



**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

SVV

**Weiterentwicklung
eines Selbst Verheii-
lenden Versatzes
als Komponente im
Barriersystem Salinar**



**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

SVV

**Weiterentwicklung
eines Selbst Verhei-
lenden Versatzes
als Komponente im
Barriersystem Salinar**

Horst-Jürgen Herbert
Herbert Kull
Ingo Müller-Lyda

April 2005

Anmerkung:

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 02 C 0830 gefördert.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt alleine bei den Autoren.

**GRS - 220
ISBN 3-931995-90-9**

Vorwort

Die Abdichtung von Strecken in Untertagedeponien im Salz ist eine Forderung für den langfristigen sicheren Einschluss von radioaktiven aber auch chemisch toxischen Abfällen. Darüber hinaus sind aus bergtechnischer Sicht offene Grubenteile vor dem Zutritt von Wässern zu schützen, um die übertägigen Anlagen vor Bergschäden zu bewahren.

Im Rahmen des BMBF-Projektes 02 E 9047 wurde von der GRS ein Verfahren für den Einsatz von **Selbst Verheilenden Versatz** (SVV) entwickelt, das die langfristig sichere Verwahrung von Schadstoffen in untertägigen Deponien im Salinargestein unterstützt. Das beim Europäischen Patentamt unter der Nr. 00120249.8 angemeldete Verfahren sieht den Einsatz von Versatzmaterialien vor, die erst bei Zutritt von Lösungen ihre volle abdichtende Wirkung entwickeln. Die Übertragbarkeit, der dem Verfahren zugrunde liegenden Laborergebnisse auf die In-situ-Verhältnisse, wurden in dem Folgeprojekt 02 C 0830 untersucht, über dessen Ergebnisse hier berichtet wird.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung	1
2 Anwendungsbereiche für SVV	3
3 Prinzip der Selbstverheilung in Salzformationen.....	5
3.1 Selbstverheilung als natürliches Analogon	6
3.2 Magnesiumsulfat - haltiger Versatz	8
3.3 Geochemische Modellierung der Prozesse bei der Selbstverheilung von SVV und Vergleich mit experimentellen Befunden.....	8
4 Belastungsszenarien	15
4.1 Anfangsbedingungen	15
4.2 Grenzfälle für den Laugen- oder Wasserzutritt	17
4.3 Abschätzung des Kontaktdrucks nach der Reaktion.....	18
5 Experimentelle Untersuchungen - Upscaling.....	21
5.1 Upscaling-Versuche – Versuche auf unterschiedlichem Maßstab	21
5.2 Auslegung und Steuerung der Upscaling-Versuche	24
5.2.1 Einbringtechnik des Versatzes im Großmaßstab	25
5.3 Verwendete Materialien und Lösungen.....	27
5.4 Ergebnisse der Flutungsversuche.....	29
5.4.1 Labormaßstab	29
5.4.2 Technikumsmaßstab	31
5.4.3 Großbohrlochversuche.....	35

5.5	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse der Upscaling-Versuche	37
6	Rückbau der Großbohrlöcher und Nachuntersuchungen.....	38
6.1	Kernbohrungen	39
6.1.1	Großbohrloch GB-1 und GB-2	40
6.1.2	Großbohrloch GB-3	43
6.2	Kontaktbereich SVV/Gebirge (Fuge).....	44
6.3	Salzausblühungen im Bereich der Auflockerungszone (ALZ)	45
6.4	Nachuntersuchungen	46
6.4.1	Mechanische Eigenschaften von SVV im Vergleich mit Steinsalz	46
6.4.2	Hydraulische Eigenschaften der SVV-Matrix im Vergleich mit Salzgas	47
6.4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der Nachuntersuchungen	48
7	Schlussfolgerungen.....	49
	GLOSSAR	50
	Literatur	51

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	(links) Lösungsfreie Kainitlagen in der Grube Brefeld, weisen hin auf den abgeschlossenen Prozess einer natürlichen Abdichtung eines Lösungszutrittes (Brockt, 2001). (rechts) Durch den Bergbau reaktivierte Lösungszutritte in der Firste. Daneben Lagen aus Kainit, Blödit und primär gebildetem Epsomit.....	6
Abb. 3.2	JAENICKE-Diagramm (oberes Drittel): Kieseritisches Hartsalz und Lösungszusammensetzungen, die Bildung von sekundärem Kainit durch die Auflösung von Carnallit, Kieserit und Sylvin, den konstituierenden Mineralen von Carnallit und kieseritischem Hartsalz	7
Abb. 3.3	Röntgendiffraktogramme des SVV-Ausgangsmaterials (oberstes Diagramm) und der Reaktionsprodukte nach der Reaktion mit IP21 Lösung – Ergebnisse eines Laborversuchs in einem 1 m-Glasrohr in zunehmenden Abständen vom Ort der Lösungszufuhr.....	9
Abb. 3.4	Röntgendiffraktogramm der Reaktionsprodukte des Ausgangs-SVV (der gleiche wie in Abb. 3.3) mit einer Halit-Anhydrit gesättigten Lösung – Ergebnisse eines in-situ Experiments im Forschungsbergwerk ASSE in einem 15 m langen Bohrloch mit 50 cm Durchmesser.....	9
Abb. 3.5	Berechneter Reaktionspfad von SVV-Ausgangsmaterial (80 Vol.-% wasserfreies Magnesiumsulfat, 10 Vol.-% Sylvin und 10 Vol.-% Halit) mit IP21-Lösung	12
Abb. 3.6	Berechneter Reaktionspfad von SVV-Ausgangsmaterial (80 Vol.-% wasserfreies Magnesiumsulfat, 10 Vol.-% Sylvin und 10 Vol.-% Halit) mit einer NaCl-CaSO ₄ -gesättigten Lösung.....	13
Abb. 4.1	Alternative Belastungsszenarien mit einem langsamen (oben) und eines spontanen Pegelanstieges (unten).....	18
Abb. 4.2	Schema der Änderungen im System Versatz-Gebirge durch die Konsolidierung	19
Abb. 5.1	Getroffene Vorgaben und Annahmen für den Vergleich der Ergebnisse der Upscaling-Versuche.....	21

Abb. 5.2	Das Ansteigen des Laugendruckes spiegelt die Selbstabdichtung des Versatzes wider.....	22
Abb. 5.3	Einschätzung der hydraulischen Wirksamkeit von bevorzugten Wegsamkeiten innerhalb der konsolidierten SVV-Matrix nach HAGEN-POISEUILLE.	23
Abb. 5.4	Vereinfachte Darstellung A) der Konfiguration und B) der Steuerung der Upscaling-Versuche.	24
Abb. 5.5	(Bild links): Skizze zur Einbringtechnik in Druckrohren und Großbohrlöcher. (Bild rechts): Eingesetzte Besatzanlage, wie sie auch zum Besetzen von Sprengbohrlöchern eingesetzt wird.	25
Abb. 5.6	Versuchsstände und Konfiguration der Upscaling-Versuche: Labor (oben), Technikum (Mitte), in situ (unten).	26
Abb. 5.7	Technikumsversuche auf der 850-m-Sohle in der SchachtanlageASSE / Remlingen. Konfiguration der Rohrversuche E und F und der Großbohrlöcher GB-1 und GB-3.	27
Abb. 5.8	(Bild rechts): Aufbau der Druckrohre E und F.	27
Abb. 5.9	Sieblinien der verwendeten Ausgangsmaterialien.	28
Abb. 5.10	Feststoffsystem A: MgSO_4 , wasserfrei; Lösung Typ 1 (Serie 1).	30
Abb. 5.11	Feststoffsystem B: MgSO_4 , wasserfrei + KCl; Lösung Typ 2 (Serie 2).....	30
Abb. 5.12	Feststoffsystem A: MgSO_4 , wasserfrei; Lösung Typ 1 (Rohr A).....	32
Abb. 5.13	Feststoffsystem B: MgSO_4 , wasserfrei + KCl + NaCl; Lösung Typ 2 (Rohr B).....	32
Abb. 5.14	Feststoffsystem A: MgSO_4 , wasserfrei; Lösung Typ 1 (Rohr E).	34
Abb. 5.15	Feststoffsystem B: MgSO_4 , wasserfrei + KCl; Lösung Typ 2 (Rohr F).....	34
Abb. 5.16	Feststoffsystem A: MgSO_4 , wasserfrei; Lösung Typ 1 (GB-2).	36
Abb. 5.17	Feststoffsystem B: MgSO_4 , wasserfrei + KCl; Lösung Typ 2 (GB-1).	36

Abb. 5.18	Sequenz von Bildern mit Darstellung struktureller Ausbildung der konsolidierten SVV-Matrix. Die Flutung erfolgte von links nach rechts. Im rechten Bild ist innerhalb der festen Matrix eine bevorzugte Wegsamkeit zu erkennen, die mit Lauge gefüllt ist.	37
Abb. 6.1	(links): Versuchsstand unter Tage; Streckenstoß mit den Großbohrlöcher GB-1, GB-2 und GB-3. (rechts): Bohransätze zur Nachbeprobung von GB-1.	38
Abb. 6.2	(links): Steuerstand der NASOVIA-Bohranlage. (rechts): Ausbau des Kernrohres.	39
Abb. 6.3	(links): Bohrkrone und ausgebauter Kern. (rechts): Kern wird zur Lagerung in Folie eingeschweißt.	39
Abb. 6.4	(links): Staubentwicklung während des Bohrens. (rechts): Bei Anbohren einer Laugentasche vermischt sich die Lauge mit dem Bohrmehl und haftet als Bohrschlamm auf dem Kernrohr. Im weiteren Verlauf härtet der Bohrschlamm aus und bildet eine feste Kruste.	40
Abb. 6.5	Bohrprofil von GB-1a.	41
Abb. 6.6	Bohrprofil von GB-1b.	42
Abb. 6.7	Bohrprofil von GB-2a.	43
Abb. 6.8	Bohrprofil von GB-3a.	44
Abb. 6.9	(links): Bohrkern GB-1c mit der Kontaktzone von SVV/Gebirge aus dem Auflockerungsbereich der Strecke. (rechts): Querschnitt durch den Bohrkern.	45
Abb. 6.10	(links): Salzausblühungen am Streckenstoß (Auflockerungszone).	45
Abb. 6.11	Mechanischen Eigenschaften von SVV im Vergleich mit natürlichem Steinsalz.	46
Abb. 6.12:	Petrophysikalische Eigenschaften von SVV im Vergleich mit dem Verfestigungsverhalten von kompaktiertem Salzgus.	47

Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1	Bandbreiten der Parameter des Versatzes vor der Reaktion.....	16
Tab. 4.2	Bandbreiten der Parameter des Versatzes nach der Reaktion	16
Tab. 5.1	Maßstab der Upscaling-Versuche	22
Tab. 5.2	Chemische Zusammensetzung der verwendeten natürlichen Lauge	28

1 **Einleitung**

Der Begriff „Selbstverheilender Versatz“ (SVV) ist, außer in seiner Anwendung, als Verfahren ist nicht genau definiert. Dieses von der GRS beim Europäischen Patentamt unter der Nr. 00120249.8 angemeldete neue Verfahren / 19 / sieht insbesondere den Einsatz von Versatzmaterialien in zu verwahrenden Salzformationen vor. Gegenwärtig existiert für den SVV in Deutschland jedoch keine Norm, Richtlinie oder eine Prüfmethode, mit der ein ingenieur-technischer Nachweis geführt werden kann.

Die vorliegende Weiterentwicklung von **Selbst Verheilendem Versatz** (SVV) für den Nachweis der Abdichtung von Strecken in Untertagedeponien baut auf den Erkenntnissen des BMBF - Projektes 02 E 9047 auf. Ziel dieses Nachfolgeprojektes 02 C 0830 war es, die im Labormaßstab ermittelte hohe abdichtende Wirkung des SVV und seine hohe mechanische Stabilität durch großmaßstäbliche Versuche (Upscaling) zu überprüfen.

Dazu wurden auf der Grundlage von vorlaufenden Technikumsversuchen die abdichtende Wirkung von SVV - Mischungen gegenüber Lauge in situ in Großbohrlöchern im Forschungsbergwerk Asse / Remlingen getestet.

Zur theoretischen Absicherung der experimentellen Ergebnisse wurden unter Einbeziehung relevanter Belastungsszenarien die geochemischen Reaktionspfade (EQ 3/6) von Versatzmischungen und Lauge sowie die mechanischen Auswirkungen (ANSYS) von auftretenden Kristallisationsdrücken auf die Versatzintegrität modelliert.

Im Projekt speziell durchgeführte Arbeiten:

- Aufstellung relevanter Belastungsszenarien zur Ableitung eines Anforderungsprofils an den SVV.
- Experimenteller Nachweis der maßstäblichen Übertragbarkeit der:
 - hydraulischen Dichtwirkung,
 - mechanischen Festigkeit

2 Anwendungsbereiche für SVV

Die Beseitigung langzeitgefährlicher Abfälle (radiotoxisch oder / oder chemisch-toxisch) stellt ein allgemeines und nur zum Teil gelöstes Problem dar. Als umweltverträglichste Technik wird heute meist die Endlagerung bzw. Deponierung in untertägigen Hohlräumen angesehen. In Deutschland wird die Verbringung in Hohlräume (Abbaukammern, Strecken, Bohrlöcher und Kavernen) im Salz favorisiert. Zur Zeit bestehende oder geplante Entsorgungsbergwerke im Salz sind z. B. die Untertagedeponien (UTD) für chemisch-toxische Abfälle in Herfa - Neurode, Zielitz, Sondershausen, die geplante UTD Niedersachsen - Riedel, das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben, das geplante Endlager Gorleben und das Versuchsbergwerk Asse.

Für die nachhaltige Sicherung der Ökosphäre ist es erforderlich, die Abfälle langzeitsicher zu isolieren. Dies wird im Normalfall durch die bestehenden Verschlusskonzepte erreicht. Im Störfall, d. h. bei Zutritt von Grundwässern oder Salzlösungen kommt der Wasserpfad als möglicher Ausbreitungsweg für Schadstoffe in Betracht. Kommen diese wässrigen Störfalllösungen mit den eingelagerten Abfällen in Kontakt, kann ein Teil der Schadstoffe freigesetzt werden und zusammen mit der Lösung migrieren. Dies soll durch ein Multibarrieresystem verhindert werden.

Für untertägige Schadstoffdeponien und radioaktive Endlager im Salz sind daher zur Stabilisierung des Deckgebirges und zur Volumenreduzierung vor der Stilllegung Verfüllungsmaßnahmen der untertägigen Hohlräume, z. B. mit Salzversatz, vorgesehen. Für die Bewertung der eingesetzten Versatzstoffe werden vor allem gebirgsmechanische Kriterien verwendet. Ein abdichtendes Verhalten wird nur durch das konvergenzbedingte Verdichten des Versatzes im Laufe mehrerer Jahrhunderte erreicht. Ein Lösungszutritt innerhalb der gebirgsmechanischen aktiven Phase kann daher nicht verhindert werden, obwohl er gerade da am wahrscheinlichsten ist.

Zutretende Lösungen könnten durch den relativ permeablen Versatz bis zu den Schadstoffen vordringen, diese auslaugen und von der Gebirgskonvergenz und evtl. Gasproduktion mit samt ihrem Schadstoffinhalt ausgepresst werden.

Um diesen Schadstofftransport weitestgehend zu verhindern, werden insbesondere für Endlager radioaktiver Abfälle, aufwendige und entsprechend teure Dammbauwerke vorgesehen. Diese haben jedoch den Nachteil, dass sie bei einmaligem Versagen ihre

Wirkung verlieren. Ursachen, die zum Versagen führen können, sind z. B. nicht vorhandener Kraft- und/oder Formschluss zum Gebirge, spannungsbedingte Rissbildung, Permeabilitätserhöhung durch thermodynamisch nicht stabile Baustoffe sowie nicht ortsstabile Dichtungsmaterialien.

Durch die Kombination vorhandener Verschlusssysteme mit Selbst Verheilenden Versatz sollen auch diese Rest-Unsicherheiten langfristig ausgeschlossen werden.

3 Prinzip der Selbstverheilung in Salzformationen

Zur Selbstverheilung von mineralogisch konditioniertem Salzversatz führen geochemische Reaktionen, bei denen das Wasser einer zutretenden Lösung in das Kristallgitter von Salzmineralien langfristig stabil eingebaut wird. Bei diesem dynamischen Prozess wird der Lösung kontinuierlich Wasser entzogen und dies letztlich ganz verbraucht. Durch den Wasserverbrauch kommt es nicht nur zur Mineralumbildung (Hydratisierung von ursprünglich wasserfreiem MgSO_4) sondern auch zur Mineralneubildung durch Ausfällung gelöster Stoffe durch Übersättigung. Die Vergrößerung des Feststoffvolumens führt bei vollständiger Reaktion zum Verschließen der hydraulischen Wegsamkeiten.

Für eine Anwendung kommen prinzipiell alle Materialien in Betracht, die mit der jeweiligen geologischen Umgebung artverwandt sind und entsprechende gleichartige Reaktionsprodukte bilden. Speziell für Salzformationen sind es konditionierte Salze bzw. Reaktionstypen:

1. $\text{H}_2\text{O} + \text{Salz} \rightarrow \text{hydratisiertes Salz}$
2. $\text{gelöstes Ion} + \text{Salz} \rightarrow \text{Doppelsalz}$
3. $\text{H}_2\text{O} + \text{gelöstes Ion} + \text{Salz} \rightarrow \text{hydratisiertes Doppelsalz}$

Alle vorstehenden Reaktionstypen nutzen die Volumenvergrößerung des Feststoffanteils durch Reaktion mit den Störfalllösungen. Bei der Reaktion werden Salzhydrate, Doppelsalze oder höhere Salze gebildet. Durch den Verbrauch des Lösemittels Wasser wird die Restlösung übersättigt und scheidet die in der Lösung enthaltenen gelösten Salze und Salzneubildungen im Porenraum aus. Dabei können weitere erhebliche Mengen Wasser als Kristallwasser im Feststoff gebunden werden. Dies bewirkt eine zunehmende Reduzierung des lösungserfüllten Porenraums, was den Abdichtungsvorgang verstärkt. Die Reaktion kann soweit fortschreiten, dass es zu einem vollständigen Verbrauch der Lösung und damit zur vollständigen Verfestigung mit der Ausbildung eines „trockenen“ Verschlussstopfens kommt. Finden diese Prozesse in einem abgeschlossenen Volumen statt, kommt es nicht nur zu einem vollständigen Verschluss des ursprünglichen Porenraums im Versatz, sondern darüber hinaus zu einem Druckaufbau. Dieser kann seinerseits zu einem Verschließen von Wegsamkeiten in der Auflockerungszone führen. Damit ist der selbstverheilende Salzversatz eine echte Alternati-

ve zu bisher verwendeten Bau- und Verschlussmaterialien, er ist langzeitstabil und als einziges Material hat er zudem das Potential auch die Auflockerungszone zu verschließen.

3.1 Selbstvereilung als natürliches Analogon

Ein Beispiel für eine natürliche Selbstabdichtung von Lösungszutritten im Salz ist der autochthon gebildete Kainit. In der Natur ist das Kalisalz Kainit kein primäres Salzmineral in der üblichen evaporitischen Eindampfungsabfolge, sondern er entsteht durch lösungsmetamorphe Umbildung aus Carnallit und Hartsalz in Folge der Einwirkung von komplexen gesättigten Salzlösungen. Im Flankenbereich von Salzlagerstätten (Kali-bergwerk Siegfried I / Vogelbeck) oder unmittelbar über dem Carnallit (ZINCKEN, 1865) weisen Lagen von Kainit auf aktive hydraulische lösungsführende Wegsamkeiten hin, die später verschlossen wurden.

Bei der mineralogischen Untersuchung von Mineralparagenesen in der Grube BRE-FELD wurden neben sekundär gebildetem Kainit auch die Sulfatminerale (Kieserit, Pentahydrat, Hexahydrat, Epsomit) nachgewiesen (Brockt, 2001), wie sie bei der Selbstabdichtung eines auf Magnesiumsulfat (wasserfrei) aufbauenden Salzversatzes entstehen.

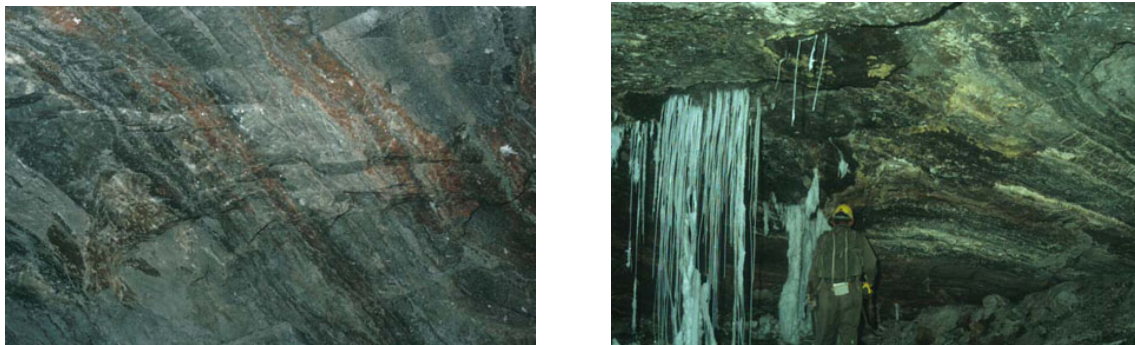


Abb. 3.1 (links) Lösungsfreie Kainitlagen in der Grube Brefeld, weisen hin auf den abgeschlossenen Prozess einer natürlichen Abdichtung eines Lösungszutrittes (Brockt, 2001). (rechts) Durch den Bergbau re-aktivierte Lösungszutritte in der Firste. Daneben Lagen aus Kainit, Blödit und primär gebildetem Epsomit.

Der Kainit entsteht bei der Auflösung von Hartsalz durch Carnallit und/oder Reaktion mit einer Salzlösung beliebiger Zusammensetzung (HERBERT, 1982). Einzige Vor-

bedingung (der Motor) für die Umwandlung von Hartsalz (und/oder Carnallit) in Kainit ist jedoch eine Untersättigung der Lösung an Magnesiumsulfat (Kieserit). Dabei entsteht neben Kainit eine Q-Lösung (bei Hartsalzauflösung) oder eine R-Lösung (bei Carnallitauflösung). Mit der Auflösung von Kieserit (eine Komponente sowohl von Hartsalz als auch von Carnallit) wird zusätzlich ein Wassermolekül frei. Aus der jetzt an Magnesium und Kalium übersättigten Lösung re-kristallisiert Kainit mit drei Wassermolekülen aus, so dass in der Bilanz der Lösung Wasser entzogen wird und das Feststoffvolumen sich vergrößert. Bei einem begrenzten Lösungszutritt wird das Hartsalz in Kainit umgewandelt und die Wegsamkeit, die zum Lösungszutritt führte verschlossen.

Bedingungen für begrenzte Hartsalzauflösung

1. Beschränktes Lösungsvolumen
2. Abdichtung der Lösungspfade
3. Q-Lösung

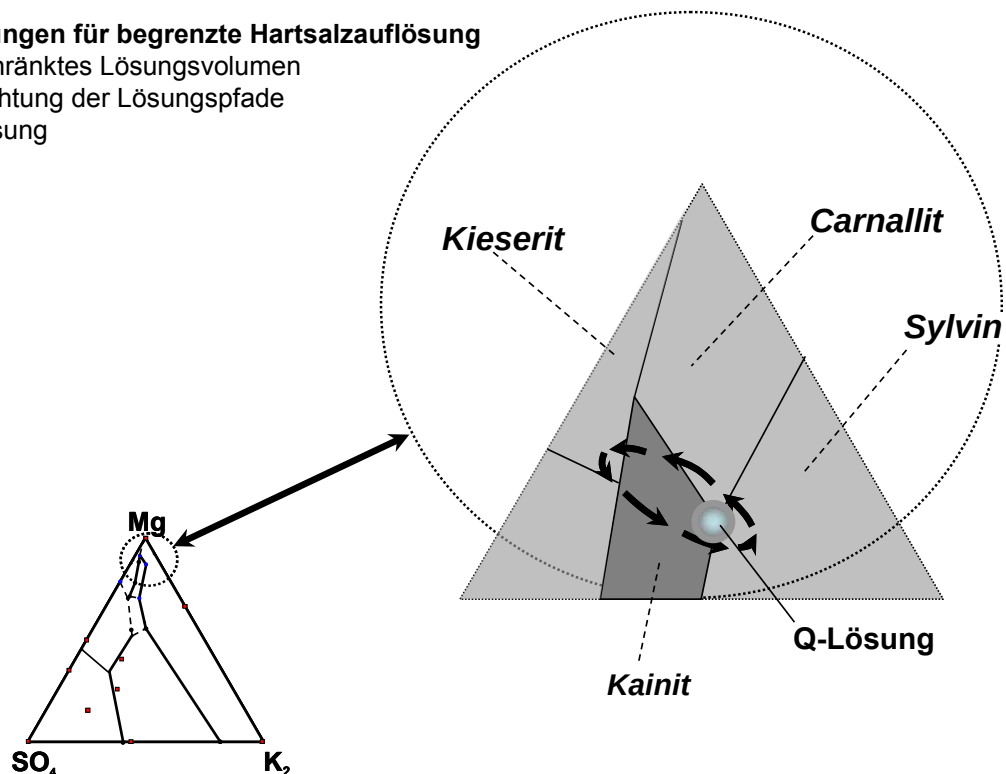


Abb. 3.2 JAENICKE-Diagramm (oberes Drittel): Kieseritisches Hartsalz und Lösungszusammensetzungen, die Bildung von sekundärem Kainit durch die Auflösung von Carnallit, Kieserit und Sylvinit, den konstituierenden Mineralen von Carnallit und kieseritischem Hartsalz

Die technisch zu realisierende „Selbstverheilung“ baut phänomenologisch auf dem Prinzip der „Kainitisierung“ auf. Wie bei der Kainitisierung wird bei der Selbstverheilung von Magnesiumsulfat (calciniert / wasserfrei) das Wasser durch Einbau ins Kristallgitter der Reaktionslösung entzogen.

3.2 Magnesiumsulfat - haltiger Versatz

Beim Zutritt von Lösungen in einen MgSO_4 -haltigen Versatz treten verschiedene Reaktionen auf. Die erste Reaktion ist die Bindung des Wassers als Kristallwasser, die durch die hohe Affinität des wasserfreien MgSO_4 zu Wasser sehr schnell abläuft. Die zweite Reaktion ist die Auflösung des MgSO_4 bis zur Sättigung des im jeweiligen System geringstlöslichen SO_4 -haltigen Salzes. Drittens kommt es zu Mineralum- und -neubildungen bei Zunahme der Mg-Konzentration bei gleichzeitigem Wasserverbrauch. Durch den Wasserentzug wird die anstehende Lösung an den gelösten Salzen übersättigt, so dass diese zum Teil mit weiterem Wasserentzug durch Einbau von Kristallwasser, wie z. B. Bischoffit, auskristallisieren.

Betrachtet werden müssen also:

- Lösevorgänge,
- Mineralneu- und -umbildungen,
- Bindung von Wasser als Kristallwasser,
- sich ergebende Volumenbilanz,
- Änderung der Versatzporosität und -permeabilität.

Problembereiche im Salinar, die zu Lösungszutritten führen können, sind z.B. Kluftzonen und lithologische Grenzen. Diese sind häufig auch Feuchtzonen.

3.3 Geochemische Modellierung der Prozesse bei der Selbstverheilung von SVV und Vergleich mit experimentellen Befunden

Abb. 3.3 und Abb. 3.4 zeigen die Röntgendiffraktogramme eines SVV-Materials vor während und nach der Reaktion mit IP21- (Abb. 3.3) und gesättigter NaCl-Lösung (Abb. 3.4) sowie die gebildeten Reaktionsprodukte. Das SVV-Ausgangsmaterial bestand aus 80 Vol.-% wasserfreiem Magnesiumsulfat, 10 Vol.-% Sylvin (KCl) und 10 Vol.-% Halit (NaCl). Die IP21-Lösung ist eine MgCl_2 reiche Salzlösung, die an den Mineralen Halit, Carnallit, Sylvin, Kainit und Polyhalit gesättigt ist. Die NaCl-Lösung war an Halit und Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ bzw. Anhydrit (CaSO_4) gesättigt.

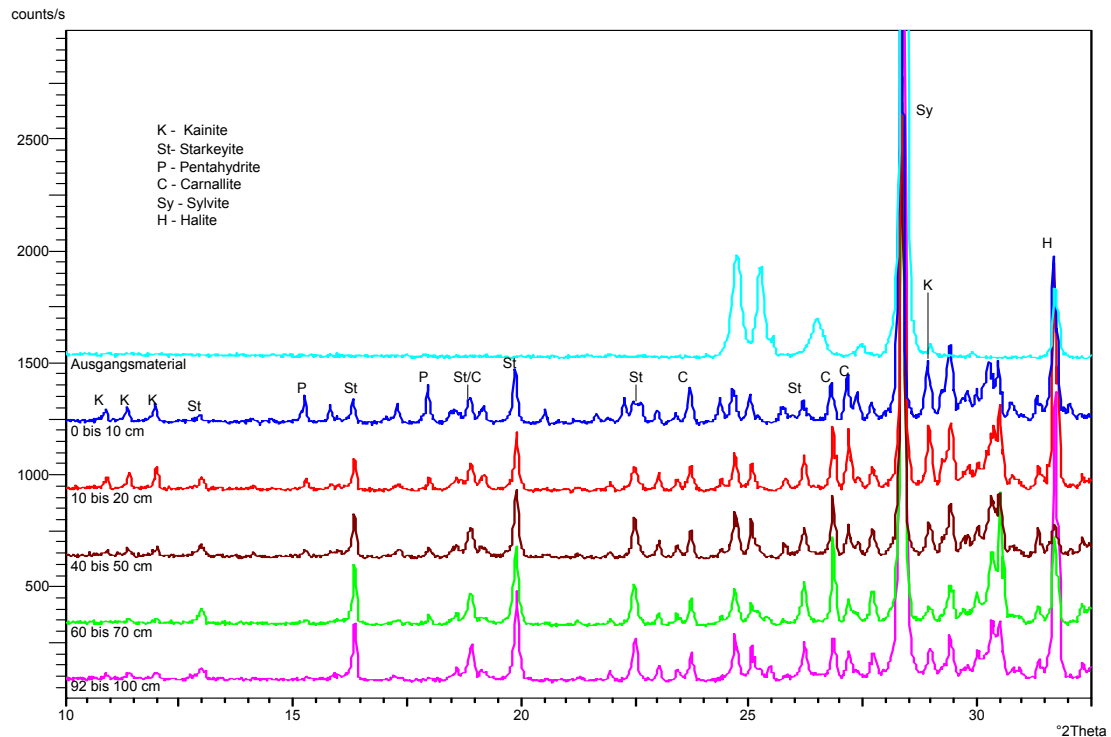


Abb. 3.3 Röntgendiffraktogramme des SVV-Ausgangsmaterials (oberstes Diagramm) und der Reaktionsprodukte nach der Reaktion mit IP21 Lösung – Ergebnisse eines Laborversuchs in einem 1 m-Glasrohr in zunehmenden Abständen vom Ort der Lösungszufuhr

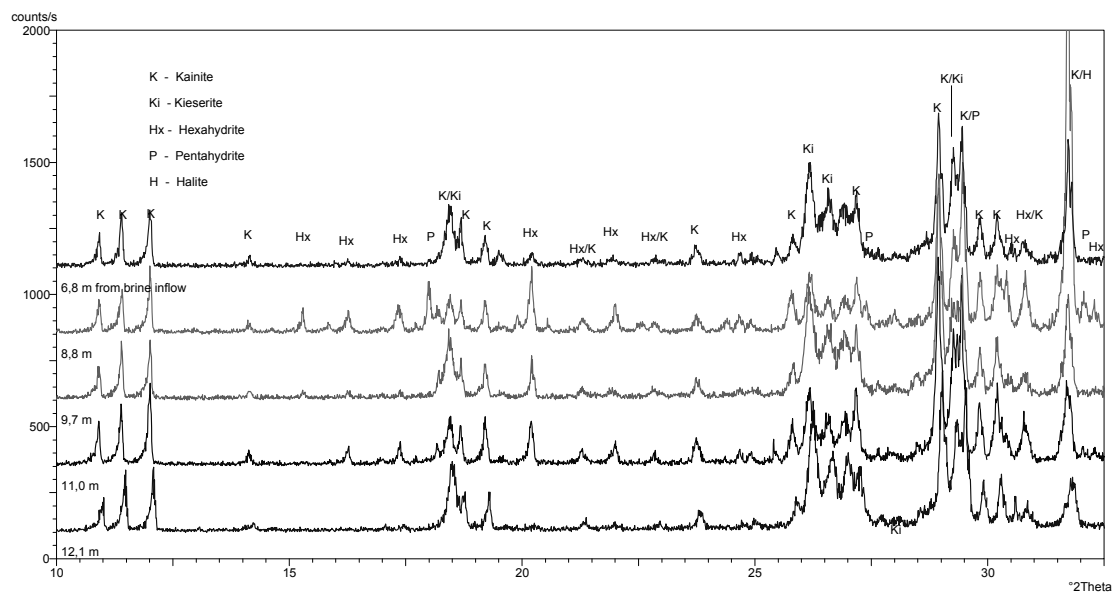


Abb. 3.4 Röntgendiffraktogramm der Reaktionsprodukte des Ausgangs-SVV (der gleiche wie in Abb. 3.3) mit einer Halit-Anhydrit gesättigten Lösung – Ergebnisse eines in-situ Experiments im Forschungsbergwerk ASSE in einem 15 m langen Bohrloch mit 50 cm Durchmesser

Die ersten beiden Peaks kurz vor und nach 25 Grad 2-Theta im SVV-Ausgangsmaterial (oberstes Diagramm) gehören zum MgSO_4 -wasserfrei. Während der Reaktion mit IP21-Lösung werden diese Peaks kleiner, verschwinden aber nicht ganz. Das heißt, dass MgSO_4 -wasserfrei durch die Reaktion zwar zu großen Teilen verbraucht wird, aber nicht vollständig. Die zugetretene IP21-Lösungsmenge hat dafür nicht ausgereicht. Das SVV-Material bleibt demzufolge auch nach Verbrauch der gesamten eingedrungenen Lösungsmenge noch reaktiv. Der nicht verbrauchte Anteil MgSO_4 -wasserfrei kann bei weiterem Lösungszutritt noch weiter reagieren. Der ursprünglich im Ausgangsmaterial vorhandene Sylvinit nimmt an der Reaktion nicht merklich teil. Die Höhe des Sylvinitpeaks bleibt in allen Diagrammen annähernd gleich hoch. Dagegen steigt der Halitpeak an, was die zusätzliche Halitbildung während der Reaktion belegt. Während der Reaktion bilden sich, wie die unteren Diagramme in Abb. 3.3 zeigen, die Minerale Kainit ($\text{KClMgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), Starkeit ($\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), Pentahydrat ($\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) und Carnallit ($\text{KClMgCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Die drei Kainitpeaks zwischen 11 und 14 Grad 2-Theta sind im Bereich des Lösungszutritts am höchsten, weil da die Verweildauer der Lösung am längsten war (durch ständig nachfließende Lösung). Sie sind aber in allen anderen Diagrammen auch deutlich erkennbar und ein Beleg dafür, dass die Neubildung von Kainit, wie oben beschrieben eine deutliche Rolle spielt. Die Volumenvergrößerung, während der fortschreitenden Reaktion, ist neben der Bildung von Kainit besonders auch auf die Bildung der metastabilen MgSO_4 -Hydrate Starkeit (vier Moleküle Hydratwasser) und Pentahydrat (fünf Moleküle Hydratwasser) und teilweise auch auf die Bildung des stabilen Carnallits (mit sechs Molekülen Hydratwasser) zurückzuführen. Bei dieser Reaktion wurde experimentell die Bildung des MgSO_4 -Hydrats Hexahydrat (mit sechs Molekülen Kristallwasser) nicht beobachtet.

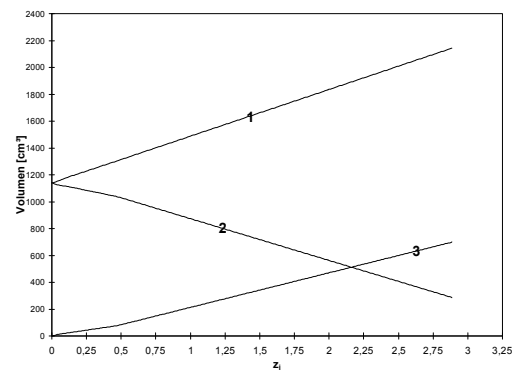
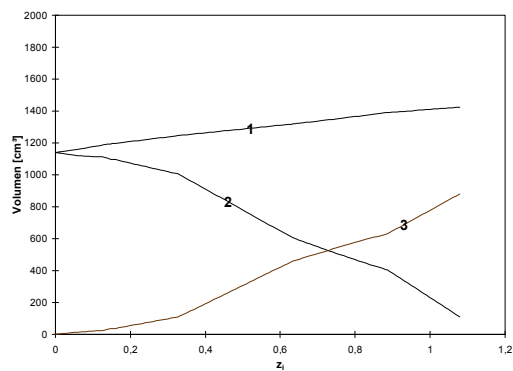
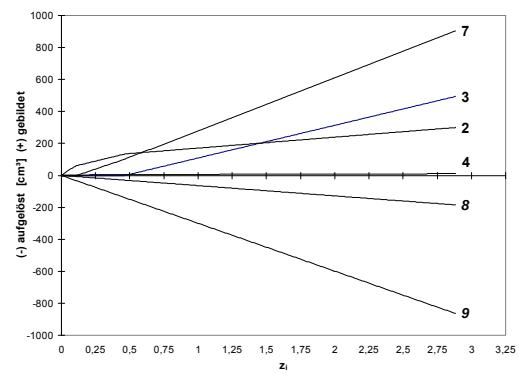
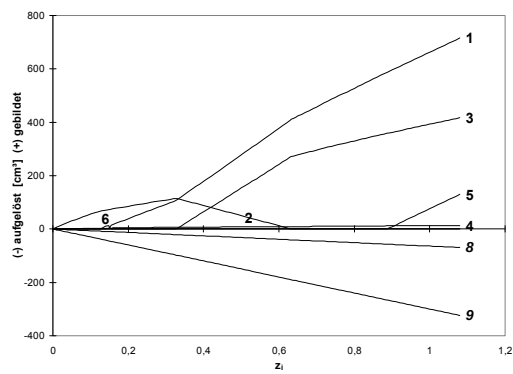
Eine sehr ähnliche Mineralparagenese bildet sich, wenn das gleiche SVV-Ausgangsmaterial mit einer völlig anderen Lösung, nämlich einer NaCl - CaSO_4 -gesättigten Lösung zusammentrifft (S. Abb. 3.4). Auch in diesem Fall bilden sich die Minerale Kainit und Pentahydrat. Hier tritt auch Hexahydrat auf, dafür fehlt Starkeit. Carnallit fehlt auch, da nicht so viel MgCl_2 im System vorhanden ist, wie bei der Reaktion mit der MgCl_2 -reichen IP21-Lösung. Auch bei der Reaktion mit der NaCl -Lösung kommt es zum vollständigen Wasserverbrauch und der Volumenvergrößerung.

Einen tieferen Einblick in die einzelnen Abläufe der beiden beobachteten Reaktionen geben geochemische Modellrechnungen. Abb. 3.5 und 3.6 zeigen die Ergebnisse der geochemischen Modellierung der beiden Reaktionen mit EQ3/6 mit der HMW-

Datenbasis bei 25 °C. Modelliert wurde jeweils der metastabile (linke Seite) und der stabile Reaktionspfad (rechte Seite).

Die Röntgenaufnahmen der Reaktionsprodukte der Reaktionen mit den beiden Lösungen haben gezeigt, dass sich kurzfristig (im Beobachtungszeitraum) neben stabilen Mineralneubildungen metastabile MgSO_4 -Hydrate wie Starkeit, Pentahydrat und Hexahydrat bilden. Darum wurde rechnerisch auch dieser Pfad betrachtet um die Übereinstimmung von experimentellen Ergebnissen und geochemischen Modellrechnungen zu überprüfen. Es zeigt sich, dass die in den Röntgendiagrammen beobachteten Minerale alle auch in den Modellrechnungen auftauchen. Das zeigt, dass die Modellrechnungen belastbar sind und auch für Volumenbilanzen herangezogen werden können. Zudem zeigen die Modellrechnungen auch Details der Reaktionen auf, die im Experiment nicht beobachtbar sind, da die Röntgenaufnahmen Augenblicksaufnahmen einer Reaktion darstellen, der sich in einem kontinuierlichen Verlauf (sprich Veränderung) befinden. Mit anderen Worten, wenn Minerale im Röntgendiagramm nicht zu sehen sind, heißt das nicht, dass vom Programm falsch gerechnet wurde, sondern nur, dass die Reaktion zum Zeitpunkt als die Röntgenaufnahme gemacht wurde, die Stabilitätsbereiche einiger Minerale bereits verlassen hat (diese Minerale waren kurzfristig da, auch in der real abgelaufenen Reaktion, sind aber wieder verschwunden, z.B. Bloedit und Leonit in der Reaktion mit NaCl-Lösung) und die Stabilitätsbereiche anderer Minerale noch nicht erreicht worden.

Allgemein ist festzustellen, dass in beiden Reaktionen, mit beiden Lösungen neben metastabilen Mineralen wie Halit, Kainit große Mengen metastabiler MgSO_4 -Hydrate gebildet werden (sowohl in den Röntgendiagrammen als auch in den Rechnungen). Bekannt ist weiterhin, dass sich metastabile Phasen schneller bilden, aber später in stabile Phasen umgewandelt werden. Die stabile Phase der MgSO_4 -Hydrate ist der Kieserit. Um eine Kieseritbildung, die aus Zeitgründen experimentell nicht beobachtbar ist, zu simulieren, wurden in den Modellrechnungen die metastabilen MgSO_4 -Hydrate unterdrückt. Dadurch wurde erreicht, dass in den Rechnungen stabile Paragenesen berechnet werden, die im Langzeitgleichgewicht mit dem Salzgebirge stehen und sich daher nicht mehr verändern können. Auch diese Rechnungen sind, ebenso wie die daraus resultierenden Volumenbilanzen, belastbar.



Metastabiler Reaktionpfad

Stabiler Reaktionpfad

oben

1 = Starkeite	2 = Kainit	3 = Carnallit	4 = Halit	5 = Bischofit
6 = Hexahydrit	7 = Kieserit	8 = Sylvin	9 = MgSO ₄ -wasserfrei	

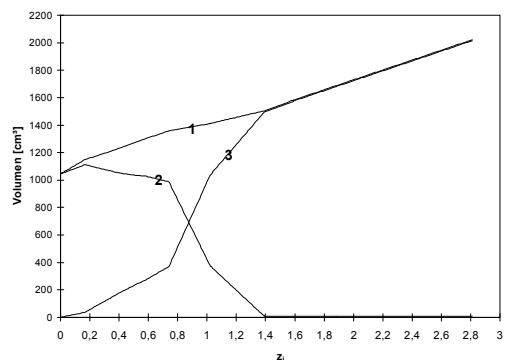
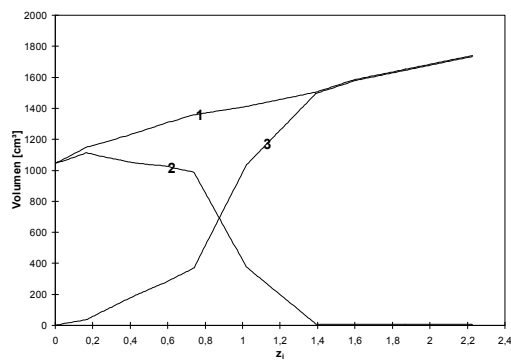
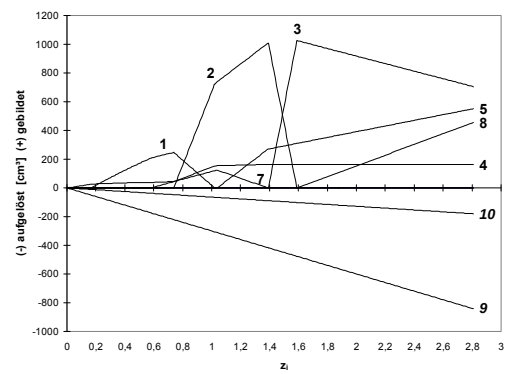
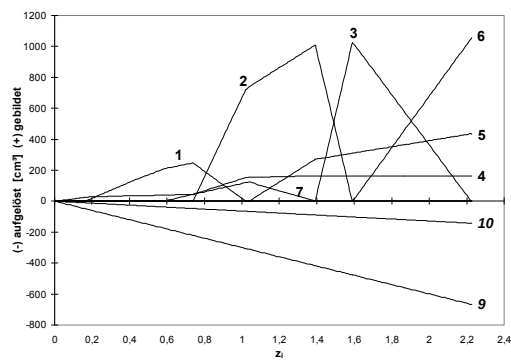
unten

1 = Systemvolumen (Differenz der Summen der Volumina von Lösungen und verbrauchtem SVV und der Summe gebrauchter Minerale)

2 = Lösungsvolumen

3 = Volumen der gebildeten Minerale

Abb. 3.5 Berechneter Reaktionpfad von SVV-Ausgangsmaterial (80 Vol.-% wasserfreies Magnesiumsulfat, 10 Vol.-% Sylvin und 10 Vol.-% Halit) mit IP21-Lösung



Metastabiler Reaktionspfad

Stabiler Reaktionspfad

oben

1 = Bloedit	2 = Epsomit	3 = Hexahydrit	4 = Halit	5 = Kainit
6 = Starkeit	7 = Leonit	8 = Kieserit	9 = MgSO ₄ -wasserfrei	

unten

1 = Systemvolumen (Differenz der Summen der Volumina von Lösungen und verbrauchtem SVV und der Summe gebrauchter Minerale)

2 = Lösungsvolumen

3 = Volumen der gebildeten Minerale

Abb. 3.6 Berechneter Reaktionspfad von SVV-Ausgangsmaterial (80 Vol.-% wasserfreies Magnesiumsulfat, 10 Vol.-% Sylvit und 10 Vol.-% Halit) mit einer NaCl-CaSO₄-gesättigten Lösung

4 Belastungsszenarien

Im Referenzszenarium für die Bildung einer Abdichtung mit SVV wird von einer Zugangsstrecke in einem Endlager im Salinar in 800 m Teufe ausgegangen, die ein Einlagerungsfeld mit einem Schacht verbindet und die über einen längeren Abschnitt mit selbst verheilendem Salzversatz verfüllt ist. Damit soll bei einem hypothetischen Laugen- oder Wasserzutritt im Schacht das Einlagerungsfeld abgedichtet werden (Abb. 4.1).

4.1 Anfangsbedingungen

Im Folgenden bezeichnet der Index „0“ immer den Zustand vor dem Wasserzutritt und der Index „1“ den Zustand nach der Reaktion, siehe Abb. 4.2 links. Im Referenzfall wird der Versatz trocken eingebracht, d.h. die Reaktion mit Wasser unter Volumenzunahme findet erst nach dem Zutritt statt. In einem relativ kurzen Zeitraum von 1 – 2 a, also noch innerhalb der Betriebsphase, läuft das konvergierende Gebirge auf den Versatzkörper auf /DRO 2001/. Infolge der fortschreitenden Konvergenz steigt der Kontakt- P_{K0} zwischen Versatz und Gebirge vom atmosphärischen Druck (ca. 0,1 MPa) bis auf den lithostatischen Druck (ca. 11 MPa) an. Während dieser Phase verringert sich der hydraulische Widerstand des Systems, weil zunächst der technisch bedingte Firstspalt geschlossen wird, anschließend der Versatz unter der Druckeinwirkung kompaktiert und die Auflockerungszone im Saum der Verbindungsstrecke verheilt. Nach sehr langen Zeiten sind die Kompaktion bzw. Ausheilung abgeschlossen und die hydraulischen Verhältnisse entsprechen wieder denen des unverritzten Gebirges, ohne dass eine Reaktion des Versatzes mit Wasser unter Volumenzunahme stattgefunden haben muss.

Eine solche Reaktion findet aber statt, wenn der Wasserzutritt vor der vollständigen konvergenzbedingten Kompaktion eintritt. Die Größe der reaktionsbedingten Volumenzunahme $\Delta V_R/V_0$ des Versatzes wird maßgeblich bestimmt durch

- dessen aktuelle Porosität ϕ_0 ,
- der mineralogischen Zusammensetzung des Versatzes und der zutretenden Lösung (und damit der möglichen Feststoff-Volumenzunahme ζ_M durch die Reaktion mit $\zeta_M = \Delta V_{\text{Matrix},R}/V_{\text{Matrix},0}$),

- den Anteil des reagierenden Versatzes, bezogen auf den insgesamt vorhandenen Versatz.

Die bisherigen Laborversuche / 12 / mit 5-cm-Rohren haben gezeigt, dass durch die Zunahme des Feststoffvolumens ζ_M bei der Reaktion zunächst die Restporosität reduziert verringert wird. Erst wenn diese aufgezehrt ist, erhöht sich das Volumen des Versatzkörpers um den Betrag ΔV_R bzw. dehnt sich um $\zeta_R = \Delta V_R / V_0$. Diese Ausdehnung erfolgt bei kurzen Proben bzw. im nicht eingespannten Zustand zunächst vorzugsweise in axialer Richtung. Bei isotroper volumetrischer Expansion des Versatzkörpers entspricht die lineare Dehnung des Versatzkörpers $\varepsilon_R = 1/3 \zeta_R$.

Tab. 4.1 Bandbreiten der Parameter des Versatzes vor der Reaktion

	Porosität ϕ_0	Permeabilität k_0	E-Modul E_{V0}	Kontaktdruck P_{K0}	Ausdehnung ζ_M
Minimum	0%	10^{-22} m^2	≈ 0	0,1 MPa	? %
Maximum	50%	10^{-12} m^2	≈ 0	11 MPa	? %

Tab. 4.2 Bandbreiten der Parameter des Versatzes nach der Reaktion

	Porosität ϕ_1	Permeabilität k_1	E-Modul E_{V1}	Kontaktdruck P_{K1}	Ausdehnung ζ_M
Minimum	0%	10^{-22} m^2	16 GPa	0,1 MPa	0
Maximum	$\phi_0 - \varepsilon_M$	10^{-12} m^2	22 GPa	11 MPa	ε_M

Zusammenfassend ergeben sich die in Tab. 4.2 aufgeführten Bandbreiten für die Parameter als Anfangsbedingungen für den Zustand des Versatzes vor dem Wasserzutritt, d.h. Beginn der Reaktion und in

die entsprechenden Parameter für den ausreagierten Versatz. Die Auslegung des Verschlusses aus SVV muss so erfolgen, dass in allen Zeiten der Nachbetriebsphase bei einem Wasserzutritt die geforderte Dichtwirkung erreicht wird, wobei der dabei entstehende Druck nicht zum Aufreißen des Gebirges führen darf.

4.2 Grenzfälle für den Laugen- oder Wasserzutritt

Mit zunehmender Querschnittsfläche der Abdichtung aus SVV nehmen die Art und die Geschwindigkeit an Bedeutung zu, mit der der Kontakt zwischen dem Versatz und dem Wasser stattfindet. Damit der Versatz reagieren kann, muss das Wasser oder die Salzlösung in den Versatzkörper eindringen. Die Menge des eindringenden Wassers hängt wiederum ab vom Außendruck, der Versatzpermeabilität und -porosität sowie der Querschnittsfläche für den Einstrom. Da die Porositätsabnahme durch die Reaktion und die damit einhergehende Permeabilitätsabnahme von der Menge des eindringenden Wassers abhängen, sind die Wasseraufnahme und die Versatzverdichtung rückgekoppelte Prozesse, die außerdem auch durch die Geschwindigkeit der Reaktion zwischen Versatz und Wasser kontrolliert werden.

Für das Szenarium des Laugenzutritts können zwei Grenzfälle angenommen werden, welche die Bandbreite der infrage kommenden Zutrittszenarien abdecken:

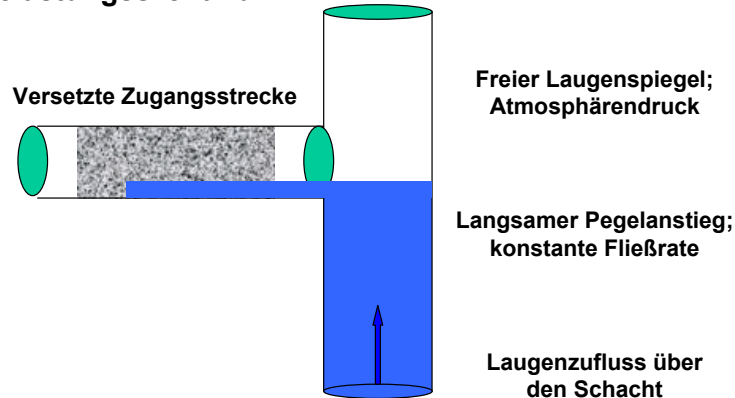
1. Langsamer Pegelanstieg

Diese Frage spielt insbesondere bei horizontalen Strecken- und Bohrlochverschlüssen eine Rolle, weil die Reaktion mit der Lauge dann nicht wie in den Laborversuchen gleichmäßig über den Querschnitt des Versatzes abläuft, sondern allmählich mit dem ansteigenden Laugenspiegel nach oben fortschreitet. Dieser Fall ist in der oberen Hälfte der Abb. 4.1 skizziert. Hier erfolgt ein Laugezufluss mit einer konstanten Rate $\dot{V}_L$, durch den die abgedichteten Bereiche des Grubengebäudes mit der vertikalen Ausdehnung h und dem Leervolumen V_0 allmählich aufgefüllt werden. Dabei ist der äußere Laugendruck niedrig, er steigt nach Erreichen der Sohle der Zugangstrecke vom Atmosphärendruck langsam entsprechend der Laugenspiegelhöhe oberhalb der Streckenfirste an. Die bestimmende Größe ist in diesem Zutrittsszenario die mittlere Anstiegsgeschwindigkeit des Laugenpegels $\dot{z}$, die sich ergibt zu:

$$\dot{z} = \frac{\dot{V}_L \cdot h}{V_0}$$

Damit ergibt sich beispielsweise für einen Laugenzufluss von 20 m³/d und den Parametern $V_0 = 10^6$ m³ und $h = 400$ m die Anstiegsgeschwindigkeit $\dot{z} = 8$ mm/d.

I. Belastungsszenarium



II. Belastungsszenarium

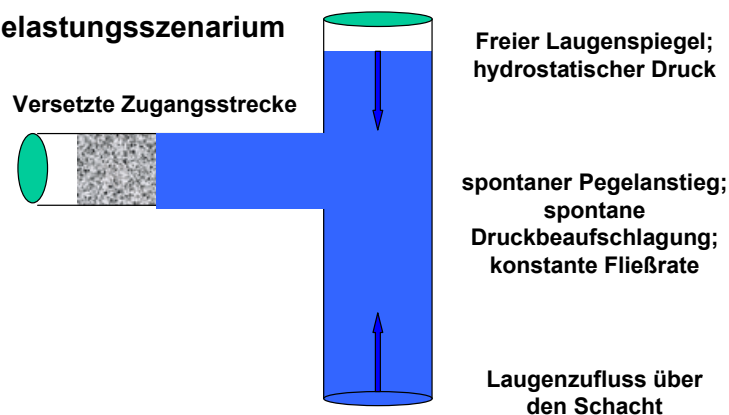


Abb. 4.1 Alternative Belastungsszenarien mit einem langsamen (oben) und eines spontanen Pegelanstieges (unten).

2. Instantaner Pegelanstieg

Der andere Grenzfall des Zutrittsszenarios ist in Abb. 4.1 unten dargestellt. Hier erfolgt ein plötzlicher, unkontrollierter Zutritt, bei dem die Lauge sofort über den gesamten Querschnitt des Versatzes ansteht und ein schneller Aufbau eines hohen hydrostatischen Drucks erfolgt.

4.3 Abschätzung des Kontaktdrucks nach der Reaktion

Bei der Auslegung einer Abdichtung mit SVV sind verschiedene Anforderungen zu berücksichtigen, wie die notwendige Begrenzung des Kontaktdrucks zwischen Versatz und Gebirge auf einen Wert von höchstens dem Fracdruck des Gebirges. Zur Abschätzung der Größenordnung des Kontaktdrucks P_{K1} zwischen Versatz und Gebirge nach der Reaktion wurde eine einfache analytische Berechnung für das in Abb. 4.2 skizzierte eindimensionale Modell durchgeführt. Im Folgenden bezeichnet der Index „0“ immer

den Zustand vor und der Index „1“ den Zustand nach der Reaktion. Die Strecke im Salzgebirge wird durch einen unendlich langen Hohlzylinder mit dem Innenradius R_{G0} dargestellt, der den Versatzbereich umschließt. Der Versatzbereich wird als unendlich langer Vollzylinder mit Radius R_{V0} angenommen. Die mechanischen Eigenschaften des Steinsalzes vor und nach der Reaktion werden durch den Elastizitätsmodul E_G und die Querkontraktionszahl ν_G beschrieben. Die mechanischen Eigenschaften des Versatzes ändern sich während der Reaktion, im ausreagierten Zustand seien diese Parameter E_{V1} und ν_{V1} . Im Anfangszustand gilt $R_{G0} = R_{V0}$ und $P_{K0} = 0$, d.h. der Versatz liegt drucklos am Gebirge an.

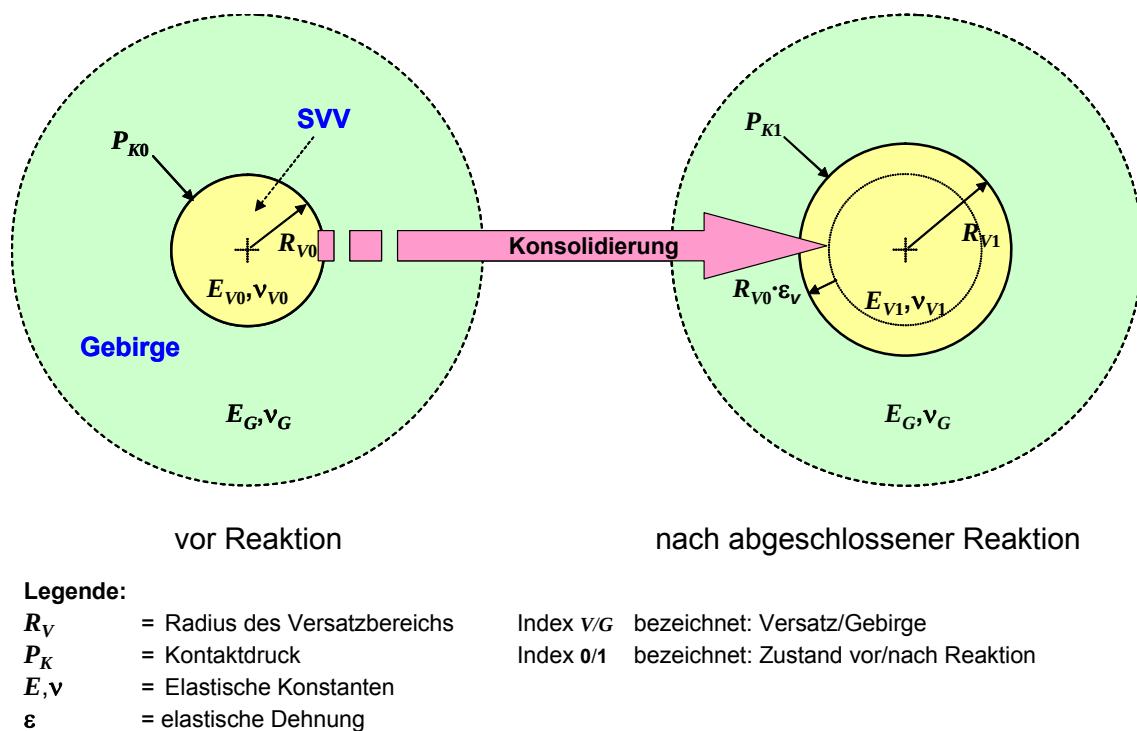


Abb. 4.2 Schema der Änderungen im System Versatz-Gebirge durch die Konsolidierung

Bei der Reaktion dehnt sich der Versatz radial um den Betrag ϵ_R , was bei unbehinderter Ausdehnung einer Zunahme des Radius um den Betrag $u_V = R_{V0} \cdot \epsilon_R$ entspricht. Im eingespannten Zustand in der Strecke wird jedoch der Kontaktdruck aufgebaut, der die Dehnung durch eine elastische Kompression des Versatzes $-\epsilon_V$ und eine elastische Dehnung der Strecke ϵ_G kompensiert. Damit ergibt sich als Bestimmungsgleichung für den Kontaktdruck P_{K1} nach der Reaktion:

$$\epsilon_R + \epsilon_V(P_{K1}) - \epsilon_G(P_{K1}) = 0.$$

Die Berechnung des Kontaktdrucks mit Hilfe des Computer-Algebra-Programms MathCad (Anhang 1) für das oben beschriebene Modell mit den Parameterwerten $E_G = 37,5 \text{ GPa}$; $\nu_G = 0,280$; $E_{V1} = 16 \text{ GPa}$ und $\nu_{V1} = 0,258$ liefert die Beziehung für den Kontaktdruck:

$$- \quad P_{K1} = 1,46 \cdot 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \varepsilon_R$$

$$- \quad \varepsilon_V = -0,514 \cdot \varepsilon_R$$

$$- \quad \varepsilon_G = 0,486 \cdot \varepsilon_R$$

Obwohl bei der Reaktion eine Erwärmung des Versatzes um mehrere 10 K mit entsprechender thermischer Ausdehnung stattfindet, bleibt diese Dehnung bei diesen Übersichtsrechnungen unberücksichtigt. Dieses ist zulässig, weil die Ausdehnung des Versatzes gegenüber der Erwärmung verzögert abläuft. Außerdem erwärmt sich das Gebirge ebenfalls und dehnt sich wegen des annähernd gleichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten um etwa denselben Betrag aus, sodass die thermische Differenzdehnung zwischen Gebirge und Versatz in erster Näherung vernachlässigt werden kann.

5 Experimentelle Untersuchungen - Upscaling

Selbstverheilender Salzversatz entwickelt bei Laugenfluss eine abdichtende Wirkung und eine für das umgebende Gebirge stabilisierende Tragfähigkeit. Inwieweit diese im Labor nachgewiesene Wirkung / 12 / auch im größeren Maßstab auftritt, wurde in so genannten Upscaling - Versuchen in 40-cm-durchmessenden Druckrohren und in 50-cm-durchmessenden Großbohrlöchern in situ untersucht.

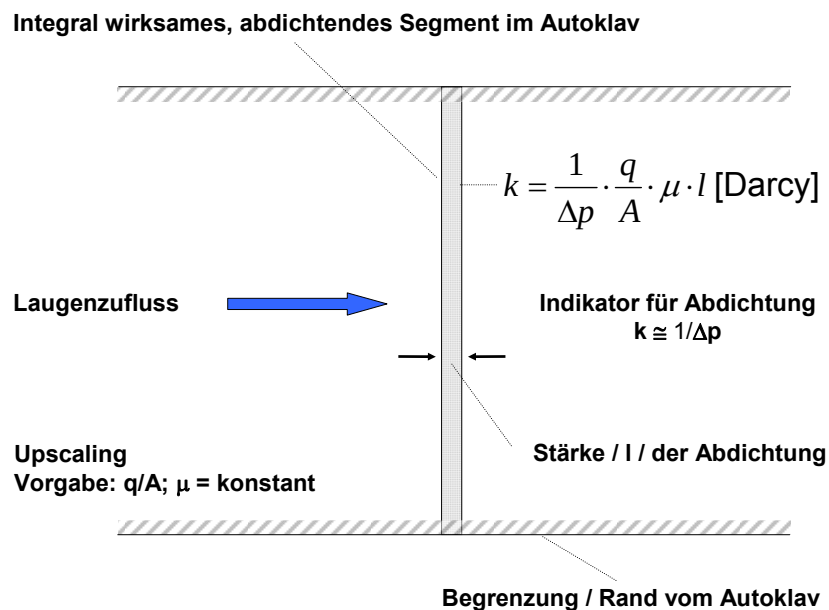


Abb. 5.1 Getroffene Vorgaben und Annahmen für den Vergleich der Ergebnisse der Upscaling-Versuche.

5.1 Upscaling-Versuche – Versuche auf unterschiedlichem Maßstab

Zur Beantwortung der Frage nach der Übertragbarkeit der im Labor nachgewiesenen selbst abdichtenden Eigenschaften von SVV auf In-situ-Verhältnisse wurde ein Laugenzufluss in zylindrischen Autoklaven¹⁾ mit unterschiedlichen geometrischen Abmessungen (Variationen: Querschnitt, A und Volumen, V) simuliert.

Tab. 5.1 Maßstab der Upscaling-Versuche

Labor	Zelle	A =	0,0019 m ² ;	V <	100 cm ³
Technikum	Rohr	A =	0,0490 m ² ;	V <	50.000 cm ³
	Rohr	A =	0,1256 m ² ;	V <	500.000 cm ³
In situ	Großbohrloch	A =	0,1963 m ² ;	V <	3.000.000 cm ³
zum Vergleich	Strecke	A =	20 m ² ;	V <	100.000.000 cm ³)

In diesen so genannten Upscaling-Versuchen wurde von einer auf den Querschnitt abgestimmten, gleich bleibenden Laugenzuflussrate q ausgegangen (Abb. 5.1).

Die Interpretation der Ergebnisse der Upscaling-Versuche mit dem Nachweis der Selbstabdichtung wurde anhand der zeitlichen Entwicklung und der Höhe des gemessenen Laugendruckes, Δp durchgeführt, da im Idealfall ein Anstieg des Laugendruckes den erhöhten Fließwiderstand in der entstehenden Abdichtung (verminderte Permeabilität, k) widerspiegelt (Abb. 5.2).

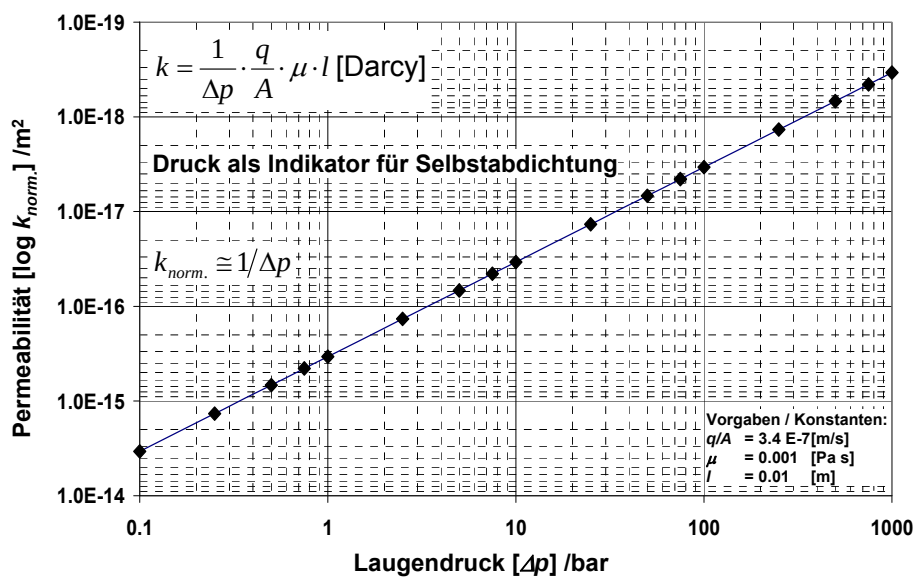


Abb. 5.2 Das Ansteigen des Laugendruckes spiegelt die Selbstabdichtung des Versatzes wider.

Zur Ableitung einer normierten Permeabilität, $k_{norm.}$ aus dem Laugendruck für ein integral wirksames, abdichtendes Segment wurde die allgemeine Darcy - Gleichung für nicht kompressible Fluide herangezogen.

Die Normierung der Permeabilität resultiert aus dem vorgegebenen Laugenzufluss q/A , der als effektiv wirksam angenommenen Stärke l der Abdichtung sowie des Wertes für die dynamische Viskosität μ von Wasser bei 20°C.

Der zugrunde gelegte Laugenzufluss (Vorgabe $q/A = \text{konstant}$) leitet sich aus dem in Kapitel 4 beschriebenen Belastungsszenarium I - sukzessiver Laugenzufluss über den Schacht- ab. Als Lastfall wird dabei angenommen, dass die Lauge über den gesamten Querschnitt einer versetzten Strecke (Streckenquerschnitt $A = 20 \text{ m}^2$) mit einer angenommenen gleich bleibenden Zuflussrate von ca. 250 m^3 pro Jahr in das Grubengebäude zutritt.

Als weiterer Proportionalitätsfaktor für die Ableitung einer normierten Permeabilität wurde eine effektive Stärke (Dicke) der Abdichtung von 1 cm vorgegeben. Diese Vorgabe geht von der Überlegung aus, dass sowohl auf der Mikro- als auch auf der Makroskala die hydraulisch wirksame Abdichtung der maßgeblichen Fließpfade im SVV kurzräumig und nicht weiträumig über das gesamte Volumen erfolgt.

Der Einfluss so genannter bevorzugter Wegsamkeiten innerhalb des konsolidierten SVV auf die integrale Permeabilität kann über das Gesetz von HAGEN-POISEUILLE abgeschätzt werden Abb. 5.3.

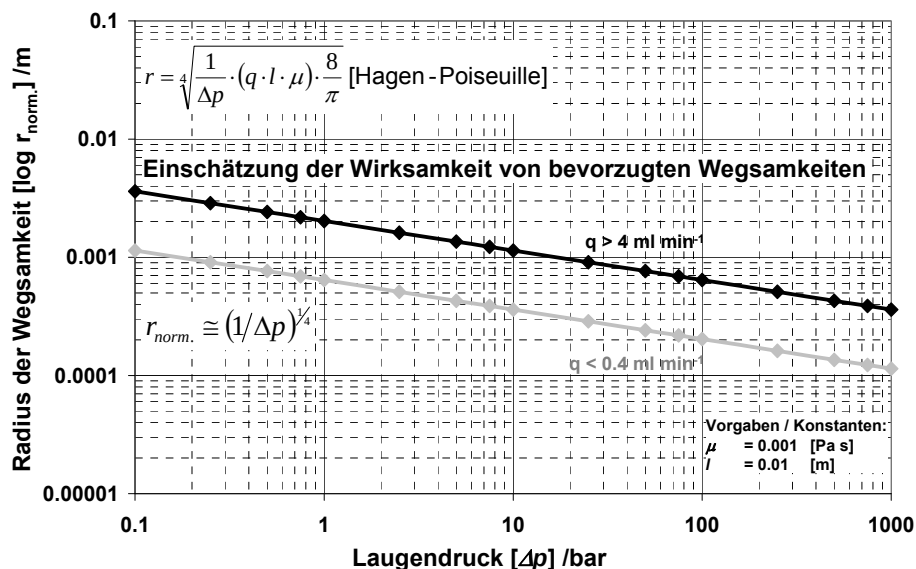


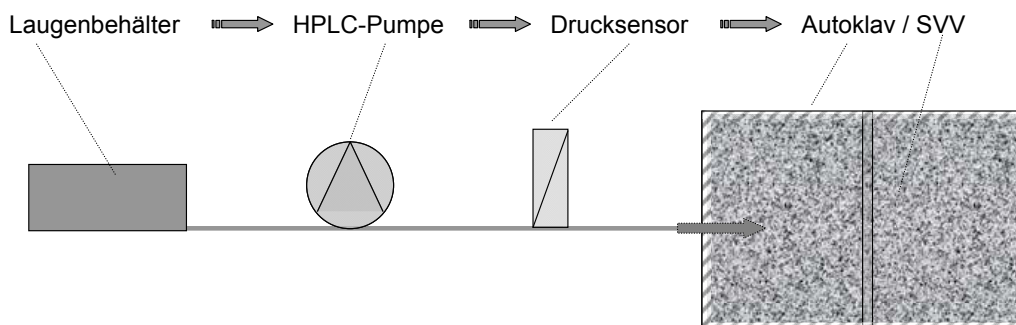
Abb. 5.3 Einschätzung der hydraulischen Wirksamkeit von bevorzugten Wegsamkeiten innerhalb der konsolidierten SVV-Matrix nach HAGEN-POISEUILLE.

5.2 Auslegung und Steuerung der Upscaling-Versuche

Zu den technischen Basiskomponenten der Versuchskonfiguration (Abb. 5.4) zählen der Behälter für die Lauge, die Hochdruckpumpe vom Typ BESTA HPLC-400/200, der Drucksensor vom Typ KELLER 1/10 MPa und die jeweiligen Autoklaven. Der zur Interpretation der Upscaling-Versuche erforderliche Parameter des Laugendruckes wurde in der Zuflussleitung mittels automatisierter Datenerfassung registriert.

Als Autoklaven wurden im Labor vertikal ausgerichtete modifizierte OEDOMETER-Zellen eingesetzt. Im Technikumsmaßstab und in situ waren die verwendeten geschweissten Stahlrohre und gebohrten Großbohrlöcher horizontal angeordnet. Die ausgewählten SVV-Materialien wurden als loser Versatz (Porosität, n : 0,45-0,55 [-]), d. h. ohne zusätzliche mechanische Verdichtung in die Autoklaven geschüttet. In situ wurden der SVV in die Großbohrlöcher eingeblasen.

A) Versuchskonfiguration



B) Steuerung der Versuche

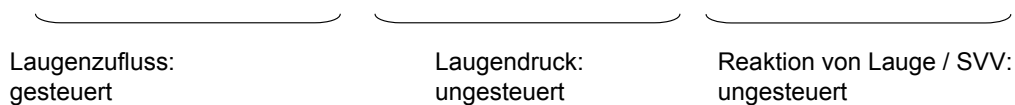


Abb. 5.4 Vereinfachte Darstellung A) der Konfiguration und B) der Steuerung der Upscaling-Versuche.

Die aktive Steuerung des Laugenzuflusses erfolgte durch die HPLC-Pumpe über eine voreingestellte, auf den Querschnitt der Autoklaven abgestimmte Fließrate (0,04 bis 10 ml min⁻¹), die auch bei steigendem Laugendruck (0 bis 100 bar) konstant gehalten wurde. In periodischen Kontrollmessungen wurde die gepumpte Laugenmenge durch Wägung des Laugenbehälters bestimmt. Eine aktive Steuerung der Dynamik der Reaktion im Autoklav, außer den Umgebungsbedingungen, wurde nicht durchgeführt.

5.2.1 Einbringtechnik des Versatzes im Großmaßstab

Im Gegensatz zu den kleinskaligen Proben (Schütttechnik) wurden im Großmaßstab die Autoklaven mittels Blastechnik mit SVV-Material beschickt. Die in 50 und 25-kg-Gebinden vorliegenden Ausgangsmaterialien wurden im Mischer vermengt. Über ein 2-mm-Schüttsieb wurde verklumptes Material vom Versatzmaterial manuell abgetrennt.

Das körnige Versatzmaterial wurde mit einer Besatzanlage durch chargenweises Verblasen in einer ca. 30-m-langen 1"- Leitung in die horizontal gelagerten Druckrohre bei relativ geringer Staubentwicklung eingebracht. Bei einem Förderdruck zwischen 0,15 und 0,25 MPa wurden ca. 400 kg Material pro Stunde versetzt. Der erforderliche Förderdruck wird über einen regelbaren Kompressor generiert.

Beim Einbringen bildete sich eine Schüttungsrampe. Visuell konnte eine leichte Entmischung des körnigen Materials beobachtet werden. Ein Spalt zwischen der Schüttungsrampe und dem Rohr wurde durch gezieltes Einblasen in den oberen Bereich vermieden. Durch den Einblasdruck und das stoßweise Verblasen in den oberen Spaltbereich wurde der Rohrquerschnitt vollständig versetzt. Zusätzliche Verdichtungsmaßnahmen wurden nicht durchgeführt.

Die gleiche Einbringtechnik wurde ebenfalls in den 15-m-langen Großbohrlöchern eingesetzt.

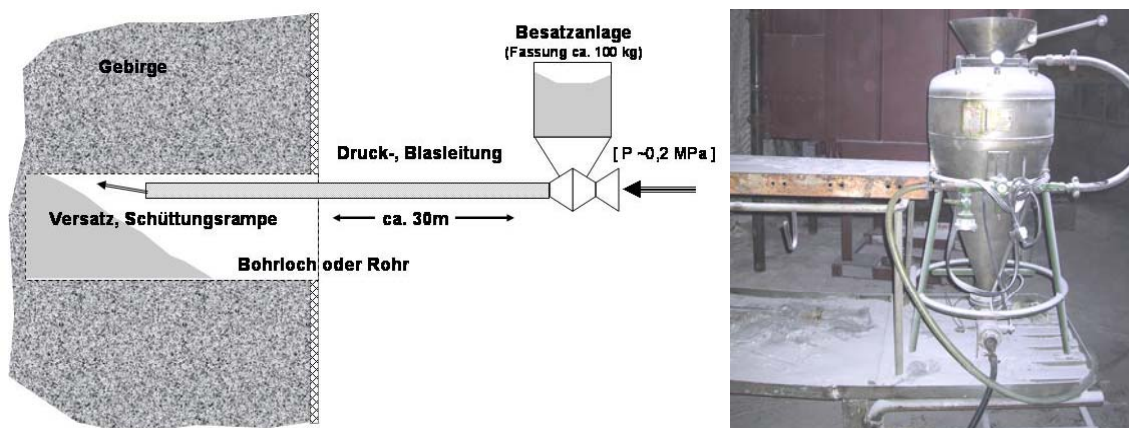


Abb. 5.5 (Bild links): Skizze zur Einbringtechnik in Druckrohren und Großbohrlöchern. (Bild rechts): Eingesetzte Besatzanlage, wie sie auch zum Besetzen von Sprengbohrlöchern eingesetzt wird.

Maßstab: Labor
OEDOMETER-Zellen



Maßstab: Technikum
Stahlrohr



Maßstab: in situ
Großbohrloch

Abb. 5.6 Versuchsstände und Konfiguration der Upscaling-Versuche:
Labor (oben), Technikum (Mitte), in situ (unten).

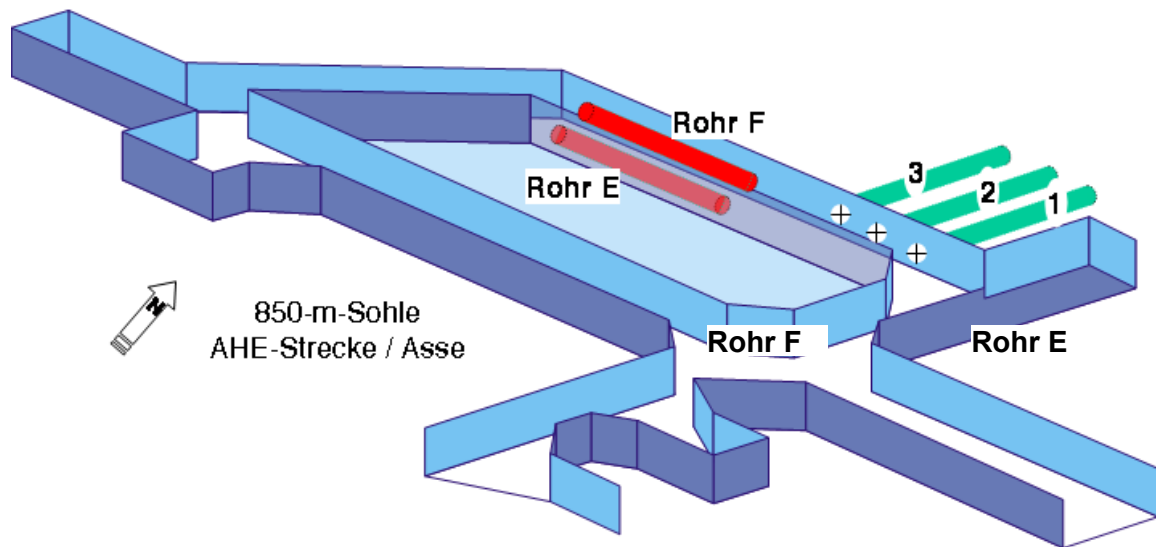


Abb. 5.7 Technikumsversuche auf der 850-m-Sohle in der Schachtanlage Asse / Remlingen. Konfiguration der Rohrversuche E und F und der Großbohrlöcher GB-1 und GB-3.



Abb. 5.8 (Bild rechts): Aufbau der Druckrohre E und F.

5.3 Verwendete Materialien und Lösungen

Als Basis der SVV - Mischungen wurde kalziniertes (wasserfreies) Magnesiumsulfat mit variierenden Zusätzen von Kalium- und Natriumchlorid eingesetzt. Die Sieblinien der Materialien sind in Abb. 5.9 dargestellt. Das handelsübliche feinkörnige Material wurde als loser Versatz in die Autoklaven geschüttet oder geblasen. Hinsichtlich des

Umgangs mit den Materialien, waren zur Vermeidung von Gesundheitsschäden die allgemeinen Vorschriften zur Handhabung von Trockenmittelsubstanzen einzuhalten.

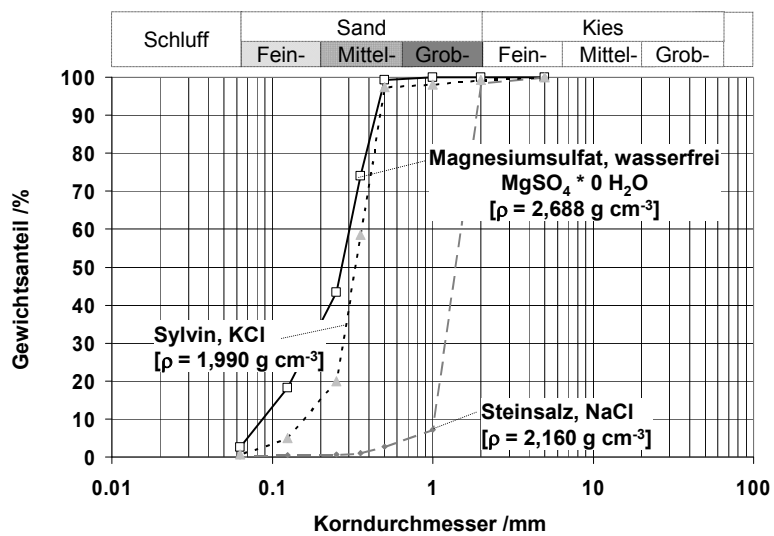


Abb. 5.9 Sieblinien der verwendeten Ausgangsmaterialien.

Als Versuchslösung wurden zwei repräsentative Typen von natürlich vorkommender Lauge aus dem Forschungsbergwerk ASSE / Remlingen verwendet.

- Typ 1: Magnesiumchlorid-reiche Lösung, gesättigt gegenüber Steinsalz, Carnallit, Sylvin und Kainit (ASSE-Sumpf 750m).
- Typ 2: Natriumchlorid-reiche Lösung, gesättigt gegenüber Steinsalz und Anhydrit (ASSE-Laugensammelstelle 658).

Tab. 5.2 Chemische Zusammensetzung der verwendeten natürlichen Lauge

Laugentyp	Dichte _(23 °C) [mg/cm ³]	Viskosität _(23 °C) [Pa s]	Ca K Mg Na Cl SO ₄					
			[mg/l]					
Typ 1 LN 2524-801	1,3010	0,07531	49	9136	98017	6577	275132	30261
Typ 2 LN 2524-701	1,2084	0,02004	688	2916	9997	98453	196475	9658

5.4 Ergebnisse der Flutungsversuche

5.4.1 Labormaßstab

Im ersten Schritt wurde das Abdichtungsverhalten von unverdichteten SVV-Mischungen gegenüber Salzlösungen in kleinskaligen Laborversuchen ermittelt (vgl. Abb. 5.6). Im Gegensatz zu allen anderen Versuchen wurden diese Proben vertikal durchströmt.

- **Feststoffsystem A:** MgSO_4 , wasserfrei; Lösung Typ 1 (Abb. 5.10)

und

- **Feststoffsystem B:** MgSO_4 , wasserfrei + KCl; Lösung Typ 2 (Abb. 5.11)

Im Feststoffsystem A tritt ein erster Effekt, der auf eine Verringerung der Permeabilität hindeutet, nach ca. 30 Stunden auf. Bei gleich bleibender Laugeninjektion steigt der Laugendruck dann zeitweise auf über 25 bar und die Lauge tritt auf der Auslassseite der Probe aus. Im weiteren Verlauf kommt es im Stundenbereich zu wiederkehrendem spontanen Druckanstiegen und spontanen Druckabfällen. Nach ca. 200 Stunden der Durchströmung erreichen die Druckspitzen Werte von über 50 bar. Das theoretische Laugenvolumen beträgt zu diesem Zeitpunkt das Fünffache der Ausgangsporosität. Das Ziel, eine Abdichtung gegenüber einem Laugendruck von 100 bar, wird nach ca. 250 Stunden erreicht.

Im Feststoffsystem B, tritt ein erster Effekt, der auf eine Verringerung der Permeabilität hindeutet, bereits nach ca. 20 Stunden auf. Unmittelbar danach erreicht der Laugendruck einen Wert von 50 bar. Auch hier treten spontanen Druckänderungen in sehr kurzen Intervallen auf. Wie im System A tritt Lauge im System B auf der Auslassseite aus. Das Ziel, die Abdichtung gegenüber einem Laugendruck von 100 bar, wird nach ca. 70 Stunden erreicht. Das theoretisch injizierte Langenvolumen beträgt zu diesem Zeitpunkt etwa das Zweifache des Volumens der Ausgangsporosität.

Anzumerken bleibt, dass die gezeigten Druckkurven ausgewählte repräsentative Versuchsverläufe darstellen.

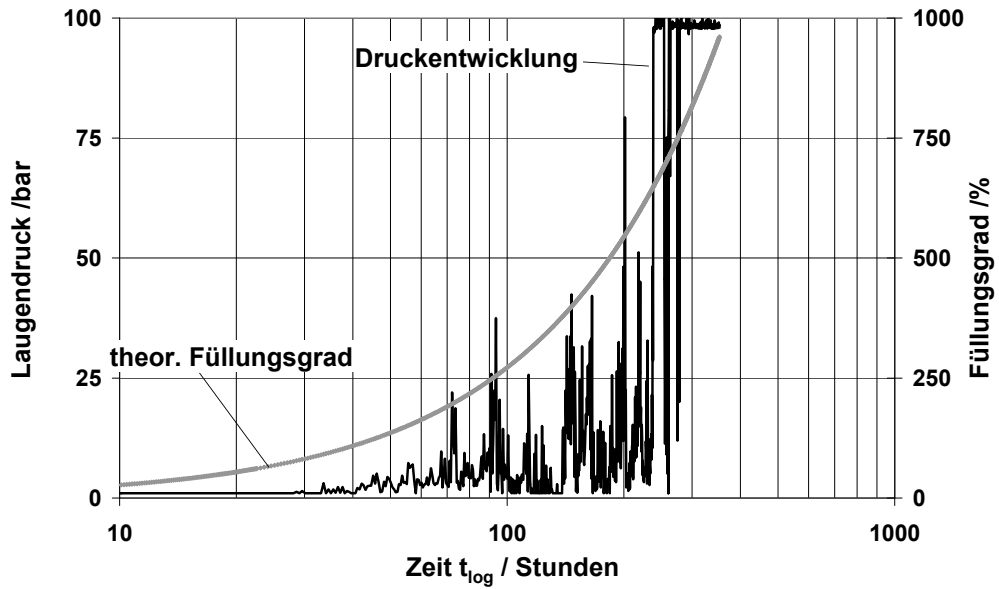


Abb. 5.10 Feststoffsystem A: $MgSO_4$, wasserfrei; Lösung Typ 1 (Serie 1).

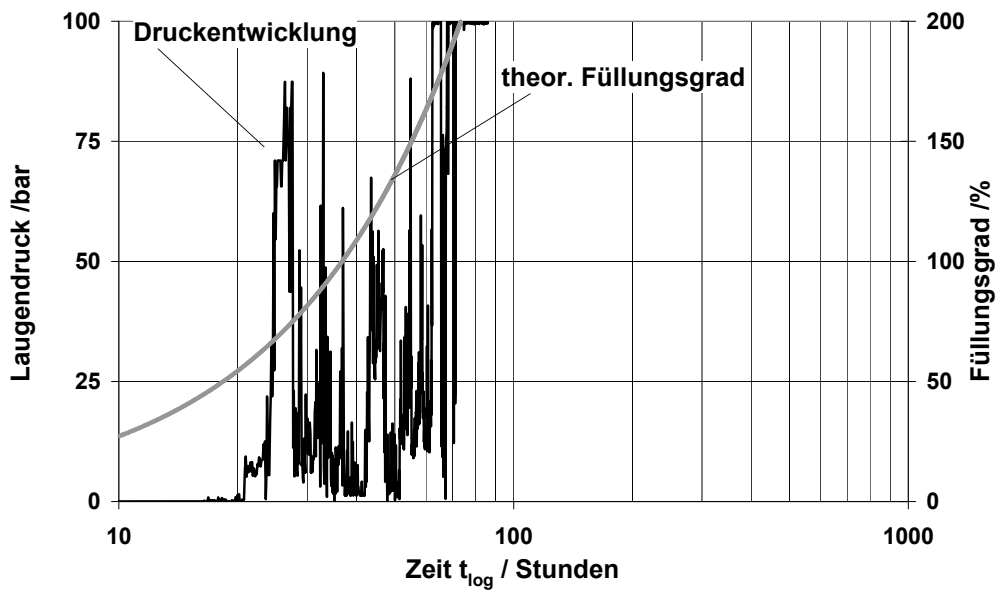


Abb. 5.11 Feststoffsystem B: $MgSO_4$, wasserfrei + KCl; Lösung Typ 2 (Serie 2).

5.4.2 Technikumsmaßstab

2-Meter-Stahlrohre

Im zweiten Schritt wurde das Abdichtungsverhalten von unverdichteten SVV-Mischungen gegenüber Salzlösungen in horizontal gelagerten Versuchen im Technikumsmaßstab ermittelt (vgl. Abb. 5.6).

- **Feststoffsystem A:** MgSO_4 , wasserfrei; Lösung Typ 1 (Abb. 5.12)

und

- **Feststoffsystem B:** MgSO_4 , wasserfrei + KCl + NaCl; Lösung Typ 2 (Abb. 5.13)

Gegenüber den kleinskaligen Versuchen, tritt ein erster Abdichtungseffekt im Feststoffsystem A erst nach ca. 700 Stunden auf. Innerhalb der folgenden 300 Stunden steigt der Laugendruck auf annähernd 100 bar. Das theoretisch injizierte Laugenvolumen entspricht zu diesem Zeitpunkt etwa dem Volumen der Ausgangsporosität. Eine Durchströmung der Probe findet nicht statt. Bis zum Erreichen des Enddruckes ist auch dieser Druckverlauf gekennzeichnet von spontanen Druckanstiegen bzw. –abfällen.

Im Feststoffsystem B treten erste kurzzeitige Druckerhöhungen auf bis zu 50 bar nach etwa 500 Stunden der Laugeninjektion auf, die im Verlauf der folgenden 200 bis 300 Stunden auf 80 bis 90 bar steigen. In diesem Zeitraum treten auch in dieser Probe spontane Druckänderungen in sehr kurzen Intervallen auf.

Bei Abbruch des Versuchs nach etwa 900 Stunden entspricht das theoretisch injizierte Langenvolumen etwa dem Volumen der Ausgangsporosität. Der Abbruch des Versuchs wurde ausgelöst durch das Aufreißen der Schweißnaht im Bereich der Flutungskammer.

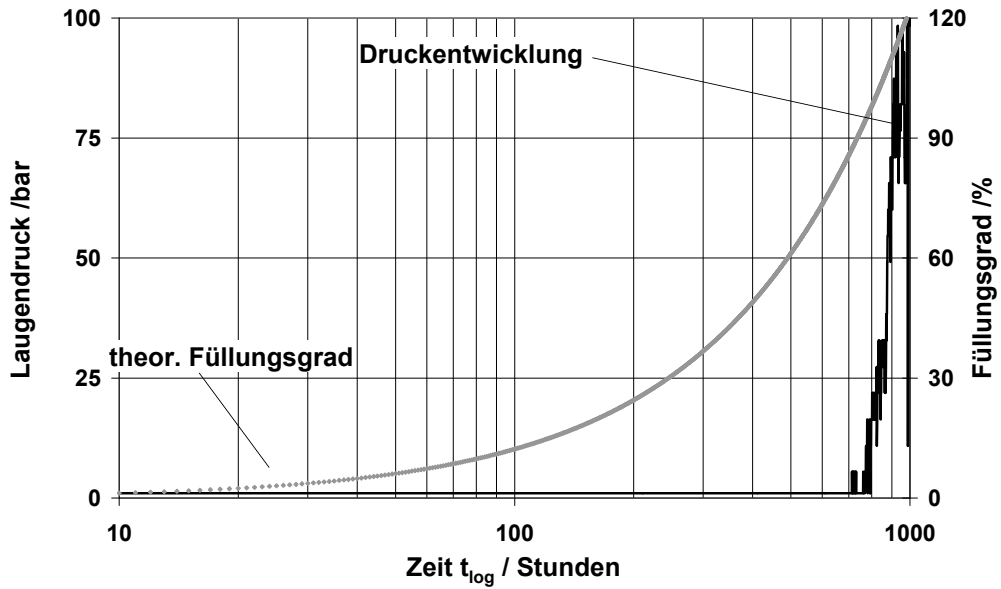


Abb. 5.12 Feststoffsystem A: MgSO_4 , wasserfrei; Lösung Typ 1 (Rohr A).

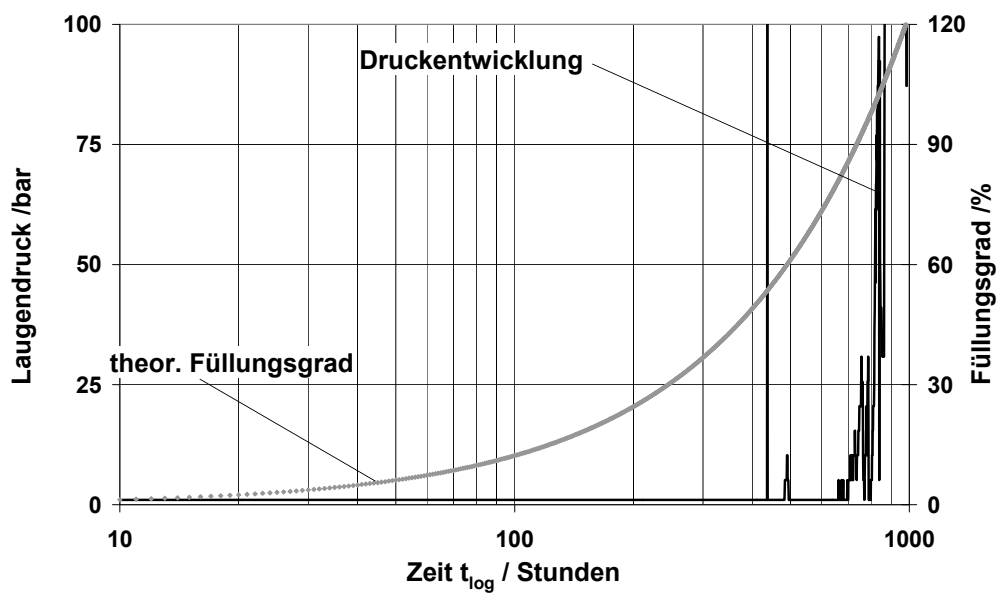


Abb. 5.13 Feststoffsystem B: MgSO_4 , wasserfrei + KCl + NaCl; Lösung Typ 2 (Rohr B).

4-Meter-Stahlrohre

Im dritten Schritt wurde das Abdichtungsverhalten von unverdichten SVV-Mischungen gegenüber Salzlösungen in horizontal gelagerten Versuchen in 4-Meter-Rohren unter in situ Bedingungen ermittelt (vgl. Abb. 5.7 und Abb. 5.8).

- **Feststoffsystem A:** MgSO_4 , wasserfrei; Lösung Typ 1 (Abb. 5.14)

und

- **Feststoffsystem B:** MgSO_4 , wasserfrei + KCl; Lösung Typ 2 (Abb. 5.15)

Im System A setzt ein erster anhaltender Anstieg des Laugendruckes nach etwa 900 Stunden ein. Anders als in den kleinskaligen Versuchen liegt die Höhe des Druckanstieges jedoch unterhalb der 10-bar-Marke. Der Druckanstieg nach 3.000 Stunden auf über 30 bar erfolgt erst, nachdem die Lauge aus der Probe über einen Zeitraum von 2.000 Stunden austrat – entsprechend einem theoretischen Füllungsgrad von ca. 200%. Das nachfolgende Druckniveau von 30 bis 40 bar ist gekennzeichnet von spontanen Druckänderungen.

Im Feststoffsystem B treten erste Drucksprünge ebenfalls nach etwa 900 Stunden ein, die kurzfristig eine Höhe von 30 bar erreichen. Der theoretische Füllungsgrad des verfügbaren Porenraumes liegt zu diesem Zeitpunkt weit unter der 100%-Marke. Das nachfolgende stufenweise Absinken des Druckes ist mitbegründet durch Undichtigkeiten an den Schweißnähten des Rohres im Bereich der Flutungskammer. Diese führten letztlich zum Abbruch der Injektion nach 2.000 Stunden.

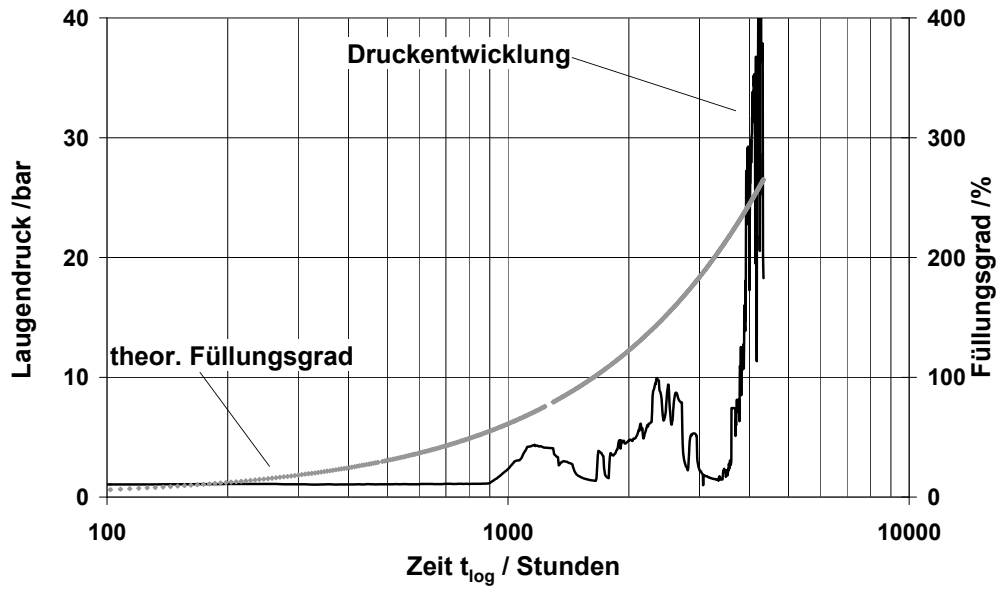


Abb. 5.14 Feststoffsystem A: MgSO₄, wasserfrei; Lösung Typ 1 (Rohr E).

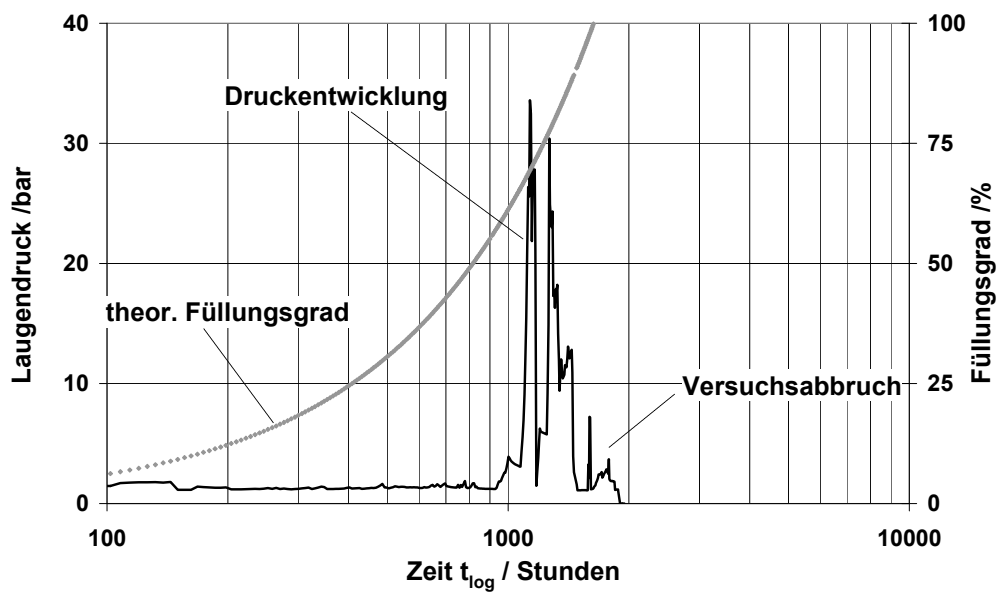


Abb. 5.15 Feststoffsystem B: MgSO₄, wasserfrei + KCl; Lösung Typ 2 (Rohr F).

5.4.3 Großbohrlochversuche

Im vierten und letzten Upscaling Schritt wurde das Abdichtungsverhalten von unverdichten SVV-Mischungen gegenüber Salzlösungen in horizontalen Großbohrlöchern im Steinsalz ermittelt (vgl. Abb. 5.6 und Abb. 5.7).

- **Feststoffsystem A:** MgSO_4 , wasserfrei; Lösung Typ 1 (Abb. 5.14)

und

- **Feststoffsystem B:** MgSO_4 , wasserfrei + KCl; Lösung Typ 2 (Abb. 5.15)

Unter den realen In-situ-Bedingungen zeigen für das System A geringe aber anhaltende Druckanstiege (<1 bar) bereits nach etwa 200 Stunden die Verringerung der Permeabilität an. Ein signifikanter Druckanstieg tritt nach etwa 1.500 Stunden ein. Bei einem theoretischen Füllungsgrad von 50 % liegt der Laugendruck im Maximum bei 15 bar. Der Druckanstieg ist verbunden mit kurzfristigen starken Druckschwankungen. Nach 5.000 Stunden wird ein maximaler Laugendruck von 25 bar erreicht. Die Druckerniedrigung auf knapp 10 bar korreliert mit dem Austritt der Lösung aus dem offenen Bohrloch und einem theoretischem Füllungsgrad von 100 %.

Im Feststoffsystem B zeigen erste Drucksprünge nach etwa 1.000 Stunden die Wirkung einer Abdichtung an. Die nachfolgenden anhaltenden Druckerhöhungen übersteigen nicht die 10-bar-Marke. Bei einem theoretischen Füllungsgrad von über 100 % liegt der Laugendruck im Bereich von 20 bar. Zu diesem Zeitpunkt tritt Lösung aus dem offenen Bohrloch aus.

In den beiden Abbildungen wird nicht gezeigt, dass der Laugendruck, nachdem die offenen Bohrlöcher durch Widerlager verschlossen wurden, während der Nachinjektion auf über 30 bar ansteigt.

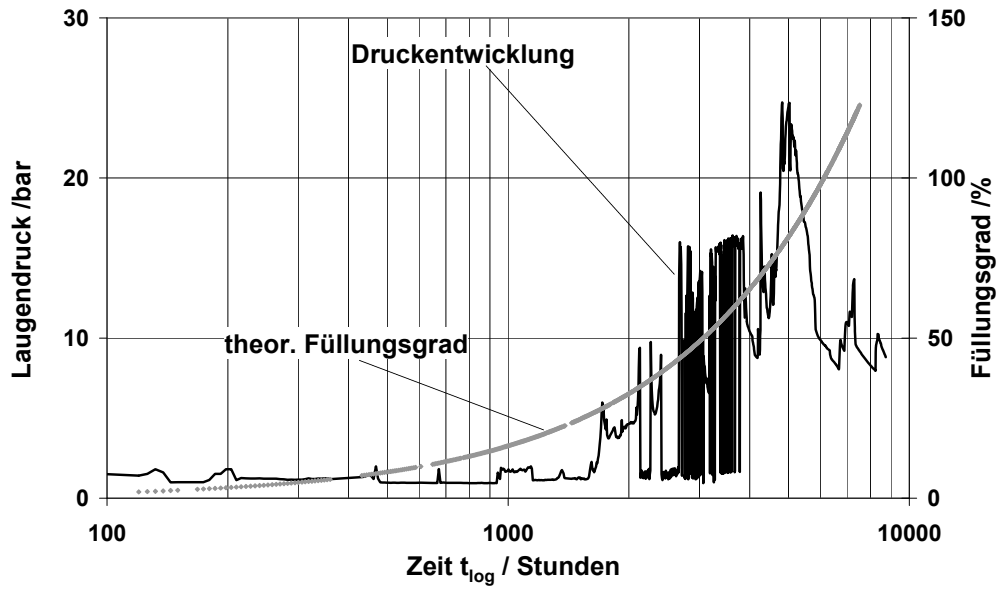


Abb. 5.16 Feststoffsystem A: MgSO_4 , wasserfrei; Lösung Typ 1 (GB-2).

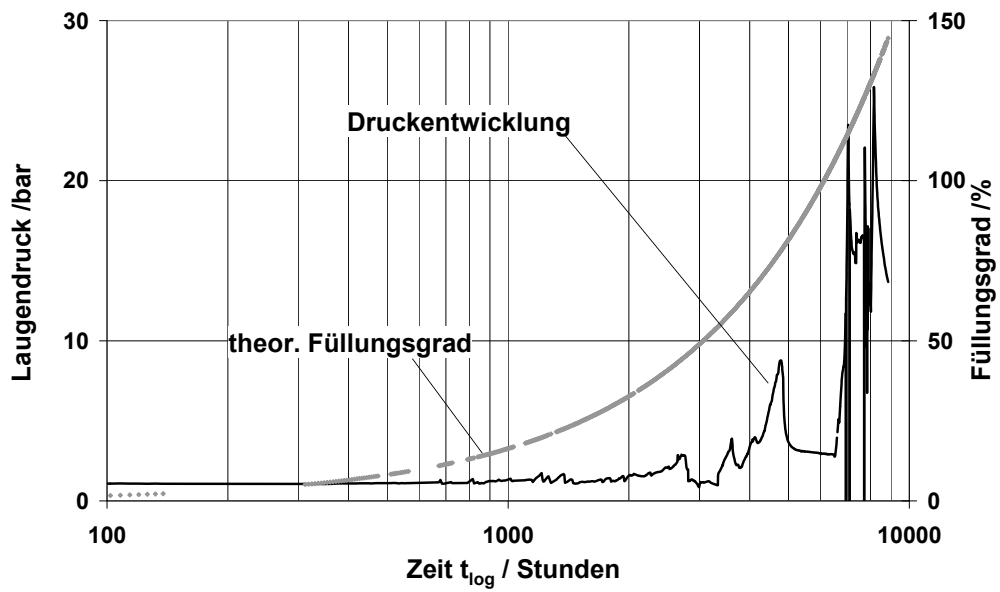


Abb. 5.17 Feststoffsystem B: MgSO_4 , wasserfrei + KCl; Lösung Typ 2 (GB-1).

5.5 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse der Upscaling-Versuche

Die Entwicklung der Laugendrucke in den durchgeführten Upscaling-Versuche belegen, dass eine Abdichtung des lose eingebrachten SVV-Materials in jedem Fall und unabhängig von der Zusammensetzung der Mischung und der zutretenden Lösung eintritt.

Die im Großbohrloch GB-2 erreichte Mindest-Druckhöhe von 10 bar, entspricht nach den normierten Berechnungsverfahren einer äquivalenten Permeabilität von $<10^{-16} \text{m}^2$.

Der im Labormaßstab erzielte Laugendruck von ~ 100 bar entspricht einer normierten Permeabilität von $<10^{-17} \text{m}^2$.

Die Tatsache, dass im Verlauf der Versuche innerhalb der konsolidierten SVV-Matrix bevorzugte Wegsamkeiten festgestellt wurden (siehe Abb. 5.18), unterstreicht die Annahme, dass das hydraulische Fließfeld nicht vollständig durch DARCY zu beschreiben ist.

Zieht man die Möglichkeit der kommunizierenden Röhrenströmung in Betracht, so entspricht der Druckanstieg auf 10 bzw. 100 bar einem normierten Radius einer Wegsamkeit von <1 mm bis $0,02 \text{mm}$.

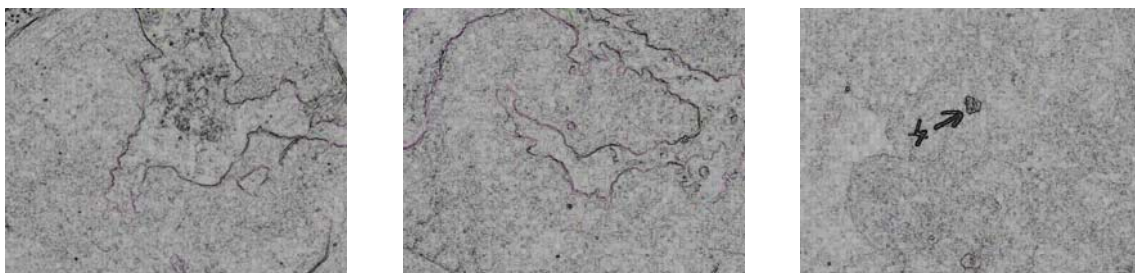


Abb. 5.18 Sequenz von Bildern mit Darstellung struktureller Ausbildung der konsolidierten SVV-Matrix. Die Flutung erfolgte von links nach rechts. Im rechten Bild ist innerhalb der festen Matrix eine bevorzugte Wegsamkeit zu erkennen, die mit Lauge gefüllt ist.

6 Rückbau der Großbohrlöcher und Nachuntersuchungen

Im Rahmen des Rückbaues der Großbohrlöcher GB-1, GB-2 und GB-3 wurden mittels Kernbohrungen (Abb. 6.1):

- der strukturelle Aufbau der verfestigten SVV-Säule (Selbstverheilte Matrixbereich),
- die Anbindung der SVV-Säule (Kontaktzone / Fuge) an das umgebende Gebirge,
- und der Übergang zur Auflockerungszone (ALZ) im Bereich der Strecke untersucht.

In den Nachuntersuchungen wurden an ungestörten Kernproben der konsolidierten SVV-Matrix deren petrophysikalische Eigenschaften und mechanische Festigkeiten untersucht. Zielsetzung der Nachuntersuchungen war :

- Die Ermittlung der neuen Mineralparagenese (vgl. Kapitel 3.3),
- der Vergleich der mechanischen Eigenschaften der ausreagierten SVV-Matrix mit denen von natürlichem Steinsalz, und
- die Einordnung der erzielten abdichtenden Wirkung im Vergleich mit kompaktierten Salzgrus.

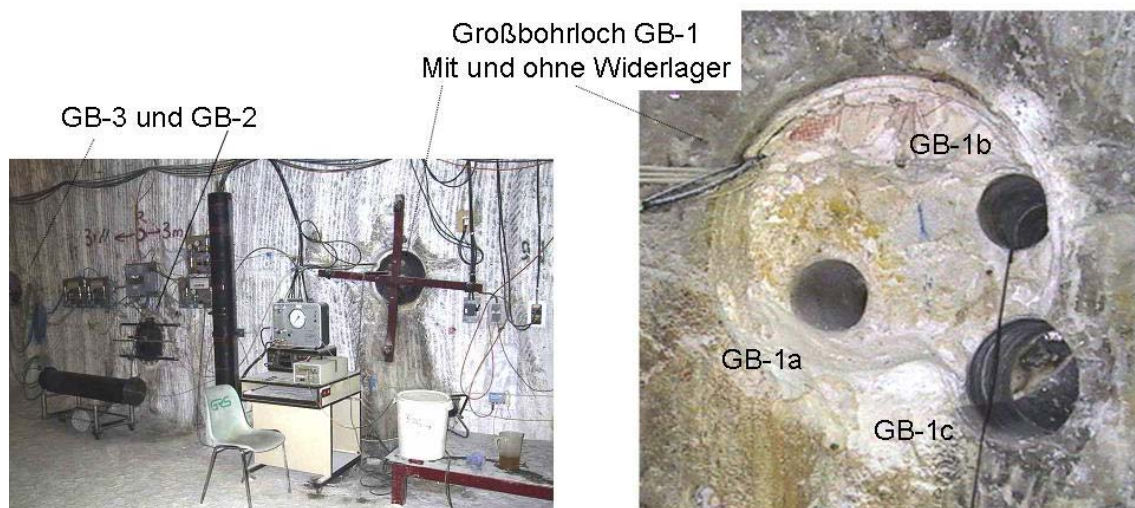


Abb. 6.1 (links): Versuchsstand unter Tage; Streckenstoß mit den Großbohrlöcher GB-1, GB-2 und GB-3. (rechts): Bohransätze zur Nachbeprobung von GB-1.

6.1 Kernbohrungen

Die Kernbohrungen wurden von der Schachtanlage ASSE mit einer NASOVIA-Bohranlage (Andruck 90-110bar) mit Luftspülung (Druck <8 bar) unter Verwendung eines Einfach-Kernrohres mit einer Bohrkrone aus Hartmetall durchgeführt (Abb. 6.2). Die Kerne wurden nach der Entnahme fotografiert und bis zu den Nachuntersuchungen in Folie eingeschweißt (Abb. 6.3).

Das Bohren im SVV erwies sich als äußerst schwierig. Ursache ist insbesondere die Nachreaktion von Magnesiumsulfat mit der Luftfeuchtigkeit und mit Resten der nicht wegreaktierten Versuchslösung, die zu Verstopfungen führte. Ein ähnlicher Effekt ist auch bei Kernbohrungen im Carnallit zu beobachten.



Abb. 6.2 (links): Steuerstand der NASOVIA-Bohranlage. (rechts): Ausbau des Kernrohres.



Abb. 6.3 (links): Bohrkronen und ausgebauter Kern. (rechts): Kern wird zur Lagerung in Folie eingeschweißt.



Abb. 6.4 (links): Staubentwicklung während des Bohrens. (rechts): Bei Anbohren einer Laugentasche vermischt sich die Lauge mit dem Bohrmehl und haftet als Bohrschlamm auf dem Kernrohr. Im weiteren Verlauf härtet der Bohrschlamm aus und bildet eine feste Kruste.

6.1.1 Großbohrloch GB-1 und GB-2

Das Großbohrloch GB-1 wurde durch zwei Kernbohrungen beprobt, deren Bohran-satzpunkte in Abb. 6.1 dargestellt sind. Ziel der Bohrung GB-1a (Abb. 6.5) war zu-nächst die verfestigte SVV-Matrix im unteren Bereich von GB-1. Aufgrund einer Ablen-kung der Bohrung wurde ab 5.5m die Kontaktzone mit dem umgebenden Steinsalz erbohrt. Mit der Bohrung GB-1b (Abb. 6.6) wurde der obere Bereich des Großbohrlo-ches Gb-1 beprobt werden. Die Kurz-Bohrung GB-1c (1-m-Länge) erfasst den Über-gang von verfestigtem SVV zum Gebirge im Bereich der Auflockerungszone der Stre-cke (siehe Kapitel 6.3). Das Großbohrloch GB-2 wurde durch eine Kernbohrungen be-probt (Abb. 6.7). Ziel der Bohrung GB-2a war ebenfalls die verfestigte SVV-Matrix.

Im Verlauf der Bohrungen wurden wiederholt so genannte **Laugennester** angebohrt, die im weiteren Verlauf der Bohrarbeiten zu erheblichen technischen Problemen führ-ten. Einerseits reichte die Luftspülung nicht aus, um die Lauge auszublasen und an-dererseits reagierte die Lauge mit dem Bohrmehl zu einer festen Masse (Abb. 6.4). Infol-ge der Reaktion kam es zu Verstopfungen in der Bohrkronen und zur Ablenkung der Bohrungen.

Ein weiterer Grund für die Ablenkung der Bohrungen wird in den **spröden Bohreigen-schaften** (erforderlicher Bohrandruck ~ 100 bar!, RQD > 2) von SVV gesehen, die durch die lagige Struktur der Matrix verstärkt wird.

Die feste SVV-Matrix weist in allen Kernbohrungen deutliche **Schüttungsstrukturen** auf, die auf die Versatztechnik (Blasversatz mit ca. 45° Schüttungswinkel) zurückgeführt werden können. **Zonare und kavernöse Strukturen** sowie mineralogische Inhomogenitäten, verdeutlichen, dass die Durchdringung des locker eingebrachten Versatzes nicht gleichmäßig erfolgt ist.

Die Verwachsung (Anbindung) der SVV-Matrix mit dem Gebirge ist praktisch vollständig gegeben – **vollständiger Formschluss**. Lösungskanäle wurden ausschließlich in nächster Entfernung zur Flutkammer festgestellt.

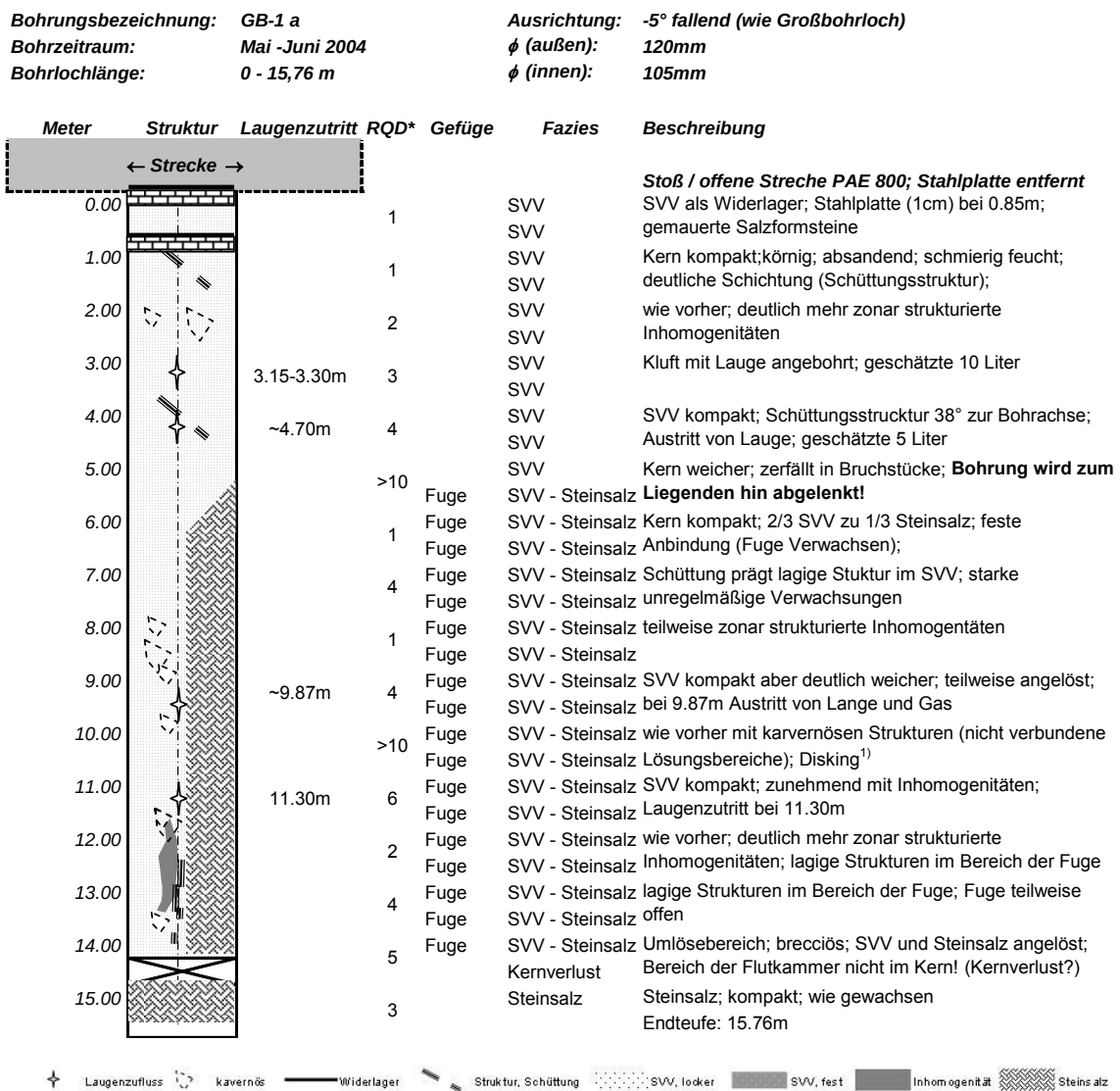


Abb. 6.5 Bohrprofil von GB-1a.

Im Bereich der nicht erbohrten Flutkammer zeigen Mineralbreccien die Umwandlungszone an, in der die Versuchslösung in eine so genannte „Gleichgewichtslösung“ umgewandelt wurde. Lösungserscheinungen im Steinsalz zeigen, dass das Gebirge im Bereich der Flutkammer in die Umwandlungszone einbezogen wird.

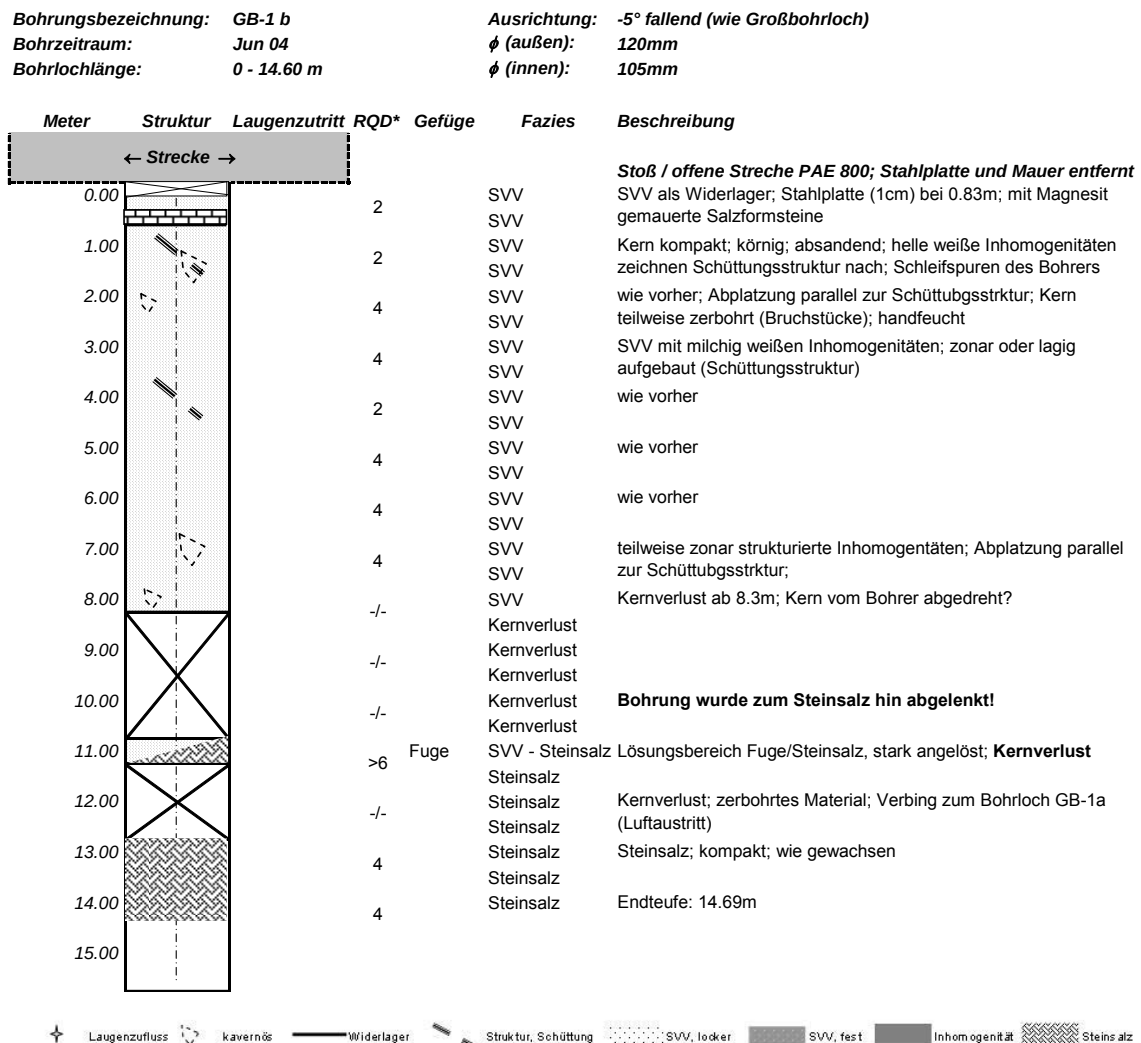


Abb. 6.6 Bohrprofil von GB-1b.

Bohrungsbezeichnung: GB-2 a
Bohrzeitraum: Juni -Juli 2004
Bohrlochlänge: 0 - 15,40 m

Ausrichtung: -5° fallend (wie Großbohrloch)
φ (außen): 120mm
φ (innen): 105mm

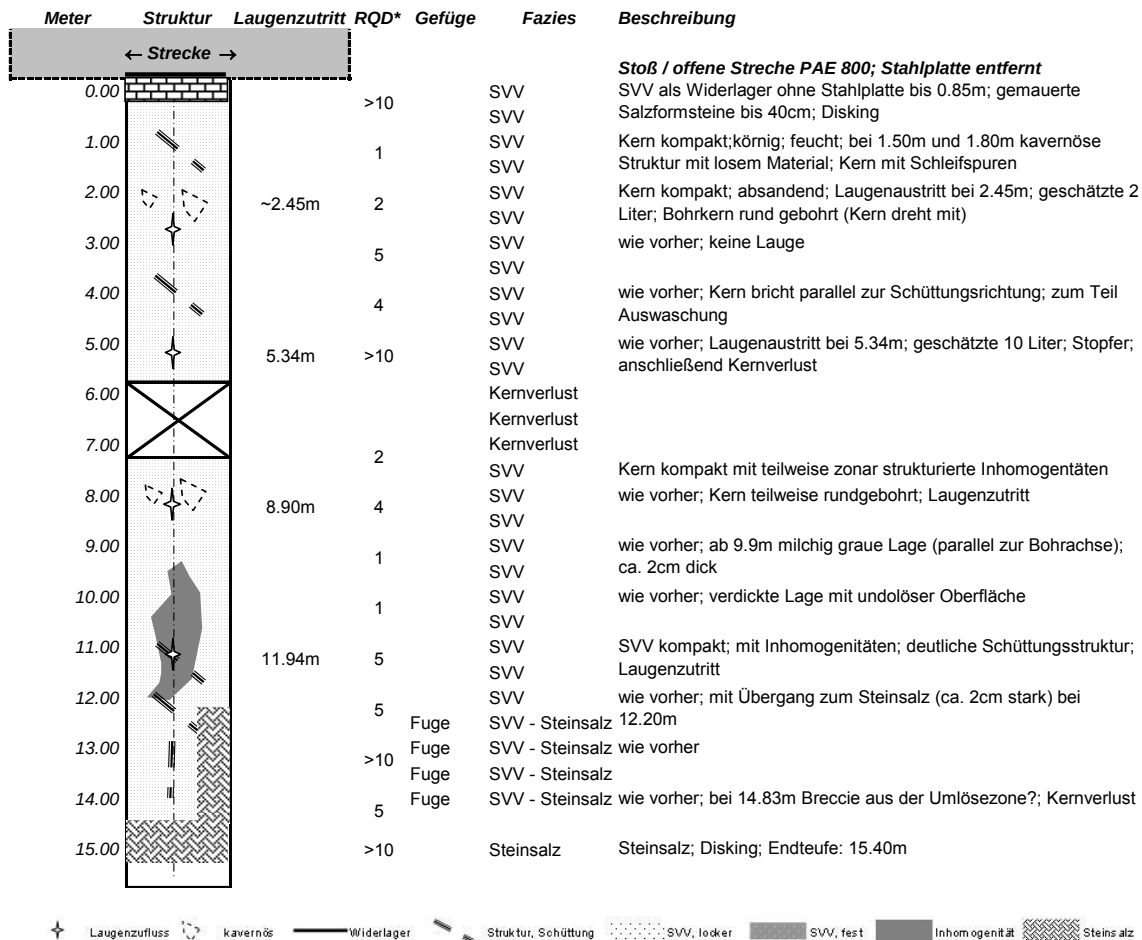


Abb. 6.7 Bohrprofil von GB-2a.

6.1.2 Großbohrloch GB-3

Im instrumentierten Großbohrloch GB-3 wurden verschiedene Mineralmischungen mit Magnesiumsulfat als Basiskomponente und Magnesit als Zusatzkomponente eingesetzt (Abschnitte A, B, C, D).

Aufgrund der in GB-3 eingebrachten Instrumentierung wird ein direkter Vergleich mit den für GB-1 und GB-2 aufgestellten Aussagen an dieser Stelle nicht durchgeführt. Qualitativ gesehen wurden keine markanten neuen Erscheinungsformen in der verfestigten SVV-Matrix von GB-3 festgestellt.

Auffällig sind allein die Häufung von nicht ausreagierten Bereichen, in denen Magnesit eingesetzt worden ist und der sehr schlechte (RQD>10) Erhaltungszustand der Bohrkern.

An den Stellen, an denen die Instrumentierung überbohrt wurde, wurde ein vollständiger Formschluss von SVV mit der Instrumentierung festgestellt.

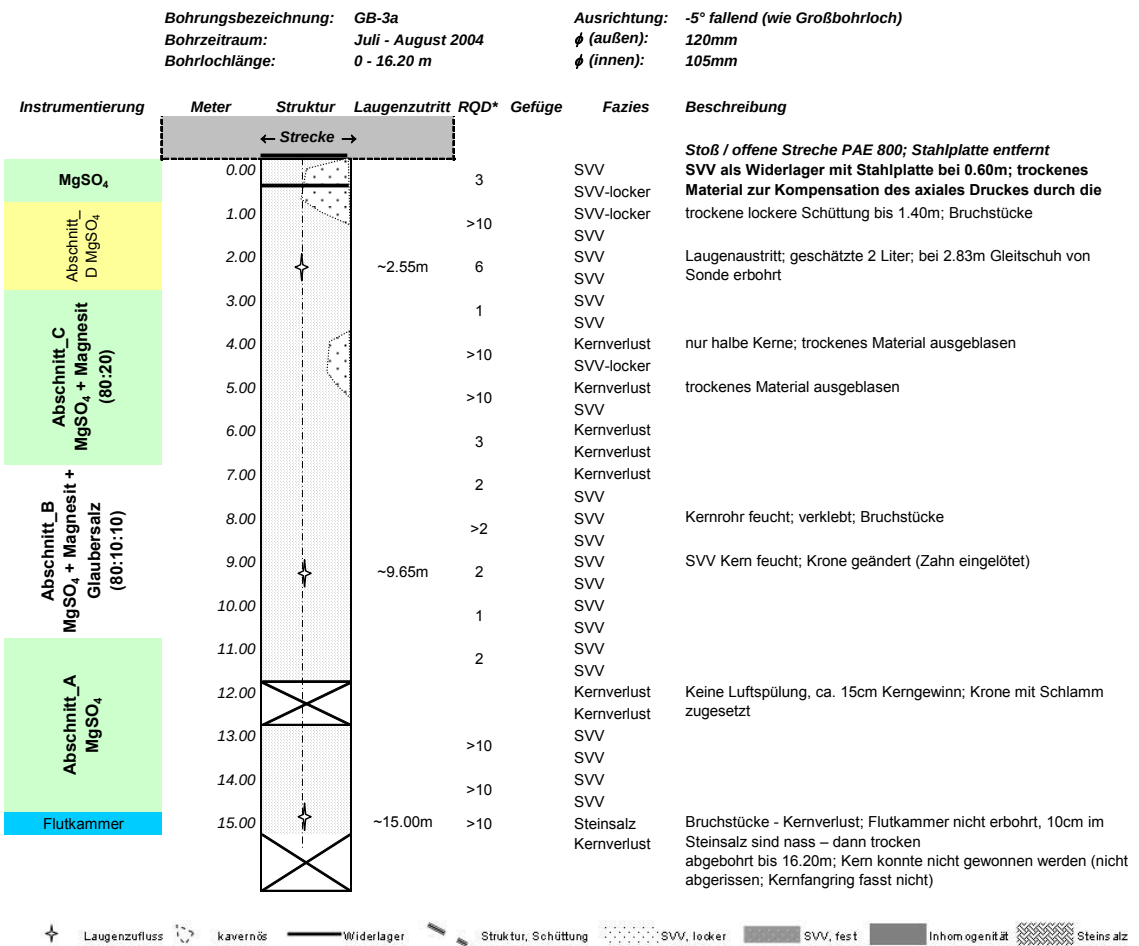


Abb. 6.8 Bohrprofil von GB-3a.

6.2 Kontaktbereich SVV/Gebirge (Fuge)

Besondere Aufmerksamkeit kommt der Ausbildung der Kontaktzone zwischen SVV und dem Gebirge und der Frage nach einer Fuge, die als Wegsamkeit für Lösungen zur Verfügung steht, zu. Abb. 6.9 zeigt den Bohrkern aus dem Bereich des Widerlagers von GB-1. Wie bereits in GB-1a und GB-1b festgestellt, ist der Formschluss auch hier

vollständig – eine Fuge fehlt, ebenso Hinweise auf eine Schädigung des Gebirges durch den Formschluss.



Abb. 6.9 (links): Bohrkern GB-1c mit der Kontaktzone von SVV/Gebirge aus dem Auflockerungsbereich der Strecke. (rechts): Querschnitt durch den Bohrkern.

6.3 Salzausblühungen im Bereich der Auflockerungszone (ALZ)

Salzausblühungen zwischen GB-1 und dem Streckenstoß zeigen den Einfluss der Auflockerungszone auf das effektive hydraulische Fließfeld im Umfeld der Bohrung. Der Schluss liegt nahe, dass die Durchlässigkeit der ALZ größer als der ausreagierten SVV-Matrix ist.



Abb. 6.10 (links): Salzausblühungen am Streckenstoß (Auflockerungszone).

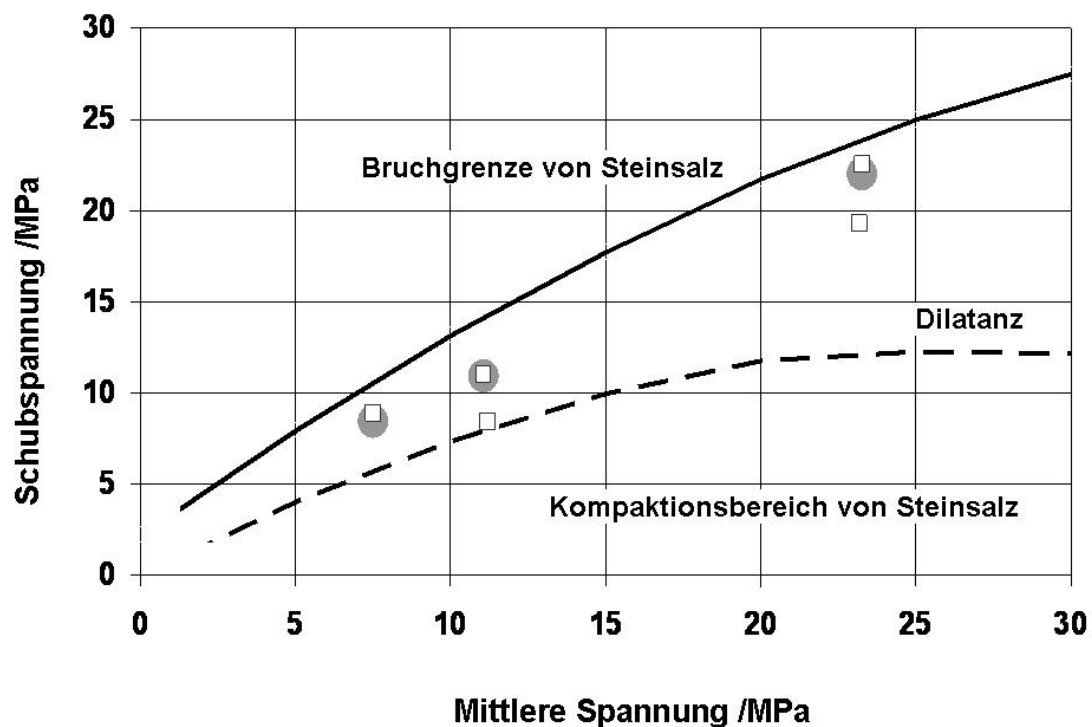
6.4 Nachuntersuchungen

6.4.1 Mechanische Eigenschaften von SVV im Vergleich mit Steinsalz

Im Rahmen der Nachuntersuchungen an ausgewählten Kernproben wurden die mechanischen Eigenschaften von SVV ermittelt und denen von natürlichem Steinsalz gegenübergestellt.

In Abb. 6.11 ist das Dilatanzverhalten von SVV bei zunehmender mittlerer Spannung dargestellt.

Die ermittelten Messwerte für SVV liegen im statistischen Wertebereich von Steinsalz. Im ersten Ansatz bedeutet dies, dass SVV sowohl im Kompaktions-, Dilatanz- als auch im Bruchverhalten wie Steinsalz zu betrachtet ist.



$$\tau = 1/3 [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}$$

$$\sigma = 1/3 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

Abb. 6.11 Mechanischen Eigenschaften von SVV im Vergleich mit natürlichem Steinsalz.

6.4.2 Hydraulische Eigenschaften der SVV-Matrix im Vergleich mit Salzgrus

SVV kann wie herkömmlicher Salzversatz / 13 /, / 17 / als Dammbaumaterial (z. B. Salzgrus) eingesetzt werden. Salzgrus wird **langfristig** durch Konvergenz kompaktiert und erhält dadurch eine niedrige Permeabilität. Mit SVV wird praktisch umgehend (**kurzfristig**) bei Laugenzutritt eine abdichtende Wirkung erzielt.

In Abb. 6.12 ist die für Salzgrus ermittelte Porosität – Permeabilität - Beziehung dargestellt. Wie SVV hat Salzgrus beim Einbringen als Versatzmaterial eine Ausgangsporosität von ca. 50 % ($n=0.5$). In Abhängigkeit von der Ausgangsfeuchte (trocken, feucht) und der Temperatur (DEBORA) führt die Kompaktion von Salzgrus zur Erniedrigung der Porosität auf unter 2 % und damit zu einer effektiven Permeabilität zwischen 10^{-16}m^2 und $<10^{-20} \text{m}^2$.

Die in den Nachuntersuchungen an Kernproben ermittelten Porositäten und Permeabilitäten liegen in der gleichen Größenordnung wie beim kompaktierten Salzgrus.

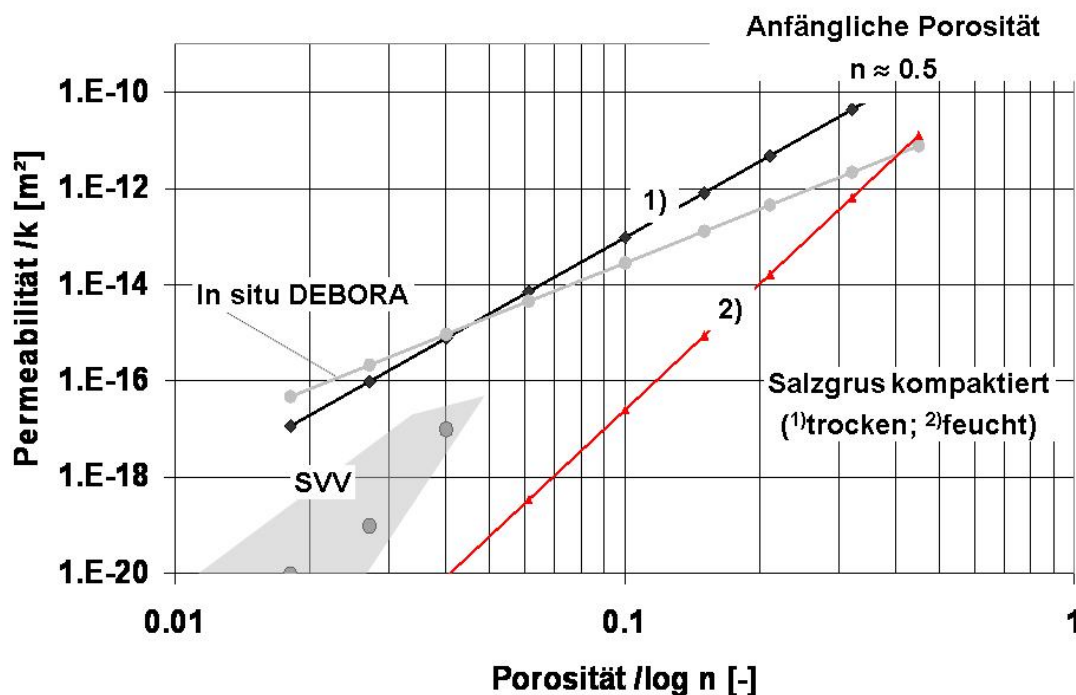


Abb. 6.12: Petrophysikalische Eigenschaften von SVV im Vergleich mit dem Verfestigungsverhalten von kompaktiertem Salzgrus.

6.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Nachuntersuchungen

Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Nachuntersuchungen unterstützen die im Kapitel 5.5 zusammengefassten phänomenologischen Aussagen insbesondere hinsichtlich der abdichtenden Wirkung von SVV bei Laugenzutritt.

Die Bohrkerne belegen, dass aus SVV, zusammen mit der injizierten Lauge, eine feste, weitgehend homogene Salzmatrix entsteht. Strukturelle und mineralogische Inhomogenitäten zeigen aber auch, dass Aufbau und Entwicklung der Salzmatrix sehr komplexen Abläufen unterliegen, die im Detail zurzeit nicht geklärt sind. Dazu zählen auch das Vorhandensein von Laugennestern und die Erkenntnis, dass nicht alles Magnesiumsulfat umgesetzt ist, sondern im Extremfall noch als lockere Schüttung vorliegt. Durch Variation der SVV-Mischungen kann, wie in GB-3, der strukturelle Aufbau beeinflusst werden. Die Präsenz von makroskopischen Strukturen und Inhomogenitäten in der SVV-Matrix unterstreicht die Bedeutung der Upscaling-Versuche, um die Übertragbarkeit von Erkenntnissen auf In-situ-Verhältnisse sicherzustellen.

Die homogene feste SVV-Matrix verfügt über petrophysikalische Eigenschaften, die von Salzversatz nur erreicht wird, wenn dieser hochgradig kompaktiert wurde. Dieser Prozess nimmt in der Praxis mehrere Jahrzehnte in Anspruch.

Weiterhin belegen die Bohrkerne, dass SVV bei Laugenzutritt mit dem Gebirge einen vollständigen Formschluss eingegangen ist und den beim Versetzen der Bohrlöcher entstandenen Setzungsspalt geschlossen hat.

Salzausblühungen, die nach der Einrichtung der Widerlager im Umkreis der Großbohrlöcher aufgetreten sind, spiegeln den möglichen Einfluss einer Auflockerungszone / ALZ auf das hydraulisch wirksame Fließfeld wider. Zumindest für den Bereich des Streckenstoßes ist davon auszugehen, dass die Permeabilität der ALZ größer ist als die der SVV-Matrix.

Die ermittelten felsmechanischen Eigenschaften der SVV-Matrix sind mit denen von Steinsalz vergleichbar. Letzteres gilt zunächst ausschließlich für die hier eingesetzten SVV-Mischungen.

7 **Schlussfolgerungen**

Selbst Verheilende Salzmischungen (SVV) auf der Basis von Magnesiumsulfat, calciniert führen im Kontakt mit salinaren Lösungen zu hydraulischen Abdichtungen unabhängig von der initialen Zusammensetzung der Lösung. Mit der geochemischen Reaktion verbunden ist die Vergrößerung des Feststoffvolumens, wodurch es zur Entwicklung eines Kristallisationsdruckes kommt. Der initiale Porenraum wird durch die Bildung von hydratisierten Magnesiumsulfat und ausgefällten Doppelsalzen geschlossen. Mit der Reaktion wird der mobile Wasseranteil der Lösung im Kristallgitter von metastabilen und stabilen Mineralen gebunden. Die Reaktion führt zur Bildung einer arteigenen langzeitstabilen Mineralparagenese. Eine vollständig durchreagierte Salzmatrix enthält kein freies Wasser. Ein mit einer hohen Porosität eingebrachter, loser Salzversatz wird durch die Reaktion in eine kompakte, mechanisch konsolidierte Salzmatrix mit hoher abdichtender Wirkung überführt.

Die Bildung einer Abdichtung ist unabhängig vom betrachteten Größenmaßstab, sie ist jedoch abhängig von der zeitlichen und räumlichen Entwicklung. Mit größer werdendem Maßstab wurden folgende phänomenologischen Abhängigkeiten festgestellt:

- Die zeitliche Entwicklung einer Abdichtung ist nicht proportional von Laugenvolumen zu Querschnittsfläche, sondern vielmehr von Laugenvolumen zu reagiertem Feststoffvolumen.
- Die integrale Permeabilität wird bestimmt durch den Durchdringungsgrad mit Lauge. Eine höhere Durchdringung führt zu niedrigeren Gesamtpermeabilitäten.
- Die Entwicklung des Kristallisationsgrades ist ebenfalls abhängig vom Durchdringungsgrad.
- Die Verteilung von strukturellen hydraulisch wirksamen Inhomogenitäten nimmt mit wachsendem Größenmaßstab zu.
- Die Bildung von bevorzugten Wegsamkeiten (Kanälen) ist bei geringem Kristallisationsdruck ausgeprägter als bei höheren Drücken.

GLOSSAR

SVV	S elbst V erheilender V ersatz
ALZ	Auflockerungszone
Autoklav	Bezeichnung für einen Behälter, in dem eine geochemische Reaktion herbeigeführt wird. Der Behälter ist formstabil.
KELLER-Sensor	Piezoresistive Messaufnehmer zur Ermittlung von Drücken von Fluiden
BESTA-Pumpe	H igh P ressure L iquid C hromatograph ;HPLC-Hochdruckpumpe
OEDOMETER	meist zylindrische Zelle mit einem starren Stahlmantel zur Einstellung stationäre Flüsse für die Ermittlung von Permeabilitäten nach Darcy
Danzit	Sulfatmineral der Magnesiumreihe

Literatur

- / 1 / Droste, J.; Feddersen, H.-K.; Rothfuchs, T. (2001) Experimental Investigations on the Backfill Behaviour in Disposal Drifts in Rock Salt (VVS-Project). GRS—173, Brauchweig, März 2001
- / 2 / Brockt, G. Fritz, K.-J. Stedingk K. Witzke T. (2001): Die ehemalige Kaligrube Brefeld bei Staßfurt - Streiflichter aus einer faszinierenden Welt.- Mineralien-Welt 12(2), 15-27
- / 3 / Herbert, H.-J. & Sander, W. (1998): Untersuchungen an Lösungszusammensetzungen bei der Migration durch das Grubengebäude Bartensleben. Bericht zum Lösungsszenario „Lösungszutritt über den Hauptanhydrit“ GRS-Bericht zum Projekt Morsleben PSP-Element 9M 212 313 20, Mai 1998.
- / 4 / Herbert, H.-J. & Sander, W. (1999): Untersuchungen an Lösungszusammensetzungen bei der Migration durch das Grubengebäude Bartensleben. Ergebnisbericht zu den Lösungsvorgängen bei der instantanen Flutung. GRS-Bericht zum Projekt Morsleben PSP-Element 9M 212 313.
- / 5 / Sander, W. and Herbert, H.-J. (2000): A new hydraulic barrier – Performance of a self-sealing salt backfill material. In Proceedings DisTec 2000, Disposal Technologies and Concepts 2000, Kontec Gesellschaft für technische Kommunikation mbH, Hamburg. ISBN 3-9806415-3-8
- / 6 / Internetliteratur www.vogelbeck.de/kaliwerk.htm: Kalibergwerkes Siegfried I in Vogelbeck.
- / 7 / Herbert, H.-J. (2003): Bentonitdichtungen und Selbstverheilender Versatz.- PtWT+E Fachgespräch Verschlussbauwerke 1993 bis 2003, Freiberg 17./18. März 2003.
- / 8 / ZINCKEN, C. (1865): Mitteilung an Prof. H.B. Geinitz vom 18.März 1865 [Über ein neues Mineral, Kainit].- Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, 310

- / 9 / KULL,H.; HERBERT;H.-J.; SANDER, W.(2004): A new self sealing backfill material for repositories in salt formations.- DISTEC 2004 – International Conference on Radioactive Waste Disposal; April 26-28, 2004; Berlin –Germany.

- / 10 / HERBERT, H.-J. & KULL,H. (2004): A new self sealing and healing backfill material for repositories in salt formations.- Solution Mining Research Institute; Technical Conference, Proceeding p. 239-264 –; October 03-06, 2004; Berlin – Germany.

- / 11 / HERBERT, H.-J. & KULL,H. (2004): A Self Sealing Backfill Material for Repositories in Salt Formations.- Waste Management Symposia –; WM'05 February 27 – March 3, 2005; Tucson / Arizona US.

- / 12 / SANDER, W. & HERBERT, H.-J. (2002): Wirksamkeit der Abdichtung von Versatzmaterialien.- Geochemische Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Salzversatz mit Zuschlagstoffen.- GRS-Bericht-180, ISBN 3-931995-48-8, Köln.

- / 13 / Rothfuchs, T.; Feddersen, H.-K.; Kröhn, K.-P.; Miehe, R.; Wieczorek, K. (1999): The DEBORA-Project: Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste – Phase II.- Final Report; GRS-161, ISBN 3-931995-26-7; Cologne/Germany.

- / 14 / Sander, W. (1999): Wirksamkeit der Abdichtung von Versatzmaterialien – In “Untertägige Entsorgung - Viertes Statusgespräch zu FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen”, 14.-15. September. In Clausthal-Zellerfeld; Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE Nr. 6, S.315-328.

- / 15 / Herbert, H.-J. (2000): Zur Geochemie und geochemischen Modellierung hoch salinarer Lösungen – Geologisches Jahrbuch, Sonderhefte, Reihe D, Heft SD1, 329 pp.

- / 16 / Sander, W. (2002): Ein neues Verfahren zum Verschluss von Entsorgungsbergwerken im Salz – Tagungsband des 2. Altbergbaukolloquiums, 7. bis 9. November 2002 in der TU Clausthal, S.372 – 388.

- / 17 / Fein, E.; Müller-Lyda, I. Storck, R. (1996): Ableitung einer Permeabilitätsbeziehung für Salzgrus und Dammbaumaterialien.- GRS-132, ISBN 3-923875-83-5; Köln/Deutschland.

- / 18 / Herbert, H.-J., Kull, H., Sander, W. (2001): Weiterentwicklung eines selbstverheilenden Salzversatzes als Komponente im Barriersystem Salinar - In "Unter-tägige Entsorgung - Fünftes Statusgespräch zu FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen". 15.-16. Mai 2001 in Leipzig; Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Be-richte FZKA-PTE Nr. 7, S.165-173.

- / 19 / Europäische Patentanmeldung Nr. 00 120 249.8-2307 "Verfahren zum Verhin-dern des Eindringens einer Salzlösung in einen Hohlraum einer Salzlagerstät-te". Anmelder: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Erfinder: W. Sander.

- / 20 / Harvie, C. E., Möller, N. and Weare, J. H. (1984): The prediction of mineral sol-ubilities in natural waters, the Na-K-Mg-Ca-Cl-SO₄-OH-HCO₃-CO₃-CO₂-H₂O system to high ionic strength at 25 °C. – Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 48, 723 -751.

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de