



## REVIEW

zu

### **Abandonment study Nedmag caverns – Cavern squeeze modeling and geophysical analysis of brine permeation and containment**

erarbeitet von

Antoine Duquesnoy

Well Engineering Partners (WEP) B.V.

Hoogeveen

am 31.03.2015

**Oktober 2016**

.....  
**M.Sc. T. Pan**

.....  
**Dipl.-Ing. O. Dyogtyev**

.....  
**Dr.-Ing. R. Wolters**

.....  
**Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. K.-H. Lux**



# **REVIEW**

zu

## **Abandonment study Nedmag caverns – Cavern squeeze modeling and geophysical analysis of brine permeation and containment**

erarbeitet von

Antoine Duquesnoy

Well Engineering Partners (WEP) B.V.

Hoogeveen

am 31.03.2015

**Oktober 2016**

.....  
**M.Sc. T. Pan**

.....  
**Dipl.-Ing. O. Dyogtyev**

.....  
**Dr.-Ing. R. Wolters**

.....  
**Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. K.-H. Lux**

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung und Bearbeitungsmethodik</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Unterlagen</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Literatur</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Analyse der vorhandenen Daten</b>	<b>6</b>
4.1	Geologische Informationen	6
4.2	Anfangs- und Randbedingungen	8
<b>5</b>	<b>Verarbeitung der geometrischen Daten zum Gebirgsbau und zu den Kavernenkonfigurationen in ein 3-dimensionales CAD-Modell</b>	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>Aufbau des 3D-Simulationsmodells</b>	<b>12</b>
6.1	Grundsätzliche Annahmen für die stilisierte Abbildung der Kavernen und das partiell erfasste Salinargebirge	12
6.2	Anfangs- und Randbedingungen für die numerischen Simulationen	15
6.3	Grundsätzliche Annahmen zu den individuellen Konvergenzeigenschaften der Kavernen sowie zu den Infiltrationseigenschaften des Salinargebirges	19
<b>7</b>	<b>FTK-Simulator / Kopplung</b>	<b>23</b>
<b>8</b>	<b>Simulationsergebnisse – Dokumentation und Diskussion</b>	<b>25</b>
8.1	Simulationsvariation A	25
8.2	Simulationsvariation B	35
8.3	Simulationsvariation C	38
8.4	Simulationsvariation D	40
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung / Conclusions</b>	<b>45</b>

## 1 Aufgabenstellung und Bearbeitungsmethodik

Mit Schreiben vom 19.11.2015 ist der Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal von der Staatstoezicht op de Mijnen beauftragt worden, einen Review zu folgendem WEP-Bericht anzufertigen:

**Abandonment study Nedmag caverns – Cavern squeeze modeling and geophysical analysis of brine permeation and containment**, *WEP (2015)*, nachfolgend auch WEP-Bericht.

In dem zum Review übergebenen Bericht wird eine prognostische Aussage zum längerfristigen geohydraulischen Verhalten der Mineralgewinnungskavernen von Tripscompagnie (TR) & Veendam (VE) des Nedmag-Solfeldes nach Stilllegung und Verschluss der Kavernen erarbeitet. Ziel ist es insbesondere festzustellen, ob und in welchem Umfang konvergenzbedingt Sole aus den Kavernen nach Verschluss freigesetzt wird und zu welchen Veränderungen die freigesetzte Sole in der aufnehmenden Gebirgsformation führen wird.

Die Bearbeitung der Aufgabenstellung erfolgt in dem zum Review vorgelegten Bericht auf analytischer Grundlage, *WEP (2015)*. Da es sich grundsätzlich und insbesondere aufgrund der in Folge selektiver Aussolungen in der Flözformation geohydraulisch miteinander verbundenen Kavernen um eine extrem neuartige und komplexe Aufgabenstellung handelt, soll der geohydraulische Teil des WEP-Berichts einer unabhängigen externen Begutachtung unterzogen werden. Für diese externe Begutachtung wird der am Lehrstuhl entwickelte Simulator FTK eingesetzt, der computergestützt die Analyse geomechanisch-geohydraulisch gekoppelter Prozesse im geologischen Untergrund ermöglicht.

Vor diesem Hintergrund ergibt sich für den vorgesehenen Bearbeitungsumfang des Reviews nachstehende Bearbeitungsmethodik:

- Sichtung der übergebenen Unterlagen,
- Übernahme und Aufarbeitung der für die Simulation erforderlichen Daten,
- Abstimmung der Daten und Klärung von Datendefiziten,
- Erarbeitung eines abstrahierten Simulationsmodells für das Kavernenfeld,
- Diskretisierung des Kavernenfeldmodells,
- Ableitung einer Konvergenzcharakteristik für die Nedmag-Kavernen,
- Durchführung der numerischen Simulationen,

- Definition von Simulationsvarianten mit unterschiedlichen Ansätzen zur geohydraulischen Abstraktion,
- Dokumentation der Ergebnisdaten,
- Analyse und Diskussion der Simulationsergebnisse,
- Bewertung des zum Review vorgelegten WEP-Berichts.

Vor dem Hintergrund der vorstehenden Bearbeitungsmethodik wird deutlich, dass das beauftragte Review nicht durch eine detaillierte direkte Überprüfung des geohydraulischen Teils des vorgelegten WEP-Berichts erfolgt. Vielmehr erfolgt die Überprüfung mit einem anderen Simulationsansatz. Übernommen werden nur die grundlegenden Kavernenfelddaten. Sie sind ausdrücklich nicht Gegenstand des Reviews.

Gegenstand des Reviews ist dagegen eine unabhängige Überprüfung des zentralen geohydraulischen Teils des WEP-Berichts, der sich auf die Simulation der Solefreisetzungprozesse aus den untertägig geohydraulisch miteinander verbundenen Kavernen bezieht. Im Fokus des Reviews stehen damit die unabhängige Ermittlung der Solefreisetzungsraten im Salzspiegelbereich und der Vergleich mit den Ergebnissen des WEP-Berichts. Nicht Gegenstand des Reviews sind die weiteren standortbezogenen Analysen und Bewertungen zum Verbleib der freigesetzten Sole im geologischen Untergrund und der Auswirkung dieser Sole auf die Umwelt. Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus der analytisch basierten Ermittlung des zum Review vorgelegten Berichts und des hier auf numerischer Basis erarbeiteten Reviews zu erreichen, sind die Annahmen und Voraussetzungen der analytisch basierten Analyse soweit wie möglich in die numerisch basierte Analyse übernommen worden.

Vor diesem Hintergrund erfolgt nachstehend nach Zusammenstellung der übergebenen Unterlagen in Abschnitt 2 und der verwendeten Literatur in Abschnitt 3 nach Einarbeitung in die standortspezifischen Rahmenbedingungen zunächst in Abschnitt 4 eine Analyse der vorhandenen Daten im Hinblick auf die Übertragung in die Ansätze für die physikalische Modellierung und für die numerische Simulation des Reviewers. Danach wird in den Abschnitten 5 und 6 die Entwicklung des abstrahierten numerischen Modells skizziert. Dabei erfolgt eine starke Fokussierung auf die hier relevante Aufgabenstellung mit der Ermittlung potentieller Soleauspressraten aus dem verschlossenen Kavernenfeld. Zentral sind dabei die geometrische Abstraktion der Kavernen und des Gebirges, die Annahme zu geohydraulisch relevanten Sachverhalten und die Entwicklung eines Funktionalmodells für die Beschreibung der standortbezogenen Kavernenkonvergenz. Der für die Durchführung der numerischen Simulationen

eingesetzte FTK-Simulator wird unter Verweis auf die Literatur kurz in Abschnitt 7 vorgestellt.

Die im Rahmen des Reviews erarbeiteten Simulationsergebnisse werden in Abschnitt 8 präsentiert und diskutiert. Insgesamt sind 4 verschiedene Variationen analysiert worden. Die Variationen betreffen vornehmlich hydraulische Parameter, z.B. die Anzahl der hydraulisch miteinander verbundenen Kavernen, die hydraulische Charakteristik der Infiltrationszone oder die Berücksichtigung der im Lauf der Zeit reduzierten Kavernenvolumina. Variationsbezogen erfolgt auch jeweils ein Vergleich mit entsprechenden Befunden aus dem WEP-Bericht.

Eine abschließende Bewertung der Ergebnisse des Reviews wird in einer Zusammenfassung in Abschnitt 9 vorgenommen.

## 2 Unterlagen

- [U1] *Well Engineering Partners B.V. (WEP) – Duquesnoy, A. (2015): Abandonment Study Nedmag Caverns – Cavern Squeeze Modeling and Geophysical Analysis of Brine Permeation and Containment. Final Report.*
- [U2] *Duquesnoy, A. (2015): Abandonment Study Nedmag Caverns – Modeling of Salt Cavern Convergence, Brine Permeation and Containment. Präsentation Dr. A. Duquesnoy, WEP, Hoogeveen, 8. December 2015.*
- [U3] *Duquesnoy, A. (2016): Antwort auf Anfrage der Reviewer zur Klärung von Datendefiziten. E-Mail, 12.02.2016.*

### 3 Literatur

*SMRI (2002) – Rokahr, R.B. et al, Crotogino, F. & Rolfs, O.:* High Pressure Cavern Analysis. Solution Mining Research Institute, Research Project Report (unpublished).

*Wolters, R. (2014):* Thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Analysen zum Tragverhalten von Kavernen im Salinargebirge vor dem Hintergrund der Energieträgerspeicherung und der Abfallentsorgung – Ein Beitrag zur Analyse von Gefügeschädigungsprozessen und Abdichtungsfunktion des Salinargebirges im Umfeld untertägiger Hohlräume. Dissertation an der TU Clausthal, Heft 20 der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal.

*Lux, K.-H., Rutenberg M., Seeska, R., Feierabend, J. & Düsterloh, U. (2015):* Kopplung der Softwarecodes FLAC<sup>3D</sup> und TOUGH2 in Verbindung mit in situ-, laborativen und numerischen Untersuchungen zum thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten von Tongestein unter Endlagerbedingungen. Abschlussbericht zum BMWi-Forschungsprojekt mit dem Förderkennzeichen 02 E 11041.

## 4 Analyse der vorhandenen Daten

### 4.1 Geologische Informationen

Im Rahmen der Erstellung des numerischen Berechnungsmodells sind aus den Unterlagen [U1] und [U3] folgende geologische Informationen verwendet worden:

- Die Positionen der Bohrungen übertage und auf der Teufe des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour untertage sind übernommen worden aus [U3] / Tabelle 3, s. Bild 4.1.
- Die Kavernenhöhen mit der Unterteilung auf 3 Teilkavernen unter der Bezeichnung Cut I, Cut II und Cut III entsprechend den soltechnisch abgebauten, hinsichtlich ihres Lösungsverhaltens und ihrer mechanischen Eigenschaften aber unterschiedlichen Salzfacies sind übernommen worden aus [U3]. In Bild 4.2 sind exemplarisch die Teufenangaben für die Kaverne TR-1 dargestellt. Die Angaben zu den Kavernenhöhen orientieren sich an den lokalen Salzschiebenmächtigkeiten im Bereich der einzelnen Kavernen.
- Die Kavernendurchmesser sind angelehnt worden an die eingeschätzten maximalen Durchmesser der Kavernen im Kavernendachbereich entsprechend [U1] / Tabelle 9, s. Bild 4.3. Es ist darauf hinzuweisen, dass in dieser Tabelle keine Einschätzungen zum maximalen Kavernendurchmesser der Kavernen TR-8 und TR-9 enthalten sind, da diese Tabelle innerhalb des WEP-Berichts im Kontext mit Stabilitätsbetrachtungen des Hangenden über Cut III der einzelnen Kavernen angegeben wird, die Kavernen TR-8 und TR-9 aber über keinen Cut III verfügen. Daher ist im Rahmen des Reviews für diese beiden Kavernen jeweils ein Kavernendurchmesser von 200 m angenommen worden.
- Die Geometrie des Salzspiegels ist angelehnt worden an [U1] und [U3], wobei die entsprechenden Teufenangaben in [U3] tabellarisch für den Bereich der Kavernenzugangsbohrungen (Bohrinformation) und in [U1] als großräumiger Isolinienplot zur Gesamtstruktur gegeben sind, s. Bild 4.4 (exemplarisch für TR-1 und TR-2) und Bild 4.5.

Table 3 specifies the geographical position of the VE and TR wells both at surface and subsurface last casing shoe position.

RD coordinaatsysteem	VE-1	VE-2	VE-3	VE-4	TR-1	TR-2	TR-3	TR-4	TR-5	TR-6	TR-7	TR-8	TR-9
Surface	X	250795	250795	250817	250839	251880	251880	251910	251910	251940	251940	251970	252000
	Y	570500	570521	570520	570519	571428	571438	571428	571436	571425	571435	571424	571434
Subsurface	X	250795	250857	251108	250562	251839	251883	252155	252278	252159	252288	251274	252467
Csg shoe	Y	570500	570227	570043	570980	571092	571424	570836	571921	571185	571553	571088	571090

Table 3: geographical positions of wellheads and casing shoes in Dutch RD-coordinates

Bild 4.1 Position der Bohrungen übertage und auf der Teufe der letzten zementierten Rohrtour untertage, [U3]

Cavern cut average	Interval layer average	TR-1										TR-2			
		Formation	From (m NAP)	To (m NAP)	Thickness (m)	Carnallite e % (v/v)	Bischofite e % (v/v)	Kieserite % (v/v)	Halite % (v/v)	Sylvite % (v/v)	Mobility factor for	Mobility factor per Cut	Formation	From (m NAP)	To (m NAP)
14,4	15,9	ZE-III 3b	1539	1551	12	45	0	22	33	0	18,55	ZE-III 3b	1616	1624	
		ZE-III 3a	1551	1558	7	3	0	0	97	0	2,17		13,89	1624	1636
46,5	58,8	ZE-III 2b	1558	1575	17	37	0	11	52	0	15,43	ZE-III 2b	1636	1668	
		ZE-III 2a	1575	1617	42	5	0	1	94	0	2,95		1668	1693	
18,0	21,2	ZE-III 1b ca	1617	1622	5	36	0	19	45	0	15,04	ZE-III 1b ca	1693	1699	
		ZE-III 1b bi	1622	1633	11	37	32	1	30	1	65,59		1699	1703	
		ZE-III 1b ca	1633	1639	6	4	3	0	91	2	7,33	ZE-III 1b ca	1703	1711	
		ZE-III 1a	1639	1652	13	28	5	10	57	0	19,97		1711	1729	
		ZE-III 1b bi	1652	1657	5	31	39	6	24	0	75,10	ZE-III 1b bi	1729	1765	
		ZE-III 1b ca	1657	1665	8	43	0	8	49	0	17,77		1765	1765	
		ZE-III 1b bi	1665	1671	6	4	86	4	6	0	139,30	ZE-III 1b bi	1765	1765	
		ZE-III 1b ca	1671	1673	3	26	1	5	68	0	12,73		1765	1765	
		ZE-III 1b bi	1673	1683	10	11	68	5	16	0	113,41	ZE-III 1b bi	1765	1765	
		ZE-III 1b ca	1683	1693	10	34	1	15	47	3	15,52		1765	1765	
		ZE-III 1a	1700		0	0	0	0	1	99	0				

Bild 4.2 Eingeschätzte Kavernenhöhen mit der Unterteilung in Cut I, Cut II und Cut III entsprechend der Salzschiehtenmächtigkeiten, [U3]

Minimum thickness H <sub>min</sub> for cavern roof	VE-1	VE-2	VE-3	VE-4	TR-1	TR-2	TR-3	TR-4	TR-5	TR-6	TR-7
Max. roof span 3b cav.(m)	211	122	294	213	243	286	269	305	225	232	397
1. Pdeficit re litho @ roof (MPa) (ref. 7,5 MPa @1549 mTVNAP)	6,5	6,3	7,9	6,9	7,4	8,1	7,7	9,4	8,0	8,6	6,9

↓

**Table 9: Minimum roof thickness for stability of each 3b-cavern roof for two rock compositions (salt = halite) and for three pressure regimes (process phases).**

Bild 4.3 Eingeschätzte maximale Durchmesser der Kavernen am Kavernendach, [U1]

TR-1			
	From m NAP	To m NAP	Thickness m
Tertiary-Quaternary	0	404	404
Upper Cretaceous	404	974	570
Lower Cretaceous	974	1098	124
Trias	1098	1464	366
ZE-IV	1464	1515	51

TR-2			
	From m NAP	To m NAP	Thickness m
Tertiary-Quaternary	0	405	405
Upper Cretaceous	405	1007	602
Lower Cretaceous	1007	1145	138
Trias	1145	1517	372
ZE-IV	1517	1596	79

↓

Bild 4.4 Geometrie der Salzoberfläche: Teufenangaben aus den Bohrinformationen, [U3]

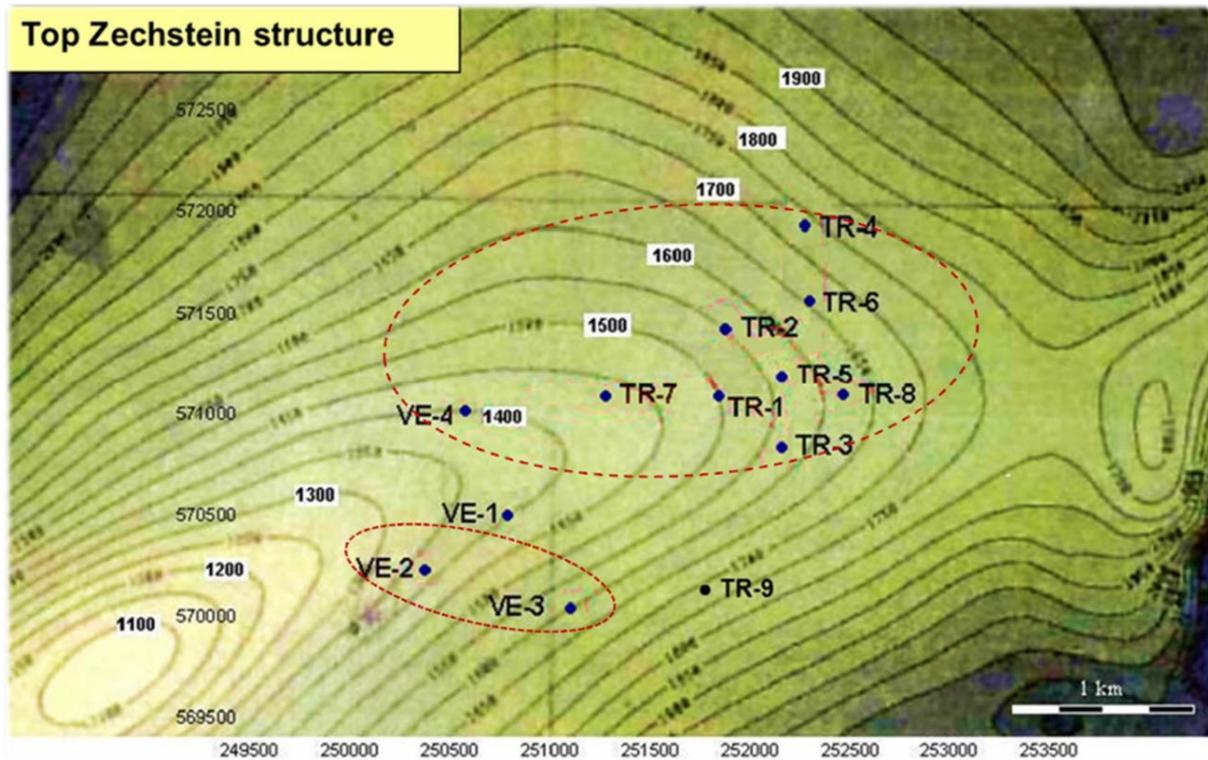


Bild 4.5 Lage der Salzlagerstättenoberfläche: Isolinienplot zur Gesamtstruktur, [U1]

## 4.2 Anfangs- und Randbedingungen

Der Solungsbergbau soll noch bis in das Jahr 2025 fortgeführt werden. Grundlage dazu ist die bestehende Entwicklungsplanung für das Kavernenfeld bis zum Solende im Jahr 2025.

Die numerischen Simulationen beginnen am Ende des Solbetriebes im Jahr 2025, wobei angenommen wird, dass das Kavernensystem zu diesem Zeitpunkt unter Beibehaltung des Kaverneninnendrucks aus der Betriebsphase unmittelbar verschlossen wird. Die Anfangsvolumina für die Teilkavernen in den einzelnen Lagerstättenbereichen (Cut I – Cut III) zu diesem Zeitpunkt werden aus [U3] / Tabelle 1 entnommen, s. Bild 4.6.

Die einzelnen Kavernen unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihrer Ausgangsvolumina zum Zeitpunkt des Kavernenverschlusses, sondern bedingt durch die unterschiedliche Teufenlage der Kavernen und der unterschiedlichen Kriecheigenschaften der umgebenden Salinarschichten auch hinsichtlich ihrer Konvergenzcharakteristik. In [U3] sind daher Informationen zu den im WEP-Bericht angesetzten individuellen Konvergenzeigenschaften der einzelnen Kavernen angegeben, die im Rahmen des Reviews übernommen worden sind. Diese Informationen sind in Bild 4.7 in Form von Konvergenzfaktoren tabellarisch zusammengefasst.

Status 2012 VE-1 missing cuts 1/2 (lower cavern); TR-8 & 9 missing cut 1 (upper cavern)

Year (January)	Number of lower caverns in squeeze model	Cut 1 average volume per cavern	Cut 2 average volume per cavern	Number of upper caverns in squeeze model	Cut 3 average volume per cavern	Total remaining free volume in system (n8)
2012	12	10.852	145.888	11	120.424	3.205.550
2013	12	8.978	142.522	11	115.981	3.093.782
2014	12	7.125	139.035	11	111.801	2.983.722
2015	12	6.009	139.111	11	104.100	2.886.546
2016	12	4.193	135.444	11	100.390	2.779.946
2017	12	2.395	131.580	11	96.916	2.673.773
2018	12	615	127.516	11	93.660	2.567.833
2019	12	0	122.434	11	90.486	2.464.550
2020	12	0	116.682	11	87.459	2.362.236
2021	12	0	110.770	11	84.610	2.259.949
2022	12	0	104.635	11	81.951	2.157.080
2023	12	0	98.346	11	79.447	2.054.072
2024	12	0	92.335	11	76.870	1.953.588
2025	12	0	85.802	11	74.632	1.850.580
2026	12	0	79.163	11	72.510	1.747.571
2027	12	0	72.427	11	70.495	1.644.562

Table 1: free volumes with standard bulking factor 1.1 for insoluble and precipitates

Source: e-mail 12.02.16

Bild 4.6 Informationen zu den Kavernenvolumina zum Zeitpunkt des Kavernenverschlusses

	CUT III	CUT II
TR-1	13,89	54,64
TR-2	13,4	57,39
TR-3	18,03	49,66
TR-4	14,06	57,09
TR-5	17,72	69,88
TR-6	15,32	65,86
TR-7	19,89	71,76
TR-8		47,31
TR-9		51,7
VE-1	17,17	
VE-2	13,99	45,96
VE-3	13,85	36,94
VE-4	17,01	52,85

$$\frac{dV}{V} = \sqrt{3} \left( \frac{\sqrt{3}}{n_1} \Delta P \right)^{n_1} \cdot A_1 \cdot e^{-\frac{Q_1}{RT}} + \sqrt{3} \left( \frac{\sqrt{3}}{n_2} \Delta P \right)^{n_2} \cdot A_2 \cdot e^{-\frac{Q_2}{RT}}$$

Parameter:

- A<sub>1</sub> = 2,92824E-05 [1/(s\*MPa<sup>n<sub>1</sub></sup>)]
- n<sub>1</sub> = 3,6 [-]
- A<sub>2</sub> = 0,00016088 [1/(s\*MPa<sup>n<sub>2</sub></sup>)]
- n<sub>2</sub> = 1 [-]

Source: R1 (P.9), e-mail 12.02.16

Bild 4.7 Information zur individuellen Konvergenzcharakteristik der einzelnen Kavernen

Zudem ist aus Bild 4.7 die im WEP-Bericht angesetzte Konvergenzformel inklusive der Materialparameter  $A_1$ ,  $n_1$ ,  $A_2$  und  $n_2$  zu ersehen. Die individuellen Konvergenzfaktoren werden für jede Kaverne multiplikativ mit den Parametern  $A_1$  und  $A_2$  kombiniert.

## 5 Verarbeitung der geometrischen Daten zum Gebirgsbau und zu den Kavernenkonfigurationen in ein 3-dimensionales CAD-Modell

Die in Abschnitt 4.1 beschriebenen Daten zum geologischen Aufbau des Gebirges und zur Geometrie der Kavernen sind im Hinblick auf die Erstellung des Berechnungsmodells in einem ersten Schritt zu einer 3D-Zeichnung verarbeitet worden. Zu diesem Zweck wurde das Programmpaket AutoCAD von Autodesk verwendet. Die Darstellung des idealisierten Kavernenfeldes ist in Bild 5.1 zu sehen. Aus dem Bild ist zu erkennen, dass die nicht bekannten Kavernengeometrien auf Grundlage der jeweiligen Flözmächtigkeit und der Aussolvolumina zu einer Zylinderform abstrahiert wurden mit einer konservativen Annahme für den Durchmesser entsprechend Bild 4.3. Zusätzlich sind Annahmen für den Durchmesser der Kavernen TR-8 und TR-9 getroffen worden, da für diese Kavernen keine entsprechenden Daten vorlagen. Der Durchmesser für diese Kavernen wurde jeweils mit 200 m angenommen.

Die 3D-Zeichnung nach Bild 5.1 ist als Grundlage bei der Erstellung der 3D-Berechnungsmodelle für die numerischen Simulationen verwendet worden.

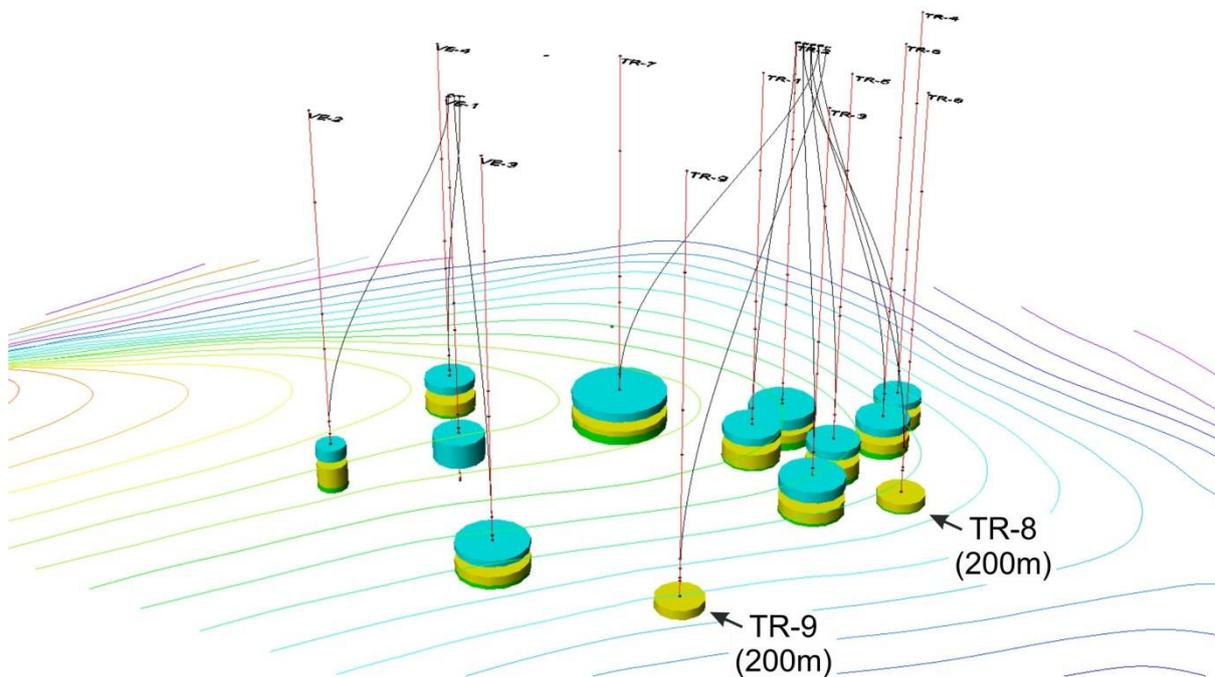


Bild 5.1 3D-Zeichnung in AutoCAD für das Kavernenfeld und für den Salzspiegel

## **6 Aufbau des 3D-Simulationsmodells**

### **6.1 Grundsätzliche Annahmen für die stilisierte Abbildung der Kavernen und das partiell erfasste Salinargebirge**

Das erarbeitete Berechnungsmodell berücksichtigt die einzelnen Kavernen des Kavernenfeldes mit Teufenlage und abstrahierter Konfiguration sowie einen für die Soleinfiltration in Betracht kommenden Gebirgsbereich in der oberhalb jeder Kaverne anstehenden Steinsalzschieht. Die räumliche Ausdehnung dieses potentiellen Infiltrationsbereiches ist im Rahmen der Modellerstellung angelehnt worden an die im WEP-Bericht beschriebene Annahme zur geometrischen Ausbildung der Infiltrationszone entsprechend Bild 6.1 als ein vom Kavernendach bzw. bei größerer Entfernung zwischen Kavernendach und letztem zementiertem Rohrschuh dann von eben diesem letzten zementierten Rohrschuh ausgehender umgekehrter Kegelstumpf unter einem Winkel von  $45^\circ$ . Da allerdings im Rahmen der numerischen Simulationen mit dem FTK-Simulator die Form der Infiltrationszone nicht von vornherein festgelegt ist, sondern sich während der Simulationen in Abhängigkeit der räumlich-zeitlichen Entwicklung der Fluiddrücke selbstständig einstellt, ist im Rahmen der Modellerstellung ein ebenfalls in Bild 6.1 skizzierter zylinderförmiger potentieller Infiltrationsbereich mit den maximalen Abmessungen des umgekehrten Kegelstumpfes diskretisiert worden.

Bild 6.2 zeigt exemplarisch für die Kaverne VE-4 eine Detailansicht zur stilisierten Abbildung der Kaverne und des darüber liegenden potentiellen Infiltrationsgebietes im CAD-Modell unter Berücksichtigung der Neigung des Salzspiegels, dessen Teufenlage einerseits aus Bild 4.5 und andererseits aus den Bohrlochinformationen entsprechend Bild 4.4 abgeleitet worden ist. Zwischen diesen beiden Teufenangaben gibt es geringe Abweichungen, da sich die Teufenlage aus der Isoliniendarstellung entsprechend Bild 4.5 nicht so präzise ablesen lässt wie aus den Bohrlochinformationen entsprechend Bild 4.4.

Des Weiteren zeigt Bild 6.2 das auf der Grundlage dieser stilisierten Geometrieabstraktion entwickelte, räumlich auf den aufgabenstellungsbezogen erforderlichen Umfang begrenzte Berechnungsmodell exemplarisch für die Kaverne VE-4 mit dem von der Infiltration betroffenen Steinsalzgebirge. Eine detailliertere Darstellung der Modelldiskretisierung ist exemplarisch für die Kaverne VE-4 in Bild 6.3 dargestellt. Die charakteristische Zonengröße beträgt in der vertikalen Richtung ca.  $20\text{ m}$ . In Bild 6.4 ist das gesamte diskretisierte Berechnungsmodell dargestellt.

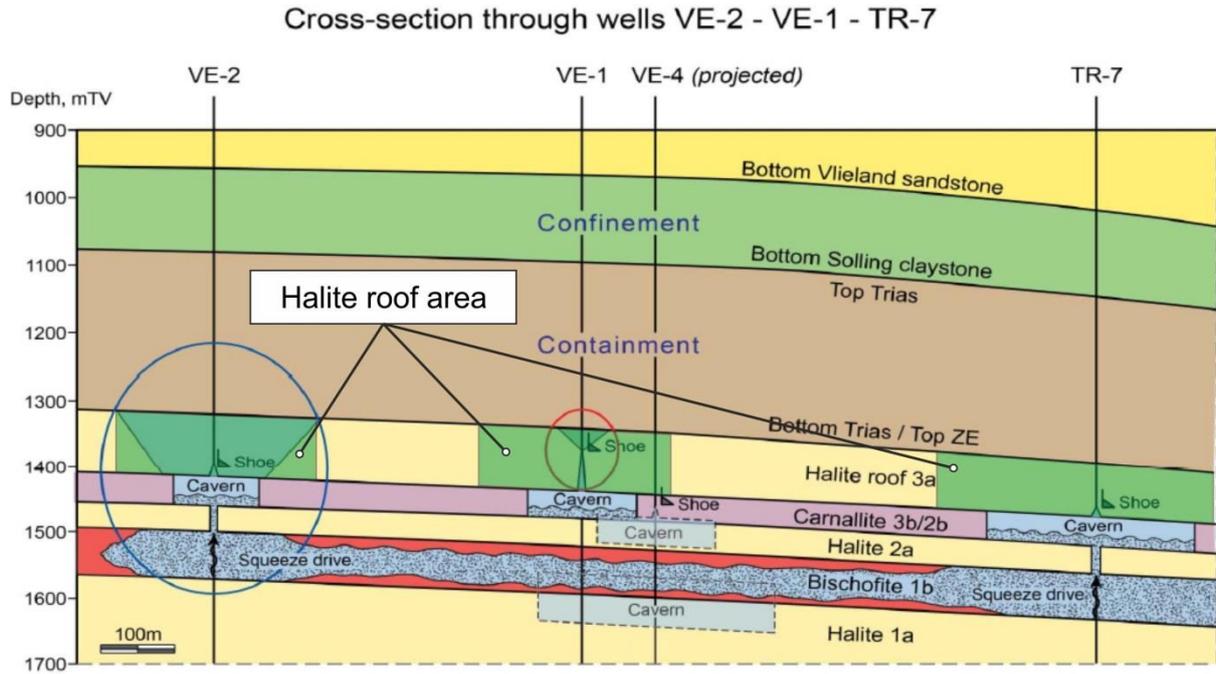


Bild 6.1 Geologischer Vertikalschnitt entlang der Bohrungen der Kavernen VE-2, VE-1 und TR-7 mit Markierung des jeweiligen potentiellen Infiltrationsbereiches oberhalb der Kavernen, [U2]

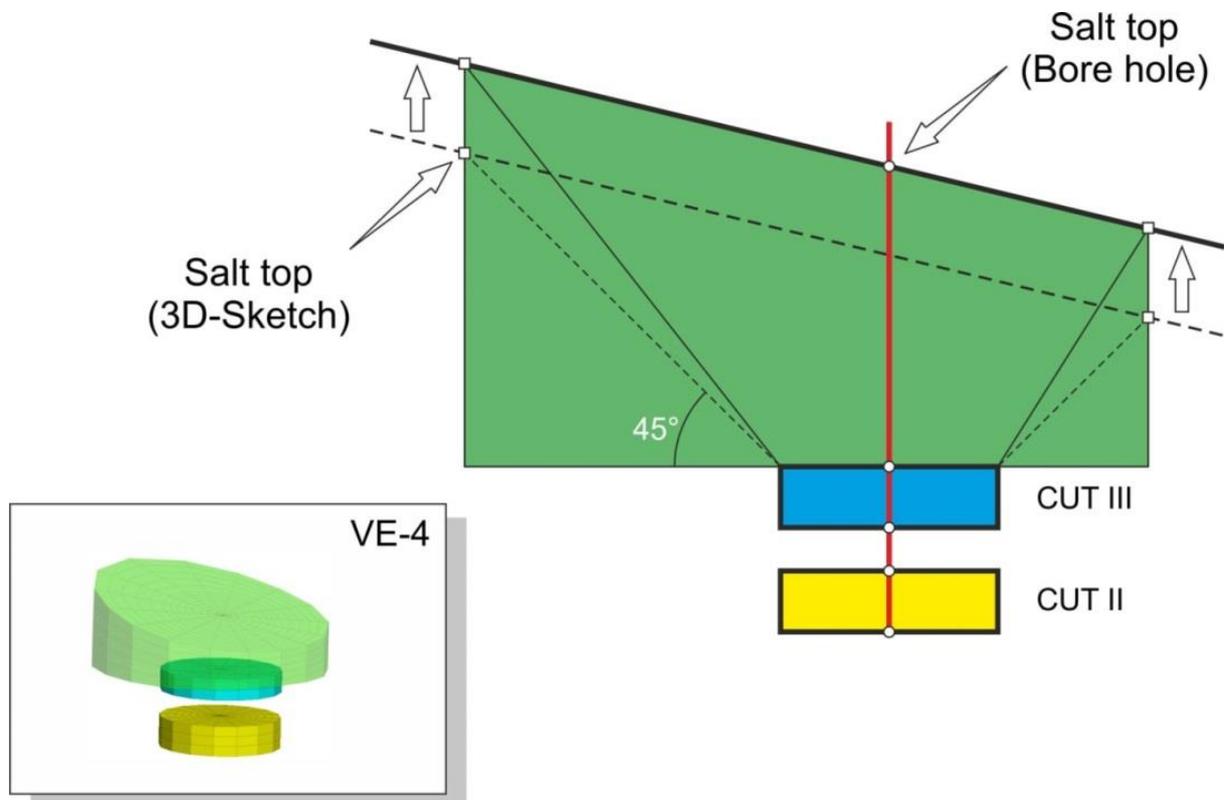


Bild 6.2 Geometrische Annahme für den zu modellierenden potentiellen Infiltrationsbereich in der Halitschicht oberhalb der Kavernen

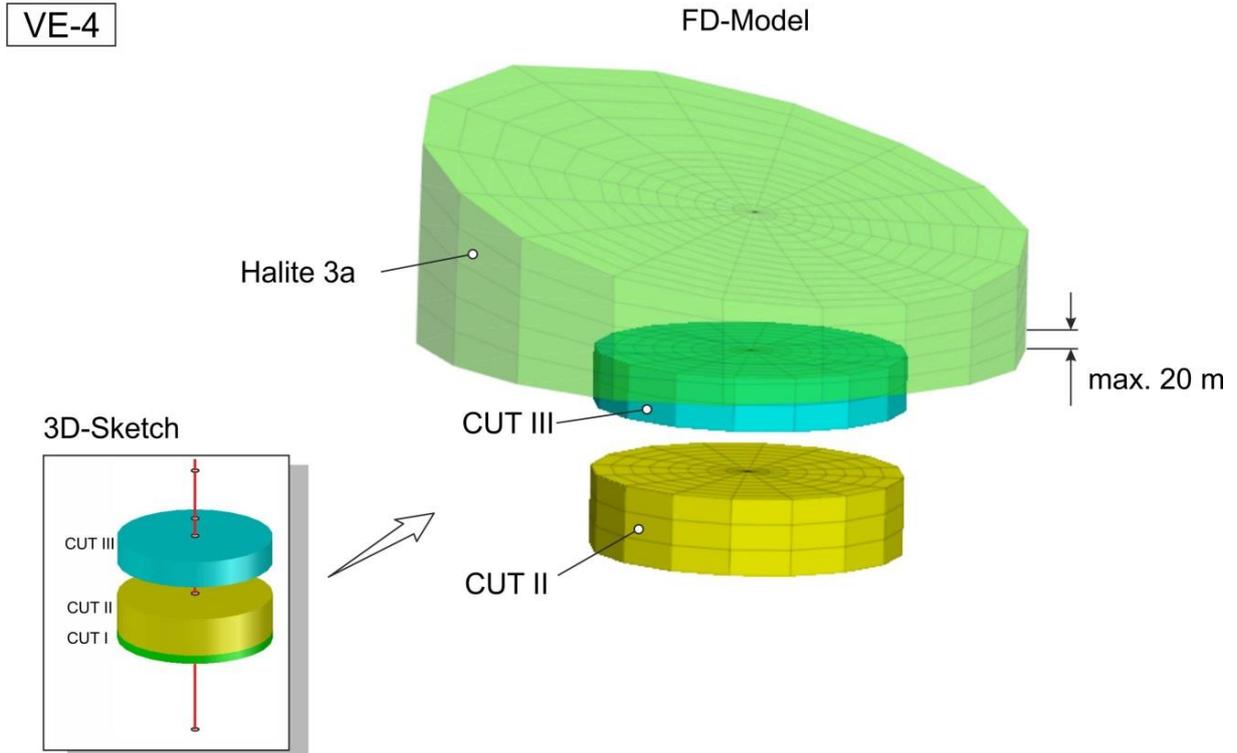


Bild 6.3 *FD-Modell zur Kaverne VE-4 mit dem darüber liegenden potentiellen Infiltrationsbereich in der Halitschicht oberhalb der Kaverne*

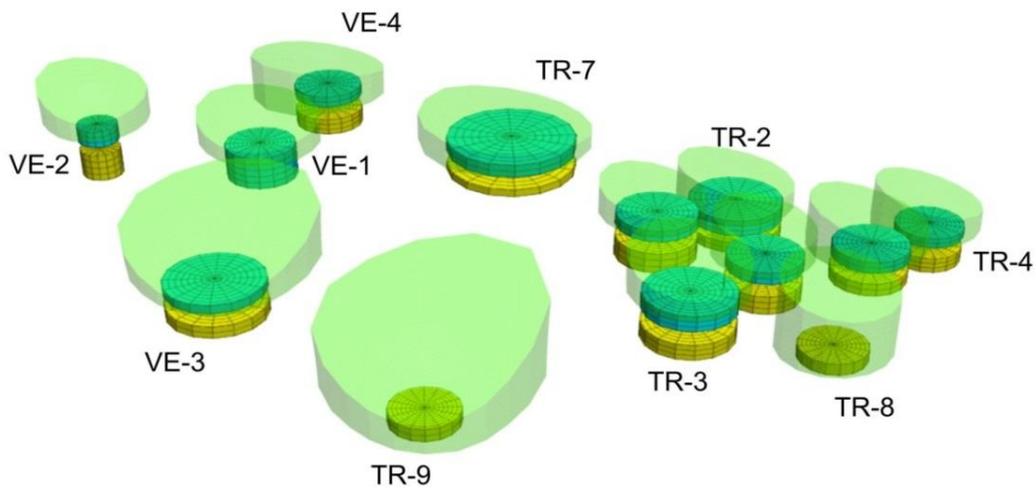


Bild 6.4 *FD-Modell des gesamten Kavernenfeldes mit den darüber liegenden potentiellen Infiltrationsbereichen in der Halitschicht oberhalb der Kavernen*

## 6.2 Anfangs- und Randbedingungen für die numerischen Simulationen

Ein Vergleich der sich im Rahmen der vorstehend erläuterten Modelldiskretisierung ergebenden Kavernenvolumina mit den in Bild 4.6 angegebenen Volumina der Kavernen zum Zeitpunkt des Kavernenverschlusses im Jahr 2025 zeigt, dass die Kavernenvolumina im Berechnungsmodell unter den gewählten Annahmen zu den Kavernenhöhen und Kavernendurchmessern signifikant überschätzt werden. Eine Anpassung der Kavernengeometrien an die Kavernenvolumina entsprechend Bild 4.6 wäre durch Anpassung der Kavernenhöhen bzw. Kavernendurchmesser zwar im Prinzip möglich, allerdings ist diese Möglichkeit im Rahmen der numerischen Simulationen dieses Reviews verworfen worden aus den folgenden 3 Gründen:

- Über die tatsächlichen geometrischen Verhältnisse der einzelnen Kavernen stehen keine hinreichenden Daten zur Verfügung.
- Die individuellen Kavernenhöhen können einen großen Einfluss haben auf die zeitabhängige konvergenzbedingte Fluidrunderhöhung im Kavernensystem. Daher sollten die Annahmen zu den Kavernenhöhen in den numerischen Simulationen angelehnt sein an die WEP-Annahmen zu den Kavernenhöhen.
- Die individuellen Kavernendurchmesser können einen großen Einfluss haben auf die zeitabhängige infiltrationsbedingte Fluiddruckreduzierung im Kavernensystem. Daher sollten die Annahmen zu den Kavernendurchmessern in den numerischen Simulationen angelehnt sein an die WEP-Annahmen zu den Kavernendurchmessern.

Um dennoch eine Anpassung der freien Solevolumina im Kavernensystem an die in Bild 4.6 dokumentierten Volumina zu erhalten, ist die Annahme getroffen worden, dass die Kavernen zu großen Teilen mit unlöslichen Feststoffen verfüllt sind, so dass sich die auspressbare Sole in vernetzten Porenräumen zwischen diesen unlöslichen Feststoffen befindet. Diese Annahme ist angelehnt an Informationen aus [U2]. Im Rahmen dieses Reviews ist daher für die Kavernenbereiche in Cut I entsprechend [U2] von einer Vollverfüllung ausgegangen worden, während für Cut II eine mittlere Anfangsporosität von  $\phi_0 \approx 4,103 \%$  bzw. für Cut III eine mittlere Anfangsporosität von  $\phi_0 \approx 3,3324 \%$  angesetzt worden ist.

Zwischen manchen der Kavernen sind bereits heute hydraulische Verbindungen identifiziert worden, die ebenfalls einen Teil des auspressbaren Solevolumens enthalten können, so dass eine abstrahierende Betrachtung der komplexen Geometrie des Kavernenfeldes unverzichtbar erscheint.

Allerdings ist die physikalische Ausbildung der hydraulischen Verbindung zwischen den Kavernen explizit nicht bekannt, insbesondere auch im Hinblick auf in ihre zukünftige Entwicklung. Im Rahmen der am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal durchgeführten Arbeiten zur Analyse des langfristigen Soleauspressverhaltens des hier betrachteten Kavernensystems sind daher mehrere Berechnungsmodelle erstellt worden, mit denen unterschiedliche Simulationsvariationen durchgeführt worden sind. Dabei sind zunächst sehr komplexe Berechnungsmodelle erstellt worden, in die mit Zuordnung einer endlichen hydraulischen Durchlässigkeit auch die hydraulischen Verbindungen zwischen den Kavernen innerhalb der Bischoffit-Schicht einbezogen worden sind, wobei die hydraulische Durchlässigkeit dieser Verbindungen als Variationsparameter angesehen wurde. Es hat sich allerdings sehr schnell gezeigt, dass die rechnerische Modellierung eines derart komplexen Kavernensystems aufgrund der damit einhergehenden großen Rechenzeiten nicht handhabbar ist, so dass eine Vereinfachung hinsichtlich der hydraulischen Verbindungen zwischen den Kavernen mit Hilfe eines geeigneten abstrahierenden Funktionalmodells herangezogen werden musste.

Im Bericht zu den von WEP durchgeführten Analysen wird davon ausgegangen, dass sich konvergenz- und infiltrationsbedingte Fluiddruckänderungen instantan im gesamten betroffenen Kavernensystem verteilen, d.h. dass die Permeabilität in den hydraulischen Verbindungen zwischen den Kavernen sehr groß ist. Da diese Annahme hinsichtlich Kavernenkonvergenz und druckgetriebener Fluidinfiltration konservativ erscheint, ist sie zur Abstraktion der ablaufenden physikalischen Prozesse entlang der hydraulischen Verbindungen zwischen den Kavernen und somit zur Vereinfachung der numerischen Simulationen auch im Rahmen der am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal durchgeführten Review-Arbeiten angesetzt worden. Die benötigten Rechenzeiten konnten damit drastisch reduziert werden.

Im Detail funktioniert die angenommene Vereinfachung derart, dass der FTK-Simulator für jeden Iterationsschritt mit zugehörigem Zeitintervall  $\Delta t$  zunächst für jede einzelne Kaverne die Kavernenkonvergenz entsprechend ihrer jeweiligen Konvergenzcharakteristik sowie die daraus resultierende konvergenzinduzierte Fluiddruckänderung in der entsprechenden Kaverne berechnet, anschließend die Fluiddrücke in den einzelnen Kavernen aber so anpasst, dass sich für jede Kaverne der gleiche Kopfdruck ergibt. Analog ist diese Vorgehensweise auch nach der Berechnung der infiltrationsbedingten Fluiddruckänderungen angewendet worden.

Dem Bericht zu den von WEP durchgeführten Analysen ist zu entnehmen, dass derzeit noch nicht alle Kavernen VE-1 – VE-4 und TR-1 – TR-9 miteinander verbunden sind. Vielmehr wird angenommen, dass

- die Kavernen VE-1 und TR-9 jeweils isoliert von den anderen Kavernen sind,
- die Kavernen VE-2 und VE-3 nur miteinander verbunden sind, aber nicht mit den anderen Kavernen, und
- die Kavernen VE-4 und TR-1 – TR-8 ein gemeinsames eigenes hydraulisch verbundenes Kavernensystem bilden.

Entsprechend der angenommenen derzeitigen Kavernenverbundensituation ist das in Bild 6.5 dargestellte Berechnungsmodell I entwickelt und diskretisiert worden, mit dem anschließend die HM-gekoppelten Simulationsvariationen A, B und C zum langfristigen Auspressverhalten der Kavernen durchgeführt worden sind.

Im WEP-Bericht [U1] wird im Rahmen der durchgeführten Analysen allerdings darauf hingewiesen, dass die Kavernenverbundensituation sich in der Zukunft ändern könnte zu einem mit Ausnahme der Kaverne VE-1, für die keine Aussolung in der Bischoffit-Schicht stattgefunden

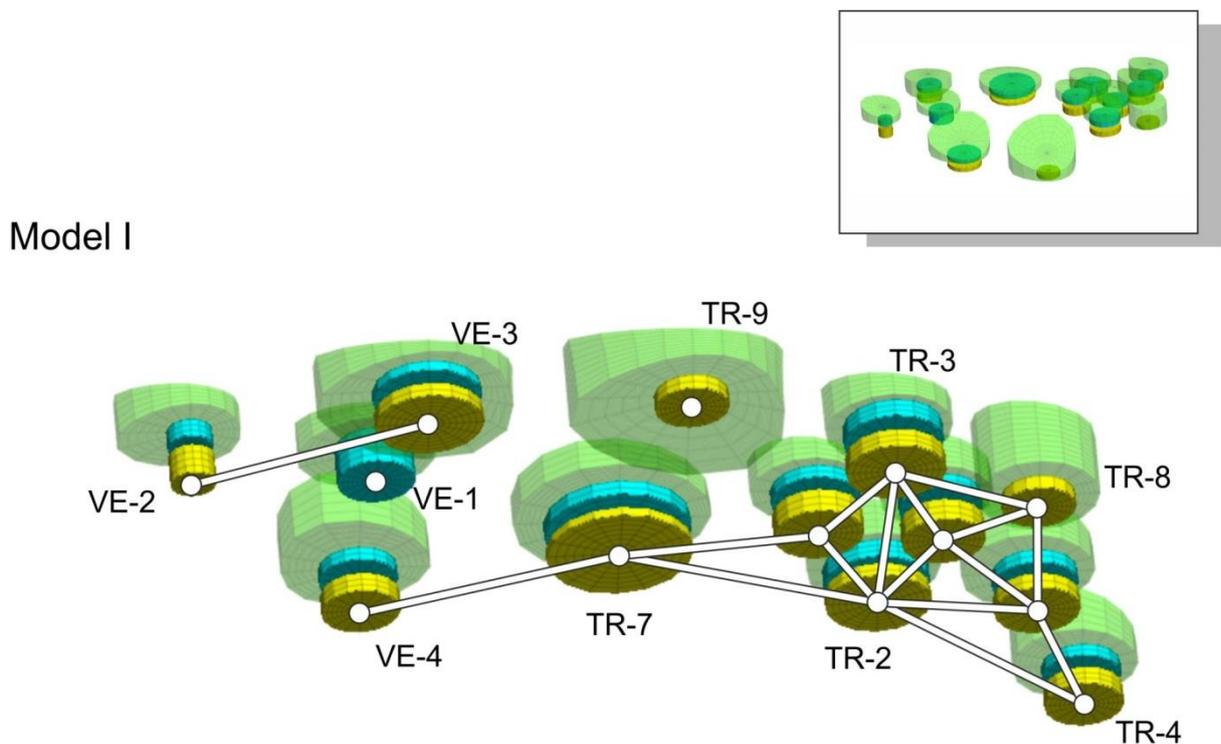


Bild 6.5 Berechnungsmodell I mit einer dem derzeitigen Zustand entsprechenden Kavernenverbundensituation nach WEP, [U1]

hat, vollständig verbundene Kavernensystem, wodurch sich der Abstand zwischen dem tiefstliegenden Kavernensumpf und dem höchstliegenden Kavernendach im Kavernensystem vergrößern würde. Daraus würde eine Intensivierung des konvergenzgetriebenen Soleauspressprozesses resultieren. Aus diesem Grund ist diese konservativere Kavernenverbundsituation in das in Bild 6.6 dargestellte Berechnungsmodell II übertragen worden. Mit diesem Berechnungsmodell ist anschließend die HM-gekoppelte Simulationsvariation D durchgeführt worden.

In allen durchgeführten Simulationsvariationen ist davon ausgegangen worden, dass die Kavernen unter Beibehaltung des in [U1] für die Betriebsphase angegebenen Innendrucks verschlossen werden. Damit ist hier von der in [U1] dokumentierten Vorgehensweise abgewichen worden, wo von Beginn an ein Kaverneninnendruck angenommen wird, bei dem konvergenzbedingter Fluiddruckaufbau und infiltrationsbedingter Fluiddruckabbau im Gleichgewicht stehen. Dieser Gleichgewichtsdruck sollte sich im Rahmen der numerischen Simulationen von selbst einstellen.

Es ist zudem darauf hinzuweisen, dass im Rahmen der durchgeführten numerischen Simulationen die Fluidichte aufgrund von Restriktionen im FTK-Simulator nicht entsprechend der

Model II

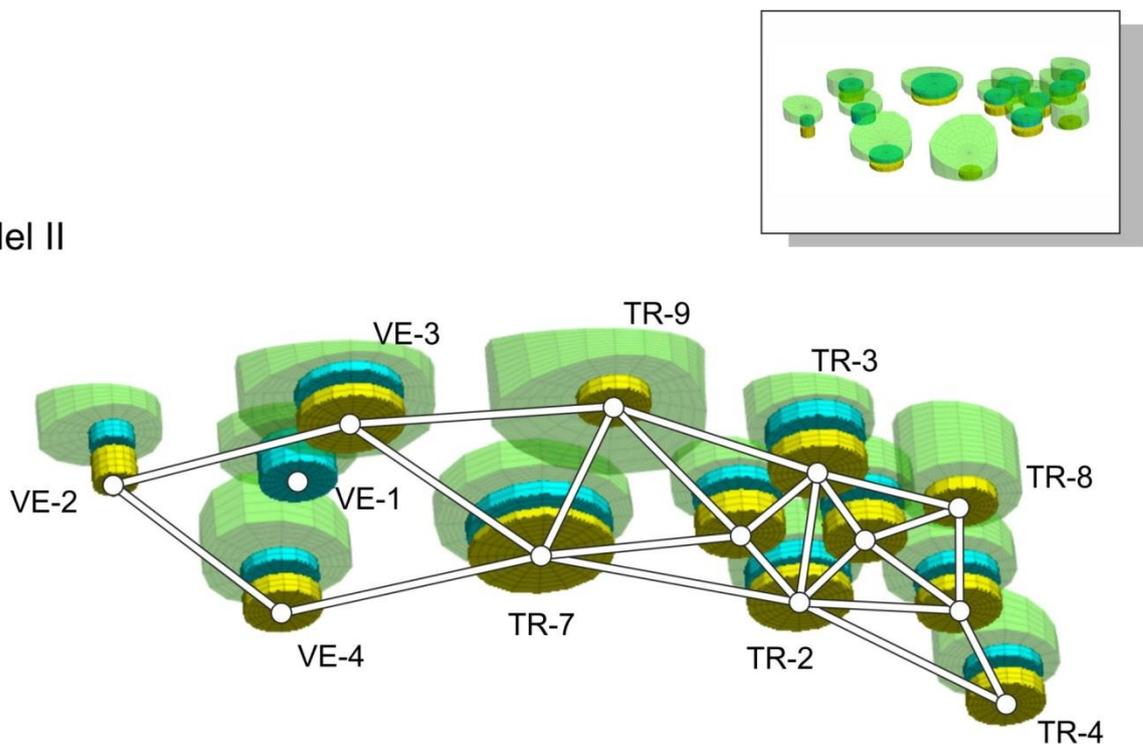


Bild 6.6 Berechnungsmodell II mit einer konservativ eingeschätzten möglichen zukünftigen Kavernenverbundsituation nach WEP, [U1]

Dichte einer gesättigten Bischofit- oder Carnallit-Sole, sondern entsprechend der Dichte von Wasser angesetzt worden ist. Dieser Ansatz wird als konservativ angesehen, da dadurch der Konvergenzprozess und somit der konvergenzbedingte Druckaufbau in den unteren Bereichen des Kavernensystems intensiviert werden.

### 6.3 Grundsätzliche Annahmen zu den individuellen Konvergenzeigenschaften der Kavernen sowie zu den Infiltrationseigenschaften des Salinargebirges

Bild 6.7 zeigt auf der linken Seite das im Rahmen der im WEP-Bericht durchgeführten Analysen zur Berechnung der Kavernenkonvergenz verwendete Funktionalmodell, das als *Two-branch Squeeze Model* bezeichnet wird, während auf der rechten Seite von Bild 6.7 ein entsprechendes am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik (LfDG) entwickeltes und in den FTK-Simulator implementiertes Funktionalmodell dargestellt wird. Auf den ersten Blick scheinen diese beiden Funktionalmodelle sehr unterschiedlich zu sein. Es ist jedoch möglich, diese beiden Funktionalmodelle durch geeignete Anpassung der Parameter nahezu deckungsgleich auszugestalten, so dass sie für identische Belastungszustände nahezu identische Konvergenzraten ausgeben. Bild 6.8 zeigt vergleichend die Konvergenzcharakteristiken, nachdem die Konvergenzcharakteristik des LfDG-Funktionalmodells durch Parameteranpassung an die in [U1] angesetzte Konvergenzcharakteristik angepasst worden ist.

$$\frac{dV}{V} = \sqrt{3} \left( \frac{\sqrt{3}}{n_1} \Delta P \right)^{n_1} \cdot A_1 \cdot e^{-\frac{Q_1}{RT}} + \sqrt{3} \left( \frac{\sqrt{3}}{n_2} \Delta P \right)^{n_2} \cdot A_2 \cdot e^{-\frac{Q_2}{RT}}$$

$$\dot{K} = \dot{K}_0 \cdot \left( 1 - \left( \frac{(P_G - \Delta P) - P_{ref}}{P_G - P_{ref}} \right)^n \right)^m \cdot \left( e^{a \cdot (T - T_{ref})^b} \right)$$

Parameter:

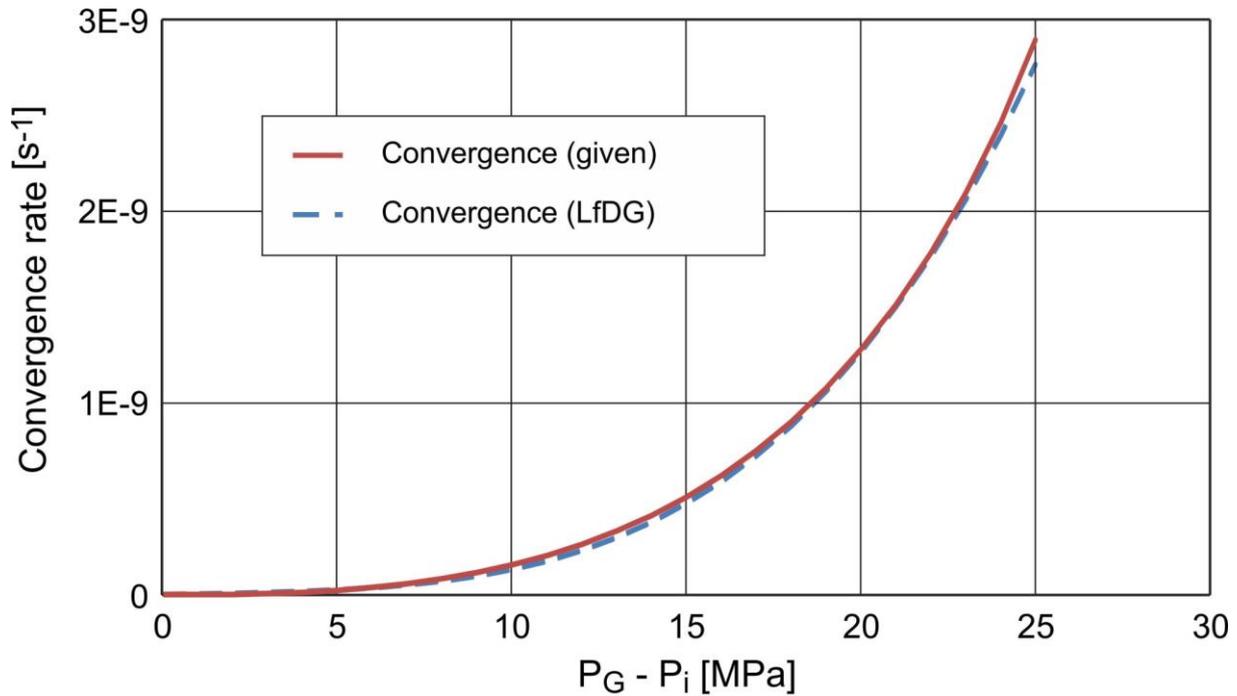
$A_1$	= 2,92824E-05 [1/(s*MPa <sup>n<sub>1</sub></sup> )] (2,53 [1/(d*MPa <sup>n<sub>1</sub></sup> )])
$n_1$	= 3,6 [-]
$A_2$	= 0,00016088 [1/(s*MPa <sup>n<sub>2</sub></sup> )] (13,9 [1/(d*MPa <sup>n<sub>2</sub></sup> )])
$n_2$	= 1 [-]

Parameter:

$\dot{K}_0$	= 1,11859E-08 [s <sup>-1</sup> ] (9,664E-04 [d <sup>-1</sup> ])
$P_{ref}$	= 0,1013 [MPa]
$P_G$	= 31,108 [MPa]
$n$	= 0,55 [-]
$m$	= 2,6 [-]
$T_{ref}$	= 329,812 [K]
$a$	= 0,062 [K <sup>-1</sup> ]
$b$	= 0,885 [-]

Source: R1 (P.9)

Bild 6.7 Funktionalmodell und zugehörige Parameter zur Berechnung der Kavernenkonvergenz, [U1] und [U3]



Source: R1

Bild 6.8 Gegenüberstellung der von WEP bzw. von LfDG verwendeten Funktionalmodelle zur Beschreibung der Konvergenzcharakteristik am Standort des Kavernenfeldes

Die in Bild 6.8 dargestellten Konvergenzcharakteristiken berücksichtigen zwar noch nicht, dass sich die verschiedenen Teilabschnitte der Kavernen in unterschiedlichen Salzarten befinden, wobei grob in Bischofit und Carnallit unterschieden werden kann, die sich im Detail aber auch noch in ihrer Zusammensetzung unterscheiden. Diese unterschiedlichen Salzzusammensetzungen resultieren in deutlichen Abweichungen der kavernenspezifischen Konvergenzcharakteristiken von den in Bild 6.8 dargestellten grundsätzlichen Konvergenzcharakteristiken. Diese materialbezogenen Spezifizierungen werden im Rahmen der rechnerischen Simulationen ebenso wie in den Analysen entsprechend [U1] durch so genannte Konvergenzfaktoren entsprechend Bild 4.7 berücksichtigt.

Neben den vorstehend erläuterten individuellen Konvergenzeigenschaften der Kavernen haben auch die Infiltrationseigenschaften des Salinargebirges einen signifikanten Einfluss auf das langfristige Trag- und Soleauspressverhalten des Kavernensystems. Bereits in SMRI (2002) sind wissenschaftliche Untersuchungen zum druckgetriebenen Infiltrationsprozess von Fluiden aus Kavernen in das umgebende Salinargebirge durchgeführt worden. Im Rahmen dieser Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die durch den Infiltrationsprozess induzierte Sekundärpermeabilität in der Infiltrationszone abhängig ist vom lokal anstehenden wirksamen Fluiddruck, der sich ergibt als Differenz aus dem Fluiddruck und der minimalen

Hauptspannung. Liegt der wirksame Fluiddruck über einem lokationsspezifischen Schwellenwert, dann ist ein starker Anstieg der Sekundärpermeabilität zu verzeichnen.

Im Rahmen der in [U1] dokumentierten Arbeiten ist der in Bild 6.9 als mathematische Formel und in Bild 6.10 als zugehörige Kurve dargestellte Ansatz des IUB der Leibniz-Universität Hannover nach *SMRI (2002)* in der Art modifiziert worden, dass es für die aus dem druckgetriebenen Infiltrationsprozess resultierende Sekundärpermeabilität keine Obergrenze gibt. Dieser modifizierte Ansatz ist ebenfalls in Bild 6.9 bzw. Bild 6.10 dargestellt. In beiden Ansätzen wird der wirksame Fluiddruck mit  $\sigma_{teff}$  bezeichnet, während der Schwellenwert für den Beginn des druckgetriebenen Infiltrationsprozesses mit  $\sigma_{teff-min}$  bezeichnet wird. Zudem wird in beiden Ansätzen für das Salinargebirge eine zwar kleine, aber dennoch positive primäre Permeabilität  $K_{init}$  unterstellt.

Beim ebenfalls in Bild 6.9 bzw. Bild 6.10 dargestellten Ansatz des LfDG nach *Wolters (2014)* wird der wirksame Fluiddruck mit  $\Delta p_{Fl}$  bezeichnet, der Schwellenwert für den Beginn des druckgetriebenen Infiltrationsprozesses mit  $\Delta p_{Fl}^{krit}$ . Das Salinargebirge wird für wirksame Fluiddrücke unterhalb dieses Schwellenwertes als dicht angesehen.

$$K = \begin{cases} K_{init} & \text{if } \sigma_{teff} \leq \sigma_{teff-min} \equiv 0 \text{ MPa} \\ K_{init} \cdot \exp\left(\left(\ln(K_{sec}) - \ln(K_{init})\right) \cdot \frac{\sigma_{teff} - \sigma_{teff-min}}{\sigma_{teff-max} - \sigma_{teff-min}}\right) & \text{if } \sigma_{teff-min} < \sigma_{teff} \leq \sigma_{teff-max} \\ K_{sec} & \text{if } \sigma_{teff} > \sigma_{teff-max} \equiv 1 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$K = \begin{cases} K_{init} & \text{if } \sigma_{teff} \leq \sigma_{teff-min} \equiv 0 \text{ MPa} \\ K_{init} \cdot \exp\left(\left(\ln(K_{sec}) - \ln(K_{init})\right) \cdot \frac{\sigma_{teff} - \sigma_{teff-min}}{1 \text{ MPa} - \sigma_{teff-min}}\right) & \text{if } \sigma_{teff-min} < \sigma_{teff} \end{cases}$$

$$K^s = K^* \cdot \begin{cases} 0 & \text{if } \Delta p_{Fl} \leq \Delta p_{Fl}^{krit} \\ 10^{a+b \cdot \arctan(c \cdot (\Delta p_{Fl} - \Delta p_{Fl}^{krit})) + d \cdot \exp(e \cdot \Delta p_{Fl})} & \text{if } \Delta p_{Fl} > \Delta p_{Fl}^{krit} \end{cases}$$

**Bild 6.9** Formelmäßige Darstellung der Ansätze zur physikalischen Modellierung der aus dem druckgetriebenen Infiltrationsprozess resultierenden Sekundärpermeabilität in der Infiltrationszone (rot: Ansatz des IUB nach *SMRI (2002)* / blau: Ansatz des WEP nach [U1] / grün: Ansatz des LfDG nach *Wolters (2014)*)

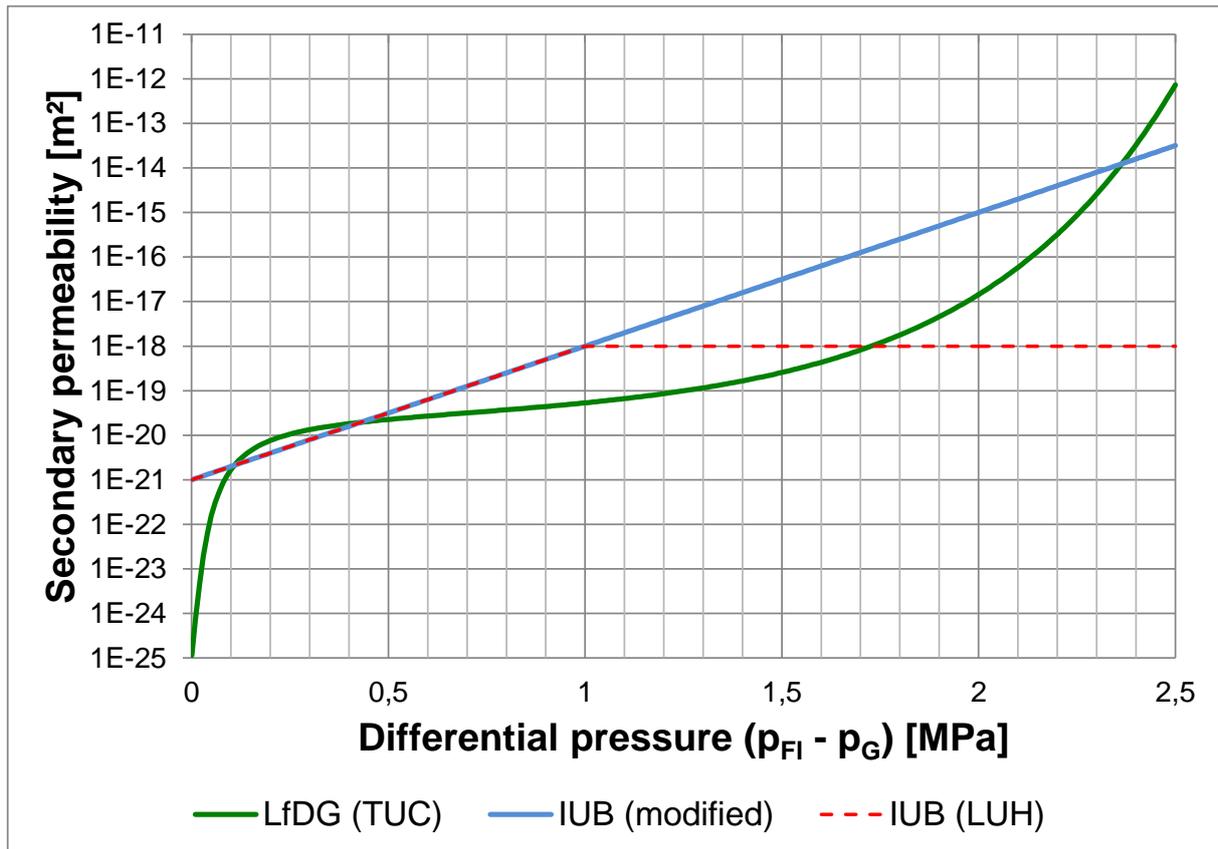


Bild 6.10 Grafische Darstellung der Ansätze zur physikalischen Modellierung der aus dem druckgetriebenen Infiltrationsprozess resultierenden Sekundärpermeabilität in der Infiltrationszone (rot: Ansatz des IUB nach SMRI (2002) / blau: Ansatz des WEP nach [U1] / grün: Ansatz des LfDG nach Wolters (2014))

## 7 FTK-Simulator / Kopplung

Die rechnerische Simulation der im betrachteten Kavernensystem ablaufenden HM-gekoppelten physikalischen Prozesse, insbesondere der druckgetriebene Infiltrationsprozess von Kavernensole in das die verschlossenen Kavernen umgebende Salinargebirge, erfolgt mit Hilfe des Simulators FTK, der im Rahmen des in *Lux et al. (2016)* dokumentierten Forschungsprojektes „Kopplung der Softwarecodes FLAC<sup>3D</sup> und TOUGH2 in Verbindung mit in situ-, laborativen und numerischen Untersuchungen zum thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten von Tongestein unter Endlagerbedingungen“ am Lehrstuhl für Depo-nietechnik und Geomechanik der TU Clausthal durch die Implementierung einer Schnittstelle zur Kommunikation der beiden Simulatoren FLAC<sup>3D</sup> und TOUGH2 zunächst grundsätzlich entwickelt sowie verifiziert und in weiterführenden ersten Schritten auch validiert worden ist, *Lux et al. (2016)*, *Blanco Martín et al. (2015)* und *Blanco Martín et al. (2016)*.

Bild 7.1 zeigt eine schematische Übersicht zur Kopplung der beiden Simulatoren FLAC<sup>3D</sup> und TOUGH2. Mit Hilfe des Simulators FTK können neben den im Umfeld von Kavernen im Salinargebirge ablaufenden hydraulischen und mechanischen Prozessen bei Bedarf auch die dort ablaufenden thermischen Prozesse modelliert werden, *Lux et al. (2015)*. Thermische Pro-

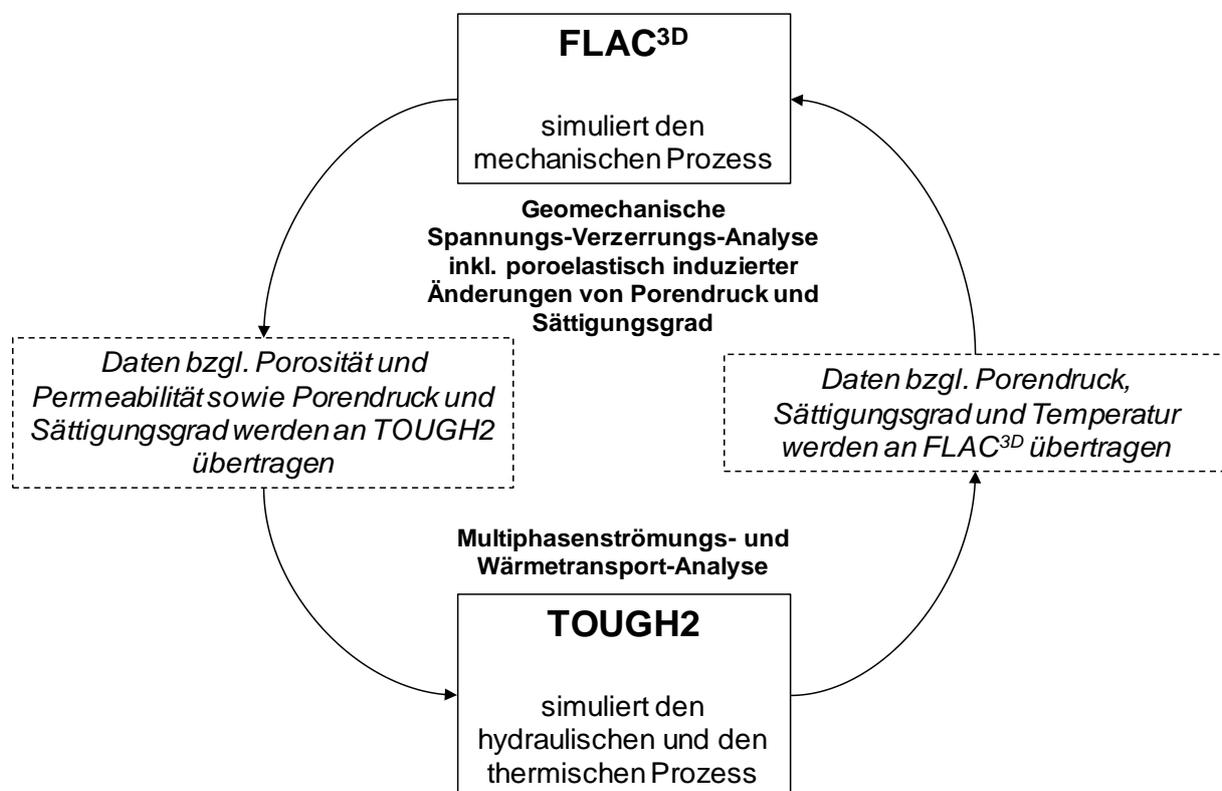


Bild 7.1 Schematische Übersicht zur Kopplung der beiden Simulatoren FLAC<sup>3D</sup> und TOUGH2 zum Simulator FTK

zesse sind allerdings im Rahmen der hier durchgeführten Analysen als vernachlässigbar angesehen worden. Daher wird im Weiteren die physikalische Modellierung thermischer Prozesse nicht weiter erläutert.

Es ist darauf hinzuweisen, dass im Rahmen der alternierenden Simulation von mechanischen und hydraulischen Prozessen im Simulator FTK zunächst immer die mechanischen Prozesse für ein bestimmtes Zeitintervall mit dem Simulator FLAC<sup>3D</sup> simuliert werden, bevor anschließend die hydraulischen Prozesse mit dem Simulator TOUGH2 simuliert werden.

Der Simulator FTK kann grundsätzlich gleichermaßen herangezogen werden zur Verbesserung einerseits des Prozessverständnisses zu den in jeder einzelnen Kaverne sowie im umgebenden Salinargebirge ablaufenden TH2M-gekoppelten physikalischen Prozessen wie auch andererseits des Systemverständnisses zum langfristigen Verhalten komplexer verbundener Kavernensysteme.

## 8 Simulationsergebnisse – Dokumentation und Diskussion

### 8.1 Simulationsvariation A

Die Simulationsvariation A zeichnet sich durch die folgenden Charakteristika aus:

- Die Sekundärpermeabilität  $K^s$  der Infiltrationszone im Salinargebirge oberhalb der Kavernen ergibt sich entsprechend des am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal entwickelten und in *Wolters (2014)* dokumentierten Ansatzes zur zeitlichen Entwicklung der Sekundärpermeabilität beim Prozess der druckgetriebenen Fluidinfiltration zu

$$K^s = K^* \cdot \begin{cases} 0 & \text{für } \Delta p_{Fl} \leq \Delta p_{Fl}^{krit} \\ 10^{a+b \cdot \arctan(c \cdot (\Delta p_{Fl} - \Delta p_{Fl}^{krit})) + d \cdot \exp(e \cdot \Delta p_{Fl})} & \text{für } \Delta p_{Fl} > \Delta p_{Fl}^{krit} \end{cases} \quad (8.1)$$

- Die Kavernenkonvergenz wirkt sich nur aus in einem konvergenzbedingten Fluiddruckaufbau innerhalb des Kavernensystems. Die konvergenzbedingte Änderung der Kavernenvolumina wird innerhalb des analog zu den Arbeiten des WEP-Berichts zu betrachtenden Zeitraums von 100 Jahren nach dem Verschluss des Kavernensystems aufgrund der relativ geringen Konvergenzraten als vernachlässigbar angesehen. Dieser Ansatz wird zudem als konservativ eingeschätzt.
- Der initiale Kopfdruck zum Zeitpunkt des Verschlusses des Kavernensystems wird analog zu dem im WEP-Bericht angesetzten Kopfdruck während der Betriebsphase angesetzt. Damit ergibt sich in einer Teufe von 1.463 m ein Fluiddruck von 6,75 MPa, der unterhalb des lithostatischen Druckes liegt.
- Im Hangenden der Kavernen wird eine den so genannten Fluid Inclusions entsprechende initiale unvernetzte Porosität von  $\phi_0 = 0,2\%$  angenommen, wobei die Fluid Inclusions zu gleichen Teilen aus eingeschlossenen Flüssigkeiten und Gasen bestehend angenommen werden, so dass die initiale Sättigung  $S_l = 50\%$  beträgt (Sättigungsgrad  $S_l = 0,5$ ).
- Für die Simulation wird das Berechnungsmodell I entsprechend Bild 6.5 verwendet.

Die Ergebnisse der Simulationsvariation A zeigen, dass die Konvergenzraten der Kavernen bereits innerhalb des ersten Jahres nach dem Verschluss des Kavernensystems stark abnehmen. Dieser Sachverhalt ist exemplarisch für die Kaverne VE-4 in Bild 8.1 dargestellt, wobei

die Konvergenzrate im Cut II aufgrund der höheren Kriechfähigkeit des Bischofits etwa 4-5 mal größer ist als bei dem im Carnallitit liegenden Cut III.

Ursache für die signifikante Abnahme der Konvergenzraten bereits innerhalb des ersten Jahres nach Kavernenverschluss ist der aus Bild 8.2 zu ersehende rasante konvergenzbedingte Fluiddruckaufbau in den verschlossenen Kavernen. Die Fluiddrücke in den verschlossenen Kavernen tendieren in der Folgezeit dann gegen ein Fluiddruckniveau, bei dem konvergenzbedingter Fluiddruckaufbau und infiltrationsbedingter Fluiddruckabbau im Gleichgewicht stehen. Dieser Gleichgewichtszustand wird in allen Kavernen innerhalb weniger Jahre erreicht, wobei ein Großteil des konvergenzbedingten Fluiddruckaufbaus bereits innerhalb des ersten Jahres nach Kavernenverschluss erfolgt.

Aus Bild 8.2 ist zudem zu ersehen, dass sich die Fluiddrücke in den jeweils miteinander hydraulisch verbundenen Kavernen entsprechend des angesetzten Funktionalmodells zeitlich absolut simultan entwickeln, allerdings aufgrund der unterschiedlichen Teufenlagen der Kavernen auf jeweils unterschiedlichem Druckniveau.

Ebenfalls in Bild 8.2 dargestellt ist exemplarisch für den Cut III der Kaverne VE-2 der lithostatische Druck am Kavernendach. Es ist zu ersehen, dass der Fluiddruck am Kavernen-

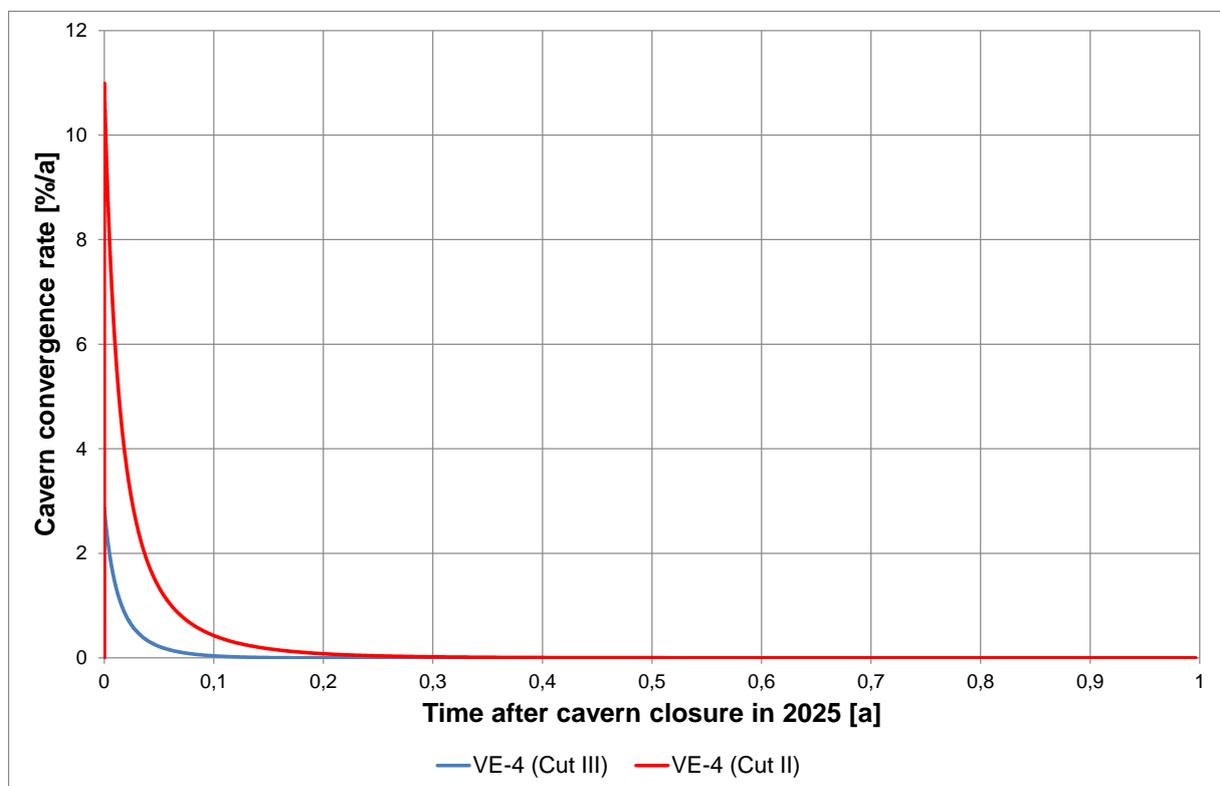


Bild 8.1 Zeitliche Entwicklung der Konvergenzraten im Cut II (Bischofit-Schicht) und Cut III (Carnallitit-Schicht) der Kaverne VE-4

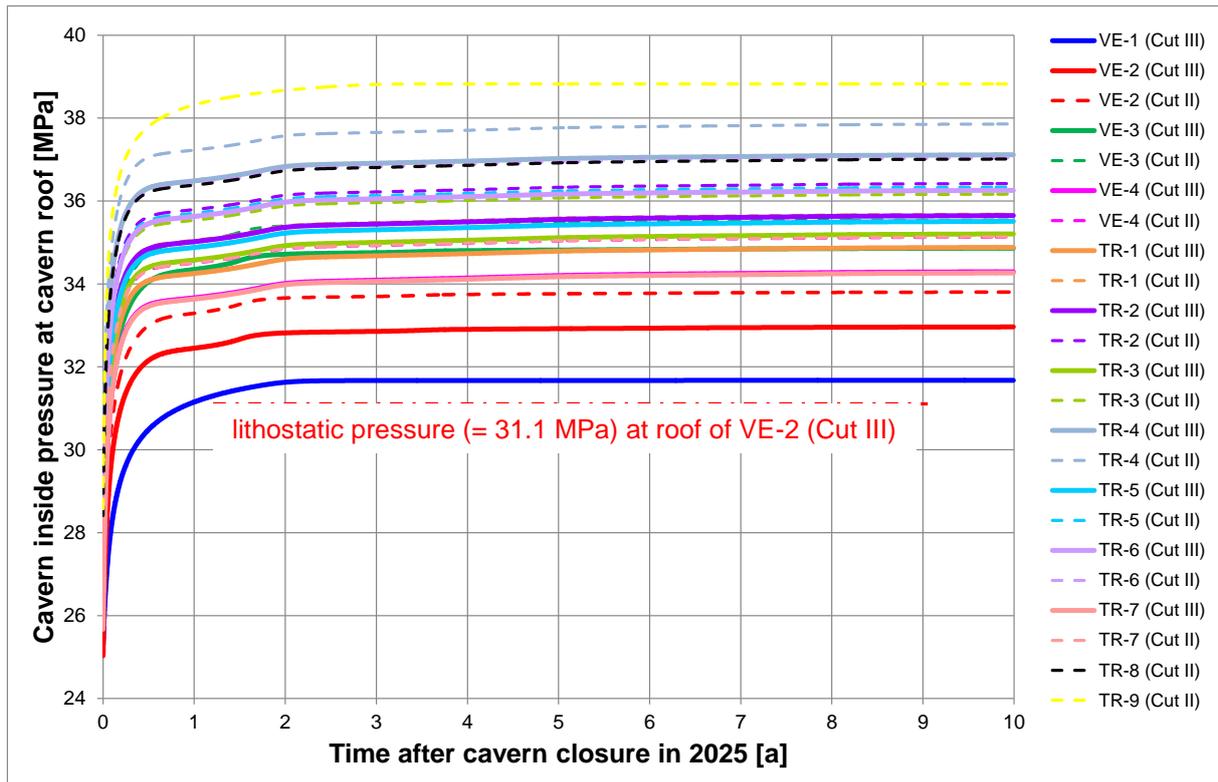


Bild 8.2 Zeitliche Entwicklung des Fluiddrucks am Kavernendach für die einzelnen Kavernen des Kavernensystems

dach den dortigen lithostatischen Druck bereits etwa ein Jahr nach dem Verschluss des Kavernensystems überschreitet, wodurch ein druckgetriebener Infiltrationsprozess mit damit einhergehender Ausbildung einer Sekundärpermeabilität in der entsprechenden Infiltrationszone induziert wird.

Allerdings wird nicht nur im Hangenden von Cut III der Kaverne VE-2 bereits zu diesem frühen Zeitpunkt ein druckgetriebener Infiltrationsprozess initiiert, sondern auch im Hangenden von Cut III der Kavernen VE-4, TR-1 und TR-7. Dieser Sachverhalt ist aus Bild 8.3 zu ersehen anhand der gegenüber dem initialen Zustand angestiegenen Sättigungsgrade im Hangenden dieser Kavernen. Bild 8.3 zeigt dabei einerseits in der großen Darstellung eine Ansicht von schräg unten auf das Hangendgebirge jeweils am Kavernendach, andererseits in der kleinen Darstellung eine Ansicht von schräg oben auf das Hangendgebirge am Salzspiegel. Da am Salzspiegel noch keine Änderung des Sättigungsgrades im Vergleich zum Ausgangszustand ausgewiesen wird, hat die Infiltrationszone den Salzspiegel zu diesem Zeitpunkt noch nicht erreicht, so dass zum Zeitpunkt  $t = 1 a$  nach Verschluss des Kavernensystems noch keine hydraulische Verbindung zwischen den Kavernen und dem Deckgebirge hergestellt ist.

Da der Fluiddruck in den Kavernen entsprechend Bild 8.2 zum Zeitpunkt  $t = 1 a$  nach Ver-

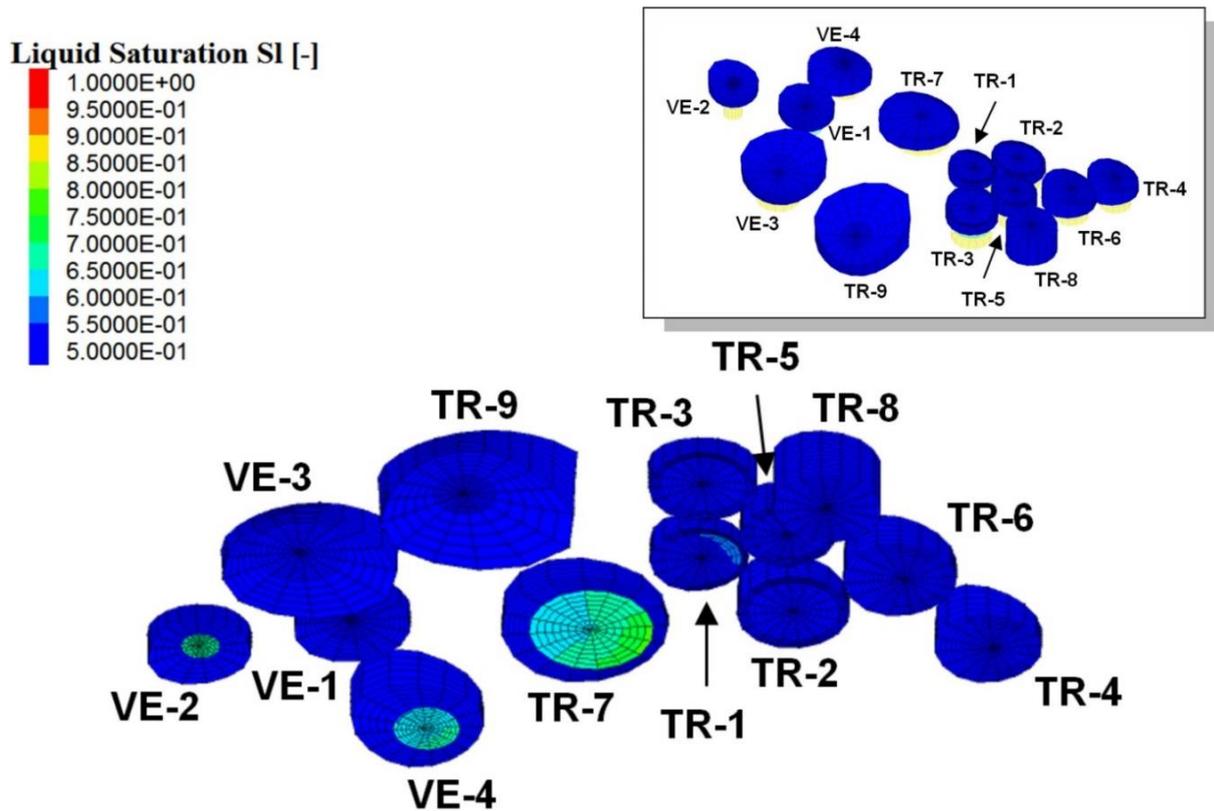


Bild 8.3 Darstellung der infiltrierten Gebirgsbereiche im Hangenden der Kavernen zum Zeitpunkt  $t = 1 a$  nach Verschluss des Kavernensystems

schluss des Kavernensystems noch in keiner Kaverne das Druckniveau erreicht hat, bei dem konvergenzbedingter Fluidruckaufbau und infiltrationsbedingter Fluidruckabbau im Gleichgewicht stehen, steigt der Fluidruck in allen Kavernen noch für einige Jahre weiter an. Durch den ansteigenden Fluidruck wird im Lauf der Zeit im Hangenden von immer mehr Kavernen der druckgetriebene Infiltrationsprozess initiiert. Bild 8.4 zeigt diesen Sachverhalt für den Zeitpunkt  $t = 10 a$  nach Verschluss des Kavernensystems. Es ist zu ersehen, dass zu diesem Zeitpunkt das Hangende von Cut III der Kavernen VE-1, VE-2, VE-4, TR-1, TR-2, TR-3, TR-5 und TR-7 infiltriert wird.

Eine Änderung des Sättigungsgrades im Bereich des Salzspiegels ist in Bild 8.4 auch für den Zeitpunkt  $t = 10 a$  nach Verschluss des Kavernensystems noch für keine Kaverne zu erkennen. Da die in Bild 8.4 gewählte Skala allerdings erst bei einem Sättigungsgrad von  $S_l > 55\%$  einen Unterschied zum Ausgangszustand anzeigt, ist für eine detailliertere Analyse in Bild 8.5 für einige Kavernen die zeitliche Entwicklung der Soleauspressvolumina aus dem Kavernensystem am Salzspiegel über den jeweiligen Kavernen dargestellt. Dabei sind besonders die Kavernen VE-2, VE-4, TR-1 und TR-7 von Bedeutung, da nur im Hangenden dieser

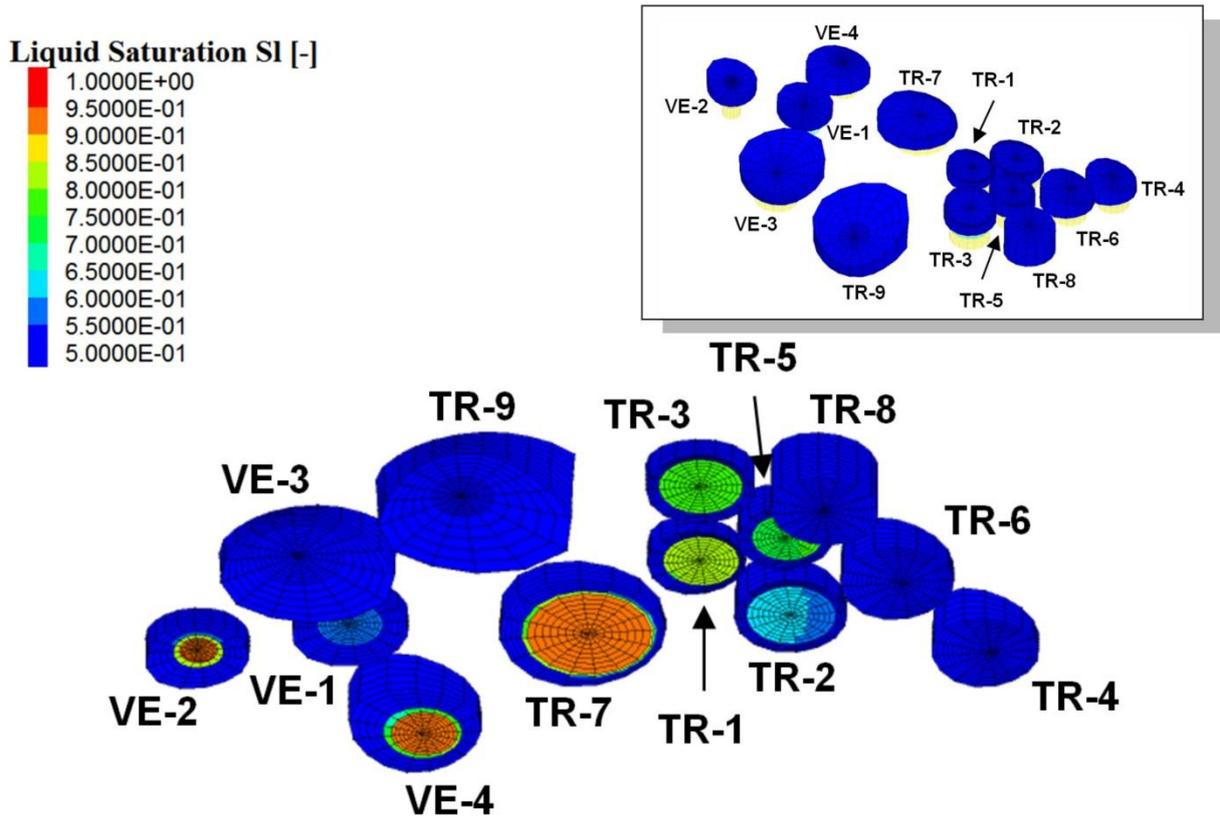


Bild 8.4 Darstellung der infiltrierten Gebirgsbereiche im Hangenden der Kavernen zum Zeitpunkt  $t = 10$  a nach Verschluss des Kavernensystems

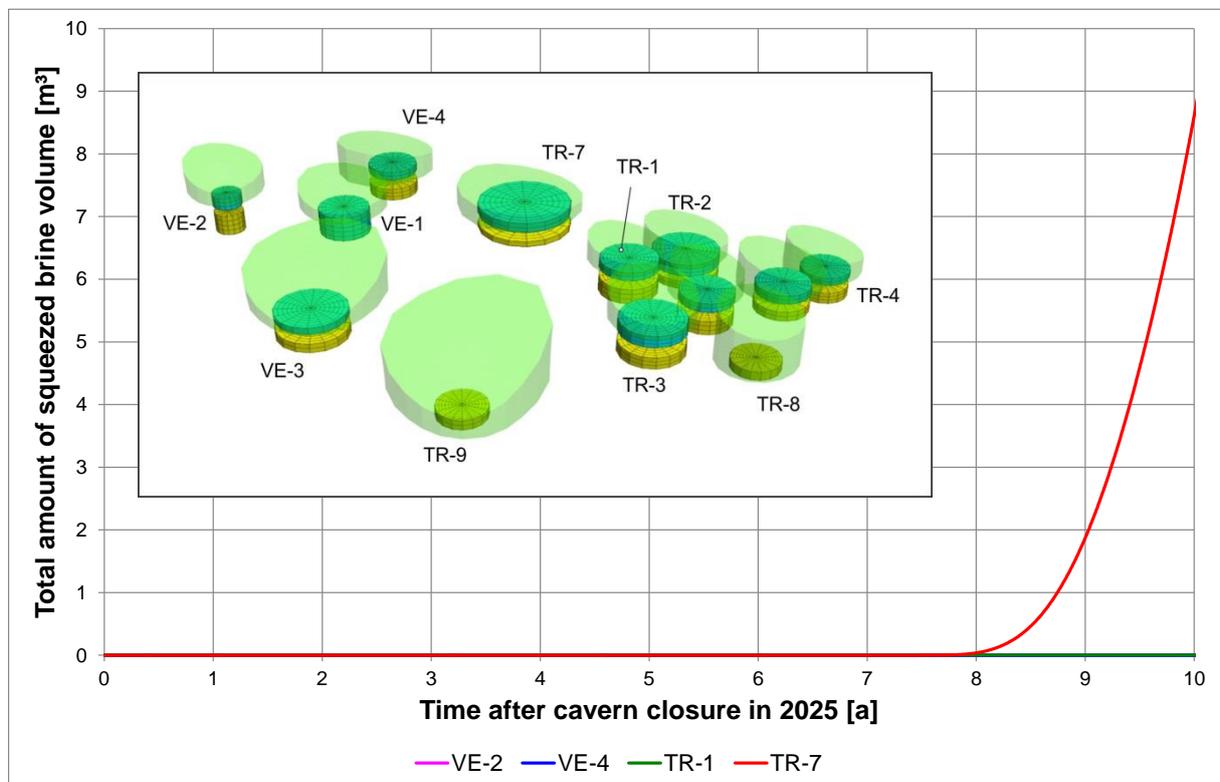


Bild 8.5 Zeitliche Entwicklung der Soleauspressvolumina aus dem Kavernensystem am Salzspiegel über den Kavernen VE-2, VE-4, TR-1 und TR-7 bis zum Zeitpunkt  $t = 10$  a nach Verschluss des Kavernensystems

Kavernen die Infiltrationsfront bis zum Ende der Simulationszeit überhaupt den jeweiligen Salzspiegel erreicht, so dass nur dort ein Auspressprozess durch die Infiltrationszone stattfinden kann. Aus Bild 8.5 ist nunmehr zu ersehen, dass bis zum Zeitpunkt  $t = 10 a$  nach Verschluss des Kavernensystems am Salzspiegel oberhalb der Kaverne TR-7 Sole ausgepresst wird. Dort hat der Soleauspressprozess etwa zum Zeitpunkt  $t = 7,5 a$  nach Verschluss des Kavernensystems begonnen, wobei die Auspressrate zunächst noch relativ gering ist, da sich in der Infiltrationszone neben der infiltrierten Sole auch noch ein Teil der primär vorhandenen gasförmigen Fluid Inclusions befinden, so dass der Soleauspressprozess zu diesem Zeitpunkt noch durch Zweiphasenfluss-Effekte verzögert wird. Dieses Gas wird allerdings während der Soleauspressung allmählich mit der Sole aus der Infiltrationszone ausgetragen, so dass sowohl der Sättigungsgrad in der Infiltrationszone wie auch die Auspressrate von Sole durch die Infiltrationszone ansteigen.

Bild 8.6 zeigt den Sättigungsgrad in den verschiedenen Infiltrationszonen zum Zeitpunkt  $t = 100 a$  nach Verschluss des Kavernensystems. Es ist einerseits zu ersehen, dass zu diesem Zeitpunkt auch oberhalb von Cut III der Kaverne TR-9 der druckgetriebene Infiltrationsprozess eingesetzt hat. Eine deutliche Änderung des Sättigungsgrades am Salzspiegel wird zu diesem Zeitpunkt für die Kavernen VE-2, VE-4 und TR-7 ausgewiesen, d.h. über die Infiltrationszone hat sich für diese Kavernen eine hydraulische Verbindung zwischen den jeweiligen Kavernen und dem nichthalitischen Deckgebirge ausgebildet.

Anhand der in Bild 8.7 dargestellten zeitlichen Entwicklung der Soleauspressvolumina ist zu ersehen, dass für die Kaverne VE-2 der Soleauspressprozess etwa zum Zeitpunkt  $t = 10 a$  nach Verschluss des Kavernensystems begonnen hat. Für die Kaverne VE-4 liegt dieser Zeitpunkt bei etwa  $t = 16 a$  nach Verschluss des Kavernensystems. Nach Austrag der primär vorhanden gasförmigen Fluid Inclusions wird die Kavernensole mit relativ konstanten Raten von  $\dot{Q} \approx 72,1 m^3/a$ ,  $\dot{Q} \approx 76 m^3/a$  bzw.  $\dot{Q} \approx 520 m^3/a$  aus den Kavernen VE-2, VE-4 bzw. TR-7 ausgepresst. Auch am Salzspiegel oberhalb der Kaverne TR-1 beginnt zum Zeitpunkt  $t = 90 a$  nach Verschluss des Kavernensystems die Soleauspressung, allerdings mit einer noch nur sehr geringen Auspressrate von  $\dot{Q} \approx 0,005 m^3/a$ .

Kumulativ ergibt sich in der Simulationsvariation A entsprechend der dargestellten Soleauspressvolumina bis zum Zeitpunkt  $t = 100 a$  nach Verschluss des Kavernensystems ein insgesamt ausgepresstes Solevolumen von etwa  $Q \approx 50.000 m^3$ . Damit liegt das berechnete ausge

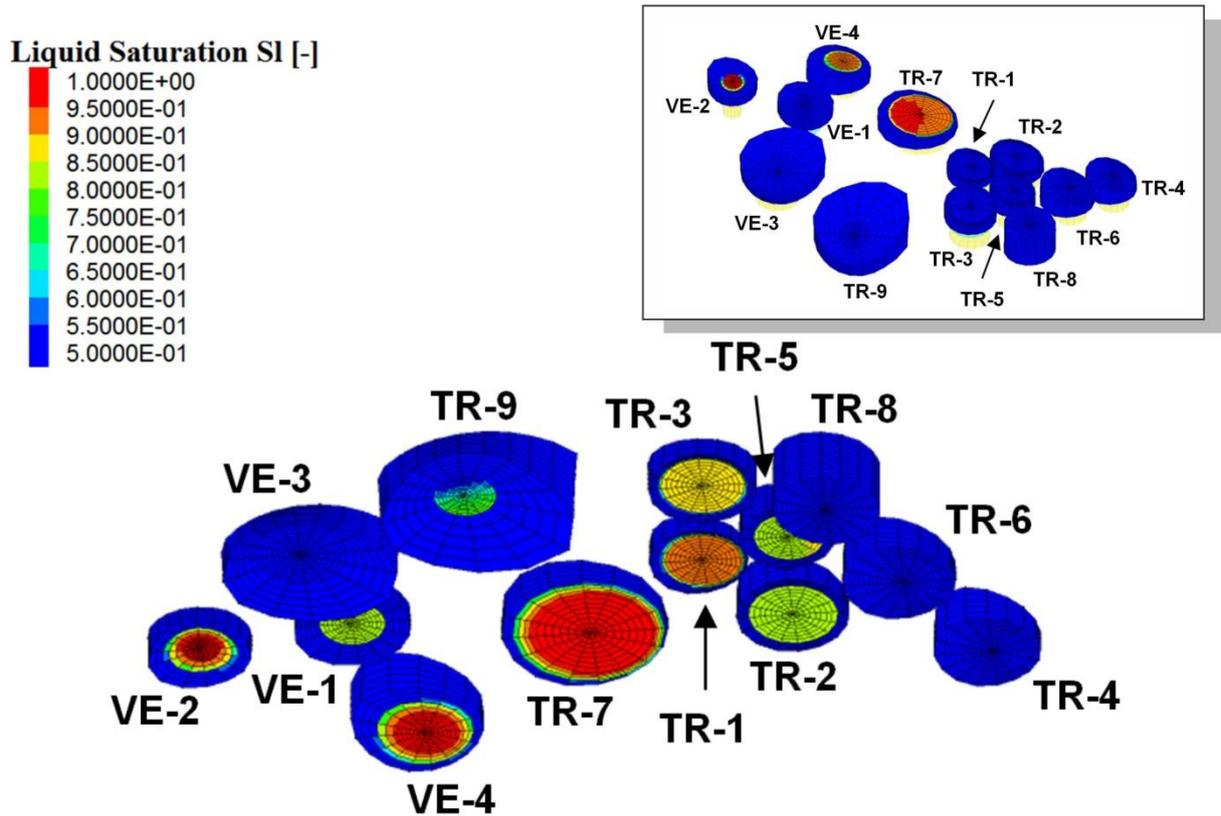


Bild 8.6 Darstellung der infiltrierten Gebirgsbereiche im Hangenden der Kavernen zum Zeitpunkt  $t = 100 \text{ a}$  nach Verschluss des Kavernensystems

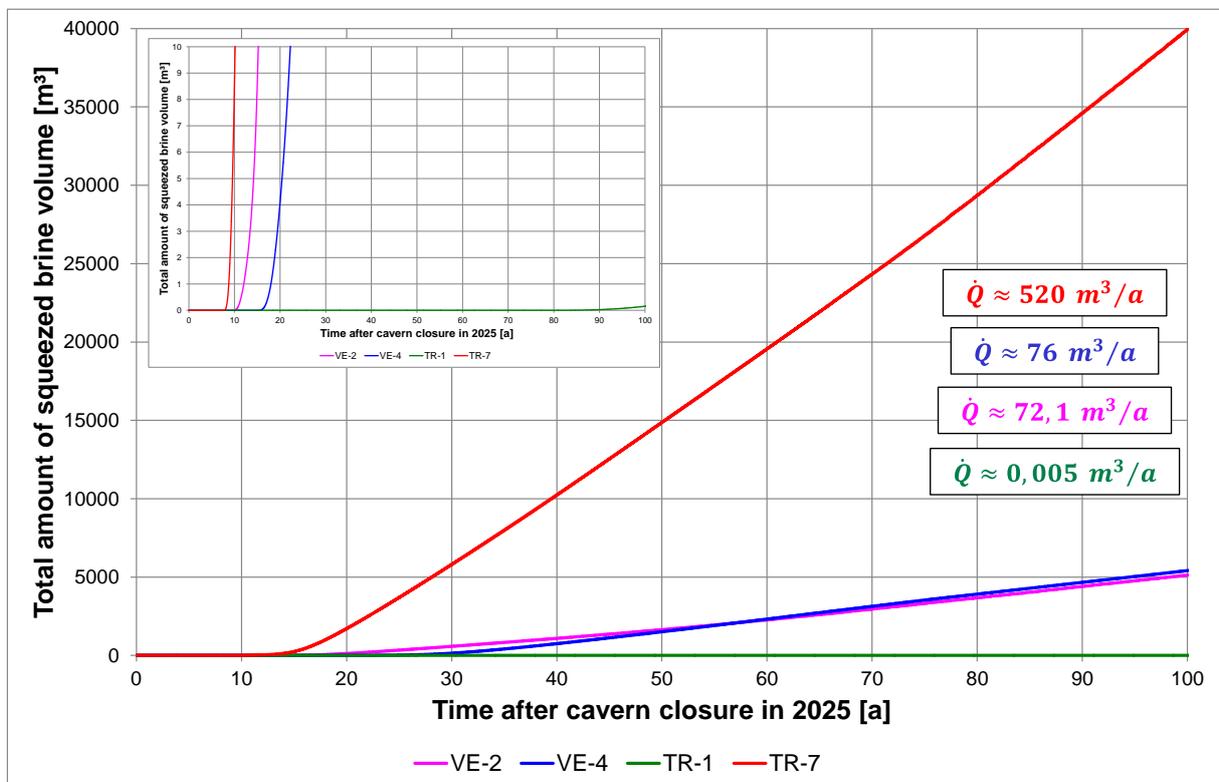


Bild 8.7 Zeitliche Entwicklung der Soleauspressvolumina aus dem Kavernensystem am Salzspiegel über den Kavernen VE-2, VE-4, TR-1 und TR-7 bis zum Zeitpunkt  $t = 100 \text{ a}$  nach Verschluss des Kavernensystems

---

presste Solevolumen unterhalb des im WEP-Bericht angegebenen ausgepressten Solevolumens von  $Q \approx 410.000 \text{ m}^3$  für diesen Zeitraum. Ursächlich für diesen deutlichen Unterschied in den Zahlenwerten für die ausgepressten Solevolumina sind nach Meinung der Autoren die folgenden drei Aspekte:

- In der Simulationsvariation A ist eine gegenüber dem WEP-Bericht unterschiedliche Annahme hinsichtlich des Modellierungsansatzes zum funktionalen Zusammenhang zwischen der durch den druckgetriebenen Infiltrationsprozess induzierten Sekundärpermeabilität in der Infiltrationszone und dem wirksamen Fluiddruck als Differenz aus Fluiddruck und minimaler Hauptspannung getroffen worden. Während in der Simulationsvariation A der Modellierungsansatz entsprechend *Wolters (2014)* verwendet worden ist, wird im WEP-Bericht [U1] ein Modellierungsansatz in Anlehnung an *SMRI (2002)* verwendet, allerdings im Gegensatz zu *SMRI (2002)* ohne Maximalwertbegrenzung der Sekundärpermeabilität, Bild 6.9 bzw. Bild 6.10.
- Im WEP-Bericht [U1] wird die Annahme getroffen, dass sich die Infiltrationszone oberhalb der Kavernen als umgekehrter Kegelstumpf ausbildet. Die Ergebnisse der am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal durchgeführten Analysen zeigen allerdings, dass die Infiltrationszone sich als nicht umgekehrter Kegelstumpf ausbildet, für die Simulationsvariation A exemplarisch dargestellt in Bild 8.8. Der Einfluss der unterschiedlichen Formen der Infiltrationszone auf das ausgepresste Solevolumen ist im Rahmen der durchgeführten Arbeiten nicht quantifiziert worden, da sich im Rahmen der rechnerischen Simulationen keine vorab definierte Form für die Infiltrationszone angeben lässt, sondern sich diese Form im Lauf der Simulation entsprechend der jeweiligen hydromechanischen Verhältnisse einstellt.
- Im WEP-Bericht wird die Annahme getroffen, dass die Größe der Sekundärpermeabilität zwar nicht zeitlich konstant ist, da sie vom zeitlich veränderlichen Fluiddruck abhängt, wohl aber räumlich konstant ist. Die Ergebnisse der am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal durchgeführten Analysen zeigen allerdings, dass sich im nahezu stationären Zustand zum Zeitpunkt  $t = 100 \text{ a}$  nach Verschluss des Kavernensystems in jeder Berechnungszone der Infiltrationszone die Sekundärpermeabilität so einstellt, dass die aus einer Kaverne in das hangende Steinsalzgebirge ausgepressten Solevolumina identisch sind mit den im Bereich des Salzspiegels in das nichtsalinare Deckgebirge ausgepressten Solevolumina. Demzufolge stellen sich im Bereich des Salzspiegels

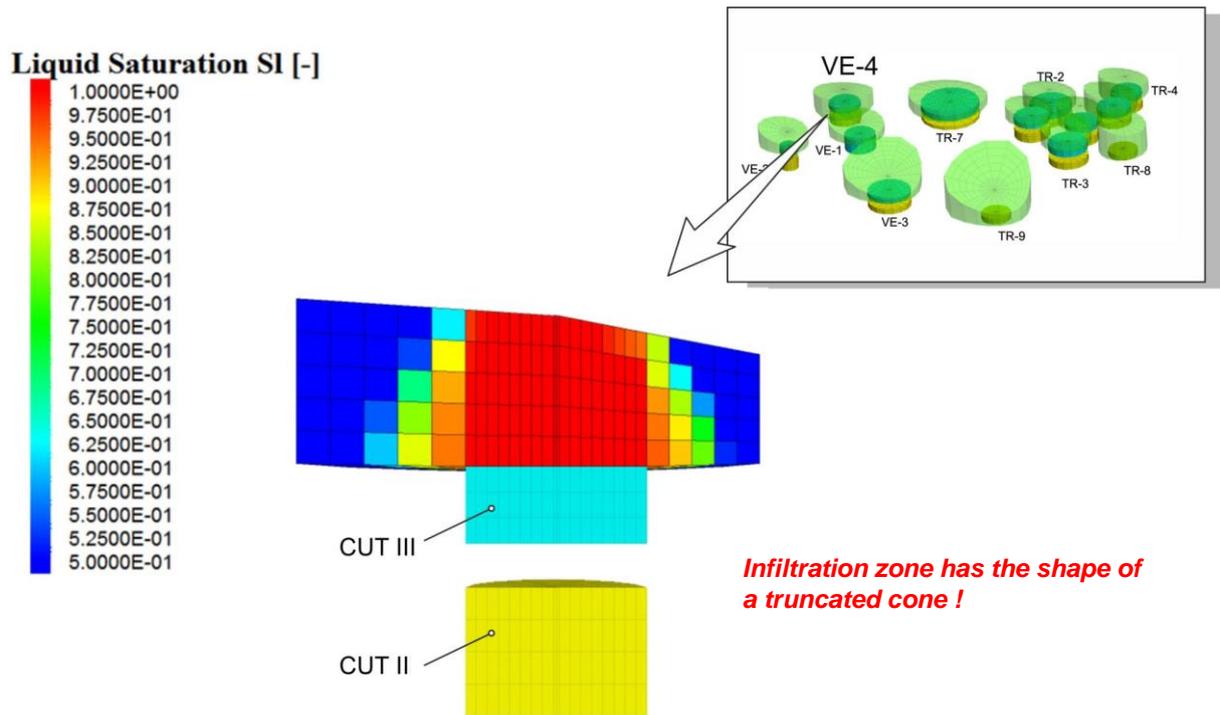


Bild 8.8 Vertikalschnitt durch die Infiltrationszone oberhalb von Cut III der Kaverne VE-4 mit Darstellung des Sättigungsgrades

deutlich niedrigere Sekundärpermeabilitäten ein als im Bereich des Kavernendachs, da die am Salzspiegel anliegenden hydraulischen Gradienten aufgrund des vergleichsweise geringen Porendrucks im Deckgebirge signifikant höher sind als im Bereich des Kavernendachs.

Bild 8.9 zeigt exemplarisch die Verteilung der Sekundärpermeabilität in einem Vertikalschnitt durch die Infiltrationszone oberhalb von Cut III der Kaverne VE-4. Es fällt auf, dass die Sekundärpermeabilität auch innerhalb einer Ebene von Berechnungszonen oberhalb der Kaverne nicht konstant ist. Eine Ursache dafür ist zurückzuführen auf die Diskretisierung des Berechnungsmodells, da die Berechnungszonen aufgrund des nicht horizontal verlaufenden Salzspiegels nicht alle eine gleiche Höhe aufweisen, resultierend in einer unterschiedlichen Teufenlage der jeweiligen Zonenschwerpunkte, deren Position bei der Berechnung der Sekundärpermeabilität in der Infiltrationszone zur Bestimmung der Minimalspannung herangezogen wird.

Der aus Bild 8.7 zu ersehende nahezu lineare Verlauf der Soleauspressvolumina setzt sich entsprechend Bild 8.10 im Rahmen einer über den Zeitpunkt  $t = 100 a$  nach Verschluss des Kavernensystems hinausgehenden Analyse des langfristigen Auspressverhaltens der Kavernen fort, wobei noch einmal darauf hinzuweisen ist, dass im Rahmen der Simulationsvaria-

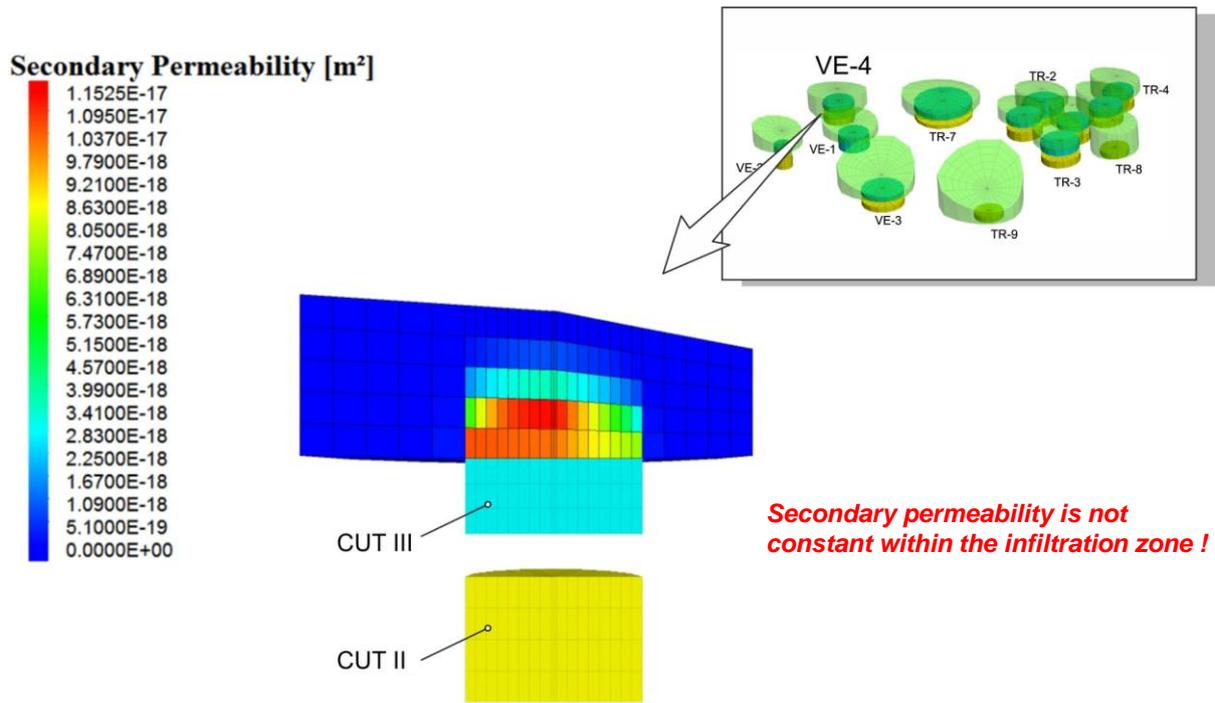


Bild 8.9 Vertikalschnitt durch die Infiltrationszone oberhalb von Cut III der Kaverne VE-4 mit Darstellung der Sekundärpermeabilität

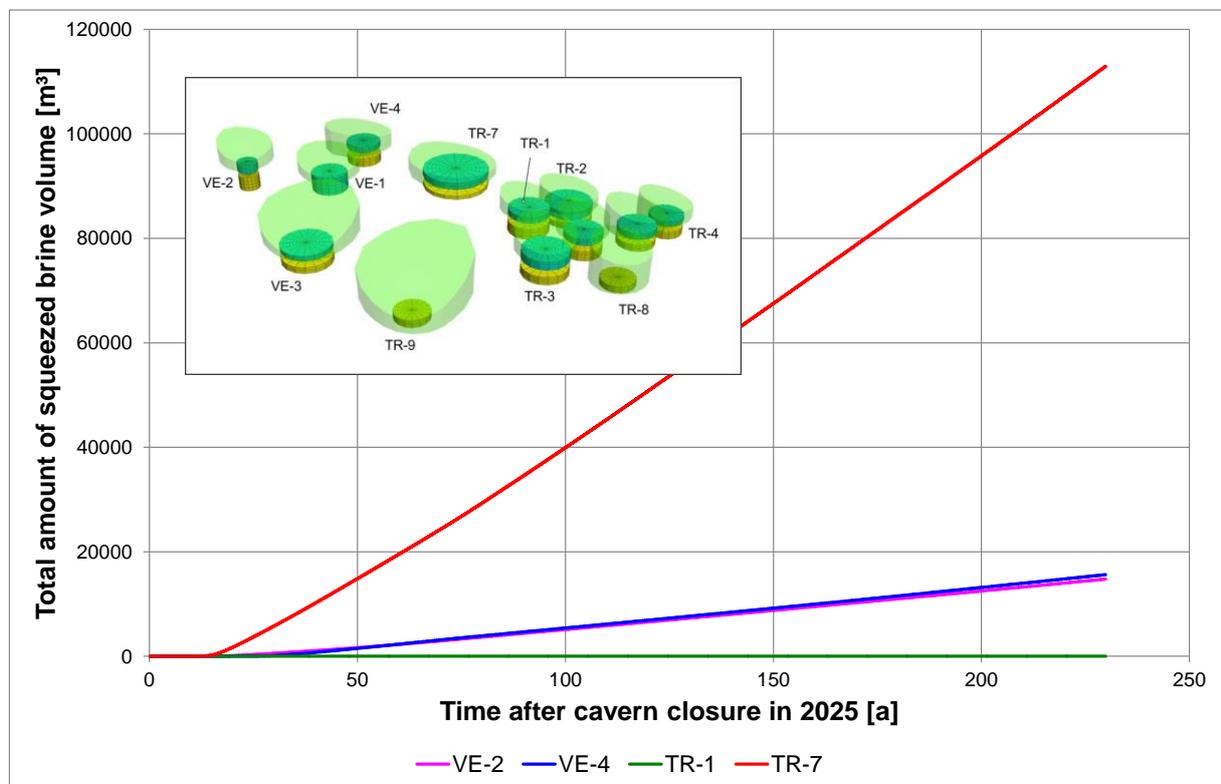


Bild 8.10 Zeitliche Entwicklung der Soleauspressvolumina aus dem Kavernensystem am Salzspiegel über den Kavernen VE-2, VE-4, TR-1 und TR-7 über den Zeitpunkt  $t = 100$  a nach Verschluss des Kavernensystems hinaus

tion A die Kavernenkonvergenz nur zu einer Erhöhung des Fluiddrucks im Kavernensystem führt, nicht aber zu einer Reduzierung der Kavernenvolumina führt.

## 8.2 Simulationsvariation B

Die Simulationsvariation B unterscheidet sich von der Simulationsvariation A dadurch, dass zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Modellierungsannahmen zum funktionalen Zusammenhang zwischen der durch den druckgetriebenen Infiltrationsprozess induzierten Sekundärpermeabilität in der Infiltrationszone und dem wirksamen Fluiddruck als Differenz aus Fluiddruck und minimaler Hauptspannung auf die ausgepressten Solevolumina in der Simulationsvariation nicht der Modellierungsansatz nach *Wolters (2014)* verwendet worden ist, sondern der im WEP-Bericht verwendete Modellierungsansatz.

Der Modellierungsansatz des WEP-Berichts [U1] ergibt entsprechend Bild 6.10 für wirksame Fluiddrücke zwischen  $\Delta p_{Fl} \approx 0,45 \text{ MPa}$  und  $\Delta p_{Fl} \approx 2,35 \text{ MPa}$  teilweise erheblich größere Sekundärpermeabilitäten als der Modellierungsansatz nach *Wolters (2014)*. Dementsprechend zeigt der Vergleich der Ergebnisse der Simulationsvariationen A und B, dass der druckgetriebene Infiltrationsprozess sowie der Soleauspressprozess in der Simulationsvariation B schneller ablaufen als in der Simulationsvariation A. Dieser Sachverhalt ist daran zu erkennen, dass für die Simulationsvariation B im Vergleich zur Simulationsvariation A

- der Sättigungsgrad im Bereich des Kavernendachs entsprechend Bild 8.11 zum Zeitpunkt  $t = 1 a$  nach Verschluss des Kavernensystems höhere Werte erreicht,
- der Sättigungsgrad sowohl im Bereich des Kavernendachs wie auch im Bereich des Salzspiegels entsprechend Bild 8.12 zum Zeitpunkt  $t = 10 a$  nach Verschluss des Kavernensystems höhere Werte erreicht,
- der Sättigungsgrad sowohl im Bereich des Kavernendachs wie auch im Bereich des Salzspiegels entsprechend Bild 8.13 zum Zeitpunkt  $t = 100 a$  nach Verschluss des Kavernensystems höhere Werte erreicht,
- die druckgetriebene Fluidinfiltration in das Hangende von Cut III der Kavernen VE-2, VE-4 und TR-7 entsprechend Bild 8.14 früher einsetzt, nämlich etwa zu den Zeitpunkten  $t \approx 4 a$ ,  $t \approx 5 a$  bzw.  $t \approx 7 a$  nach Verschluss des Kavernensystems für die Kavernen TR-7, VE-2 bzw. VE-4, und schließlich

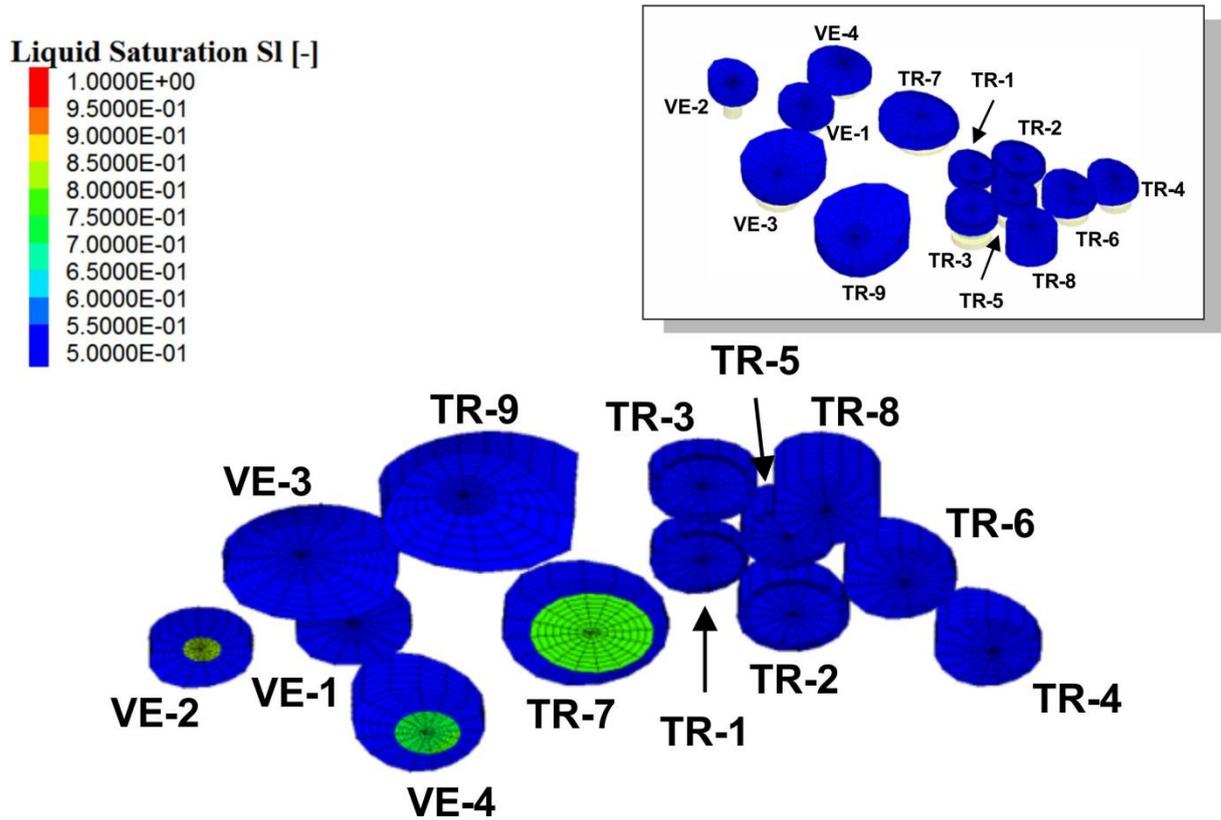


Bild 8.11 Darstellung der infiltrierten Gebirgsbereiche im Hangenden der Kavernen zum Zeitpunkt  $t = 1a$  nach Verschluss des Kavernensystems

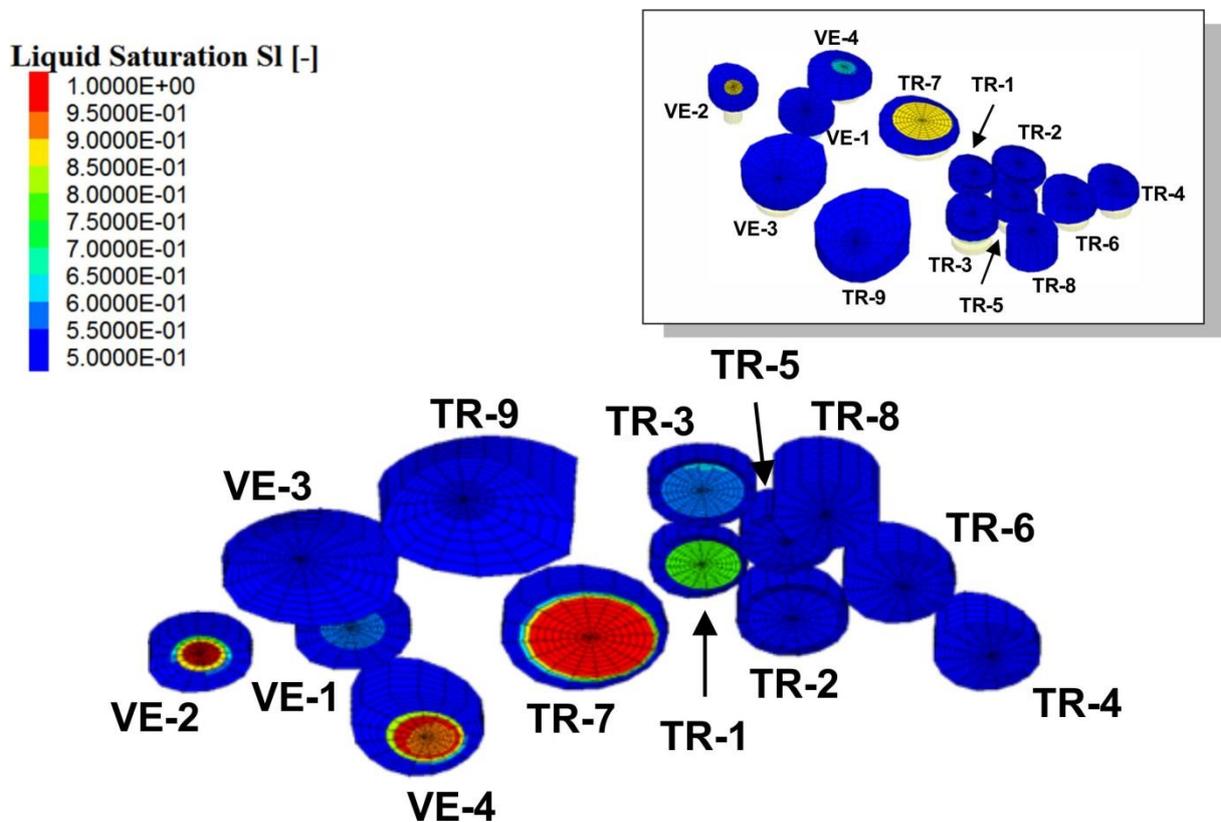


Bild 8.12 Darstellung der infiltrierten Gebirgsbereiche im Hangenden der Kavernen zum Zeitpunkt  $t = 10a$  nach Verschluss des Kavernensystems

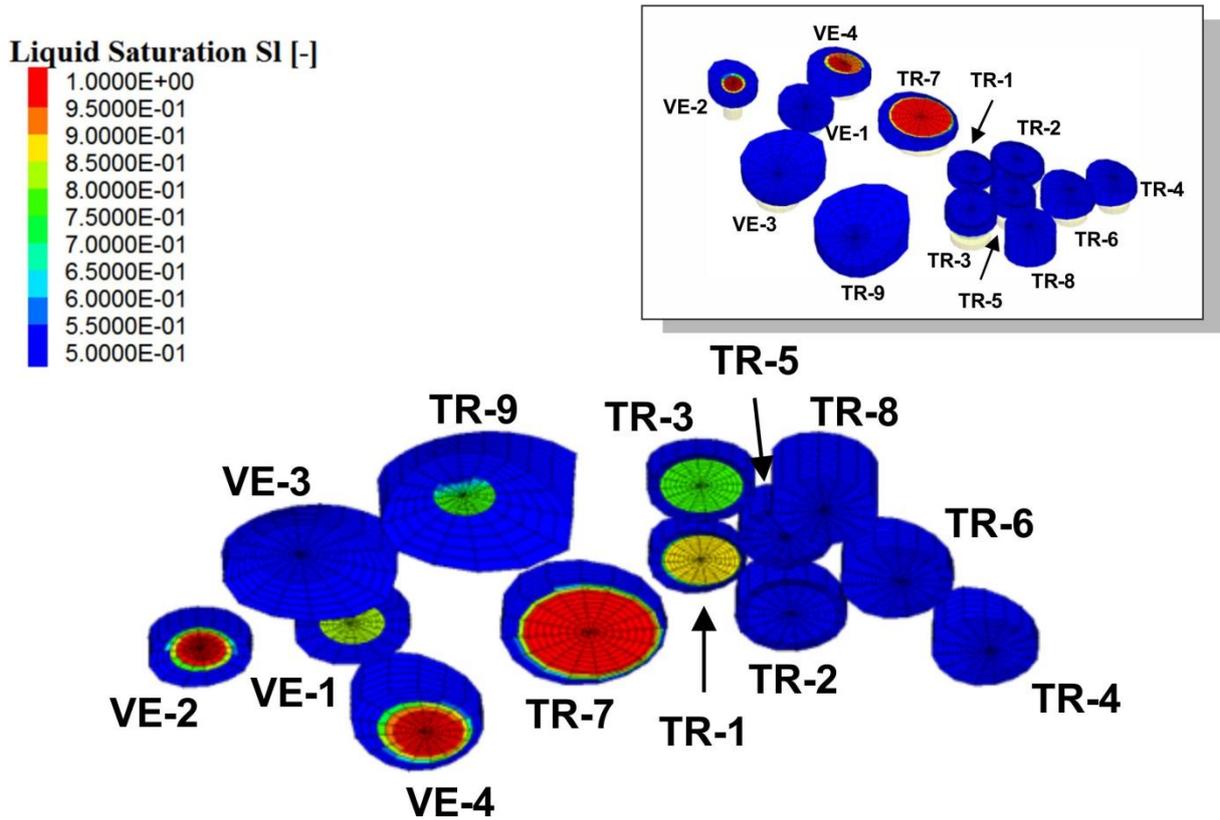


Bild 8.13 Darstellung der infiltrierten Gebirgsbereiche im Hangenden der Kavernen zum Zeitpunkt  $t = 100$  a nach Verschluss des Kavernensystems

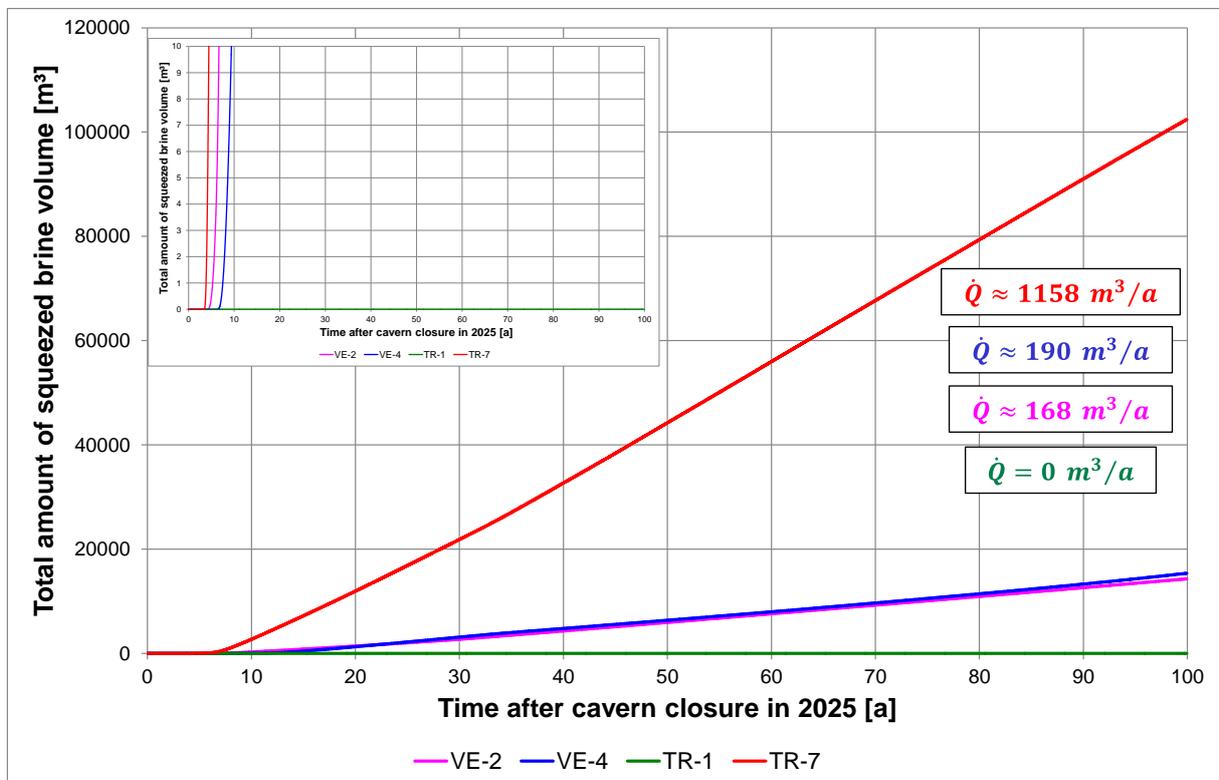


Bild 8.14 Zeitliche Entwicklung der Soleauspressvolumina aus dem Kavernensystem am Salzspiegel über den Kavernen VE-2, VE-4, TR-1 und TR-7 bis zum Zeitpunkt  $t = 100$  a nach Verschluss des Kavernensystems

- die ausgepressten Solevolumina sowie die Auspressraten aus den Kavernen VE-2, VE-4 und TR-7 entsprechend Bild 8.14 größer sind.

Die Soleauspressraten stellen sich in den Kavernen VE-2, VE-4 und TR-7 mit  $\dot{Q} \approx 168 \text{ m}^3/a$ ,  $\dot{Q} \approx 190 \text{ m}^3/a$  bzw.  $\dot{Q} \approx 1.158 \text{ m}^3/a$  ein. Aufgrund der höheren Auspressraten aus diesen Kavernen stellt sich im nahezu stationären Zustand in der Simulationsvariation B im Kavernensystem ein etwas geringeres Fluidruckniveau ein als in der Simulationsvariation A, so dass die Infiltrationsfront im Hangenden von Cut III der Kaverne TR-1 den Salzspiegel bis zum Zeitpunkt  $t = 100 a$  nach Verschluss des Kavernensystems nicht erreicht.

Kumulativ ergibt sich in der Simulationsvariation B entsprechend der dargestellten Soleauspressvolumina bis zum Zeitpunkt  $t = 100 a$  nach Verschluss des Kavernensystems ein insgesamt ausgepresstes Solevolumen von etwa  $Q \approx 135.000 \text{ m}^3$ . Damit liegt das berechnete ausgepresste Solevolumen auch für die Simulationsvariation B noch deutlich unterhalb des im WEP-Bericht angegebenen ausgepressten Solevolumens von  $Q \approx 410.000 \text{ m}^3$  für diesen Zeitraum.

### 8.3 Simulationsvariation C

Die Simulationsvariation C unterscheidet sich von der Simulationsvariation A dadurch, dass der Kavernenkonvergenzprozess nicht nur zu einem konvergenzbedingten Fluidruckaufbau im Kavernensystem führt, sondern auch zu einer allmählichen konvergenzbedingten Reduzierung der Kavernenvolumina.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Simulationsvariation C mit den Ergebnissen der Simulationsvariation A zeigt, dass die Berücksichtigung der konvergenzbedingten Reduzierung der Kavernenvolumina bis zum Zeitpunkt  $t = 100 a$  nach Verschluss des Kavernensystems nur einen sehr geringen Einfluss auf das berechnete langfristige Trag- und Auspressverhalten des Kavernensystems hat, da das Kavernensystem als Gesamtsystem nur relativ langsam konvergiert. Einzig die am tiefsten liegende Kaverne, Cut II der Kaverne TR-4, zeigt zu diesem Zeitpunkt bereits eine deutliche konvergenzbedingte Reduktion ihres Kavernenvolumens, da die Konvergenz von Cut II der Kaverne TR-4 zu diesem Zeitpunkt bereits etwa 50 % beträgt.

Da sich mit Blick auf das Auspressverhalten des gesamten Kavernensystems der Einfluss der Berücksichtigung der konvergenzbedingten Reduzierung der Kavernenvolumina bis zum Zeitpunkt  $t = 100 a$  nach Verschluss des Kavernensystems nur gering bemerkbar macht, ist

die Simulation noch weiter fortgeführt worden. Dabei hat sich entsprechend Bild 8.15 gezeigt, dass die Intensität des Soleauspressprozesses mit zunehmender Zeit abnimmt, da insbesondere Cut II der Kaverne TR-4 nach einigen Jahrhunderten annähernd Totalkonvergenz erreicht und damit nicht mehr aufgrund seiner Teufenlage als treibende Kraft für den Soleauspressprozess zur Verfügung steht. Die Soleauspressraten am Salzspiegel reduzieren sich dadurch bis zum Zeitpunkt  $t \approx 730 a$  nach Verschluss des Kavernensystems auf Zahlenwerte von  $\dot{Q} \approx 44 m^3/a$ ,  $\dot{Q} \approx 31 m^3/a$  bzw.  $\dot{Q} \approx 161 m^3/a$  für die Kavernen VE-2, VE-4 bzw. TR-7. Einzig für die Kaverne TR-1 ist im Vergleich zum Zeitpunkt  $t = 100 a$  nach Verschluss des Kavernensystems ein Anstieg der Soleauspressrate auf  $\dot{Q} \approx 3 m^3/a$  zu verzeichnen, was darauf zurückzuführen ist, dass bei dieser Kaverne der Soleauspressprozess erst zum Zeitpunkt  $t \approx 90 a$  nach Verschluss des Kavernensystems eingesetzt hat, wobei er zu Beginn noch durch die in allen Simulationsvariationen im Hangenden der Kavernen angenommenen primär vorhandenen gasförmigen Fluid Inclusions verzögert wird und sich mit dem allmählichen Ausstrag dieser gasförmigen Fluid Inclusions dann intensiviert.

Insgesamt ist entsprechend Bild 8.15 bis zum Ende der Simulationsvariation C zum Zeitpunkt

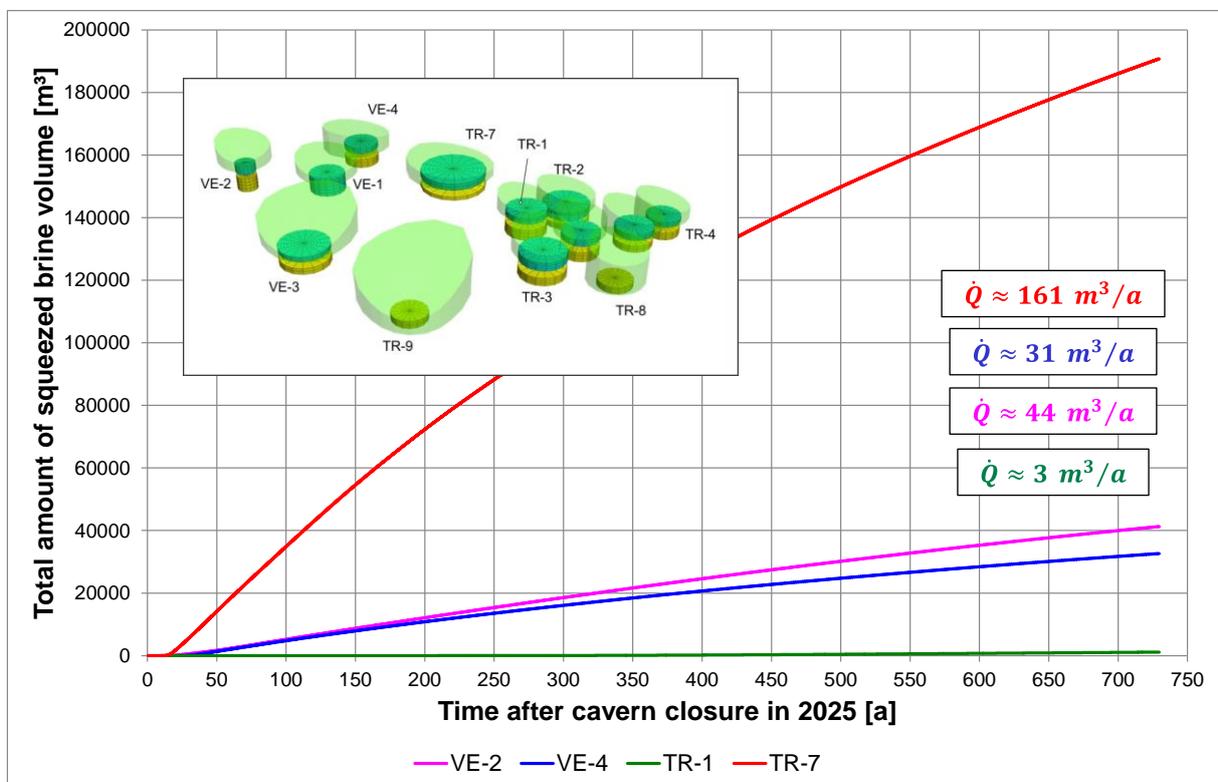


Bild 8.15 Zeitliche Entwicklung der Soleauspressvolumina aus dem Kavernensystem am Salzspiegel über den Kavernen VE-2, VE-4, TR-1 und TR-7 über den Zeitpunkt  $t = 100 a$  nach Verschluss des Kavernensystems hinaus

$t = 730 a$  nach Verschluss des Kavernensystems ein ausgepresstes Solevolumen von  $Q \approx 260.000 m^3$  berechnet worden.

#### 8.4 Simulationsvariation D

Die Simulationsvariation D unterscheidet sich von der Simulationsvariation A dadurch, dass in der Simulationsvariation D eine stärkere hydraulische Verbindung der einzelnen Kavernen entsprechend dem in Bild 6.6 dargestellten Berechnungsmodell II angesetzt wird. In Berechnungsmodell II wird angenommen, dass alle Kavernen des Kavernensystems miteinander verbunden sind mit Ausnahme der Kaverne VE-1, die über keinen Cut II in der Bischoffit-Schicht verfügt.

Im Rahmen der rechnerischen Simulation zum langfristigen Trag- und Auspressverhalten des Kavernensystems mit Berechnungsmodell II hat sich gezeigt, dass die numerische Stabilität bei Verwendung dieses Berechnungsmodells signifikant abnimmt. Ursache dafür ist, dass sich durch die nahezu vollständige hydraulische Vernetzung der Kavernen des Kavernensystems der Abstand zwischen dem tiefstliegenden und dem höchstliegenden Punkt des Kavernensystems im Vergleich zu den Simulationsvariationen A, B und C vergrößert hat, wodurch die Intensität des druckgetriebenen Infiltrationsprozesses zunimmt.

Bei einer Intensivierung des druckgetriebenen Infiltrationsprozesses ist es aus numerischer Sicht deutlich schwieriger, den Gleichgewichtsdruck zwischen konvergenzbedingtem Fluidruckaufbau und infiltrationsbedingtem Fluidruckabbau zu erreichen. Um dieses numerische Problem zu lösen, musste die Rechengenauigkeit in dieser Simulationsvariation D gegenüber den Simulationsvariationen A, B und C erheblich gesteigert werden, was zwangsläufig zu einer Reduzierung der einzelnen numerischen Zeitinkremente führt und somit dann auch zu einer deutlichen Erhöhung des Berechnungsaufwandes. Aus diesem Grund konnte im Rahmen der Projektlaufzeit die Simulationsvariation D nicht bis zum Zeitpunkt  $t = 100 a$  nach Verschluss des Kavernensystems durchgeführt werden, sondern hat nur den Zeitpunkt  $t = 40 a$  nach Verschluss des Kavernensystems erreicht. Da zum Ende der Simulation allerdings nahezu stationäre Verhältnisse vorliegen, ist eine Extrapolation der Simulationsergebnisse auf den Zeitpunkt  $t = 100 a$  nach Verschluss des Kavernensystems nach Ansicht der Autoren möglich.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Simulationsvariation D mit den Ergebnissen der Simulationsvariation A zeigt hinsichtlich der allmählichen Ausbildung einer Infiltrationszone im

Hangenden der Kavernen zunächst einen ähnlichen Beginn des druckgetriebenen Infiltrationsprozesses. Wie aus Bild 8.16 für den Zeitpunkt  $t=1a$  nach Verschluss des Kavernensystems zu ersehen ist, infiltriert zu diesem Zeitpunkt auch in der Simulationsvariation D aus Cut III der Kavernen VE-2, VE-4, TR-1 und TR-7 Sole in das darüber liegende Hangende, allerdings aus der Kaverne VE-2 mit etwas höherer Intensität als in der Simulationsvariation A, zu erkennen daran, dass der Sättigungsgrad im Hangenden der Kaverne VE-2 in der Simulationsvariation D schneller ansteigt als in der Simulationsvariation A.

Aus Bild 8.17 ist für den Zeitpunkt  $t=10a$  nach Verschluss des Kavernensystems zu ersehen, dass sich der Trend einer intensiveren Soleinfiltration aus Cut III der Kaverne VE-2 in das darüber liegende Hangende im Verlauf der weiteren Simulation fortsetzt, während für die anderen Kavernen der Soleinfiltrationsprozess in der Simulationsvariation D weniger intensiv abläuft als in der Simulationsvariation A. Ursache dafür ist, dass sich der Gleichgewichtsdruck zwischen konvergenzbedingtem Fluidruckaufbau und infiltrationsbedingtem Fluidruckabbau aufgrund der intensiveren Soleinfiltration aus der Kaverne VE-2 in der Simulationsvariation D etwas niedriger einstellt als in der Simulationsvariation A.

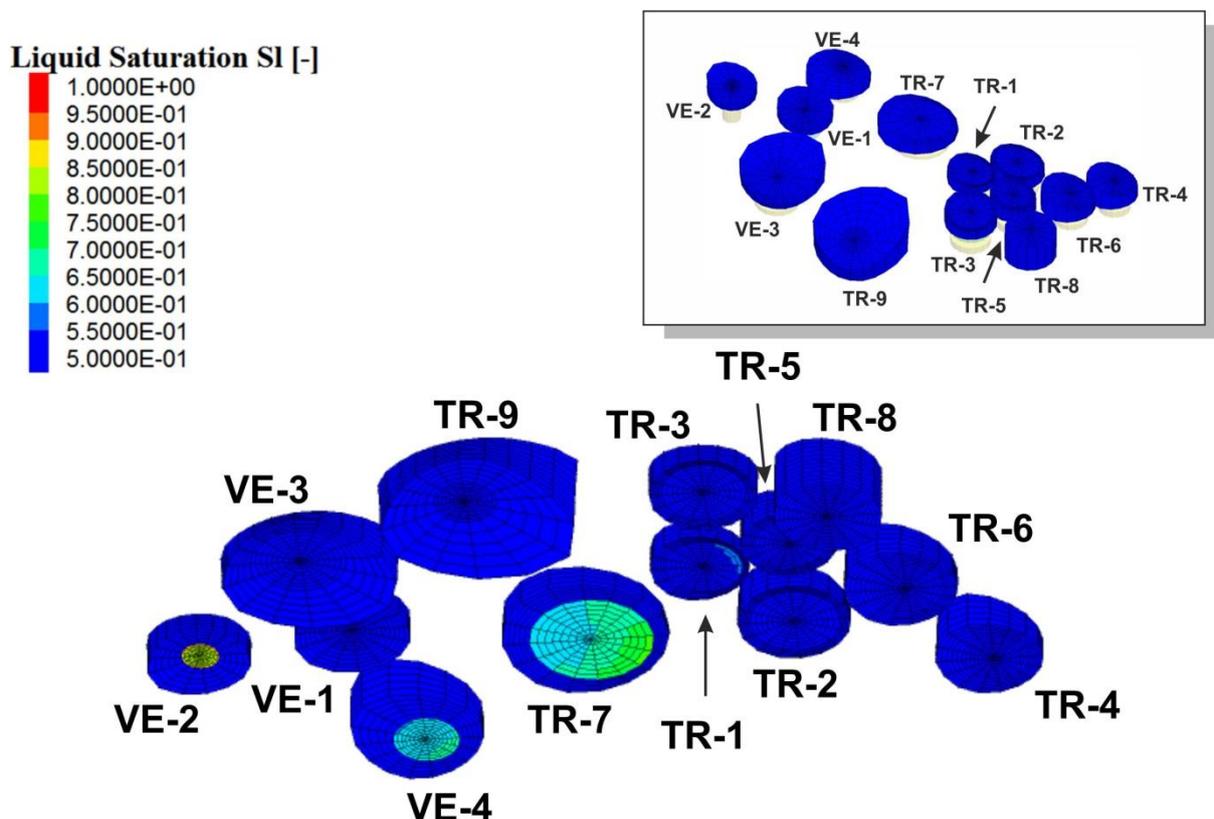


Bild 8.16 Darstellung der infiltrierten Gebirgsbereiche im Hangenden der Kavernen zum Zeitpunkt  $t=1a$  nach Verschluss des Kavernensystems

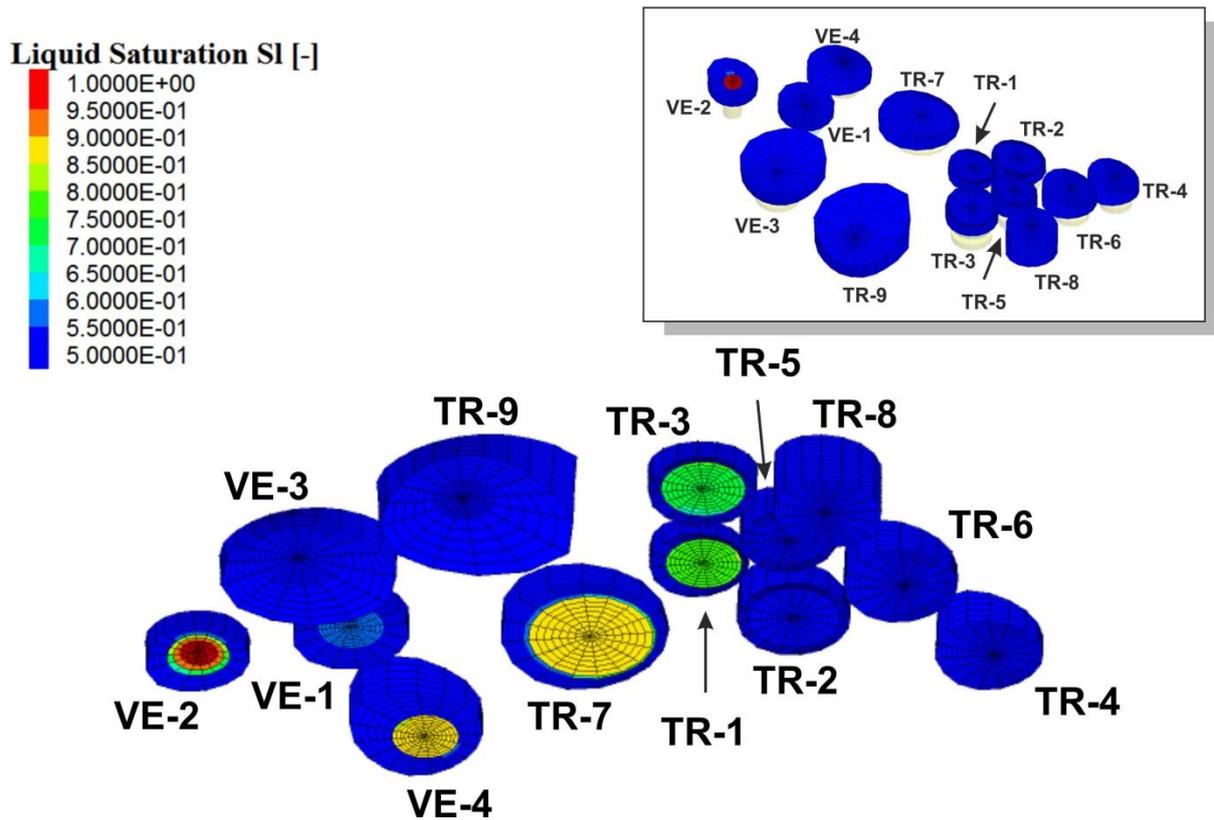


Bild 8.17 Darstellung der infiltrierten Gebirgsbereiche im Hangenden der Kavernen zum Zeitpunkt  $t = 10 a$  nach Verschluss des Kavernensystems

Zudem ist in Bild 8.17 zu erkennen, dass zum Zeitpunkt  $t = 10 a$  nach Verschluss des Kavernensystems bereits eine signifikante Soleauspressung am Salzspiegel über der Kaverne VE-2 erfolgt, da der Sättigungsgrad dort schon  $S_l = 100 \%$  erreicht hat.

Im weiteren Verlauf der Simulation setzt sich die Soleauspressung aus der Kaverne VE-2 kontinuierlich fort, während die Infiltrationsfronten oberhalb der anderen Kavernen den Salzspiegel bis zum Ende der Simulation zum Zeitpunkt  $t = 40 a$  nach Verschluss des Kavernensystems entsprechend Bild 8.18 nicht erreichen. Allerdings sind die Sättigungsgrade im Hangenden einiger anderer Kavernen im Bereich der jeweiligen Kavernendächer zu diesem Zeitpunkt gegenüber dem Zeitpunkt  $t = 10 a$  nach Verschluss des Kavernensystems leicht angestiegen. Es ist daher nicht auszuschließen, dass dort die Infiltrationsfront möglicherweise auch zu einem späteren Zeitpunkt den Salzspiegel erreichen wird. Diese hydraulischen Durchschläge der Infiltrationsfronten am Salzspiegel sind allerdings aufgrund des niedrigeren Gleichgewichtsdrucks in der Simulationsvariation D deutlich später zu erwarten als in der Simulationsvariation A, aufgrund der exponentiellen Abhängigkeiten der Sekundärpermeabilität in der Infiltrationszone vom wirksamen Fluiddruck möglicherweise sogar erst Jahrhunderte oder sogar Jahrtausende später.

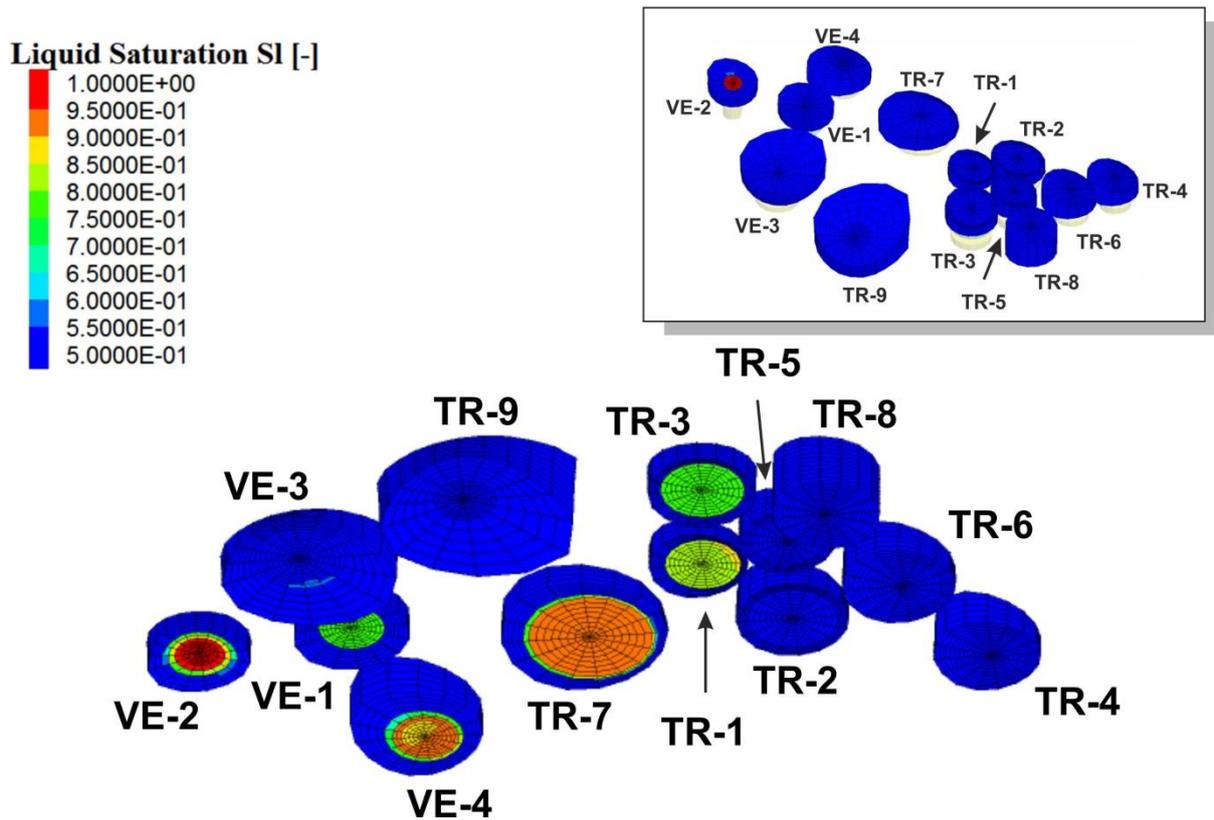


Bild 8.18 Darstellung der infiltrierten Gebirgsbereiche im Hangenden der Kavernen zum Zeitpunkt  $t = 40 a$  nach Verschluss des Kavernensystems

Auch aus der zeitlichen Darstellung der Soleauspressvolumina in Bild 8.19 ist zu erkennen, dass bis zum Zeitpunkt  $t = 40 a$  nach Verschluss des Kavernensystems Sole ausschließlich am Salzspiegel oberhalb der Kaverne VE-2 ausgepresst wird, und zwar mit einer Rate von etwa  $\dot{Q} \approx 1.436 m^3/a$ . Eine Extrapolation auf den Zeitpunkt  $t = 100 a$  nach Verschluss des Kavernensystems lässt für diesen Zeitpunkt ein insgesamt ausgepresstes Solevolumen von  $Q \approx 140.000 m^3$  erwarten. Somit liegt auch in der Simulationsvariation D das für diesen Zeitpunkt berechnete ausgepresste Solevolumen deutlich unterhalb des im WEP-Bericht [U1] angegebenen Zahlenwertes von  $Q \approx 410.000 m^3$ .

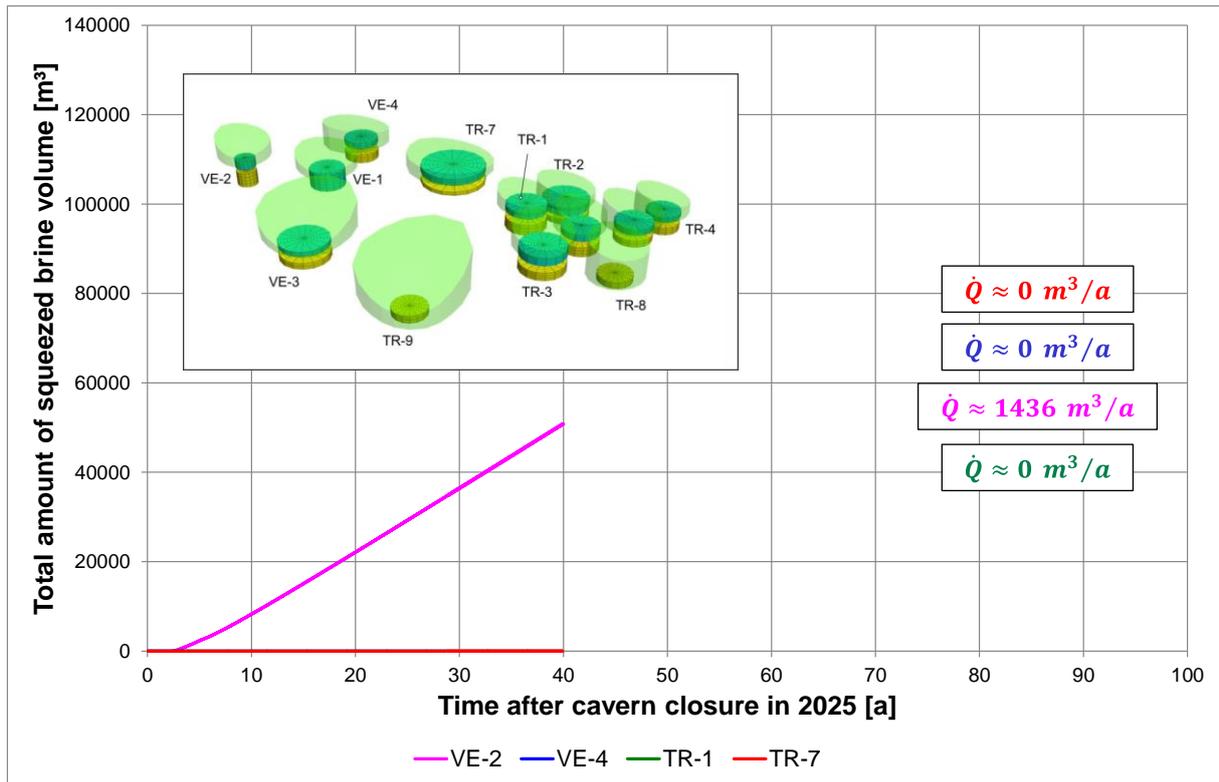


Bild 8.19 Zeitliche Entwicklung der Soleauspressvolumina aus dem Kavernensystem am Salzspiegel über den Kavernen VE-2, VE-4, TR-1 und TR-7 bis zum Zeitpunkt  $t = 40 \text{ a}$  nach Verschluss des Kavernensystems

## 9 Zusammenfassung / Conclusions

Auf Veranlassung der Staatstoezicht op de Mijnen ist der Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal mit einem Review zu dem Bericht

**Abandonment study Nedmag caverns – Cavern squeeze modeling and geophysical analysis of brine permeation and containment, WEP (2015)**

beauftragt worden (WEP-Bericht).

Zielsetzung des Reviews war es, die im WEP-Bericht ermittelten Ausflussraten des verschlossenen Kavernensystems mit einem unabhängigen Ansatz zu überprüfen. Dabei sind die standortspezifischen geotektonisch, geomechanisch und geometrisch-konfigurativ relevanten Rahmenbedingungen des Kavernenfeldes soweit wie möglich übernommen worden.

Im Rahmen der am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik durchgeführten Analysen zum langfristigen Auspressverhalten des hier betrachteten Kavernensystems der Nedmag-Kavernenanlage sind mit dem am Lehrstuhl entwickelten FTK-Simulator zu Beginn diverse numerische Simulationen zur Erarbeitung eines für die Aufgabenstellung geeigneten und funktionstüchtigen Simulationsmodells durchgeführt worden. Dabei hat sich gezeigt, dass die numerische Simulation des hydromechanischen Kavernenanlagenverhaltens über einen Betrachtungszeitraum von mindestens 100 Jahren bei einem derart komplex hydraulisch verbundenen Kavernensystem derzeit nur mit Hilfe eines abstrahierenden Funktionalmodells zur Berücksichtigung des zwischen den Kavernen stattfindenden Fluiddruckausgleichs erfolgen kann. In diesem Zusammenhang war insbesondere auch zu berücksichtigen, dass sowohl konfigurativ wie auch geohydraulisch Datendefizite bestehen (→ konservative Approximation).

Nach Implementierung eines geeigneten Funktionalmodells sind insgesamt vier Simulationsvariationen durchgeführt worden, wobei in allen Fällen die so genannte „Bleed Off“-Phase, die laut WEP-Bericht dem endgültigen Verschluss des Kavernensystems vorgeschaltet werden kann, nicht berücksichtigt worden ist.

Die geometrischen Informationen zur Konfiguration des Kavernensystems sowie des umgebenden Gebirges sind dem WEP-Bericht entnommen bzw. beim Autor des WEP-Berichts erfragt worden, ebenso wie die Informationen zum Konvergenzverhalten der einzelnen Kavernen sowie zu weiteren Anfangs- und Randbedingungen, [U1], [U3].

Im Gegensatz zum WEP-Bericht ist im Rahmen der hier durchgeführten Arbeiten die Annahme getroffen worden, dass der Kaverneninnendruck zum Zeitpunkt des Verschlusses des Kavernensystems dem Betriebsdruck während des Solbetriebes entspricht. Es hat sich dann

gezeigt, dass der Fluiddruck im Kavernensystem unmittelbar nach dem Verschluss des Kavernensystems sehr schnell ansteigt und im Bereich des Kavernendachs einiger weniger Kavernen die dort lokal vorhandene minimale Hauptspannung schon innerhalb weniger Monate überschreitet, so dass ein druckgetriebener Infiltrationsprozess initiiert wird. Schon nach wenigen Jahren erreicht der Fluiddruck im Kavernensystem einen Gleichgewichtsdruck, bei dem konvergenzbedingter Fluiddruckaufbau und infiltrationsbedingter Fluiddruckabbau nahezu identisch sind.

Die Ergebnisse der vier durchgeführten Simulationen bestätigen zunächst die Ergebnisse des WEP-Berichts hinsichtlich der räumlichen Positionen, an denen Sole am Salzspiegel in das Deckgebirge ausgepresst wird, nämlich im Wesentlichen oberhalb der Kavernen VE-2, VE-4 und TR-7, in geringem Maße auch oberhalb der Kaverne TR-1. Weiterhin zeigt sich erwartungsgemäß, dass die berechneten Soleauspressraten oberhalb dieser Kavernen stark von den hydraulischen Verbindungen innerhalb des Kavernensystems abhängen. Während im Fall einer Kavernenverbindung entsprechend Berechnungsmodell I vornehmlich Sole oberhalb der Kaverne TR-7 ausgepresst wird, erfolgt eine Soleauspressung bei einer Kavernenverbindung entsprechend Berechnungsmodell II nahezu ausschließlich oberhalb der Kaverne VE-2.

In allen durchgeführten Simulationsvariationen stellt sich in Summe für das gesamte Kavernensystem eine deutlich geringere Soleauspressrate ein als im WEP-Bericht angegeben. Als Ursache für diesen Unterschied vermuten die Autoren vornehmlich die im WEP-Bericht angenommene zwar zeitlich variable, aber räumlich konstante Sekundärpermeabilität in der Infiltrationszone. Diese konservativ vereinfachte Annahme ist zwar für die analytische Lösung der Aufgabenstellung erforderlich, bestätigt sich im Rahmen der numerischen Simulation aber nicht. Vielmehr zeigt die numerische Simulation, dass es in der Infiltrationszone Bereiche gibt, in denen sich beanspruchungsbezogen eine deutlich niedrigere Sekundärpermeabilität einstellt.

***Zusammenfassend ist aus Sicht des Reviewers festzustellen, dass auf der Grundlage der getroffenen Annahmen und Voraussetzungen die im WEP-Bericht angegebenen Soleauspressraten und -volumina für die weitere Auswirkungsanalyse als konservativ abdeckend einzuschätzen sind.***

The Chair in Waste Disposal and Geomechanics of TU Clausthal has been commissioned by Staatstoezicht op de Mijnen to review the report

**Abandonment study Nedmag caverns – Cavern squeeze modeling and geophysical analysis of brine permeation and containment, WEP (2015).**

The objective of the review was to check the outflow rates of the closed cavern system, as documented in the WEP-report, with an independent approach. Within the review process, the site-specific geotectonic, geomechanical and geometrically configurationally relevant boundary conditions of the cavern field have been adopted as far as possible.

Within a first step of the analysis process performed by the Chair in Waste Disposal and Geomechanics to investigate the squeezing behaviour of the Nedmag cavern system, various numerical simulations have been carried out using the simulation tool FTK developed at the Chair in Waste Disposal and Geomechanics. These numerical simulations were performed using different modelling approaches to identify a numerical model suitable for the given task. It has been shown that the numerical simulation of the hydromechanical cavern system behaviour for an observation period of at least 100 years regarding such a complexly hydraulically connected cavern system can currently only be performed using an abstracting functional model. This model takes into account the fluid pressure equalisation taking place among the connected caverns. In this context, it is also important to mention that data deficits exist both in terms of configuration and geohydraulics (→ conservative approximation).

After the implementation of a suitable functional model, four simulation variations have been performed. In all cases, the so-called “bleed-off” phase, which according to the WEP-report may be performed before the final closure of the cavern system, has not been considered.

The information concerning geometry of the cavern system as well as of the surrounding rock mass have been taken from the WEP-report or have been requested by the reviewers from the author of the WEP-report, and so have been the information concerning the convergence behavior of the individual caverns as well as other initial and boundary conditions, [U1], [U3].

In contrast to the WEP-report, it has been assumed within the framework of the analysis performed by the reviewers that the cavern fluid pressure within the cavern system at cavern closure is equal to the cavern fluid pressure during the operational phase. It has then been shown that the fluid pressure within the cavern system increases very rapidly immediately after the closure of the cavern system, exceeding minimum principal stress at some of the cavern roofs only a few months after cavern system closure so that a pressure-driven infiltration process gets initiated. After only a few years, the fluid pressure in the cavern system reaches equi-

librium pressure, so that convergence-induced fluid pressure increasing rates and infiltration-induced fluid pressure decreasing rates are almost identical.

The numerical results obtained by the four simulations performed by the reviewers confirm the results of the WEP-report with regard to the spatial positions at which brine is squeezed out at the salt top into the overburden, namely essentially above the caverns VE-2, VE-4, and TR-7, small amounts also above the cavern TR-1. Furthermore, it is expected that the calculated brine squeezing rates above these caverns are strongly dependent on the hydraulic connections within the cavern system. In the case of a connected cavern system according to model I brine is mainly squeezed out from cavern TR-7, while in the case of a connected cavern system according to model II brine is almost exclusively squeezed out from cavern VE-2.

In all of the simulations performed, the total squeeze rate from the cavern system is significantly lower than reported in the WEP-report. In the reviewers' opinion, this difference is mainly caused by the secondary permeability within the infiltration zone, which is assumed by WEP to be at least variable in time, but constant in space. This conservatively simplified assumption is necessary for WEPs analytical solution approach, but is not confirmed by the reviewers' numerical simulations. Rather, the numerical simulations show that there are areas within the infiltration zone with a significantly lower secondary permeability than assumed in the WEP-report.

***In conclusion, it should be noted that the brine squeezing rates as well as the total brine amount squeezed out from the cavern system given within the WEP-report using the documented assumptions can be regarded as conservative for a further analysis.***