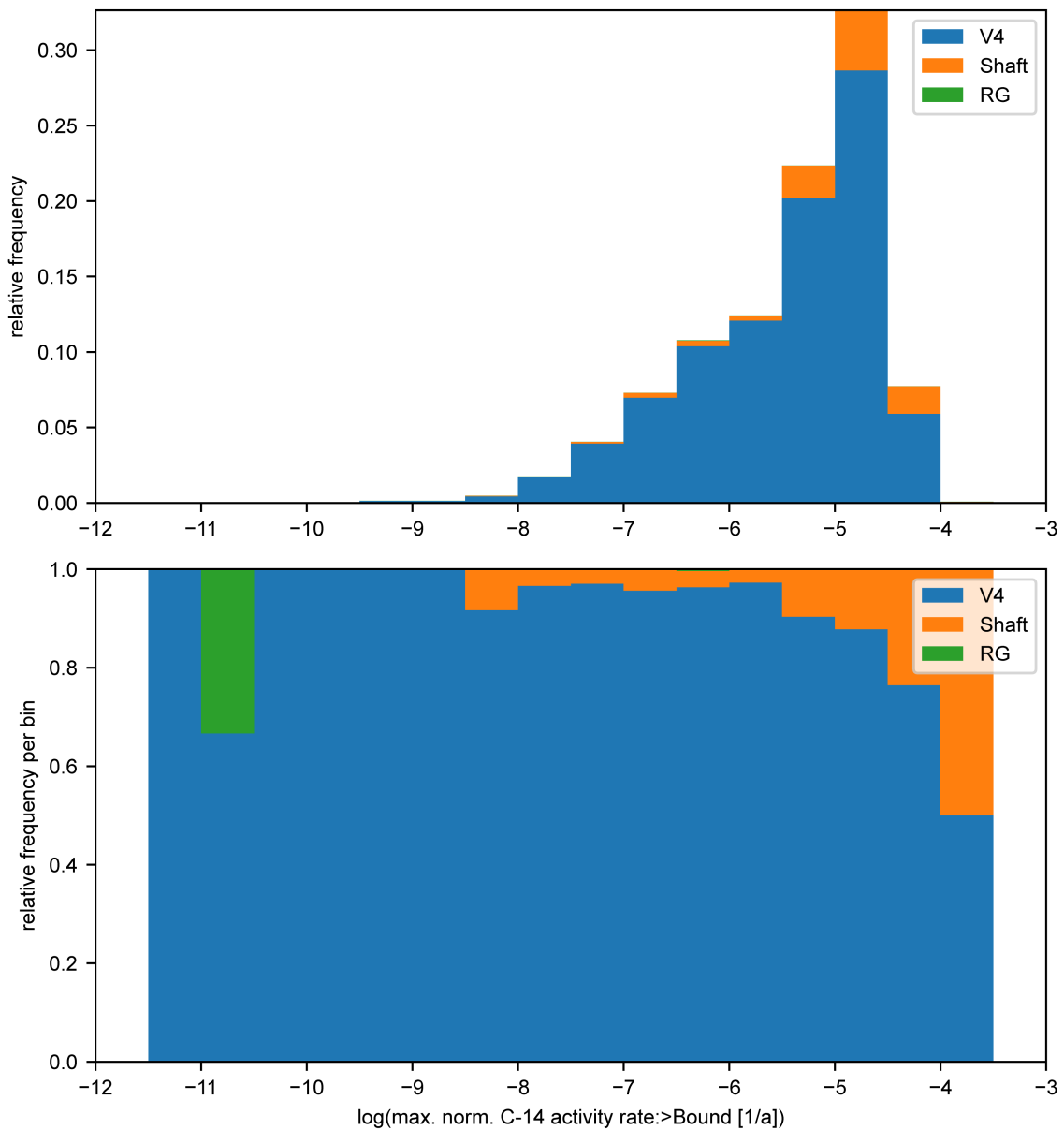


Fig. 6-24: Relative Häufigkeit (oben) und relative Häufigkeit pro Klasse (unten) der dominierenden Freisetzungspfade für unterschiedliche Klassen der maximalen normierten Aktivitätsflüsse über alle Ränder

In den Klassen mit maximalen normierten Aktivitätsflüssen unter $1\text{E-}9 \text{ 1/a}$ sowie oberhalb von $1\text{E-}4 \text{ 1/a}$ befinden sich nur wenige Rechenfälle. In der oberen Abbildung zur relativen Häufigkeit sind diese nicht sichtbar.

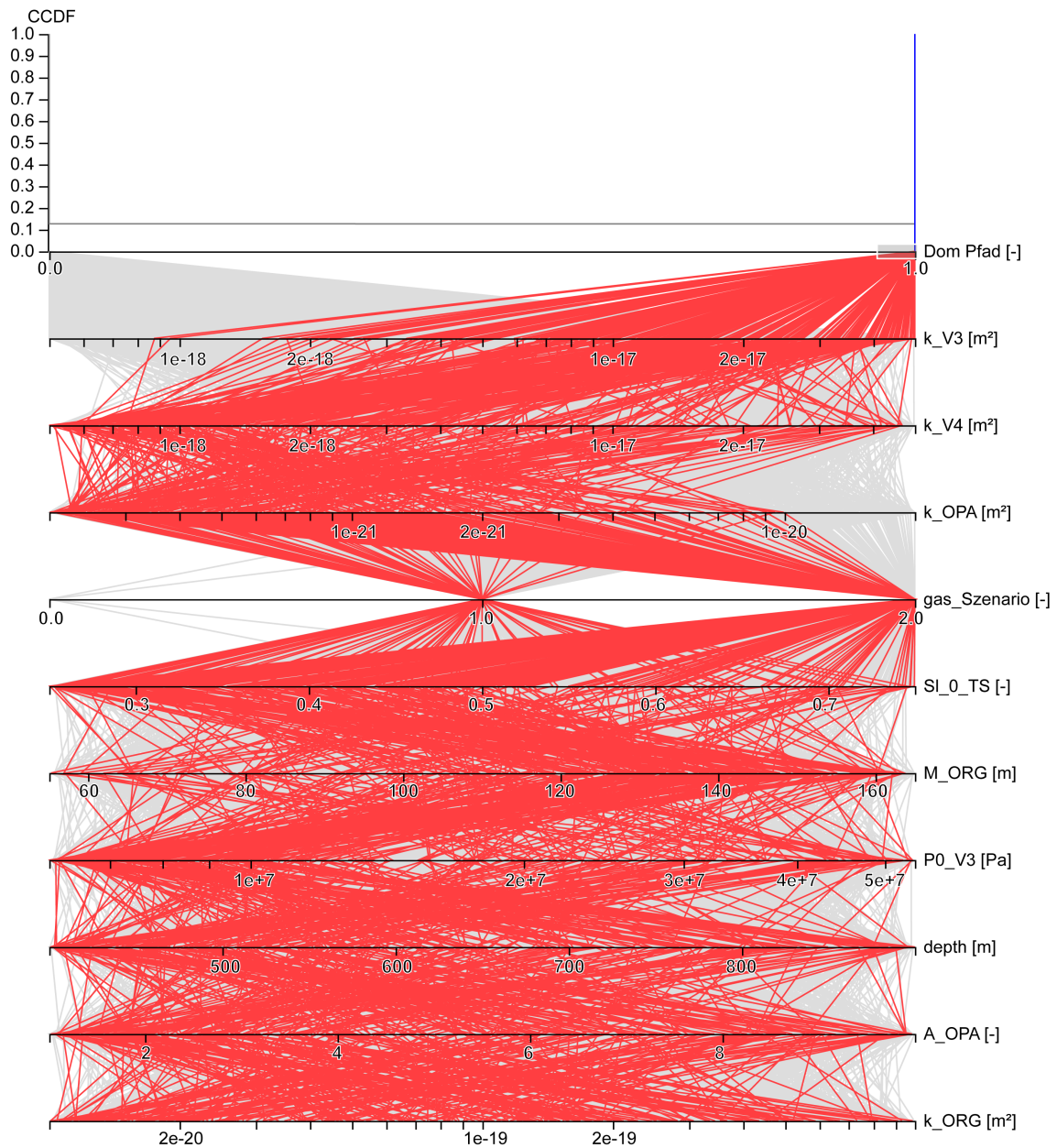


Fig. 6-25: Cobweb-Diagramm; Dominanter Pfad mit den zehn Parametern, die damit am stärksten korreliert sind (sortiert nach abnehmender Korrelation)

0: Rampe, 1: Schacht

Rot hervorgehoben sind die Rechenfälle für den Pfad 1 (via Schacht), die übrigen Rechenfälle sind in grau hinterlegt. Der Übersichtlichkeit halber sind nur die oberen rund 50% aller Rechenfälle in Bezug auf den maximalen normierten Aktivitätsfluss über alle Ränder dargestellt.

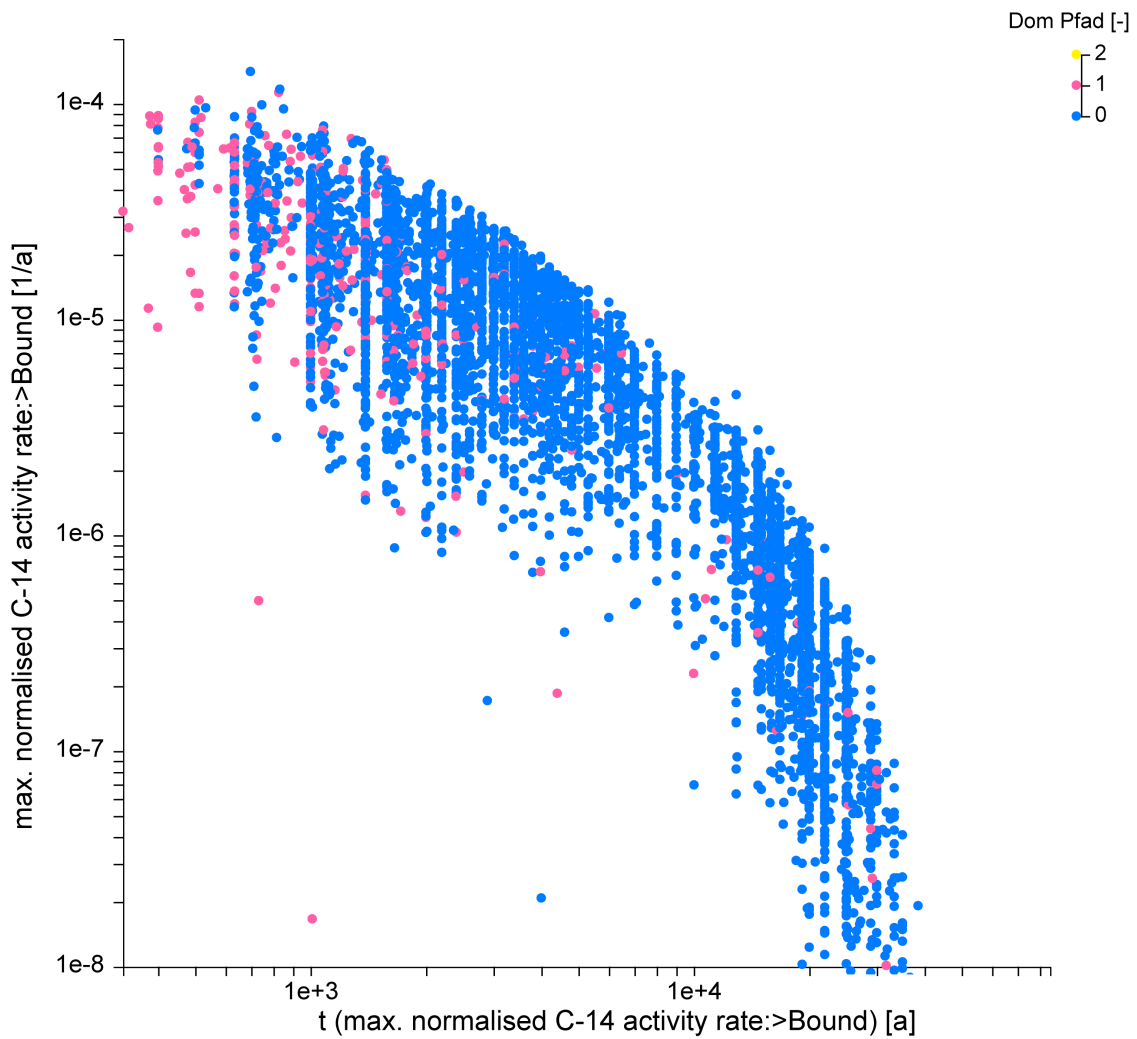


Fig. 6-26: Scatterplot der maximalen normierten Aktivitätsflüsse über alle Ränder als Funktion des Auftretenszeitpunkts des Maximums. Der jeweilige dominante Transportpfad (Dom Pfad) der Rechenfälle ist in Farbe dargestellt.

0: Rampe, 1: Schacht, 2: Rahmengesteine. Rechenfälle mit dominatem Pfad über die Rahmengesteine weisen maximale normierte Aktivitätsflüsse von unter $1\text{E-}8$ 1/a auf.

6.4.4 Robustheitsanalyse und beispielhafte Optimierungsmassnahmen

Aus den vorangehenden Kapiteln sind einerseits die sensitivsten Parameter bezogen auf die betrachteten sicherheitsrelevanten Indikatoren (vgl. Tab. 6-4) sowie die quantitativen Auswirkungen der Ungewissheiten in den Parameterwerten auf die Resultate bekannt. In vorliegendem Kapitel wird methodisch aufgezeigt, wie über eine Robustheitsanalyse und durch das Stellen von Anforderungen an die Lagerkonfiguration bzw. einzelne Lagerkomponenten eine Optimierung des Systemverhaltens bezogen auf die Indikatoren – nachfolgend beispielhaft bezogen auf den maximalen normierten Aktivitätsfluss – erfolgen kann.

Hierzu werden die Rechenfälle mit maximalen normierten Aktivitätsflüssen von mehr als 50% des globalen Maximums genauer analysiert und auf dieser Grundlage beispielhaft sicherheitstechnische Anforderungen an Parameter abgeleitet, so dass diese Fälle verhindert werden und sich das Systemverhalten – innerhalb der neuen bzw. strengeren Parameterbandbreiten – verbessert.

Das Cobweb-Diagramm in Fig. 6-27 zeigt, dass die Fälle mit den höchsten normierten Aktivitätsflüssen (mehr als 50% des globalen Maximums) vorwiegend bei folgenden Kombinationen auftreten:

- hohe Gasbildungsraten (gas_Szenario)
- hohe Permeabilität des V4-Siegels (k_{V4})
- geringe Permeabilität des Wirtgesteins (k_{OPA})
- geringe Tiefe der Lagerebene.

Wie die Fig. 6-27 und Fig. 6-28 eindrücklich illustrieren, treten die höchsten Aktivitätsflüsse nur bei Rechenfällen mit dem oberen Eckwert der Gasbildung auf. Im Rahmen einer Gesamtoptimierung ist also (auch) bezogen auf die RN-Freisetzung über den Gaspfad eine möglichst tiefe Gasbildung anzustreben³⁰. Da dieser Aspekt bekannt und nicht direkt an den Kontext der Lagerkonfiguration gekoppelt ist, wird im Folgenden die Bandbreite der Gasbildungsraten nicht eingeschränkt und dieser Aspekt nicht weiter vertieft.

Die Permeabilität des Wirtgesteins kann nur sehr bedingt beeinflusst werden und ist Resultat der bzw. gekoppelt an die Standortwahl. Ähnliches gilt für die Tiefe der Lagerebene. Es werden somit keine weiteren Anforderungen an diese Parameter gestellt, sondern sie werden mit ihren Bandbreiten ebenfalls als Randbedingung postuliert.

Aus obigem ist es naheliegend, die Möglichkeit auszuloten, ob und wie die Aktivitätsflüsse über die Eigenschaften der V4- und V3-Siegel weiter begrenzt werden könnten. Das Cobweb-Diagramm (Fig. 6-27) zeigt, dass beim V4-Siegel vor allem hohe Permeabilitäten zu den höchsten maximalen Aktivitätsflüssen führen, während es beim V3-Siegel sowohl hohe als auch niedrige Permeabilitäten sind. Grund für dieses unterschiedliche Verhalten ist die Konkurrenzwirkung zwischen den V4- und V3-Siegeln, wie bereits im vorangehenden Kapitel 6.4.3 diskutiert und in Fig. 6-29 (oben) illustriert: Bei hoher Permeabilität des V4-Siegels ist der Freisetzungspfad über dieses Siegel dominierend und es resultieren die höchsten maximalen Aktivitätsflüsse unabhängig davon, wie hoch oder tief die Permeabilität des V3-Siegels ist. Bei niedriger Permeabilität des V4-Siegels hingegen sind die Aktivitätsflüsse durch den Freisetzungspfad über das V3-Siegel und

³⁰ Im Rahmen einer weitergehenden Interpretation der Ergebnisse bzw. bei der Anwendung der hier präsentierten Methodik gilt es zu beachten, dass eine Reduktion von konservativen Modellannahmen bezüglich der Gasbildung auch zu einer Reduktion der modellierten Aktivitätsflüsse beitragen kann. D.h. die Reduktion von Modellungswissheiten ist ein weiterer Aspekt, den es einzubeziehen gilt, der hier aber nicht weiter diskutiert wird.

somit die Permeabilität des V3-Siegels dominiert. Damit wird klar, dass es nicht zielführend ist, nur das eine oder andere Siegel zu optimieren. Vielmehr muss eine Anforderung an beide gestellt werden. Zum Beispiel können mit der Anforderung

$$k_{V3} < 1e-17 \text{ m}^2 \text{ und zugleich } k_{V4} < 1e-17 \text{ m}^2$$

die Fälle mit den höchsten Aktivitätsflüssen eliminiert bzw. die auftretenden maximalen Aktivitätsflüsse um rund einen Faktor 2 reduziert werden, wie Fig. 6-29 (unten) illustriert.

Mittels der hier präsentierten Methodik ist es also möglich, aktiv über Anforderungen an die Versiegelungen des Lagers das Systemverhalten zu optimieren. Beispielhaft wurde dies bezogen auf die maximalen normierten Aktivitätsflüsse als Indikator für die RN-Freisetzung aufgezeigt. In der Anwendung der Methodik wird die Optimierung allerdings häufig mehrere Indikatoren berücksichtigen und es muss sichergestellt werden, dass mehrere (a priori konkurrierende) Bedingungen zusammen erfüllt werden können. Für die Versiegelungen betrifft dies – nebst Anforderungen zur Limitierung der RN-Freisetzung – im Besonderen allfällige Anforderungen zur Beschränkung des Druckaufbaus durch Gasbildung (z.B. EGTS im SMA-Lagerteil) bzw. die Bedingung, dass ein maximaler Druck innerhalb des Lagers nicht überschritten werden darf.

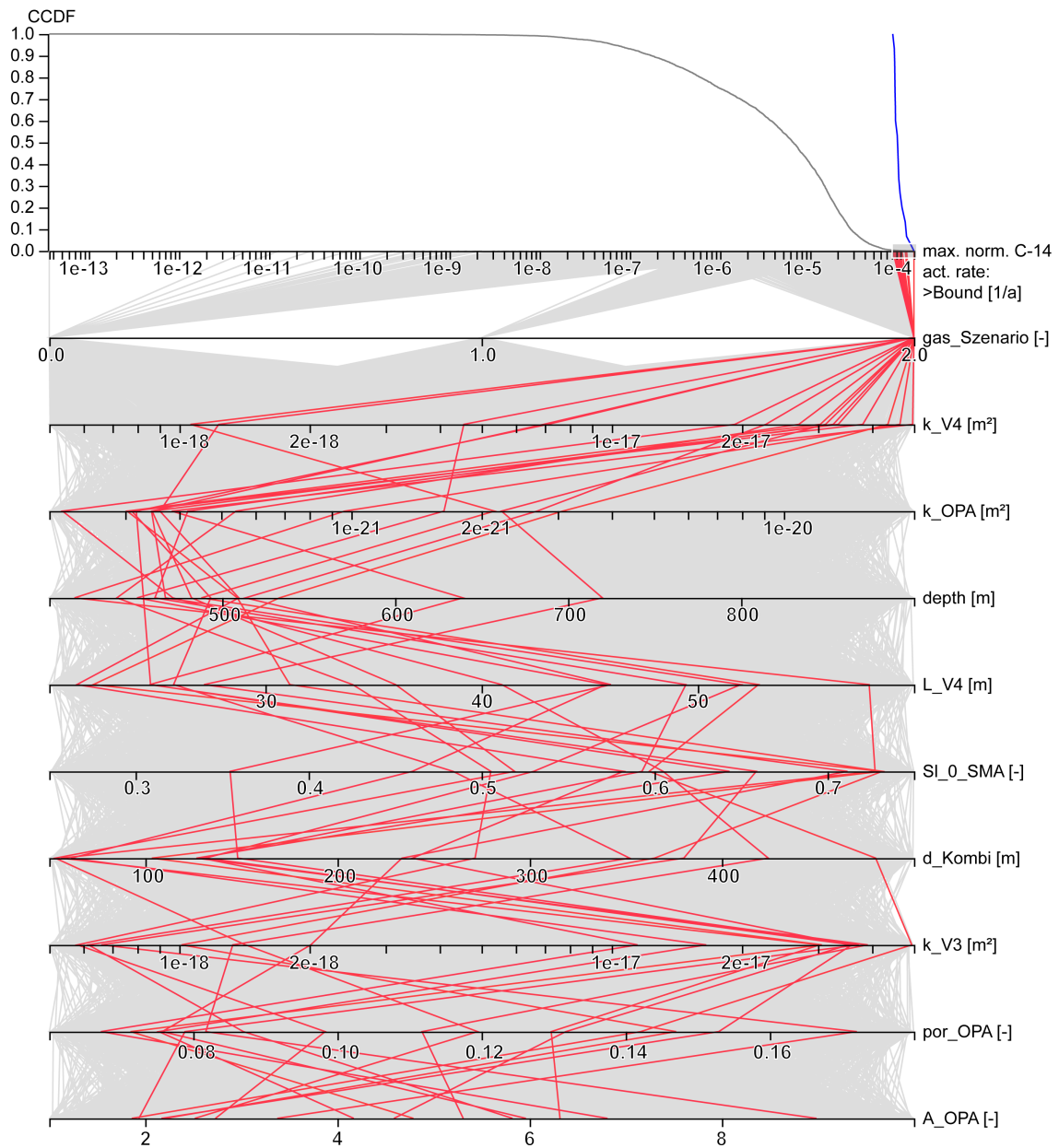


Fig. 6-27: Cobweb-Diagramm; maximale normierte Aktivitätsflüsse über alle Ränder mit den zehn Parametern, die damit am stärksten korrelieren (sortiert nach abnehmender Korrelation)

Rot hervorgehoben sind die Rechenfälle, deren maximale normierte Aktivitätsflüsse mehr als 50% des globalen Maximums betragen. Die übrigen Rechenfälle sind grau hinterlegt.

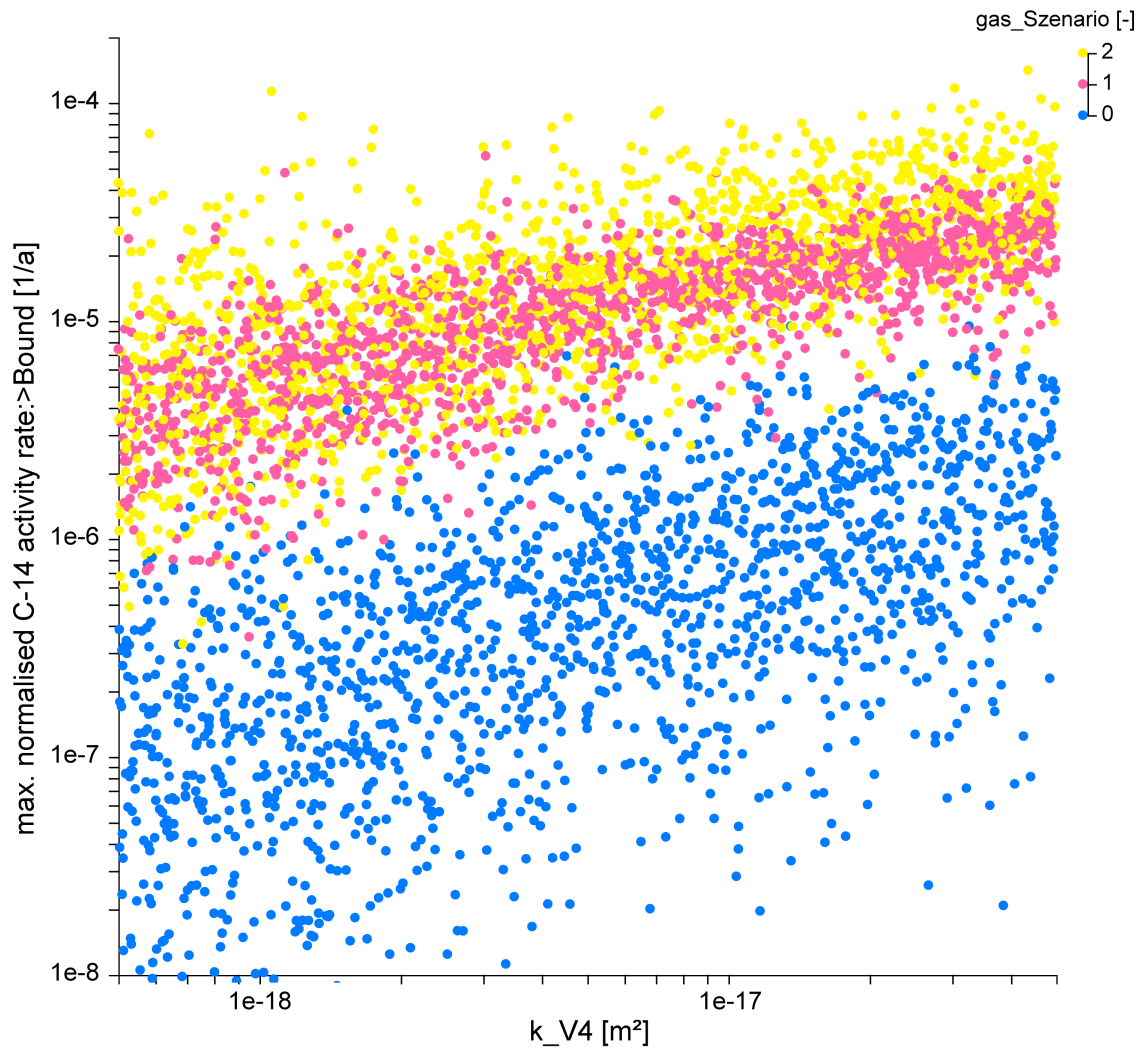


Fig. 6-28: Scatterplot der maximalen normierten Aktivitätsflüsse über alle Ränder als Funktion der Permeabilität der Versiegelung in der Rampe (k_{V4}). Das jeweilige Gasbildungsszenario (gas_Szenario) der Rechenfälle ist in Farbe dargestellt.

0: Unterer Eckwert der Gasbildungsrate, 1: Referenz-Gasbildungsrate, 2: Oberer Eckwert der Gasbildungsrate

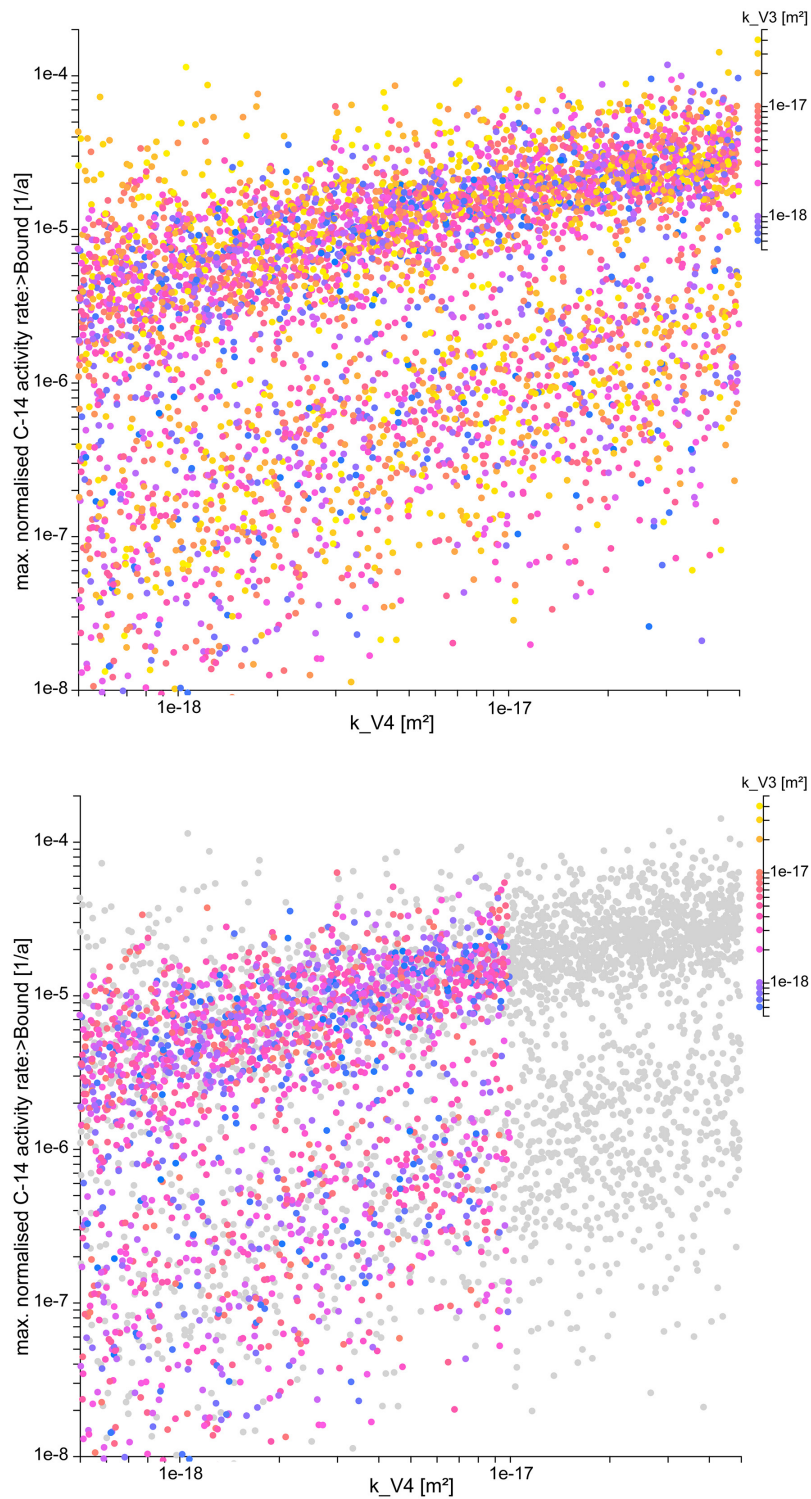


Fig. 6-29: Scatterplot der maximalen normierten Aktivitätsflüsse über alle Ränder als Funktion der Permeabilität der Versiegelung in der Rampe (k_{V4} , x-Achse) und der Permeabilität der Versiegelung im Schacht (k_{V3} , in Farbe) ohne (oben) und mit Anwendung der im Text vorgeschlagenen Anforderung (unten)

6.5 Synthese der Ergebnisse

Im Rahmen der vorliegenden Systemanalysen zur RN-Freisetzung wurden spezifische Modellwerkzeuge (Makroelement-Modell) entwickelt und validiert. Zudem wurde eine Simulationsumgebung zur Durchführung von probabilistischen Modellrechnungen bereitgestellt und beispielhaft für den Transport von volatilem C-14 in einem generischen Kombilager angewandt.

Die Nutzung des Makroelement-Modellierungskonzepts in deterministischen Analysen und in Kombination mit probabilistischen Sensitivitäts- und Ungewissheitsanalysen hat sich als geeignetes Werkzeug erwiesen, um das Systemverständnis zu studieren, Indikatoren zur RN-Freisetzung wie z.B. normierte Aktivitätsflüsse quantitativ zu berechnen und allfällige Optimierungen am Lagerkonzept zu unterstützen.

Die Simulationsergebnisse des Kombilagers (Basisfall) im Vergleich zu jenen der Einzellager zeigen, dass Wechselwirkungen zwischen den Lagerteilen erkennbar sind, sich diese aber im vorliegenden Fall nicht negativ (bzw. aufgrund des höheren Gasspeichervolumens sogar eher leicht positiv) auf die Aktivitätsflüsse und somit die RN-Freisetzung auswirken.

Die Sensitivitätsanalyse macht zudem deutlich, dass die Aktivitätsflüsse nur gering sensitiv auf den Abstand zwischen den Lagerteilen (d_{Kombi}) sind; die Sensitivitäten auf die Gasbildung im Lager, die Eigenschaften der Siegel, sowie Parameter des Wirtgesteins sind wesentlich höher. Entsprechend ist eine Anforderung an den Mindestabstand zwischen den Lagerteilen aus radiologischer Sicht weder notwendig noch sinnvoll (im Rahmen der hier untersuchten aus ingenieurtechnischer Sicht realisierbaren Abstände).

Schliesslich gilt es zu beachten, dass die Anwendung der Methodik auf standortspezifischen Modellen und den aktuellen Daten zum Inventar und somit auch den Gasbildungsraten erfolgen wird, so dass die entsprechenden Parameter mit adäquaten Bandbreiten als Randbedingung einfließen können. Die verbleibenden Ungewissheiten und somit Parameterbandbreiten werden deutlich geringer sein, als sie für die generische Situation in den vorliegenden Modellen für die Methodikentwicklung verwendet wurden.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Mit der Entwicklung und Dokumentation einer Methodik für die Definition des Mindestabstands zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen eines möglichen Kombilagers trägt die Nagra zur Erfüllung der Auflage 5.3 ("Konsequenzen Kombilager") des Bundesrats zum Entsorgungsprogramm 2016 bei: *"Im Entsorgungsprogramm 2021 hat die Nagra die grundsätzlich bestehenden Varianten bei einer Kombilager-Lösung aufzuzeigen, um mögliche sicherheitsrelevante Beeinträchtigungen der einzelnen Lagerteile zu vermeiden. Ausserdem sollen der relative Platzbedarf und die sicherheitstechnisch anzustrebenden Varianten dokumentiert werden"*. Die Auflage wird in Anhang 8.3 des Entsorgungsprogramms 2021 (Nagra 2021) ausführlich diskutiert; der vorliegende Hintergrundbericht liefert das Argumentarium zur Beurteilung der Wechselwirkungen zwischen dem SMA- und dem HAA-Lagerteil eines Kombilagers hinsichtlich der Langzeitsicherheit.

Darüber hinaus stellen die entwickelten Modellwerkzeuge im Rahmen des sicherheitstechnischen Vergleichs einen wichtigen Beitrag zur Auswahl der Standorte bzw. des Lagertyps dar. Auf der Grundlage einer umfassenden Zusammenstellung der behördlichen Vorgaben liefert der vorliegende Bericht einen methodischen Ansatz zur Ableitung von standortspezifisch zu erfüllenden sicherheitstechnischen Anforderungen bezüglich der Anordnung der HAA- und SMA-Lagerteile im Kombilager. Hierzu zählt insbesondere der zwischen den Lagerteilen einzuhaltende Mindestabstand, der gewährleistet, dass die möglichen THM-C-Wechselwirkungen zwischen den Lagerteilen über das Wirtgestein sowie allfällige radiologische Wechselwirkungen keine sicherheitsrelevante Beeinträchtigung darstellen. Weitere Aspekte sind mögliche THM-C Wechselwirkungen entlang der Zugangsbauwerke zu den Lagerteilen.

7.1 Behördliche Vorgaben zum Kombilager

Der Begriff "Kombilager" wird in verschiedenen Dokumenten der zuständigen Bundesbehörden (ENSI, BFE, KNS, Bundesrat) und der internationalen Expertengruppen im Sachplanverfahren (ESchT) mit leicht unterschiedlichen Definitionen verwendet. Ein Vergleich der erfassten Quellen zeigt (Kapitel 2), dass die Definitionen konsistent sind, auch wenn sie zum Teil komplementäre Aspekte des Kombilagers hervorheben.

Insgesamt wurden 23 Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise des ENSI und weiterer Akteure (Bundesamt für Energie, Kommission für nukleare Sicherheit, Expertengruppe Schweizer Tiefenlager) mit explizitem Bezug zum Kombilager gesichtet. Die Anforderungen beziehen sich ausnahmslos auf die Projektierung des Kombilagers (inkl. Standortwahl), sie enthalten keine konkreten Anforderungen bezüglich der sicherheitstechnischen und bautechnischen Auslegung des Kombilagers selbst.

Verbindliche Vorgaben, die für die Ableitung von Mindestanforderungen bezüglich der Anordnung und Auslegung der HAA- und SMA-Lagerteile im Kombilager benötigt werden, sind in den Präzisierungen des ENSI zur Etappe 3 zusammengefasst (ENSI 33/649; vgl. Kapitel 2.2.3).

7.2 Bereitstellung einer modell-unterstützten Bewertungsmethodik

Es wurde eine modellunterstützte Indikatormethodik entwickelt, mit der die sicherheitstechnische Gesamtbewertung des Kombilagers gegenüber zwei separaten Lagern für HAA und SMA in unterschiedlichen Standortgebieten möglich ist, wie dies in den Vorgaben durch die Behörden gefordert wird (vgl. Kapitel 2.2.3). In einem transparenten Analyseprozess wird mittels

quantitativer Indikatoren und den dazugehörigen Eignungskenngrößen der Nachweis erbracht, dass die Schutz- und Sicherheitsfunktionen der verschiedenen Barrierensysteme des Kombilagers durch Wechselwirkungen zwischen den SMA- und HAA-Lagerteilen nicht beeinträchtigt werden. Die Nachweisführung umfasst folgende Schritte (vgl. Kapitel 3.3):

- Systematisches Screening aller potenziell sicherheitsrelevanten Wechselwirkungen. Mögliche Beeinträchtigungen der Langzeitsicherheitsfunktionen des Multibarrierensystems eines Kombilagers werden identifiziert.
- Festlegung der mittels Systemanalyse zu beurteilenden Lagerkonfigurationen (Anordnung der SMA- und HAA-Lagerteile, sowie der Zugangsbauwerke). Um eine robuste Ermittlung des Mindestabstands zwischen den SMA- und HAA-Lagerteilen zu gewährleisten, werden ungünstige Lagerkonfigurationen ausgewählt.
- Durchführung der modellunterstützten Analysen der zu beurteilenden Lagerkonfigurationen, bestehend aus (i) phänomenologischen Systemanalysen, (ii) Robustheitsanalysen zur Beurteilung der Barrierenintegrität ("Schutz der Abfälle und der Barrierensysteme") und (iii) Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen zur Radionuklidfreisetzung ("Rückhaltung und verzögerte Freisetzung der Radionuklide").
- Synthese der Systemanalyse und Formulierung der Mindestanforderungen an ein Kombilager für jedes der drei vorgeschlagenen Standortgebiete.

7.3 Beispielhafte Durchführung von Systemanalysen

Die Durchführung der modellunterstützten Analysen erfolgt beispielhaft mittels provisorischer Referenzdatensätze zu den geologischen Verhältnissen in den Standortgebieten, zu den Lagerkonfigurationen und zu den abfallbezogenen Quelltermen (Wärme- und Gasfreisetzung). Hierzu werden sogenannte "provisorische Objektdatensätze" verwendet, die ausschliesslich für den vorliegenden Anwendungszweck der Methodikentwicklung gültig sind. Eine eingehende Überprüfung der Belastbarkeit der verwendeten geologischen Grundlagendaten (Gebirgseigenschaften, Zustandsgrößen, thermische und hydraulische Randbedingungen) wird dann erfolgen, wenn die finalen standortspezifischen Geodatensätze aus den Standorterkundungen der Etappe 3 zur Verfügung stehen.

Die phänomenologischen Systemanalysen dienen zur überschlägigen Abschätzung der sicherheitstechnischen Relevanz verschiedener Wechselwirkungen. Zu den betrachteten Aspekten zählen die Auflockerungszone um die verfüllten Einlagerungsbauwerke, die räumliche Variabilität der Wirtgesteinseigenschaften, die Gasakkumulation durch Korrosions- und Degradationsprozesse sowie der Wärmeeintrag durch die hochaktiven Abfälle. Für die phänomenologischen Systemanalysen wurde ein Abstand von 125 m zwischen den nächstgelegenen Einlagerungsbauwerken der beiden Lagerteile HAA und SMA angenommen. Die Simulationen zeigen, dass die Auflockerungszonen auch unter der Annahme ungünstiger geomechanischer Verhältnisse (geringe Gebirgsfestigkeit, ausgeprägte Spannungsanisotropie) nicht zu einer gegenseitigen Beeinträchtigung der Lagerfelder führen. Auch in Bezug auf die räumliche Variabilität der sicherheitsrelevanten Wirtgesteinseigenschaften konnten keine signifikanten Wechselwirkungen identifiziert werden. Bezüglich der Gasfreisetzung zeigen die Modellrechnungen, dass eine gegenseitige Beeinflussung der Lagerfelder zwar nicht ausgeschlossen wird, da sich infolge des Gasdruckaufbaus in den Lagerkammern die Gassättigung im umgebenden Wirtgestein geringfügig erhöht. Die Gassättigungen liegen allerdings im ‰-Bereich, so dass eine Beeinträchtigung der Barrierenfunktion des Wirtgesteins nicht zu erwarten ist. Als einzige Wechselwirkung von sicherheitstechnischer Relevanz weisen die thermohydraulischen Analysen auf eine signifikante Temperaturerhöhung in der dem HAA-Lagerfeld nächstgelegenen SMA-

Kaverne hin. Verglichen mit dem SMA-Einzellager, können unter ungünstigen Verhältnissen über einen Zeitraum von mehreren Hundert Jahren erhöhte Temperaturen von $> 5\text{ °C}$ auftreten. Ohne weitere Abklärungen kann nicht ausgeschlossen werden, dass solche Temperatureffekte zu verstärkten hydro-chemischen Interaktionen mit sicherheitstechnischer Relevanz in den technischen Barrierensystemen des SMA-Lagerteils führen können (z.B. Beeinträchtigung der Gastransportkapazität des Sand/Bentonit-Siegels).

Mit den beispielhaften Robustheitsanalysen zur Beurteilung der Barrierenintegrität ("Schutz der Abfälle und der Barrierensysteme") und Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen zur Radionuklidfreisetzung ("Rückhaltung und verzögerte Freisetzung der Radionuklide") wurde gezeigt, dass die verfügbaren Modellwerkzeuge für standortspezifische Lagerprojekte einsetzbar sind.

Aus den Systemanalysen zur Radionuklidfreisetzung folgt, dass ein Kombilager keine Nachteile bezüglich der Freisetzung von volatillem C-14 gegenüber zwei Einzellagern aufweist. Bezogen auf die Radionuklidfreisetzung über die Flüssigphase lässt sich dieselbe Aussage postulieren, solange die Barrierenintegritäten erhalten bleiben, was mittels der phänomenologischen Systemanalysen gezeigt wird.

7.4 Vorläufige Aussagen zum Mindestabstand

Mittels der phänomenologischen Analysen wurde gezeigt, dass selbst bei einem Abstand von 125 m zwischen den Lagerteilen SMA und HAA keine kritischen Systemzustände im Hinblick auf die mechanische Integrität der technischen und geologischen Barrieren zu erwarten sind. Weder die thermischen noch die gasbedingten Wechselwirkungen scheinen die Langzeitsicherheitsfunktionen der Barrierensysteme negativ zu beeinflussen. Es kann sogar nachgewiesen werden, dass die maximalen Gasdrücke im SMA-Lagerteil des Kombilagers gegenüber dem SMA-Einzellager geringfügig tiefer sind.

Auch aus den Analysen zur Radionuklidfreisetzung ergeben sich keine Anforderungen bezüglich des Mindestabstands zwischen Lagerteilen SMA und HAA eines Kombilagers. Aus radiologischer Sicht wirkt sich die Konfiguration des Kombilagers gegenüber den Einzellagern für HAA und SMA sogar günstig aus, da entlang der Betriebs- und Lüftungsbauwerke ein höheres Gasspeichervolumen zur Verfügung steht.

Als einzige Wechselwirkung mit potenziell sicherheitstechnischer Relevanz für ein Kombilager wird die Kategorie der thermo-hydro-chemischen (THC-) Interaktionen betrachtet, die vor allem im SMA-Lagerteil zu sicherheitstechnischen Beeinträchtigungen führen könnte (vgl. Kapitel 5.4). Vergleichsrechnungen zeigen, dass bei einem Abstand von 125 m zwischen den beiden Lagerteilen des Kombilagers in den SMA-Kavernen mit deutlich höheren Temperaturen gerechnet werden muss, als dies bei einem Abstand von 210 m zu erwarten wäre. Qualitativ erscheint ein Mindestabstand von 210 m zwischen den Lagerteilen HAA und SMA ausreichend zu sein, um sicherheitstechnische Beeinträchtigungen des SMA-Lagers durch THC-Wechselwirkungen zu vermeiden. Solide quantitativen Festlegungen sind jedoch erst möglich, wenn die neuen standortbezogenen Datengrundlagen ("Geodatensätze") vorliegen. Insbesondere wird erwartet, dass die unterschiedlichen thermischen Randbedingungen in den Standortgebieten (unterschiedliche Tiefenlage) und die standortspezifischen Messungen von Wärmeleitfähigkeiten von Wirtgestein und der Rahmengesteine einen Einfluss auf die Festlegung des Mindestabstands haben werden.

7.5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit der im vorliegenden Bericht entwickelten Methodik zur Definition des Mindestabstands zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen im Kombilager werden die Modellwerkzeuge bereitgestellt, um den Nachweis zu erbringen, dass bei geeigneter Lagerkonfiguration die möglichen THM-C-Wechselwirkungen sowie allfällige radiologische Wechselwirkungen zwischen den Lagerteilen über das Wirtgestein oder die Betriebs- und Lüftungsbauwerke keine sicherheitsrelevante Beeinträchtigung darstellen. Die Verfügbarkeit der Methodik ist ein wichtiger Meilenstein im Rahmen des sicherheitstechnischen Vergleichs, wenn im Rahmen der Gesamtbewertung der Standorte der Entscheid zwischen dem Kombilager und zwei separaten Einzellagern zu treffen ist.

Mit der Methodikentwicklung und den beispielhaften Anwendungen auf der Grundlage einer semi-generischen Lagerauslegung wurden wichtige Beiträge zum übergeordneten Workflow des sicherheitstechnischen Vergleichs geliefert. Die entwickelten Modellwerkzeuge werden im Laufe des Jahres 2021 nochmals überarbeitet, wenn (i) die neuen Geodatensätze (Version GDS – 2), (ii) die überarbeiteten Lagerprojekte (finale Anlagen- und Betriebsdatensätze – ADS) und (iii) die finalen Inventardatensätze (IDS/MIRAM) vorliegen. Anschliessend werden, voraussichtlich ab Ende 2021, die sicherheitsbezogenen Bewertungen des Kombilagers im Rahmen der Gesamtbewertung der Standortprojekte durchgeführt.

8 Literaturverzeichnis

- Alcolea, A. (2018): Hydraulic significance of the EDZ around underground structures of a geological repository for radioactive waste – A sensitivity study for the repository configurations L/ILW and SF/HLW in the siting regions JO, NL and ZNO. Nagra Arbeitsbericht NAB 18-17.
- BFE (2018): Sachplan geologische Tiefenlager – Ergebnisbericht zu Etappe 2: Festlegungen und Objektblätter. Bundesamt für Energie BFE, Bern, Schweiz.
- BFE (2008): Sachplan geologische Tiefenlager – Konzeptteil. Bundesamt für Energie BFE, Bern, Schweiz.
- BFE (2011): Sachplan geologische Tiefenlager – Konzeptteil. Revision vom 30. November 2011. Bundesamt für Energie BFE, Bern, Schweiz.
- Bundesrat (2018): Verfügung des Schweizerischen Bundesrats zum Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen. Schweizerischer Bundesrat, 21. Nov. 2018, Bern, Schweiz.
- Capouet, M., Necib, S., Schumacher, S., Mibus, J., Neeft, E.A.C., Norris, S., Nummi, O. & Rübel, A. (2018): CAST outcomes in the context of the safety case: WP6 Synthesis report (D6.4). European Commission.
- ENSI (2017a): Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2. ENSI 33/540, Apr. 2017. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg, Schweiz.
- ENSI (2017b): Stellungnahme des ENSI zur Kostenstudie 2016 über die Stilllegung der Kernanlagen und Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Schweiz. ENSI-AN-9930, Juli 2017. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg, Schweiz.
- ENSI (2018a): Stellungnahme zum Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen. ENSI 33/592, Apr. 2018. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg, Schweiz.
- ENSI (2018b): Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. ENSI 33/649, Nov. 2018. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg, Schweiz.
- ENSI (2020): Geologische Tiefenlager. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G03/d. ENSI, Brugg.
- ESchT (2017): Stellungnahme der ESchT zum 2×2-Vorschlag der Nagra, Jan. 2017, Expertengruppe Schweizer Tiefenlager, Deutschland.
- ESchT (2018): Empfehlungen der ESchT für Etappe 3 des Schweizer Sachplanverfahrens geologische Tiefenlager, Jan. 2018, Expertengruppe Schweizer Tiefenlager, Deutschland.

- Geomechanica (2018): Extent and shape of the EDZ around underground structures of a geological repository for radioactive waste – A sensitivity study for the repository configurations L/ILW and SF/HLW in the siting regions JO, NL and ZNO. Nagra Arbeitsbericht NAB 18-12.
- Heierli, J. (2016): A comparative study of engineering options for the disposal of high-level radioactive waste with regard to thermal effects and chemical degradation. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 53(9), 1276-1295.
- Jung, Y., Pau, G.S.H., Finsterle, S. & Doughty, C. (2018): TOUGH3 User's Guide, Version 1.0. LBNL-2001093. Energy Geosciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory University of California. Berkeley, California.
- Kämpfer, Th., Mishin, Y., Brommundt, J., Roger, J., Treille, E. & Hubschwerlen, N. (2014): Extension and Tuning of TOUGH2-MP EOS7R for the Assessment of Deep Geological Repositories for Nuclear Waste: Hydrogen, Arbitrarily Long Decay Chains, and Solubility Limits, *Nuclear Technology*, 187:2, 131-146.
- KEG (2003): Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003, Stand am 1. Januar 2009. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1, Schweiz.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, Stand am 1. Mai 2012. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.
- KNS (2017): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2 – Stellungnahme zum sicherheitstechnischen Gutachten des ENSI zum Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. KNS-02820, Juni 2017. Eidgenössische Kommission für nukleare Sicherheit KNS, Brugg, Schweiz.
- KNS (2018): Stellungnahme des ENSI zum Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen – Stellungnahme der KNS. KNS-02858, Apr. 2018. Eidgenössische Kommission für nukleare Sicherheit KNS, Brugg, Schweiz.
- Leupin, O.X., Smith, P., Marschall, P., Johnson, L., Savage, D., Cloet, V., Schneider, J. & Senger, R. (2016): Low- and intermediate-level waste repository-induced effects. Nagra Technischer Bericht NTB 14-14.
- Morris, M.D. (1991): Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics* 33 (2), 161–174.
- Nagra (2008a): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse (Hauptbericht). Nagra Technischer Bericht NTB 08-03.
- Nagra (2008b): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager; Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie; Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit. Nagra Technischer Bericht NTB 08-05.
- Nagra (2014a): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2. Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. Nagra Technischer Bericht NTB 14-01.

- Nagra (2014b): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Charakteristische Dosisintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barrierensysteme. Nagra Technischer Bericht NTB 14-03.
- Nagra (2014c): Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien MIRAM 14. Nagra Technischer Bericht NTB 14-04.
- Nagra (2014d): Modelling of Radionuclide Transport along the Underground Access Structures of Deep Geological Repositories. Nagra Technical Report NTB 14-10.
- Nagra (2016a): Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen. Nagra Technischer Bericht NTB 16-01.
- Nagra (2016b): Production, consumption and transport of gases in deep geological repositories according to the Swiss disposal concept. Nagra Technical Report NTB 16-03.
- Nagra (2016c): Modelling of Gas Generation in Deep Geological Repositories after Closure. Nagra Technical Report NTB 16-04.
- Nagra (2016d): Sensitivity analyses of gas release from a L/ILW repository in the Opalinus Clay including the microbial consumption of hydrogen. Nagra Arbeitsbericht NAB 16-07.
- Nagra (2016e): Sensitivity analyses of gas release from a SF/HLW repository in the Opalinus Clay. Nagra Arbeitsbericht NAB 16-08.
- Nagra (2020): Standortunabhängiger Vergleich eines Kombilagers mit zwei Einzellagern hinsichtlich Bau- und Betriebsabläufe sowie Umwelt. Nagra Arbeitsbericht NAB 19-15.
- Nagra (2021): Entsorgungsprogramm 2021 der Entsorgungspflichtigen. Nagra Technischer Bericht NTB 21-01.
- Papafotiou, A. & Namhata, A. (2018): Development of models of the entire L/ILW repository for the assessment of repository induced effects in the siting regions Jura Ost, Nördlich Lägern, Zürich Nordost. Nagra Arbeitsbericht NAB 18-20.
- Papafotiou, A. & Senger, R. (2013a): Thermo-hydraulic modelling of the temperature distribution in the siting region Nördlich Lägern. Nagra Arbeitsbericht NAB 13-56.
- Papafotiou, A. & Senger, R. (2013b): Thermo-hydraulic modelling of the temperature distribution in the siting region Zürich Nordost and Südanden. Nagra Arbeitsbericht NAB 13-57.
- Papafotiou, A. & Senger, R. (2013c): Thermo-hydraulic modelling of the temperature distribution in the siting region Jura Ost. Nagra Arbeitsbericht NAB 14-39.
- Papafotiou, A., Namhata, A., Singh, A., Williams, M., Jigmond, M. & Marschall, P. (2017a): Parametric sensitivity analysis of heat and gas release for a geological repository for SF/HLW in Northern Switzerland. Nagra Arbeitsbericht NAB 17-05.
- Papafotiou, A., Williams, M., Singh, A. & Jigmond, M. (2017b): Parametric sensitivity analysis of gas release from a L/ILW repository in the Opalinus Clay. Nagra Arbeitsbericht NAB 17-08.

Anhang A: Vorgaben und Erwartungen seitens der Behörden, AdK und EschT in Bezug auf ein Kombilager

Tab. A-1: Übersicht der Vorgaben, Empfehlungen und Hinweise zum Kombilager von Behörden und Expertengruppen im Sachplanverfahren

Nr.	Zitat Originaltext	Quelle	Priorität	Kommentar
1	Es ist aufzuzeigen, welche Mindestabstände zwischen den getrennten Lagerteilen für HAA und SMA einzuhalten sind.	ENSI (2018b), S. 21	Vorgabe	Die Zitate 1 und 2 betreffen Mindestabstände zwischen den Lagerteilen für SMA und HAA.
2	Die Nagra hat bei der Evaluation einer Kombilager-Lösung aufzuzeigen und zu begründen, welche Mindestabstände zwischen HAA- und SMA-Lager einzuhalten sind und welche Konsequenzen sich daraus für den Platzbedarf ergeben.	ENSI (2018b), S. 23	Vorgabe	
3	Im zweiten Schritt wird der Standort für das SMA-Lager gewählt. Der gewählte EG des HAA-Lagers inklusive seiner für den Standortvergleich verwendeten Platzreserven steht nicht mehr für die Abgrenzung des EG für das SMA-Lager zur Verfügung.	ENSI (2018b), S. 23	Vorgabe	Siehe Fig. 1.
4	Bei der Abgrenzung des EG für das SMA-Lager im HAA-Standortgebiet ist zu erläutern, welche Konsequenzen sich aus der Realisierung eines Kombilagere für Bau-, Betriebs- und Langzeitsicherheit ergeben. Diese sind beim Vergleich mit den weiteren SMA-EGs zu berücksichtigen.	ENSI (2018b), S. 21	Vorgabe	Die Zitate 4 bis 8 betreffen Wechselwirkungen zwischen den Lagerteilen, Konsequenzen für Platzbedarf/ Platzreserven und Varianten für ein Kombilager.
5	Der Einfluss auf die Bestimmung der Platzreserven und die Auswirkungen der lagerbedingten Einflüsse auf das SMA- als auch HAA-Lager sind aufzuzeigen.	ENSI (2018b), S. 21	Vorgabe	
6	Es ist sicherzustellen, dass die möglichen Wechselwirkungen zwischen dem SMA- und dem HAA-Lager eines Kombilagere keine sicherheitsrelevante Beeinträchtigung darstellen.	ENSI (2018b), S. 21	Vorgabe	
7	Die Entsorgungspflichtigen haben bei der Evaluation einer Kombilager-Lösung aufzuzeigen, welche Konsequenzen sich aus möglichen Wechselwirkungen der einzelnen Lagerteile eines Kombilagere ergeben. Dazu ist im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch aufzuzeigen, welche Varianten grundsätzlich bestehen, welcher relative Platzbedarf sich daraus ergibt und welche Varianten sicherheitstechnisch anzustreben sind (A.2, Kapitel 8.2).	ENSI (2018a), S. 31f.	Vorgabe	

Tab. A-1: Fortsetzung

Nr.	Zitat Originaltext	Quelle	Priorität	Kommentar
8	Im EP21 hat die Nagra die grundsätzlich bestehenden Varianten bei einer Kombilager-Lösung aufzuzeigen, um mögliche sicherheitsrelevante Beeinträchtigungen der einzelnen Lagerteile zu vermeiden. Ausserdem soll der relative Platzbedarf und die sicherheitstechnisch anzustrebenden Varianten dokumentiert werden.	Bundesrat (2018), S. 21f.	Vorgabe (Auflage für EP21)	
9	Das ENSI nimmt die Überlegungen der Nagra zu einem Kombilager zur Kenntnis. Es nimmt im Rahmen seiner Beurteilung zu Etappe 2 SGT dazu nicht explizit Stellung, da das Ziel der Etappe 2 SGT auf der Standorteinengung liegt. Die Vor- und Nachteile eines Kombilagers im Vergleich zu zwei Lagern in separaten Standortgebieten sind von der Nagra in Etappe 3 SGT darzulegen.	ENSI (2017a), S. 249	Vorgabe	Die Zitate 9 bis 12 betreffen den Vergleich der Variante Kombilager zu zwei Einzellagern in separaten Standortgebieten.
10	Bezüglich der Variante eines Kombilagers ist davon auszugehen, dass diese im weiteren Verfahrensablauf sicherheitstechnisch im Vergleich zu zwei getrennten Lagern für HAA und SMA zu beurteilen sein wird. Die hierfür erforderlichen Grundlagen hinsichtlich Lagerkonzeption bzw. -auslegung sollten unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Anforderungen der Abfalltypen im Zuge von Etappe 3 SGT erarbeitet werden.	KNS (2017), S. 38	Hinweis	
11	In Etappe 3 des Sachplanverfahrens muss die Nagra die Vor- und Nachteile eines Kombilagers für SMA und HAA im gleichen Standortgebiet im Vergleich zu zwei Lagern in separaten Standortgebieten prüfen und darlegen.	BFE (2018), S. 15	Vorgabe (verbindliche Festlegung)	
12	Aus sicherheitstechnischer Sicht zeichnet sich heute keine Präferenz für die Realisierung der Einzellager bzw. eines Kombilagers ab. Der Entscheid über die Realisierung von zwei Einzellagern oder einem Kombilager kann erst nach Vorliegen der Ergebnisse der weiteren Standortuntersuchungen (Bohrungen, Auswertung der 3D-Seismik etc.) getroffen werden.	ENSI (2017b), S. 32	Hinweis	
13	<i>Empfehlung 4-4:</i> Solange das Kombilager als Option in Betracht gezogen wird, empfiehlt das ENSI in den nächsten Kostenstudien ein eigenes, detaillierteres Konzept für die Auslegung und die Betriebsführung der OFA des Kombilagers zu verwenden.	ENSI (2017b), S. 35	Empfehlung	Die Zitate 13 und 14 betreffen die OFA eines Kombilagers.

Tab. A-1: Fortsetzung

Nr.	Zitat Originaltext	Quelle	Priorität	Kommentar
14	Von den funktionellen und betrieblichen Abläufen, insbesondere aber auch von den Durchsätzen her, müssen aus Sicht des ENSI für die Verpackungsanlage SMA/LMA des Kombilagers wesentliche Anpassungen gegenüber dem Anlagenteil "Verpackung LMA" des HAA-Lagers gemacht werden. Aus Sicht des ENSI ist es absolut unüblich und entspricht auch nicht dem Stand heute betriebener Anlagen in Heiss-Zellentechnik, dass eine Anlage zur offenen Handhabung grosser Mengen an bestrahlten Brennelementen und zur Dekontamination und Zerlegung von mehr als 25'000 t Material, welches über Jahrzehnte in teilweise direktem Kontakt mit den bestrahlten Brennelementen war, nicht mit Einrichtungen zur Sammlung und Verarbeitung kontaminierter Dekontaminationslösungen ausgestattet ist.	ENSI (2017b), S. 48	Hinweis	
15	Falls die gewählten EG des HAA- und des SMA-Lagers in einem Standortgebiet liegen, ist im Sicherheitsnachweis (Kapitel 5.1 und 5.2) ein Kombilager zu betrachten.	ENSI (2018b), S. 21	Vorgabe	
16	Die Nagra hält im NTB 16-01 fest, dass beim Kombilager die beiden Lagerteile (HAA und SMA) im gleichen oder in unterschiedlichen Wirtgesteinen liegen können. Diese Aussage ist im Widerspruch zu Aussagen im NTB 14-01, wo als Wirtgestein nur der Opalinuston weitergezogen wird. Die Option, dass Teile der SMA-Abfälle auch im 'Braunen Dogger' eingelagert werden könnten (d.h. effektiv das SMA-Lager auf zwei Wirtgesteine aufgeteilt würde), wurde seitens ENSI nicht explizit geprüft. Falls diese Option weiterverfolgt würde, müsste die Nagra in Etappe 3 SGT zeigen, dass ein solches Vorgehen sicherheitsgerichtet wäre.	ENSI (2018a), S. 23	Hinweis	

Tab. A-1: Fortsetzung

Nr.	Zitat Originaltext	Quelle	Priorität	Kommentar
17	Die Nagra sieht bei einem Kombilager eine Aufteilung in ein HAA- und ein SMA/LMA-Lager vor. Sie geht damit davon aus, dass die LMA-Lagerkavernen in das SMA-Lager integriert werden. Aus Sicht des ENSI kann dies sicherheitstechnisch sinnvoll sein, aber hier sind Abklärungen vorzulegen, die aufzeigen, inwiefern die unterschiedlichen Abfalltypen der Kategorie LMA und SMA miteinander kompatibel sind, und ob eine zusätzliche Aufteilung der Abfälle auf räumlich stärker separierte Lagerkavernen die gesamtheitliche Sicherheit erhöhen könnte.	ENSI (2018a), S. 23	Vorgabe	
18	Gemäss NTB 16-01 (Fig. 3-12) sollen die verschiedenen Lagerteile auf dem Niveau der Lagerebene erschlossen werden. Das ENSI weist darauf hin, dass es im Sinne einer unabhängigen Verschlussung der unterschiedlichen Lagerteile ggf. auch sinnvoll sein könnte, die Lagerteile bereits auf Niveau der Multifunktionsstelle (vgl. NAB 16-45, Fig. 2-3-1 und 2.3-2, d. h. am oberen Ende des Wirtgesteins oder der Rahmengesteine) voneinander zu trennen.	ENSI (2018a), S. 23	Hinweis	
19	Nach Einschätzung der ESchT ist die Umsetzbarkeit eines Kombilagers mit dem Vorgehen der Nagra, die optimierten Lagerperimeter für ein SMA-Lager und ein HAA-Lager additiv anzuordnen, plausibel. Dennoch ist ohne eine konkrete Planung für ein Kombilager z.B. aufgrund unterschiedlicher Anforderungen aus dem Betrieb und die insgesamt längere Betriebsdauer eines Kombilagers die Umsetzbarkeit an den betrachteten Standorten nicht zweifelsfrei belegt. Nach bisherigen Erkenntnissen ergeben sich grundsätzlich aus den unterschiedlichen Abfalltypen relevante unterschiedliche Anforderungen an den Betrieb eines Kombilagers und an die für den sicheren Verschluss und die Gewährleistung der Langzeitsicherheit in der Nachbetriebs- und Nachverschlussphase. Diese unterschiedlichen Anforderungen erfordern in der Regel eine räumliche und systemtechnische Trennung der Lagerung der Abfalltypen in einem Endlager.	ESchT (2017), S. 31	Hinweis	Die Zitate 19 bis 22 betreffen die Realisierbarkeit und Planung des Kombilagers.

Tab. A-1: Fortsetzung

Nr.	Zitat Originaltext	Quelle	Priorität	Kommentar
	Generell sind aus Sicht der ESchT die optimierten Lagerperimeter ausreichend für die Aufnahme des gesamten Abfallinventars und weisen Reserven auf. Auch wenn der Einschätzung der Nagra, dass das Standortgebiet zur Aufnahme eines Kombilagers geeignet ist, grundsätzlich gefolgt werden kann, sollte die Realisierbarkeit eines Kombilagers im Standortgebiet Jura Ost durch Vorlage einer konkreteren Planung aufgezeigt werden.	ESchT (2017), S. 44f.	Empfehlung	
21	Die Realisierbarkeit eines Kombilagers im Standortgebiet Zürich-Nordost sollte durch Vorlage einer konkreteren Planung aufgezeigt werden.	ESchT (2017), S. 47	Empfehlung	
22	Hierbei sollte auch die Realisierbarkeit eines Kombilagers (eines in einem Standortgebiet kombinierten SMA- und HAA-Lagers) in den zu betrachtenden Standortgebieten nachvollziehbar dargestellt und durch Planungen unterlegt werden, insbesondere da die unterschiedlichen Abfalltypen unterschiedliche Anforderungen an ein Kombilager ergeben, die in der Regel eine räumliche und systemtechnische Trennung bei der Lagerung der Abfalltypen bedingen.	ESchT (2017), S. 51	Empfehlung	

Anhang B: Ergänzende Angaben zu den Systemanalysen zur RN-Freisetzung (Kapitel 6)

B.1 Geometrische Eigenschaften der Lagerbauwerke und daraus abgeleiteter Lagerstrukturen im Modell

Tab. B-1: Geometrische Eigenschaften der berücksichtigten Lagerbauwerke im SMA-Lagerteil gemäss Tab. 2-5 in NAB 16-07 (Nagra 2016d) sowie im HAA-Lagerteil gemäss Tab. 2-8 in NAB 16-08 (Nagra 2016e).

Die Anzahl Lagerkammern wurden entsprechend NTB 16-01 (Nagra 2016a) und die Länge der HAA-Lagerkammern gemäss aktuellem Planungstand aktualisiert.

Die Farben deuten an, welche Bauwerke welcher Lagerstruktur im Modell zugewiesen bzw. darin zusammengefasst werden (siehe Tab. B-2). Keine Farbe bedeutet, dass das Bauwerk in beiden Lagerteilen vorkommt; in diesem Fall wird nur jenes des HAA-Lagerteils übernommen.

	Lagerbauwerk	Anzahl Bauwerke	Profil	Querschnitt [m ²]	Länge gesamt [m]	Porosität [-]	Volumen [m ³]	Porenvolumen [m ³]
SMA Lagerteil (NAB 16-07)	L/ILW Caverns	7	K09	102.2	1'400	0.25	143'080	35'770
	V1 Seals	7	M, I	47	140	0.30	6'524	1'957
	Branch Tunnels	7	L	20.5	747	0.35	15'307	5'357
	Operation Gallery	1	L	20.5	645	0.35	13'229	4'630
	Ventilation Tunnel	1	D5	19.9	589	0.35	11'714	4'100
	V2 Seals	2	L	20.5	120	0.35	2'460	861
	Test Facility	1	L, D5	20.1	1'584	0.35	31'838	11'143
	Observation Gallery	1	D5	19.9	372	0.35	7'403	2'591
	Access Tunnels in OPA	1	A5	31.8	375	0.35	11'925	4'174
	V4 Seal	1	A5	31.8	40	0.35	1'272	445
	Shafts (V3) in OPA	2	S3	28.3	115	0.30	3'258	977
	Shafts (UCU)	2	S3	28.3	80	0.35	2'264	792
HAA Lagerteil (NAB 16-08)	SF/HLW Tunnels	20	F	4.9	16'000	0.4	78'400	31'360
	SF/HLW V1 Seals	20	M, N	4.9	800	0.3	3'920	1'176
	Branch tunnels	20	E	16.2	1'020	0.3	16'524	4'957
	Operation gallery	1	L	20.5	837	0.3	17'159	5'148
	Ventilationstunnel	1	D5	19.9	1'139	0.3	22'671	6'801
	V2 Seals	2	L	20.5	40	0.3	820	246
	Test facility	1	L, A5, D5	20.83	2'148	0.3	44'743	13'423
	Observation gallery	1	D5	19.9	930	0.3	18'507	5'552
	Access tunnels in OPA	1	A5	31.8	840	0.3	26'712	8'014
	Shafts (V3) in OPA	2	S3	28.3	94	0.4	2'660	1'064
	Shafts (UCU)	2	S3	28.3	100	0.3	2'830	849
	V4 Seal	1	A5	31.8	40	0.3	1'272	382

Tab. B-2: Geometrische Eigenschaften der Lagerstrukturen im Modell mit Angabe des Verfüllmaterials und entsprechender Materialklasse (korrespondierend mit Tab. B-3 und Tab. B-4) sowie der Zuordnung zum entsprechenden Makroelement

Die Farben deuten an, welche Lagerbauwerke (aus Tab. B-1) welcher Lagerstruktur im Modell entsprechen bzw. darin zusammengefasst sind. Die Strukturen OpVentKombi sowie Boundary kommen in keinem der Lagerteile vor und sind deshalb nicht eingefärbt, siehe dazu auch Fussnoten a und d. Die SMA- und HAA-Lagerkammern werden dem Kombi-Makroelement (A) zugeordnet und gemäss Kapitel 6.2.4 bzw. Fig. 6-7 auf jeweils zwei Lagerstrukturen (seitlich/zentral) mit unterschiedlichen Skalierungsfaktoren verteilt.

Lagerstruktur	Verfüllmaterial	Materialklasse	Makroelement	Skalierungsfaktor	Volumen gesamt [m ³]	Querschnitt [m ²]	Radius [m]	Effektive Länge pro Struktur [m]
SMA S / SMA C	SMAS / SMAC	SMA	A	6 1	143'080	102.2	5.70	200
HAA S / HAA C	HAAS / HAAC	HAA	A	17 1	70'560	4.9	1.25	800
V1_SMA	V1SMA	V1_SMA	B	7	6'524	46.6	3.85	20
OpVentLK_SMA	RestS	Tunnel	C	2	40'249	20.5	2.55	982
V2_SMA	V2SMA	V2_SMA	D	2	2'460	20.5	2.55	60
V1_HAA	V1HAA	V1_HAA	E	18	3'528	4.9	1.25	40
OpVentLK_HAA	RestH	Tunnel	F	2	50'719	20.5	2.55	1'237
V2_HAA	V2HAA	V2_HAA	G	2	820	20.5	2.55	20
OpVentKombi	Rest	Tunnel	H	2	1'845	20.5	2.55	45 ^a
ObsTest ^c	Rest	Tunnel	I	1	63'250	20.83	2.57	3'036
AccessTunnel	Rest	Tunnel	J	1	26'712	31.8	3.18	840
V4	V4	V4	K	1	1'272	31.8	3.18	40
Boundary ^d	V4BND	V4	L	1	1E50	31.8	3.18	1
Shaft	V3 / Shaft ^e	V3 / Tunnel	M	2	9'201	28.3	3.00	163 ^b

- ^a Die Länge und damit das Volumen ergeben sich aus d_Kombi (125 m) – Länge V2_SMA – Länge V2_HAA.
- ^b Die Länge und damit das Volumen ergeben sich aus der Stratigraphie (55 m OPA plus 105 m ORG). Hinzu kommt der Radius der Struktur OpVentKombi, da der Schachtfuss im Modell am Boden des Bautunnels ansetzt (z = -2.55), siehe auch Fig. 6-1.
- ^c Der Kontrollstollen (*Observation Gallery*) ist gemäss Skizze eines generischen Kombilagers in NTB 16-01 (Nagra 2016a) für beide Lagerteile vorhanden, in der Lagerstruktur ObsTest wird jedoch nur jene des HAA-Lagers gemäss NAB 16-08 (Nagra 2016e) zugrunde gelegt. Die entsprechende Länge im HAA-Lager ist aber konsistent mit der abgeschätzten Gesamtlänge im generischen Kombilager.
- ^d Stellt die Druckrandbedingung ausserhalb des V4-Siegels dar. Zur modelltechnischen Umsetzung wird der Struktur eine kleine Länge, jedoch ein sehr grosses Volumen zugewiesen.
- ^e V3 bezeichnet die Schacht-Versiegelung im Opalinuston und Shaft die Verfüllung darüber. Für die letztere wird bei den Vergleichsrechnungen (Kapitel 6.2.6) die Bezeichnung RestM verwendet.

B.2 Parameterbandbreiten und -verteilungen

Tab. B-3: Parameterbandbreiten und -verteilungen für die globale Sensitivitätsanalyse (Morris OAT) sowie die Monte-Carlo-Ungewissheitsanalyse
Nicht variierte Parameter sind Tab. B-4 zu entnehmen.

Name/Formel	Einheit	Verteilung	Ref	UE	OE	Parameterbeschreibung
por_OPA	-	Gleichverteilt	0.12	0.06	0.18	Porosität OPA
por_ORG	-	Gleichverteilt	0.12	0.05	0.15	Porosität ORG
por_URG	-	Gleichverteilt	0.06	0.03	0.09	Porosität URG
eta_por_EDZ	-	Gleichverteilt	1.25	1.00	1.50	Faktor eta_por_AUZ
por_EDZ = eta_por_EDZ * por_OPA	-	Berechnete Grösse	0.15	0.06	0.27	Porosität AUZ
por_V1_HAA	-	Gleichverteilt	0.30	0.25	0.35	Porosität Siegel V1 HAA
por_V1_SMA	-	Gleichverteilt	0.30	0.25	0.35	Porosität Siegel V1 SMA
por_V2_HAA	-	Gleichverteilt	0.35	0.30	0.40	Porosität Siegel V2 HAA
por_V2_SMA	-	Gleichverteilt	0.35	0.30	0.40	Porosität Siegel V2 SMA
por_V3	-	Gleichverteilt	0.30	0.25	0.35	Porosität Siegel V3
por_V4	-	Gleichverteilt	0.35	0.30	0.40	Porosität Siegel V4
por_Tunnel	-	Gleichverteilt	0.35	0.30	0.40	Porosität Betriebs-, Bau- und restliche Tunnel
por_SMA	-	Gleichverteilt	0.23	0.18	0.28	Porosität SMA-Lagerkammern
por_HAA	-	Gleichverteilt	0.39	0.34	0.44	Porosität HAA-Lagerkammern
k_OPA	m ²	Log-gleichverteilt	2.00E-21	2.00E-22	2.00E-20	Permeabilität OPA (vertikal)
k_ORG	m ²	Log-gleichverteilt	1.00E-19	1.00E-20	1.00E-18	Permeabilität ORG (vertikal)
k_URG	m ²	Log-gleichverteilt	1.00E-19	1.00E-20	1.00E-18	Permeabilität URG (vertikal)
eta_k_EDZ	-	Log-gleichverteilt	5	1	50	Faktor eta_k_AUZ

Tab. B-3: Fortsetzung

Name/Formel	Einheit	Verteilung	Ref	UE	OE	Parameterbeschreibung
$k_{EDZ} = \eta \cdot k_{EDZ} \cdot k_{OPA} \cdot A_{OPA}$	m ²	Berechnete Grösse	5.00E-20	2.00E-22	1.00E-17	Permeabilität AUZ (isotrop)
k_V1_HAA	m ²	Log-gleichverteilt	1.00E-20	1.00E-21	1.00E-19	Permeabilität Siegel V1 HAA (isotrop)
k_V1_SMA	m ²	Log-gleichverteilt	1.00E-16	1.00E-17	1.00E-15	Permeabilität Siegel V1 SMA (isotrop)
k_V2_HAA	m ²	Log-gleichverteilt	1.00E-16	1.00E-17	1.00E-15	Permeabilität Siegel V2 HAA (isotrop)
k_V2_SMA	m ²	Log-gleichverteilt	1.00E-16	1.00E-17	1.00E-15	Permeabilität Siegel V2 SMA (isotrop)
k_V3	m ²	Log-gleichverteilt	5.00E-18	5.00E-19	5.00E-17	Permeabilität Siegel V3 (isotrop)
k_V4	m ²	Log-gleichverteilt	5.00E-18	5.00E-19	5.00E-17	Permeabilität Siegel V4 (isotrop)
k_Tunnel	m ²	Log-gleichverteilt	1.00E-15	1.00E-16	1.00E-14	Permeabilität Betriebs-, Bau- und restliche Tunnel (isotrop)
k_SMA	m ²	Log-gleichverteilt	1.00E-14	1.00E-15	1.00E-13	Permeabilität SMA-Lagerkammern (isotrop)
k_HAA	m ²	Log-gleichverteilt	3.50E-20	3.50E-21	3.50E-19	Permeabilität HAA-Lagerkammern (isotrop)
A_OPA	-	Gleichverteilt	5	1	10	Anisotropie OPA für Permeabilität
A_ORG	-	Gleichverteilt	5	5	10	Anisotropie ORG für Permeabilität
A_URG	-	Gleichverteilt	5	5	10	Anisotropie URG für Permeabilität
cwet_OPA	W/m/K	Gleichverteilt	1.55	1.40	1.71	Wärmeleitfähigkeit OPA wassergesättigt
cwet_ORG	W/m/K	Gleichverteilt	2.20	1.98	2.42	Wärmeleitfähigkeit ORG wassergesättigt
cwet_URG	W/m/K	Gleichverteilt	2.14	1.93	2.35	Wärmeleitfähigkeit URG wassergesättigt
$cwet_{EDZ} = cwet_{OPA}$	W/m/K	Berechnete Grösse	1.55	1.40	1.71	Wärmeleitfähigkeit AUZ wassergesättigt
cwet_HAA	W/m/K	Gleichverteilt	1.00	0.90	1.10	Wärmeleitfähigkeit HAA-Lagerkammern wassergesättigt
spht_OPA	J/kg/K	Gleichverteilt	995	896	1'095	Spez. Wärmekapazität OPA
spht_ORG	J/kg/K	Gleichverteilt	995	896	1'095	Spez. Wärmekapazität ORG
spht_URG	J/kg/K	Gleichverteilt	995	896	1'095	Spez. Wärmekapazität URG
$spht_{EDZ} = spht_{OPA}$	J/kg/K	Berechnete Grösse	995	896	1'095	Spez. Wärmekapazität AUZ

Tab. B-3: Fortsetzung

Name/Formel	Einheit	Verteilung	Ref	UE	OE	Parameterbeschreibung
spht_HAA	J/kg/K	Gleichverteilt	733	660	806	Spez. Wärmekapazität HAA-Lagerkammern
com_OPA	1/Pa	Gleichverteilt	1.70E-09	1.36E-09	2.04E-09	Porenkompressibilität OPA
com_ORG	1/Pa	Gleichverteilt	2.62E-10	2.10E-10	3.14E-10	Porenkompressibilität ORG
com_URG	1/Pa	Gleichverteilt	2.62E-10	2.10E-10	3.14E-10	Porenkompressibilität URG
com_EDZ = com_OPA	1/Pa	Berechnete Grösse	1.70E-09	1.36E-09	2.04E-09	Porenkompressibilität AUZ
exp_OPA	1/K	Gleichverteilt	1.70E-05	1.36E-05	2.04E-05	Therm. Porenexpansivität OPA
exp_ORG	1/K	Gleichverteilt	1.70E-05	1.36E-05	2.04E-05	Therm. Porenexpansivität ORG
exp_URG	1/K	Gleichverteilt	1.70E-05	1.36E-05	2.04E-05	Therm. Porenexpansivität URG
exp_EDZ = exp_OPA	1/K	Berechnete Grösse	1.70E-05	1.36E-05	2.04E-05	Therm. Porenexpansivität AUZ
cdry_OPA = cwet_OPA	W/m/K	Berechnete Grösse	1.55	1.40	1.71	Wärmeleitfähigkeit OPA trocken
cdry_ORG = cwet_ORG	W/m/K	Berechnete Grösse	2.20	1.98	2.42	Wärmeleitfähigkeit ORG trocken
cdry_URG = cwet_URG	W/m/K	Berechnete Grösse	2.14	1.93	2.35	Wärmeleitfähigkeit URG trocken
cdry_EDZ = cwet_EDZ	W/m/K	Berechnete Grösse	1.55	1.40	1.71	Wärmeleitfähigkeit AUZ trocken
cdry_HAA = cwet_HAA * 0.3	W/m/K	Berechnete Grösse	0.30	0.27	0.33	Wärmeleitfähigkeit HAA-Lagerkammern trocken
n_OPA	-	Gleichverteilt	1.60	1.40	1.80	Van Genuchten n (Formfaktor) OPA
n_ORG	-	Gleichverteilt	2.00	1.60	2.40	Van Genuchten n (Formfaktor) ORG
n_URG	-	Gleichverteilt	2.00	1.60	2.40	Van Genuchten n (Formfaktor) URG
n_EDZ = n_OPA	-	Berechnete Grösse	1.60	1.40	1.80	Van Genuchten n (Formfaktor) AUZ
n_V1_HAA	-	Gleichverteilt	2.50	2.30	2.70	Van Genuchten n (Formfaktor) Siegel V1 HAA
n_V1_SMA	-	Gleichverteilt	2.50	2.30	2.70	Van Genuchten n (Formfaktor) Siegel V1 SMA
n_V2_HAA	-	Gleichverteilt	2.50	2.30	2.70	Van Genuchten n (Formfaktor) Siegel V2 HAA
n_V2_SMA	-	Gleichverteilt	2.50	2.30	2.70	Van Genuchten n (Formfaktor) Siegel V2 SMA

Tab. B-3: Fortsetzung

Name/Formel	Einheit	Verteilung	Ref	UE	OE	Parameterbeschreibung
n_V3	-	Gleichverteilt	1.82	1.62	2.02	Van Genuchten n (Formfaktor) Siegel V3
n_V4	-	Gleichverteilt	2.50	2.30	2.70	Van Genuchten n (Formfaktor) Siegel V4
n_Tunnel	-	Gleichverteilt	2.50	2.30	2.70	Van Genuchten n (Formfaktor) Betriebs-, Bau- und restliche Tunnel
n_SMA	-	Gleichverteilt	2.00	1.80	2.20	Van Genuchten n (Formfaktor) SMA-Lagerkammern
n_HAA	-	Gleichverteilt	1.67	1.47	1.87	Van Genuchten n (Formfaktor) HAA-Lagerkammern
P0_OPA	Pa	Log-gleichverteilt	3.40E+07	1.70E+07	6.80E+07	Van Genuchten P0 (Gaseindringdruck) OPA
P0_ORG	Pa	Log-gleichverteilt	1.00E+07	3.33E+06	3.00E+07	Van Genuchten P0 (Gaseindringdruck) ORG
P0_URG	Pa	Log-gleichverteilt	1.00E+07	3.33E+06	3.00E+07	Van Genuchten P0 (Gaseindringdruck) URG
eta_P0_EDZ	-	Log-gleichverteilt	0.5	0.1	1	Faktor eta_P0_AUZ
$P0_EDZ = P0_OPA * eta_P0_EDZ$	Pa	Berechnete Grösse	1.70E+07	1.70E+06	6.80E+07	Van Genuchten P0 (Gaseindringdruck) AUZ
P0_V1_HAA	Pa	Log-gleichverteilt	4.00E+03	1.33E+03	1.20E+04	Van Genuchten P0 (Gaseindringdruck) Siegel V1 HAA
P0_V1_SMA	Pa	Log-gleichverteilt	4.00E+03	1.33E+03	1.20E+04	Van Genuchten P0 (Gaseindringdruck) Siegel V1 SMA
P0_V2_HAA	Pa	Log-gleichverteilt	4.00E+03	1.33E+03	1.20E+04	Van Genuchten P0 (Gaseindringdruck) Siegel V2 HAA
P0_V2_SMA	Pa	Log-gleichverteilt	4.00E+03	1.33E+03	1.20E+04	Van Genuchten P0 (Gaseindringdruck) Siegel V2 SMA
P0_V3	Pa	Log-gleichverteilt	1.80E+07	6.00E+06	5.40E+07	Van Genuchten P0 (Gaseindringdruck) Siegel V3
P0_V4	Pa	Log-gleichverteilt	4.00E+03	1.33E+03	1.20E+04	Van Genuchten P0 (Gaseindringdruck) Siegel V4
P0_Tunnel	Pa	Log-gleichverteilt	4.00E+03	1.33E+03	1.20E+04	Van Genuchten P0 (Gaseindringdruck) Betriebs-, Bau- und restliche Tunnel
P0_SMA	Pa	Log-gleichverteilt	5.00E+02	1.67E+02	1.20E+04	Van Genuchten P0 (Gaseindringdruck) SMA-Lagerkammern
P0_HAA	Pa	Log-gleichverteilt	1.00E+07	3.33E+06	3.00E+07	Van Genuchten P0 (Gaseindringdruck) HAA-Lagerkammern
SI_0_TS	-	Gleichverteilt	0.50	0.25	0.75	Anfangssättigung Tunnel und Siegel
$SI_0_V1_HAA = SI_0_TS$	-	Berechnete Grösse	0.50	0.25	0.75	Anfangssättigung Siegel V1 HAA
$SI_0_V1_SMA = SI_0_TS$	-	Berechnete Grösse	0.50	0.25	0.75	Anfangssättigung Siegel V1 SMA

Tab. B-3: Fortsetzung

Name/Formel	Einheit	Verteilung	Ref	UE	OE	Parameterbeschreibung
Sl_0_V2_HAA = Sl_0_TS	-	Berechnete Grösse	0.50	0.25	0.75	Anfangssättigung Siegel V2 HAA
Sl_0_V2_SMA = Sl_0_TS	-	Berechnete Grösse	0.50	0.25	0.75	Anfangssättigung Siegel V2 SMA
Sl_0_V3 = Sl_0_TS	-	Berechnete Grösse	0.50	0.25	0.75	Anfangssättigung Siegel V3
Sl_0_V4 = Sl_0_TS	-	Berechnete Grösse	0.50	0.25	0.75	Anfangssättigung Siegel V4
Sl_0_Tunnel = Sl_0_TS	-	Berechnete Grösse	0.50	0.25	0.75	Anfangssättigung Betriebs-, Bau- und restliche Tunnel
Sl_0_SMA	-	Gleichverteilt	0.50	0.25	0.75	Anfangssättigung SMA-Lagerkammern
Sl_0_HAA	-	Gleichverteilt	0.23	0.12	0.35	Anfangssättigung HAA-Lagerkammern
D_C14_l	m ² /s	Log-gleichverteilt	2.00E-10	2.00E-11	4.00E-10	Diffusionskoeffizient C-14 org in wässriger Phase
D_C14_g	m ² /s	Log-gleichverteilt	3.00E-06	3.00E-07	6.00E-06	Diffusionskoeffizient C-14 org in Gasphase
D_H2_l	m ² /s	Log-gleichverteilt	2.00E-10	2.00E-11	4.00E-10	Diffusionskoeffizient H2 gelöst in wässriger Phase
D_H2_g	m ² /s	Log-gleichverteilt	3.00E-06	3.00E-07	6.00E-06	Diffusionskoeffizient H2 in Gasphase
M_OPA	m	Gleichverteilt	110	80	130	Mächtigkeit OPA
M_ORG	m	Gleichverteilt	105	55	165	Mächtigkeit ORG
M_URG	m	Gleichverteilt	160	130	180	Mächtigkeit URG
d_HAA	m	Gleichverteilt	40	20	60	Abstand HAA-Lagerkammern
d_SMA	m	Gleichverteilt	85	43	128	Abstand SMA-Lagerkammern
d_Kombi	m	Gleichverteilt	125	50	500	Abstand SMA-/HAA-Lagerteil
depth	m	Gleichverteilt	600	400	900	Abstand Lagerebene zur Geländeoberkante
L_V1_HAA	m	Gleichverteilt	40	20	60	Länge Siegel V1 HAA
L_V1_SMA	m	Gleichverteilt	20	10	30	Länge Siegel V1 SMA
L_V2_HAA	m	Gleichverteilt	20	10	30	Länge Siegel V2 HAA
L_V2_SMA	m	Gleichverteilt	60	30	90	Länge Siegel V2 SMA

Tab. B-3: Fortsetzung

Name/Formel	Einheit	Verteilung	Ref	UE	OE	Parameterbeschreibung
$L_{V3} = M_{OPA}/2$	m	Berechnete Grösse	55	40	65	Länge Siegel V3
L_{V4}	m	Gleichverteilt	40	20	60	Länge Siegel V4
$L_{OpVentLK_HAA} \sim d_{HAA}$	m	Berechnete Grösse	1'237	800	1'674	Länge Betriebs- und Bautunnel HAA; Abhängig vom Abstand zwischen HAA-Lagerkammern
$L_{OpVentLK_SMA} \sim d_{SMA}$	m	Berechnete Grösse	982	678	1'286	Länge Betriebs- und Bautunnel SMA; Abhängig vom Abstand zwischen SMA-Lagerkammern
$L_{OpVentKombi} \sim d_{Kombi}$	m	Berechnete Grösse	45	10	460	Länge Betriebs- und Bautunnel im zentralen Bereich; Abhängig vom Abstand zwischen SMA-/HAA-Lagerteil
t_{E_HAA}	yr	Log-gleichverteilt	10'000	1'000	30'000	Einschlusszeit HAA (für Freisetzung C-14)
t_{E_SMA}	yr	Log-gleichverteilt	100	10	1'000	Einschlusszeit SMA (für Freisetzung C-14)
t_{B_HAA}	yr	Gleichverteilt	2	1	3	Dauer Betriebsphase HAA
t_{B_SMA}	yr	Gleichverteilt	50	50	100	Dauer Betriebsphase SMA
rh	%	Gleichverteilt	60	50	70	Relative Feuchte während der Betriebsphase
gas_Szenario	-	Diskrete Verteilung	Refcase	Lower-bound	Upper-bound	Gasbildungsszenario
$gas_{HAA} = gas_Szenario$	-	Berechnete Grösse				Gasbildungsszenario HAA Referenzwert sowie Oberer und Unterer Eckwert der Gasbildung der BE gemäss NTB 16-04 (Nagra 2016c)
$gas_{SMA} = gas_Szenario$	-	Berechnete Grösse				Gasbildungsszenario SMA Referenzwert sowie Oberer und Unterer Eckwert der Gasbildung der SMA/ATA gemäss NTB 16-04 (Nagra 2016c)
$gas_{Tunnel} = gas_Szenario$	-	Berechnete Grösse				Gasbildungsszenario Tunnel Referenzwert sowie Oberer und Unterer Eckwert der Gasbildung der Lagerbauwerke gemäss NTB 16-04 (Nagra 2016c)

Name/Formel	Einheit	Verteilung	Ref	UE	OE	Parameterbeschreibung
heat_HAA	-	Diskrete Verteilung	Refcase	Lower-bound	Upper-bound	Wärmeleistungsszenario HAA Referenzwert der Wärmeleistung gemäss Tab. 6-1 (gewichtetes Mittel über alle Behältertypen); Unterer Eckwert der Wärmeleistung: Behältertyp BE-S-1; Oberer Eckwert der Wärmeleistung: Behältertyp BE-D-2

Ref: Referenzwert für Basisfall, UE: Unterer Eckwert, OE: Oberer Eckwert

B.3 Parametrisierung des Basisfalls

Tab. B-4: Hydraulische und thermophysikalische Parameter der verwendeten Materialien im Basisfall

Die Bezeichnungen der variierten Parameter sowie der Materialklassen sind konsistent mit Tab. B-3; deren Bedeutung kann dort entnommen werden. Die nicht variierten Parameter werden unten in Fussnoten erläutert.

	OPA	ORG	URG	EDZ	V1_HAA	V1_SMA	V2_HAA	V2_SMA	V3	V4	Tunnel	SMA	HAA
drok [kg/m ³]	2'700	2'710	2'720	2'700	2'700	2'700	2'700	2'700	2'700	2'700	2'700	2'650	3'602
por [-]	0.12	0.12	0.06	0.15	0.3	0.3	0.35	0.35	0.3	0.35	0.35	0.23	0.39
k [m ²]	2E-21	1E-19	1E-19	5E-20	1E-20	1E-16	1E-16	1E-16	5E-18	5E-18	1E-15	1E-14	3.5E-20
A [-]	5	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
cwet [W/m/K]	1.55	2.2	2.14	1.55	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	2.5	1
spht [J/kg/K]	995	995	995	995	964	964	964	964	964	964	920	905	733
com [1/Pa]	1.70E-09	2.62E-10	2.62E-10	1.70E-09	1.00E-09	1.00E-09	1.00E-09	1.00E-09	1.00E-09	1.00E-09	1.00E-09	4.09E-10	3.24E-09
expan [1/K]	1.70E-05	1.70E-05	1.70E-05	1.70E-05	1.50E-05	1.50E-05	1.50E-05	1.50E-05	1.50E-05	1.50E-05	1.50E-05	1.50E-05	2.36E-05
cdry [W/m/K]	1.55	2.2	2.14	1.55	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	2.5	0.3
Slr-krel [-] ^a	0.5	0.25	0.25	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.01	0.3	0.3	0.3	0.1
Sgr-krel [-] ^b	0	0.001	0.001	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0
n [-]	1.6	2	2	1.6	2.5	2.5	2.5	2.5	1.82	2.5	2.5	2	1.67
P0 [Pa]	3.40E+07	1.00E+07	1.00E+07	1.70E+07	4.00E+03	4.00E+03	4.00E+03	4.00E+03	1.80E+07	4.00E+03	4.00E+03	5.00E+02	1.00E+07
Pmax [Pa] ^c	1.00E+10	1.00E+10	1.00E+10	1.00E+10	1.00E+10	1.00E+10	1.00E+10	1.00E+10	1.00E+10	1.00E+10	1.00E+10	1.00E+10	1.00E+10
Tref [°C] ^d	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Slr-pcap [-] ^e	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Sl_0 [-]	1	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.23

^{a, b} Residuale Flüssigkeits- und Gassättigung der relativen Permeabilitätsfunktion nach Van Genuchten

^{c, d, e} Maximaler Kapillardruck, Referenztemperatur und residuale Flüssigkeitssättigung der Kapillardruckfunktion nach Van Genuchten

B.4 Ergebnisse der Monte-Carlo-Ungewissheitsanalyse für die Indikatoren Druck und Temperatur

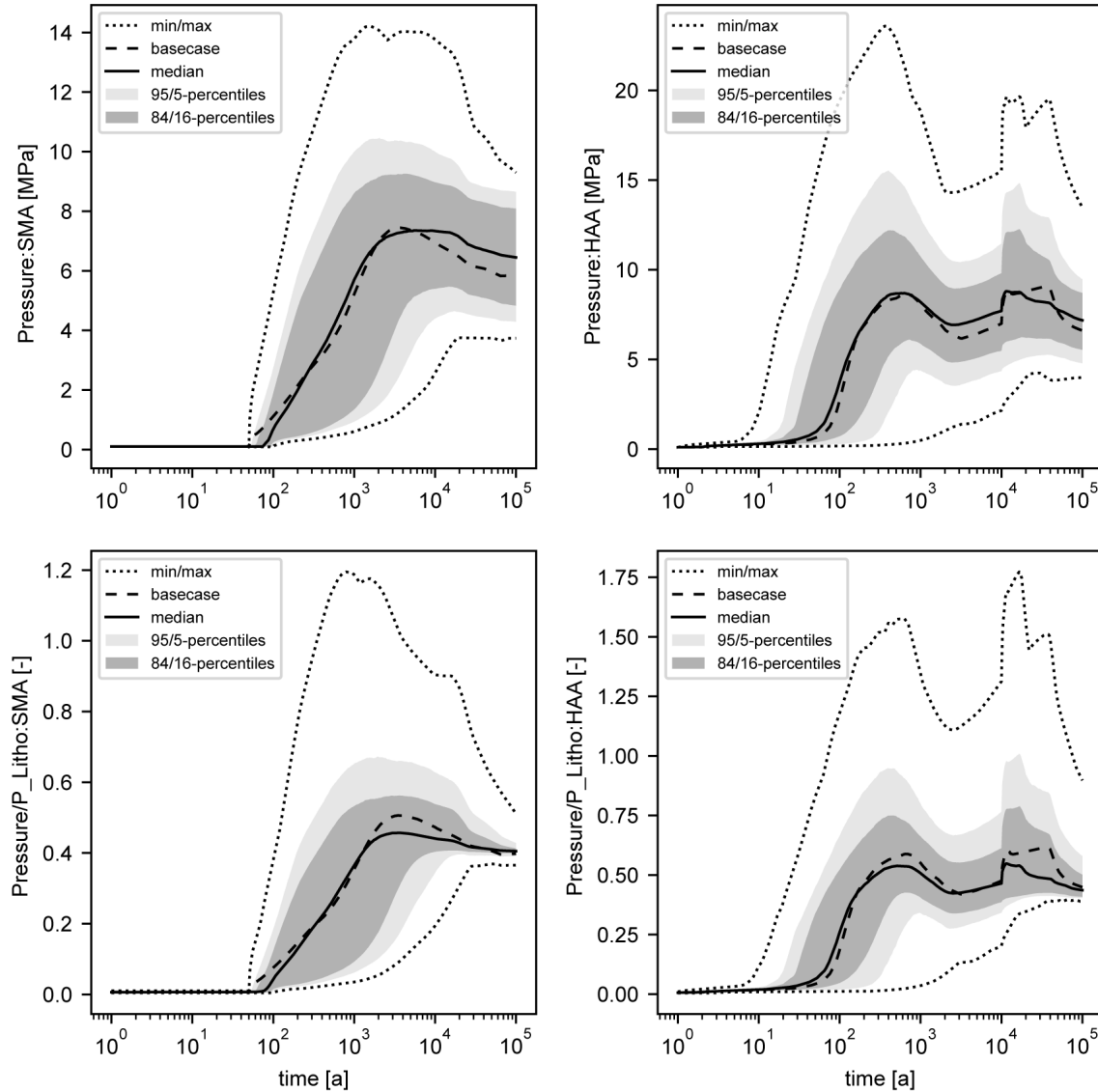


Fig. B-1: Verteilung des zeitlichen Verlaufs des Drucks in den Lagerkammern (oben) sowie des Verhältnisses zum lithostatischen Druck (unten) für SMA (links) und HAA (rechts)

Für jeden Rechenfall und jeden Zeitpunkt wird das Maximum der seitlichen/zentralen Lagerkammer dargestellt.

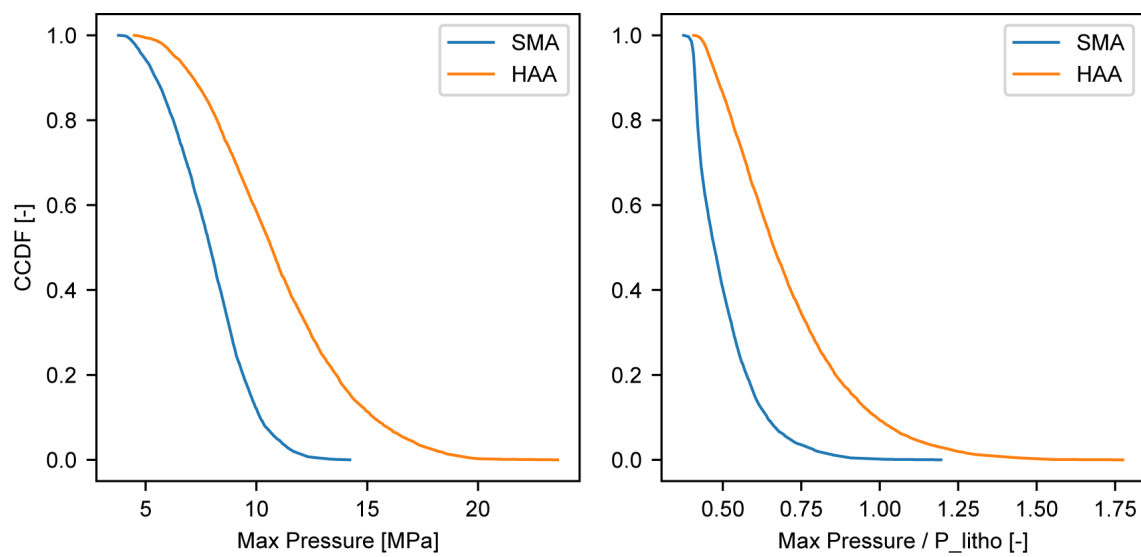


Fig. B-2: CCDF des Maximaldrucks in den Lagerkammern (links) sowie des Verhältnisses zum lithostatischen Druck (rechts)

Evaluiert wird jeweils der Maximaldruck sowohl über die seitliche als auch die zentrale Lagerkammer.

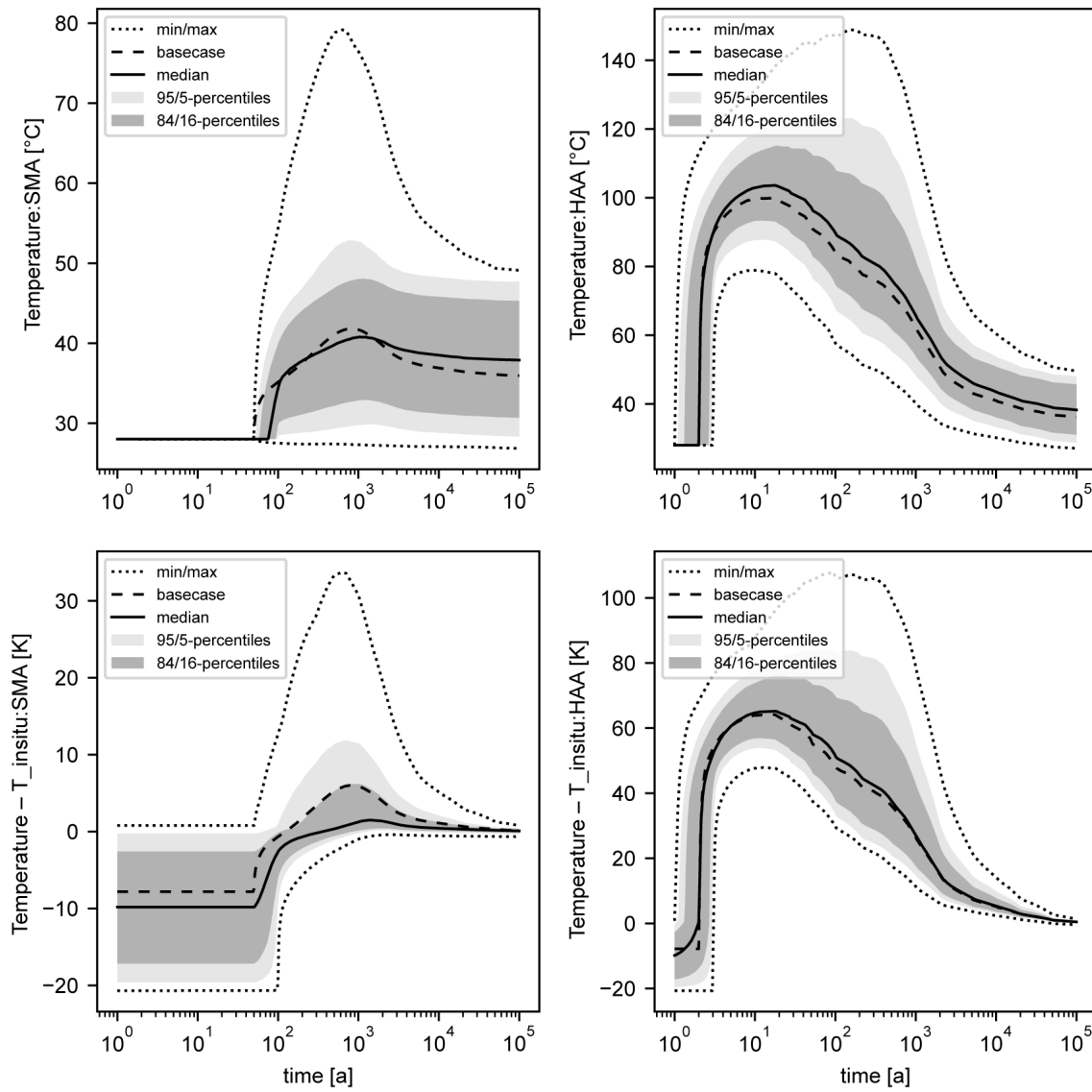


Fig. B-3: Verteilung des zeitlichen Verlaufs der Temperatur in den Lagerkammern (oben) sowie der Differenz zur in-situ Temperatur (unten)

Für jeden Rechenfall und jeden Zeitpunkt wird das Maximum der seitlichen/zentralen Lagerkammer dargestellt.

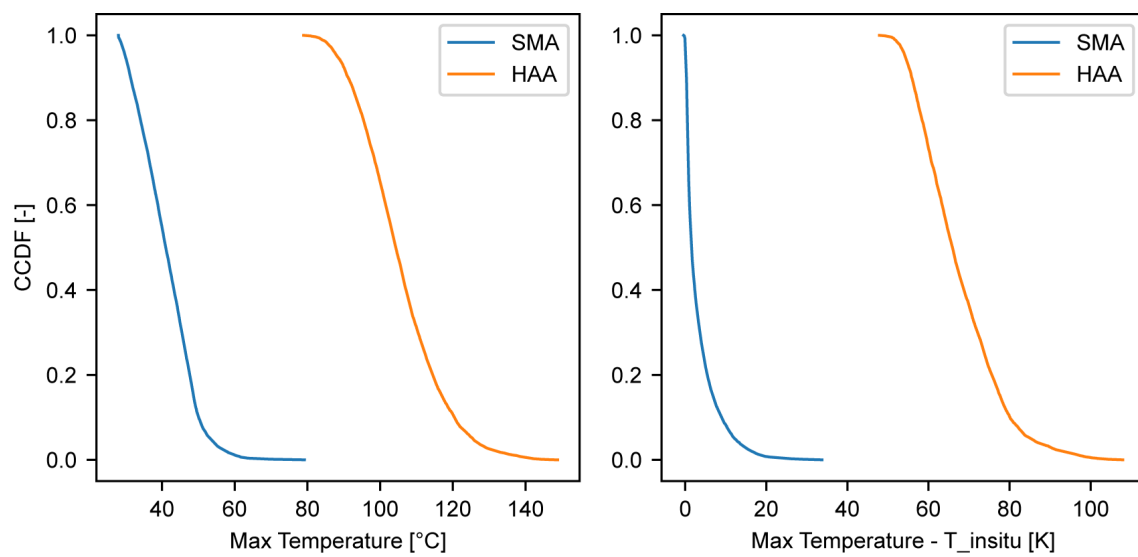


Fig. B-4: CCDF der Maximaltemperatur in den Lagerkammern (links) sowie der Differenz zur in-situ Temperatur (rechts)

Evaluiert wird jeweils die Maximaltemperatur sowohl über die seitliche als auch die zentrale Lagerkammer.

B.5 Vorgenommene Anpassungen am Makroelement-Modell des Basisfalls im Rahmen der Vergleichsrechnung

Zur Validierung der getroffenen Vereinfachungen im Makroelement-Modell des gesamten Kombilagers (Kapitel 6.2.5), welches die Grundlage der Systemanalysen zur RN-Freisetzung bildet, wird eine Vergleichsrechnung gegenüber dem semi-generischen 3D-Modell durchgeführt (Kapitel 4.2.3). Voraussetzung hierfür ist, dass sich die Unterschiede zwischen den Modellen auf das Abstraktionslevel beschränken. Die zur Vereinheitlichung der Datengrundlage, des Modellkonzepts und dessen modelltechnischer Umsetzung notwendigen Anpassungen am Makroelement-Modell des Basisfalls gemäss Kapitel 6.2.5 / 6.3.2 lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

- **Makroelement-Layout:**

Das Makroelement-Layout (Anordnung und Verbindung der Makroelemente) wird aus dem in Kapitel 6.2.5 beschriebenen Basisfall unverändert übernommen (Fig. 6-9); die Anordnung der Lagerbauwerke im 3D-Modell (Fig. 4-4) wird damit hinreichend gut wiedergegeben. Einzig angepasst werden Skalierungs-/Dehnungsfaktoren aufgrund einer unterschiedlichen Anzahl und Länge der Lagerkammern (siehe nächster Punkt "Geometrische Eigenschaften"). Zudem wird die axiale Diskretisierung um die Siegel bzw. beidseitig eines Permeabilitätskontrasts durch jeweiliges Einfügen einer 1 m-mächtigen Schicht erhöht, um Artefakten der Permeabilitätsgewichtung vorzubeugen.

- **Geometrische Eigenschaften der Lagerbauwerke und -strukturen**

Für die Vergleichsrechnung werden dem Makroelement-Modell die geometrischen Eigenschaften (Querschnitte, Längen, Porositäten) der berücksichtigten Lagerbauwerke im 3D-Modell zugrunde gelegt und in entsprechende Lagerstrukturen zusammengefasst. Die Geometrien des 3D-Modells sind rein generischer Natur und weichen von jenen im Makroelement-Modell des Basisfalls, welche auf NAB 16-07 und NAB 16-08 (Nagra 2016d, e) sowie NTB 16-01 (Nagra 2016a) basieren, deutlich ab (u.a. Länge und Querschnitt der Lagerkammern).

- **Tunnelquerschnitt**

Die Tunnelquerschnitte aller Makroelemente werden vom Rhombus in ein Quadrat überführt. Dies in Angleichung an das 3D-Modell sowie zur Schaffung eindeutiger Verhältnisse bzgl. der Anisotropie³¹.

Zudem wurde die Breite der Makroelemente (Distanz zwischen angenommenen Symmetrieebenen) ungefähr an das 3D-Modell angeglichen:

- V1_SMA: 40 m
- V1_HAA, OpVentLK_SMA, V2_SMA, OpVentKombi, ObsTest: 25 m
- übrige: 50 m (unverändert)

- **AUZ**

Konzeptionell war eine Mächtigkeit der AUZ von 1 m vorgesehen, wie sie im Makroelement-Modell des Basisfalls auch abgebildet ist. Im 3D-Modell ist die AUZ-Mächtigkeit jedoch durch die Elementgrössen des Modellnetzes auf eine Untergrenze von 2 bzw. 2.5 m limitiert.

³¹ Bei einer Connection im Winkel von 45°, wie sie beim Rhombus vorkommt, ist die Wahl der vertikalen bzw. horizontalen Permeabilität (isot 1 bzw. 3) nicht eindeutig.

Für die Vergleichsrechnung wird die Mächtigkeit der AUZ im Makroelement-Modell auf 2.25 m gesetzt.

Im 3D-Modell ist die AUZ, anders als im Makroelement-Modell des Basisfalls, nicht überall vorhanden. Für die Vergleichsrechnung wurde die AUZ deshalb in folgenden Makroelementen eliminiert: Kombi (HAA-Lagerteil), V1_HAA, AccessTunnel, V4, Boundary, Shaft

- Thermohydraulische Parameter

Die hydraulischen und thermophysikalischen Parameter des 3D-Modells werden für die Vergleichsrechnung (mit wenigen Ausnahmen) unverändert übernommen. Die Änderungen gegenüber dem Basisfall (Kapitel 6.3.2) lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

- Permeabilität AUZ: wird im 3D-Modell skaliert, um die zu hohe Mächtigkeit der AUZ zu kompensieren und ist zudem anisotrop. Im Makroelement-Modell werden die skalierten Permeabilitäten in generalisierter³² Form übernommen. Im Vergleich zum Basisfall reduziert sich die Permeabilität der AUZ um maximal einen Faktor 5.
- Kapillardruck AUZ: Reduktion um ca. Faktor 10
- Permeabilität ORG und URG: Reduktion um Faktor 2 (vertikal) bis 10 (horizontal), isotrop statt anisotrop (Anisotropiefaktor von 5 auf 1 reduziert)

- System- und numerische Parameter

Systemparameter wie Stratigraphie, Anfangs-/Randbedingungen und Quellterme sowie numerische Parameter werden aus dem 3D-Modell, sofern sie nicht im Zusammenhang mit dem Abstraktionslevel stehen, meist unverändert im Makroelement-Modell für die Vergleichsrechnung übernommen. Die wesentlichen Änderungen sind im Folgenden aufgeführt:

- Mächtigkeit ORG und URG: von 105 bzw. 160 m reduziert auf 10 bzw. 15 m
- Dauer Belüftungsphase SMA: von 50 auf 23 Jahre reduziert
- Gasbildung: ATA-Inventar und Tunnelgasbildung (ausser K09) eliminiert
- Wärmequellterm: 1'600 ELB mit behälterspezifischer Wärmeleistung des Typs BE-D-2
- Distanz zwischen den Lagerteilen: von 125 auf 250 m erhöht
- Diffusion: deaktiviert
- Gewichtung der Permeabilität: Für die Vergleichsrechnung wurde anstelle der Upstream-Gewichtung analog zum 3D-Modell die harmonische Gewichtung verwendet.
- Druck bei Rampe bzw. ausserhalb V4-Siegel: Gemäss Lage im 3D-Modell von 5.43 auf 5.59 MPa erhöht

³² Die Permeabilität in axialer Richtung wird im 3D-Modell abhängig von der bauwerksspezifischen Querschnittsfläche der AUZ mit unterschiedlichen Faktoren skaliert. Im Makroelement-Modell wird der Wert der AUZ um die SMA-Lagerkammern global übernommen.