

Abschlussbericht

**Untersuchung der konvergenzinduzierten zeitlichen und
räumlichen Soleinfiltration aus der Kaverne BAS-3 in das
anstehende Steinsalzgebirge**

Dezember 2010



Abschlussbericht

**Untersuchung der konvergenzinduzierten zeitlichen und
räumlichen Soleinfiltration aus der Kaverne BAS-3 in das
anstehende Steinsalzgebirge**

Projektleiter:

X

Sachbearbeiter:

Clausthal, im Dezember 2010

.....

.....

.....

.....



Zusammenfassung der Projektergebnisse

Im Rahmen der Stilllegungsplanung für die Kaverne BAS-3 der Firma FRISIA Zout sollte durch den Auftragnehmer unter Verwendung der am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal entwickelten Simulationssoftware MISES3-INFIL die konvergenzinduzierte zeitliche und räumliche Soleinfiltration aus der Kaverne BAS-3 in das anstehende Steinsalzgebirge untersucht werden.

Da keine laborativen Untersuchungen zur Charakterisierung der lokationsbezogenen Infiltrationseigenschaften des Steinsalzgebirges in der Umgebung der Kaverne BAS-3 zur Verfügung standen, diese Infiltrationseigenschaften jedoch auch nicht im Rahmen der Projektlaufzeit laborativ ermittelt werden konnten, musste eine Einschätzung der Infiltrationseigenschaften erfolgen. Hierzu ist zusätzlich eine retrospektive Analyse eines in der Kaverne BAS-2 durchgeführten Druckaufbauversuchs vorgenommen worden. Die im Rahmen dieses Druckaufbauversuchs erhaltenen Messwerte konnten durch die retrospektive Analyse nach umfangreichen Sensitivitätsanalysen unter Einbeziehung der thermisch bedingten Einflüsse auf den Druckaufbau in der Kaverne mit einer guten Übereinstimmung nachvollzogen und die erforderlichen Infiltrationskennwerte eingeschätzt werden.

Mit Hilfe der eingeschätzten Infiltrationseigenschaften ist dann eine Prognoserechnung zur zeitlichen und räumlichen Soleinfiltration aus der Kaverne BAS-3 in das anstehende Steinsalzgebirge durchgeführt worden. Dabei hat sich gezeigt, dass sich die Infiltrationsfront in den ersten Jahrzehnten nach dem Kavernenverschluss vornehmlich oberhalb, aber auch seitlich oberhalb der Kaverne relativ schnell ausbreitet und nach ca. 50 Jahren eine Teufe von ca. -2325 m und damit eine Ausdehnung vom Kavernendach aus gesehen von 100 m erreicht. Das allmähliche Abklingen der Temperatúrausgleichsprozesse und die zunehmende Entfernung zwischen der Infiltrationsfront und der Kaverne führen im Lauf der Zeit allerdings zu einer signifikanten Reduzierung der Propagationsrate der Infiltrationsfront, so dass sich die Infiltrationsfront schon 100 Jahre nach dem Kavernenverschluss mit nur noch einer Rate von etwa 4 mm/a in Richtung des Salzspiegels weiterbewegt. Die Berechnung ist nach dieser Simulationszeit abgebrochen worden. Eine konservative Extrapolation ergibt eine Infiltrationsfrontteufe von $z \approx -2320\text{ m}$ nach 500 Jahren. Der Salzspiegel wird bei der Infiltrationsrate von 4 mm/a nach ca. 55000 Jahren erreicht.



Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung und Randbedingungen	1
2	Unterlagen	4
3	Literatur	5
4	Bearbeitungsmethodik.....	6
5	Zusammenstellung standortspezifischer gebirgsmechanischer Grundlagen- daten.....	7
5.1	Gebirgsbau	7
5.1.1	Gebirgsbau im Bereich der Kaverne BAS-2.....	7
5.1.2	Gebirgsbau im Bereich der Kaverne BAS-3.....	7
5.2	Kavernenabmessungen	8
5.2.1	Abmessungen der Kaverne BAS-2	8
5.2.2	Abmessungen der Kaverne BAS-3	9
5.3	Messtechnische Beobachtungen	9
5.4	Laborative Untersuchungen	12
6	Physikalische Modellierung	14
6.1	Stoffmodelle und Materialkennwerte	14
6.1.1	Homogenbereich Steinsalz	14
6.1.2	Homogenbereich Carnallit.....	17
6.1.3	Homogenbereich Anhydrit	17
6.2	Modellierung eines thermisch bedingten Soledruckaufbaus	18
6.3	Physikalische Modellierung und rechnerische Simulation eines druckgetriebenen Infiltrationsprozesses	21
6.3.1	Propagationsprozess der Infiltrationsfront.....	21
6.3.2	<i>Darcy</i> -Strömungsprozess innerhalb der Infiltrationszone	26
6.3.3	Zusammenhang zwischen der Infiltrationsfrontpropagation und dem <i>Darcy</i> - Strömungsprozess in der Infiltrationszone	28
7	Rechnerische Simulationen zum Infiltrationsprozess für die Kavernen BAS-2 und BAS-3.....	30
7.1	Vorbemerkung	30



7.2	Retrospektive Analyse des Druckaufbauversuchs in Kaverne BAS-2	31
7.2.1	Modellgeometrie	31
7.2.2	Berücksichtigung der Kavernenbetriebsphase	32
7.2.3	Simulationsergebnisse	32
7.3	Prognose für die verschlossene Kaverne BAS-3	35
7.3.1	Modellgeometrie	35
7.3.2	Berücksichtigung der Kavernenbetriebsphase	36
7.3.3	Simulationsergebnisse	36
8	Zusammenfassung der Projektergebnisse	39

1 Aufgabenstellung und Randbedingungen

Im Nordwesten der Niederlande, nahe der Stadt Harlingen, gewinnt die Firma FRISIA Zout durch Solution Mining seit 1995 Steinsalz. Die Solegewinnungskavernen befinden sich in Teufen von etwa 2400 m bis 3200 m. Bild 1.1 zeigt in einem schematisch-prinzipiellen Vertikalschnitt den prinzipiellen geologischen Gebirgsaufbau im Bereich der Kavernen BAS-1, BAS-2 und BAS-3.

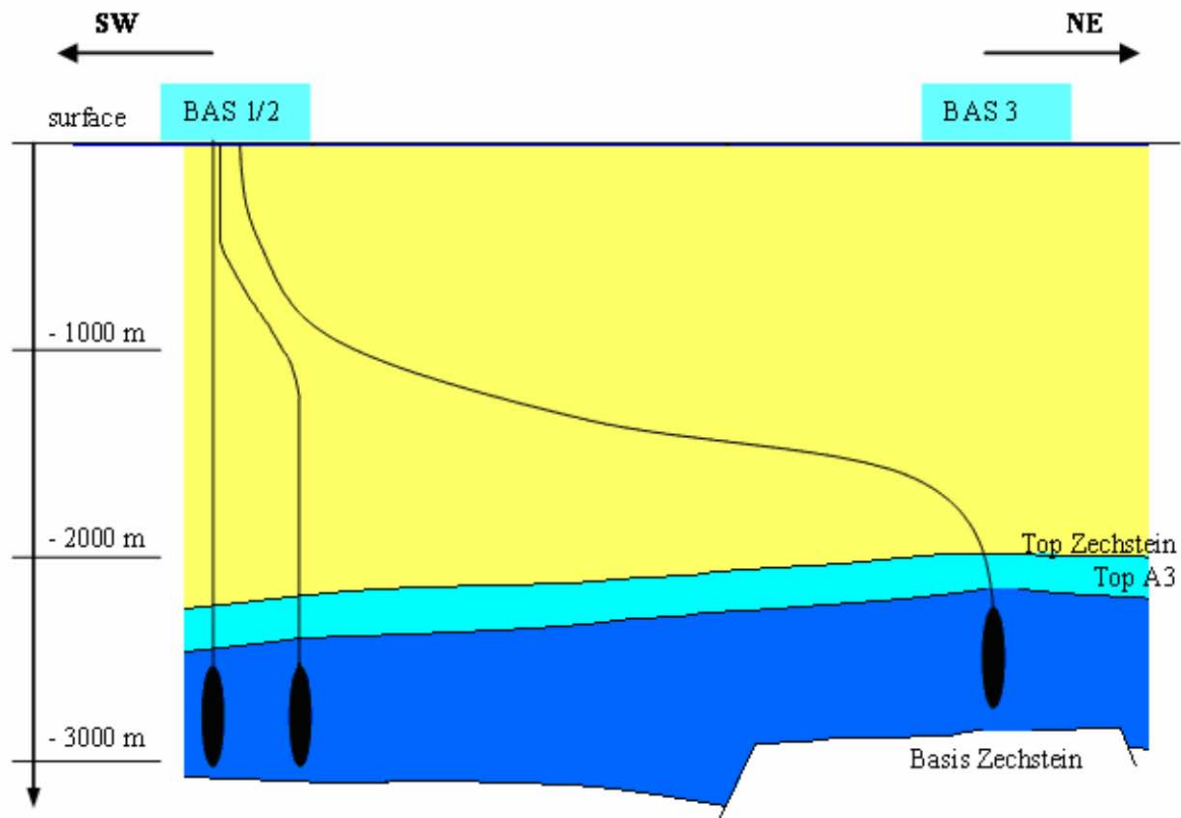


Bild 1.1 Schematische Darstellung des prinzipiellen geologischen Gebirgsaufbaus im Bereich der Kavernen BAS-1, BAS-2 und BAS-3

Bild 1.2 zeigt eine schematische Darstellung des prinzipiellen geologischen Gebirgsaufbaus für das Nahfeld der Kaverne BAS-3. Zudem sind in Bild 1.2 einige geometrische Daten angegeben, z.B. die Teufenlage des Kavernendachs und des Kavernensumpfs sowie der mittlere Kavernenradius und das Kavernenvolumen, aber auch die Mächtigkeiten der Salzschichten sowie der im Hangenden der Kaverne BAS-3 befindlichen Carnallit- und Anhydritschicht.

Im Rahmen der Stilllegungsplanung der Kaverne BAS-3 ist für den Zeitraum nach Abschluss der Solung und nach dem Verschluss der soleverfüllten Kaverne das konvergenzbedingte

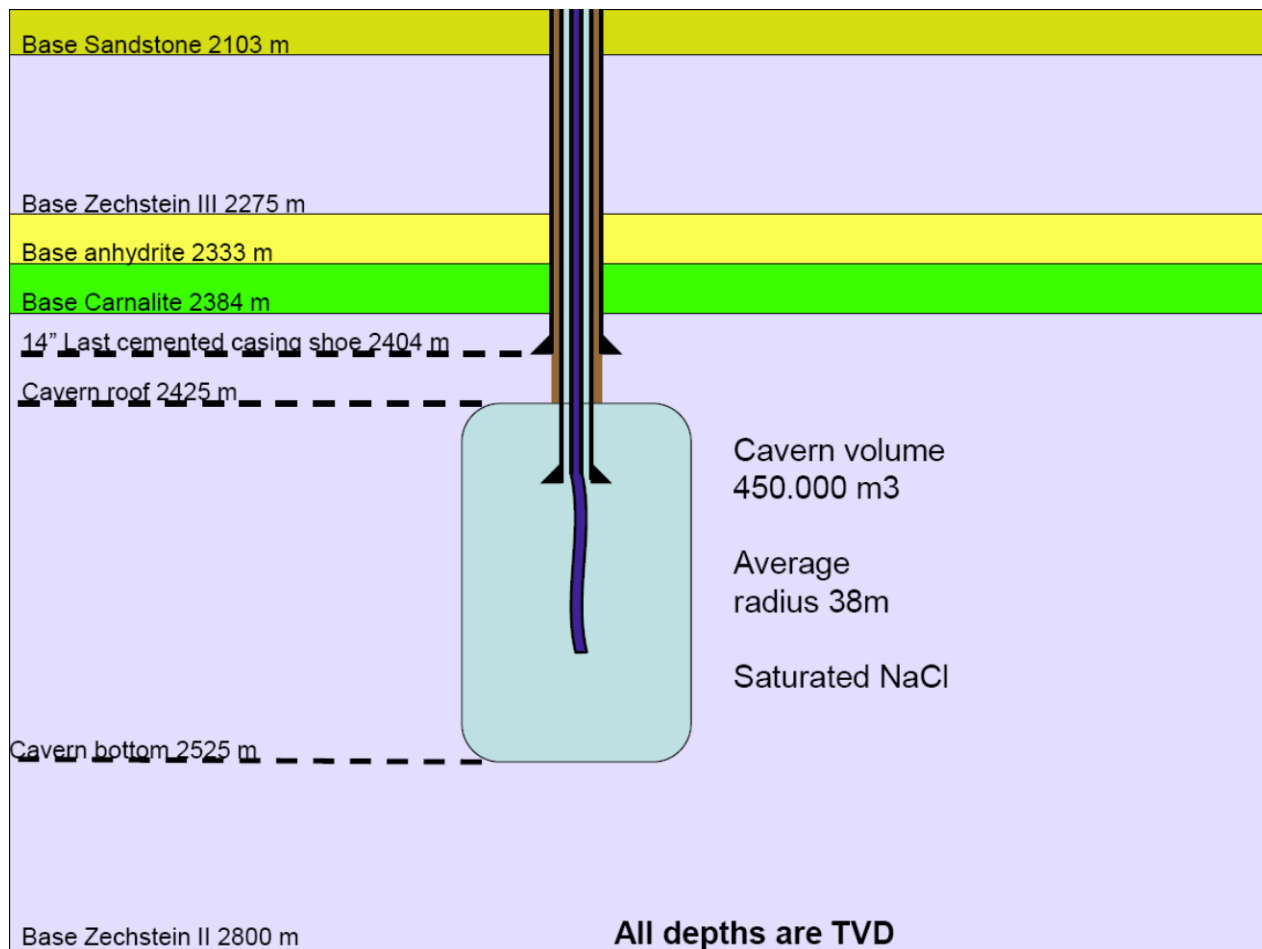


Bild 1.2 Schematische Darstellung des prinzipiellen geologischen Gebirgsaufbaus im Bereich der Kaverne BAS-3

Infiltrationsverhalten der Kavernensole in die überlagernden Salzschiechten zu bewerten. Dazu soll mit der am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal entwickelten numerischen Simulationssoftware MISES3-INFIL die konvergenzbedingte zeitliche und räumliche Infiltration der Kavernensole von der verschlossenen Kaverne BAS-3 ausgehend in das hangende Steinsalzgebirge untersucht werden. Ziel dieser mechanisch-hydraulisch gekoppelten Untersuchungen ist die Bestimmung des Zeitraums, den die Kavernensole benötigt, um permeable Schichten oberhalb des Salinars zu erreichen.

Die im Hangenden der Kaverne BAS-3 befindliche Carnallititschicht sowie die ebenfalls im Hangenden der Kaverne BAS-3 befindliche Anhydritschicht sollen im Rahmen der numerischen Simulation des Infiltrationsprozesses modelliert werden unter Ansatz von Salzeigenschaften, die vergleichbar sind mit den Eigenschaften der darüber liegenden Steinsalzschiecht. Dieser Ansatz ist im Rahmen einer Untersuchung der Soleinfiltration aus der Kaverne BAS-3 in das anstehende Steinsalzgebirge als konservativ anzusehen, da möglicherweise die Carnallititschicht durch selektive Auflösung und die Anhydritschicht durch einen erhöhten Fluideindringdruck eine Ver-



breiterung der Infiltrationszone und in der Konsequenz eine Verlangsamung der Infiltrationsfrontpropagation bewirken.



2 **Unterlagen**

- [U1] *E.H. van Heekeren (2009)*: Pressure build-up in a shut in solution-mined salt cavern. Final report AES/GT/09-01, 09.01.2009.
- [U2] *H. van Heekeren, T. Bakker, T. Duquesnoy & V. de Ruiter (2009)*: Abandonment of an extremely deep Cavern at Frisia Salt. Technical conference paper at SMRI Spring 2009 Technical Conference.
- [U3] Lithology-Log. BAS-3E SIDETRACK NO. 5.
- [U4] Quick Overview about Geology and Well at BAS-3.
- [U5] BAS-3 sonar measurement from August 2008.
- [U6] Rock Mechanical Investigation on Rock Salt from the Cavern Wells BAS-1 and BAS-2. Laborbericht des IfG Leipzig.
- [U7] Rock Mechanical Investigations on Rock Salt from the Cavern Well BAS-4. Laborbericht des IfG Leipzig.
- [U8] Complete pressure history BAS-2.
- [U9] Answers to questions from meeting Nov 8th 2010.
- [U10] All four BAS-2 compression tests.



3 Literatur

- Bérest, P. ; Bergues, J. & Brouard, B. (1999):* Static and dynamic compressibility of deep underground caverns. *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci.*, 36 :1031–1049, 1999.
- Ehgartner, B.L. & Linn, J.K. (1994):* Mechanical behavior of sealed SPR caverns. Technical conference paper at SMRI Spring 1994 Technical Conference.
- Karimi-Jafari, M. ; Bérest, P. & Brouard, B. (2007):* Thermal Effects in Salt Caverns. Technical conference paper at SMRI Spring 2007 Technical Conference.
- Lux, K.-H. (2005):* Zum langfristigen Tragverhalten von verschlossenen solegefüllten Salzkavernen – ein neuer Ansatz zu physikalischer Modellierung und numerischer Simulation. Theoretische und laborative Grundlagen. *Erdöl Erdgas Kohle*, Vol. no. 11.
- Lux, K.-H. (2006a):* Zum langfristigen Tragverhalten von verschlossenen solegefüllten Salzkavernen – ein neuer Ansatz zu physikalischer Modellierung und numerischer Simulation. Rechnerische Analysen und grundlegende Erkenntnisse. *Erdöl Erdgas Kohle*, Vol. no. 4.
- Lux, K.-H. (2006b):* Zum langfristigen Tragverhalten von verschlossenen solegefüllten Salzkavernen – ein neuer Ansatz zu physikalischer Modellierung und numerischer Simulation. Analyse eines Feldversuchs zur Validation und einige grundlegende Hinweise zur Stilllegung von Salzkavernen. *Erdöl Erdgas Kohle*, Vol. no. 11.
- Lux, K.-H. ; Düsterloh, U. & Wolters, R. (2006):* Long-term Behaviour of Sealed Brine-filled Cavities in Rock Salt Mass – A new Approach for Physical Modelling and Numerical Simulation. Technical Conference Paper, SMRI Fall 2006 Conference.
- Wolters, R. ; Lux, K.-H. & Düsterloh, U. (2009):* Fluid Infiltration Processes into Rock Salt Barriers resulting from Fluid Pressure Build-Up due to Convergence, Thermal Expansion and Gas Generation. EC-TIMODAZ-THERESA THMC conference, 29 Sep. – 01 Oct. 2009.
- Wolters, R. ; Lux, K.-H. & Düsterloh, U. (2010):* Evaluation of Rock Salt Barriers with Respect to Tightness: Influence of Thermomechanical Damage, Fluid Infiltration and Sealing/Healing. 44th US Rock Mechanics Symposium, Salt Lake City, 2010.

4 Bearbeitungsmethodik

Grundlegend für die numerische Simulation der druckgetriebenen Soleinfiltration in das Steinsalzgebirge ist die Charakterisierung des Salzgesteins mit Blick auf die wesentlichen Infiltrationseigenschaften:

- wirksamer Fluiddruck (= Differenz aus Fluiddruck und minimaler Hauptspannung), ab dem eine Fluidinfiltration in das Gestein beginnt,
- mittlere Propagationsgeschwindigkeit der Infiltrationsfront (= mittlere Infiltrationsgeschwindigkeit) für unterschiedliche wirksame Fluiddrücke,
- mittleres Solespeichervolumen pro Kubikmeter infiltriertem Gestein (= sekundäre Porosität) und
- durch den Infiltrationsprozess induzierte Permeabilität in den infiltrierten Gebirgsbereichen (= sekundäre Permeabilität).

Die physikalische Charakterisierung des Salzgesteins erfolgt üblicherweise mittels eines speziellen laborativen Untersuchungsprogramms an Salzprüfkörpern der betrachteten Lokation. Da allerdings zu der im Rahmen dieses Projektes betrachteten Lokation ein solches laboratives Untersuchungsprogramm bisher nicht vorliegt und auch nicht Gegenstand dieses Projektes ist, müssen die für die numerische Simulation des druckgetriebenen Infiltrationsprozesses benötigten Kennwerte zur Charakterisierung der Infiltrationseigenschaften des im Bereich der Kaverne BAS-3 anstehenden Salinargebirges bestmöglich eingeschätzt werden anhand alternativ verfügbarer Daten für die betrachtete Lokation.

Zur Einschätzung der Infiltrationseigenschaften des im Bereich der Kaverne BAS-3 anstehenden Salinargebirges und somit zur Reduzierung von Ungewissheiten in der physikalischen Modellierung und der numerischen Simulation der ablaufenden hydraulisch-mechanisch gekoppelten Prozesse ist im Rahmen dieses Projektes eine Reanalyse eines in der Kaverne BAS-2 durchgeführten Druckaufbauversuches erfolgt. Dieser Druckaufbauversuch ist unter anderem beschrieben in den Unterlagen [U1] und [U2]. Die Kaverne BAS-2 befindet sich relativ nah an der zu untersuchenden Kaverne BAS-3, so dass die Annahme von ähnlichen Infiltrationseigenschaften für das jeweils anstehende Steinsalzgebirge plausibel erscheint.

Mit den durch die Reanalyse des in der Kaverne BAS-2 durchgeführten Druckaufbauversuches ermittelten Infiltrationskennwerten wird die zeitliche und räumliche Ausbreitung von Sole aus der Kaverne BAS-3 in das anstehende Steinsalzgebirge modelliert.



5 Zusammenstellung standortspezifischer gebirgsmechanischer Grundlagendaten

5.1 Gebirgsbau

5.1.1 Gebirgsbau im Bereich der Kaverne BAS-2

Die Kaverne BAS-2 befindet sich in einer Salzschieht mit einer Mächtigkeit von etwa 800 m. Die Salzschieht befindet sich in dem Teufenbereich von $z = -2240 \text{ m}$ bis $z = -3042 \text{ m}$. Dabei ist die Salzschieht durchzogen von einer ca. 30 m mächtigen Anhydritschicht ($z = -2432 \text{ m}$ bis $z = -2462 \text{ m}$) sowie von einer ca. 40 m mächtigen Carnallitischicht ($z = -2462 \text{ m}$ bis $z = -2500 \text{ m}$). Oberhalb der Salzschieht befinden sich die Deckgebirgsschichten aus dem Quartär, dem Tertiär und der Kreide sowie eine Sandsteinschicht. Eine detaillierte tabellarische Darstellung zum Gebirgsbau im Bereich der Kaverne BAS-2 sowie zu einigen grundlegenden physikalischen Eigenschaften der einzelnen Gebirgsschichten ist der Unterlage [U1] zu entnehmen und wird an dieser Stelle in Tabelle 5.1 übernommen.

Gebirgsschicht	Teufe (TVD) [m]	Dichte [kg/m ³]	Elastizitätsmodul [MPa]	Poissonzahl [-]
Quartär	0 – 597	1950	125	0,25
Tertiär	597 – 1113	2300	125	0,25
Kreide	1113 – 1434	2250	1500	0,25
Sandstein	1434 – 2240	2230	2000	0,25
Steinsalz	2240 – 2432	2185	11000	0,35
Anhydrit	2432 – 2462	2900	10000	0,25
Carnallitit	2462 – 2500	1600	5500	0,35
Steinsalz	2500 – 3042	2185	11000	0,35
Dolomit	3042 – 3600	2700	25000	0,30

Tabelle 5.1 Gebirgsbau im Bereich der Kaverne BAS-2, [U1]

5.1.2 Gebirgsbau im Bereich der Kaverne BAS-3

Aus Bild 1.1 ist zu ersehen, dass sich die Kaverne BAS-3 in der gleichen Salzschieht befindet wie die Kaverne BAS-2, die allerdings im Bereich der Kaverne BAS-3 entsprechend Bild 1.2 nur

noch eine Mächtigkeit von etwa 700 m hat. Aus Bild 1.1 ist zudem zu ersehen, dass die einzelnen Gebirgsschichten von der Kaverne BAS-2 zu der Kaverne BAS-3 hin ansteigen. Aufbauend auf den aus Bild 1.1 bzw. Bild 1.2 zu entnehmenden Angaben können die salinaren Gebirgsschichten im Bereich der Kaverne BAS-3 entsprechend Tabelle 5.2 festgelegt werden. Für die Deckgebirgsschichten stehen allerdings keine hinreichenden Angaben zur Verfügung.

Gebirgsschicht	Teufe (TVD) [m]	Dichte [kg/m ³]	Elastizitätsmodul [MPa]	Poissonzahl [-]
Steinsalz	2103 – 2275	2185	11000	0,35
Anhydrit	2275 – 2333	2900	10000	0,25
Carnallitit	2333 – 2384	1600	5500	0,35
Steinsalz	2384 – 2800	2185	11000	0,35

Tabelle 5.2 Gebirgsbau im Bereich der Kaverne BAS-3 (nur die salinaren Gebirgsschichten)

5.2 Kavernenabmessungen

5.2.1 Abmessungen der Kaverne BAS-2

Bild 5.1 zeigt eine schematische Darstellung der Kavernengeometrie von Kaverne BAS-2. Es ist zu ersehen, dass die Kaverne BAS-2 eine zylindrische Form aufweist. Das Kavernendach befindet sich in einer Teufe von $z \approx -2533 \text{ m}$, der Kavernensumpf bei $z \approx -2800 \text{ m}$. Es ergibt sich demnach eine Kavernenhöhe von $h \approx 267 \text{ m}$. Mit dem in Bild 5.1 angegebenen Kavernenvolumen von $V \approx 200.000 \text{ m}^3$ ergibt sich ein Kavernenradius von $r \approx 16 \text{ m}$.

Das Steinsalz zwischen dem Kavernendach und der Carnallititschicht hat eine Mächtigkeit von etwa 33 m.

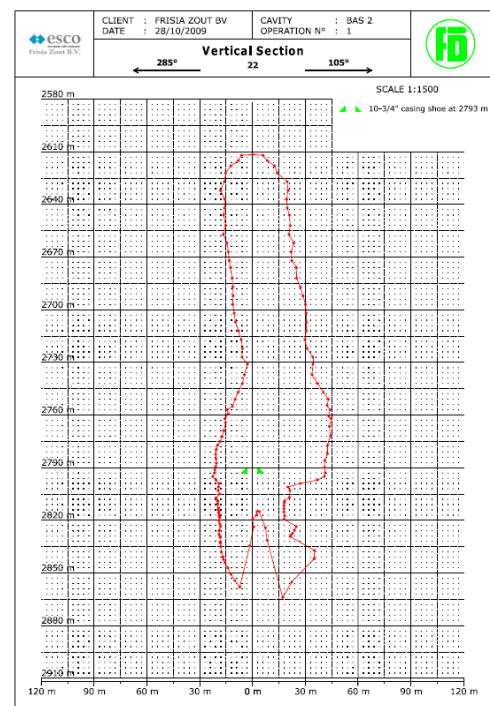


Bild 5.1 Vermessungsergebnis zur Kavernengeometrie der Kaverne BAS-2 (rechts), Teufenangaben sind nicht TVD

5.2.2 Abmessungen der Kaverne BAS-3

Im Gegensatz zu der Kaverne BAS-2 ist die Kaverne BAS-3 nicht zylindrisch ausgebildet. Das in Bild 5.2 dargestellte Ergebnis einer echometrischen Vermessung der Kaverne BAS-3 deutet vielmehr hin auf eine in der Tendenz eher kugelförmige Kaverne.

Aus Bild 5.2 ist zu ersehen, dass die Kaverne BAS-3 eine Höhe von etwa $h \approx 95 \text{ m}$ hat. Das Kavernendach befindet sich in einer Teufe von $z \approx -2425 \text{ m}$, der Kavernensumpf bei $z \approx -2520 \text{ m}$. In Verbindung mit Bild 5.2 ergibt sich der Radius der Kaverne BAS-3 bei kugelförmiger Abstraktion zu $r \approx 47,5 \text{ m}$. Das Kavernenvolumen beträgt etwa $V \approx 450.000 \text{ m}^3$.

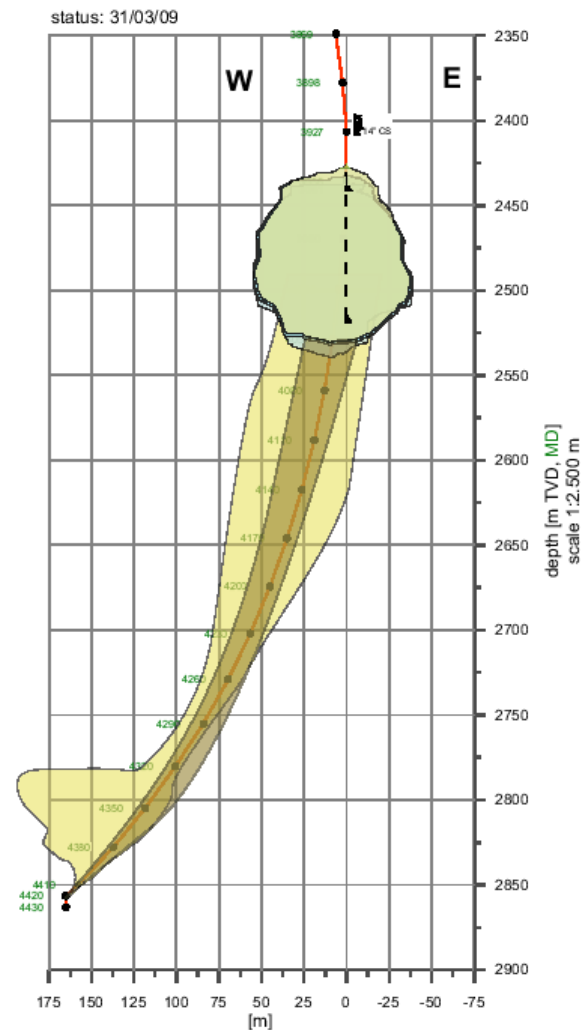


Bild 5.2 Ergebnis einer echometrischen Vermessung der Kaverne BAS-3, [U5]

5.3 Messtechnische Beobachtungen

Im Rahmen des in der Kaverne BAS-2 durchgeführten Druckaufbauversuches sind die zeitliche Fluiddruckentwicklung an drei charakteristischen Punkten der Kaverne bzw. der Verrohrung sowie die zeitliche Entwicklung der Fluidtemperatur in der Kaverne messtechnisch erfasst worden, [U8].

Bild 5.3 zeigt die zeitlichen Verläufe der Kopfdrücke, die während des Druckaufbauversuches an der 7"-, der 10 3/4"- und der 13 3/8"-Verrohrung gemessen worden sind. Mit Blick auf die in Bild 5.3 dargestellte Druckentwicklung ist hervorzuheben, dass kurz nach dem Verschluss der

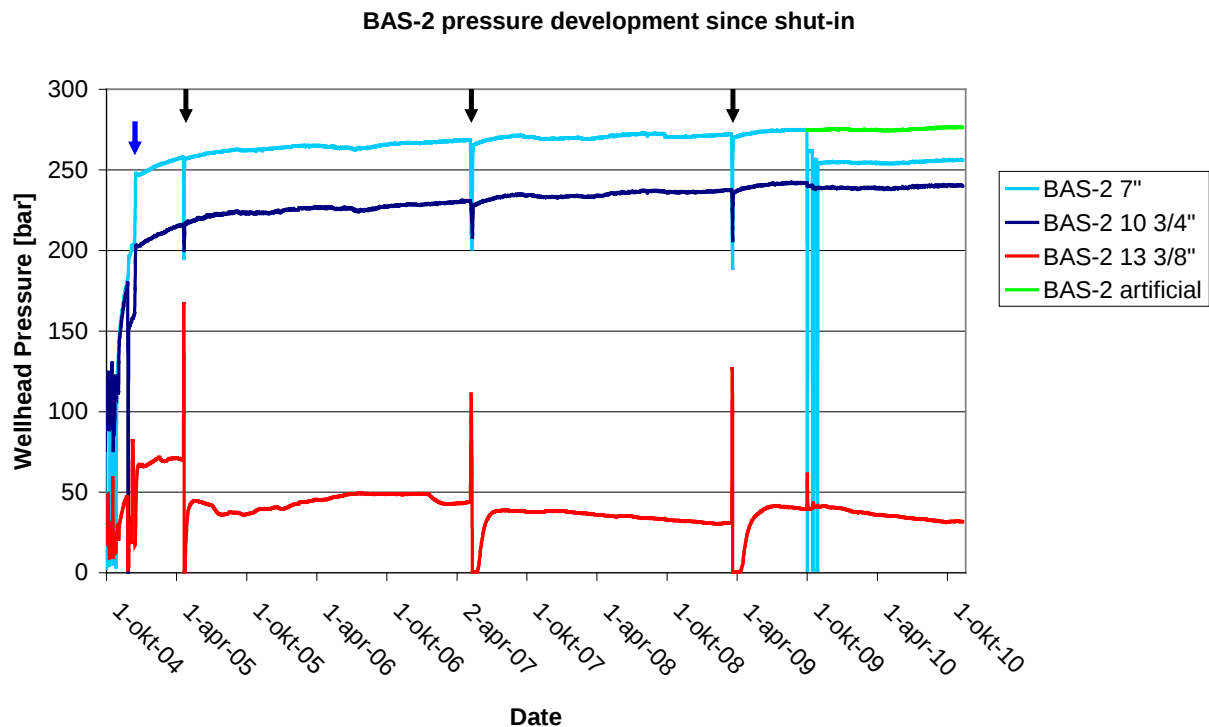


Bild 5.3 Messergebnisse zum Kopfdruck in der Kaverne BAS-2 während des Druckaufbauversuches (gemessen an der 7" -, der 10 3/4" - und der 13 3/8" -Verrohrung), [U8]

Kaverne der Kaverneninnendruck angehoben worden ist, um die Kavernenkonvergenz zu minimieren. Die Druckanhebung erfolgte zu dem mit dem blauen Pfeil markierten Zeitpunkt. Der weitere zeitliche Soledruckaufbau ist dagegen zurückzuführen auf die Kavernenkonvergenz sowie den Temperatúrausgleich zwischen dem anstehenden Salinargebirge und der Kavernensole.

Aus Bild 5.3 ist deutlich zu ersehen, dass sich die Kopfdrücke an der 7" - und an der 10 3/4" - Verrohrung relativ parallel entwickeln und bedingt durch die Kavernenkonvergenz sowie durch die Temperaturerhöhung in der Kavernensole allmählich ansteigen, einzig der Kopfdruck an der 13 3/8" -Verrohrung verhält sich vollkommen unterschiedlich, da die 13 3/8" -Verrohrung oberhalb des Kavernendaches zementiert worden ist und daher nicht vom Druckaufbau in der Kaverne beeinflusst wird.

Zu den mit den drei schwarzen Pfeilen markierten Zeitpunkten sind zwischenzeitlich kurze Drucktests zur Bestimmung des Gebirgsdrucks am Kavernendach in der Art durchgeführt worden, dass der Kaverneninnendruck kurz abgesenkt und im Anschluss sofort wieder angehoben worden ist. Es wurde dabei messtechnisch erfasst, wie viel Fluidvolumen in die Kaverne verpresst werden musste, um eine Druckerhöhung von 1 bar zu erreichen. Sobald der Fluiddruck am Kavernendach in die Größenordnung der dort vorhandenen Tangentialspannung

kommt, nimmt die zur weiteren Druckerhöhung benötigte Fluidmenge signifikant zu. Bild 5.4 zeigt die erhaltenen Messdaten zu den beschriebenen Drucktests. Es ist deutlich zu ersehen, dass die Tangentialspannung am Kavernendach sich im Lauf der Zeit vergrößert, da das Soledruckniveau, bei dem der Anstieg der benötigten Fluidmenge zur weiteren Druckerhöhung registriert worden ist, mit der Zeit zugenommen hat.

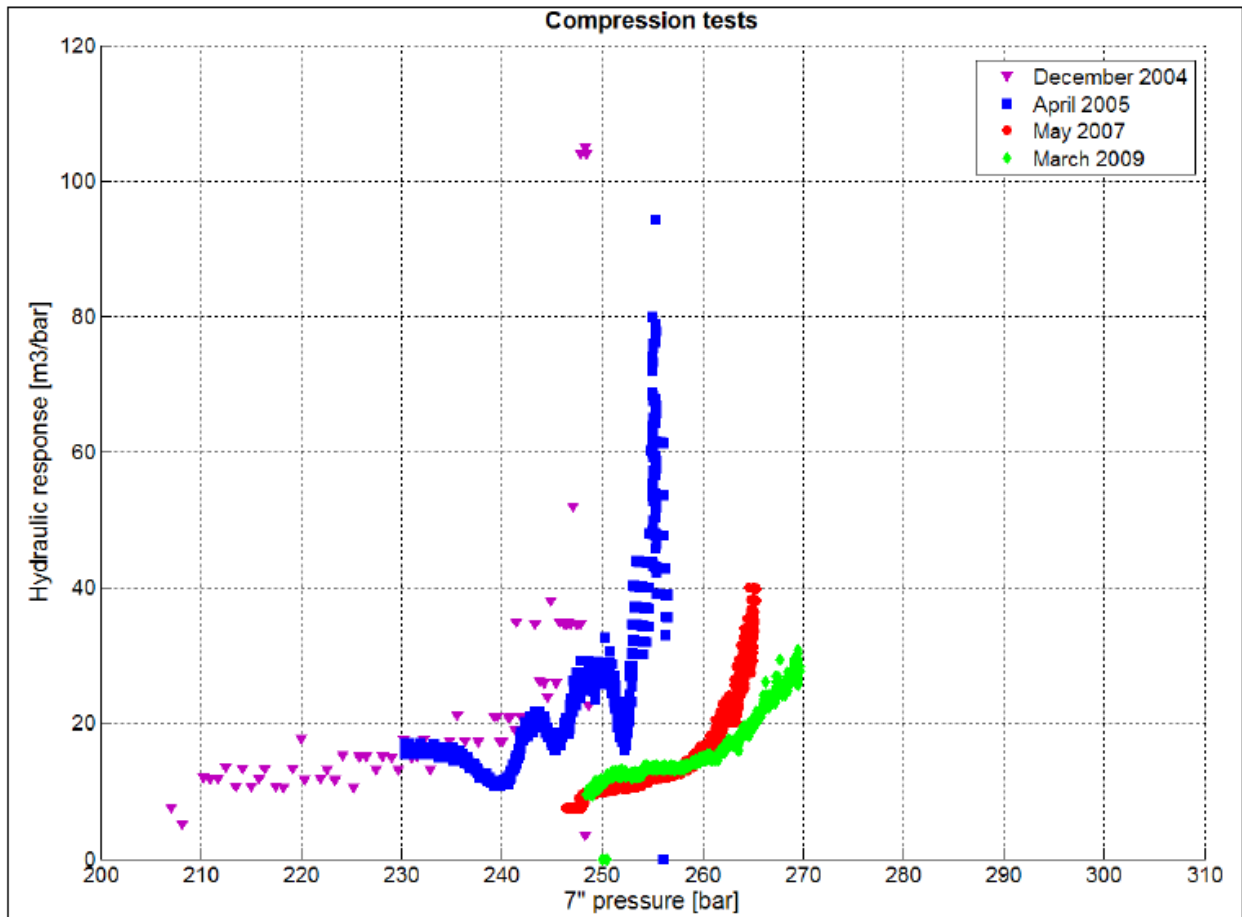


Bild 5.4 Messergebnisse der Drucktests zur Bestimmung des Gebirgsdrucks am Kavernendach als 7"-Kopfdruck, [U10]

Bild 5.5 zeigt die zeitliche Entwicklung der Soletemperatur in der Kaverne BAS-2 während des Druckaufbauversuches. Es ist zu ersehen, dass im ersten Jahr nach dem Kavernenverschluss die Soletemperatur deutlich ansteigt, danach verlangsamt sich dieser Prozess allerdings allmählich, bis dann nach längerer Zeit von einigen Jahren etwa das Niveau der primären Gebirgstemperatur erreicht sein wird.

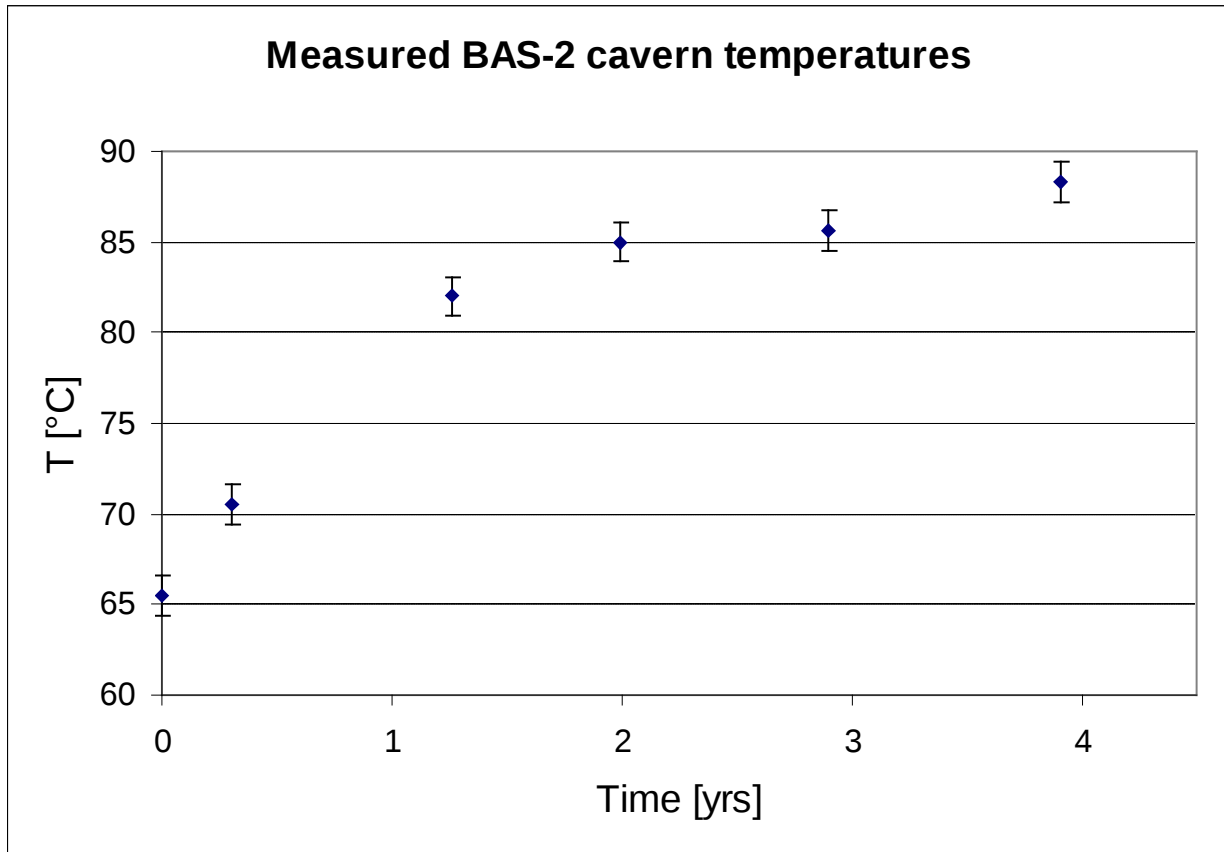


Bild 5.5 Messergebnisse zur Soletemperatur in der Kaverne BAS-2 während des Druckaufbauversuches, [U1]

5.4 Laborative Untersuchungen

Das IfG Leipzig hat zur Charakterisierung des Kriechverhaltens der Steinsalzschicht einstufige und mehrstufige Kriechversuche bei einer Temperatur von $T = 105\text{ °C}$ durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind dem Auftragnehmer durch den Auftraggeber als Unterlagen [U6] und [U7] zur Verfügung gestellt worden. In Bild 5.6 sind die vom IfG Leipzig laborativ ermittelten Kriechraten zusammenfassend dargestellt.

Die Versuche an Bohrkernmaterial der Kavernen BAS-1 bzw. BAS-2 sind bei Vergleichsspannungen zwischen $\sigma_v = 5\text{ MPa}$ und $\sigma_v = 20\text{ MPa}$ durchgeführt worden. Derart hohe Vergleichsspannungen treten allerdings im Umfeld einer verschlossenen solegefüllten Kaverne nur kurz nach dem Kavernenverschluss auf, solange der Soledruck noch deutlich unterhalb des Gebirgsdrucks liegt; langfristig sind aufgrund des hohen Innendrucks in der Kaverne während der Infiltrationsphase wesentlich geringere Vergleichsspannungen im anstehenden Gebirge zu erwarten.

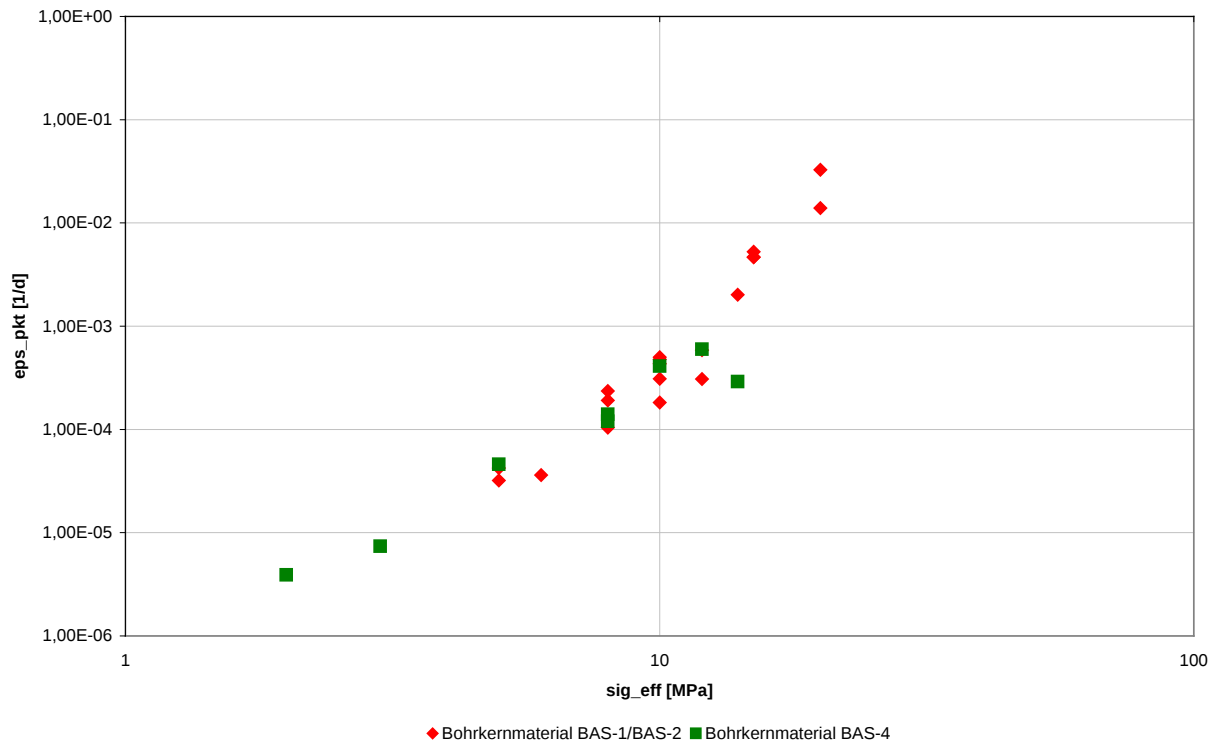


Bild 5.6 Messergebnisse der Laboruntersuchungen des IfG Leipzig, zusammengestellt aus den Unterlagen [U6] und [U7]

Die Versuche an Bohrkernmaterial der Kaverne BAS-4 sind bei Vergleichsspannungen zwischen $\sigma_v = 2 \text{ MPa}$ und $\sigma_v = 14 \text{ MPa}$ durchgeführt worden, leider allerdings gerade im Bereich geringer Beanspruchungen ohne Wiederholungsversuche, so dass keine Streubreite der Versuchsdaten vorliegt. Insbesondere die Messwerte für die relativ niedrigen Vergleichsspannungen sind für die rechnerische Modellierung der Kavernenkonvergenz bei hohen Kaverneninnendrücken heranzuziehen.

Neben den laborativen Untersuchungen zum Kriechverhalten des Steinsalzes sind in den Unterlagen [U6] und [U7] auch Untersuchungen zur Ermittlung des dynamischen Elastizitätsmoduls sowie der dynamischen Poissonzahl dargestellt. Da diese allerdings eine relativ große Streubreite aufweisen und auch bezüglich der hier relevanten Prozesse eher nur untergeordnete Bedeutung haben, werden für die numerischen Berechnungen in diesem Projekt die entsprechenden Kennwerte aus der Unterlage [U1] verwendet, die bereits in Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 dargestellt worden sind.

6 Physikalische Modellierung

6.1 Stoffmodelle und Materialkennwerte

6.1.1 Homogenbereich Steinsalz

In der vom Auftraggeber durchgeführten Untersuchung des Druckaufbauversuches in der Kaverne BAS-2 [U1] ist zur Beschreibung des Deformationsverhaltens des Homogenbereichs Steinsalz das so genannte *Norton-Hoff*-Stoffmodell (Gl. (6.1)) verwendet worden:

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \cdot (P_\infty - P_i)^{n_1} + A_2 \cdot (P_\infty - P_i)^{n_2} \quad (6.1)$$

Dabei sind zur Charakterisierung der stationären Kriechrate zwei verschiedene Parametersätze untersucht worden:

- High Linear Creep: $A_1 = 5,8 \cdot 10^{-8} \text{ d}^{-1}$, $n_1 = 3,6$, $A_2 = 5,1 \cdot 10^{-6} \text{ d}^{-1}$, $n_2 = 1$
- Low Linear Creep: $A_1 = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ d}^{-1}$, $n_1 = 3,6$, $A_2 = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ d}^{-1}$, $n_2 = 1$

Bild 6.1 zeigt die Kriechraten in Abhängigkeit von der Druckdifferenz $(P_\infty - P_i) = \sigma_{\text{eff}}$ für die beiden untersuchten Parametersätze.

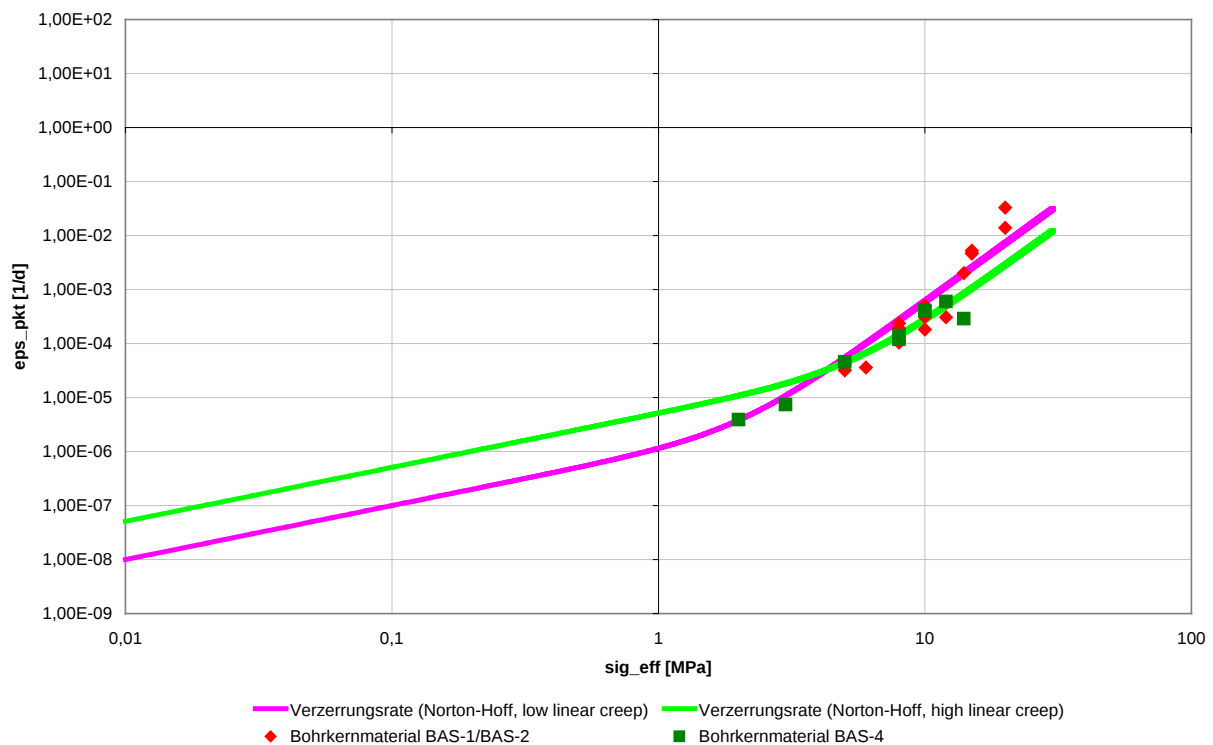


Bild 6.1 Kriechrate nach Stoffmodell Norton-Hoff für die beiden untersuchten Parametersätze

Aus der Unterlage [U1] geht hervor, dass der Parametersatz „Low Linear Creep“ zur Beschreibung des Druckaufbaus in der Kaverne nach dem Kavernenverschluss besser geeignet gewesen ist. Da im Umfeld einer verschlossenen solegefüllten Kaverne eher relativ niedrige Vergleichsspannungen zu erwarten sind und da die in Bild 6.1 dargestellten laborativ ermittelten Kriechraten für die niedrigen Vergleichsspannungen besser durch den Parametersatz „Low Linear Creep“ als durch den Parametersatz „High Linear Creep“ abgebildet werden, wird im Rahmen dieses Projekts zur Charakterisierung des Kriechverhaltens der Steinsalzschicht der Parametersatz „Low Linear Creep“ verwendet. Es besteht aus Sicht des Auftragnehmers allerdings auch die Möglichkeit, dass der Parametersatz „Low Linear Creep“ die Kriechraten für Vergleichsspannungen $\sigma_v < 2 \text{ MPa}$ sogar noch überschätzt, da die vorhandenen Messwerte für solche Vergleichsspannungen auch auf noch deutlich niedrigere Kriechraten extrapoliert werden können.

Da das Stoffmodell nach *Norton-Hoff* nicht in der vom Auftragnehmer zur Simulation des Infiltrationsprozesses verwendeten Software MISES3-INFIL implementiert ist, musste ein alternatives Stoffmodell verwendet werden, wobei die dort angesetzten Stoffmodellparameter so gewählt worden sind, dass sich für den relevanten Differenzdruckbereich $< 10 \text{ MPa}$ nahezu die gleichen Kriechraten ergeben wie im Stoffmodell nach *Norton-Hoff* mit dem Parametersatz „Low Linear Creep“. Der Auftragnehmer hat sich daher im Rahmen dieses Projekts zur Verwendung des Stoffmodells *Lubby2* nach Gl. (6.2) (bzw. nach Gl. (6.4) bei Berücksichtigung einiger plausibler Vereinfachungen) entschieden:

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \left(\frac{1}{\eta_k} \cdot \left(1 - \frac{G_k}{\sigma_v} \right) + \frac{1}{\eta_m} \right) \cdot \sigma_v \quad (6.2)$$

mit

$$\eta_k = \bar{\eta}_k^* \cdot \exp(k_2 \cdot \sigma_v)$$

$$G_k = \begin{cases} \bar{G}_k^* \cdot \exp(k_1 \cdot \sigma_v) \cdot \exp(l_1 \cdot T) & (\varepsilon_{tr} < \max \varepsilon_{tr}, \text{Verfestigung}) \\ \bar{G}_{kE}^* \cdot \exp(k_{1E} \cdot \sigma_v) \cdot \exp(l_{1E} \cdot T) & (\varepsilon_{tr} > \max \varepsilon_{tr}, \text{Erholung}) \end{cases}$$

$$\eta_m = \bar{\eta}_m^* \cdot \exp(m \cdot \sigma_v) \cdot \exp(l \cdot T)$$

σ_v - Vergleichsspannung nach von Mises in MPa,

$\bar{G}_k^*$ - Materialparameter in MPa,

k_1 - Materialparameter in MPa^{-1} ,



$\bar{\eta}_k^*$ - Materialparameter in $MPa \cdot d$,

k_2 - Materialparameter in MPa^{-1} ,

$\bar{\eta}_m^*$ - Materialparameter in $MPa \cdot d$,

m - Materialparameter in MPa^{-1} ,

l - Materialparameter in K^{-1} und

T - Temperatur in K .

Mit dem Stoffmodell *Lubby2* können transiente sowie stationäre Deformationsprozesse abgebildet werden. Die transienten Deformationsprozesse können allerdings in diesem Projekt vernachlässigt werden ($G_k = 0$), da sie bei der Innendruckanhebung eher nicht relevant sind und darüber hinaus im Lauf der Zeit abklingen und somit nicht langfristig zur Hohlraumkonvergenz sowie zum daraus resultierenden Soledruckaufbau innerhalb der Kaverne beitragen. Gl. (6.2) vereinfacht sich damit zu Gl. (6.3):

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \frac{\sigma_v}{\eta_m} \text{ mit } \eta_m = \bar{\eta}_m^* \cdot \exp(m \cdot \sigma_v) \cdot \exp(l \cdot T) \quad (6.3)$$

Wird die Temperatur des Salinargebirges ebenso wie in [U1] als konstant angesetzt, vereinfacht sich Gl. (6.3) weiter zu Gl. (6.4):

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \frac{\sigma_v}{\eta_m} \text{ mit } \eta_m = \bar{\eta}_m^{**} \cdot \exp(m \cdot \sigma_v) \quad (6.4)$$

Die im Rahmen dieses Projekts verwendeten Parameter im Stoffmodell *Lubby2* nach Gl. (6.4) sind $\bar{\eta}_m^{**} = 1,1 \cdot 10^6 \text{ MPa} \cdot d$ und $m = -0,45 \text{ MPa}^{-1}$. Bild 6.2 zeigt einen Vergleich der stationären Kriechraten nach dem Stoffmodell *Lubby2* mit den stationären Kriechraten nach dem Stoffmodell *Norton-Hoff*. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung für den hier relevanten Differenzdruckbereich.

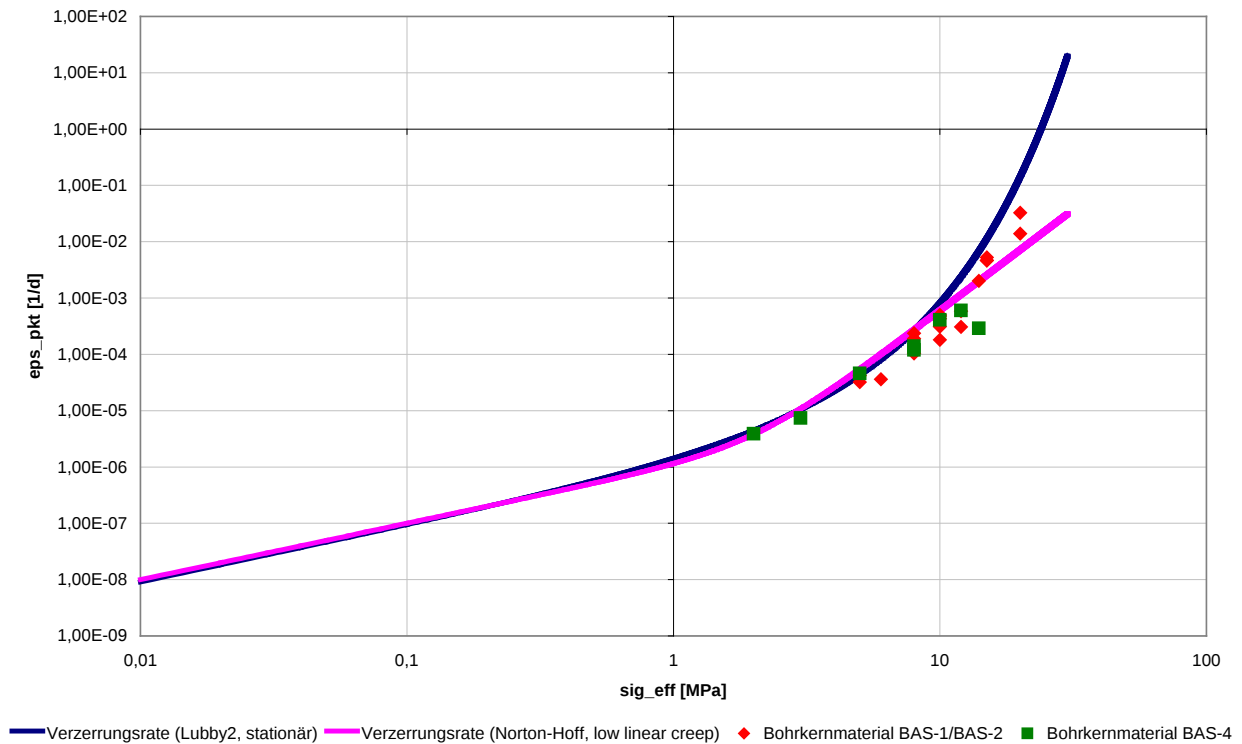


Bild 6.2 Kriechraten nach Stoffmodell Norton-Hoff (low linear creep) und Kriechraten nach Stoffmodell Lubby2

6.1.2 Homogenbereich Carnallitit

Der Homogenbereich Carnallitit wird in Bezug auf die Kriecheigenschaften analog zu den Steinsalzschieben modelliert. Die Carnallititschicht unterscheidet sich von den Steinsalzschieben nur in den Kennwerten für die Dichte, für den Elastizitätsmodul und für die Poissonzahl, die entsprechend Tabelle 5.1 bzw. entsprechend Tabelle 5.2 angesetzt worden sind.

6.1.3 Homogenbereich Anhydrit

Der Homogenbereich Anhydrit wird in Bezug auf die Kriecheigenschaften analog zu den Steinsalzschieben modelliert. Die Anhydritschicht unterscheidet sich von den Steinsalzschieben nur in den Kennwerten für die Dichte, für den Elastizitätsmodul und für die Poissonzahl, die entsprechend Tabelle 5.1 bzw. entsprechend Tabelle 5.2 angesetzt worden sind.



6.2 Modellierung eines thermisch bedingten Soledruckaufbaus

Im Rahmen des vorliegenden Projektes erfolgt die Modellierung des thermisch induzierten Soledruckaufbaus in der Kaverne BAS-2 bzw. in der Kaverne BAS-3 unter Verwendung von Gl. (6.5):

$$\Delta p_{Fl} = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \Delta T_{Fl} \quad (6.5)$$

mit

- p_{Fl} - Soledruck in der Kaverne in MPa ,
- T_{Fl} - Temperatur der Kavernensole in K ,
- α - Wärmeausdehnungskoeffizient der Kavernensole in K^{-1} und
- β - Kavernenkompressibilität in MPa^{-1} .

Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Sole hat einen Zahlenwert von $\alpha = 4,4 \cdot 10^{-4} K^{-1}$. Die Kavernenkompressibilität hängt von verschiedenen Einflüssen ab, u.a. von der Solekompressibilität, den elastischen Eigenschaften des Gebirges, der Kavernenform und den Lösungseigenschaften des Gebirges, *Bérest et al. (1999)*. Für eine Salzkaverne beträgt die Kavernenkompressibilität etwa $\beta \approx 4 \cdot 10^{-4} MPa^{-1}$.

Die Temperatur der Kavernensole wird als räumlich konstant angesehen, da Konvektionsprozesse in der Kaverne zu einer Homogenisierung der Soletemperatur führen. Die zeitliche Entwicklung der Soletemperatur kann nach *Ehgartner & Linn (1994)* beschrieben werden durch Gl. (6.6):

$$T(t) = T_{\infty} - (T_{\infty} - T_0) \cdot e^{-t/\tau} \quad (6.6)$$

mit

- $T(t)$ - Soletemperatur in der Kaverne in $^{\circ}C$ bzw. in K zum Zeitpunkt t ,
- T_{∞} - initiale Gebirgstemperatur in $^{\circ}C$ bzw. in K ,
- T_0 - initiale Temperatur der Kavernensole in $^{\circ}C$ bzw. in K zum Zeitpunkt des Kavernenverschlusses und
- τ - kavernengeometrieabhängiger Parameter.



Der von der zu betrachtenden Kavernengeometrie abhängige Parameter τ in Gl. (6.6) ist so zu wählen, dass zum Zeitpunkt t_c 75 % der ursprünglichen vorhandenen Temperaturdifferenz

$T_\infty - T_0$ abgebaut sind, d.h. es gilt $\tau = -\frac{t_c}{\ln(0,25)}$. Der Zeitpunkt t_c wird bezeichnet als charakteristische Zeit und ist abhängig von der zu betrachtenden Kavernengeometrie.

In *Karimi-Jafari et al. (2007)* sind die charakteristischen Zeiten für einige einfache Kavernengeometrien untersucht worden. Demnach gilt, dass die charakteristische Zeit t_c ermittelt werden kann durch

$$- \quad t_c \approx r \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{V}{100000}\right)^2} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\ln(A/A_0)}{s}\right)^2\right) \text{ für schlanke zylindrische Kavernen} \quad (6.7)$$

mit

V - Kavernenvolumen in m^3 ,

$A = \frac{H}{D}$ - Verhältnis von Kavernenhöhe H zu Kavernendurchmesser D und

$r = 4,67 \text{ a}$, $s = 1,97$ und $A_0 = 0,91$

sowie durch

$$- \quad t_c \approx \frac{1}{4} \cdot \frac{\sqrt[3]{V^2}}{k_{salt}^{th}} \text{ für sphärische Kavernen} \quad (6.8)$$

mit

V - Kavernenvolumen in m^3 und

k_{salt}^{th} - Wärmeleitfähigkeit des Salzgebirges (ein typischer Wert für Salz ist

$$k_{salt}^{th} = 100 \text{ m}^2/\text{a})$$

Bild 6.3 zeigt die zeitabhängige Temperaturentwicklung nach Gl. (6.6)/(6.7) für die KaverneBAS-2 (schlanke zylindrische Kaverne). Bild 6.4 zeigt die zeitabhängige Temperaturentwicklung nach Gl. (6.6)/(6.8) für die Kaverne BAS-3 (sphärische Kaverne).

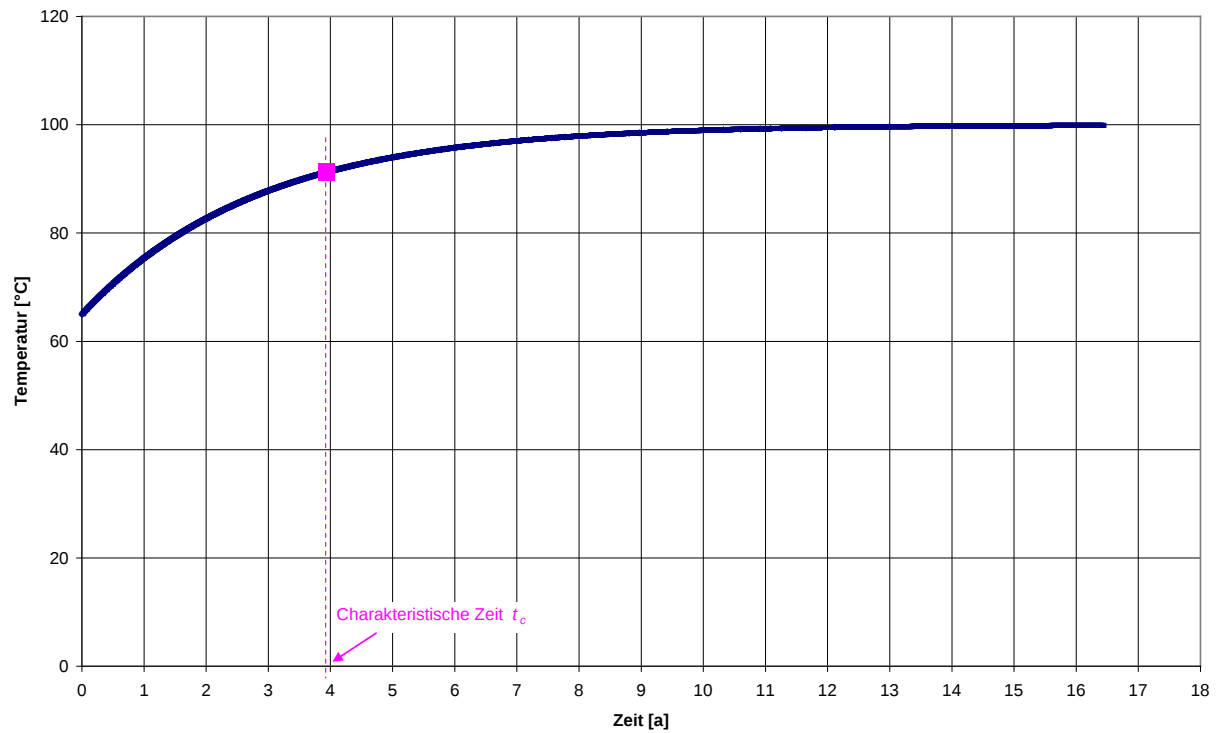


Bild 6.3 Zeitabhängige Temperaturentwicklung in der Kaverne BAS-2

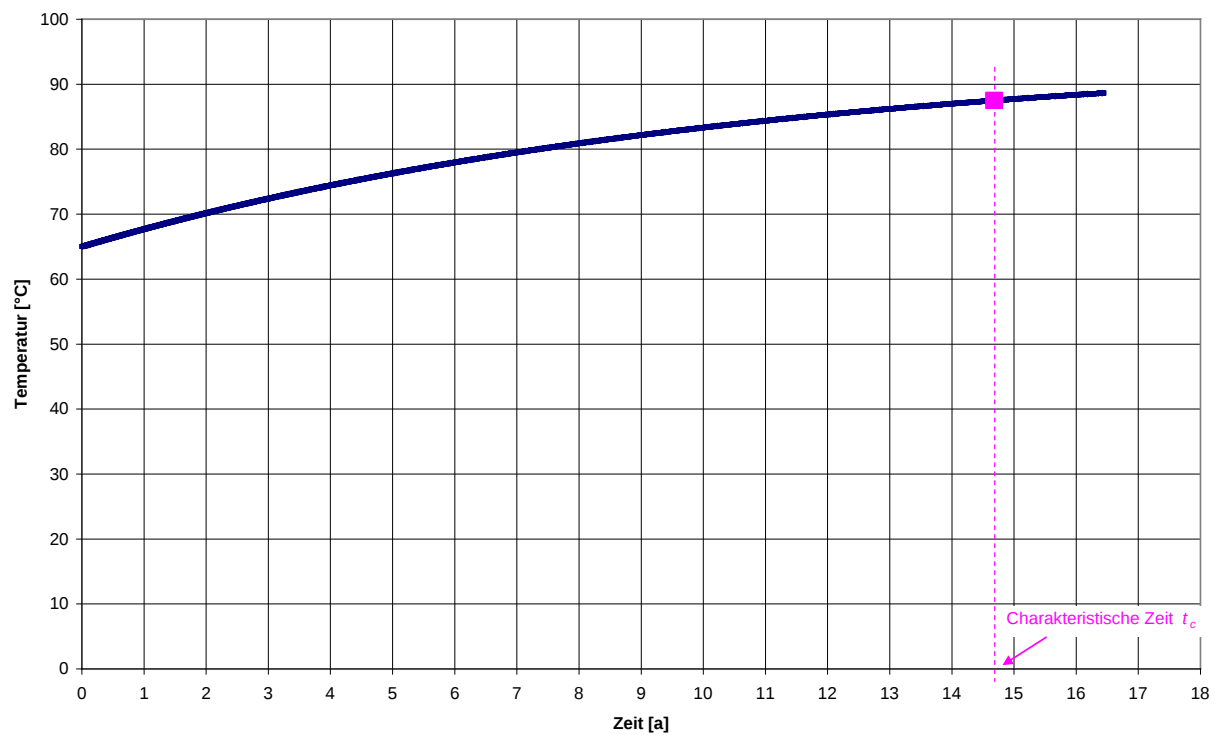


Bild 6.4 Zeitabhängige Temperaturentwicklung in der Kaverne BAS-3

6.3 Physikalische Modellierung und rechnerische Simulation eines druckgetriebenen Infiltrationsprozesses

6.3.1 Propagationsprozess der Infiltrationsfront

Nach bestehenden Erkenntnissen kann bei Sole als Infiltrationsfluid davon ausgegangen werden, dass bei geringen Druckaufbauraten das primär impermeable, d.h. unter primärem Gebirgsdruck flüssigkeits- und gasdichte Steinsalzgebirge bei Erreichen eines Fluidruckniveaus, das etwa der minimalen Gebirgsspannung entspricht, durch progressive Infiltration von Sole in sekundär ausgebildete Mikrowegsamkeiten seine Dichtheit verliert. Zur physikalischen Modellierung und zur rechnerischen Simulation dieses Infiltrationsprozesses lässt sich folgende Hypothese aufstellen:

- Das unverritzte Steinsalzgebirge ist unter primärer Gebirgsdruckverteilung flüssigkeits- und gasdicht.
- Bei Erreichen einer noch näher zu bestimmenden Konstellation zwischen Soledruck und minimaler Gebirgsspannung bilden sich im Salzgesteinsgefüge unter Einwirkung der unter Druck stehenden Sole auf Mikro- bzw. Mesoebene im Korngefüge entlang von Korngrenzenflächen sekundäre Wegsamkeiten aus.
- Volumenbezogene Intensität (= Sekundärporosität) und Propagationsrate (= Rissbildungsrate) der Sekundärwegsamkeiten sind gesteins- und beanspruchungsabhängig und können zumindest integral aus laborativen Untersuchungen eingeschätzt werden.
- Die Rissausbreitung im Gebirge folgt hinsichtlich ihrer Generalrichtung bei makroskopischer Betrachtung den Regeln der Hydrofrac-Theorie. Wesentlichen Einfluss auf die Rissausbreitungsrichtung haben damit das lokale Spannungsfeld und das Gesteinsgefüge.
- Gebirgskonvergenz (abhängig von Kriecheigenschaften des Gebirges, Teufenlage der Kaverne und Kavernengeometrie), Solekompressionsmodul, Sekundärporosität sowie Sekundärpermeabilität in der Infiltrationszone und die Differenz zwischen Fluidruck und minimaler Gebirgsspannung im Bereich der Rissausbreitungsfront sind die wesentlichen Parameter, die das Vordringen der Solefront in das Steinsalzgebirge bestimmen.

Zur Ermittlung der Infiltrationseigenschaften von Steinsalz werden beim Auftragnehmer üblicherweise laborative Untersuchungen an Prüfkörpern der Abmessungen $l/d = 30/15 \text{ cm}$ in speziell für diese Versuche konstruierten Prüfanlagen durchgeführt. Bild 6.5 zeigt eine Ansicht dieser Prüfstände. Das Versuchsprinzip besteht darin, die Prüfkörper triaxial zu beanspruchen und gleichzeitig überlagernd axial einen Fluidruck aufzubringen, wobei der Fluidruck als versuchstechnische Variable angesehen wird und sowohl unterhalb wie auch oberhalb der lateralen

(minimalen) mechanischen Spannung liegen kann. Die Axialspannung ist in der Regel größer als der Fluidruck. Aus dieser Versuchskonstellation folgt im Grundsatz (bei isotropem Gefüge) eine bezogen auf den Prüfkörper axialgerichtete Ausbreitung der Infiltrationsfront. Die im Endbereich des Prüfkörpers im Übergang zu den Druckkolben der Prüfmaschine aufgrund behinderter Querdehnung und zusätzlich zu den von außen angelegten Lateralspannungen vorliegenden Horizontalspannungen werden als gering eingeschätzt (Axialspannung nicht sehr viel größer als Lateralspannung $\rightarrow$ geringe Querdehnung). Die Fluidinfiltration erfolgt über künstlich angebrachte Schlitze oder Bohrungen von einigen cm Länge, um eine Gefügeimperfektion an der fluidruckbelasteten Gesteinsoberfläche zu simulieren. Gemessen werden während des Versuches die mechanischen Spannungen Axialdruck σ_1 und Lateraldruck $\sigma_{2,3} (\equiv \min \sigma)$ sowie der Fluidruck p_{Fl} . Im Fall der Infiltration wird der Fluidruck p_{Fl} durch Zuführung von Druckflüssigkeit konstant gehalten. Gemessen wird auch das dazu erforderliche Fluidvolumen V_{inf} , das dem Infiltrationsvolumen entspricht.



Bild 6.5 Ansicht eines für Infiltrationsversuche verwendeten Prüfstandes

Das Versuchsende ist erreicht nach Ablauf einer vorgegebenen Versuchs- bzw. Infiltrationszeit oder nach Durchbruch des Fluids auf der Gegenseite des Prüfkörpers und Erreichen einer etwa stationären Strömung. Nach Versuchsende wird der Prüfkörper aufgeschnitten. Da dem Druckfluid ein Tracer zugegeben wurde, können die infiltrierten Zonen unter UV-Licht visualisiert werden.

Das Versuchsende ist erreicht nach Ablauf einer vorgegebenen Versuchs- bzw. Infiltrationszeit oder nach Durchbruch des Fluids auf der Gegenseite des Prüfkörpers und Erreichen einer etwa stationären Strömung. Nach Versuchsende wird der Prüfkörper aufgeschnitten. Da dem Druckfluid ein Tracer zugegeben wurde, können die infiltrierten Zonen unter UV-Licht visualisiert werden.

Bild 6.6 und Bild 6.7 zeigen typische Ergebnisse von Infiltrationsversuchen. In Bild 6.6 ist das

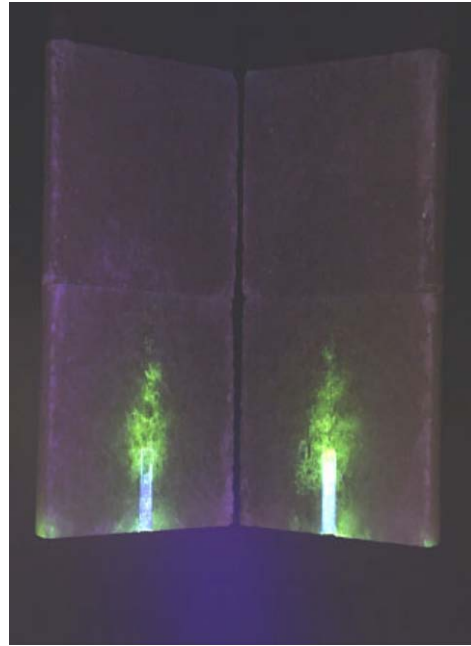
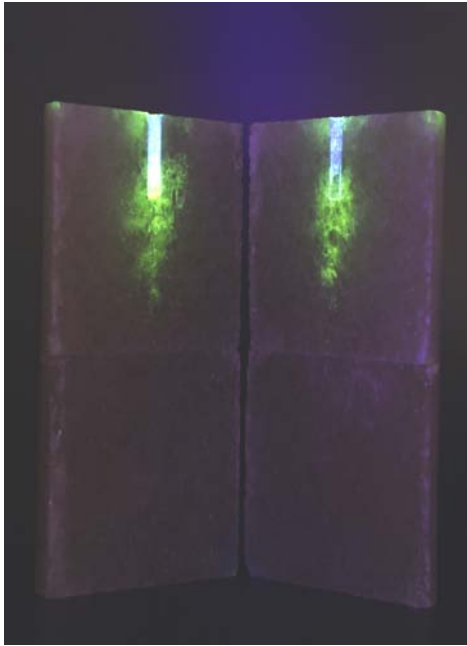


Bild 6.6 *Ausbildung der Infiltrationszone links in einem Prüfkörper (Versuch) und rechts in Anlehnung an die Verhältnisse in einer Kaverne*



Bild 6.7 *Ausbildung der Infiltrationszone in einem Prüfkörper mit einem kavernendachartigen Injektionsraum*

Anfangsstadium der Infiltration von einer zentralen Bohrung ausgehend zu beobachten. Deutlich zu sehen ist, dass die Infiltrationszone an der Kontur der Bohrung beginnt und sich dann in axialer Richtung in den Prüfkörper ausbreitet. Neben der Entwicklung der Infiltrationsfront in Axialrichtung erfolgt auch eine etwa radialsymmetrische Ausbreitung in lateraler Richtung, allerdings

zeitverzögert. Bild 6.7 zeigt zusätzlich den Infiltrationsverlauf in Prüfkörper mit einem kaverndachartigen Injektionsraum.

Repräsentative Messdaten eines Infiltrationsversuches sind in Bild 6.8 dargestellt.

Aufgetragen sind die konstant gehaltenen mechanischen und hydraulischen Drücke sowie das zur Aufrechterhaltung eines konstanten Fluiddruckes verbrauchte und in den Prüfkörper injizierte Fluidvolumen. Dieses Fluidvolumen entspricht damit dem Volumen der in den Prüfkörper infiltrierten Flüssigkeit, ist also gleich dem Infiltrationsvolumen.

Es zeigt sich, dass im zeitlichen Verlauf des Injektions- bzw. Infiltrationsvolumens zwei Bereiche zu unterscheiden sind, die ausgezeichnet sind durch eine jeweils etwa konstante, aber sehr unterschiedliche Infiltrations- (= Injektions-)rate. In der Interpretation wird der erste Teil der Kurve mit der signifikant geringeren Rate mit dem eigentlichen Infiltrationsprozess in Beziehung gesetzt: angetrieben durch den konstant gehaltenen Druck schafft sich das Fluid bei hinreichend großem Druckniveau im Vergleich zu der lateralen mechanischen (Minimal)Spannung im Kristallkorngefüge intergranulare Wegsamkeiten, in die es eindringt und von denen ausgehend es dann weiter vordringt. Dadurch entsteht ein vernetztes Mikrorissgefüge mit der Hauptausbreitungsrichtung in Richtung der größeren Hauptspannung bei gleichzeitiger, in der Intensität

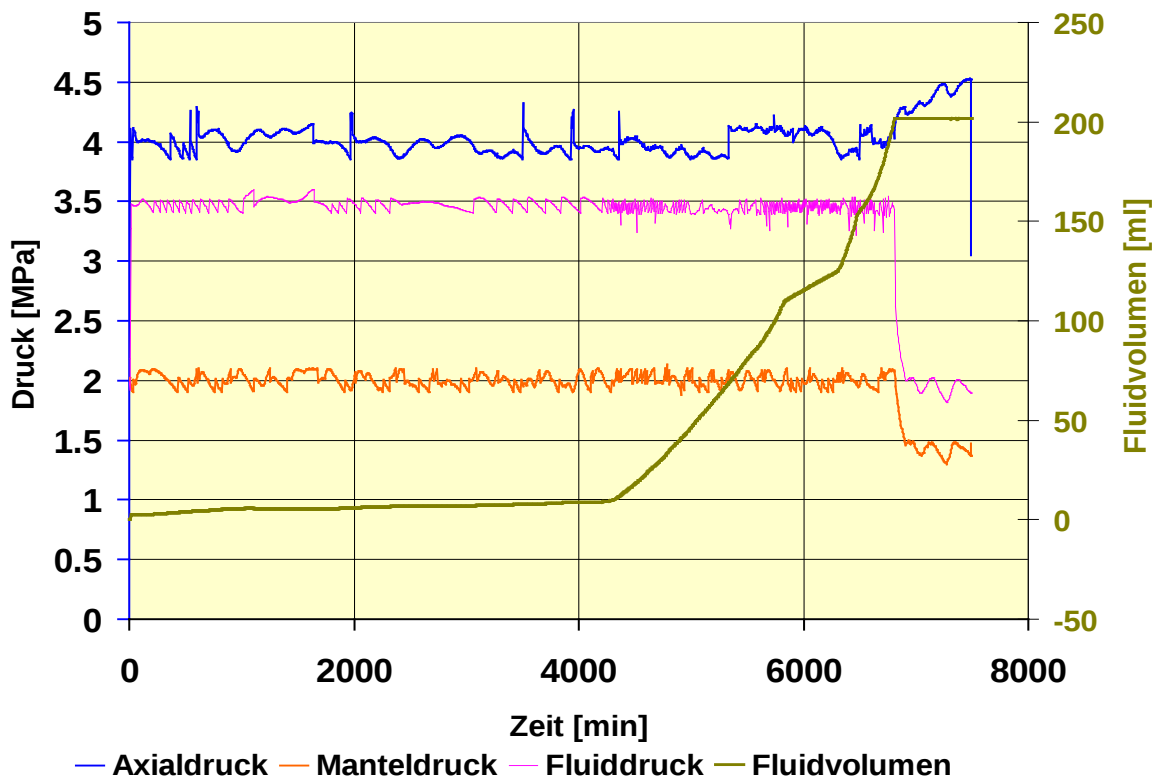


Bild 6.8 Messdaten eines Infiltrationsversuches

allerdings untergeordneter lateraler Ausdehnung. Diese Versuchsphase wird als Infiltrationsphase bezeichnet.

Die Infiltrationsphase endet relativ abrupt – in den Messdaten erkennbar an der zu einem gewissen Zeitpunkt fast instantan signifikant ansteigenden Injektionsrate. In der Interpretation wird dieser Zeitpunkt gleichgesetzt mit dem hydraulischen Durchschlag des Fluids und der Schaffung einer hydraulischen Verbindung zwischen zwei Reservoirien mit unterschiedlichen Fluiddrücken. Der zweite Teil der Messkurve mit der höheren Injektionsrate wird in Konsequenz als *Darcy*-Strömung gedeutet. Strömungswege sind die zuvor durch den Infiltrationsprozess sekundär geschaffenen Wegsamkeiten. Da dieser Strömungsprozess unter sonst konstanten Bedingungen mit im Grundsatz konstanter Rate bezüglich des Volumenstroms erfolgt, kann davon ausgegangen werden, dass in dieser Zeit unter den allerdings entsprechend dem hydraulischen Potentialfeld veränderten Porendruckbedingungen keine neuen Wegsamkeiten mehr geschaffen werden.

Werden der Infiltrationsweg und die Zeit bis zum Durchschlag bei integral-makroskopischer Betrachtungsweise miteinander verknüpft, dann kann daraus eine mittlere Infiltrationsrate abgeleitet werden. In Bild 6.9 dargestellt sind für mehrere Versuche mit unterschiedlicher Konstellationen aus Minimalspannung und Fluiddruck, zusammengefasst bezeichnet als wirksamer Fluiddruck $\Delta p_{Fl} = p_{Fl} - \sigma_{min}$ (Druckspannung bzw. Fluiddruck mit jeweils positivem

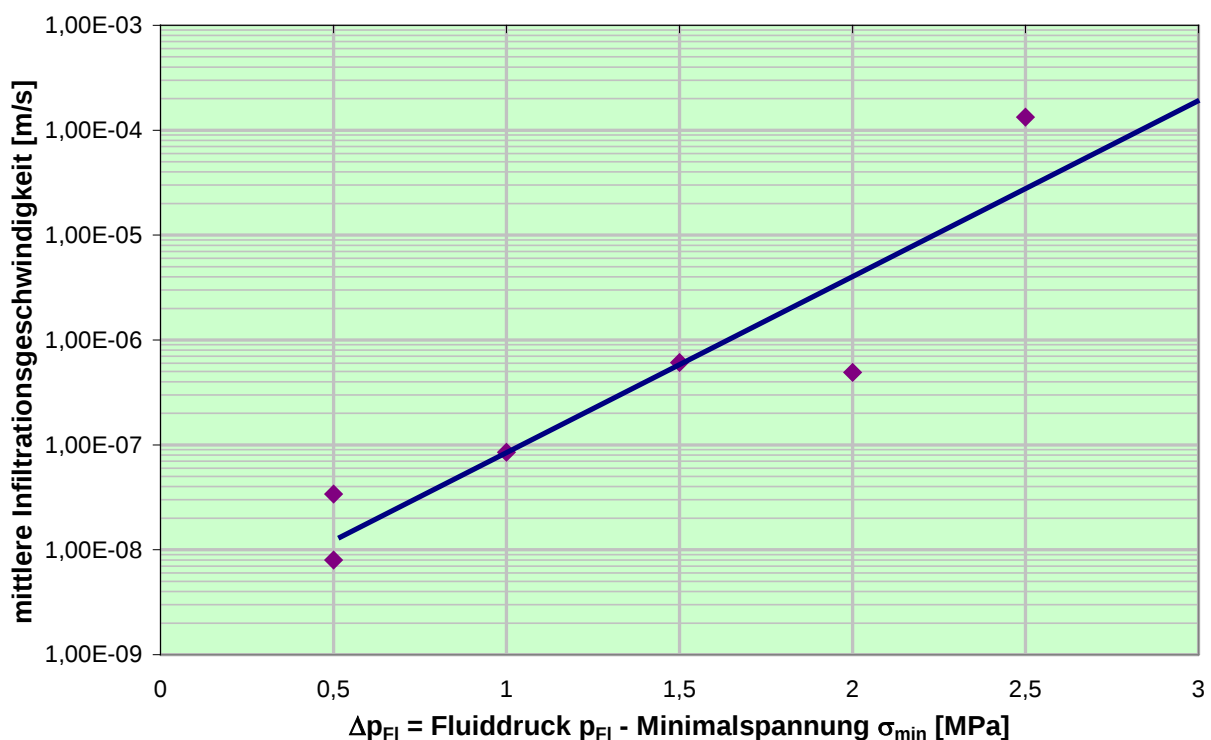


Bild 6.9 Mittlere Infiltrationsrate in Abhängigkeit vom Differenzdruck

Vorzeichen), die ermittelten mittleren Infiltrationsraten $\bar{v}_{\text{inf}}$.

Die Infiltrationsrate ist lokations- bzw. gesteinsabhängig laborativ zu ermitteln. Die bisher beim Auftragnehmer durchgeführten laborativen Untersuchungen ergeben eine Abhängigkeit der Infiltrationsrate von dem wirksamen Fluiddruck Δp_{Fl} . Zur Beschreibung dieser Abhängigkeit ist empirisch der Ansatz nach Gl. (6.9) gewählt worden:

$$\bar{v}_{\text{inf}} = a \cdot \exp(b \cdot \Delta p_{\text{Fl}}) \quad (6.9)$$

mit

a, b - lokations- bzw. gesteinsabhängige Parameter.

Da allerdings im Rahmen dieses Projekts keine laborativen Untersuchungen zu den Infiltrationseigenschaften des im Bereich der Kavernen BAS-2 bzw. BAS-3 anstehenden Steinsalzes durchgeführt worden sind, mussten die Parameter a und b durch eine Reanalyse des in der Kaverne BAS-2 durchgeführten Druckaufbauversuches unter Berücksichtigung der Wiedererwärmung der Sole und der daraus resultierenden Konsequenzen bestmöglich eingeschätzt werden.

6.3.2 Darcy-Strömungsprozess innerhalb der Infiltrationszone

Wie bereits in Abschnitt 6.3.1 kurz beschrieben worden ist, kann bei laborativen Untersuchungen zum Prozess der druckgetriebenen Fluidinfiltration in Steinsalz nach der Entstehung einer hydraulischen Verbindung zwischen der mit dem Infiltrationsfluid beaufschlagten Injektionsbohrung und der rückseitigen Prüfkörperstirnfläche ein signifikanter Anstieg der Fluidauspressrate aus der Injektionsbohrung beobachtet werden. Anhand dieser Fluidauspressrate kann unter Berücksichtigung des hydraulischen Gradienten zwischen der Injektionsbohrung und der rückseitigen Prüfkörperstirnfläche eine mittlere Sekundärpermeabilität in der Infiltrationszone abgeleitet werden.

Basierend auf der laborativ eingeschätzten mittleren Sekundärpermeabilität in der Infiltrationszone kann begleitend zur numerischen Simulation der fluiddruckgetriebenen Ausbildung von Mikrowegsamkeiten im Bereich der Infiltrationsfront auch das Nachströmen von Fluid aus der Quelle – im Laborversuch z.B. aus der Injektionsbohrung und im Feld z.B. aus der verschlossenen Kaverne – durch die Infiltrationszone hin zur Infiltrationsfront als *Darcy*-Strömungsprozess numerisch simuliert werden. Die *Darcy*-Strömungsgeschwindigkeit (= Filtergeschwindigkeit v_F) ergibt sich dabei für ein infinitesimal kleines Zeitinkrement entsprechend Gl. (6.10) zu



$$v_F = -k_f \cdot i \quad (6.10)$$

mit

k_f - Darcy-Beiwert in m/s und

i - hydraulischer Gradient zwischen der Fluidquelle und der Infiltrationsfront in -.

Der Darcy-Beiwert k_f ergibt sich aus der Permeabilität K entsprechend Gl. (6.11) zu

$$k_f = \frac{K \cdot \rho_{Fl} \cdot g}{\mu} \quad (6.11)$$

mit

K - Permeabilität in m^2 ,

ρ_{Fl} - Fluideichte in kg/m^3 ,

g - Erdbeschleunigung in m/s^2 und

μ - dynamische Viskosität des Fluids in $Pa \cdot s$.

Der Darcy-Beiwert k_f ist üblicherweise mit Blick auf den Zahlenwert etwa um den Faktor 10^7 größer als die Permeabilität K .

Der hydraulische Gradient i ergibt sich aus der Druckdifferenz Δp zwischen der Fluidquelle und der Infiltrationsfront entsprechend Gl. (6.12) zu

$$i = \frac{\left(\frac{\Delta p}{\rho_{Fl} \cdot g} \right)}{l} \quad (6.12)$$

mit

Δp - Druckdifferenz zwischen der Fluidquelle und der Infiltrationsfront in Pa ,

ρ_{Fl} - Fluideichte in kg/m^3 ,

g - Erdbeschleunigung in m/s^2 und

l - Entfernung zwischen der Fluidquelle und der Infiltrationsfront in m .

Die Fließgeschwindigkeit (= Abstandsgeschwindigkeit v_A) ergibt sich dann für ein infinitesimal kleines Zeitinkrement entsprechend Gl. (6.13) zu:

$$v_A = \frac{v_F}{\phi^s} \quad (6.13)$$

mit

ϕ^s - Sekundärporosität in der Infiltrationszone in -.

Beispiel: Ist der *Darcy*-Beiwert k_f und der hydraulische Gradient i für einen vertikal durchströmten porösen Körper mit den Abmessungen $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ bekannt, so kann unter Berücksichtigung von Gl. (6.10) relativ einfach der Volumenstrom $\dot{Q} = v_F \cdot A = v_F \cdot 1\text{ m}^2$ berechnet werden. Tatsächlich wird in einem porösen Körper allerdings nur ein Teil der Querschnittsfläche durchströmt, da der restliche Teil durch den Feststoff belegt ist. Um den gleichen Volumenstrom bei reduzierter Querschnittsfläche zu erhalten, muss die Fließgeschwindigkeit v_A in den Wegsamkeiten daher größer sein als die Filtergeschwindigkeit v_F . Dieser Zusammenhang wird durch Gl. (6.13) beschrieben.

6.3.3 Zusammenhang zwischen der Infiltrationsfrontpropagation und dem *Darcy*-Strömungsprozess in der Infiltrationszone

Bei der zeitlich-räumlichen Ausbreitung der Infiltrationszone werden im Bereich der Infiltrationsfront neue sekundäre Mikrowegsamkeiten ausgebildet, in die sich das Fluid von der Infiltrationsfront her ausbreiten kann. Die Ausbreitung des Fluids induziert dabei eine Reduzierung des Fluiddrucks im Bereich der Infiltrationsfront. Die Reduzierung des Fluiddrucks resultiert unmittelbar in einer Reduzierung der mittleren Infiltrationsgeschwindigkeit $\bar{v}_{\text{inf}}$ und somit der Infiltrationsfrontpropagationsrate.

Die Reduzierung des Fluiddrucks an der Infiltrationsfront führt zu einer Erhöhung des hydraulischen Gradienten zwischen der Fluidquelle und der Infiltrationsfront und damit zu einer Erhöhung der Abstandsgeschwindigkeit v_A in der Infiltrationszone. Die erhöhte Abstandsgeschwindigkeit in der Infiltrationszone bedingt wiederum ein verstärktes Nachströmen von Fluid aus der Fluidquelle zur Infiltrationsfront, wodurch die weitere Reduzierung des Fluiddrucks an der Infiltrationsfront verzögert wird.

Der Fluiddruck an der Infiltrationsfront strebt einem Niveau entgegen, bei dem die mittlere Infiltrationsgeschwindigkeit $\bar{v}_{\text{inf}}$ im Bereich der Infiltrationsfront und die Abstandsgeschwindigkeit v_A in der Infiltrationszone gleich sind.

Bild 6.10 zeigt eine zusammenfassende Darstellung des zuvor erläuterten Zusammenhangs zwischen der Infiltrationsfrontpropagation und dem *Darcy*-Strömungsprozess in der Infiltrationszone.

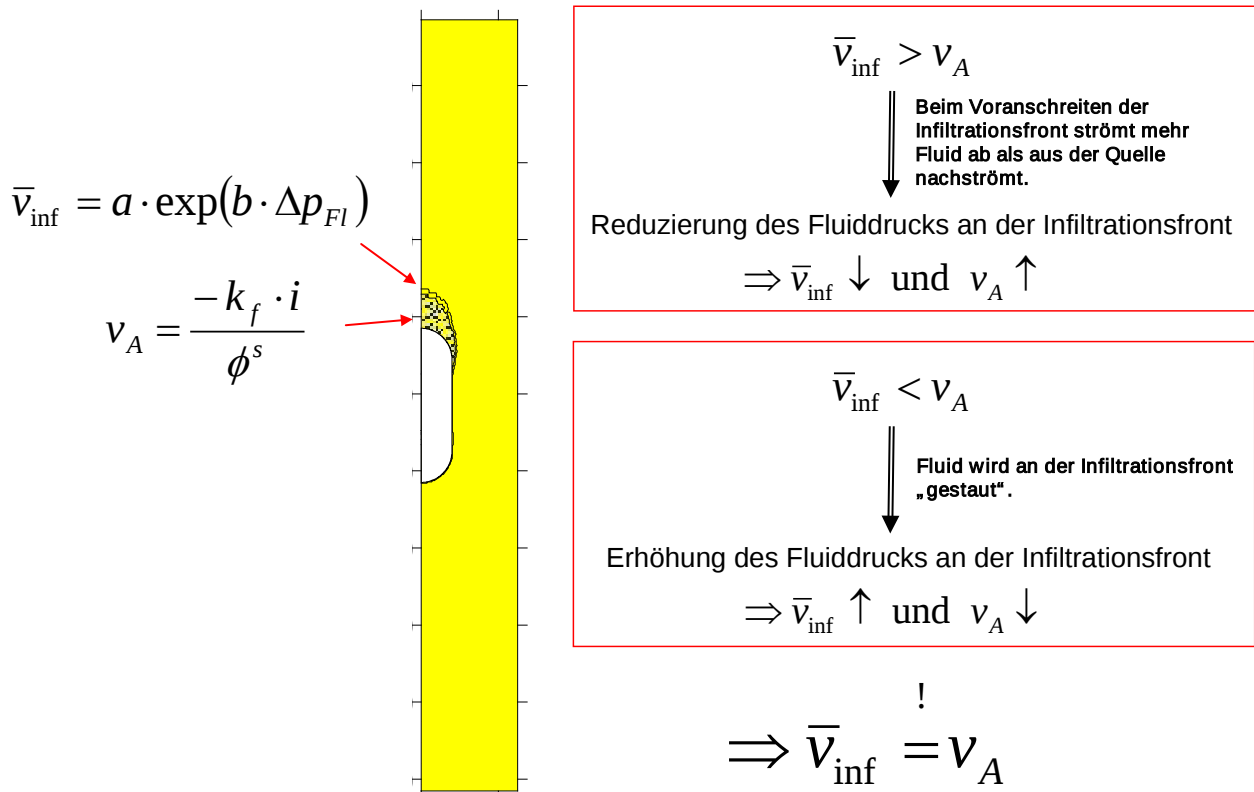


Bild 6.10 Physikalisches Modell zum Zusammenhang zwischen der Infiltrationsfrontpropagation und dem Darcy-Strömungsprozess in der Infiltrationszone

7 Rechnerische Simulationen zum Infiltrationsprozess für die Kavernen BAS-2 und BAS-3

7.1 Vorbemerkung

Bei den im Rahmen dieses Projektes durchgeführten numerischen Untersuchungen zur zeitlichen und räumlichen Infiltration von Sole aus den Kavernen BAS-2 und BAS-3 in das umgebende Gebirge ist jeweils nur der Teufenbereich zwischen dem Salzspiegel und der Oberkante des Liegenden unterhalb der Kavernen in das Berechnungsmodell übernommen worden. Die im Hangenden der Kavernen befindliche Carnallitit- sowie Anhydritschicht werden entsprechend der Absprachen mit dem Auftraggeber unter Ansatz von Steinsalzeigenschaften modelliert. In den numerischen Simulationen unterscheiden sich die Steinsalzsichten, die Carnallititschicht und die Anhydritschicht nur durch die Dichte, durch den Elastizitätsmodul und durch die Poissonzahl. Diese drei Kennwerte werden für die drei Schichten entsprechend Tabelle 5.1 bzw. entsprechend Tabelle 5.2 angesetzt. Bezüglich der Infiltration werden Carnallitit und Anhydrit wie Steinsalz behandelt.

Die Deckgebirgsschichten werden im Berechnungsmodell nicht explizit berücksichtigt. Sie wirken ausschließlich in Form eines Überlagerungsdrucks, der sich aus den jeweiligen Dichten und Mächtigkeiten der verschiedenen Deckgebirgsschichten entsprechend Tabelle 5.1 ergibt. Die Deckgebirgsschichten haben abgesehen von dem durch sie induzierten Überlagerungsdruck für die numerische Simulation des Infiltrationsprozesses keine weitere Bedeutung.

Die dem Kavernenverschluss vorlaufenden Betriebsphasen der Kavernen BAS-2 und BAS-3 werden in den numerischen Simulationen in vereinfachter Form modelliert. Dabei wird der durch den Auftraggeber mitgeteilte solbetriebliche Kaverneninnendruck in der Kaverne angesetzt und damit das durch den Kavernenbetrieb induzierte Sekundärspannungsfeld berechnet. Die stetige Nachsolung der Kavernen während der jeweiligen Betriebsphasen kann in der numerischen Simulation nicht explizit berücksichtigt werden, so dass sich unter den angesetzten Innendrücker schon nach relativ kurzen Zeiträumen erhebliche Kavernenkonvergenzen einstellen, die allerdings in einem Spannungsfeld stattfinden, welches angesichts der besonderen Bedingungen dieser Kavernen schon wenige Tage nach dem Simulationsbeginn nahezu stationär ist. Am Simulationsbeginn steht dabei eine instantane Kavernenauffahrung mit anschließender instantaner Einstellung des Innendrucks auf dem jeweils vorgegebenen Druckniveau. Anschließend wird jeweils die Betriebsphase bis zum Erreichen des stationären Sekundärspannungszustands simuliert und im Anschluss wird die jeweilige Kaverne verschlossen und die eigentliche Simulation des druckgetriebenen Infiltrationsprozesses beginnt.

7.2 Retrospektive Analyse des Druckaufbauversuchs in Kaverne BAS-2

7.2.1 Modellgeometrie

Bild 7.1 zeigt das Berechnungsmodell für die Kaverne BAS-2 mit Gebirgsschichten und Diskretisierung.

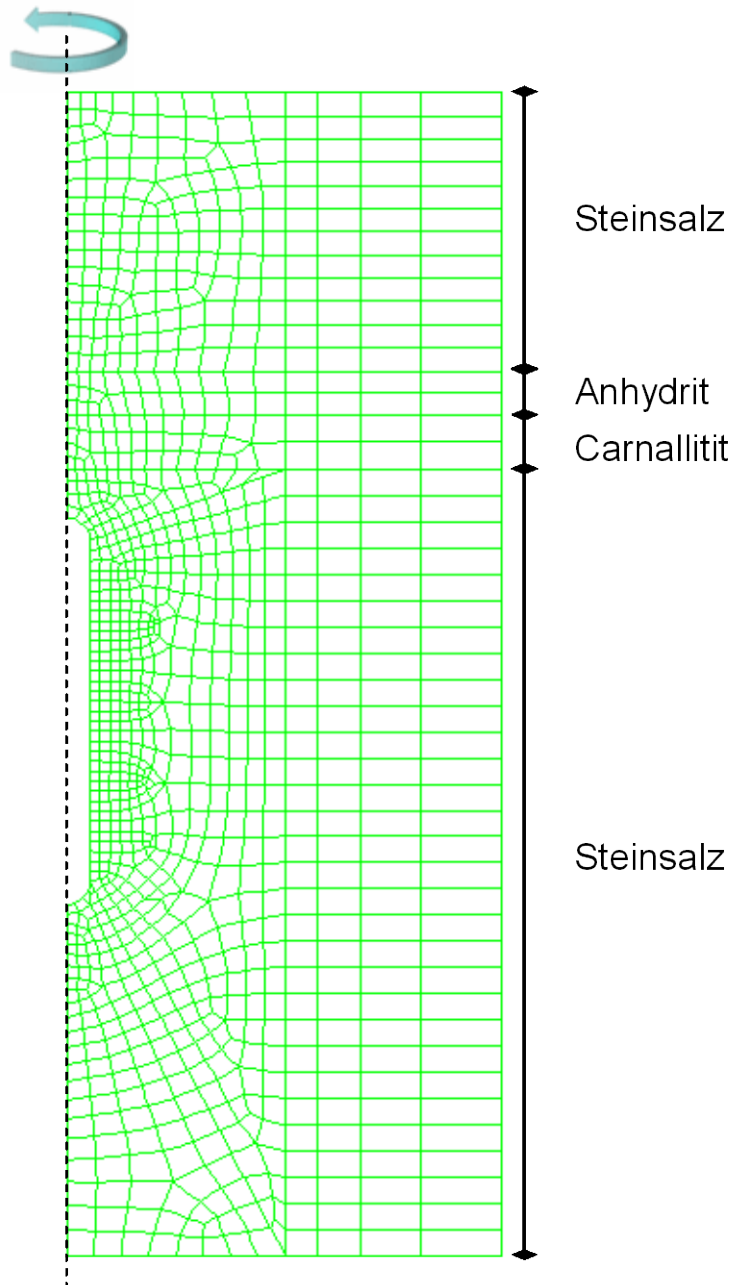


Bild 7.1 Diskretisiertes rotationssymmetrisches Berechnungsmodell für die Kaverne BAS-2

7.2.2 Berücksichtigung der Kavernenbetriebsphase

Die Kaverne BAS-2 ist während ihrer etwa 10-jährigen Betriebsphase mit einem Soledruck von $p_{Fl}(z = -2533 \text{ m}) = 340 \text{ bar}$ am Kavernendach gefahren worden. Die numerische Simulation der Betriebsphase hat gezeigt, dass etwa 20 Tage nach Simulationsbeginn ein stationärer Zustand bezogen auf das Sekundärspannungsfeld erreicht wird. Da sich das Spannungsfeld somit im weiteren Verlauf der Betriebsphase nicht mehr verändert, ist für die rechnerische Untersuchung der zeitlich-räumlichen Soleinfiltration aus der Kaverne in das umgebende Gebirge der Spannungszustand nach 20 Tagen Betriebsphase als Ausgangsspannungszustand angesetzt worden.

7.2.3 Simulationsergebnisse

Im Rahmen der retrospektiven Analyse des Druckaufbauversuchs in der Kaverne BAS-2 zur Einschätzung der lokationsspezifischen Infiltrationseigenschaften des an der Kaverne BAS-2 anstehenden Steinsalzes sind diverse Berechnungsvariationen durchgeführt worden. An dieser Stelle soll nur auf die abschließende Bestanpassung eingegangen werden, da nur die aus dieser Bestanpassung ermittelten Kennwerte für die numerische Simulation des langfristigen Verhaltens der Kaverne BAS-3 von Bedeutung sind.

Die Bestanpassung zeichnet sich durch die folgende Parameterkombination aus:

- Sekundärpermeabilität in der Infiltrationszone: $K^s = 3 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$
- Sekundärporosität in der Infiltrationszone: $\phi^s = 1 \%$
- Parameter a aus Gl. (6.9): $1,27 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$
- Parameter b aus Gl. (6.9): 4 MPa^{-1}

Der in Bild 5.4 dargestellte Druckversuch aus dem März 2009 weist nach Umrechnung auf das Teufenniveau des Kavernendachs der Kaverne BAS-2 eine Tangentialspannung von etwa $\sigma_t \approx 51 \text{ MPa}$ aus. Da sich anhand der Dichten des überlagernden Gesteins eine primäre Vertikalspannung von etwa $p_G = 54 \text{ MPa}$ ergibt und die Auffahrung der Kaverne sogar zunächst zu einer Erhöhung der Tangentialspannung führt, hat sich die Tangentialspannung am Kavernendach seit der Auffahrung der Kaverne demnach erheblich reduziert. Dieser Prozess konnte in der numerischen Simulation zwar qualitativ nachvollzogen werden, allerdings erhöht sich nach dem Verschluss der Kaverne die Tangentialspannung in den numerischen Simulationen unter Verwendung des Parametersatzes „Low Linear Creep“, der aus den in Abschnitt 5 dargestellten La-

borversuchen abgeleitet ist, bis zum Jahr 2009 immer bis auf das Primärspannungsniveau. Als Ursache dafür ist zu sehen, dass die Laborversuche nicht auf dem Niveau der im Bereich des Kavernendachs tatsächlich vorhandenen deviatorischen Belastung durchgeführt worden sind, sondern bei teilweise sehr viel größeren deviatorischen Belastungen. Das Kriechvermögen ist dadurch offenbar für die vorliegenden Spannungsverhältnisse überschätzt worden.

Da eine Parameteranalyse mit Blick auf das Kriechverhalten des Steinsalzes im zeitlichen Rahmen der Projektlaufzeit nicht möglich war, ist zur Anpassung der Berechnungsergebnisse an die Messergebnisse alternativ die Primärspannung um etwa $\Delta p_G \approx 3 \text{ MPa}$ abgesenkt worden. Zudem ist im Rahmen der Bestanpassung das Infiltrationskriterium in der Art modifiziert worden, dass eine druckgetriebene Fluidinfiltration stattfindet bei $(p_{Fl} - \min \sigma) > -0,5 \text{ MPa}$.

Der zentrale Aspekt bei der Reanalyse des Druckaufbauversuchs in der Kaverne BAS-2 ist das Nachvollziehen der gemessenen zeitlichen Soledruckentwicklung in der Kaverne entsprechend Bild 5.3. Für den Vergleich der Messwerte mit den Simulationsergebnissen ist der Kopfdruck an der 7"-Verrohrung auf das Soledruckniveau am Kavernendach der Kaverne BAS-2 umgerechnet worden. Bild 7.2 zeigt eine Gegenüberstellung des auf das Kavernendach umgerechneten gemessenen Soledrucks mit dem im Rahmen der Bestanpassung berechneten Soledruck am Kavernendach sowie die am Kavernendach berechnete Tangentialspannung.

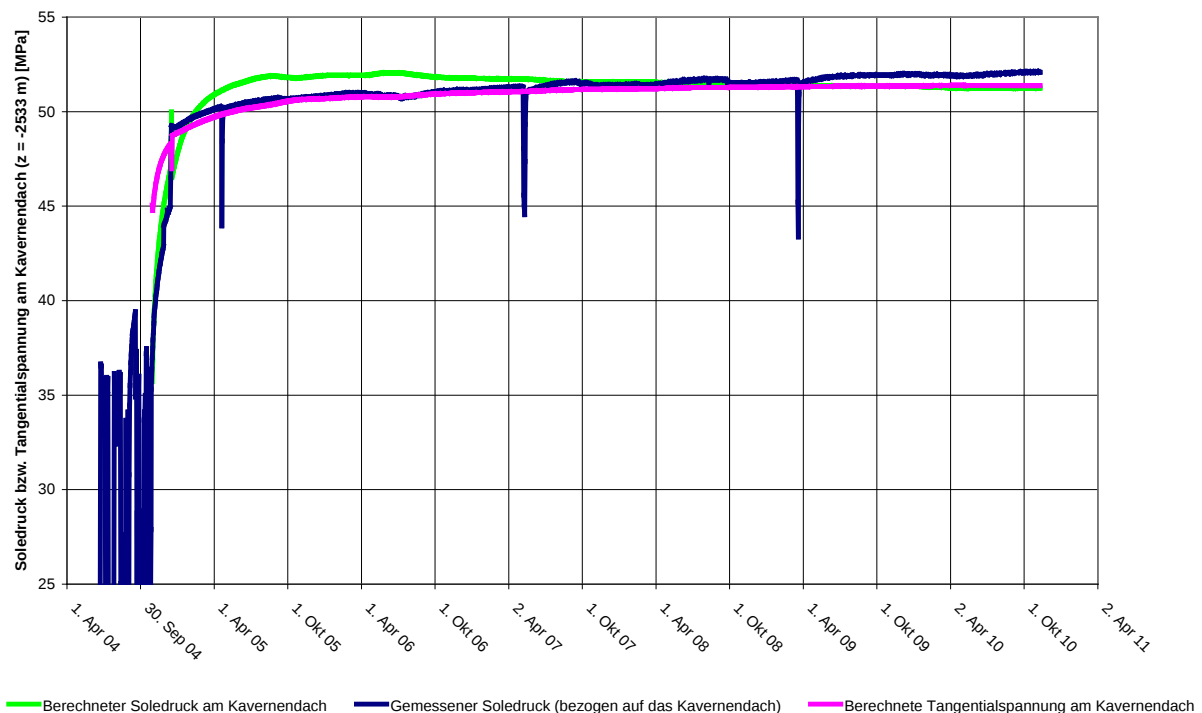


Bild 7.2 Gegenüberstellung des gemessenen und des berechneten Soledrucks am Kavernendach sowie der berechneten Tangentialspannung

Aus Bild 7.2 ist deutlich zu ersehen, dass die Tangentialspannung am Kavernendach nach Ende der Betriebsphase deutlich abgesenkt ist, sich allerdings schon innerhalb von etwa 2 Jahren nach Kavernenverschluss wieder bis auf das Niveau der Primärspannung (hier: $p_G = 51 \text{ MPa}$) erhöht. Der berechnete Soledruck steigt bedingt durch den relativ intensiv verlaufenden Temperatúrausgleich in den ersten 6 Monaten nach dem Kavernenverschluss sehr schnell an. Im weiteren Verlauf nimmt der Einfluss des Temperatúrausgleichs allerdings stetig ab und wird zudem noch überlagert durch einen infiltrationsbedingten Druckabbau, sodass kein weiterer Druckanstieg mehr berechnet wird. Vielmehr nähert sich der berechnete Soledruck am Kavernendach der berechneten Tangentialspannung an. Es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen konvergenzbedingtem Fluidruckaufbau und infiltrationsbedingtem Fluidruckabbau ein. Da sich der berechnete Soledruck der berechneten Tangentialspannung annähert und diese nicht über das Niveau der Primärspannung ansteigen kann, wird der gemessene leicht ansteigende Soledruck am Kavernendach mit zunehmender Berechnungsdauer immer stärker unterschätzt. Eine bessere Anpassung kann hier nur gelingen, wenn die Kriechparameter des Steinsalzes in einer Variationsanalyse derart angepasst werden, dass sich die berechnete Tangentialspannung am Kavernendach nahezu parallel zum gemessenen Soledruck am Kavernendach entwickelt.

Es ist allerdings zu erwarten, dass die Anpassung der Kriechparameter zu keiner signifikanten Änderung des berechneten zeitlich-räumlichen Infiltrationsverhaltens führen wird, da sich auch in diesem Fall der berechnete Soledruck am Kavernendach der dort anliegenden Tangentialspannung annähern wird. Da die Infiltrationsfrontpropagationsrate allerdings nur abhängt von der Differenz aus Fluiddruck und Minimalspannung, diese aber relativ ähnlich bleiben wird zu den in Bild 7.2 dargestellten Simulationsergebnissen, werden die übrigen Ergebnisse der numerischen Simulation ebenfalls relativ ähnlich bleiben.

Bild 7.3 zeigt die berechnete Infiltrationszone für den

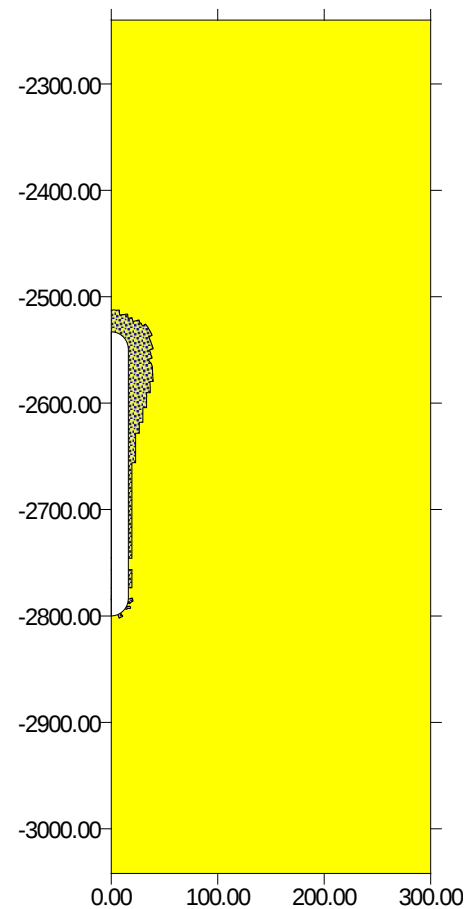


Bild 7.3 Berechnete Infiltrationszone für die Kaverne BAS-2 für den November 2010 (etwa 6 Jahre nach Kavernenverschluss)

November 2010, also etwa 6 Jahre nach dem Kavernenverschluss. Es ist zu ersehen, dass die Infiltrationszone sich vornehmlich am Kavernendach ausbildet, da dort die minimalen Hauptspannungen am niedrigsten sind. Mit zunehmender Teufe steigt die minimale Hauptspannung aufgrund des Dichteunterschiedes zwischen dem Salzgestein und der Sole schneller an als der Soledruck, sodass im unteren Kavernenbereich das Infiltrationskriterium nicht mehr erfüllt ist.

7.3 Prognose für die verschlossene Kaverne BAS-3

7.3.1 Modellgeometrie

Bild 7.4 zeigt das Berechnungsmodell für die Kaverne BAS-3 mit Gebirgsschichten und Diskretisierung.

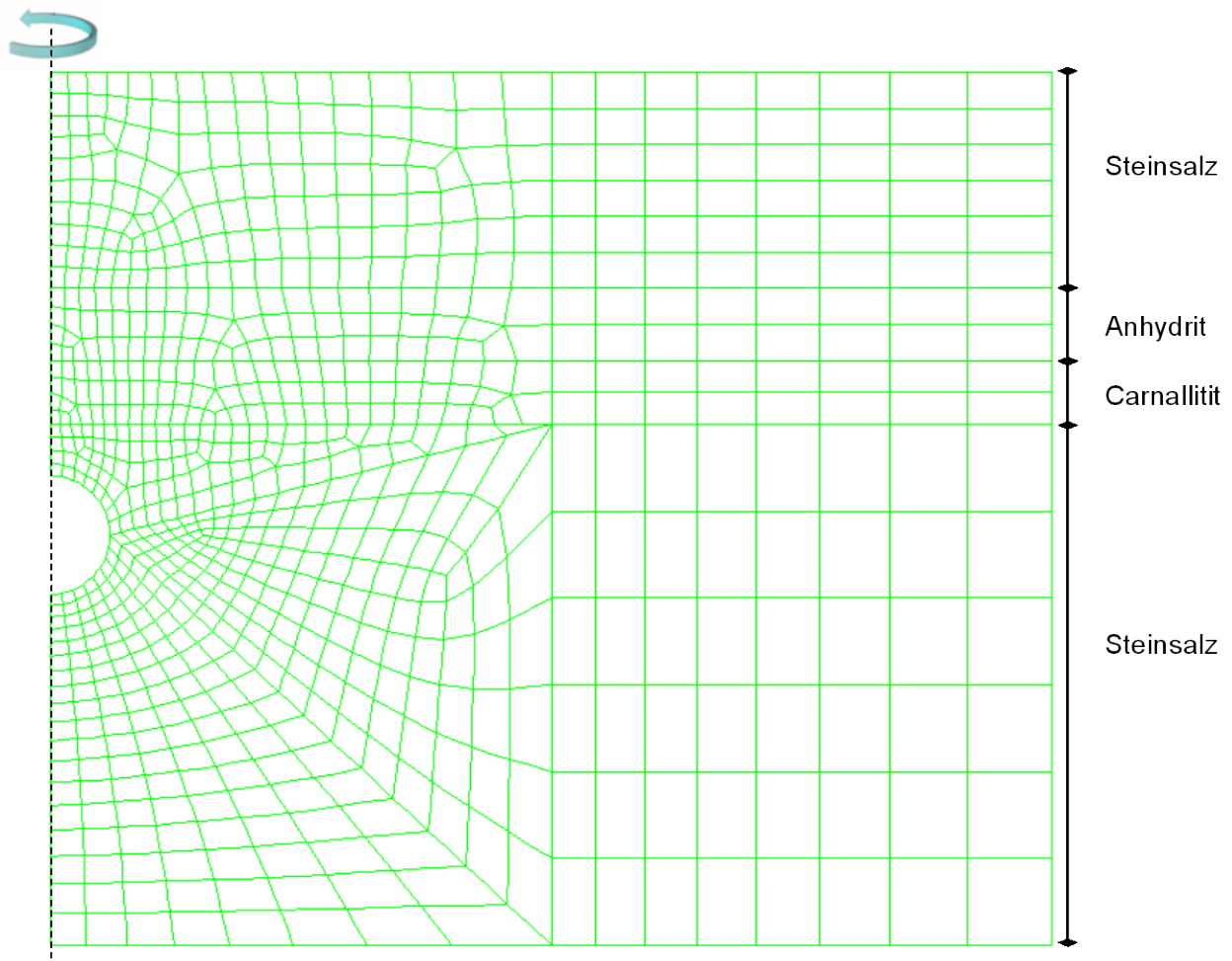


Bild 7.4 Diskretisiertes Berechnungsmodell für die Kaverne BAS-3

7.3.2 Berücksichtigung der Kavernenbetriebsphase

Die Kaverne BAS-3 ist während ihrer etwa 5-jährigen Betriebsphase mit einem Soledruck von $p_{Fl}(z = -2425 \text{ m}) = 350 \text{ bar}$ am Kavernendach gefahren worden. Die numerische Simulation der Betriebsphase hat gezeigt, dass rechnerisch etwa 100 Tage nach Simulationsbeginn ein stationärer Zustand bezogen auf das Sekundärspannungsfeld erreicht wird. Da sich das Spannungsfeld somit im weiteren Verlauf der Betriebsphase nicht mehr verändert, ist für die rechnerische Untersuchung der zeitlich-räumlichen Soleinfiltration aus der Kaverne in das umgebende Gebirge der Spannungszustand nach 100 Tagen Betriebsphase als Ausgangsspannungszustand angesetzt worden.

7.3.3 Simulationsergebnisse

Für die numerische Simulation des Langzeitverhaltens der verschlossenen solegefüllten Kaverne BAS-3 sind die in Abschnitt 7.2.3 beschriebenen Kennwerte verwendet worden, die aus der Bestanpassung bei der retrospektiven Analyse des Druckaufbauversuchs in der Kaverne BAS-2 ermittelt worden sind.

Bild 7.5 zeigt die zeitliche Entwicklung des Soledrucks am Kavernendach für die ersten 113

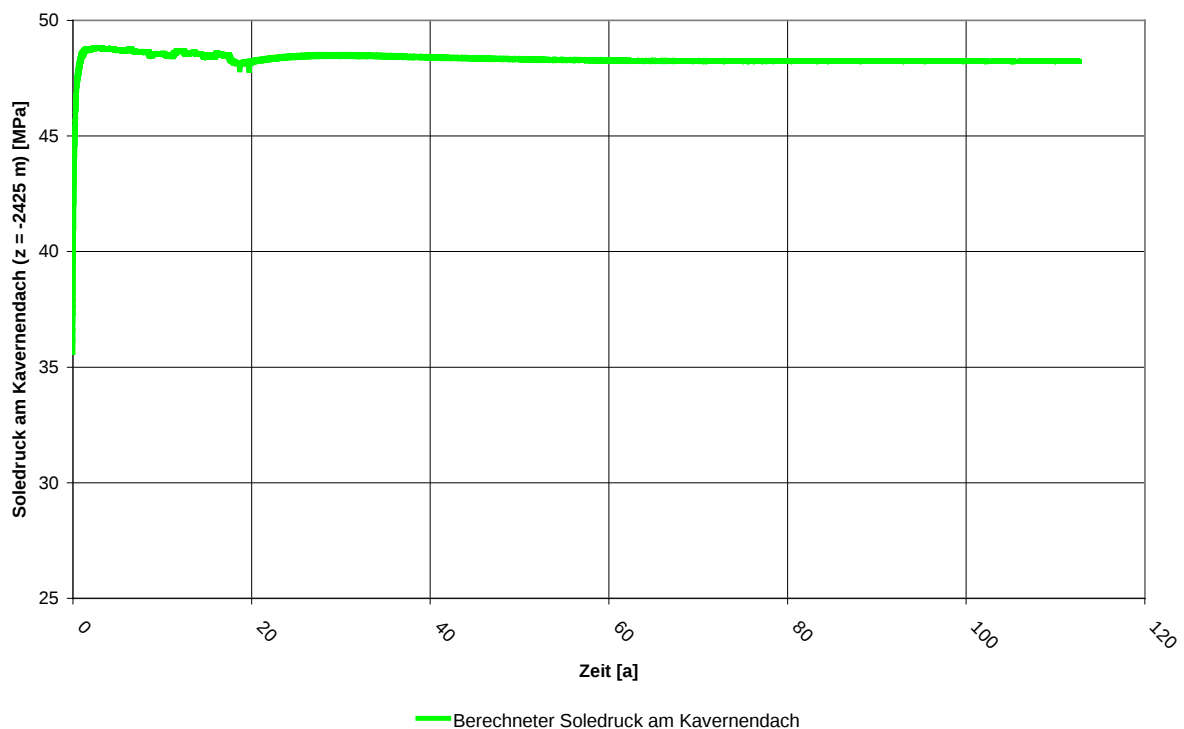


Bild 7.5 Zeitliche Entwicklung des Soledrucks am Kavernendach

Jahre nach Kavernenverschluss. Es ist deutlich zu ersehen, dass der Soledruck in den ersten Jahren nach dem Kavernenverschluss sehr schnell ansteigt bis auf etwa $48,8 \text{ MPa}$, sich dann aber im weiteren Verlauf wieder etwas reduziert und sich anschließend auf einem Niveau von $48,2 \text{ MPa}$ stabilisiert, da sich nunmehr ein Gleichgewichtszustand zwischen konvergenzbedingtem Soledruckaufbau und infiltrationsbedingtem Soledruckabbau einstellt. Der Einfluss aus der Wiedererwärmung der Sole ist nach ca. 40 Jahren nur noch marginal und weiter abnehmend. Damit nimmt auch das „Rauschen“ in den Berechnungsergebnissen ab, das in den ersten Jahren nach dem Kavernenverschluss zu beobachten ist. Das „Rauschen“ resultiert aus etwas zu großen numerischen Zeitschritten während des relativ intensiven thermisch bedingten Druckaufbaus in der Anfangszeit und des ebenfalls relativ intensiven infiltrationsbedingten Druckabbaus in der Anfangszeit.

Bild 7.6 zeigt die berechnete Infiltrationszone etwa 113 Jahre nach dem Kavernenverschluss. Zu diesem Zeitpunkt sind bereits etwa 30500 m^3 Sole aus der Kaverne in das umgebende Gebirge

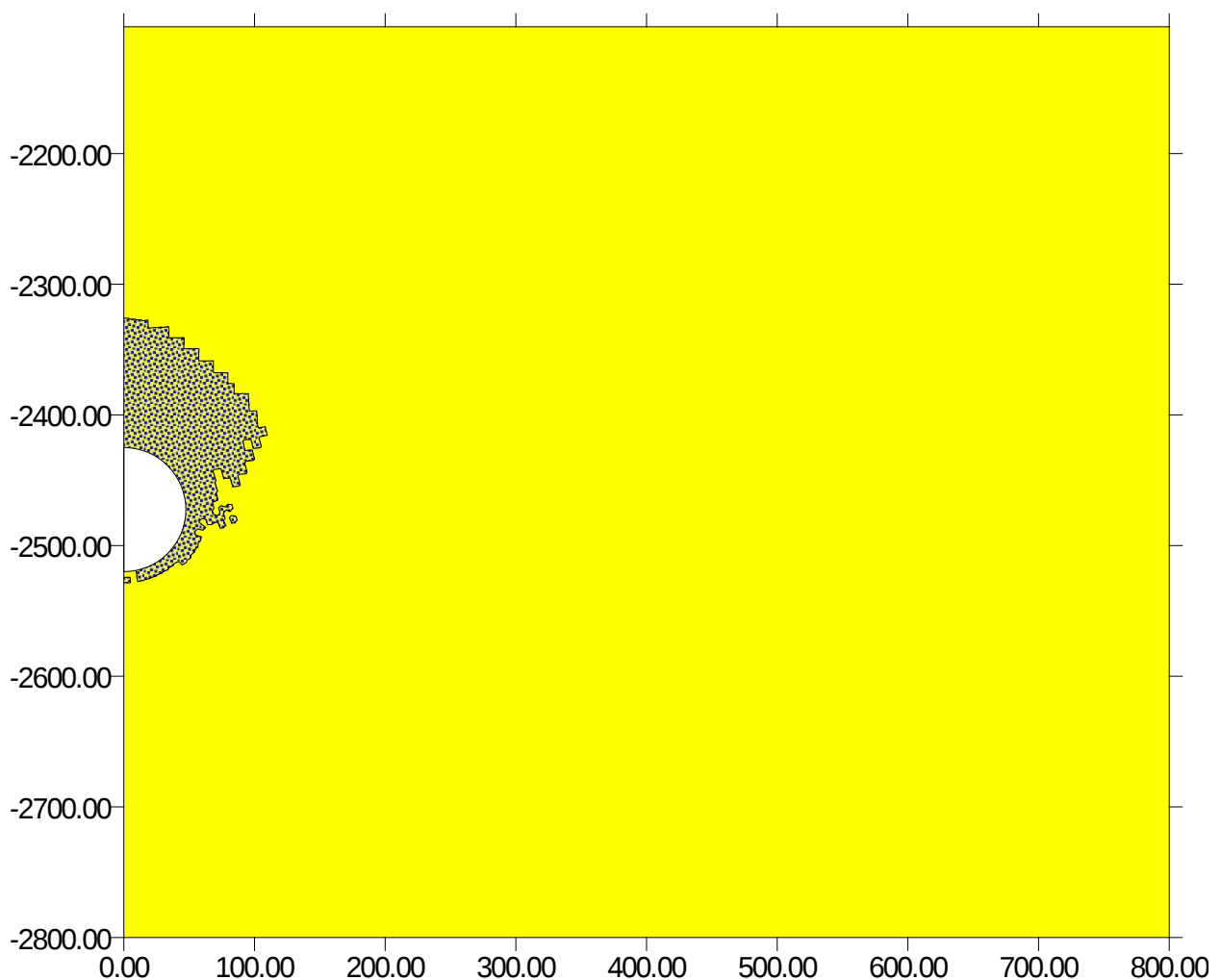


Bild 7.6 Berechnete Infiltrationszone etwa 113 Jahre nach Kavernenverschluss

infiltriert. Dabei bildet sich die Infiltrationszone zunächst sowohl über dem Kavernendach wie auch seitlich des Kavernendaches aus, konzentriert sich mit zunehmender Zeit allerdings mehr im Gebirgsbereich über dem Kavernendach. Die Entfernung zwischen der Spitze der Infiltrationsfront und dem Kavernendach beträgt etwa 100 m. Dieses Ergebnis ist auch aus Bild 7.7 zu ersehen, in dem die zeitliche Entwicklung der Infiltrationsfronttiefe dargestellt ist. Die Infiltrationsfront bewegt sich am Ende der Simulation mit einer leicht abnehmenden Rate von etwa 4 mm/a in Richtung Salzspiegel.

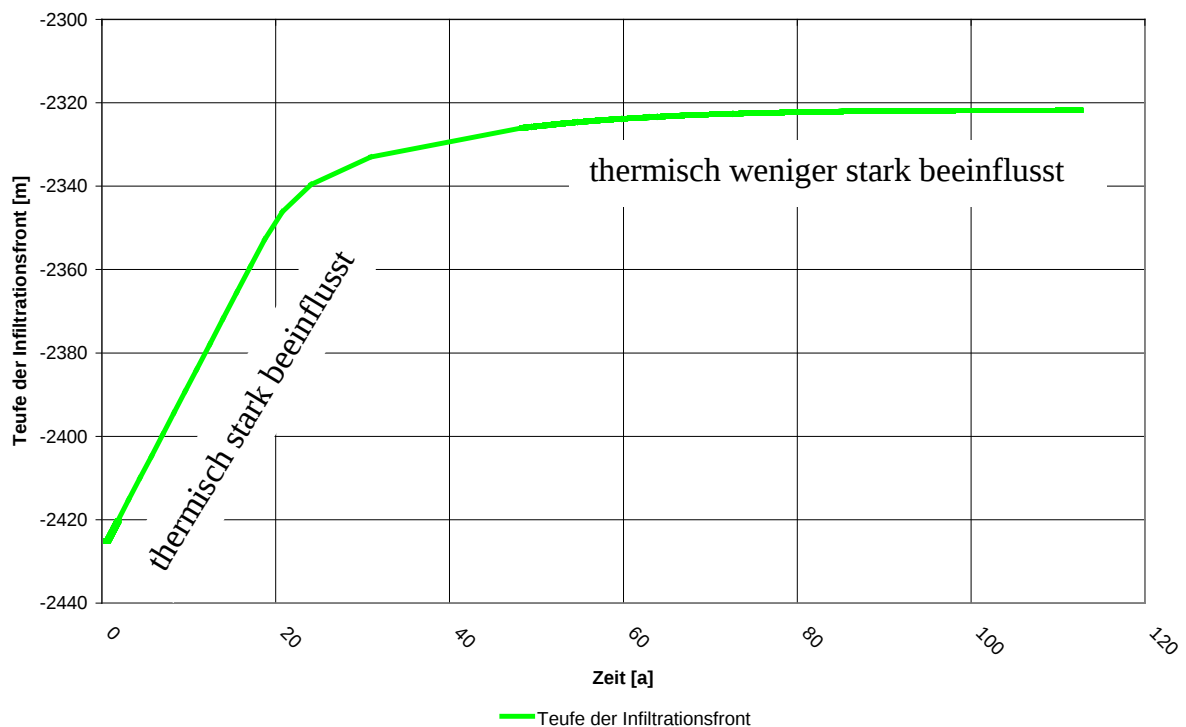


Bild 7.7 Zeitliche Entwicklung der Infiltrationsfronttiefe über dem Kavernendach

8 Zusammenfassung der Projektergebnisse

Im Rahmen der Stilllegungsplanung für die Kaverne BAS-3 der Firma FRISIA Zout sollte durch den Auftragnehmer unter Verwendung der am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal entwickelten Simulationssoftware MISES3-INFIL die konvergenzinduzierte zeitliche und räumliche Soleinfiltration aus der Kaverne BAS-3 in das anstehende Steinsalzgebirge untersucht werden.

Da keine laborativen Untersuchungen zur Charakterisierung der lokationsbezogenen Infiltrationseigenschaften des Steinsalzgebirges in der Umgebung der Kaverne BAS-3 zur Verfügung standen, diese Infiltrationseigenschaften jedoch auch nicht im Rahmen der Projektlaufzeit laborativ ermittelt werden konnten, musste eine Einschätzung der Infiltrationseigenschaften erfolgen. Hierzu ist zusätzlich eine retrospektive Analyse eines in der Kaverne BAS-2 durchgeführten Druckaufbauversuchs vorgenommen worden. Die im Rahmen dieses Druckaufbauversuchs erhaltenen Messwerte konnten durch die retrospektive Analyse nach umfangreichen Sensitivitätsanalysen unter Einbeziehung der thermisch bedingten Einflüsse auf den Druckaufbau in der Kaverne mit einer guten Übereinstimmung nachvollzogen und die erforderlichen Infiltrationskennwerte eingeschätzt werden.

Mit Hilfe der eingeschätzten Infiltrationseigenschaften ist dann eine Prognoserechnung zur zeitlichen und räumlichen Soleinfiltration aus der Kaverne BAS-3 in das anstehende Steinsalzgebirge durchgeführt worden. Dabei hat sich gezeigt, dass sich die Infiltrationsfront in den ersten Jahrzehnten nach dem Kavernenverschluss vornehmlich oberhalb, aber auch seitlich oberhalb der Kaverne relativ schnell ausbreitet und nach ca. 50 Jahren eine Teufe von ca. -2325 m und damit eine Ausdehnung vom Kavernendach aus gesehen von 100 m erreicht. Das allmähliche Abklingen der Temperatenausgleichsprozesse und die zunehmende Entfernung zwischen der Infiltrationsfront und der Kaverne führen im Lauf der Zeit allerdings zu einer signifikanten Reduzierung der Propagationsrate der Infiltrationsfront, so dass sich die Infiltrationsfront schon 100 Jahre nach dem Kavernenverschluss mit nur noch einer konstanten bzw. leicht abnehmenden Rate von etwa 4 mm/a in Richtung des Salzspiegels weiterbewegt. Die Berechnung ist nach dieser Simulationszeit abgebrochen worden. Eine konservative Extrapolation ergibt eine Infiltrationsfrontteufe von $z \approx -2320\text{ m}$ nach 500 Jahren. Der Salzspiegel wird bei der Infiltrationsrate von 4 mm/a nach ca. 55000 Jahren erreicht.

Es ist noch einmal abschließend darauf hinzuweisen, dass sowohl für die Simulation des Verhaltens der Kaverne BAS-2 wie auch für die Simulation des Verhaltens der Kaverne BAS-3 zur Beschreibung des Kriechverhaltens des Steinsalzes der Parametersatz „Low Linear Creep“ ver-

wendet worden ist. Die Ergebnisse von ergänzend durchgeführten und hier nicht dokumentierten numerischen Simulationen geben allerdings in Verbindung mit den gemessenen Innendruckverläufen und der diesbezüglichen Einschätzung des primären Gebirgsspannungszustandes einen Hinweis darauf, dass dieser Parametersatz das Kriechvermögen des Steinsalzes für Vergleichsspannungen $\sigma_v < 2 \text{ MPa}$ überschätzt. Demnach wird mit dem Parametersatz „Low Linear Creep“ auch die Kavernenkonvergenz überschätzt, die neben den ablaufenden Temperatúrausgleichsprozessen ein wesentlicher Antrieb für die Fluidinfiltration aus den Kavernen in das umgebende Gebirge darstellt. Da die Kriechrate beim Parametersatz „High Linear Creep“ für Vergleichsspannungen $\sigma_v < 2 \text{ MPa}$ sogar noch höher ist, wird das Kriechvermögen des Steinsalzes bei diesem Parametersatz noch stärker überschätzt.

Es bleibt an dieser Stelle offen, welchen quantitativen Einfluss eine überschätzte Kriechrate auf die Fluidinfiltration hat, da eine niedrigere Kriechrate auch Rückwirkung auf die aus der Reanalyse des Druckaufbauversuchs in der Kaverne BAS-2 erhaltenen Infiltrations- und Permeationsparameter hat. Qualitativ wird allerdings erwartet, dass eine überschätzte Kriechrate eher zu einer Überschätzung der Permeabilität in der Infiltrationszone geführt hat. Möglicherweise läuft somit der gesamte Infiltrationsprozess langsamer ab als es die bisherigen numerischen Simulationen ergeben haben. Eine abschließende Klärung dieser Hypothese würde weiterer Untersuchungen bedürfen. Sollte sich tatsächlich eine geringere Permeabilität für die Infiltrationszone ergeben, so wären die bisherigen numerischen Simulationen als konservativ einzuschätzen.