



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

Wirksamkeit der Abdichtung von Versatzmaterialien



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

Wirksamkeit der Abdichtung von Versatzmaterialien

Geochemische Unter-
suchungen zum Langzeit-
verhalten von Salzversatz mit
Zuschlagstoffen

Wolfgang Sander
Horst-Jürgen Herbert

Juli 2002

Anmerkung:

Die diesem Bericht zugrunde liegen-
den Arbeiten wurden mit Mitteln des
Bundesministeriums für Wirtschaft
und Arbeit (BMWA) unter dem För-
derkennzeichen 02 E 9047 4 geför-
dert.

Die Arbeiten wurden von der Gesell-
schaft für Anlagen- und Reaktorsich-
erheit (GRS) mbH durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt die-
ser Veröffentlichung liegt allein bei
den Autoren.

**GRS - 180
ISBN 3-931995-48-8**

Deskriptoren:

Aktiver Abfall, Ausbreitung, Deponie, Geomechanik, Langzeitsicherheit, Nichtaktiver Abfall, Salz, Schadstofftransport, Technische Barriere, Wasser

Inhaltsverzeichnis

	Vorwort	1
	Kurzfassung	3
1	Einleitung und Problemstellung	15
2	Ziele des Vorhabens	17
3	Theoretischer und praktischer Hintergrund.....	19
3.1	Theoretische Betrachtungen	19
3.2	Versatzmaterial als Barriere in Untertagedeponien – eine Literaturstudie	20
3.2.1	Ergebnisse der Literaturrecherche.....	23
3.2.2	Verfüllkonzepte	23
3.2.3	Versatz- und Verschlusstechniken.....	23
3.2.4	Salzversatz	24
3.2.5	Verhalten von Salzversatz ohne Lösungen.....	25
3.2.6	Verhalten von Salzversatz mit Lösungen.....	25
3.3	Geochemische Reaktionen von Salzen und Lösungen	25
3.3.1	Relevante Mineralreaktionen in Salzformationen – eine Übersicht.....	26
3.3.2	Theoretische Betrachtung der Vorgänge im quinären System	27
3.3.3	Hartsalzauflösung – Eine natürliche geochemische Selbstverschlussreaktion	29
3.3.4	Das Ende der Hartsalzauflösung	32
3.3.5	Bilanzrechnungen bei der Hartsalzauflösung und Rolle des Ca im System	34
3.3.6	Hartsalzauflösung und die Endlagersicherheit.....	34
3.4	Beispiele natürlicher geochemischer Selbstverschlussreaktionen.....	35
3.4.1	Kluffüllungen	36
3.4.2	Sättigungsgrenzen	36
3.4.3	Kainitbildung	37

4	Konzept der Versatzertüchtigung durch Initiieren von Selbstverschlussreaktionen	41
4.1	Auswahl von Zuschlagstoffen	41
4.2	Beschreibung von Selbstverschlussreaktionen.....	43
5	Vorgehensweise - Arbeitsprogramm	45
5.1	Sichtung, Auswahl und Bewertung möglicher Versatz- und Zuschlagstoffe.....	45
5.2	Experimentelle Arbeiten	45
6	Untersuchungsmethoden.....	47
6.1	Kurzzeitversuche	47
6.2	Säulenversuche	47
6.3	Hochdrucksäulenversuche.....	48
7	Experimentelle Ergebnisse	51
7.1	Kurzzeitversuche	51
7.2	Hochdrucksäulenversuche.....	52
8	Ergebnisse der geochemischen Modellierung.....	59
9	Diskussion und Interpretation der Ergebnisse	63
10	Die Innovation und praktische Anwendungsfelder	67
11	Zusammenfassung	71
12	Literatur	73
	Abbildungsverzeichnis	75
	Tabellenverzeichnis.....	83
13	Anhang: Abbildungen und Tabellen	87
14	Anlage: Literaturstudie	253

Vorwort

Das Forschungsvorhaben „Wirksamkeit der Abdichtung von Versatzmaterialien“ wurde von der GRS und K-UTEC in Kooperation durchgeführt. Teil 1 (02 E 90474) des Vorhabens „Geochemische Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Salzversatz mit Zuschlagstoffen“ wurde von der GRS und Teil 2 (02 E 90457) „Labor-, Technikums- und In-situ-Versuche am System polymineralisches Salzgestein - Versatzstoff - Fluid“ von K-UTEC bearbeitet. Die Beantragung und Bearbeitung der beiden Teilvorhaben wurde von beiden Organisationen jeweils selbstständig durchgeführt. Ein enger Erfahrungs- und Ergebnisaustausch fand während der Durchführung der Teilvorhaben zwischen den beiden Organisationen statt. Berichtet wird hier über die Untersuchungen und Ergebnisse der GRS.

Kurzfassung

Probenbeschreibung und Zielsetzung

Die Beseitigung langzeitgefährlicher Abfälle (radioaktiver oder chemisch-toxischer Stoffe) stellt ein allgemeines, nur zum Teil gelöstes Problem dar. Als umweltverträglichste Technik wird heute meist die Endlagerung bzw. Deponierung in untertägigen Hohlräumen angesehen. In Deutschland wurde bisher die Verbringung der Abfälle 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 über lange Zeiträume zu isolieren. Dies soll im Normalfall durch die bestehenden Verschlusskonzepte erreicht werden. Im Störfall, d. h. bei Zutritt von Grundwässern oder Salzlösungen, kommt der Wasserpfad als möglicher Ausbreitungsweg für Schadstoffe in Betracht. Wenn die eingelagerten Abfälle mit wässrigen Lösungen in Kontakt kommen, können Schadstoffe aus den Abfällen freigesetzt werden und zusammen mit der Lösung in die Ökosphäre migrieren.

Durch die Verfüllung von Teilbereichen und die Errichtung eines Multibarrieresystems vor der Stilllegung der Untertagedeponie soll die Schadstoffausbreitung verhindert werden. Für untertägige Schadstoffdeponien und radioaktive Endlager im Salz ist daher zur Stabilisierung des Gebirges und zur Volumenreduzierung die Einbringung von Versatzmaterialien vorgesehen. Für die Bewertung der eingesetzten Versatzstoffe werden vor allem gebirgsmechanische Kriterien verwendet.

Eine Abdichtung wird durch die konvergenzbedingte Kompaktion des Versatzes erst im Laufe langer Zeiträume erreicht. Bevor die Kompaktion nicht abgeschlossen ist, kann ein Lösungszutritt in der Regel nicht verhindert werden, obwohl er am wahrscheinlichsten in diesem Zeitraum eintritt. Zutretende Lösungen können durch einen relativ durchlässigen Salzversatz bis zu den Schadstoffen vordringen, diese auslaugen und durch die anhaltende Gebirgskonvergenz zusammen mit ihrem Schadstoffinhalt ausgepresst werden.

Diese Lösungen können unter Umständen auch eine Reaktion mit den Abfällen bewirken, bei der Gase freigesetzt werden, die dann ein gleiches Volumen mit kontaminierter Lösung verdrängen.

Um diesen Schadstofftransport zu verhindern, sind für Endlager radioaktiver Abfälle aufwendige und entsprechend teure Multibarrieresysteme vorgesehen, mit denen eine sofort einsetzende abdichtende Wirkung erzielt wird. Diese haben jedoch den Nachteil, dass sie bei Versagen der Barrierewirkung ihre Funktion ganz oder teilweise einbüßen können. Ursachen, die zum Versagen führen, sind z. B. nicht vorhandener Kraftschluss zum Gebirge, spannungsbedingte Rissbildung, Permeabilitätserhöhung durch thermodynamisch nicht stabile Baustoffe oder nicht ortsstabile Dichtungsmaterialien.

Zur Untersuchung der Verbesserung der Eigenschaften von Versatzstoffen im Salz im Sinne der Barrierewirkung wurde ein dreijähriges F+E-Vorhaben durchgeführt, in dem anhand phasentheoretischer Betrachtungen, geochemischer Laboruntersuchungen und Modellrechnungen ein Verfahren zum Verschluss von Entsorgungsbergwerken durch ein langzeitsicheres Versatzmaterial entwickelt werden sollte.

Primäres Ziel war es, nachzuweisen, dass mit ausgewählten Zuschlagstoffen bei Zutritt von Wasser oder Salzlösungen im Versatzmaterial Reaktionen ausgelöst werden können, die einen langzeitstabilen geochemisch - mineralogischen Selbstverschluss bewirken. Dadurch soll ein weiteres Vordringen der Lösungen stark behindert oder unterbunden werden. Die Schadstoffe sollen so vor der Mobilisierung geschützt und deren Ausbreitung in die Ökosphäre verhindert werden.

Entwickelt wurde ein Verfahren, das diesen Anforderungen entspricht. Es wurde beim Europäischen Patentamt unter der Nr. 00120249.8 angemeldet.

Lösungsansatz und Vorgehensweise

Gegenstand der Erfindung ist ein Verfahren, bei dem reaktives Versatzmaterial mit Salzlösungen unter Vergrößerung des Feststoffvolumens reagiert und dabei einen flüssigkeitsdichten Verschlussstopfen bildet. Dieses Versatzmaterial kann aus einem reinen Stoff, einer Stoffgemenge, die auch Abfall oder Reststoff enthalten kann, einem natürlichen oder einem behandelten natürlichen Stoff bestehen. Der Stoff wird allein oder in Verbindung mit einem oder mehreren, inerten oder ebenfalls reaktiven Stoffen trocken in die zu verfüllenden untertägigen Hohlräume so eingebracht, dass das verbleibende Porenvolumen kleiner als die durch Lösungsreaktion hervorgerufene Volumenzunahme des Feststoffs ist.

Das Verfahren nutzt Stoffe mit ähnlichen Eigenschaften wie die der geologischen Umgebung. Die Stoffe sind ungiftig und belasten die Umwelt nicht zusätzlich. Sie werden als lockere Schüttung (Versatzmaterial) in die untertägigen Hohlräume und Strecken gefüllt. Bei Kontakt mit Wasser oder Salzlösungen reagiert das Ausgangsmaterial zu einem trockenen geochemisch stabilen Feststoff, der den gesamten Hohlraum druckdicht verschließt, so dass ein weiteres Vordringen von Wasser oder Lösung und eventuell darin enthaltener Schadstoffe auf lange Zeit verhindert wird.

Das zum Patent angemeldete Verfahren nutzt folgende Reaktionstypen:

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

Das Verfahren nutzt 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 zusätzlich zu den Reaktionsprodukten aus den Versatzstoffen die in der Lösung enthaltenen gelösten Salze im Porenraum aus. Dabei können weitere erhebliche Mengen Wasser als Kristallwasser im Feststoff gebunden werden. Dies führt zu einer zunehmenden Reduzierung des lösungserfüllten Porenraums, was den Abdichtungsvorgang noch 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.

Mit ausgewählten Versatzmaterialien wurden in Laborversuchen lösungsdichte und druckstabile Verschlüsse mit verschiedenen möglichen Störfalllösungen erreicht. Die Verschlüsse weisen annähernd die mechanischen, chemischen und hydraulischen Eigenschaften des anstehenden unverritzten Salzgebirges auf.

Durch mineralogisch - geochemische Untersuchungen von Versatzmaterialien und Zuschlagstoffen und geochemische Modellrechnungen wurden Reaktionen identifiziert und quantifiziert, die im Falle eines Zutritts von Salzlösung zur Wasserbindung und Verringerung von Porosität und Permeabilität führen. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf in der Praxis anwendbare Stoffe, die solche Reaktionen beim Kontakt mit endlagerrelevanten Salzlösungen zeigen. Zur Auswahl geeigneter Versatzstoffe wurden über 200 Rezepturen in 402 Kurzversuchen untersucht.

Am wirksamsten sind Reaktionen, bei denen Wasser im Mineral gebunden wird. Bei fortschreitender Reaktion, im Verlauf der Versatzdurchtränkung, wird immer mehr Wasser der Lösung entzogen und letztlich quantitativ im Feststoff fixiert. Durch den Wasserverbrauch kommt es nicht nur zur Mineralumbildung bei den Zuschlagstoffen sondern auch zur Mineralneubildung durch Ausfällung gelöster Stoffe bei Übersättigung. Das Volumen der Mineralneubildungen kann sich im Vergleich zum eingesetzten Ausgangsmaterial mehr als verdoppeln.

Für die Untersuchung und Qualifizierung besonders geeigneter Rezepturen wurden Versuche in Hochdrucksäulen durchgeführt. Dazu wurde locker geschüttetes Versatzmaterial mit einer Porosität von ca. 50 % in eine Säule eingefüllt. Dann wurde eine NaCl- oder IP21-Lösung mit konstanter Förderrate durch die Schüttung gepumpt. Die in der Säule ablaufenden Reaktionen führen dazu, dass aufgrund der Mineralum- und -neubildungen der ursprüngliche Porenraum mehr und mehr zukristallisierte, was zu einer Verringerung des Porenraums auf < 2 % und der Permeabilität auf < 10^{-20} m^2 führte. Dies entspricht der Durchlässigkeit des unverritzten Salzgebirges. Computertomogramme zeigen, dass in der ausreagierten Säulenfüllung der verbleibende sehr geringe Porenanteil als Totporen vorliegt. Ab einem zuvor festgelegten Maximaldruck von 20 MPa (200 bar) wurde der Druck der zugegebenen Lösung konstant gehalten und die geförderte Lösungsmenge und der Kristallisationsdruck gemessen. 20 MPa entspricht dem Doppelten des zu erwartenden Lösungsdrucks von 10 MPa (100 bar) in

800 m Teufe und einer mittleren Lösungsdichte von $1,25 \text{ g/cm}^3$ bei einer vollständig gefluteten Grube. Der höhere Druck wurde gewählt, um eine Sicherheitsreserve zu garantieren.

Die Beobachtung des Lösungsdrucks in den Hochdrucksäulenversuchen zeigt, dass die Mineralreaktionen nach ca. $1\frac{1}{2}$ Tagen einsetzen und es innerhalb von Stunden trotz eines Lösungsdrucks von 20 MPa zu einem fast vollständigen Verschluss kommt. Der Kristallisationsdruck erreicht nach ca. 12 Tagen mit bis zu ca. 10 MPa einen Endwert. Auch nach 40 Tagen war kein weiterer Durchfluss bei gleichbleibenden Druckbedingungen zu registrieren. Für diesen stabilen Endzustand wurde eine Permeabilität von $< 10^{-20} \text{ m}^2$ abgeschätzt. Der sich einstellende Kristallisationsdruck ist von der Rezeptur und den geometrischen Randbedingungen abhängig und liegt in den verschiedenen Versuchen zwischen 2 und 10 MPa. Der entstehende Kristallisationsdruck sorgt dafür, dass sich der gebildete Stopfen fest an die Wandung presst und so die Fuge zwischen Versatz und Wandung zuverlässig schließt.

Die nach Abschluss der Versuche aus den Säulen gewonnenen Proben sind kompakt, trocken mit einer Restfeuchte von $< 1 \%$ (m/m) und haben eine glatte Oberfläche. Die mineralogische Zusammensetzung ist nicht homogen, sondern weist entsprechend der fortschreitenden Lösungsentwicklung entlang des Migrationspfads Variationen im Phasenbestand auf. Die Werte der einaxialen Druckfestigkeit an Proben aus dem Stopfen lagen mit 13 bis 15 kN im Bereich von grobkristallinem Steinsalz.

Ist die Versatzsäule lang genug um die Reaktion bis zur vollständigen Wasserbindung ablaufen zu lassen, bleibt vor der Lösungsfront unverändertes lockeres Versatzmaterial erhalten. Dieses kann für den Fall, dass erneut Lösungsmigration auftritt, reagieren und zu einer weiteren Verheilung des Versatzes führen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es möglich ist verschiedene Versatzmaterialien herzustellen, die trocken eingebracht werden und erst bei Lösungszutritt mit der Lösung zu einem flüssigkeits- und druckdichten Verschluss reagieren, der ein weiteres Vordringen der Lösung verhindert. Die Dichtwirkung ist unabhängig von der Zuflussrichtung, so dass sowohl eindringende als auch ausgepresste (kontaminierte) Lösungen am weiteren Migrieren gehindert werden. Der Verschluss ist selbst verheilend, denn sollte z. B. durch mechanische Einwirkung die Integrität verletzt werden, würde die neuerlich migrierende Lösung mit dem bisher noch nicht durchfeuchteten Versatzmaterial reagieren und damit zu einem erneuten Verschluss führen.

Das untersuchte Versatzmaterial hat folgende Vorteile:

- Artverwandtes Material mit ähnlichen Eigenschaften wie das Salzgestein
- Trockene Einbringung
- Einfaches Einbringverfahren
- Selbstständige Bildung eines Verschlussstopfens
- Gasdurchlässig bis zum Lösungszutritt
- Selbstständige Reaktion mit Lösung
- Trockenes Produkt (Restfeuchte < 1 % (m/m))
- Verschluss der Poren (Totporenraum < 0,2 %)
- Starke Verringerung der Permeabilität (< 10^{-20} m²), ähnlich der von Steinsalz
- Kraftschluss zum Gebirge durch Kristallisationsdruck
- schnelle Abdichtung bei Lösungskontakt
- Langzeitstabilität
- Selbstverheilung
- Fixierung von Schadstoffen im Feststoff
- Einaxiale Druckfestigkeit zwischen 13 –15 kN, ähnlich der von grobkristallinem Steinsalz

Diskussion und Interpretation der Ergebnisse

Das Verfahren nutzt chemische Reaktionen zwischen einem Versatzmaterial und einer zu einem unbekanntem Zeitpunkt zutretenden Salzlösung für die Ausbildung einer Barriere zur Verringerung oder Verhinderung der Migration beim Eindringen bzw. Auspressen von Lösungen im Untertagebereich einer Schadstoffdeponie oder eines Endlagers.

Untersucht wurde der Einsatz von Anhydriden und Entwässerungsprodukten kristallwasserhaltiger natürlicher und künstlicher Mineralsalze, auch von Abfällen und Rest-

stoffen mit und ohne Zusatz von inertem Material oder eines weiteren Reaktanden. Der Zusatz kann als Gemenge oder in räumlich gestaffelter Abfolge eingebracht werden. Als am wirkungsvollsten haben sich wasserfreies Magnesiumsulfat und ein Gemisch von wasserfreiem Magnesiumsulfat und Sylvin im stöchiometrischen Verhältnis der resultierenden stabilen Mineralphase Kainit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{KCl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) herausgestellt.

MgSO_4 wasserfrei reagiert zusammen mit eventuell vorhandenen anderen Bestandteilen des Versatzmaterials und dem Wasser der eindringenden Störfalllösung unter Bildung von Magnesiumsulfathydraten (z. B. $\text{MgSO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot \text{KCl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ usw.). Dadurch wird das Wasser chemisch gebunden und das Volumen des Feststoffs erhöht. Die in der Lösung vorhandenen gelösten Salze werden dadurch übersättigt und zusätzlich als Feststoff ausgeschieden. Bei vollständiger Reaktion des Wassers der Lösung mit dem Versatzmaterial bildet sich ein trockenes Produkt.

Um Einfluss auf die ablaufenden Reaktionen hinsichtlich des neuen Feststoffvolumens und des resultierenden maximalen Kristallisationsdrucks zu nehmen, können weitere Salze dem Versatzmaterial beigemischt werden.

Als inertes Material können Steinsalz als Haufwerk oder Haldensalz aber auch industrielle Reststoffe oder Abfälle verwendet werden. Die Menge wird so gewählt, dass durch die Reaktion des Versatzmaterials mit der Lösung der Porenraum vollständig gefüllt wird und sich ein gewünschter Kristallisationsdruck gegen das Gebirge ausbildet. Dabei kann auch Einfluss auf die Korngrößenverteilung zur Optimierung der Einbaudichte genommen werden.

Durch den Einsatz weiterer reaktiver Zuschlagstoffe lässt sich die Reaktion zusätzlich steuern und optimieren, insbesondere im Hinblick auf die Stöchiometrie, die Vollständigkeit, die Phasenstabilität, die Wasserbindung, den Kristallisationsdruck, die Volumenveränderung, das geochemische Milieu und die Zusammensetzung des Ausgangsmaterials. Je nach Randbedingungen und Anforderungen kommt als weiterer reaktiver Stoff vor allem KCl in Betracht. Damit lässt sich die Bildung der langzeitstabilen Minerale Kainit, Carnallit, Bischofit und Kieserit steuern.

Eine weitere Vorgehensweise zur Optimierung des Reaktionsablaufs z. B. im Hinblick auf die geologischen Aufschlussverhältnisse und zur Konstruktion eines Mehrbarriersystems liegt in der räumlich getrennten Einbringung verschiedener Materialien.

Dadurch können selbst für den Fall, dass ein Versatzkörper von der Störfalllösung durchbrochen wird, weitere Reaktionen initiiert werden, die zu einem neuerlichen Selbstverschluss führen oder aber die zufließende Lösung so konditionieren, dass in dem Versatzmaterial die gewünschte Reaktion abläuft. Stellt man entlang des Fließweges der Störfalllösung leicht lösliche Salze, wie z. B. Carnallit, zur Verfügung und lässt die daran angereicherte Lösung auf ein geeignetes Versatzmaterial treffen, können ebenfalls Reaktionen ablaufen, die durch lokale Volumenvergrößerung einen Verschluss bilden.

Die Innovation, Erläuterung der Arbeitsweise und Funktion

Neu ist, dass ein Versatzmaterial eine hydraulisch dichte, geochemisch stabile und selbst verheilende Barriere gegen den Zutritt von Lösungen und die Ausbreitung von Schadstoffen bildet. Diese Barriere kann zusätzlich zu den bisher vorgesehenen Barrieren eingesetzt werden, aber diese auch, je nach Anforderungen, teilweise oder ganz ersetzen.

Im Gegensatz zu aufwendigen technischen Bauwerken kann das Versatzmaterial einfach mit Ladefahrzeugen, Schleuder- oder Blasanlagen als lockeres Haufwerk in die Hohlräume eingebracht werden. Der Versatz bleibt anfangs gasdurchlässig, so dass sich kein Gasdruck in der Grube aufbauen kann.

Die eigentliche Abdichtung erfolgt genau in dem Moment, in dem sie gebraucht wird: beim Lösungszutritt. Es entsteht, ohne weiteres Zutun, ein chemisch stabiler, druckdichter Verschluss. Durch seine einfache Konstruktion ist das angewendete Verfahren sehr robust und störunanfällig.

Die neu gebildeten Minerale sind gegenüber der Porenraumlösung stabil. Die Reaktion kann soweit gehen, dass dort, wo die Lösungsfront am weitesten vorgedrungen ist, sämtliche Lösungsbestandteile, einschließlich eventuell vorhandener Schadstoffe und des Wassers der Lösung, in festen Mineralen fixiert werden. Dadurch wird ein räumlich begrenzter aber sehr dichter Stopfen im Versatzkörper gebildet, der aufgrund des Kristallisationsdrucks auch einen schnellen Kraftschluss zum Gebirge erreicht. Die Volumenvergrößerung der Feststoffe bewirkt nicht nur einen Druckaufbau, sondern führt auch zu einer starken Reduzierung der Permeabilität des Versatzkörpers.

Solange die Permeabilität noch groß genug ist, um eine Migration der Lösung zuzulassen, läuft auch die Mineralneubildungsreaktion ab und führt zu weiterer Verringerung der Permeabilität, bis schließlich die Migration der Lösung gestoppt wird. Wird die Integrität dieses Verschlusses, z. B. durch gebirgsmechanische Vorgänge wie Rissbildung oder Erhöhung des hydrostatischen Drucks gestört und kommt es dadurch zu einer erneuten Lösungsmigration, so trifft die Lösung abermals auf reaktives Material, was wiederum zur Bildung eines dichten Stopfens führt. Also tritt eine Selbstverheilung ein.

Praktische Anwendungsfelder

Das Verfahren dient zur Verfüllung von untertägigen Hohlräumen im Salz. Es hat die besondere Eigenschaft, dass es bei Lösungszutritt wie ein Verschlussbauwerk wirken kann. Daher ist es überall dort einsetzbar, wo neben einer Volumenreduzierung und mechanischen Stützwirkung eine Verhinderung einer Lösungsmigration gefordert ist. Anwendungen sind z. B.:

- Verfüllung von Strecken und Kammern
- Verschluss von Bohrlöchern, Rolllöchern und Blindschächten
- Isolierung von Abfällen durch Einbettung
- Abdämmung von Lösungszutritten
- Abgrenzung oder Unterteilung von Feldesteilen gegen Lösungen
- Verschluss von Tagesschächten und Kavernen im Salinar.

Das entwickelte Verfahren ist vielfach modifizierbar und den örtlichen, räumlichen, geologischen, mechanischen, chemischen und sicherheitstechnischen Gegebenheiten und Zielen anpassbar. Eine Auslegung erfolgt auf der Basis von geochemischen Modellierungen mit dem Rechenprogramm EQ3/6 und den Ergebnissen von Laborversuchen und Messungen. Durch die Anwendung des so optimierten Verfahrens ist es möglich, Schadstoffe jeder Art vor dem Kontakt mit Wasser oder Salzlösungen zu schützen, Grubenteile vor der Flutung zu bewahren oder die Flutung zu steuern. Eine Ausbreitung von Schadstoffen kann dadurch stark reduziert werden.

Das Verfahren kann in allen stratigraphischen Horizonten im Salz, auch in den Kalilagern und im Anhydrit eingesetzt werden.

Daraus lassen sich die wesentlichen Anwendungsfelder ableiten:

- Schutz von Kali- und Steinsalzgruben jeglicher Art (auch Entsorgungsbergwerke) vor dem Zutritt von Wässern und Lösungen
- Steuerung von Zuflüssen in o. a. Gruben bei planmäßiger Flutung
- Verhinderung der Auflösung von leicht löslichen Kalisalzen
- Verhinderung der Migration von Schadstoffen aus eingelagerten Abfällen
- Verstärkung von technischen Barrieren
- Teilweise oder vollständiger Ersatz von Verschlüssen und Dammbauwerken
- Langzeitsicherer Verschluss von o. a. Gruben oder Feldesteilen, z. B. Einlagerungsbereichen im Anschluss an die Betriebsphase
- Nachhaltiger Schutz der Ökosphäre durch Verringerung bzw. Verhinderung des Eintrags von Schadstoffen in das Grund- und Oberflächenwasser.
- Gebirgsmechanische Stabilisierung des Deckgebirges durch Verhinderung von Erosion in den Grubenbauen und durch die Stützwirkung des Versatzmaterials und der gebildeten Stopfen.

Marktfähigkeit der Entwicklung

Das Verfahren ist kostengünstiger und robuster als technische Bauwerke. Es eignet sich zum Verfüllen und zum Schutz von Endlagern, Untertagedeponien und Bergwerken im Salinar. Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ergibt sich aus den nur geringen Mehrkosten für das spezielle Versatzmaterial gegenüber dem bisher vorgesehenen Steinsalzversatz, bei stark verbesserten Eigenschaften. Diese Eigenschaften können dazu führen, dass die Anzahl kostenintensiver Spezialbauwerke verringert, deren Konstruktion vereinfacht wird oder diese ganz entfallen können.

Die Breite der Anwendungsfelder zur Verfüllung und Abdichtung in fast allen untertägigen Hohlräumen im Salinar, wie z. B. Endlager, UTD, Versatzbergwerken, Stilllegungsbergwerken und produzierenden Kali- und Steinsalzgruben aber auch Kavernen

und Solbetrieben, lässt bei entsprechender Auswahl der verwendeten Materialien und Einbringtechnik gute Marktchancen gegenüber konventionellen Verfahren erwarten.

Die Anwendung von leicht verfügbaren Massengütern als reaktives Versatzmaterial, zusammen mit der einfachen Einbringtechnik, macht das Verfahren sowohl kurzzeitig als auch langfristig sehr wirtschaftlich.

Zur Erreichung der Marktfähigkeit ist noch der Nachweis der Übertragbarkeit der theoretischen Berechnungen und Laborversuche auf den In-situ-Maßstab zu erbringen. Dafür sind Arbeiten zur Durchführung von untertägigen Demonstrationsversuchen im Rahmen eines weiteren F+E-Vorhabens angelaufen. Parallel dazu müssen weitere Laboruntersuchungen vorgenommen werden, die die Möglichkeiten und Grenzen der Steuerung wichtiger mechanischer Eigenschaften wie resultierende Drücke und Festigkeiten aufzeigen.

1 Einleitung und Problemstellung

Versatz als technische Barriere gegen Nuklid­ausbreitung ist fester Bestandteil des Endlagerkonzeptes. In der derzeitigen Diskussion werden an den Versatz folgende Anforderungen gestellt:

- Minimierung des freien Restvolumens,
- mechanische Stabilisierung der Grubenbaue und
- Reduzierung der Gesamtpermeabilität.

Für Endlager für radioaktive Abfälle in Salzformationen ist derzeit in erster Linie Steinsalz als Versatzmaterial vorgesehen. Diesem wird im bisherigen Konzept keine wichtige Funktion als Barriere gegen Lösungszutritt zugeschrieben (zumindest nicht in der Anfangsphase bis der Salzversatz infolge Konvergenz die geringen Permeabilitäts­werte des umgebenden Salzgebirges erreicht hat).

Nach dem Einbringen des Versatzes in die Grubenhohlräume liegt der verbleibende Resthohlraum überwiegend als Porenraum vor. Die Größe dieses Porenraums hängt wesentlich von der Zusammensetzung und der Konsistenz des Versatzmaterials sowie dem Einbringverfahren ab und erreicht z. B. im Falle von Salzhauwerk selten Anfangswerte unter ca. 35 %. Entsprechend kann ein solcher Versatz das Eindringen von Lösungen nicht verhindern.

Da der Wasserpfad der wesentliche Ausbreitungsweg ist, kommt dem Verhalten der Barriere „Versatz“ bei und nach dem Fluten der untertägigen Resthohlräume eine besondere Bedeutung für die Langzeitsicherheit zu, besonders wenn es gelingt, das anfänglich sehr große Porenvolumen zu reduzieren. Dies erscheint unter bestimmten Voraussetzungen möglich. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist, dass als Versatzmaterial nicht nur reines Steinsalz verwendet wird, das gegen eindringende Steinsalzesättigte Lösungen chemisch inert ist. Gezielt eingesetzte Zuschlagstoffe können beim Zutritt von Lösungen chemische Reaktionen auslösen, die zu einer beträchtlichen Verkleinerung des offenen Porenvolumens führen. Aus der Kenntnis der Lösungsgleichgewichte der ozeanischen Salze ist es möglich, Reaktionen zwischen Salzlösungen und ausgewählten Zuschlagstoffen zu finden, die zur Wasserbindung und Mineralneubildung mit Vergrößerung des Feststoffvolumens führen. Ein nahezu vollständiger Selbstverschluss des so ertüchtigten Versatzes scheint aus heutiger Sicht möglich.

Wesentlich für die Langzeitsicherheit eines Endlagers ist dabei, dass solche Reaktionen zu neuen stabilen Verbindungen führen, die mit ihrer chemisch-mineralogischen Umgebung im Gleichgewicht stehen.

Versatz als technische Barriere ist nicht nur in Endlagern für radioaktive Abfälle vorgesehen. Auch für die Einlagerung von chemisch-toxischen Abfällen in Untertagedeponien sind abdichtende Versatzstoffe von Interesse. Im industriellen Maßstab werden heute bereits Reststoffe zur Stabilisierung abgeworfener Kaligruben oder Feldesteile verbraucht (UTV). Die chemischen Reaktionen dieser meist bergbaufremden Reststoffe mit eventuell zutretenden Salzlösungen sind bisher noch nicht im Hinblick auf ihre mögliche Barrierewirkung untersucht worden. Inhaltsstoffe dieser Reststoffe können ähnliche Reaktionen mit den Salzlösungen hervorrufen, wie die oben erwähnten Zuschlagstoffe im Salzversatz in Endlagern. Die Untersuchung dieser Reaktionen und eine Optimierung der Versatzeinbringung durch gezielte Kombination unterschiedlicher Reststoffe im Hinblick auf eine Wasserbindung und Volumenvergrößerung im Störfall Lösungszutritt stehen bisher noch aus.

2 Ziele des Vorhabens

Durch mineralogisch – geochemische Untersuchungen von Versatzmaterialien und Zuschlagstoffen in Kombination mit geochemischen Modellrechnungen mit EQ3/6 sollten Reaktionen identifiziert und quantifiziert werden, die im Falle eines Salzlösungszutritts zur Wasserbindung und Verringerung von Porosität und Permeabilität führen. Reaktionen, wie Mineralumwandlungen durch Hydratation und Mineralneubildung durch Übersättigung sollten identifiziert werden, die durch Zunahme des Feststoffvolumens eine Verringerung des Porenvolumens und letztlich den Verschluss von Wegsamkeiten im anfangs hochpermeablen Versatz bewirken. Die Untersuchungen sollten sich auf in der Praxis anwendbare Zuschlagstoffe mit entsprechenden Eigenschaften konzentrieren. Die Reaktionen sollten unter Endlager- oder UTD-Bedingungen zu langzeitstabilen Mineralassoziationen führen. Ein weiterer Schwerpunkt waren gleichartige Untersuchungen an Abfall- und Reststoffen, die im Rahmen von Versatzmaßnahmen untertägig eingebracht werden. Das Potential solcher Versatzrezepturen zur selbstständigen Entwicklung abdichtender Bereiche bei Lösungszutritt sollte untersucht und die zugrunde liegenden Reaktionen quantifiziert werden.

3 Theoretischer und praktischer Hintergrund

3.1 Theoretische Betrachtungen

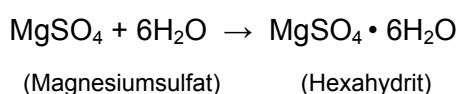
Zur Beurteilung des Langzeitverhaltens eines als Versatz eingebrachten Feststoffes bei Lösungskontakt müssen die Einzelreaktionen zwischen der wässrigen Phase und den Feststoffphasen und deren Auswirkungen auf die Barrierewirkung des Versatzmaterials bekannt sein. Steinsalz als alleiniges Versatzmaterial verhält sich gegenüber zutretenden NaCl-gesättigten Lösungen chemisch inert. Für Zuschlagstoffe, Baustoffe und für Fremdversatz müssen die möglichen Reaktionen mit den relevanten Lösungen im Einzelnen untersucht, modelliert und hinsichtlich der erzielbaren Dichtwirkung bewertet werden.

Betrachtet werden müssen:

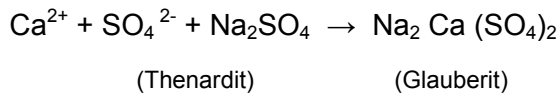
- Lösevorgänge,
- Mineralneu- und -umbildungen,
- Bindung von Wasser als Kristallwasser,
- sich ergebende Volumenbilanz,
- Änderung der Versatzpermeabilität.

Bei chemischen Reaktionen verändert sich das Feststoffvolumen; es kann verkleinert, aber auch vergrößert werden. Für eine Dichtwirkung sind vor allem diejenigen Reaktionen von Bedeutung, die zu einer Vergrößerung des Volumenanteils der Feststoffe im Versatz führen und dadurch die Permeabilität verringern. Das entstehende Produkt muss langzeitstabil, d. h. im thermodynamischen Gleichgewicht mit dem vorhandenen chemischen Milieu sein. Dafür kommen im Wesentlichen drei Reaktionstypen in Frage:

1. Reaktion des Wasseranteils der Lösung mit Komponenten des Versatzes:
 $\text{H}_2\text{O} + \text{Salz} \rightarrow \text{hydratisiertes Salz, z. B.:$

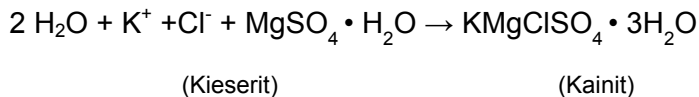


2. Reaktion der gelösten Bestandteile mit Komponenten des Versatzes:
gelöstes Ion + Salz → Doppelsalz, z. B.:



3. Reaktion des Wasseranteils und der gelösten Bestandteile mit Komponenten des Versatzes:

$\text{H}_2\text{O} + \text{gelöstes Ion} + \text{Salz} \rightarrow \text{hydratisiertes Doppelsalz}$, z. B.:



Für die Untersuchung solcher Reaktionen ist es in Anbetracht der komplexen Systeme - Versatz mit Zuschlagstoffen, unterschiedliche geologische Horizonte, verschiedenartige Lösungen - einfacher, wenn der Gesamtablauf in seine Teilreaktionen aufgeteilt wird. Getrennt untersucht werden müssen daher:

1. die spontanen Reaktionen, mit der Bildung von z. T. metastabilen Phasen, beim ersten Kontakt von Versatzmaterial und Lösung
2. die meist längerfristigen dynamischen Vorgänge mit Abbau von Übersättigungen, Umwandlung metastabiler Phasen in stabile Minerale und Stufenmetamorphose
3. die Bedingungen für die Einstellung thermodynamischer Gleichgewichte
4. Auswirkungen von Veränderungen der Randbedingungen, z. B. Konvergenz, Temperatur etc., auf die Einstellung der stabilen Zustände.

3.2 Versatzmaterial als Barriere in Untertagedeponien – eine Literaturstudie

Die Ausführungen in diesem Kapitel stellen die Zusammenfassung der Literaturliteraturauswertung dar. Die dafür konsultierten Literaturstellen sind in der Anlage 1 zusammengestellt, mit Titel, Autoren, Erscheinungsort und –zeit.

Die Literaturrecherche wurde beginnend mit dem Jahr 1985 durchgeführt. Für die Zeit davor lag bereits die Literatursammlung „Salz“ inklusive der Originalarbeiten mit ca. 700 Zitaten vor. Die Recherche wurde vor allem in folgenden Datenbanken durchgeführt:

- GeoLine (FIZ-Technik e.V.)
- GeoRef (American Geological Institute).

Zur Suche wurden die nachfolgenden Stichworte verwendet:

- Salzverfestigung
- Zuschlagstoffe
- Reaktionen mit Lösungen (Laugen)
- Spülversatz
- Fremdversatz
- Flugasche
- Zement
- Streckenversatz
- Versatz
- Streckenverschlüsse
- Sorelzement
- Mg-Gel
- Bohrlochzemente
- Bohrlochverschlüsse
- Versatzstoffe
- HAW
- Reaktionen von Salzlösungen mit Salzen und/oder Salzgesteinen
- Kainitbildung
- Kainitvorkommen
- Vertaubungsreaktionen
- Injektionsverfahren
- Laugeneindämmung

- Kristallisationsdruck
- Versatztechnik
- Versatzmaterial / Verfüllmaterial
- Verfüllen / Versetzen von Grubenbauen
- Wasserbindung
- Salzreaktionen
- Kali- / Salzgewinnung
- Kali- / Salzaufbereitung
- Mineralsynthese
- synthetisches Gestein („synrock“)
- Salzhydrat
- Kali- / Salzrückstände
- Porosität
- Permeabilität
- Bindemittel
- Rekristallisation
- Filterstaub
- Querschnittsabdichtung
- Blasversatz

Da es bei vielen dieser Suchbegriffe wegen unspezifischer Bedeutung zu sehr vielen Treffern kam, wurde die Suche durch Begriffsverknüpfungen präzisiert und dadurch eine Gesamtmenge von ca. 2500 Treffern erreicht. Per Hand wurden daraus 387 Zitate extrahiert und in eine Literaturdatenbank „Salzversatz“ aufgenommen.

Aus dieser deutschen und internationalen Literatur wurden 100 Arbeiten ausgewählt und Kopien der Originalarbeiten beschafft.

3.2.1 Ergebnisse der Literaturrecherche

Zur Verhinderung von Tagesbrüchen in den ehemaligen brandenburgischen Braunkohlengruben wird abbindende Braunkohlenfilterasche (BFA) nach unter Tage verbracht. Das Einbringen bergbaufremder Reststoffe / Abfälle scheidet noch häufig an den heute geltenden Sicherheitsstandards insbesondere dort, wo das Elutionsverhalten der Reststoffe zu anwendungsspezifischen Belastungen führen kann. Bei Kesselaschen muss aus Gründen der Tragfähigkeit und der Schadstoffabgabe eine hohe Einbaudichte gewährleistet werden. Durch Versatzgemische von Kraftwerksreststoffen und Zement kann eine Permeabilität im Versatzkörper von $5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ erreicht werden. Für injektionsfähige Hochofenzemente, Steinflugasche und Bentonit wurden Permeabilitäten von 10^{-14} m^2 ermittelt.

Für Hohlräume, die nach dem 'room and pillow'-Abbauverfahren aufgefahren werden, besteht keine Versatzpflicht.

3.2.2 Verfüllkonzepte

Einbringung selbsthärtenden Versatzes oder bindemittelverfestigten Versatzes. Salztone können als natürliches Analogon für die Beurteilung der Langzeitstabilität eines Tonversatzes herangezogen werden. Für Carnallitbergwerke wurden flüssigkeitsdichte Abschlussbauwerke entwickelt. Nach landesrechtlichen Gesichtspunkten ist zwischen der Verwertung von Versatzstoffen und ihrer Deponierung zu unterscheiden. In Niedersachsen regelt dies die TA Abfall. Die Eignung von Haldenmaterial für eine Verwertung als Versatz ist im Einzelfall nachzuweisen. In den Kaligruben der ehemaligen DDR wurde Versatz nur bei steil stehender Lagerung eingebracht.

Aus gebirgsmechanischer Sicht sind bei dem Verfüllen von gesolten Kavernen Versatzmaterialien vorteilhaft, die schnell eine hohe Festigkeit bei geringer Verformbarkeit erreichen.

3.2.3 Versatz- und Verschlusstechniken

Beim Einbringen von Spülversatz beeinträchtigt eine zu kleine Durchlässigkeit die Entwässerung des Materials. Wirbelschichtasche (WSA) kann bei ausreichend kleinem Korn über große Entfernungen gepumpt und verblasen werden. Über Pipelines können

von über Tage hydraulischer Versatz (Sand/Kies) und Zementschlämme z. T. mit Flugaschen in technische und natürliche Hohlräume gepumpt werden. Ohne Bindemittelzusatz kann das erforderliche Förderwasser den Filterstäuben und festen Reaktionsprodukten aus Abfall- und Sondermüllverbrennungsanlagen nicht entzogen werden. Ihre Brikettierung führt zu einer guten Kompaktierung. In trockenen Einbaubereichen ist der Einsatz von lufttrockenem Bentonit als Pressling-Granulat-Gemisch vorteilhaft für das Dicht- und Lastabtragungsverhalten. NaCl- oder Q-Lösungen können die Eigenschaften und damit die Wirkungsweise von Tonversatz nachhaltig verändern. Ausbaufähig sind die Möglichkeiten der für das Salz angedachten Verschlussprinzipien der provozierten Mineralsynthese, der Dichtungssäule und der Dichtungsschlitzte. Insbesondere eine zeitlich gesteuerte Kristallisation von kalziumsulfathaltigen Kristallen verspricht eine direkte Abdichtung von Fließwegen. Das Versatzverfahren beeinflusst über die Korngrößenverteilung die Versatzdichte und damit die Durchlässigkeitsverteilung. Durch optimale Laugen-Bindemittel-Werte können bei pumpfähiger Konsistenz maximale Festigkeiten und Steifigkeiten und minimale Durchlässigkeiten erzielt werden. Versatz aus Reststoffen und Abfällen weist meist geringere Einbaudichten und Tragfähigkeiten auf als Bergeversatz.

Im ehemaligen Kalibergwerk Glückauf Sondershausen kamen Pump-, Sturz- und Behälterversatztechniken zum Einsatz. Anfallende Lösungen von der Kalirückstandshalde wurden als Dickstoffpumpversatz nach unter Tage verbracht.

Die Verfüllung von Schächten erfolgt nach dem Prinzip der geschichteten Füllsäule unter Verwendung bergfremder Materialien (Basalt, Kies, Sand sowie Beton und Ton).

Beim Einsatz des Injektionsverfahrens ist auf einen optimalen Injektionsdruck zu achten, um ein weiteres Aufreißen (Fracen) von Klüften zu vermeiden.

3.2.4 Salzversatz

Polymineralische Gesteine von Halit-Calcit- und Halit-Quarzgemischen entwickeln unter Druck (~300 MPa) eine Stoffbänderung durch Verscheren der Halitklasten, was zur Reduktion der Festigkeit des Gesamtsystems führt. Feinkörnigere Aggregate werden unter Ausbildung einer ausgeprägten Foliation eingeregelt. Bei der kataklastischen Deformation von Calcit verschließt Halit die Mikroklüfte. Verfestigtes Spül-

versatzmaterial weist Festigkeits- und Verformungsparameter auf, die denen von gewachsenem Hart- und Steinsalz gleichwertig sind.

Die Deformation (Kompaktion) von Steinsalzgrus ist von den Faktoren Korngrößenverteilung, Spannungszustand, Porosität und Feuchtegehalt abhängig. Weitere Einflussgrößen für das Deformationsverhalten sind Kataklyse und Drucklösung. Unterhalb eines Spannungszustandes von 2 MPa dominiert die Drucklösung. In situ gemessene Kompaktionsraten sind meist höher als Laborwerte. Bei der Druckfestigkeit besteht eine direkte Abhängigkeit von der Porosität.

3.2.5 Verhalten von Salzversatz ohne Lösungen

Ideale Sieblinien verbessern das Druck-Setzungs-Verhalten von bindemittellosem und bindemittelhaltigem Versatz von Rückständen der Kalibiaufbereitung. Das thermomechanische Verhalten von Salzgrus, ist durch eine nichtlineare zeit-, spannungs- und temperaturabhängige Funktion, das Kriechverhalten durch die Arrhenius-Gleichung zu beschreiben.

3.2.6 Verhalten von Salzversatz mit Lösungen

Salzlösungen bewirken die Substitution von Calcium im Gips und damit die Bildung von neuen Mineralparagenesen. Durch die Injektion von übersättigten CaSO_4 -Suspensionen können durch Ausfällung von Gips Fließwege im Salz für Lösungen verschlossen werden, was jedoch vom $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ -Verhältnis beeinflusst wird. In dem hexären System Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{SO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{O}$ ist das gebildete Syngenit ein beständiger Bodenkörper. Durch Karbonatisierung und Gipsneubildungen hervorgerufene Volumenvergrößerungen können zur Bildung von Mikrorissen führen.

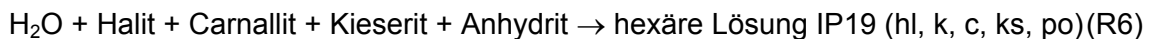
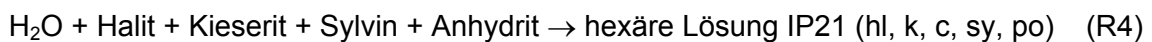
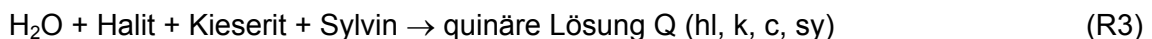
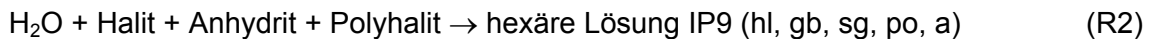
3.3 Geochemische Reaktionen von Salzen und Lösungen

Die Beantwortung der Fragen, welche Wechselwirkungsreaktionen von Lösungen mit unterschiedlichen Salzgemengen auftreten können, welche Lösungen mit welchen Zusammensetzungen in welchen Mengen sich unter welchen Randbedingungen einstellen, welche Mineralumsetzungen und welche Volumenveränderungen stattfinden, war das Ziel langjähriger großmaßstäblicher In-situ-Versuche und geochemischer

Modellierungen der GSF und später der GRS. Die Ergebnisse dieser Arbeiten werden in /HER 00/ zusammengefasst. Durch diese Großversuche konnte gezeigt werden, dass sich die theoretisch zu erwartenden, aus Laborversuchen bekannten Lösungsentwicklungen auch im Großmaßstab einstellen und vor allem, dass diese Vorgänge qualitativ und quantitativ verstanden werden und mittels der geochemischen Modellierung prognostizierbar sind. Da diese Reaktionen für die vorliegende Zielsetzung ausschlaggebende Bedeutung haben, soll darauf näher eingegangen werden.

3.3.1 Relevante Mineralreaktionen in Salzformationen – eine Übersicht

Die Reaktionsgleichungen R1 bis R6 zeigen schematisch die Lösungsentwicklungen bei Kontakt von Wasser mit dem Endlagermedium Steinsalz sowie den beiden häufigsten Kalisalzformationen Hartsalz und Carnallit.



Die Lösevorgänge im anhydritischen Steinsalz (R1) sind einfach und daher gut bekannt. Ausführlich beschrieben werden sie in /BRA 71/. Komplizierter sind die Vorgänge bei der Auflösung von polyhalitischem Steinsalz (R2), da hierbei das komplexe hexäre System Na-K-Ca-Mg-Cl-SO₄ betrachtet werden muss. Eine Reduzierung der Vorgänge auf das einfachere, Ca-freie, quinäre System ist nicht immer möglich, da CaSO₄-haltige Bodenkörper in diesen Reaktionen eine entscheidende Rolle spielen. Eine detaillierte qualitative und quantitative Beschreibung der Auflösungsreaktion von polyhalitischem Steinsalz findet sich in /HER 00/.

Die Untersuchung der Hartsalz- und Carnallitauflösung (Reaktionen R3 bis R6) erfolgte in Großversuchen in den Kalibergwerken Hope und Asse. Diese Arbeiten haben zu einem vertieften Verständnis der Reaktionsmechanismen und zur Absicherung der quantitativen geochemischen Modellrechnungen geführt. Unter anderem konnte gezeigt werden, dass die Lösungszusammensetzung am invarianten Punkt

IP21 (entsprechend der Q-Lösung im quinären System) in abgesoffenen Kalibergwerken immer erreicht wird, die Zusammensetzung IP19 (entsprechend der R-Lösung) dagegen nur unter ganz besonderen Randbedingungen.

Die Lösungen IP21 und IP19 unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zwar nur unwesentlich, die sich bildenden Lösungsmengen und Mineralumsätze sind jedoch extrem unterschiedlich. Diese Unterschiede wirken sich auf die Ergebnisse der Langzeitsicherheitsbetrachtungen aus. Es konnte gezeigt werden, dass sich IP21-Lösungen immer dann bilden, wenn Carnallit und Hartsalz gemeinsam aufgelöst werden. Steht nur Hartsalz zur Verfügung, bildet sich eine konstante Lösung am Punkt IP21, die mit dem Hartsalz nicht im thermodynamischen Gleichgewicht steht. Bei gleich bleibender Lösungszusammensetzung geht unter ständiger Kainitausscheidung die Auflösung weiter, bis entweder Sylvin oder Kieserit nicht mehr zur Verfügung steht. Wird dagegen Carnallit allein aufgelöst, bildet sich eine Gleichgewichtslösung am Punkt IP19, die gleichzeitig das Ende der Auflösung bedeutet. Für jeden Punkt des Reaktionsverlaufes lassen sich mittels geochemischer Modellierung quantitative Reaktionsgleichungen aufstellen, die durch Labor- und In-situ-Versuche abgesichert worden sind /HER 00/.

3.3.2 Theoretische Betrachtung der Vorgänge im quinären System

Betrachtet man das Mg-SO₄-K₂-Dreieck mit den Stabilitätsfeldern der Ca-freien quinären NaCl-gesättigten Lösungen für 25 °C stellt man fest, dass sich die Stabilitätsfelder von Sylvin und Kieserit nicht berühren.

Betrachtet man den Reaktionspfad bei der Auflösung von Hartsalz durch eine polyhalithaltige, NaCl-gesättigte Lösung im Jänecke-Dreieck (Abb. 3.1), wird der Ausgangspunkt infolge der Ionenverhältnisse in der Ausgangslösung im darstellenden Punkt des Polyhalits (po) nahe der SO₄-Ecke liegen. Die Auflösung beginnt mit gleichzeitiger Auflösung von Sylvin und Kieserit, d. h. Kalium und Magnesium reichern sich in der Lösung an. Die Lösungszusammensetzung bewegt sich in Richtung des Sylvinfeldes, bis an der Kristallisationslinie F-M die Sylvinsättigung und damit die Grenze des Sylvinfeldes (begrenzt durch die Punkte M, F, E, Q, P, N) erreicht wird. Durch Kieseritauflösung und doppelte Umsetzung entwickelt sich die Lösung entlang der Linie F-M unter Glaseritausscheidung zu höheren MgCl₂-Gehalten, zunächst bis zum Punkt M. Die M-Lösung ist an Halit, Glaserit, Schönit und Sylvin gesättigt. Da die Kieseritsätti-

gung nicht erreicht ist, kann Kieserit weiter gelöst werden. Die Lösung entwickelt sich unter Ausscheidung von Halit und Schönit zu einer N-Lösung. Da im Schönit Kalium gebunden wird, welches damit der Lösung entzogen wird, löst diese weiteren Sylvin auf, um die Sylvinsättigung aufrechtzuerhalten. Die N-Lösung ist an Halit, Schönit, Leonit und Sylvin gesättigt. Diese Lösung kann weiteren Kieserit lösen und entwickelt sich unter Ausscheidung von Leonit zu einer P-Lösung. Da im Leonit auch Kalium gebunden wird, wird zum Erhalt der Sylvinsättigung auch etwas Sylvin gelöst. Die P-Lösung ist an Halit, Leonit, Kainit und Sylvin gesättigt. Auch diese Lösung kann weiteren Kieserit und Sylvin lösen und bildet unter Ausscheidung von Kainit eine Q-Lösung. Diese Lösung ist an Halit, Carnallit, Kainit und Sylvin gesättigt, nicht aber an Kieserit. Die Auflösung von Kieserit geht unter Ausscheidung von Kainit weiter. Da im Kainit Kalium gebunden wird, muss die Lösung auch Sylvin nachlösen. Da aber der aufgelöste Kieserit zu immer neuem Kainit umgesetzt wird, kann die Lösung die Kieseritsättigung nicht erreichen. Die Auflösung von Kieserit und Sylvin wird also unter ständiger Kainitausscheidung weitergehen /SAN 00/. Dieser Prozess kommt erst zum Stillstand, wenn entweder kein Sylvin oder kein Kieserit mehr vorhanden oder für die Lösung zugänglich ist. Die Lösungszusammensetzung bleibt also am Punkt Q lange Zeit unverändert stehen, obwohl gleichzeitig große Mineralumsetzungen und Volumenänderungen stattfinden. Die Lösung Q ist in Bezug auf das Hartsalz eine konstante Lösung, aber keine Gleichgewichtslösung. Sie kann sich verändern, wenn z. B. Sylvin aufgebraucht ist. Kieserit wird weiter gelöst. Da jetzt aber für die Kainitbildung kein Sylvin mehr zur Verfügung steht, wird $MgSO_4$ nicht mehr verbraucht, sondern führt zur Kieseritsättigung. Damit erreicht die Lösung eine neue Zusammensetzung am Punkt R. Wird dagegen zuerst der Kieserit verbraucht, bleibt die Lösungszusammensetzung am Punkt Q stehen.

Ist das eingedrungene Lösungsvolumen im Vergleich zum Volumen des anstehenden Kieserits und Sylvins im Hartsalzflöz gering, steht praktisch unendlich viel von diesen Mineralen für die Auflösung zur Verfügung. Da aber eine Kieseritsättigung nie erreicht wird, weil immer neuer Kainit gebildet wird, ist es theoretisch vorstellbar, dass sich das betrachtete Lösungsvolumen, unter Beibehaltung der Lösungszusammensetzung am Punkt Q durch das Hartsalzflöz frisst und den Salzstock wieder verlässt, falls das Flöz am Salzstockrand ausbeißt. Dieses Szenario ist für die Sicherheitsbetrachtung eines Endlagers oder einer Untertagedeponie mit Aufschlüssen von kieseritischem Hartsalz denkbar ungünstig, da über den beschriebenen Prozess durchgängige Wegsamkeiten Deckgebirge-Endlager-Deckgebirge entstehen könnten. Es stellt sich die Frage, ob

dieser Prozess wirklich so abläuft oder ob es ein natürliches Ende gibt. Auch für die Einschätzung der Abläufe in einem ähnlich zusammengesetzten Salzversatz ist diese Frage von grundsätzlichem Interesse. Darum wird sie hier ausführlich diskutiert.

3.3.3 Hartsalzauflösung – Eine natürliche geochemische Selbstverschlussreaktion

Die Reaktionen, die zum Selbstverschluss im Salzversatz führen können, weisen bei ähnlicher Mineralzusammensetzung Ähnlichkeiten mit den Abläufen bei der Umbildung von Hartsalz auf. Darum soll hier die Lösungsmetamorphose von Hartsalz am Beispiel der Ergebnisse aus dem Großversuch im gefluteten Kalibergwerk Hope nördlich von Hannover dargestellt werden. Beschrieben wird die Auflösung des verbreitetsten Hartsalztyps „Kieseritisches Hartsalz“, bestehend aus Halit + Sylvin + Kieserit +/- Anhydrit.

Um die angesprochenen Fragen zu beantworten, wurde im stillgelegten Kalibergwerk Hope nördlich von Hannover von 1983 bis 1991 ein großmaßstäblicher In-situ-Versuch durchgeführt. In Hope war Hartsalz der Zusammensetzung 61,4 % Halit, 31,7 % Sylvin, 3,4 % Kieserit und 1,7 % Anhydrit abgebaut worden. Die Grube wurde im Zuge der Solung von Gasspeicherkavernen im Salzstock Empelde mit den dort anfallenden NaCl-Lösungen geflutet.

Die Flutung von Hope begann im März 1984. Die Messung der Lösungsentwicklung wurde durch automatisierte Erfassungssysteme unter Tage als auch direkt durch die Schächte Hope und Adolfsglück und durch eine speziell zu diesem Zweck in einen Hartsalzabbau abgeteuft Messbohrung durchgeführt /HER 87/, /HER 89/, /HER 92/. Die automatische Messung beschränkte sich auf die Erfassung von physikalischen Parametern der Lösungen wie Druck, Temperatur, Leitfähigkeit, Schallgeschwindigkeit. Lösungsproben konnten an drei Stellen des Grubengebäudes, in den beiden Schächten und der Messbohrung gewonnen werden.

In den Abb. 3.2 bis 3.5 sind die Proben aus den tiefen, $MgCl_2$ -reichen Lösungsschichten der Schächte Hope und Adolfsglück und aus der Messbohrung dargestellt. Diese Lösungen standen im direkten Kontakt zum Hartsalz. Abb. 3.2 zeigt die gemessene Lösungsentwicklung im Vergleich zur geochemischen Modellierung. Die in Hope eingeleitete Ausgangslösung war praktisch NaCl-gesättigt. In Abb. 3.2 und den folgenden Abb. 3.6 bis 3.8 sind senkrechte Linien mit den Reaktionspunkten R1 bis R7

eingetragen. An diesen Punkten der Modellierung wurden Reaktionsgleichungen aufgestellt /HER 00/.

Die gemessenen und mittels EQ3/6 berechneten Lösungszusammensetzungen stimmen gut überein. Gut ist auch die Übereinstimmung zwischen den mit EQ3 berechneten Sättigungszuständen (Affinitäten) der beprobten Lösungen und den Affinitäten der Modellierung (s. Abb. 3.3 und 3.4). Durch die Hartsalzauflösung steigen in der NaCl-gesättigten Ausgangslösung die K- und Mg-Gehalte stark an, wodurch neue Bodenkörper zur Sättigung gelangen und Halit aus der Lösung verdrängt wird. Die Halitsättigung bleibt trotz sinkender Na-Gehalte erhalten. Die Affinitäten von Sylvin, Kieserit und Anhydrit, die in der Ausgangslösung nicht gesättigt waren, steigen erwartungsgemäß an. Trotz der extrem guten Löslichkeit von Sylvin und der schlechten Löslichkeit von Anhydrit erreicht Anhydrit vor Sylvin die Sättigung. Dies hängt damit zusammen, dass bis zur Sättigung viel mehr Sylvin als Anhydrit in Lösung gehen muss. Da die Ausgangslösung sehr wenig Mg enthält, ist am Anfang die Kieserituntersättigung sehr groß. Sie nimmt aber auch mit zunehmender Kieseritauflösung nur langsam ab. Die Affinität von Kieserit lag sieben Jahre nach Versuchsbeginn noch bei -4 kcal. Dies entspricht einer 1000-fachen Untersättigung¹ gegenüber dem Wert 0 bei Sättigung. Aus dem Verlauf der Elementgehalte wird deutlich, dass sechs Jahre nach Versuchsbeginn die Lösungsentwicklung noch nicht abgeschlossen ist. Die gleiche Aussage ist aus den Affinitätswerten der Bodenkörper abzuleiten. In den vorangegangenen Betrachtungen wurde gezeigt, dass gegen Ende der Lösungsentwicklung eine Q-Lösung erwartet werden kann, die an den Bodenkörpern Halit, Sylvin, Kainit und Carnallit gesättigt ist. Sechs Jahre nach Versuchsbeginn hatte die Lösung in Hope zwar schon die Sättigung an Halit, Sylvin und Anhydrit erreicht, war aber noch weit von der Sättigung an Kainit und Carnallit entfernt. Die Lösungsentwicklung war also noch in vollem Gange.

Während der In-situ-Versuch nach siebenjähriger Beobachtungszeit, lange vor dem Ende der Reaktion, abgebrochen werden musste, war eine geochemische Modellierung der Reaktion bis zu ihrem thermodynamischen Ende, jedoch ohne Zeitskala,

¹ Affinität = -4 entspricht einem $SI = \log Q/K = -2,936$.
(Affinität = $2,303 \cdot RT \cdot SI = 2,303 \cdot 0,001985 \cdot 298 \cdot (-2,936) = -3,99969$)
Da die Sättigungsskala eine logarithmische Skala ist, entspricht $SI = -2,936$ etwa 1000-facher Untersättigung.

problemlos möglich. Die Ergebnisse dieser Rechnungen sind in den Abb. 3.6 bis 3.8 dargestellt. Das theoretisch erwartete Ende der Lösungsentwicklung am Punkt Q wurde in der geochemischen Modellierung tatsächlich erreicht. Wie weit die experimentell abgedeckte Lösungsentwicklung von ihrem tatsächlichen Ende entfernt ist zeigen die Abb. 3.5 und 3.6 bis 3.8.

Die Modellierung zeigt, dass nacheinander die Sättigungen an Halit, Anhydrit und Sylvin erreicht werden. Kieseritsättigung wird, wie theoretisch erwartet, bis zum Ende der Reaktion nicht erreicht. Die Reaktion hört mit einer leichten Kieserituntersättigung auf.

Die berechneten Entwicklungslinien zeigen eine Reihe von Knicken, die mit dem Auftauchen oder Verschwinden von Bodenkörpern zusammenhängen.

Die Ergebnisse der geochemischen Modellierung beziehen sich auf das hexäre System, welches die CaSO_4 -haltigen Minerale berücksichtigt. An den Knickpunkten der Lösungsentwicklung treten relevante Änderungen im Reaktionsverlauf auf. Minerale gelangen zur Sättigung und werden über einen bestimmten Konzentrationsbereich aus der Lösung als Neubildungen ausgeschieden. Danach können sie wieder aufgezehrt werden und wieder in den Bereich der Untersättigung gelangen (Stufenmetamorphose). Dazu gehören die Minerale Anhydrit, Syngenit, Glaserit und Leonit. Andere Minerale wie Polyhalit, Kainit und Carnallit gelangen zur Sättigung und behalten diese unter ständiger Neubildung und Ausscheidung bis zum Ende der Reaktion bei. Sylvin gelangt schon frühzeitig zur Sättigung und behält diese bis zum Ende der Reaktion bei.

Um die Sättigung aufrechtzuerhalten, müssen während der gesamten Reaktion große Sylvinmengen nachgelöst werden. Das dadurch in die Lösung eingebrachte K wird mit den neu gebildeten kaliumhaltigen Mineralen wieder ausgeschieden, während sich Cl in der Lösung in Form von MgCl_2 anreichert. Diese Änderungen haben direkte Auswirkungen auf den Lösungsschemismus und bewirken Knicke im Reaktionsverlauf. An diesen Reaktionspunkten finden folgende Änderungen im Reaktionsverlauf statt:

- R1 = Ende der experimentellen Beobachtung,
- R2 = Beginn der Polyhalitsättigung,
- R3 = Ende der Glaseritsättigung,
- R4 = Beginn der Kainitsättigung,

- R5 = Ende der Leonitsättigung,
- R6 = Beginn der Carnallitsättigung,
- R7 = Ende der Reaktion am Punkt IP21 (entsprechend dem Punkt Q im quinären System) mit Sättigung an Halit, Sylvin, Carnallit, Kainit und Polyhalit.

In den eingangs angestellten theoretischen Überlegungen wurde gezeigt, dass die Lösungsentwicklung bei der Hartsalzauflösung bei der Betrachtung im Ca-freien NaCl-gesättigten quinären System über die invarianten Punkte M, N, P bis Q geht. Die entsprechenden Punkte im hexären System tragen die Bezeichnungen IP24, IP23, IP22 und IP21. Der Unterschied zwischen den entsprechenden Lösungen im quinären und hexären System besteht darin, dass die quinären Lösungen zusätzlich noch an Polyhalit gesättigt sind. Aus der Betrachtung der Lösungsentwicklung ist zu erkennen, dass es im Reaktionsverlauf Bereiche gibt, in denen die Lösungszusammensetzungen konstant bleiben, aber trotzdem Mineralumsetzungen in großem Umfang stattfinden. Dies ist zwischen den Reaktionspunkten R4 und R5 und zwischen R6 und R7 der Fall. Für die Sicherheitsbetrachtungen in einem gefluteten Salzbergwerk ist diese Beobachtung von erheblicher Bedeutung, da sie das natürliche Ende der Hartsalzauflösung erklärt.

3.3.4 Das Ende der Hartsalzauflösung

Da auch am Ende der Reaktion die Lösung noch nicht kieseritgesättigt ist, stellt sich die Frage, was die Reaktion zum Stillstand bringen kann. Der kainitbildende Kreisprozess /HER 82/ Kieserituntersättigung → Kieseritauflösung → Kainitbildung → Sylvinauflösung → Kainitbildung → Kieserituntersättigung bleibt bis zum Ende der Reaktion als treibende Kraft funktionsfähig. Es muss also einen anderen Grund geben, der das Ende der Reaktion herbeiführt.

Die Wasseraktivität als indirektes Maß für den Salzgehalt der Lösung und die Änderung des Gesamtwassergehaltes im Reaktionsverlauf sind in Abb. 3.8 dargestellt. Aus dem Vergleich der beiden Kurven wird deutlich, dass es im Reaktionsverlauf Bereiche gibt, in denen sich die Lösungszusammensetzung nicht ändert (z. B. zwischen R4 und R5 und zwischen R6 und R7), wohl aber die verfügbare Wassermenge (die Reaktionen werden immer auf 1 kg H₂O in der Ausgangslösung bezogen). Betrachtet man die Abläufe zwischen R6 und R7 wird klar, dass bei gleich bleibender Zusammensetzung

der Lösung am Punkt IP21 (Q) die Wassermenge und damit die Restlösungsmenge kontinuierlich abnimmt und am Punkt R7 ganz verschwindet. Die Reaktion hört also trotz bis zuletzt bestehender Kieserituntersättigung auf, sobald kein Wasser mehr vorhanden ist. Wasser verschwindet aus dem System, weil neben dem eingedrungenen Wasser (es wird eine Einheit von 1 kg betrachtet) als Wasserlieferant nur Kieserit vorhanden ist, die entstehenden Minerale Polyhalit, Kainit und Carnallit aber größere Mengen Wasser binden als eingetragen werden.

Damit kann auch die Frage, ob eindringende Lösungen sich durch das ganze Hartsalzlager fressen können beantwortet werden. In der hier betrachteten Reaktion gibt es keinen vollständigen Selbstverheilungseffekt in dem Sinne, dass das Volumen der ausfallenden Minerale das ursprüngliche Hohlraumvolumen (in welches die Lösung eingedrungen ist) einschließlich des durch Auflösung neu geschaffenen Hohlraums vollständig ausfüllt. Es kommt zwar zu einer deutlichen Verringerung des ursprünglichen Volumens, aber nicht zur vollständigen Verheilung². Trotzdem ist ein „Durchfressen“ der Lösung durch das Hartsalzflöz nicht wahrscheinlich, da die Reaktion durch den vollständigen Verbrauch des Wassers zum Stillstand gelangt. Dies ist dann der Fall, wenn die Menge des zur Verfügung stehenden Wassers begrenzt und im Verhältnis zum Volumen des Hartsalzflözes relativ klein ist, und die Lösung sich innerhalb des Flözes so langsam fortbewegt, dass sich die betrachteten Gleichgewichte einstellen können. Diese Voraussetzungen sind in einem Endlagerbergwerk im Störfall „Lösungszutritt“ erfüllt. Im selbst verheilenden Versatz sind die Verhältnisse derart, dass das ursprüngliche Hohlraumvolumen fast quantitativ verschwindet und das mit der Lösung eingedrungene Wasservolumen vollständig aufgebraucht wird.

² Betrachtet man ein ursprüngliches Lösungsvolumen von 1111 cm^3 (entspricht dem Volumen einer NaCl-gesättigten Lösung mit einem kg Wasser und einer Dichte von $1,205 \text{ g/cm}^3$ und die Mineralumsätze, die eine solche Lösung bis zum Ende der Hartsalzauflösung bewirkt, stellt man fest, dass sich das Ausgangsvolumen zwar um 248 cm^3 verringert, aber nicht ganz verschwindet. Das Volumen aller aufgelösten Minerale beträgt 2744 cm^3 und das der neu gebildeten Minerale 3607 cm^3 . $1111 + 2744 - 3607 = 248$.

3.3.5 Bilanzrechnungen bei der Hartsalzauflösung und Rolle des Ca im System

Von einem kg Wasser (entspricht 55,51 mol) in der Ausgangslösung vom Typ Hope können gemäß Reaktionsgleichung R7 27,7 mol Sylvin, 22,2 mol Kieserit und 11,1 mol Anhydrit gelöst werden. Während der Reaktion werden 5,8 mol Halit, 5,6 mol Carnallit, 11,1 mol Kainit und 5,6 mol Polyhalit ausgeschieden. Die detaillierte Reaktion zeigt, dass im Verlauf der Reaktion noch Zwischenprodukte auftreten und wieder verschwinden. Diese Zwischenprodukte sind 0,28 mol Glaserit, 1,0 mol Leonit und 1,04 mol Syngenit. Aus dieser Betrachtung wird deutlich, dass Ca im Verlauf der ganzen Lösungsentwicklung eine entscheidende Rolle spielt, auch dann noch, wenn die Ca-Gehalte in der Lösung sehr klein geworden sind. Die Kurve der Anhydritauflösung hat im Verlauf der gesamten Reaktion eine gleich bleibende, recht große negative Steigung, d. h. die Anhydritauflösung ändert sich nur unwesentlich, auch bei starken Änderungen der Ca-Gehalte in der Lösung.

3.3.6 Hartsalzauflösung und die Endlagersicherheit

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass es unter bekannten Randbedingungen möglich ist, die Lösungszusammensetzung und deren Entwicklung bei einem Lösungszutritt qualitativ und quantitativ zu beschreiben. Die geochemische Modellierung auf thermodynamischer Basis eröffnet zudem die Möglichkeit, nicht nur das quinäre System, sondern auch das naturnähere hexäre System zu betrachten. Es ist möglich, während der Reaktion auftretende Mineralumsetzungen und Volumenveränderungen zu quantifizieren.

Hartsalzaufschlüsse in einem Endlager oder einer Untertagedeponie führen beim Volllaufen des Grubengebäudes zur Bildung von IP21 Lösungen, bei deren Bildung Anhydrit eine große Rolle spielt.

Die Gefahr eines „Durchfressens“ durch das Hartsalzflöz und des Austritts der Lösungen aus der Salzformation durch neu geschaffene Wegsamkeiten im Hartsalzflöz ist trotz des nicht erreichbaren thermodynamischen Gleichgewichtes nicht gegeben, da durch die Reaktion mehr Wasser verbraucht wird, als im System vorhanden ist. Dabei entstehen Mineralneubildungen mit größerem Volumen als das Volumen der aufgelösten Minerale.

Es stellt sich noch die Frage nach der Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf andere Standorte mit Hartsalzaufschlüssen, aber mit anderen Randbedingungen als Hope bezüglich der Zusammensetzung der zutretenden Ausgangslösung und der Salzzusammensetzung. Dazu ist grundsätzlich festzustellen, dass die Lösungsentwicklung immer auf den gleichen Punkt zustrebt, unabhängig davon, auf welchem Weg sie diesen Punkt erreicht. Bei der Hartsalzauflösung wird sich daher immer eine Q- bzw. IP21-Lösung einstellen, unabhängig von der Zusammensetzung der Ausgangslösung und der Hartsalzzusammensetzung (soweit die Ausgangslösung Kieserit-untersättigt und Kieserit verfügbar ist). Der Weg zu diesem Endpunkt der Entwicklung und die Geschwindigkeit können in Abhängigkeit von den vorliegenden Mineralmengen unterschiedlich sein. Da man aber bei Hartsalzlagerstätten mit großen Mengen Kieserit und Sylvinit rechnen kann, ist bei ihrer Auflösung, wie Schachtmessungen belegen, auch immer mit der Einstellung solcher Endlösungen zu rechnen. Die Zeit, die zum Erreichen dieses Endpunktes der Entwicklung nötig ist, spielt eine untergeordnete Rolle, da Sicherheitsbetrachtungen für Endlager sich auf sehr große Zeiträume erstrecken.

Die geochemische Modellierung auf thermodynamischer Basis erlaubt es, zuverlässige Rechnungen durchzuführen, in die die örtlichen Randbedingungen optimal einfließen. Ebenso sind zuverlässige Parametervariationen möglich, wenn die Randbedingungen nicht genau bekannt sind. Berechnungen dieser Art liegen auch den Betrachtungen der untersuchten Salzversatzrezepturen zugrunde. Darüber hinaus wurde am Salzversatz die rechnerisch bestimmte Reduzierung der Porosität durch computertomographische Aufnahmen belegt. Die durch die abnehmende Porosität bedingte Reduzierung der Permeabilität konnte direkt gemessen werden. So fügen sich geochemische Modellierung und die direkte Bestimmung physikalischer Porosität und hydraulischer Parameter (Permeabilität) zu einem konsistenten Gesamtbild, das eine quantitative Beurteilung des Salzversatzes in seiner Wechselwirkung mit Salzlösung zulässt.

3.4 Beispiele natürlicher geochemischer Selbstverschlussreaktionen

Die gute Eignung von Salzformationen für die langzeitliche Deponierung von Schadstoffen liegt unter anderem daran, dass es natürliche, effektive Mechanismen gibt, die über geologische Zeiträume das Eindringen von Wasser in die Salzstruktur verhindern können. Da insbesondere die Kalisalze leicht wasserlöslich sind, deutet deren heutige Existenz auf Mechanismen hin, die das außerhalb der Formationen vorhandene Wasser langfristig zurückhalten können. Wenn derartige Mechanismen geeignet sind,

die Salzlagerstätte selbst zu schützen, sollte es auch möglich sein, diese oder ähnliche Prozesse zum Schutz der eingelagerten Abfallstoffe vor dem Eindringen von Wasser oder Lösungen in die Einlagerungsbereiche zu nutzen.

Bei diesen Mechanismen handelt es sich neben dem allmählichen Schließen von tektonisch gebildeten oder durch Auflösung entstandenen Wegsamkeiten durch die Gebirgskonvergenz, vor allem um chemische Prozesse.

3.4.1 Kluffüllungen

Wegsamkeiten können sich z. B. bilden, wenn durch Gebirgsbewegungen Zugspannungen entstehen, die insbesondere in Anhydrit-, Dolomit- und Tonlagen zu Klüften führen. Im Werrarevier kommen auch Störungen durch Basaltintrusionen hinzu. Häufig sind derartige Klüfte durch sekundäre Minerale, wie z. B. Halit, Sylvit oder Carnallit vollständig ausgefüllt und verheilt. Die Sekundärminerale sind meist bei der Abkühlung wärmerer, migrierender Lösungen auskristallisiert und haben die Wegsamkeit bis zur vollständigen Abdichtung geschlossen. Diese Lösungen stammen entweder aus dem Liegenden der Salzstruktur oder sind durch Thermometamorphose in der Salzlagerstätte entstanden. Auch Reste von ehemaligem Meerwasser, aus dem die Salzformationen ursprünglich gebildet wurden (so genannte Uralagen), werden als Ursprung diskutiert.

3.4.2 Sättigungsgrenzen

Trifft Wasser auf Salz, wird dieses gelöst, allerdings nur bis zur Sättigung an den vorhandenen Mineralen, z. B. Halit und Anhydrit. Derartige Lösungen findet man daher am Top und an den Flanken von Salzformationen. Diese Lösungen haben eine höhere Dichte als das Grundwasser und bleiben, wenn nicht Strömungsvorgänge einen Abtransport bewirken, als schützende Schicht zwischen Salz und Süßwasser. Dies sind die so genannten Hutgesteinlösungen, die zusammen mit den Lösungsrückständen das Salz nach oben abschirmen. An Salzstöcken stellt sich so ein Gleichgewicht zwischen Salzstockaufstieg (Halokinese) und Ablaugung ein.

3.4.3 Kainitbildung

Kalilager, die bis in den Bereich des Grundwassers reichen, verhalten sich anders. Hier laufen die unter Kap. 3.3 beschriebenen komplexen Lösungsreaktionen mit Mineralum- und -neubildung ab. Vor allem ist es die Kainitisierung, die zu einer Volumenzunahme des Feststoffanteils führt, was eine Selbstverheilung der Migrationswege bewirkt.

Kainithaltige Gesteine (Kainitit) kommen vor allem in der Nähe des Salzspiegels (Abb. 3.9) und des Salzhangs (Abb. 3.10) vor. Dort sind sie aus carnallitischen bzw. sylvinitischen kieserithaltigen Kalilagern durch Lösungsmetamorphose entstanden. Dem Bergmann dienen daher Kainitvorkommen als Hinweis für das Erreichen des Randes der Salzstruktur.

An exponierten Stellen, an denen Kalisalzhorizonte mit Grundwasser oder NaCl-gesättigten Lösungen in Kontakt kommen, wird zuerst ein Teil des Gesteins gelöst, und ein Teil des gelösten Halites ausgeschieden (sekundärer Halit). Dieser Vorgang kann bis zur Totalvertaubung gehen /STR 87/, d. h. alle ursprünglich vorhandenen Kalium- und Magnesiumsalze gehen in Lösung und werden mit der Lösung abtransportiert. Zurück bleiben der primäre und der sekundäre Halit.

Enthält das Lager Carnallit, wird dieser im weiteren Verlauf inkongruent zersetzt, d. h. das Magnesiumchloridhexahydrat geht in Lösung, während das Kaliumchlorid als so genannter Zersetzungssylvin zurückbleibt. Das in der eindringenden Lösung enthaltene Natriumchlorid wird bei diesem Vorgang übersättigt und als Halit ausgeschieden. Bei diesem Vorgang bildet sich zusammen mit dem vorhandenen Kieserit und dem primären Halit ein kieseritisches Hartsalz. Der Vorgang führt zu einer Reduzierung der Flözmächtigkeit. Dieser Volumenschwund wird durch Gebirgskonvergenz ausgeglichen. In Gruben in flacher Lagerung sind solche Mächtigkeitsreduzierungen am Übergang Carnallitit zu Hartsalz mit bruchloser Verformung des Hangenden häufig zu beobachten. Dieser Vorgang hat wegen der Volumenabnahme der festen Phasen keine selbst verheilende Wirkung und ist häufig an Störungszonen gebunden.

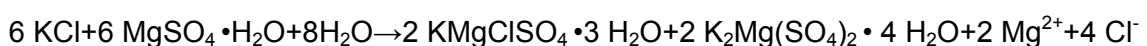
Begrenzt wird diese Lösungsmetamorphose durch das Erreichen der Carnallitsättigung am isotherm invarianten Punkt Q des quinären Meerwassersystems. Auch wenn keine Carnallitzersetzung mehr stattfindet, ist für den Fall, dass die Lösung nicht abgepresst wird, mit dem Beginn der Kainitisierung zu rechnen. Da diese Vorgänge im Porenraum der Gesteine ablaufen, sind die Umwandlungsgeschwindigkeiten wegen des behin-

der Stofftransport sehr gering. Zum Zeitpunkt der Kainitisierung ist der lösungserfüllte Porenraum klein. Dies bedeutet, dass die Vergrößerung des Feststoffvolumens bei der Kainitbildung zu einem Verschluss der Poren und Wegsamkeiten führen kann. Die eindringende Lösung verschließt sich hierdurch selbst den Weg für ein weiteres Vordringen. Restlösungen, die im Porenraum eingeschlossen werden, reagieren mit dem anstehenden Gestein weiter, bis das gesamte Wasser als Kristallwasser im Kainit gebunden und damit aufgebraucht wird. Der dabei entstehende Kristallisationsdruck führt zu einer weiteren Verdichtung des Gesteins. Hierdurch bildet sich ein trockenes und dichtes sekundäres Gestein.

Trifft eine NaCl-Lösung direkt auf Hartsalz, wird zuerst vor allem Sylvinit bis zur Sättigung gelöst, wobei eine entsprechende Menge Halit ausgeschieden wird. Danach beginnt die doppelte Umsetzung $\text{KCl} + \text{MgSO}_4 \leftrightarrow \text{K}_2\text{SO}_4 + \text{MgCl}_2$, wobei zuerst Schönit, bei steigenden MgCl_2 -gehalten in der Reaktionslösung Leonit und letztlich Kainit gebildet wird. Dieser Prozess läuft über die Punkte P und M bis zum Punkt Q.

Dort wird bis zum vollständigen Wasserverbrauch, wie bereits oben beschrieben, Kainit gebildet. Der Selbstverschluss des Hartsalzlagers ist in diesem Fall wegen des Fehlens der anfänglichen starken Mineralauflösung erheblich effektiver.

Die vereinfachte Reaktionsgleichung für die Bildung von Kainit über Leonit (ohne Wiederauflösung) gibt einen Eindruck über die Volumenvergrößerung der Minerale um 34 %.



$$225 \text{ cm}^3 + 194 \text{ cm}^3 + (180 \text{ cm}^3) \rightarrow 227 \text{ cm}^3 + 333 \text{ cm}^3$$

$$\text{Minerale gelöst} : 419 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Minerale neu gebildet} : 560 \text{ cm}^3$$

/KÜH 57/ gibt eine Volumenzunahme von 28 % an. /SES 87/ beschreibt eine derartige Paragenese im Kaliwerk Neuhof-Ellers mit Leonit und Kainit in der Nähe des Salzhangs (Exkursionspunkt 4). Den Dünnschliff einer Handstückprobe von dieser Lokalität zeigt Abb. 3.11. Die Kainitisierungszone ist nach /SES 87/ in der Regel wenige Zehner Meter breit und geht in Richtung Salzhang in völlige Vertaubung über, in der vorwiegend grobkörniges bis spätiges Steinsalz auftritt. Die Kainitisierungszone ist mit dem normal ausgebildeten Kalilager labusartig verzahnt. Nach /KÜH 57/ verursacht die Volumenzunahme einen Kristallisationsdruck, durch den Poren und Haarrisse völlig

zugepresst werden. Dadurch soll der Vorgang der Lösungsinfiltration unterbunden und die Kainitisierung gestoppt werden.

Dieser natürliche Vorgang der Selbstverheilung durch Kainitisierung ist jedoch nicht direkt in einem Versatzmaterial anwendbar. Erstens ist die Reaktionsgeschwindigkeit der Kainitisierung wegen der erforderlichen doppelten Umsetzung gering, so dass nur sehr langsam migrierende Lösungsfronten genügend Stoffumsatz bewirken. Zweitens ist die molare Volumenexpansion nicht sehr hoch, so dass nur stark verdichtetes Material für einen Selbstverschluss in Frage kommt. Als natürliches Analogon kann die Selbstverheilung durch Kainitisierung jedoch als Nachweis für die langfristige Absperrung von angestauten, druckbelasteten Lösungen dienen. Die Natur zeigt hier ein Beispiel für die Machbarkeit von sich selbst bildenden und selbst verheilenden Stofftransportbarrieren, deren Übertragung auf den Verschluss von bergmännisch aufgefahrenen Hohlräumen nur der Ermittlung geeigneter Versatzstoffe bedarf.

4 Konzept der Versatzertüchtigung durch Initiieren von Selbstverschlussreaktionen

Im Kapitel 3 wurden die Erwartungen an die Eigenschaften eines Versatzmaterials in einer Grube im Salz beschrieben. Die Anforderungen an die chemischen Eigenschaften waren bisher sehr gering. Das Material sollte möglichst arteigen, d. h. dem Stoffbestand der Salzlager ähnlich, und gegen Lösungsangriff stabil sein. Chemische Reaktionen und aktive chemische Barriereigenschaften waren bisher nicht gefordert.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde ein Konzept entwickelt, das Potential möglicher Stoffumsätze wie sie bei der Kainitisierung von Kalilagern beobachtet wurden auf Zuschlagstoffe für Salzversatz zu übertragen (Abb. 4.1). Dies bedeutete, ein chemisch reaktives Versatzmaterial aus arteigenen Stoffen zu entwickeln und zu erproben. Arteigen heißt im Falle der marinen Evaporitgesteine, dass sich die Reaktionen mit dem quinären oder hexären System der Salze ozeanischer Salzablagerungen (Meerwassersystem) und deren Untersystemen beschreiben lassen. Als reaktive Komponenten kamen also nur Na, K, Mg, Ca, Cl, SO_4 und H_2O in Betracht.

4.1 Auswahl von Zuschlagstoffen

Für das Initiieren von Selbstverschlussreaktionen kommen als Zuschlagstoffe zum Salzversatz nur Stoffe in Frage, die mit den zutretenden Lösungen nicht im Gleichgewicht sind und daher mit diesen reagieren können. Diese Stoffe sollen mit Komponenten der Lösung derart reagieren, dass sich neue Feststoffe bilden, die ein größeres Molvolumen als der Ausgangsstoff bzw. die Summe der Ausgangsstoffe haben. Es müssen also Reaktionen gefunden werden, bei denen Komponenten aus der Lösung zur Bildung neuer Mineralphasen beitragen. Die Hauptkomponente der Lösungen ist das Wasser. Daher sind vor allem Reaktionen, bei denen sich kristallwasserhaltige Salze bilden, von Interesse.

Die wichtigsten chloridischen Salze, die Kristallwasser enthalten, sind im quinären System der Carnallit $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ und der Bischofit $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Als Reaktant käme wasserfreies Magnesiumchlorid in Frage. Dies ist nur schwer in reiner Form herstellbar und daher selbst in Labormengen nicht zu erhalten. Wie später noch gezeigt wird, spielt die Kristallisation von $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dennoch eine wichtige Rolle.

Im hexären System treten die CaCl_2 -haltigen Minerale Antarctit $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ und der Tachhydrit $\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ auf. Calciumchlorid wasserfrei ist zwar verfügbar; es wurde auch wegen des Vorkommens in Flugaschen anfänglich mitbetrachtet. Die Existenzgebiete dieser Salze liegen jedoch bei sehr hohen CaCl_2 -gehalten in der Lösung, so dass vor Erreichen der Mineralsättigung zu große Mengen an CaCl_2 gelöst werden müssen. Nur bei sehr großem Feststoff-/Lösungsverhältnis kann es daher zu einer ausreichenden Mineralbildung kommen. Natriumchlorid bildet im zu betrachtenden Temperaturintervall keine hydratisierten Salze und Kaliumchlorid nur Kainit $\text{KMgSO}_4\text{Cl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.

Anders sieht es bei den Sulfaten aus. Hier gibt es eine Fülle von kristallwasserhaltigen einfachen Salzen und Doppelsalzen. Der Polyhalit ist sogar ein wasserhaltiges Salz mit drei unterschiedlichen Kationen. Alle Sulfate des Meerwassersystems bilden hydratisierte Salze:

Na_2SO_4

bildet Mirabilit (Glaubersalz) $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, Löweit $\text{Na}_{12}\text{Mg}_7(\text{SO}_4)_{13} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ und Astrakanit (Blödit) $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

K_2SO_4

bildet Astrakanit (Blödit) $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Leonit $\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Schönit $\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Syngenit $\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Gorgeyit $\text{K}_2\text{Ca}_5(\text{SO}_4)_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ und Polyhalit $\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

CaSO_4

bildet Halbhydrat (Bassanit) $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Syngenit $\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Gorgeyit $\text{K}_2\text{Ca}_5(\text{SO}_4)_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ und Polyhalit $\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

MgSO_4

bildet Kieserit $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Starkeyit (Leonhardit) $\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Pentahydrit $\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Hexahydrit $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Epsomit (Bittersalz, Reichhardit) $\text{MgSO} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, Leonit $\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Schönit $\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Kainit $\text{KMgSO}_4\text{Cl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, Astrakanit (Blödit) $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Löweit $\text{Na}_{12}\text{Mg}_7(\text{SO}_4)_{13} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ und Polyhalit $\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Von diesen Sulfaten ist das Magnesiumsulfat am häufigsten, da es anders als Natrium- und Kaliumsulfat kein eigenes Existenzfeld im quinären System und dessen Untersystemen hat. Dies bedeutet, dass es, egal mit welcher Lösung es Kontakt hat, ab Erreichen der Sättigung immer zu Mineralbildung unter Einbau von Wasser und/oder Lösungsbestandteilen kommt. Beim Calciumsulfat sind die Wasseraufnahme und die Reaktionsmöglichkeiten im Vergleich zum Magnesiumsulfat beschränkt.

4.2 Beschreibung von Selbstverschlussreaktionen

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. Bischofit, auskristallisieren.

Betrachtet werden müssen also:

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

Bei diesen Reaktionen kann das Feststoffvolumen verkleinert, aber auch vergrößert werden. Für die Langzeitsicherheit sind vor allem diejenigen Reaktionen von Bedeutung, die zu einer Vergrößerung des Volumenanteils der Feststoffe im Versatz führen und dadurch die Permeabilität verringern.

Für die Untersuchung solcher Reaktionen ist es in Anbetracht der komplexen Systeme (Versatz mit Zuschlagstoffen, unterschiedliche geologische Horizonte, verschiedenartige Lösungen) einfacher, wenn der Gesamttablauf in Teilreaktionen aufgeteilt wird.

Getrennt untersucht werden können:

1. die spontanen Reaktionen, mit der Bildung von z. T. metastabilen Phasen, beim ersten Kontakt von Versatzmaterial und Lösung,
2. die meist längerfristigen dynamischen Vorgänge mit Abbau von Übersättigungen, Umwandlung metastabiler Phasen in stabile Minerale und Stufenmetamorphose,
3. die Bedingungen für die Einstellung thermodynamischer Gleichgewichte,
4. die Auswirkungen von Veränderungen der Randbedingungen, z. B. Konvergenz, Temperatur etc., auf die Einstellung der stabilen Zustände.

5 Vorgehensweise - Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm gliederte sich in zwei Arbeitspakete. AP1 umfasste die theoretischen Arbeiten und Modellrechnungen. In AP2 wurden die Laborversuche zusammengefasst, die in Abhängigkeit von den Ergebnissen aus AP1 durchgeführt wurden.

5.1 Sichtung, Auswahl und Bewertung möglicher Versatz- und Zuschlagstoffe

Aufgrund der Ergebnisse einer Literaturlauswertung und theoretischer Betrachtungen wurden die Reaktionen ausgewählt, die stabile Bodenkörper zu den möglichen Störfalllösungen bilden und die als Bestandteil von Salzlagerstätten vorkommen. Die Betrachtung schloss auch Ausgangsmaterialien ein, die kein Existenzgebiet in den Salzsystemen haben und eventuell nur künstlich vorkommen, jedoch Bestandteil potentieller Zuschlagstoffe sind. Dies waren Stoffe, die bei Kontakt mit den Lösungen entweder mit Lösungsbestandteilen und/oder untereinander reagieren und dann stabile Bodenkörper bilden.

5.2 Experimentelle Arbeiten

Für die Untersuchung der chemischen Reaktionen zwischen Lösung und Versatzmaterial wurden jeweils die beiden wichtigsten Störfalllösungen verwendet, wie sie /HER 95/ beschreibt:

1. die an Halit, Anhydrit, Syngenit, Glauberit und Polyhalit gesättigte, NaCl-reiche IP9-Lösung, die die Gleichgewichtslösung zu polyhalitischem Steinsalz darstellt,
2. die an Halit, Anhydrit, Kainit, Kieserit und Carnallit gesättigte, MgCl₂-reiche IP21-Lösung, die im Gleichgewicht zu dem Carnallit der Kalilager des Zechsteinsalinars steht.

In Tab. 0.1 sind die Zusammensetzungen der in den Experimenten eingesetzten Lösungen angegeben. Die Art der verwendeten Feststoffe und ihre chemische Zusammensetzung finden sich in Tab. 0.2.

In Kurzzeitexperimenten wurden die häufigsten Materialgruppen wie Magnesiumsulfat, Natriumsulfat, Kieserit, Kaliumsulfat, Kaliumchlorid, Calciumchlorid, Hartsalz, UTD-Abfälle untersucht (s. Tab. 0.3 bis 0.35). Dazu wurden reine Substanzen, die sich als wesentliche Komponenten oder Zuschlagstoffe herausgestellt hatten, mit den Lösungen kurzzeitig kontaktiert und dann möglichst quantitativ wieder getrennt. Die Veränderungen des Feststoffs und der Lösungen wurden untersucht.

Die aus der großen Anzahl von Kurzzeitversuchen (402 verschiedene Versuche mit insgesamt 14 Stoffen oder Stoffkombinationen und zwei Salzlösungen) gewonnenen Daten über Gleichgewichtsbedingungen und Stoffumsätze wurden für die Planung der weiteren Versuche, der so genannten Hochdrucksäulenversuche, herangezogen. In diesen Versuchen (insgesamt 14) wurden die besonders geeigneten Reaktanten einer detaillierteren Untersuchung unterzogen.

Die erfassten Messgrößen in beiden Versuchsarten sind aus den Tab. 0.3 bis 0.37 zu ersehen. Details zu den Versuchsdurchführungen finden sich im Kapitel Untersuchungsmethoden.

6 Untersuchungsverfahren

6.1 Kurzzeitversuche

Zur Beobachtung der schnellen Reaktionen, die mit dem Ausgangsmaterial und der Lösung zu einem druckdichten Stopfen führen sollten, wurden Kurzzeitexperimente durchgeführt. Die zu untersuchenden Komponenten oder Zuschlagstoffe wurden mit den Lösungen kontaktiert und dann nach unterschiedlichen Zeiten möglichst quantitativ wieder getrennt. Die dabei ablaufenden Veränderungen des Feststoffs und der Lösungen wurden untersucht.

Der Feststoff wurde dazu in Zentrifugalfilterröhrchen (s. Abb. 6.1) mit einer hydrophoben Teflonmembran eingewogen und mit der jeweiligen Lösung versetzt. Nach Ablauf der Reaktionen wurden Feststoff und Flüssigkeit zentrifugiert. Die Teflonmembran ist erst bei erhöhtem Druck (z. B. beim Zentrifugieren) für die wässrige Lösung durchlässig. Damit kann verhindert werden, dass bei reaktionsträgem Material die Lösung vorzeitig durch den Filter in das Auffanggefäß abfließt. Durch das Zentrifugieren wird die im Reaktionsteil evtl. noch vorhandene nicht reagierte Lösung bei 6000 Umdrehungen/Minute durch den Reaktionsstopfen gedrückt. Anhand der Durchflussmenge kann auf die Durchlässigkeit des Stopfens geschlossen werden.

Gemessen wurden die Lösungszusammensetzung und Lösungsmenge, sowohl der überstehenden, durch Dekantieren gewonnenen Lösung als auch des evtl. vorhandenen Zentrifugats. Bestimmt wurden auch der Mineralbestand und die Volumen- und Massenänderungen sowie das Kristallwasser. Traten im Aufgussteil nach der Reaktion mehrere sichtbare Reaktionszonen auf (nicht reagiertes Material und Reaktionsprodukt), wurde das Röhrchen an der Grenzfläche zerschnitten und selektiv beprobt. Gegen Verdunstung wurden die Zentrifugalfilter dicht verschlossen. Blindversuche zeigten, dass an inertem Steinsalz praktisch keine Lösungsrückhaltung nach dem Zentrifugieren auftrat.

6.2 Säulenversuche

Zur Untersuchung der Vorgänge beim Befeuchten und Durchströmen von ausgewählten Versatzmaterialien sollten in Glassäulen (Chromatographiesäulen) drucklose Versuche durchgeführt werden. Dabei kam es sehr schnell zur Bildung eines Stopfens.

Ohne Druck floss schon nach wenigen Millimetern bis Zentimetern keine Lösung mehr in die Säule. Häufig kam es auch zum Platzen des Glases durch den sich aufbauenden Kristallisationsdruck im Stopfenbereich. Der Einsatz von Kunststoffrohren verhinderte zwar das Platzen, aber nicht den schnellen Verschluss. Die Wirkung der Reaktion war identisch mit den Kurzzeitversuchen; es konnte jedoch kein Drucktest wie beim Zentrifugieren gemacht werden.

Um die Vorgänge beim Durchströmen beobachten zu können, wurde eine verfüllte, horizontale, 2 m lange Glassäule mit 4,9 cm Innendurchmesser mit einer Pumpe langsam geflutet. Der Pumpendruck betrug max. 0,3 MPa. Auch hier führte der Kristallisationsdruck bei der Stopfenbildung zum Bruch des Glases, nachdem ca. 50 cm der Säule durchfeuchtet waren.

6.3 Hochdrucksäulenversuche

Die Hochdrucksäulenversuche wurden im Verlauf des Projektes den Kenntnissen der Reaktionsmechanismen und der Wirkung der Verschlussstopfen angepasst und instrumentell ständig erweitert. Abb. 6.2 zeigt das Schema des Versuchsaufbaus. Abb. 6.3 zeigt einen Versuchsaufbau mit einer senkrechten HPLC-Säule und den Waagen zur Bestimmung der Förderrate und der Massenerfassung. Unter dem Säulenstativ ist die Hochdruckpumpe zu erkennen; daneben ein Dichtemessgerät zur Erfassung der Lösungsdichte direkt nach dem Durchströmen der Säule. Die Dichtemessung war allerdings nur möglich, wenn mindestens 2 ml Reaktionslösung austraten, was nicht immer der Fall war. Abb. 6.4 zeigt einen Versuchsaufbau mit horizontaler Säule. Hier sind zusätzlich zu den Komponenten aus Abb. 6.3 noch die außen auf der Säule aufgeklebten Dehnungsmessstreifen und die dazugehörige Messwert-erfassung zu erkennen.

Ursprünglich war vorgesehen, die Hochdruckversuche mit zwei unterschiedlichen Versuchsdurchführungen zu gestalten. Die Stopfenbildung, die erst in diesem Stadium erwartet wurde, sollte in schnellen Versuchen untersucht werden, während das Langzeitverhalten in weiteren Dauerstandsversuchen nachgewiesen werden sollte.

Nach den Ergebnissen der Säulenversuche ergab sich die Notwendigkeit, die Versuchsdurchführung der Hochdruckversuche sukzessive zu entwickeln.

Für die Versuchsaufbauten wurden soweit wie möglich Komponenten aus der Hochdruck-Säulen-Chromatographie (HPLC) eingesetzt. Wichtigster Teil waren Edelstahlsäulen mit unterschiedlichem Durchmesser und Länge (s. Tab. 0.36). Zur Flutung der Säulen dienten regelbare HPLC-Pumpen, die bei konstanter, kleiner Förderrate die Lösungen in die Säulen pumpen. Beim Erreichen eines voreingestellten Maximaldrucks wurde nur noch die zur Aufrechterhaltung des Drucks erforderliche Lösungsmenge nachgepumpt. Alle Hochdrucksäulenversuche wurden mit einem Maximaldruck von 20 MPa (200 bar) gefahren. Dieser Druck entspricht etwa dem Gebirgsdruck in 800 m Teufe und übersteigt den hydrostatischen Druck um fast das Doppelte.

Die Pumprate wurde so eingestellt, dass sie einem Lösungszutritt von 100 m^3 pro Jahr bezogen auf einen 20 m^2 -Streckenquerschnitt entsprach. Die Messung der Förderrate allein war jedoch zu ungenau, um den Versuch unter kontrollierten Bedingungen durchzuführen. Störungen durch Luftblasen und Verstopfungen im Fördersystem konnten nicht rechtzeitig erkannt werden. Daher wurde zusätzlich die Masse der eingepumpten Lösung, später auch die der evtl. durchgetretenen Lösung, mit einer Waage kontinuierlich erfasst. Außerdem wurde der Pumpendruck kontinuierlich registriert.

Bei einigen Versuchen wurden zwei Säulen hintereinander geschaltet, um eine längere Reaktionszone zu bekommen.

Um Aussagen über den Kristallisationsdruck zu erhalten, wurde mit Dehnungsmessstreifen (DMS), die außen auf die Wandung der HPLC-Säule aufgeklebt wurden, die druckbedingte Umfangsvergrößerung der Säule gemessen. Vorher wurden die DMS durch Aufbringen eines bekannten hydrostatischen Säuleninnendrucks auf Druck kalibriert. Nachdem dieses Verfahren erfolgreich war, wurden bei weiteren Säulen mehrere DMS in regelmäßigen Abständen aufgeklebt. So konnte die Zone der höchsten Druckentwicklung und damit der Bereich der intensivsten Stopfenbildung lokalisiert werden.

Die Probengewinnung aus den HPLC-Säulen war nur durch Aufschneiden der Rohrwand möglich. Die so gewonnenen Proben eigneten sich zwar für die chemischen und mineralogischen Untersuchungen, waren aber durch die Beprobung mechanisch beeinträchtigt, so dass keine Festigkeitsuntersuchungen gemacht werden konnten. Daher wurde eine spezielle Hochdruckzelle gebaut, mit der sowohl Proben definierter Geometrie hergestellt werden konnten (die Proben brauchten nach Versuchsende nicht durch Sägen oder Abdrehen präpariert zu werden), als auch der Kristallisationsdruck

direkt gemessen werden konnte. Abb. 6.5 zeigt die Prinzipzeichnung einer derartigen Zelle.

Durch Hintereinanderschaltung zweier Kristallisationsdruckmesszellen (Abb. 6.6) konnten gleichzeitig zwei Probekörper hergestellt werden, die repräsentativ für unterschiedlich weit entwickelte Reaktionsbereiche im Versatzmaterial entlang des Migrationspfades der Lösung sind. Während in der ersten Zelle frische Lösung auf das Versatzmaterial trifft, ist es in der zweiten Zelle eine durch die vorherige Reaktion veränderte Lösung. An den gewonnenen Proben konnte die einaxiale Druckfestigkeit bestimmt werden.

7 Experimentelle Ergebnisse

7.1 Kurzzeitversuche

Die Tab. 0.3 bis 0.35 fassen die Ergebnisse der 402 Kurzzeitversuche zusammen. Jede der 33 Tabellen repräsentiert eine Versuchsgruppe. Die Kurzzeitversuche dienen vor allem dem Verständnis der ablaufenden Vorgänge beim Lösungskontakt der verschiedenen ausgewählten Materialien und des Einflusses verschiedener variabler Parameter wie Lösungstyp, Rezeptur, Korngröße und Reaktionszeit. Für die Versuche mit Magnesiumsulfat wurden unterschiedlich hergestellte Produkte eingesetzt.

- Magnesiumsulfat wasserfrei, Laborchemikalie zur Analyse
- Elektrostatisch abgetrennter Kieserit (Esta-Kieserit), calciniert
- Kieseritisches Hartsalz calciniert, angereichert mit Esta-Kieserit, calciniert

Als Inertmaterial wurde Steinsalz unterschiedlicher Korngröße eingesetzt. Natriumsulfat, Kaliumsulfat und Calciumchlorid kamen als Laborchemikalien zum Einsatz. Die Abfallstoffe wurden unverändert für die Versuche verwendet.

Anhand der Versuche und theoretischer Betrachtungen, aber auch aus den Ergebnissen der Modellierung ergab sich, dass Magnesiumsulfat wasserfrei das höffigste Ausgangsmaterial ist. Daher wurden vermehrt Versuche mit Magnesiumsulfat wasserfrei unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführt. Dabei zeigte sich immer wieder die breite Anwendbarkeit dieses Materials. Unabhängig von der Lösungsart, der Lösungsmenge, der Zeit, der Korngröße, der Mischung mit inertem oder reaktivem Material kam es zur Bildung eines unter den Versuchsbedingungen meist dichten Stopfens.

Die untersuchten Bodenkörper ergaben die ganze Bandbreite der möglichen und erwarteten Reaktionsprodukte. Die Wassergehalte ergaben stets sehr hohe Kristallwassermengen und nur sehr geringe Reste von Haftwasser. Größere Mengen an freiem Wasser waren nur dann vorhanden, wenn wegen einer sehr schnellen Stopfenbildung nicht die gesamte aufgegebenen Lösung in das Material eindringen konnte. In einigen Fällen war die Reaktion nicht vollständig (kurze Zeit, nicht gleichmäßige Lösungsaufgabe), so dass ein Zentrifugat aufgefangen wurde.

Als Zusammenfassung der Vielzahl von Kurzeitversuchen ist festzuhalten:

- MgSO_4 wasserfrei zeigt die größte Rückhaltewirkung
- MgSO_4 wasserfrei mit KCl zeigt vergleichbar gute Ergebnisse
- CaCl_2 führt nur bei relativ kleinem Lösungsangebot zu der gewünschten Volumenvergrößerung
- Na_2SO_4 und K_2SO_4 zeigen nur eine geringe Lösungsrückhaltung
- Die getesteten Abfallstoffe zeigen unterschiedliche, generell aber geringe Rückhaltung bis auf die Braunkohlenflugasche. Diese zeigt als einziger Abfallstoff vollständige Rückhaltung, allerdings nur bei kleinem Lösungsangebot.

7.2 Hochdrucksäulenversuche

In den Langzeitversuchen in den Hochdrucksäulen wurden nur noch MgSO_4 wasserfrei und das Gemisch MgSO_4 wasserfrei mit Sylvin betrachtet. Die Randbedingungen und Ergebnisse dieser Versuche sind in den Tab. 0.36 und 0.37 und in den Abb. 7.1 bis 7.22 dargestellt.

Die Vorgänge innerhalb einer gefluteten, mit MgSO_4 gefüllten Säule lassen sich am besten am Beispiel des Säulenversuchs HV-8 zeigen. Dieser Versuch wurde wie die Hochdrucksäulenversuche durchgeführt, jedoch ohne Druckbeaufschlagung. Stattdessen wurde eine horizontale Glassäule eingesetzt, um den Vorgang der Durchtränkung und Verfestigung beobachten zu können. Abb. 7.1 zeigt den Versuchsaufbau. Im Verlauf der Versuchsdurchführung kam es wegen des Kristallisationsdrucks zum Platzen der Glassäule (Abb. 7.2). Schon vorher war es nicht mehr möglich, weitere Lösung in die Säule zu pumpen. Die vordere Lösungs- und gleichzeitig Reaktionsfront (Abb. 7.3) war zu diesem Zeitpunkt bereits zum Stehen gekommen und hatte zu einem Verschluss der Säule bei den gegebenen Versuchsbedingungen geführt. Vor der Lösungsfront war unreaktiertes Ausgangsmaterial, das bei weiterem Vordringen der Lösung ebenfalls zur Reaktion bereit gestanden hätte.

Abb. 7.4 zeigt den Bereich der Stopfenbildung nach Ausbau aus der Säule. Von rechts trat die Lösung zu. Hier ist ein kleiner Bereich erkennbar, in dem Lösungserscheinungen zu beobachten sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Lösung nicht an Magnesiumsulfat gesättigt war. Danach ist der Bereich erkennbar, in dem es zur Mine-

ralneubildung und zum Verschluss der Säule kam. Ganz links ist der abrupte Übergang von reagiertem zu unreaktiertem Verfüllmaterial zu erkennen.

Die Auflösungszone am Beginn der Säule war nur in diesem Versuch zu erkennen. Bei den Hochdruckversuchen wurde dieser Bereich durch die vollständigeren Reaktion mit höheren Volumenzunahmen wieder zugeedrückt, so dass auch am Einlass der Säulen kein Lösungshohlraum übrig blieb.

Während der Versuch in der Glassäule nur die prinzipiellen Vorgänge bei der Flutung des Porenraums im selbst verheilenden Versatz veranschaulichen konnte, lieferten die Versuche in den HPLC-Säulen Messwerte und Proben, die unter den Druckbedingungen, wie sie in situ maximal zu erwarten sind, gewonnen wurden.

Die Hochdrucksäulenversuche wurden mit unterschiedlichen Versuchskonfigurationen und Versuchsbedingungen durchgeführt (s. Kapitel 6.3, Tab. 0.36 und 0.37 und Abb. 6.2 bis 6.6).

Der typische Verlauf der Druckentwicklung eines Hochdrucksäulenversuchs ist in Abb. 7.5 dargestellt. Bei konstanter Förderrate (s. Kapitel 6.3) wurde anfangs Lösung praktisch drucklos in die Säule gefördert. Bereits nach einigen Stunden kam es zu einem Anstieg des Lösungsdrucks (blaue Kurve), der aber bald wieder gegen null abfiel. Der zur Erfassung des Gesamtdrucks in der Säule bei 10 cm installierte Dehnungsmessstreifen (violette Kurve) registrierte zu diesem Zeitpunkt noch keinen Druckanstieg. Hier stieg der Druck nach ca. 20 Stunden an. Danach stieg auch der Lösungsdruck, erst langsam und nach anderthalb Tagen schlagartig. Nach Erreichen von 20 MPa (200 bar) wurde die Förderrate der Pumpe so geregelt, dass der Lösungsdruck konstant blieb. Der anfangs noch durch die Säule gepumpte Lösungsfluss kam danach zum Erliegen. Insgesamt traten 128 g Lösung am Ende der Säule aus. Dass überhaupt Lösung austreten konnte, lag daran, dass die Säulenlänge für die gegebenen Bedingungen zu kurz gewählt war.

Einige Tage lang wurden noch ständig geringer werdende Mengen an Lösung zur Aufrechterhaltung des frontseitig anstehenden Lösungsdrucks in die Säule gefördert (Abb. 7.6). Diese Mengen wurden benötigt, um die Volumenkontraktion bei der Nachreaktion des noch nicht ganz verschlossenen Porenraums auszugleichen. Dabei stieg der Kristallisationsdruck soweit an, dass beim Abbruch des Versuchs nach über vier Wochen (nicht mehr in der Graphik dargestellt) keine nachweisbare Menge Lösung

mehr aus der Säule austrat (der in den Kurven zu erkennende Offset nach ca. 10,5 Tagen ist apparativ bedingt). Nach 1,5 Tagen hatte sich bereits ein Verschluss gebildet, der nach ca. 12 Tagen Nachreaktionszeit zu einem ausreagierten Stopfen führte. Zieht man den anstehenden Lösungsdruck vom Gesamtdruck ab, ergibt sich ein verbleibender Restdruck, der als Kristallisationsdruck angesehen werden kann (rote Kurve). Dieser Druck gilt natürlich nur für den Punkt an dem der Dehnungsmessstreifen installiert war. Es ist mit dieser Messanordnung nicht feststellbar, inwieweit der Lösungsdruck nach dem Aushärten des Stopfens noch am Gesamtdruck beteiligt ist. Daher sind zur Bestimmung des Kristallisationsdrucks gesonderte Messungen erforderlich. Diese Versuche werden weiter unten beschrieben.

Abb. 7.7 bis Abb. 7.14 zeigen beispielhaft den Lösungsdruck, den Gesamtdruck, die Druckdifferenz zwischen beiden Drücken, die Massenbilanz, den gebildeten Stopfen mit Probenahmepunkten, die Wassergehalte in den Proben, die Mineralparagenesen und die Mineralverteilung. Der hier dargestellte Hochdrucksäulenversuch PV-4 wurde mit einer horizontal ausgerichteten Säule, die mit vier Dehnungsmessstreifen zur Erfassung des Gesamtdrucks ausgestattet war, durchgeführt. Die Säule war mit einem Gemenge aus getrocknetem Kieserit und Sylvin gefüllt. Geflutet wurde mit einer IP21-Lösung.

Der Verlauf des Lösungsdrucks ist ähnlich dem des zuvor beschriebenen Versuchs mit senkrecht stehender Säule. Während der Stopfenbildungsphase ist hier allerdings ein wiederholter Druckabfall durch mehrmaliges Durchbrechen bereits gebildeter Verschlüsse zu beobachten. Dies zeigt den Selbstverheilungsprozess, wenn die Integrität des noch sehr schwach ausgebildeten Stopfens gestört wird. Durch neuerliche Reaktion mit weiterem Versatzmaterial bildet sich immer wieder ein neuer Verschluss, bis der Streifen den herrschenden Bedingungen standhalten kann. Nach ca. fünf Tagen hat sich auch in der horizontalen Säule ein dichter Stopfen gebildet, so dass der Lösungsdruck bei 20 MPa konstant blieb. Die beiden negativen Peaks in den Abb. 7.8 bis 7.9 sind nicht real, sondern durch Störungen im Messsystem entstanden. Die Druckschwankungen bei 20 MPa sind auf Störungen bei der Regelung der Pumpe zurückzuführen.

In Abb. 7.8 sind die gemessenen Gesamtdrücke an den vier Positionen der Dehnungsmessstreifen aufgetragen. Anfänglich entsprechen die Drücke an allen Messfühlern dem Lösungsdruck. Erst nach der Ausbildung des Verschlussstopfens bilden sich unterschiedliche, vom Lösungsdruck unabhängige Drücke aus.

Bildet man die Differenz aus Gesamtdruck und Lösungsdruck, ergeben sich die Kurven in Abb. 7.9. Die höchsten Werte ergeben sich bei dem Fühler bei 160 mm. In diesem Bereich hat sich der eigentliche Verschluss gebildet. Auch die Fühler davor und dahinter zeigen einen Kristallisationsdruck an. Bei 410 mm ergibt sich dagegen eine negative Differenz, was darauf zurückzuführen ist, dass an dieser Stelle der Lösungsdruck nicht mehr im vollen Umfang wirksam ist, da der gebildete Stopfen eine hydraulische Verbindung nicht mehr zulässt. Die dargestellten Kurven sind zwar aufschlussreich für das Verständnis der Vorgänge in der Säule. Die absoluten Werte des Kristallisationsdrucks können hieraus jedoch nicht abgeleitet werden.

Die Darstellung der Massenbilanz in Abb. 7.10 zeigt, dass nach der Ausbildung des Verschlussstopfens noch eine Nachreaktion abläuft, die nach ca. zehn Tagen abgeschlossen ist. Von diesem Zeitpunkt an wird auch bei dem herrschenden Lösungsdruck von 20 MPa keine Lösung mehr in die Säule gefördert. Auch bei diesem Versuch trat anfangs Reaktionslösung am Ausgang der Säule aus. Dies hatte aber keinen Einfluss auf die beobachtete Abdichtungsreaktion. In anderen Versuchen konnte gezeigt werden, dass durch das Hintereinanderschalten zweier Säulen die Reaktionslänge so vergrößert werden kann, dass keine Lösung mehr aus dem System austritt.

Nach Versuchsende wurde die Säule aufgeschnitten und der verfestigte Versatz beprobt (Abb. 7.11). An den Proben wurden unter anderem der Haftwasser- und der Kristallwassergehalt bestimmt. Die sehr geringen Haftwassermengen von deutlich unter 1 Gew.-% zeigen, dass das Material sehr trocken ist und das Wasser praktisch vollständig reagiert hat. Der hohe Kristallwasseranteil macht deutlich, dass das verfügbare Wasser überwiegend im Feststoff gebunden wurde. Die Abnahme des Kristallwassergehalts entlang des Fließwegs zeigt, dass sich entsprechend dem Reaktionsfortschritt beim Migrieren der Lösung unterschiedliche Stoffumsätze ergeben.

Deutlich wird dies auch beim Vergleich der Röntgendiffraktogramme in Abb. 7.13. Das Ausgangsmaterial zeigt ein übersichtliches Diffraktogramm der Ausgangsstoffe mit wasserfreiem Magnesiumsulfat, Sylvin und etwas Halit, der mit dem wasserfreien Magnesiumsulfat als Verunreinigung eingebracht wurde. In den Diffraktogrammen der Proben zeigt sich neben den Peaks der Ausgangsminerale, dass sich als neue Minerale Kainit, Starkeyit, Pentahydrat und Carnallit gebildet haben. Alle diese Mineralneubildungen enthalten Kristallwasser und haben daher ein größeres Feststoffvolumen als das Ausgangsmaterial.

Die Änderung der Mineralverteilung entlang des Migrationswegs lässt sich aus Abb. 7.14 abschätzen. Hier wurden die Peakhöhen der Hauptreflexe aufgetragen. Die eingezeichneten Linien geben den Trend wieder. Danach nimmt im Verlauf des Reaktionsfortschritts der Anteil an Starkeyit zu, während der Anteil der anderen Mineralneubildungen abnimmt. Die hier beschriebenen Verhältnisse sind nur eines von vielen möglichen Beispielen. Wie weiter unten gezeigt wird, können die Vorgänge entlang des Migrationspfads recht gut geochemisch modelliert werden.

Die Hochdrucksäulenversuche haben gezeigt, dass es bei allen eingesetzten Rezepturen und mit allen Lösungen zur Ausbildung eines Verschlussstopfens kommt. Dabei erreicht die Permeabilität in den Säulen Werte von $< 10^{-20} \text{ m}^2$, wie Abschätzungen ergeben haben³. Genauere Werte können nicht angegeben werden, da auch nach Abschluss der chemischen Reaktion nach ca. acht Wochen bei 20 MPa Lösungsdruck keinerlei ausgetretene Lösung feststellbar war. Technisch gesehen muss das System als „dicht“ angesehen werden.

Der verbleibende Porenraum wurde weiter untersucht. Die Proben wirken sehr kompakt, die Kontaktfläche zur Rohrwand ist äußerst glatt und ohne sichtbare Poren. Eine Quantifizierung der Porosität mit gängigen Methoden, z. B. mit einem Quecksilberporosimeter, war wegen der geringen Permeabilität nicht durchführbar. Außerdem schieden alle Verfahren aus, bei denen die Probe aus der Hochdrucksäule entnommen werden muss, weil sie bei der Entnahme entspannt und sich durch die dabei auftretende Auflockerung neue Poren bilden. Daher wurden zur Untersuchung des Porenraums Aufnahmen mit Computertomographie (CT) (Abb. 7.15) an den ungeöffneten Säulen sowohl vor als auch nach der Reaktion durchgeführt.

Bei der CT werden Schnittbilder der Schwächung der Röntgenstrahlen erzeugt und die Dichteunterschiede zwischen dem Feststoff und dem Hohlraum von einem Computer als Porenraumverteilung dargestellt. Die Abb. 7.16 und Abb. 7.17 zeigen solche Beispiele. Die CT-Schnittbilder des unreaktierten Versatzmaterials in Abb. 7.16 ergeben eine hohe Porosität von bis zu 49 %. Dagegen ergibt sich nach der Verschlussreaktion im oberen Säulenbereich eine Restporosität von nur noch $< 4 \%$ (Abb. 7.17, rechts).

³ Als Nachweisgrenze für die Volumenmessung einer Durchströmungslösung wurden 10 μl angenommen. Verdunstungsverluste konnten nicht auftreten, da am Austrittspunkt der Wasserdampfdruck der Lösung eingestellt wurde.

An der Rohrwandung ist im unteren Teil noch ein sehr schmaler Bereich mit einer Restporosität von ca. 15 % erkennbar (Abb. 7.17 links).

Die Zusammenhänge werden klar, wenn aus sehr vielen Schnittbildern, die in geringem Abstand aufgenommen wurden, ein dreidimensionales Bild des Porenraums errechnet wird (Abb. 7.18 bis Abb. 7.20). Dargestellt sind jeweils ca. 4 cm hohe Bereiche aus einer 20 cm langen Säule mit einem Innendurchmesser von 1,9 cm.

Abb. 7.18 zeigt den Porenraum im unreaktierten Versatzmaterial. Die gelben Bereiche stellen die Hohlräume dar. Die Salzkörner sind nicht dargestellt und daher nur als Negativform zwischen den Poren zu erkennen. Der gemessene Porenraum zeigt eine stark vernetzte Struktur mit durchgängigen Wegsamkeiten. Dies deutet auf eine hohe Durchlässigkeit des Materials hin. Die Porenverteilung im unteren und oberen Säulenbereich ist gleich. Abb. 7.19 zeigt den Porenraum im ausreagierten Versatzmaterial im unteren Teil der Säule, wo die Lösung in die Schüttung eintrat. Der Porenanteil ist gegenüber der Ausgangsschüttung stark reduziert und es haben sich viele kleine isolierte Restporen gebildet. Allerdings ist auch ein kanalähnlicher Bereich zu erkennen, in dem noch verbundene Poren eine offensichtliche Wegsamkeit darstellen. Ein derartiger Kanal fehlt im oberen Teil der Säule völlig (Abb. 7.20). Dort sind nur noch geschlossene Poren zu erkennen. Die Porosität wurde von anfänglich ca. 50 % auf < 2 % reduziert. Das Fehlen von durchgängigen Wegsamkeiten zeigt, dass dieser Bereich impermeabel ist. Hier hat sich der Verschlussstopfen gebildet.

Zur Untersuchung der mechanischen Festigkeit des ausreagierten Materials war es nötig, spezielle Kristallisationsdruckmesszellen zu entwickeln (Abb. 6.5 und Abb. 6.6). Die Prüfkörper sollten unter gleichen Bedingungen und bis zum vollständigen Verschluss gebildet worden sein. Abb. 7.21 zeigt einen Prüfkörper, der nach dem Ausbau aus der Zelle die Konsistenz eines Bohrkerns hatte. Orientierende einaxiale Druckversuche ergaben Festigkeiten von 13 - 15 kN (Abb. 7.22). Dies entspricht etwa grobkörnigem Steinsalz.

Zusammenfassend lässt die Auswertung der Säulenversuche folgende Aussagen zu:

- Die Bildung eines selbst verheilenden Verschlussstopfens durch Reaktion mit der eindringenden Lösung konnte in allen Hochdrucksäulen beobachtet werden.

- In allen Versuchen wurde ein vollständiger Verbrauch der im Porenraum vorhandenen Lösung beobachtet. Die vollständige Wasserbindung setzt allerdings ein ausreichendes Versatzvolumen voraus.
- Die Restfeuchte im ausreagierten Versatz lag in allen Versuchen unter 1 Gew.-%
- Es wurde eine Reduzierung des Porenraums von 50 % auf < 2 % erreicht.
- Der verbleibende Porenraum besteht nachweislich aus isolierten, geschlossenen Poren.
- Die hohe Ausgangspermeabilität verringerte sich auf $<10^{-20} \text{ m}^2$, da nach einem Zeitraum von bis zu acht Wochen kein Durchfluss mehr zu beobachten war. Mit diesem Wert liegt die Permeabilität des Salzversatzstopfens im Bereich der niedrigen Permeabilitäten von unverritztem Steinsalz.
- Der Kristallisationsdruck variierte bei unterschiedlichen Randbedingungen zwischen 2 und 10 MPa.
- Die einaxiale Druckfestigkeit des durchreagierten Versatzes lag bei 13 – 15 kN.
- Die beobachteten Mineralparagenesen im ausreagierten Versatz zeigten, dass die neu gebildeten Minerale zum größten Teil langzeitstabil und nur teilweise metastabil sind. Die wichtigsten stabilen Minerale sind Carnallit, Bischofit, Hexahydrat und Kainit. Zu den wichtigsten metastabilen Neubildungen gehören Starkeyit und Pentahydrat.
- Die beobachteten Reaktionen sind dynamische Prozesse. Entsprechend sind die mineralogischen Zusammensetzungen im Versatzkörper nicht homogen, sondern weisen entsprechend der fortschreitenden Lösungsfront und der Lösungsentwicklung Unterschiede auf.

8 Ergebnisse der geochemischen Modellierung

Tab. 0.38 enthält die wichtigsten Daten von 24 Reaktionen, die geochemisch modelliert wurden. Acht ausgewählte Reaktionen werden in den Abb. 8.1 bis 8.8 detailliert dargestellt. Tatsächlich wurden weit mehr Modellierungen zu allen Kurzzeit- und Hochdruck-säulenversuchen durchgeführt. Modelliert wurden sowohl die metastabilen als auch die entsprechenden stabilen Reaktionspfade der Reaktionen. In den Abb. 8.1 bis 8.8 sind nur die Ergebnisse ausgewählter Reaktionen auf dem metastabilen Reaktionspfad erläutert, weil nur die metastabilen Mineralparagenesen in den Experimenten tatsächlich gefunden wurden.

Die genannten Abbildungen bestehen jeweils aus drei Teilen a, b und c. Teil a enthält im oberen Bild die Entwicklung der chemischen Zusammensetzung der eingesetzten Lösung und im unteren Bild die Entwicklung der Mineralsättigungen der in der Reaktion auftretenden Minerale. Teil b zeigt im oberen Bild die Entwicklung der Mineralvolumina (mit negativem Vorzeichen die verbrauchten Volumina der eingesetzten Phasen, mit positivem Vorzeichen die gebildeten Volumina der Mineralneubildungen) und im unteren Bild Mineralbilanz, Lösungsvolumen, Systemvolumen und Reaktionsbilanz. Teil c veranschaulicht den Reaktionspfad im Mg-SO₄-K₂-Dreieck. Die Begriffe Mineralbilanz, Systemvolumen und Reaktionsbilanz bedürfen einer kurzen Erläuterung.

Mineralbilanz: Summe gebildeter Minerale minus Summe eingesetzter Minerale. Werte über Null drücken aus, dass mehr Minerale gebildet als aufgelöst wurden.

Systemvolumen: Lösungsvolumen minus Summe gebildeter Minerale. Das Systemvolumen nimmt grundsätzlich zu, da dem System mit fortlaufender Reaktionszahl immer mehr Reaktanden und damit auch Volumen hinzugefügt wird.

Reaktionsbilanz: verbliebenes Lösungsvolumen plus Summe gebildeter Minerale minus eingesetztes Lösungsvolumen minus Summe eingesetzter Minerale; oder anders ausgedrückt: Endvolumen (Endlösung plus mineralische Produkte) minus Ausgangslösung plus unreaktierte Minerale. Diese Zahl drückt aus, ob die Reaktion zu einer Volumenkontraktion oder Volumenexpansion des Gesamtsystems führt. Die meisten freiwillig ablaufenden Reaktionen (so auch alle hier betrachteten Reaktionen) führen zu einer Volumenkontraktion. Der entstehende Hohlraum wird durch nachströmende Lösung gefüllt. Der Übergang von metastabilen in stabile Phasen ist ebenfalls

durch Kontraktion gekennzeichnet, so dass sich immer neue Risse bilden, durch die frische Lösung nachströmen kann. Aus diesen physiko-chemischen Zusammenhängen wird deutlich, dass dieses Versatzmaterial nur in dem Fall zu einer Abdichtung führen kann, wenn mehr Ausgangsmaterial angeboten wird, als durch die eingedrungene Lösung aufgebraucht werden kann. Trifft die nachströmende Lösung auf unverbrauchte Reaktanden, können die Risse wieder verheilen. Diese theoretische Betrachtung wurde durch die experimentellen Ergebnisse bestätigt. Sie macht auch deutlich, warum das Material nur trocken eingebracht seine Dichtwirkung entfalten kann.

In den Abbildungen mit Mineralvolumina (8.1b, 8.2b, 8.3b, 8.4b, 8.5b, 8.6b, 8.7b, 8.8b, 8.9 und 8.10) werden nur diejenigen Minerale gezeigt, deren Volumen an irgend einem Punkt der Reaktion 5 % des Skalenvolumens überschreitet. Ca-Minerale treten hier aus diesem Grund häufig nicht auf. Sie sind aber im Mineral-Affinitäten-Diagramm sichtbar.

Abb. 8.9 zeigt in einer Übersicht einen vereinfachten, auf das Wesentliche reduzierten Vergleich der Detailergebnisse aus den Abb. 8.1 bis 8.8. Zusätzlich beinhaltet die Abbildung auch noch einige Reaktionen, die in den Abb. 8.1 bis 8.8 nicht enthalten sind, z. B. Reaktionen mit Hutgesteinslösung und Q-Lösung. Auf die Einzeldarstellung dieser letztgenannten Reaktionen wurde verzichtet, da sie sich kaum von den Reaktionen mit NaCl-Lösung respektive IP21-Lösung unterscheiden. Dargestellt ist die Gesamtvolumenzunahme bei den betrachteten Reaktionen bezogen auf das Ausgangsvolumen des eingesetzten Feststoffes. In Abb. 8.9 sind nur die Ergebnisse des metastabilen Reaktionspfades berücksichtigt. Die Berechnung dieses Reaktionspfades wurde durch die Unterdrückung stabiler Reaktionsprodukte erreicht. Unterdrückt wurden alle Reaktionsprodukte, die im stabilen Reaktionsverlauf rechnerisch auftraten, in den Experimenten aber nicht gefunden wurden. Auf diese Weise kam es zu einer guten Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Experimente und der Modellierungen.

Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Berechnungen des metastabilen und des stabilen Reaktionspfades werden durch den Vergleich der Abb. 8.9 und 8.10 deutlich. Ganz allgemein ist die Volumenzunahme auf dem stabilen Reaktionspfad niedriger. Trotzdem reicht er theoretisch aus, um eine Dichtwirkung zu erhalten. Abb. 8.11 zeigt eine Umrechnung der Ergebnisse aus der hervorgeht, welche Lösungsmenge von 1 Liter Versatz gebunden wird und zwar jeweils bei Betrachtung des stabilen und des metastabilen Reaktionspfades. Die den Abbildungen mit Volumenbilanzen zugrunde

liegenden Zahlenwerte sind in Tab. 0.38 zusammengefasst. In dieser Tabelle ist besonders die Spalte „Volumen der Endlösung“ wichtig. Sie zeigt, dass in allen betrachteten Fällen die Lösung in der Reaktion vollständig aufgebraucht wird, unabhängig davon, welcher der betrachteten Ausgangsstoffe und welche Ausgangslösung ansteht und unabhängig davon, ob der stabile oder metastabile Reaktionspfad betrachtet wird.

Die Randbedingungen der Modellierungen wurden immer gleich gehalten, d. h. die Rechnung wurde jeweils mit 1 kg Wasser begonnen. Je nach Zusammensetzung der eingesetzten Lösung ist das eingesetzte Lösungsvolumen dadurch unterschiedlich. Die eingesetzten Reaktanden sind MgSO_4 wasserfrei und ein Gemisch von MgSO_4 wasserfrei und Sylvin. Alle eingesetzten Bodenkörper stehen im Überschuss zur Verfügung, d. h. im Laufe der Reaktion sättigt sich die Lösung daran auf.

Die wichtigsten Ergebnisse der geochemischen Modellierung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Metastabiler Reaktionspfad:

1. Alle Reaktionen führen zu einem vollständigen Verbrauch der eindringenden Lösung.
2. Als Ergebnis der Reaktion ergibt sich in allen Fällen eine starke Volumenvergrößerung. Das neu gebildete Mineralvolumen ist mehr als doppelt so groß wie das Volumen der aufgelösten Ausgangsminerale.
3. MgSO_4 wasserfrei als alleiniges Versatzmaterial führt zu einer stärkeren Volumenzunahme als die Mischung MgSO_4 wasserfrei und Sylvin.
4. Auch die Mischung MgSO_4 wasserfrei und Sylvin reicht mit allen Lösungen aus, um einen Porenraum von 50 % zu schließen.

Stabiler Reaktionspfad:

1. Alle Reaktionen führen zu einem vollständigen Verbrauch der eindringenden Lösung.
2. Als Ergebnis der Reaktion ergibt sich in allen Fällen eine deutliche Volumenvergrößerung. Das neu gebildete Mineralvolumen ist jedoch in der Regel

nicht mehr doppelt so groß wie das Volumen der aufgelösten Ausgangsminerale. Ein Porenraum von 50 % könnte somit nicht mehr vollständig gefüllt werden.

3. Die Mischung MgSO_4 wasserfrei und Sylvin reicht bei allen betrachteten Lösungen aus, um einen Porenraum von 35 % zu schließen.
4. MgSO_4 wasserfrei als alleiniges Versatzmaterial führt nicht mehr in allen Fällen zu einer stärkeren Volumenzunahme als die Mischung MgSO_4 wasserfrei und Sylvin.

Abb. 8.11 verdeutlicht, dass die Mischung MgSO_4 wasserfrei und Sylvin gegenüber MgSO_4 wasserfrei als alleinigem Versatzstoff große Vorteile bietet. Rechnerisch bleibt die Dichtwirkung bei der Mischung trotz der unvermeidlichen Volumenreduzierung beim Übergang zu stabilen Paragenesen erhalten. Wie die Diskussion der Ergebnisse zeigen wird, bietet die Mischung auch hinsichtlich des Langzeitverhaltens Vorteile.

9 Diskussion und Interpretation der Ergebnisse

Die experimentellen Ergebnisse lassen sich durch die Ergebnisse der geochemischen Modellierung auf dem metastabilen Reaktionspfad gut erklären. Experimentell gefundene Mineralphasen spielen auch in der Modellierung die Hauptrolle.

Die Bildung von Starkeyit und Hexahydrat im kaliumfreien System werden ebenso beschrieben wie die Bildung des Astrakanits im NaCl-reichen System. Die Fällung von Bischofit bei Abwesenheit von Sylvin und die Bildung von Carnallit mit Sylvin aus $MgCl_2$ – Lösungen wird ebenso beschrieben wie die Salze der Stufenmetamorphose, z. B. Schönit, Leonit usw., die bei nicht vollständiger Rückreaktion in den Proben zu finden sind. Auch das in der Modellierung ganz am Ende des Reaktionspfads auftretende Oxychlorid konnte röntgenographisch als Bodenkörper eines Tropfens Restlösung im Bereich der Reaktionsfront nachgewiesen werden.

Die experimentell beobachtete Reduzierung der Porosität und Permeabilität ergibt sich auch aus den Berechnungen. Gleiches gilt für den experimentell beobachteten totalen Lösungsverbrauch. In dieses konsistente Bild passen auch die gemessenen Kristallisationsdrücke. Damit wird klar, dass mit den Versatzstoffen $MgSO_4$ wasserfrei und der Mischung wasserfrei mit Sylvin Stoffe gefunden wurden, die zu einer fast instantanen und sehr effektiven Reduzierung von Lösungszutritten egal welcher chemischen Zusammensetzung führen. Mit diesen Stoffen kann also nachweislich ein früher und schneller Lösungszutritt wirksam und zu relativ geringen Kosten verhindert werden.

Eine Tonne Magnesiumsulfat wasserfrei kostet ab Werk ca. 430 DM (ca. 220 Euro). Bei einer Materialdichte von $2,6 \text{ g/cm}^3$ und einer Mischung mit ca. 30 % Steinsalzhaufwerk ergibt sich bei einer Schüttdichte von 50 % die Menge von ca. einer Tonne Magnesiumsulfat je Kubikmeter Versatzmaterial. Für eine Strecke mit 20 m^2 Querschnittsfläche werden demnach 20 t Magnesiumsulfat je Streckenmeter benötigt. Diese 20 t je Streckenmeter kosten 8.600 DM. Geht man von einer Einbaulänge von 50 m aus, fallen Materialkosten von 430.000 DM (220.000 Euro) an.

Diese Kosten lassen sich bei der Realisierung einer In-situ-Maßnahme noch weiter senken, z. B. durch Großabnehmerrabatte, Verwendung eines weniger reinen Materials und Optimierung des Steinsalzanteils. Außerdem besteht die Möglichkeit, das Magnesiumsulfat aus Hartsalzlagerstätten, die wegen des geringen Sylvingehalts normaler-

weise nicht bauwürdig sind, zu gewinnen. Das Hartsalz kann auch ohne vorherige Trennung calciniert werden, wobei ein zu geringer $MgSO_4$ -Anteil durch Zugabe von reinem Material angehoben werden kann. Bei Gruben mit entsprechenden Lagerstätten ist auch eine Calciniierung untertage denkbar, so dass die Schachtförderung entfällt.

Bedenkt man, dass der Einbau des Versatzmaterials mit einfachen, in der Grube vorhandenen Verfahren innerhalb kurzer Zeiten erfolgen kann, stellt sich auch die gesamte Versatzmaßnahme als kostengünstig dar.

Besonderer Diskussionsbedarf besteht jedoch noch hinsichtlich des Langzeitverhaltens einer solchen hydraulischen Barriere. Diskutiert werden müssen zwei Aspekte:

1. Umwandlung der metastabilen Mineralparagenese in eine stabile Paragenese in der Abdichtung ohne Lösungskontakt
2. Umwandlung der metastabilen Mineralparagenese in eine stabile Paragenese in der Abdichtung mit Lösungskontakt

Zu 1:

Eine solche Umwandlung ist zu erwarten. Sie wird voraussichtlich langsam ablaufen. Über die Kinetik der Umwandlung können keine Aussagen gemacht werden. Dies ist jedoch ein langsamer Prozess, da er nur durch Wasserdiffusion bewerkstelligt werden kann. Da es sich um einen geschlossenenporigen Körper handelt, ist die Diffusion über die Dampfphase nicht möglich, so dass nur Feststoffdiffusion denkbar ist. Findet die Umwandlung trotzdem statt, ist sie mit einer Volumenkontraktion verbunden, die zu Rissen und zum Eindringen weiterer Lösung führt. Trifft diese Lösung auf noch unreaktiertes Material, wird dieses reagieren und die Risse unter Bildung neuer metastabiler Phasen schließen. Irgendwann ist durch diesen Prozess das gesamte Material der Abdichtung durchreagiert und es kann Fall 2 diskutiert werden. Für den Fall 1 wäre eine realistische Abschätzung der für die Umwandlung benötigten Zeiten von Interesse.

Zu 2:

Die metastabilen Minerale können nur an der Kontaktfläche vor dem gebildeten Stopfen zur anstehenden Lösung mit dieser reagieren und sich in neue, letztlich stabile

Minerale umwandeln. Als Beispiel sei hier die Reaktion MgSO_4 wasserfrei mit Q-Lösung genannt. Als metastabile Paragenese stellt sich ein Gemenge von Bischofit, Carnallit, Halit und Starkeyit ein. Die vor der Abdichtung noch anstehende Q-Lösung ist Bischofit- und Starkeyit-untersättigt, was zur Auflösung dieser beiden Minerale führt. Halit und Carnallit dagegen bleiben erhalten, da die Q-Lösung daran gesättigt ist. Das aus dem Bischofit stammende Wasser und das MgCl_2 werden in neuem Carnallit gebunden. Aus jedem Mol Bischofit entsteht ein Mol Carnallit mit größerem Molvolumen. Starkeyit ist ein Magnesiumsulfat mit vier Mol Kristallwasser. Aus jedem Mol Starkeyit wird ein Mol Kainit gebildet. Kainit hat nur drei Kristallwasser. Ein Kristallwasser bleibt damit in Lösung. Das Volumen der neu gebildeten stabilen Minerale wird durch die Umwandlung des Starkeyit in Kainit jedoch nicht verringert sondern vergrößert, da zwar ein Mol Wasser pro Mol Starkeyit in Lösung bleibt, dafür aber ein Mol KCl aus der Lösung entfernt wird. Da KCl ein größeres Molvolumen hat als Wasser, wird die Gesamtvolumenbilanz positiv, d. h. die neu gebildeten langzeitstabilen Minerale haben ein etwas größeres Volumen als die verschwindenden metastabilen Phasen. Dies gilt jedoch nur, wenn KCl zur Verfügung steht. Als Lieferant dafür steht erstens die Q-Lösung zur Verfügung und zweitens Sylvin, falls dieser Bestandteil des Versatzes ist. Daraus wird deutlich, dass die Mischung gegenüber dem reinen wasserfreien MgSO_4 Vorteile für die Langzeitstabilität bietet.

Die Volumenveränderungen bei der Umwandlung der metastabilen in stabile Mineralparagenesen müssen für andere Lösungszusammensetzungen jeweils konkret ausgerechnet werden. Eine positive Volumenbilanz ist für Lösungen mit geringerem oder fehlendem MgCl_2 - und KCl-Gehalt nicht in allen Fällen zu erwarten. Dies scheint jedoch kein Problem darzustellen, da gezeigt werden konnte /HER 00/, dass in allen Salzbergwerken des Sulfattyps innerhalb von wenigen Jahren nach der Flutung eine Q-Lösung anstehen wird.

10 Die Innovation und praktische Anwendungsfelder

Neu ist, dass ein Versatzmaterial eine hydraulisch dichte, geochemisch stabile und selbst verheilende Barriere gegen den Zutritt von Lösungen und die Ausbreitung von Schadstoffen bildet. Diese Barriere kann zusätzlich zu den bisher vorgesehenen Barrieren eingesetzt werden, aber diese auch, je nach Anforderungen, teilweise oder ganz ersetzen.

Im Gegensatz zu aufwendigen technischen Bauwerken kann das Versatzmaterial einfach mit Ladefahrzeugen, Schleuder- oder Blasanlagen als lockeres Haufwerk in die Hohlräume eingebracht werden. Der Versatz bleibt anfangs gasdurchlässig, so dass sich kein Gasdruck in der Grube aufbauen kann.

Die eigentliche Abdichtung erfolgt genau in dem Moment, in dem sie gebraucht wird. Es entsteht, ohne weiteres Zutun, ein chemisch stabiler, druckdichter Verschluss. Durch seine einfache Konstruktion ist das angewendete Verfahren sehr robust und störunanfällig.

Die neu gebildeten Minerale sind gegenüber der Porenraumlösung stabil. Die Lösungsreaktion wird bei Kontakt zu unreaktiertem Material soweit gehen, dass dort, wo die Lösungsfront am weitesten vorgedrungen ist, sämtliche Lösungsbestandteile, einschließlich eventuell vorhandener Schadstoffe und das Wasser der Lösung, in festen Mineralen fixiert werden. Dadurch wird ein räumlich begrenzter aber sehr dichter Stopfen im Versatzkörper gebildet, der aufgrund des Kristallisationsdrucks auch einen schnellen Kraftschluss zum Gebirge erreicht. Die Volumenvergrößerung der Feststoffe bewirkt nicht nur einen Druckaufbau, sondern führt auch zu einer starken Reduzierung der Permeabilität des Versatzkörpers.

Solange die Permeabilität noch groß genug ist, um eine Migration der Lösung zuzulassen, läuft auch die Mineralneubildungsreaktion ab und führt zu weiterer Verringerung der Permeabilität, bis schließlich die Migration der Lösung gestoppt wird. Sollte die Integrität dieses Verschlusses, z. B. durch gebirgsmechanische Vorgänge wie Rissbildung oder Erhöhung des hydrostatischen Drucks gestört werden und kommt es dadurch zu einer erneuten Lösungsmigration, so trifft die Lösung abermals auf reaktives Material, was wiederum zur Bildung eines dichten Stopfens führt. Also tritt eine Selbstverheilung ein.

Das Verfahren dient zur Verfüllung von untertägigen Hohlräumen im Salz. Es hat die besondere Eigenschaft, dass es bei Lösungszutritt wie ein Verschlussbauwerk wirken kann. Daher ist es überall dort einsetzbar, wo neben einer Volumenreduzierung und mechanischen Stützwirkung eine Verhinderung einer Lösungsmigration gefordert ist. Anwendungen sind z. B.:

- Verfüllung von Kammern und Strecken
- Verschluss von Bohrlöchern, Röllöchern und Blindschächten
- Isolierung von Abfällen durch Einbettung
- Abdämmung von Lösungszutritten
- Abgrenzung oder Unterteilung von Feldesteilen gegen Lösungen
- Verschluss von Tagesschächten und Kavernen im Salinar.

Das entwickelte Verfahren ist vielfach modifizierbar und den örtlichen, räumlichen, geologischen, mechanischen, chemischen und sicherheitstechnischen Gegebenheiten und Zielen anpassbar. Eine Anpassung erfolgt auf der Basis von geochemischen Modellierungen mit dem Rechenprogramm EQ3/6 und den Ergebnissen von Laborversuchen und Messungen. Durch die Anwendung des so optimierten Verfahrens ist es möglich, Schadstoffe jeder Art vor dem Kontakt mit Wasser oder Salzlösungen zu schützen, Grubenteile vor der Flutung zu bewahren oder die Flutung zu steuern. Eine Ausbreitung von Schadstoffen kann dadurch stark reduziert werden.

Das Verfahren kann in allen stratigraphischen Horizonten im Salz, auch in den Kalilagern und im Anhydrit eingesetzt werden.

Daraus lassen sich die wesentlichen Anwendungsfelder ableiten:

- Schutz von Kali- und Steinsalzgruben jeglicher Art (auch Entsorgungsbergwerke) vor dem Zutritt von Wässern und Lösungen
- Steuerung von Zuflüssen in o. a. Gruben bei planmäßiger Flutung
- Verhinderung der Auflösung von leicht löslichen Kalisalzen
- Verhinderung der Freisetzung von Schadstoffen aus eingelagerten Abfällen
- Verstärkung von technischen Barrieren (Redundanz)

- Teilweise oder vollständiger Ersatz von Verschlüssen und Dammbauwerken
- Langzeitsicherer Verschluss von o. a. Gruben oder Feldesteilen, z. B. Einlagerungsbereichen im Anschluss an die Betriebsphase
- Schutz der Ökosphäre durch Verringerung bzw. Verhinderung des Eintrags von Schadstoffen in das Grund- und Oberflächenwasser.
- Gebirgsmechanische Stabilisierung des Deckgebirges durch Verhinderung von Erosion in den Grubenbauen und durch die Stützwirkung des Versatzmaterials vor und nach der Ausbildung des Stopfens.

Das Verfahren ist kostengünstiger und robuster als technische Bauwerke. Es eignet sich zum Verfüllen und zum Schutz von Endlagern, Untertagedeponien und Bergwerken im Salinar. Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ergibt sich aus den nur geringen Mehrkosten für das spezielle Versatzmaterial (s. Kap. 8) gegenüber dem bisher vorgesehenen Steinsalzversatz, bei stark verbesserten Eigenschaften. Diese Eigenschaften können dazu führen, dass die Anzahl kostenintensiver Spezialbauwerke verringert, deren Konstruktion vereinfacht wird oder diese ganz entfallen können.

Die Breite der Anwendungsfelder zur Verfüllung und Abdichtung in fast allen untertägigen Hohlräumen im Salinar, wie z. B. Endlager, UTD, Versatzbergwerken, Stilllegungsbergwerken und produzierenden Kali- und Steinsalzgruben aber auch Kavernen und Solbetrieben, lässt bei entsprechender Auswahl der verwendeten Materialien und Einbringtechnik gute Marktchancen gegenüber konventionellen Verfahren erwarten.

Die Anwendung von leicht verfügbaren Massengütern aus der normalen Kalisalzproduktion als reaktives Versatzmaterial, zusammen mit der einfachen Einbringtechnik, macht das Verfahren sowohl kurzzeitig als auch langfristig sehr wirtschaftlich.

Zur Erreichung der Marktfähigkeit ist noch der Nachweis der Übertragbarkeit der theoretischen Berechnungen und Laborversuche auf den In-situ-Maßstab zu erbringen. Dafür sind Arbeiten zur Durchführung von untertägigen Demonstrationsversuchen im Rahmen eines weiteren F+E-Vorhabens angelaufen. Parallel dazu müssen weitere Laboruntersuchungen vorgenommen werden, die die Möglichkeiten und Grenzen der

Steuerung wichtiger mechanischer Eigenschaften wie resultierende Drücke und Festigkeiten aufzeigen.

11 Zusammenfassung

In dem vorliegenden Forschungsvorhaben wurden geochemische Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Salzversatz mit Zuschlagstoffen durchgeführt. Bei der Untersuchung der möglichen Zuschlagstoffe stellte sich heraus, dass mit ausgewählten Stoffen und Rezepturen ein Salzversatz konzipiert werden kann, der eine langzeitstabile Barriere gegen Salzlösungen bildet.

Verfüllt man an strategisch günstigen Stellen untertägige Hohlräume mit einem reaktiven, wasserbindenden Versatzmaterial, kommt es bei einem evtl. Lösungszutritt durch Mineralneu- und -umbildung zur Volumenvergrößerung des Feststoffanteils. Die Reaktion läuft solange ab, bis alle Poren verschlossen sind und alles Wasser im Porenraum verbraucht ist. Der dabei entstehende Kristallisationsdruck führt zu einer fugenlosen Anbindung des Versatzes an das Gebirge. Durch die Ausheilung aller Wegsamkeiten im Versatzmaterial kommt es zur Bildung eines Verschlussstopfens, der das weitere Vordringen von Lösung verhindert.

Für die Auswahl des geeignetsten Materials wurden sowohl Laborversuche als auch geochemische Modellrechnungen durchgeführt. Als am besten für alle möglichen Salzlösungen geeignet, stellte sich Magnesiumsulfat wasserfrei heraus. Dieses Material ist arteigen, da es aus dem Kieserit der Zechsteinsalzlagerstätten gewonnen wird. Die Reaktionsprodukte sind Bestandteil des quinären bzw. hexären Systems der Salze ozeanischer Salzablagerungen und verhalten sich daher ähnlich den natürlichen Salzparagenesen. Bringt man das Magnesiumsulfat zusammen mit anderen Salzen ein, kann die Mineralreaktion den gegebenen örtlichen Verhältnissen entsprechend optimiert und gesteuert werden. Dabei können sowohl weitere reaktive Minerale (z. B. Sylvin) als auch inerte Salze (z. B. Steinsalz) eingesetzt werden. Auch Abfallstoffe kommen in beiden Kategorien als Zuschlag in Frage. Die Versatzstoffe können je nach Anforderung als Gemenge oder in gestaffelter Reihenfolge eingebracht werden.

Zur Optimierung der Durchtränkungsprozesse können vor und/oder hinter der Versatzschüttung durchlässige Strömungsbarrieren, z. B. aus Salzhaufwerk, Beton, Ton, Magnesia-gel etc., eingebaut werden.

In Laborversuchen konnten Verschlussstopfen erzeugt werden, deren Eigenschaften denen des gewachsenen Gebirges vergleichbar sind. Die Permeabilitäten von kleiner 10^{-20} m^2

entsprechen der im Steinsalz gemessenen Permeabilität. Auch die einaxialen Druckfestigkeitswerte liegen im Bereich von grobem Steinsalz. Die ermittelten Kristallisationsdrücke liegen unterhalb des zu erwartenden Gebirgsdrucks, so dass nicht mit einem Frac des Gebirges zu rechnen ist.

Die geochemischen Modellierungen geben die Reaktionsabläufe und die Volumenänderungen gut wieder, so dass für gegebene Randbedingungen eine Optimierung der Versatzrezeptur erfolgen und diese anschließend in Laborversuchen verifiziert und charakterisiert werden kann.

Das wichtigste Ergebnis des vorliegenden Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Verfüllung untertägiger Hohlräume im Salz mit einem selbst verheilenden Versatzmaterial, das bei Lösungszutritt selbstständig einen lösungsdichten Verschlussstopfen bildet. Damit konnte, unter der Maßgabe, dass die Übertragung auf den In-situ-Maßstab gelingt, eine neue, kostengünstige, langzeitstabile und lösungs-unabhängige Barriere gegen das Eindringen von Salzlösungen in Salzbergwerke und den Schadstofftransport aus UTD und Endlagern im Salz gefunden werden. Das Verfahren wurde beim Europäischen Patentamt angemeldet und soll dem nachhaltigen Schutz von Mensch, Umwelt und Ressourcen dienen.

Die Übertragbarkeit der bisherigen Ergebnisse auf den In-situ-Maßstab wird in einem Nachfolgeprojekt untersucht.

12 Literatur

- /BRA 71/ BRAITSCH, O. (1971): Salt Deposits. Their Origin and Composition. – Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York,
- /CLO 95/ CLOKE, P. (1995): Zur Druckabhängigkeit der Löslichkeit von Salzen des ozeanischen Systems. - pers. Mitteilung
- /HER 82/ HERBERT, H.-J. und SANDER, W. (1982): Mineralogisch-chemische Prozesse in laugeerfüllten Schächten des Zechsteinsalinars. Fortschritte der Mineralogie 60, H. 1, S. 96 - 98
- /HER 87/ HERBERT, H.-J. und SANDER, W. (1987): Die Flutung des Kalibergwerks Hope – Ergebnisse des geochemischen Messprogramms. Kali und Steinsalz 9, H 10, 326 - 333
- /HER 89/ HERBERT, H.-J. (1989): Geochemische Vorgänge bei der Flutung des Kalibergwerks Hope. – GSF-Bericht 5/89, 62 S.
- /HER 92/ HERBERT, H.-J. und REICHELT, Chr. (1992): Sieben Jahre Laugenentwicklung im gefluteten Kalibergwerk Hope - Geochemische Messungen und rechnerische Modellierung. - Kali und Steinsalz 11, 44 - 48
- /HER 95/ HERBERT, H.-J. (1995): Water Rock Interations in Salt Formations and Safety Aspects of Repositories. – Wast Management Conference, WM '95, Tucson/AZ, Proceedings auf CD, 8S.
- /HER 00/ HERBERT, H.-J. (2000): Zur Geochemie und geochemischen Modellierung hochsalinärer Lösungen. – Geol. Jb., Sonderhefte, SD1, 392 S
- /KÜH 57/ KÜHN, R. (1957): Führung durch das Kaliwerk Neuhoof-Ellers, obere Sohle, nebst einigen Beiträgen zur Petrographie des Werra-Kaligebiets. – Fortschr. Miner., 35, 60-81, Stuttgart.

- /SES 87/ SESSLER, W. (1987): Kaliwerk NeuhoF-Ellers der Kali und Salz AG, Schachtanlage Ellers. – Befahrung des Werra-Salinars mit dem Kaliflöz Hessen (K1H), des miozänen Vulkanismus im Bereich der 1. Sohle und einer Auslaugungssenke an der Straße von NeuhoF nach Giesel. – Int. Symp. Zechstein 87, Exkursionsführer, 47-56, Wiesbaden
- /SAN 99/ 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“, Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE Nr. 6 S 315 - 328
- /SAN 00/ SANDER, W. und Herbert, H.-J. (2000): A new hydraulic barrier – Performance of a selfhealing salt backfill material. – In „Proceedings DisTec 2000“, - Kontec Gesellschaft für technische Kommunikation mbH, Hamburg, S 606 – 611.
- /STR 87/ STRUENSEE, v. G. (1987): Kali und Steinsalzbergwerk Hattorf der Kali und Salz AG, Schachtanlage Hera. – Befahrung des Werra-Salinars mit den Kaliflözen Hessen (K1H) und Thüringen (K1Th) sowie des miozänen Vulkanismus im Bereich der 1. und 2. Sohle. - Int. Symp. Zechstein 87, Exkursionsführer, 35-46, Wiesbaden

Abbildungsverzeichnis

Abb.3.1:	Darstellung der quinären und hexären Systeme der Salze ozeanischer Salzablagerungen im Jänecke- (Mg-SO ₄ -K ₂)-Dreieck	88
Abb. 3.2:	Lösungsentwicklung im gefluteten Kalibergwerk Hope – Vergleich von Messdaten mit Ergebnissen der geochemischen Modellierung	89
Abb. 3.3:	Entwicklung der Mineral-Sättigungen in den Lösungen für die bei der Hartsalzauflösung aufgelösten Minerale (Reaktanden) – Vergleich der Affinitäten aus den natürlichen Lösungen mit Ergebnissen der geochemischen Modellierung	90
Abb. 3.4:	Lösungsentwicklung im gefluteten Kalibergwerk Hope in den Dreiecken der vier NaCl-gesättigten quinären Randsysteme des hexären Systems der ozeanischen Salze – Vergleich von Messdaten mit Ergebnissen der geochemischen Modellierung	91
Abb. 3.5:	Entwicklung der Mineral-Sättigungen in den Lösungen für die bei der Hartsalzauflösung gebildeten Minerale (Produkte) – Vergleich der Affinitäten aus den natürlichen Lösungen mit Ergebnissen der geochemischen Modellierung	92
Abb. 3.6:	Vollständiger Verlauf der Lösungsentwicklung bei der Hartsalzauflösung – Ergebnisse der geochemischen Modellierung: Lösungszusammensetzung (oben), Affinitäten der Reaktanden (Mitte) und Affinitäten der Produkte (unten)	93
Abb. 3.7:	Massenbilanz der gelösten und gebildeten Minerale bei der Hartsalzauflösung - Ergebnisse der geochemischen Modellierung	94
Abb. 3.8:	Entwicklung des Wassergehaltes und der Wasseraktivität der Lösungen bei der Hartsalzauflösung – Ergebnisse der geochemischen Modellierung	94
Abb. 3.9:	Ausbildung eines Kainithutes im Top des Kalilagers in der steilen Lagerung	95

Abb. 3.10	Ausbildung von "Hutsalz" im Bereich des Salzhangs in der flachen Lagerung	95
Abb. 3.11:	Dünnschliffaufnahme von einer Probe aus dem „Hartsalz“ (verzwillingte Matrix mit niedriger Doppelbrechung; Mineralkörner mit der höheren Licht- und Doppelbrechung).....	96
Abb. 4.1:	Wirkungsweise eines selbst verheilenden Versatzmaterials in einem Endlager in Salzformationen	97
Abb. 6.1:	Zentrifugalfilterröhrchen zur Durchführung der Kurzzeitversuche.....	98
Abb. 6.2:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für Langzeitsäulenversuche	98
Abb. 6.3:	Versuchsaufbau für Langzeitversuche mit senkrechter HPLC-Säule	99
Abb. 6.4:	Versuchsaufbau für Langzeitversuche mit horizontaler HPLC-Säule mit Dehnungsmessstreifen zur Druckmessung.....	99
Abb. 6.5:	Prinzipzeichnung der Kristallisationsdruckmesszelle zur Herstellung von Probekörpern für einaxiale Druckversuche	100
Abb. 6.6:	Versuchsaufbau für Langzeitversuche mit zwei hintereinander geschalteten Kristallisationsdruckmesszellen zur Herstellung von Probekörpern für ein- axiale Druckversuche.....	101
Abb. 7.1:	Säulenversuch in einer horizontalen Glassäule zur optischen Beobachtung des Lösungsfortschritts und der Stopfenbildung im Salzversatz.....	101
Abb. 7.2:	Ausschnitt aus der Glassäule (Abb. 7.1) mit durch Kristallisationsdruck geplatzt Glasrohr	102
Abb. 7.3:	Ausschnitt aus der Glassäule (Abb. 7.1) – Übergang von reagiertem (rechts) zu unreaktiertem Versatzmaterial (links) im Bereich der Lösungsfront	102

Abb. 7.4:	Füllung nach Entfernen der Glassäule (Abb. 7.1) – Gesamtansicht des Versatzmaterials aus der Glassäule, rechts Eintritt der Lösung, Mitte Stopfenbildung infolge Reaktion mit eingedrungener Lösung, links loses, unreaktiertes Versatzmaterial infolge fehlender Lösung, deren Fortschreiten durch die Stopfenbildung verhindert wurde	103
Abb. 7.5:	Hochdrucksäulenversuch HV-7 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - Lösungsdruck, Gesamtdruck und Kristallisationsdruck (Gesamtdruck und Differenz zwischen Gesamtdruck und Pumpendruck).....	104
Abb. 7.6:	Hochdrucksäulenversuch HV-7 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - in den Versatz eingedrungene, durchgetretene und verbliebene Lösungsmasse	105
Abb. 7.7:	Hochdrucksäulenversuch PV-4 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - Lösungsdruck (Pumpendruck).....	106
Abb. 7.8:	Hochdrucksäulenversuch SV-PV-4 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - Gesamtdruck an vier Stellen der 1 m langen Säule	107
Abb. 7.9:	Hochdrucksäulenversuch SV-PV-4 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - Differenz zwischen Gesamtdruck und Pumpendruck an vier Stellen der 1 m langen Säule	108
Abb. 7.10:	Hochdrucksäulenversuch SV-PV-4 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - in den Versatz eingedrungene, durchgetretene und verbliebene Lösungsmenge.....	109
Abb. 7.11:	Hochdrucksäulenversuch SV-PV-4 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - Aufgeschnittene Hochdrucksäule mit verfestigtem Versatzmaterial und Lage von fünf Probennahmepunkten für Wassergehaltsbestimmungen und mineralogische Untersuchungen.....	110
Abb. 7.12:	Hochdrucksäulenversuch SV-PV-4 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - Kristallwasser- und Haftwassergehalte an fünf verschiedenen Stellen der 1 m langen Säule.....	111

Abb. 7.13: Hochdrucksäulenversuch SV-PV-4 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - RDA-Diagramm, Vergleich der Peakintensitäten vom Ausgangsmaterial und den neu gebildeten Mineralphasen an fünf Stellen der 1 m langen Säule	112
Abb. 7.14: Hochdrucksäulenversuch SV-PV-4 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - Veränderung der Gehalte der Mineralneubildungen an fünf Stellen der 1 m langen Säule	113
Abb. 7.15: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus des Computertomographen (CT), der für die Auswertung der Hochdrucksäulenversuche eingesetzt wurde	114
Abb. 7.16: CT-Schnittbilder des unreaktierten Versatzmaterials aus Versuch SV-PV-7 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - Porositätsverteilung im unteren und oberen Bereich der Säule bei trockener Schüttung vor der Reaktion mit Salzlösung	115
Abb. 7.17: CT-Schnittbilder des reaktierten Versatzmaterials aus Versuch SV-PV-7 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - Porositätsverteilung im unteren und oberen Bereich der Säule nach Reaktionsende	115
Abb. 7.18: Dreidimensionale Darstellung der Hohlräume im unreaktierten Versatzmaterial aus Versuch SV-PV-7 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - Hohlraum ist gelb dargestellt, dunkle Bereiche stellen den Feststoff dar.....	116
Abb. 7.19: Dreidimensionale Darstellung der Hohlräume im reaktierten Versatzmaterial aus Versuch SV-PV-7 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung – Unterer Säulenbereich (Einströmbereich der Lösung): Hohlräume gelb, dunkle Bereiche Feststoff; auf der linken Seite sind isolierte Poren zu erkennen, auf der rechten Seite die zusammenhängenden Poren eines Lösungskanal.....	117

Abb. 7.20: Dreidimensionale Darstellung der Hohlräume im reagierten Versatzmaterial aus Versuch SV-PV-7 mit getrocknetem Kieserit, Sylvit und IP21-Lösung - Stopfenbereich: Hohlräume gelb, dunkle Bereiche Feststoff, auffällig ist, dass im Stopfenbereich nur geschlossene, isolierte Poren auftreten	118
Abb. 7.21: Ausreagierter Probekörper für einaxiale Druckversuche, Versuch SV-KP	119
Abb. 7.22: Ausreagierte Probekörper aus dem Versuch SV-KP1.1 und SV-KP1.2 nach einaxialem Druckversuch – mit 13 - 15 KN entsprechen die mechanischen Kennwerte etwa denen von grobkörnigem Steinsalz.....	119
Abb. 8.1a: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit NaCl-Lösung - Lösungsentwicklung (oben), Mineralsättigungen (unten)	120
Abb. 8.1b: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit NaCl-Lösung - Mineralvolumina (oben), Volumenbilanzen, Wasserverbrauch (unten).....	121
Abb. 8.1c: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit NaCl-Lösung - Reaktionspfad im Mg-SO ₄ -K ₂ -Dreieck	122
Abb. 8.2a: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit M-Lösung - Lösungsentwicklung (oben), Mineralsättigungen (unten)	123
Abb. 8.2b: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit M-Lösung – Mineralvolumina (oben) Volumenbilanzen und Wasserverbrauch (unten)	124
Abb. 8.2c: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit M-Lösung - Reaktionspfad im Mg-SO ₄ -K ₂ -Dreieck	125
Abb. 8.3a: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit IP9-Lösung - Lösungsentwicklung (oben), Mineralsättigungen (unten)	126

Abb. 8.3b: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit IP9-Lösung – Mineralvolumina (oben) Volumenbilanzen und Wasserverbrauch (unten).....	127
Abb. 8.3c: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit IP9-Lösung - Reaktionspfad im Mg-SO ₄ -K ₂ -Dreieck	128
Abb. 8.4a: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit IP21-Lösung - Lösungsentwicklung (oben), Mineralsättigungen (unten)	129
Abb. 8.4b: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit IP21-Lösung - Mineralvolumina (oben), Volumenbilanzen und Wasserverbrauch (unten).....	130
Abb. 8.4c: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit IP21-Lösung - Reaktionspfad im Mg-SO ₄ -K ₂ -Dreieck	131
Abb. 8.5a: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvin mit NaCl-Lösung - Lösungsentwicklung (oben), Mineralsättigungen (unten).....	132
Abb. 8.5b: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvin mit NaCl-Lösung - Mineralvolumina (oben), Volumenbilanzen und Wasserverbrauch (unten).....	133
Abb. 8.5c: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvin mit NaCl-Lösung -Reaktionspfad im Mg-SO ₄ -K ₂ -Dreieck	134
Abb. 8.6a: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvin mit M-Lösung - Lösungsentwicklung (oben), Mineralsättigungen (unten)	135

Abb. 8.6b: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvit mit M-Lösung - Mineralvolumina (oben), Volumenbilanzen und Wasserverbrauch (unten).....	136
Abb. 8.6c: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvit mit M-Lösung - Reaktionspfad im Mg-SO ₄ -K ₂ -Dreieck	137
Abb. 8.7a: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvit mit IP9-Lösung - Lösungsentwicklung (oben), Mineralsättigungen (unten).....	138
Abb.8.7b: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvit mit IP9-Lösung - Mineralvolumina (oben), Volumenbilanzen und Wasserverbrauch (unten)	139
Abb. 8.7c: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvit mit IP9-Lösung - Reaktionspfad im Mg-SO ₄ -K ₂ -Dreieck	140
Abb. 8.8a: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvit mit IP21-Lösung - Lösungsentwicklung (oben), Mineralsättigungen (unten).....	141
Abb. 8.8b: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvit mit IP21-Lösung - Mineralvolumina (oben), Volumenbilanzen und Wasserverbrauch (unten).....	142
Abb. 8.8c: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvit mit IP21-Lösung - Reaktionspfad im Mg-SO ₄ -K ₂ -Dreieck	143
Abb. 8.9: Volumenbilanzen der modellierten Reaktionen am Ende des metastabilen Reaktionspfades bezogen auf 1l Ausgangsmineralvolumen.....	144

Abb. 8.10: Volumenbilanzen der modellierten Reaktionen am Ende des stabilen Reaktionspfades bezogen auf 1l Ausgangsmineralvolumen.....	145
Abb. 8.11: Darstellung der an der Reaktion beteiligten Lösungsmenge bei 50 % und 35 % Versatzporenvolumen und der Lösungsmengen, die in den Reaktionen auf dem stabilen und metastabilen Reaktionspfad von 1l Versatz gebunden werden können.....	146

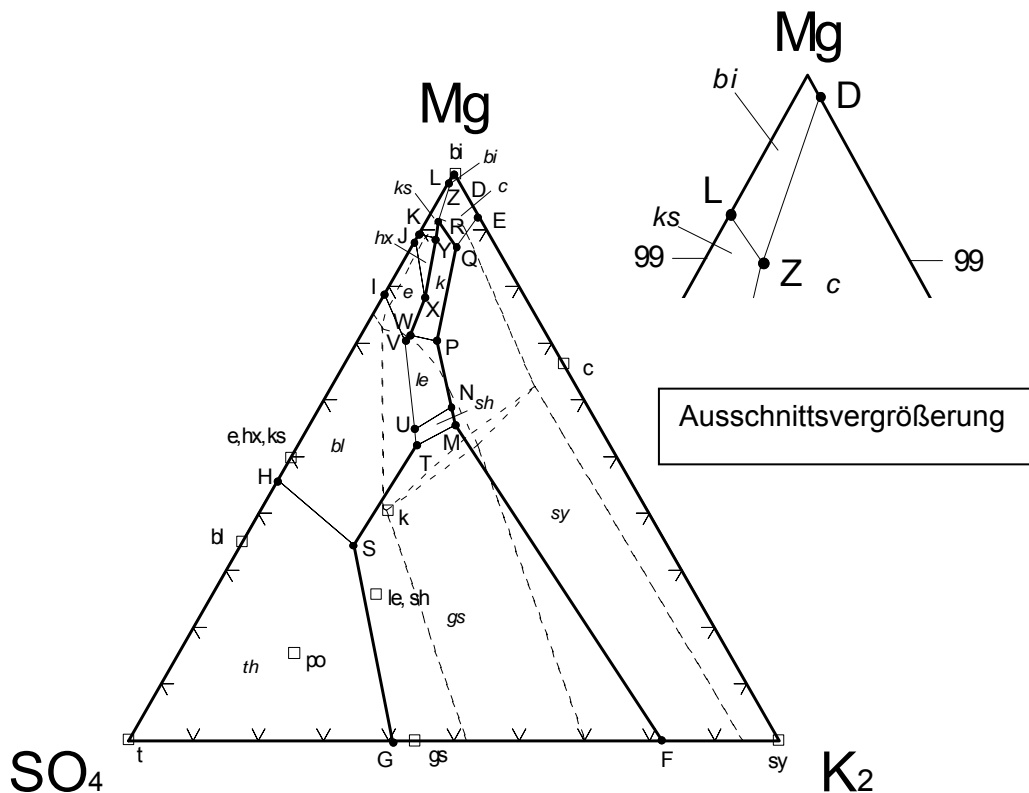
Tabellenverzeichnis

Tab. 0.1: Zusammensetzung der in den Versuchen und in der geochemischen Modellierung eingesetzten Lösungen	147
Tab. 0.2: Zusammensetzung der eingesetzten Feststoffe (Salze).....	148
Tab. 0.3: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, wasserfrei mit IP9-Lösung.....	149
Tab. 0.4: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, wasserfrei mit IP21-Lösung.....	152
Tab. 0.5: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet aller Korngrößen mit IP9-Lösung	155
Tab. 0.6: Kurzzeitversuche Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet aller Korngrößen mit IP21-Lösung	158
Tab. 0.7: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 1 bis < 2 mm mit IP9-Lösung.....	161
Tab. 0.8: Kurzzeitversuche der Versuchgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 500 µm bis 1 mm mit IP9-Lösung	164
Tab. 0.9: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße >250 bis 500 µm mit IP9-Lösung	167
Tab. 0.10: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 125 bis 250 µm mit IP9-Lösung	170
Tab. 0.11: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 63 bis 125 µm mit IP9-Lösung	173

Tab. 0.12: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 1 bis < 2 mm mit IP21-Lösung	176
Tab. 0.13: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße >500 µm bis 1 mm mit IP21-Lösung	179
Tab. 0.14: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 250 bis 500 µm mit IP21-Lösung	182
Tab. 0.15: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 125 bis 250 µm mit IP21-Lösung	185
Tab. 0.16: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 63 bis 125 µm mit IP21-Lösung	188
Tab. 0.17: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Morsleben Hartsalz getrocknet mit IP9-Lösung	191
Tab. 0.18: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Morsleben Hartsalz getrocknet mit IP21-Lösung	194
Tab. 0.19: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Morsleben Hartsalz getrocknet und Kieserit getrocknet mit IP9-Lösung	197
Tab. 0.20: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Morsleben Hartsalz getrocknet und Kieserit getrocknet mit IP21-Lösung	200
Tab. 0.21: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Natriumsulfat mit IP9-Lösung	203
Tab. 0.22: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Natriumsulfat mit IP21-Lösung	206

Tab. 0.23: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Kaliumsulfat mit IP9-Lösung	209
Tab. 0.24: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Kaliumsulfat mit IP21-Lösung	212
Tab. 0.25: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Kaliumchlorid + Magnesiumsulfat 1 : 1 (mol) mit IP9-Lösung und mit IP21-Lösung.....	215
Tab. 0.26: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Kaliumchlorid + Magnesiumsulfat 1 : 1 (mol) mit IP21-Lösung und mit IP9-Lösung.....	218
Tab. 0.27: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Calciumchlorid mit IP9-Lösung	221
Tab. 0.28: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Calciumchlorid mit IP21-Lösung	224
Tab. 0.29: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 26 „Reaktionsprodukte aus der Abgasreinigung und Verbrennung“ mit IP9 und IP21-Lösung.....	227
Tab. 0.30: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 34 „Calciumchlorid“ mit IP9 und IP21-Lösung.....	229
Tab. 0.31: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 157 „Braunkohlenfilterstaub“ mit IP9 und IP21-Lösung	232
Tab. 0.32: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 303 „Filterstaub aus Sonderabfallverbrennungsanlage“ mit IP9 und IP21-Lösung.....	235
Tab. 0.33: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 105 „Entschwefelungsschlacke“ mit IP9 und IP21-Lösung	238

Tab. 0.34: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 301 „Reaktionsprodukte aus Abgasreinigung von Sondermüllverbrennung“ mit IP9 und IP21-Lösung	241
Tab. 0.35: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 104 „Haldenschlacke“ mit IP9 und IP21-Lösung	244
Tab. 0.36: Hochdrucksäulenversuche - Randbedingungen und Ergebnisse	247
Tab. 0.37: Hochdrucksäulenversuche - Charakterisierung der Reaktionsprodukte	248
Tab. 0.38: Reaktionen der Versatzstoffe $MgSO_4$ -wasserfrei und $MgSO_4$ -wasserfrei mit Sylvin im Kontakt zu sechs unterschied- lichen Salzlösungen	250



Legende: Großbuchstaben an den Eckpunkten des Dreiecks = Komponenten, Großbuchstaben im Dreieck = invariante Lösungen (Tab. 4.2.4), Kleinbuchstaben = Abkürzungen von Salzmineralnamen (Tab. 3.2.1), Kleinbuchstaben kursiv = Stabilitätsfelder von Salzmineralen, G + Kleinbuchstaben = darstellende Punkte von Salzmineralen, fette Linien im Dreieck = Kristallisationsbahnen (nach Braitsch 1962), dünne Linien = Überschreitungslienien, gestrichelte Linien = Projektion des hexären auf das quinäre System (nach Eugster et al. 1980)

Abb.3.1: Darstellung der quinären und hexären Systeme der Salze ozeanischer Salzablagerungen im Jänecke- (Mg-SO₄-K₂)-Dreieck

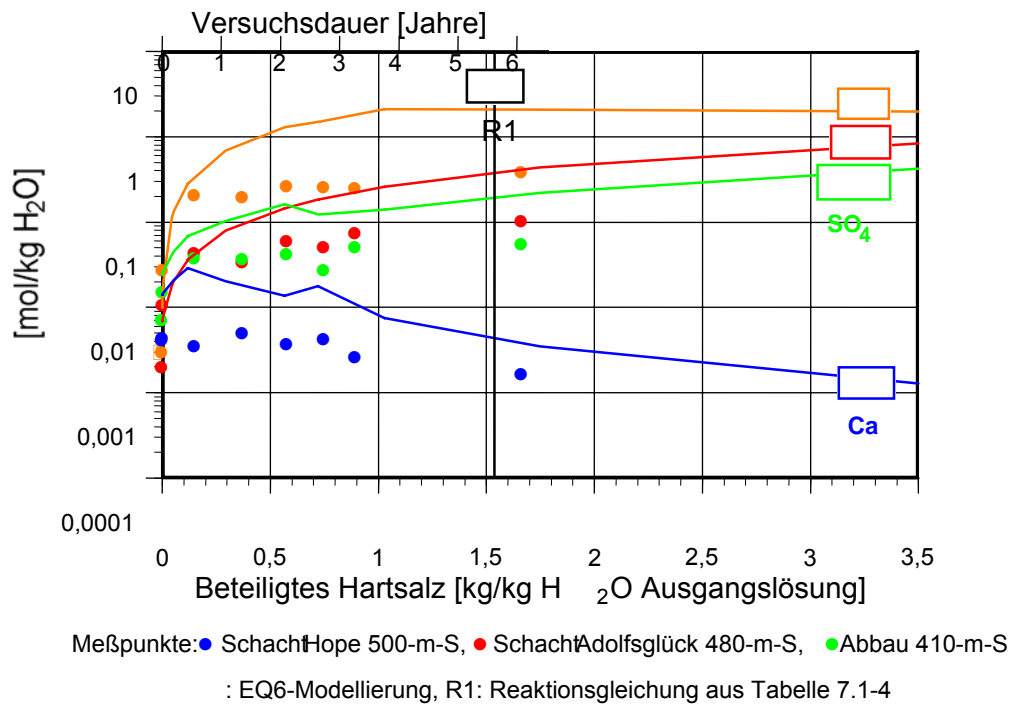


Abb. 3.2: Lösungsentwicklung im gefluteten Kalibergwerk Hope – Vergleich von Messdaten mit Ergebnissen der geochemischen Modellierung

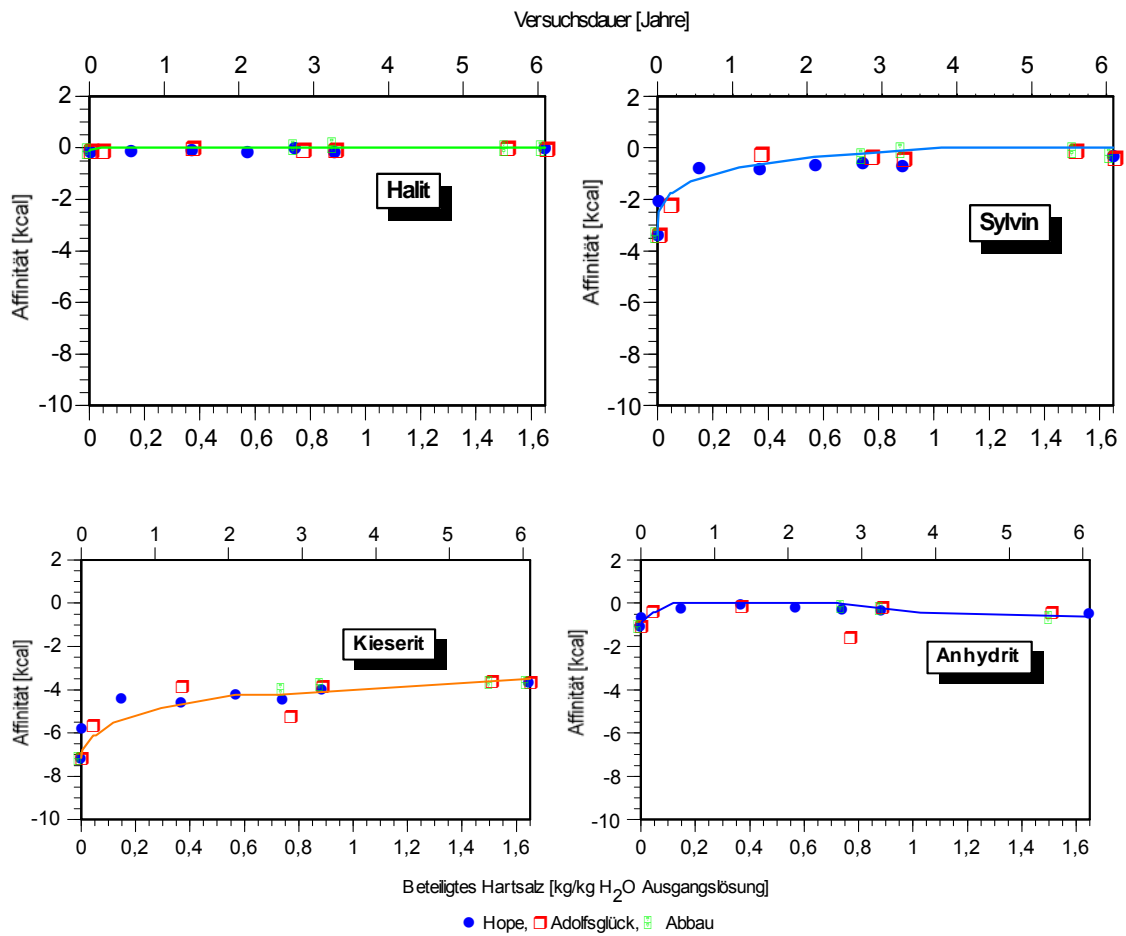


Abb. 3.3: Entwicklung der Mineral-Sättigungen in den Lösungen für die bei der Hartsalzauflösung aufgelösten Minerale (Reaktanden) – Vergleich der Affinitäten aus den natürlichen Lösungen mit Ergebnissen der geochemischen Modellierung

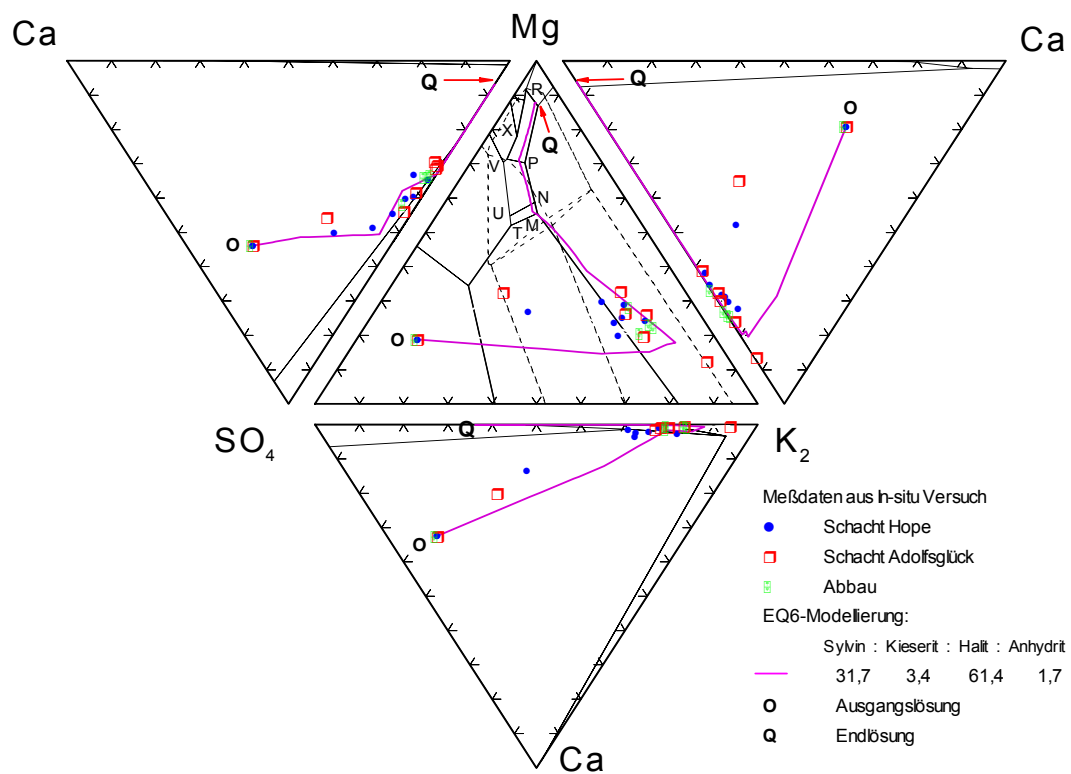


Abb. 3.4: Lösungsentwicklung im gefluteten Kalibergwerk Hope in den Dreiecken der vier NaCl-gesättigten quinären Randsysteme des hexären Systems der ozeanischen Salze – Vergleich von Messdaten mit Ergebnissen der geochemischen Modellierung

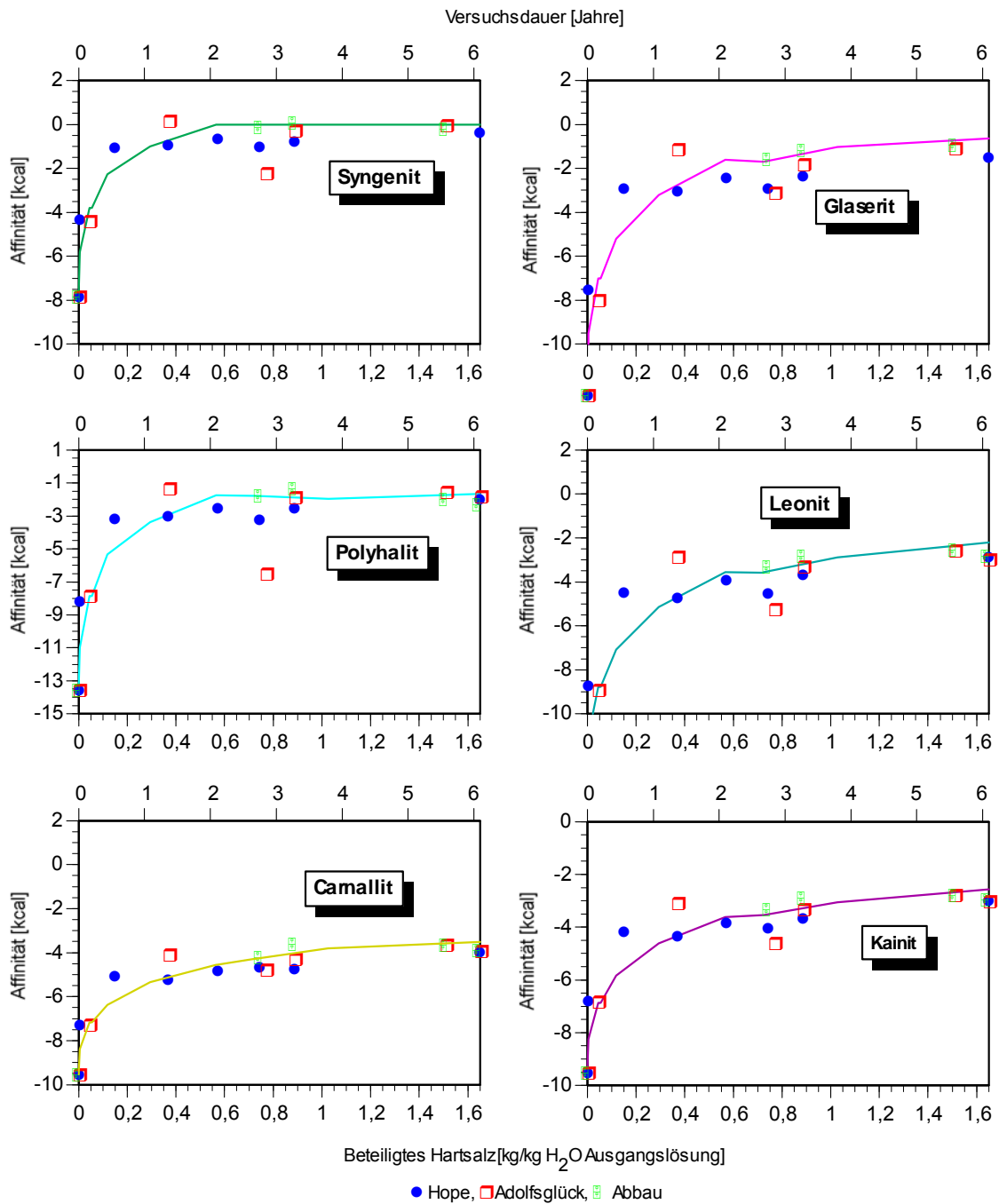


Abb. 3.5: Entwicklung der Mineral-Sättigungen in den Lösungen für die bei der Hartsalzauflösung gebildeten Minerale (Produkte) – Vergleich der Affinitäten aus den natürlichen Lösungen mit Ergebnissen der geochemischen Modellierung

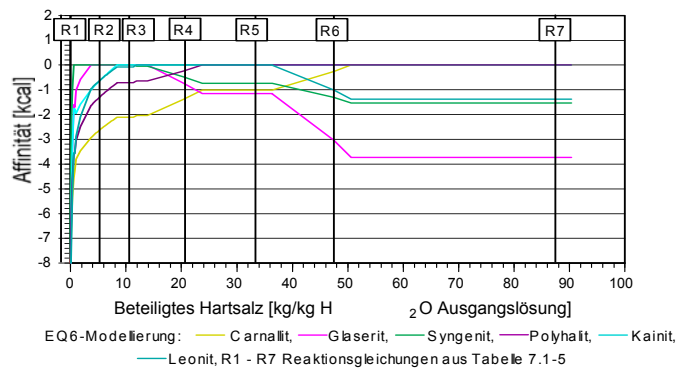
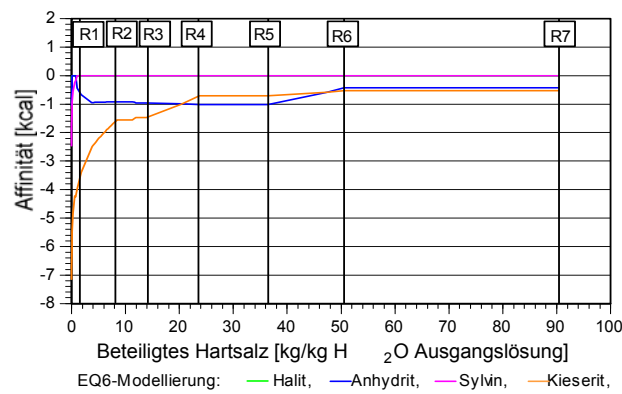
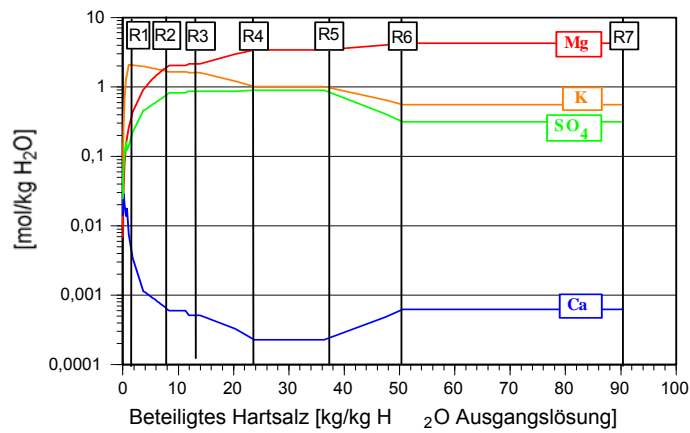


Abb. 3.6: Vollständiger Verlauf der Lösungsentwicklung bei der Hartsalzauflösung – Ergebnisse der geochemischen Modellierung: Lösungszusammensetzung (oben), Affinitäten der Reaktanden (Mitte) und Affinitäten der Produkte (unten)

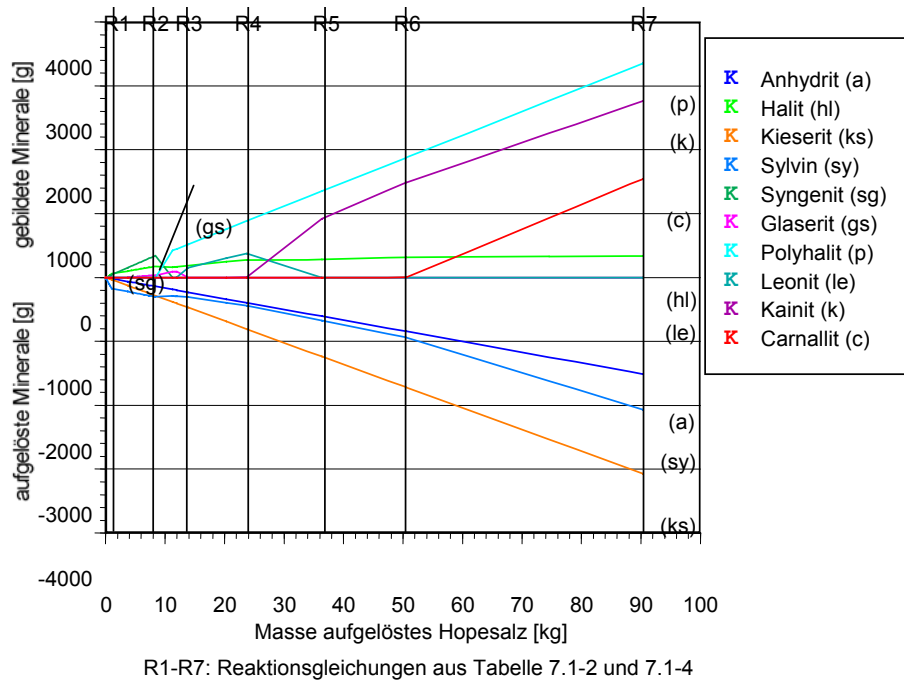


Abb. 3.7: Massenbilanz der gelösten und gebildeten Minerale bei der Hartsalzauf-
lösung - Ergebnisse der geochemischen Modellierung.

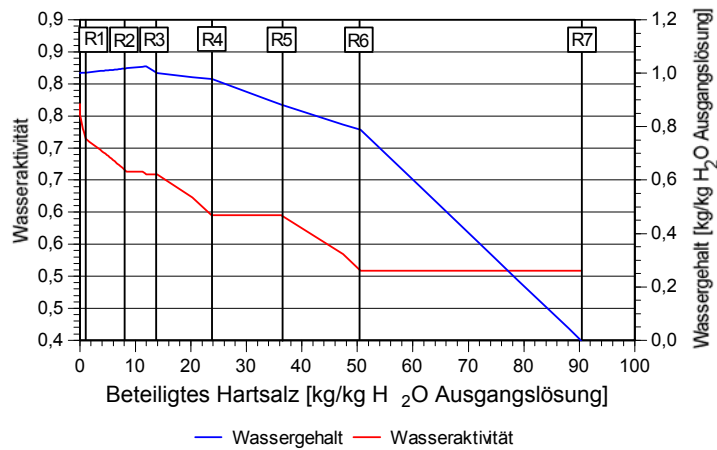


Abb. 3.8: Entwicklung des Wassergehaltes und der Wasseraktivität der Lösungen bei
der Hartsalzauflösung – Ergebnisse der geochemischen Modellierung

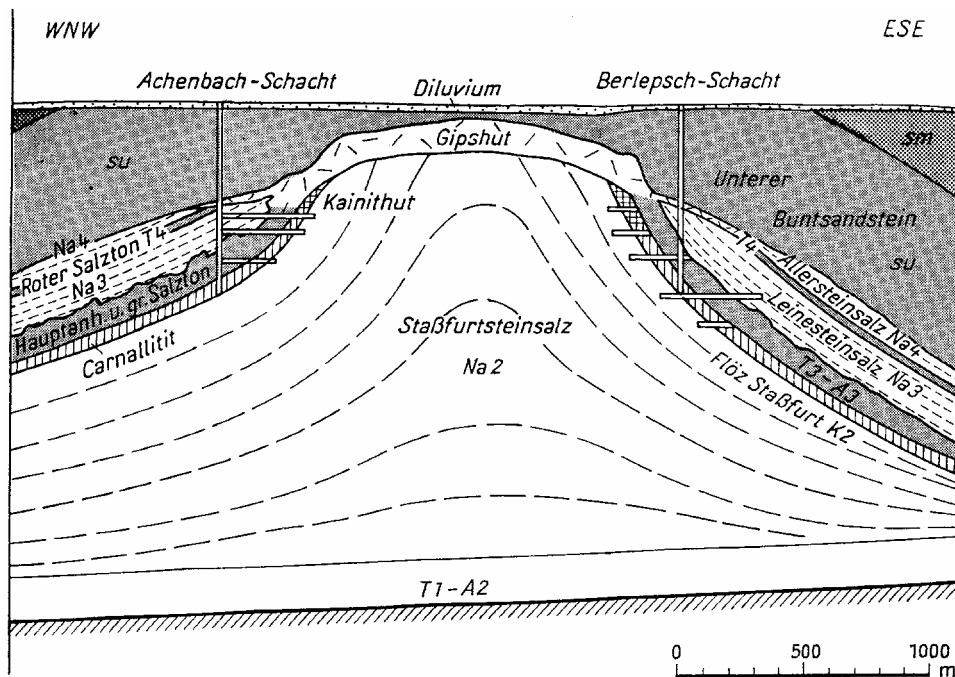


Abb. 3.9: Ausbildung eines Kainithutes im Top des Kalilagers in der steilen Lagerung

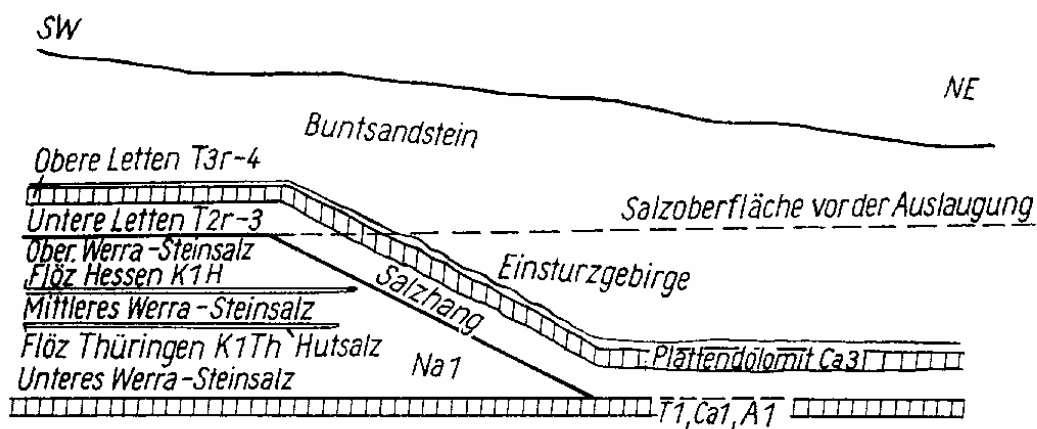


Abb. 3.10: Ausbildung von "Hutsalz" im Bereich des Salzhangs in der flachen Lagerung

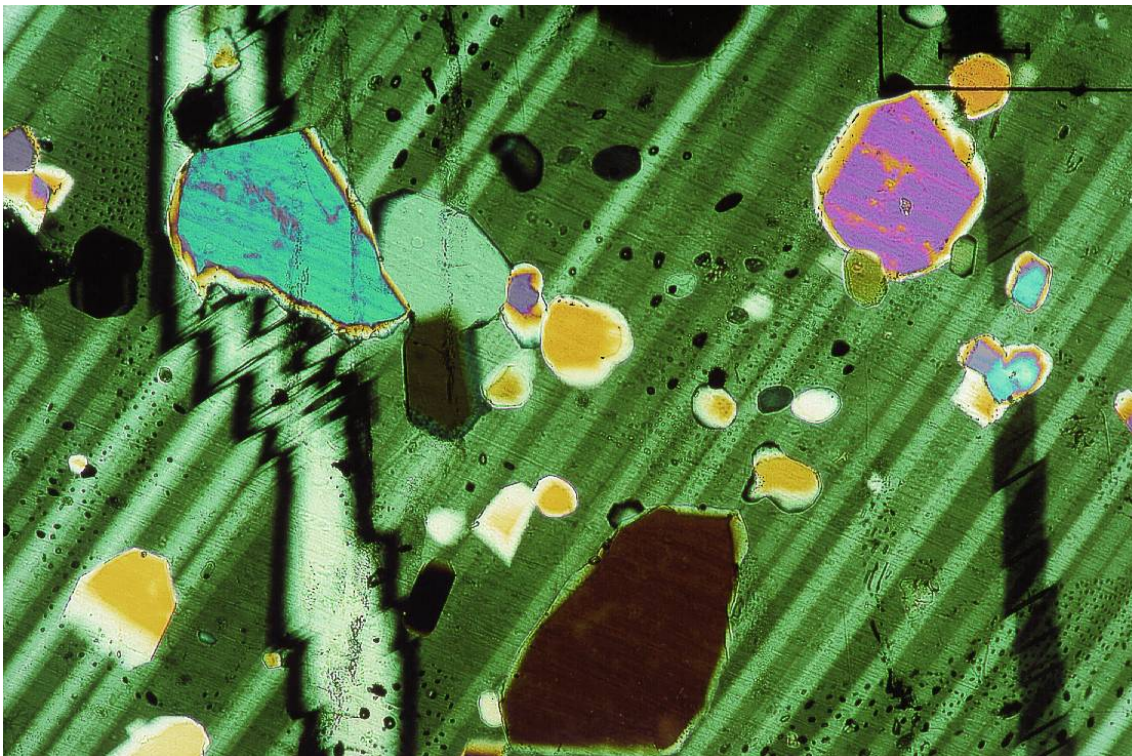


Abb. 3.11: Dünnschliffaufnahme von einer Probe aus dem "Hartsalz" (verzwillingte Matrix mit niedriger Doppelbrechung; Mineralkörner mit der höheren Licht- und Doppelbrechung)

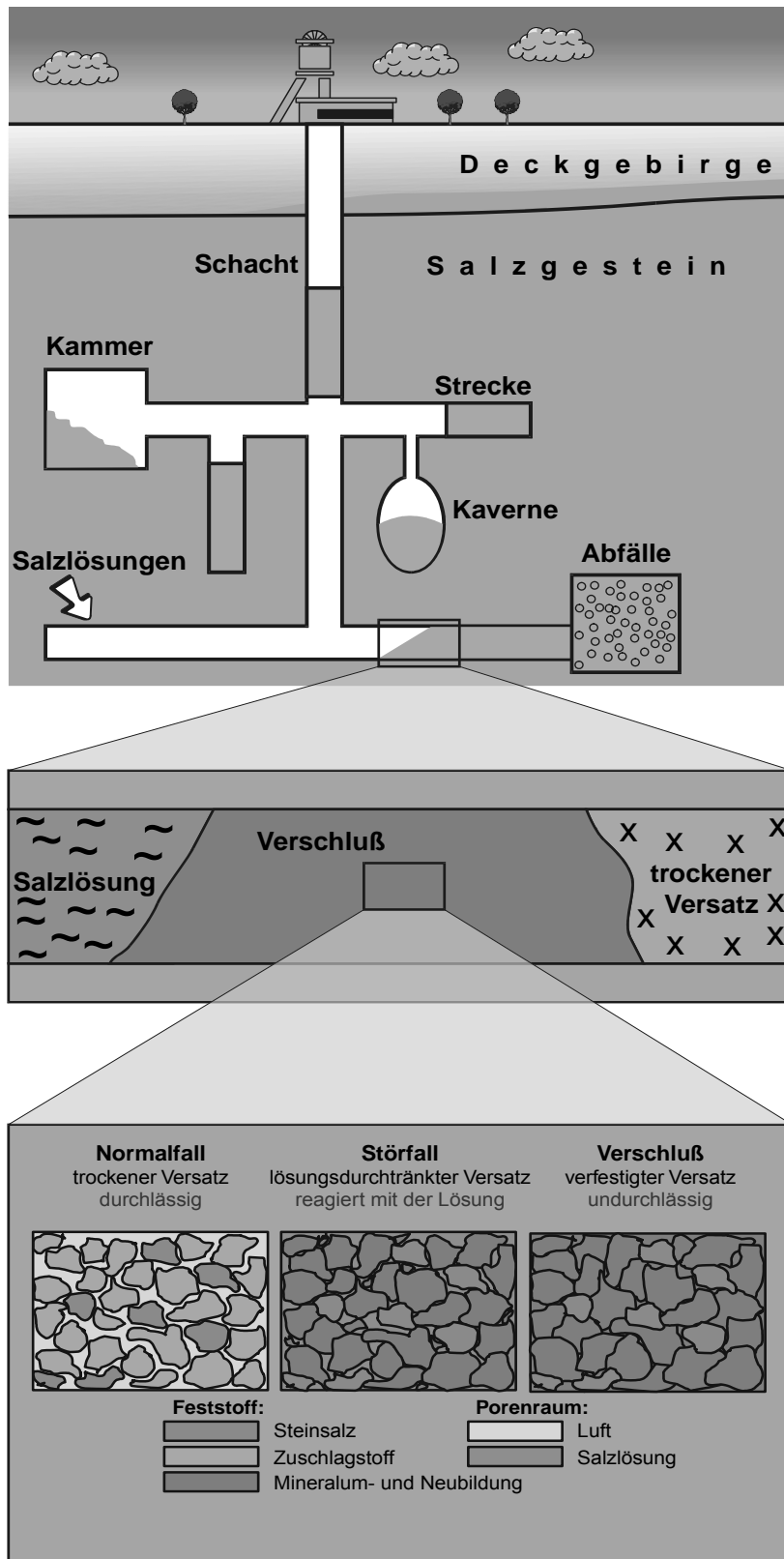


Abb. 4.1: Wirkungsweise eines selbst verheilenden Versatzmaterials in einem Endlager in Salzformationen

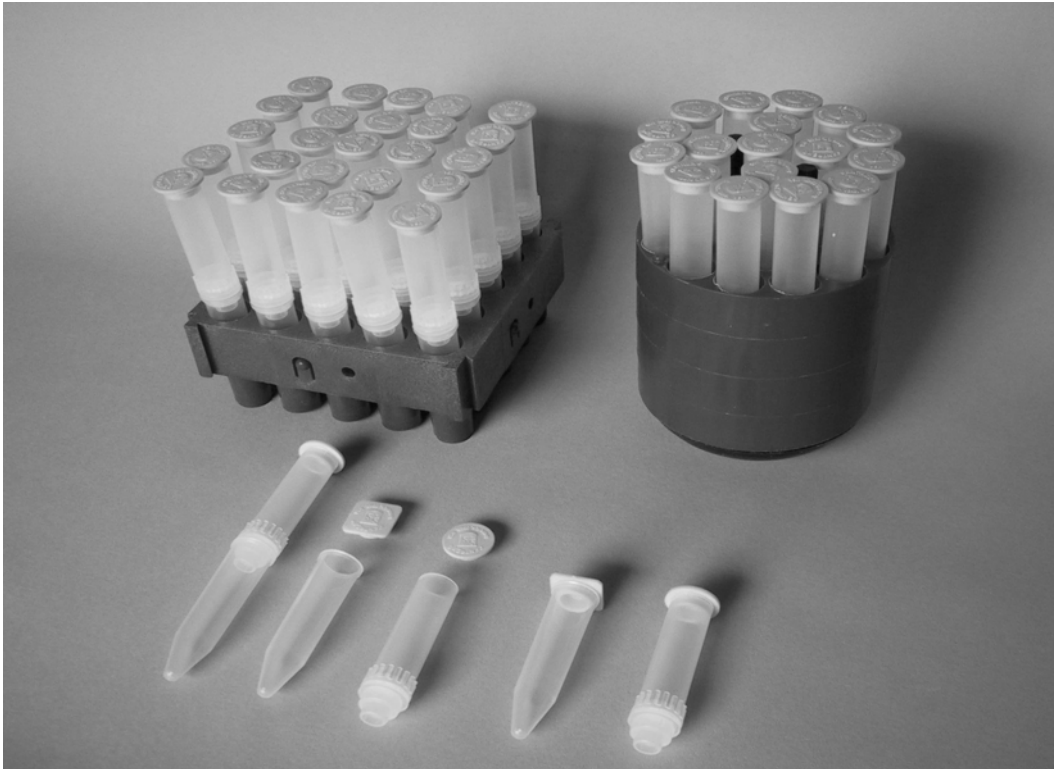


Abb. 6.1: Zentrifugalfiltrerröhrchen zur Durchführung der Kurzzeitversuche

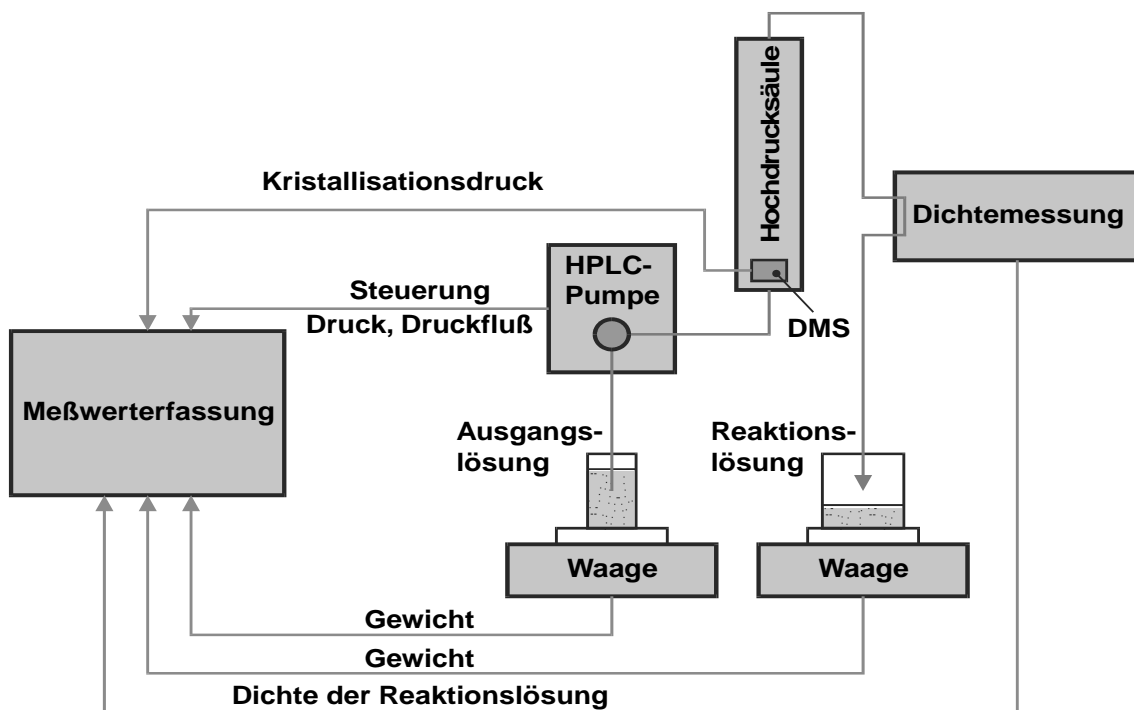


Abb. 6.2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für Langzeitsäulenversuche

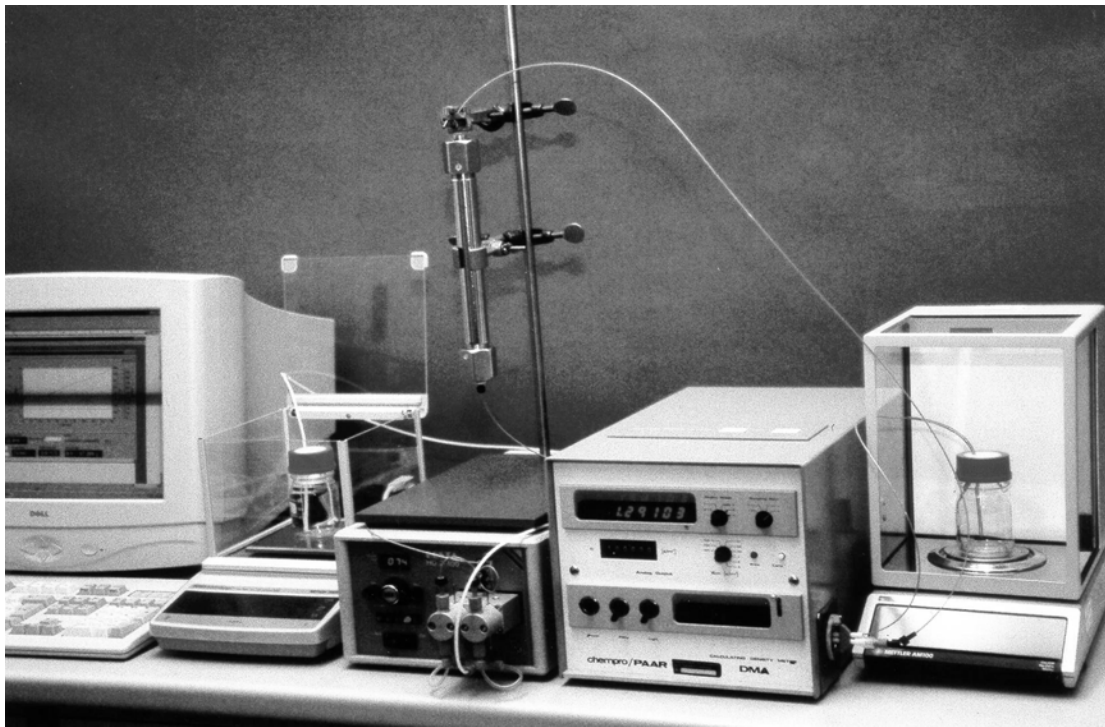


Abb. 6.3: Versuchsaufbau für Langzeitversuche mit senkrechter HPLC-Säule

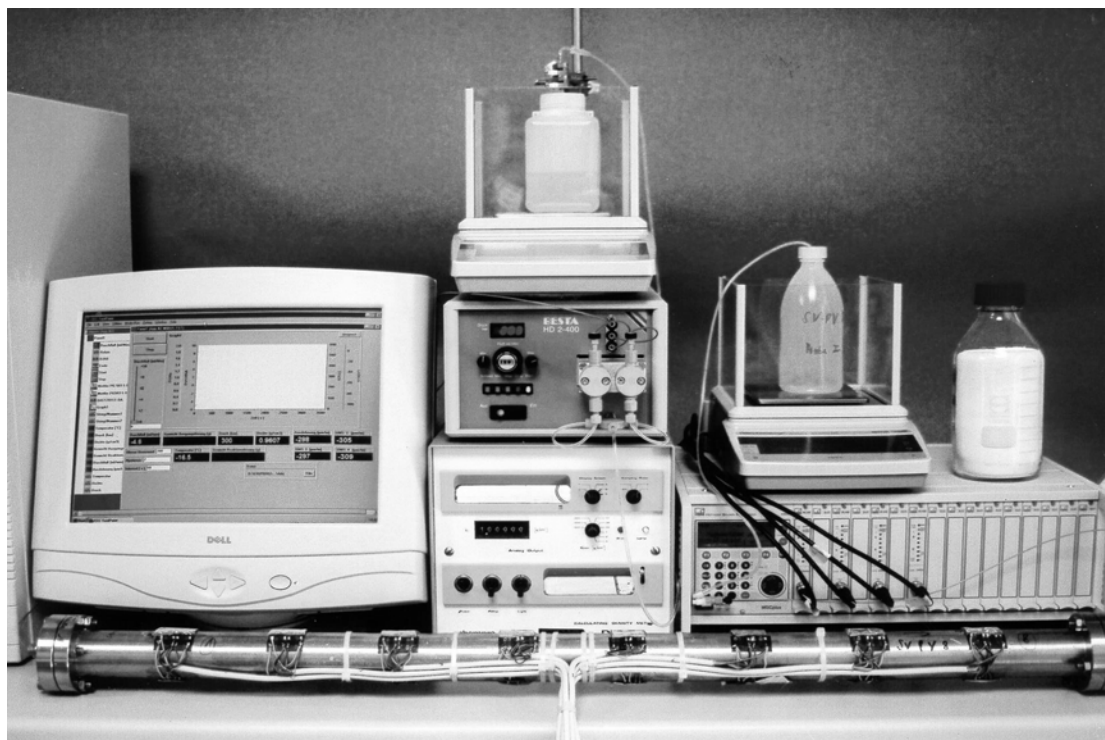


Abb. 6.4: Versuchsaufbau für Langzeitversuche mit horizontaler HPLC-Säule mit Dehnungsmessstreifen zur Druckmessung

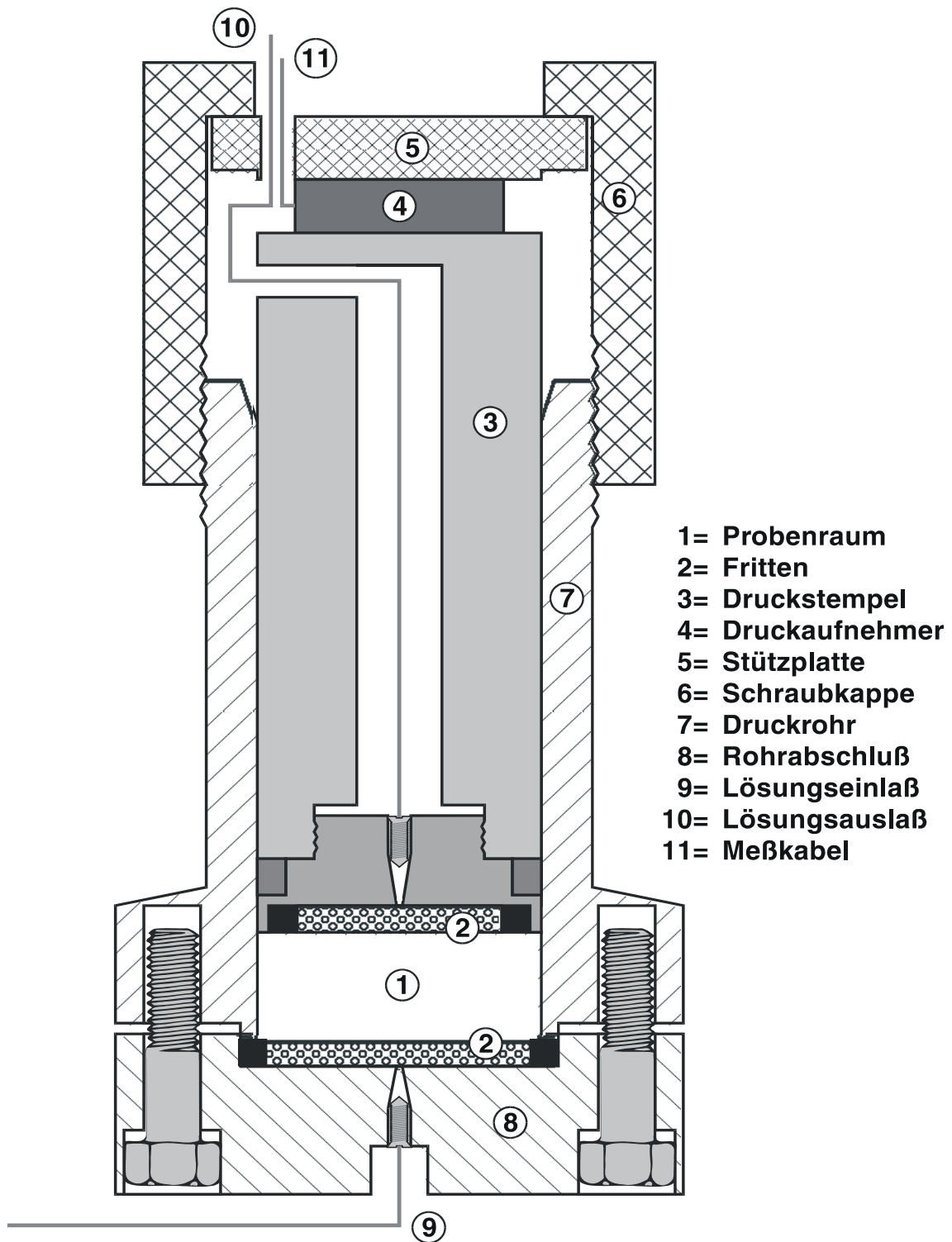


Abb. 6.5: Prinzipzeichnung der Kristallisationsdruckmesszelle zur Herstellung von Probekörpern für einaxiale Druckversuche

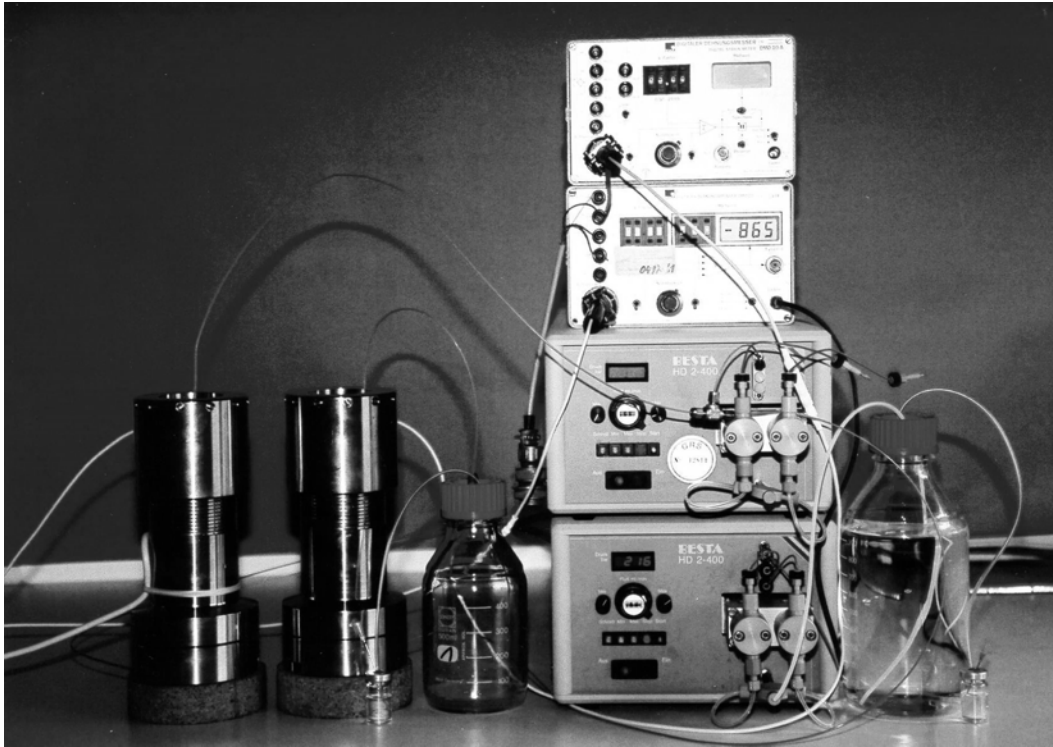


Abb. 6.6: Versuchsaufbau für Langzeitversuche mit zwei hintereinander geschalteten Kristallisationsdruckmesszellen zur Herstellung von Probekörpern für ein-axiale Druckversuche



Abb. 7.1: Säulenversuch in einer horizontalen Glassäule zur optischen Beobachtung des Lösungsfortschritts und der Stopfenbildung im Salzversatz

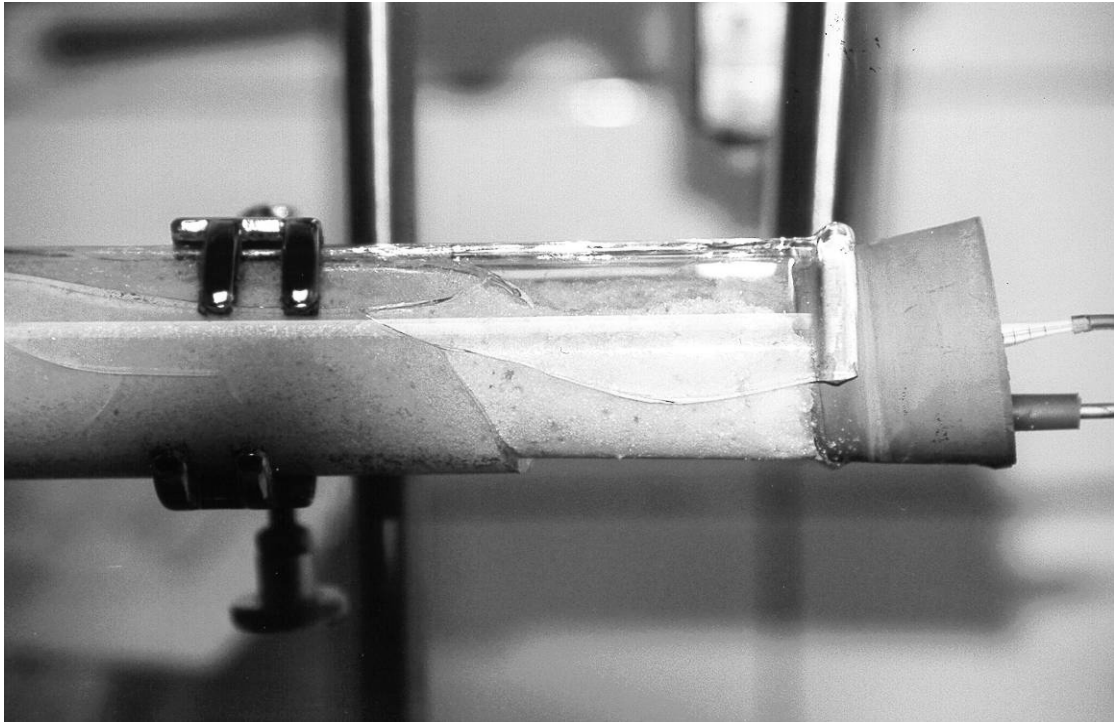


Abb. 7.2: Ausschnitt aus der Glassäule (Abb. 7.1) mit durch Kristallisationsdruck geplatzt Glasrohr

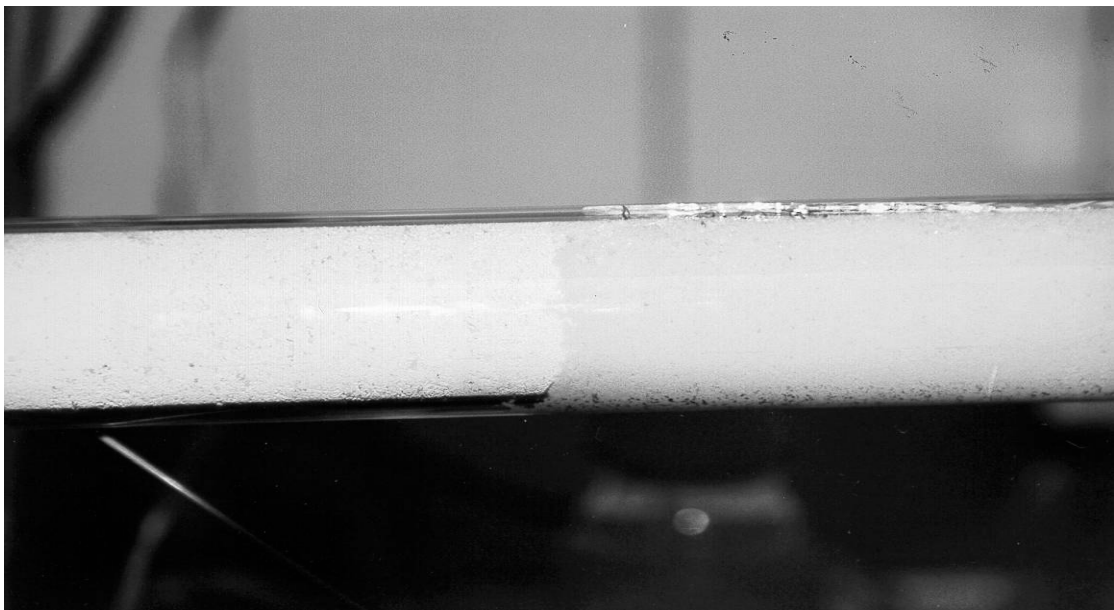


Abb. 7.3: Ausschnitt aus der Glassäule (Abb. 7.1) – Übergang von reagiertem (rechts) zu unreaktiertem Versatzmaterial (links) im Bereich der Lösungsfront



Abb. 7.4: Füllung nach Entfernen der Glassäule (Abb. 7.1) – Gesamtansicht des Versatzmaterials aus der Glassäule, rechts Eintritt der Lösung, Mitte Stopfenbildung infolge Reaktion mit eingedrungener Lösung, links loses, unreaktiertes Versatzmaterial infolge fehlender Lösung, deren Fortschreiten durch die Stopfenbildung verhindert wurde

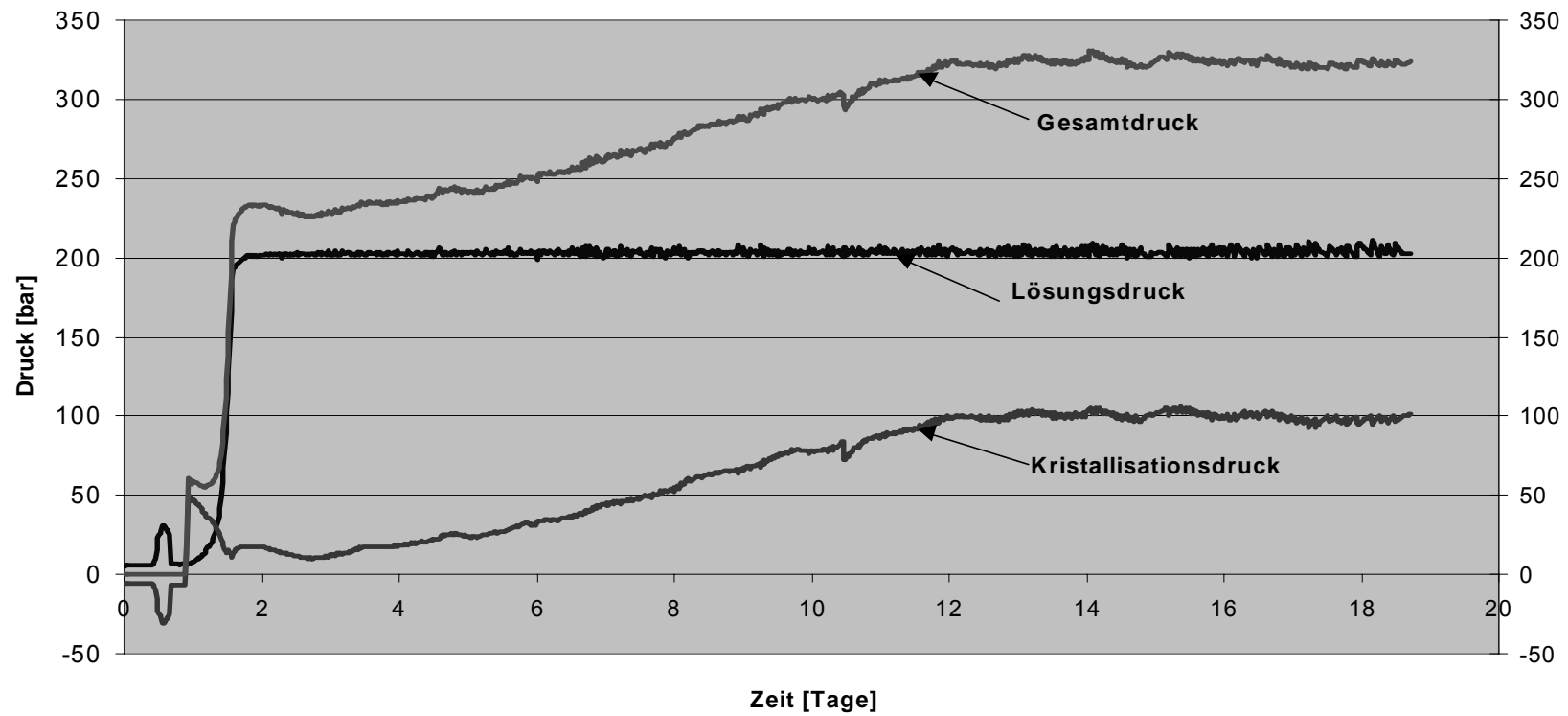


Abb. 7.5: Hochdrucksäulenversuch HV-7 mit getrocknetem Kieserit, Sylvit und IP21-Lösung - Lösungsdruck, Gesamtdruck und Kristallisationsdruck (Gesamtdruck und Differenz zwischen Gesamtdruck und Pumpendruck)



Abb. 7.6: Hochdrucksäulenversuch HV-7 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - in den Versatz eingedrungene, durchgetretene und verbliebene Lösungsmasse

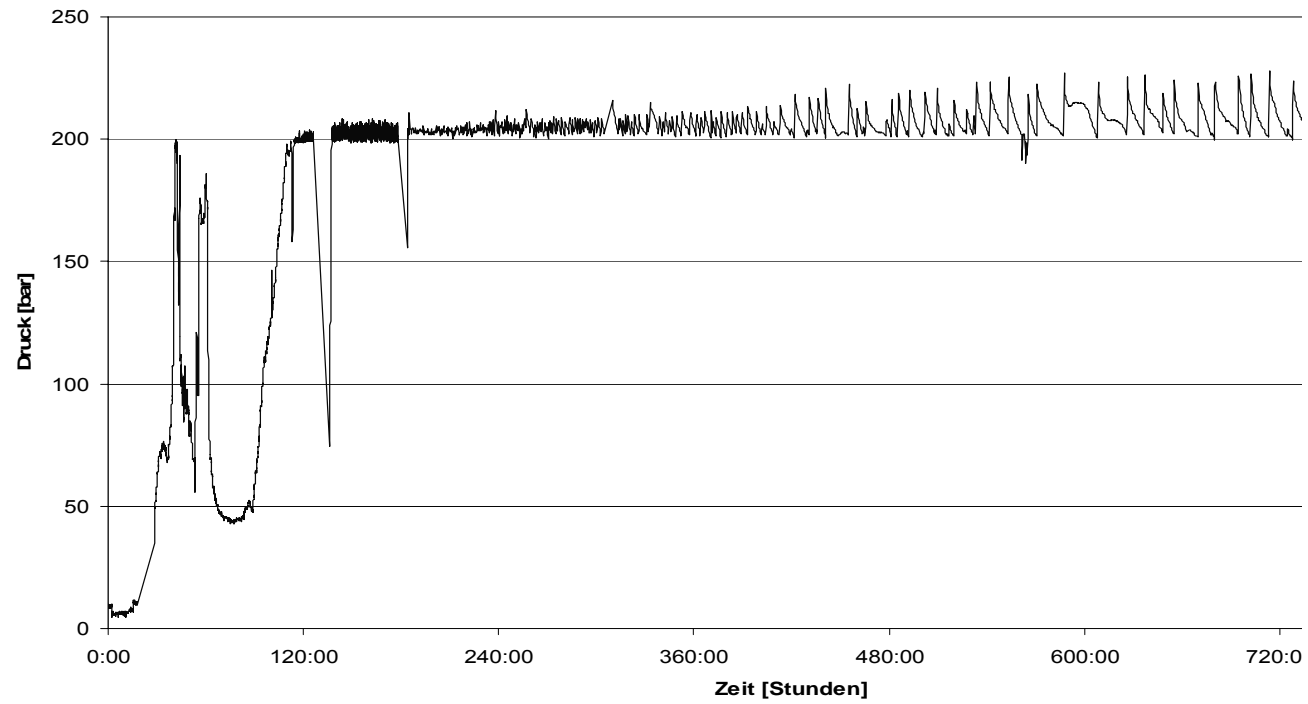


Abb. 7.7: Hochdrucksäulenversuch PV-4 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - Lösungsdruck (Pumpendruck)

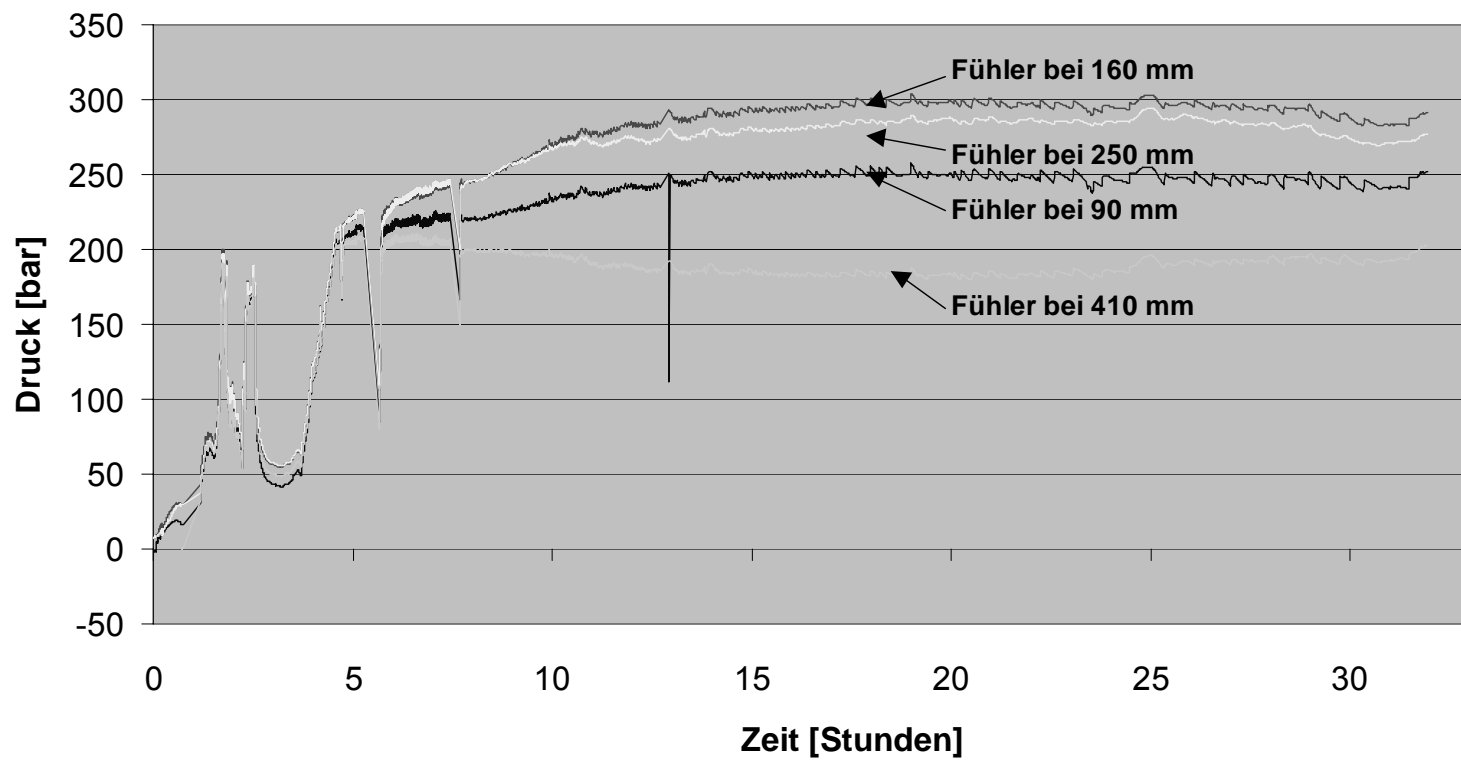


Abb. 7.8: Hochdrucksäulenversuch SV-PV-4 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - Gesamtdruck an vier Stellen der 1 m langen Säule

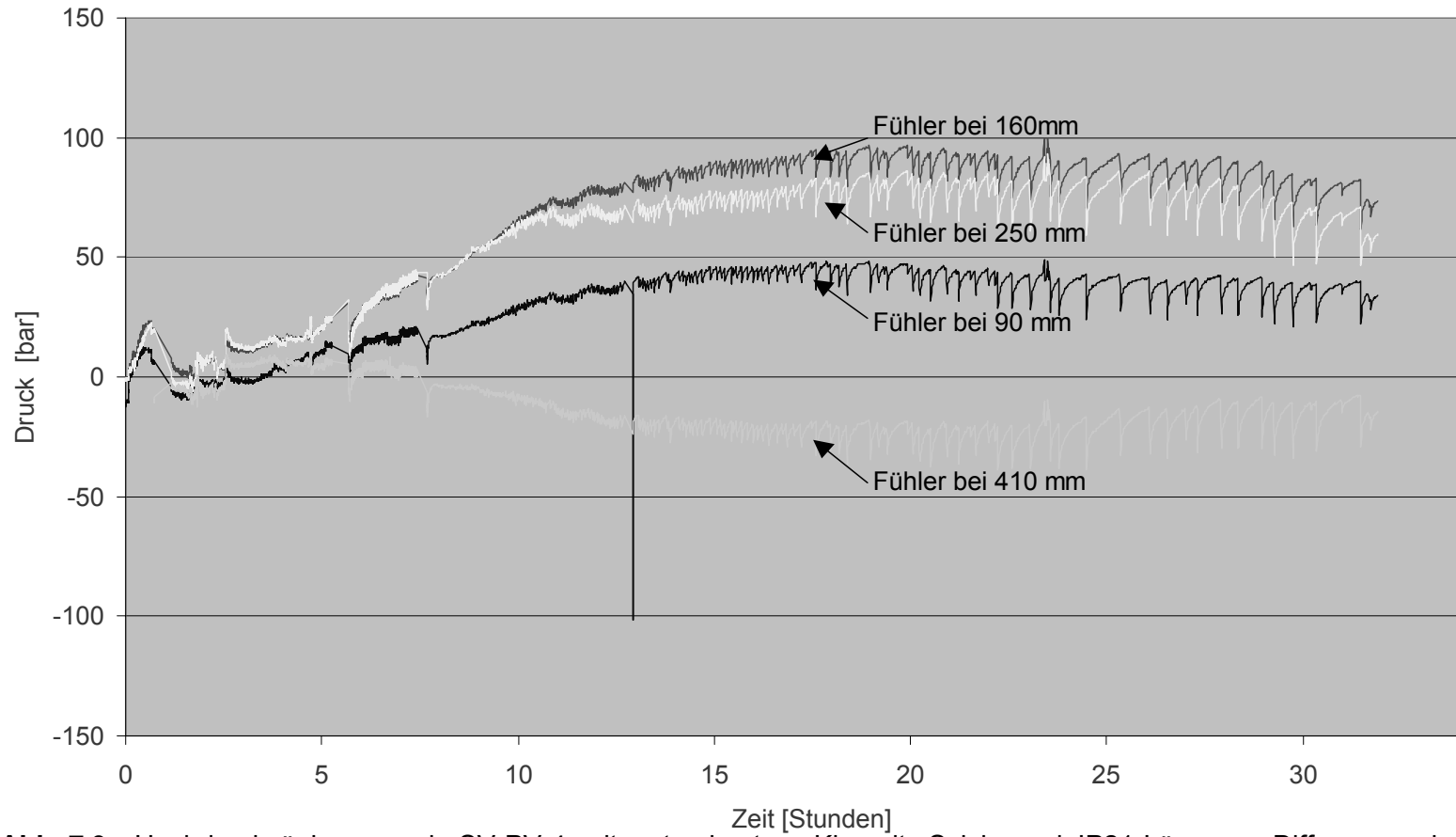


Abb. 7.9: Hochdrucksäulenversuch SV-PV-4 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - Differenz zwischen Gesamtdruck und Pumpendruck an vier Stellen der 1 m langen Säule

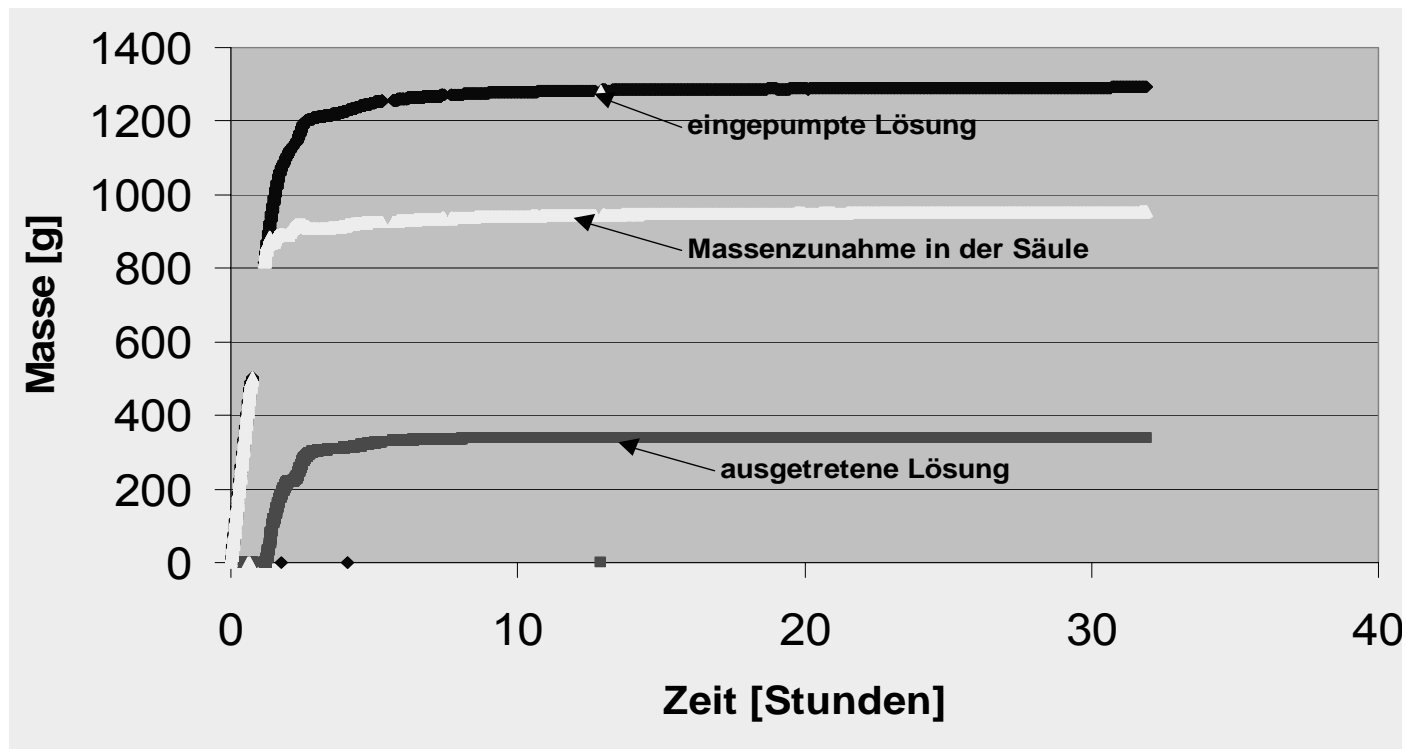


Abb. 7.10: Hochdrucksäulenversuch SV-PV-4 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - in den Versatz eingedrungene, durchgetretene und verbliebene Lösungsmenge

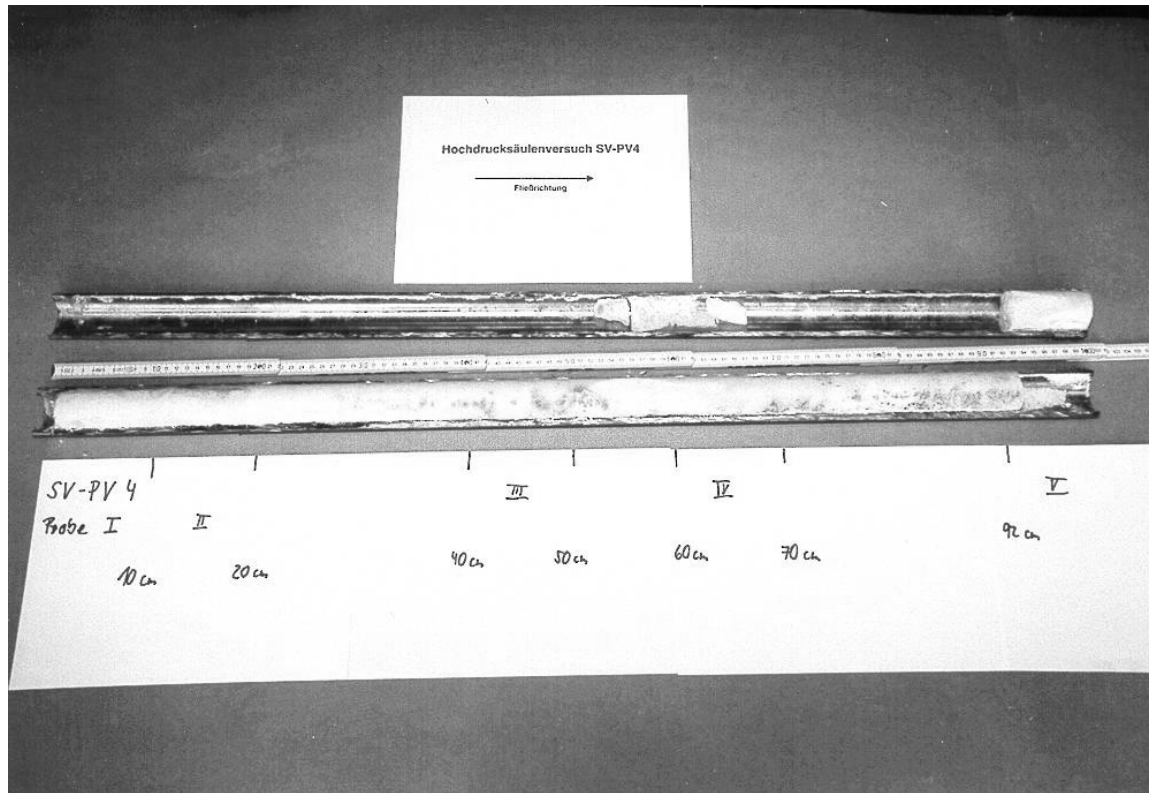


Abb. 7.11: Hochdrucksäulenversuch SV-PV-4 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - Aufgeschnittene Hochdrucksäule mit verfestigtem Versatzmaterial und Lage von fünf Probennahmepunkten für Wassergehaltsbestimmungen und mineralogische Untersuchungen

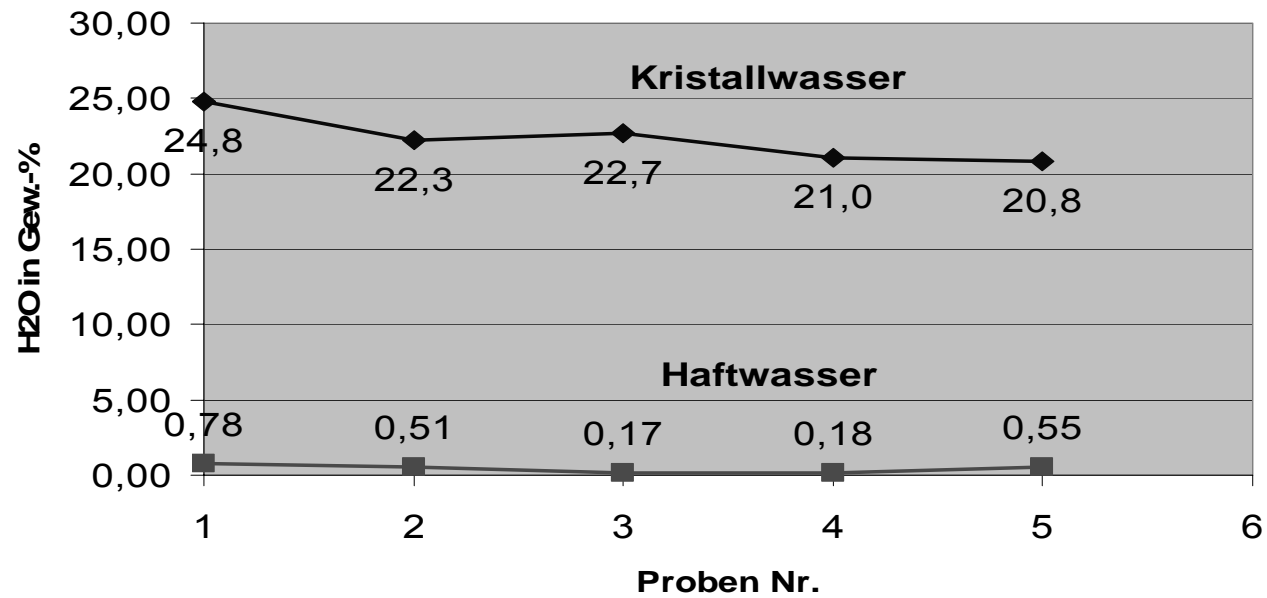


Abb. 7.12: Hochdrucksäulenversuch SV-PV-4 mit getrocknetem Kieserit, Sylvit und IP21-Lösung - Kristallwasser- und Haftwassergehalte an fünf verschiedenen Stellen der 1 m langen Säule

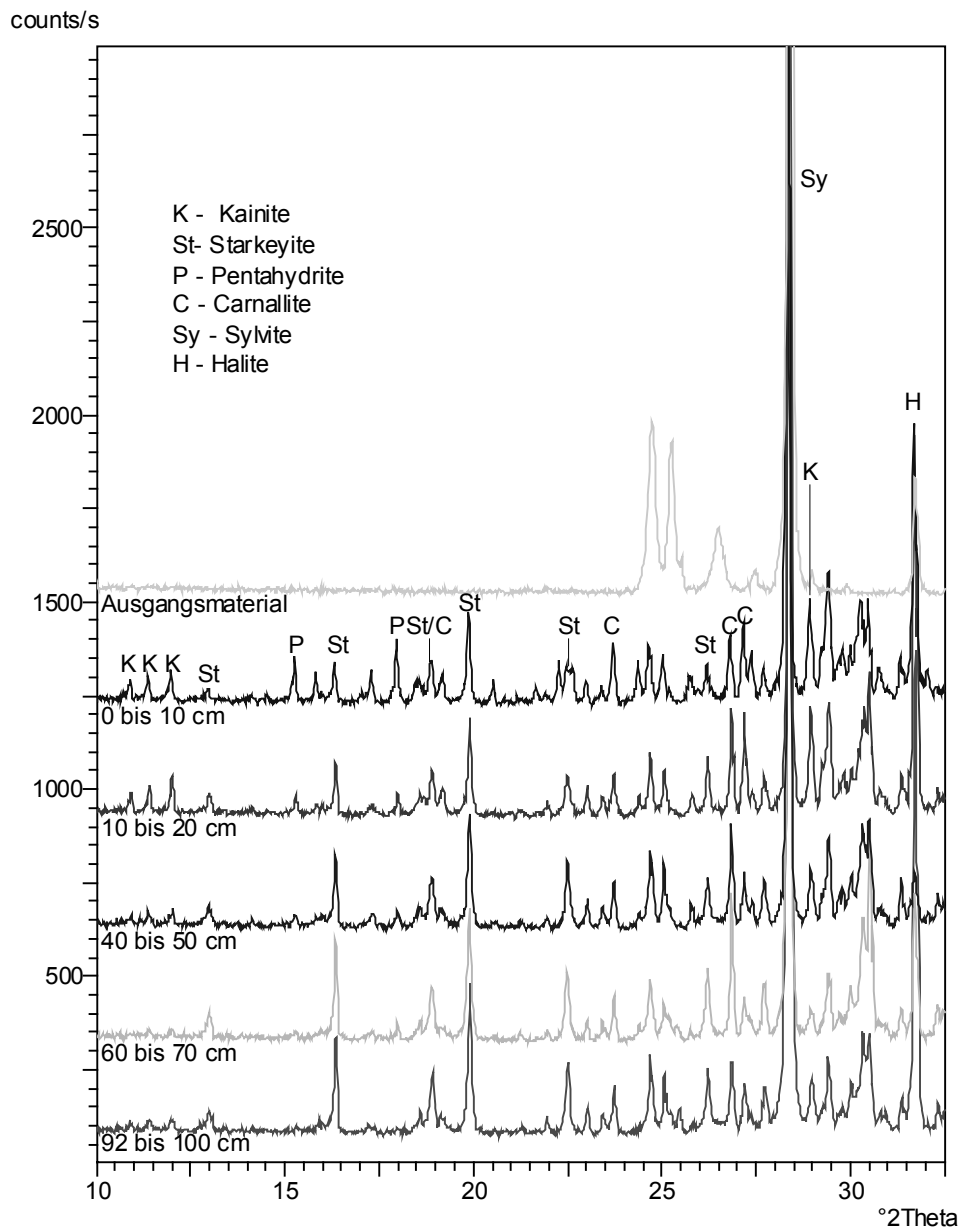


Abb. 7.13: Hochdrucksäulenversuch SV-PV-4 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - RDA-Diagramm, Vergleich der Peakintensitäten vom Ausgangsmaterial und den neu gebildeten Mineralphasen an fünf Stellen der 1 m langen Säule

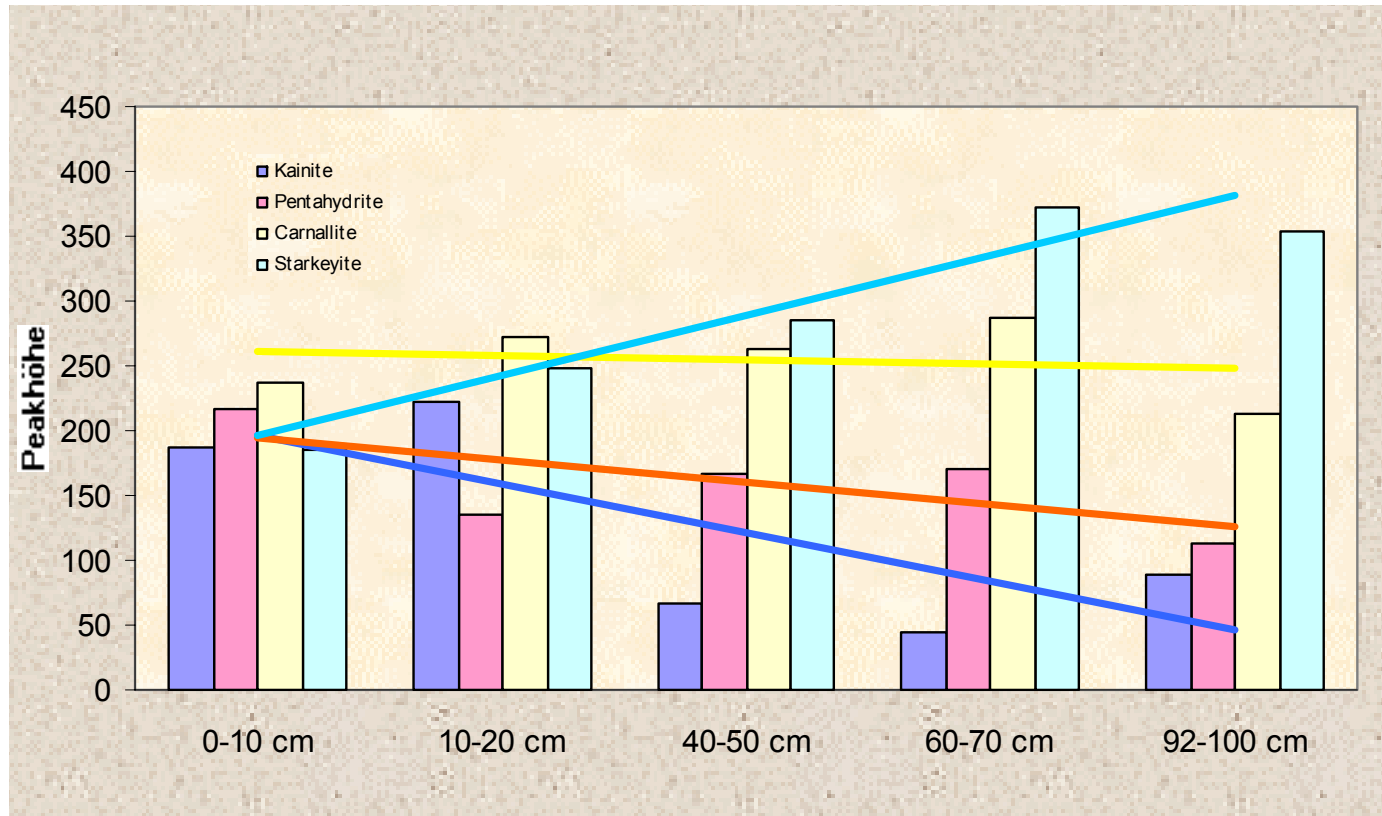


Abb. 7.14: Hochdrucksäulenversuch SV-PV-4 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - Veränderung der Gehalte der Mineralneubildungen an fünf Stellen der 1 m langen Säule

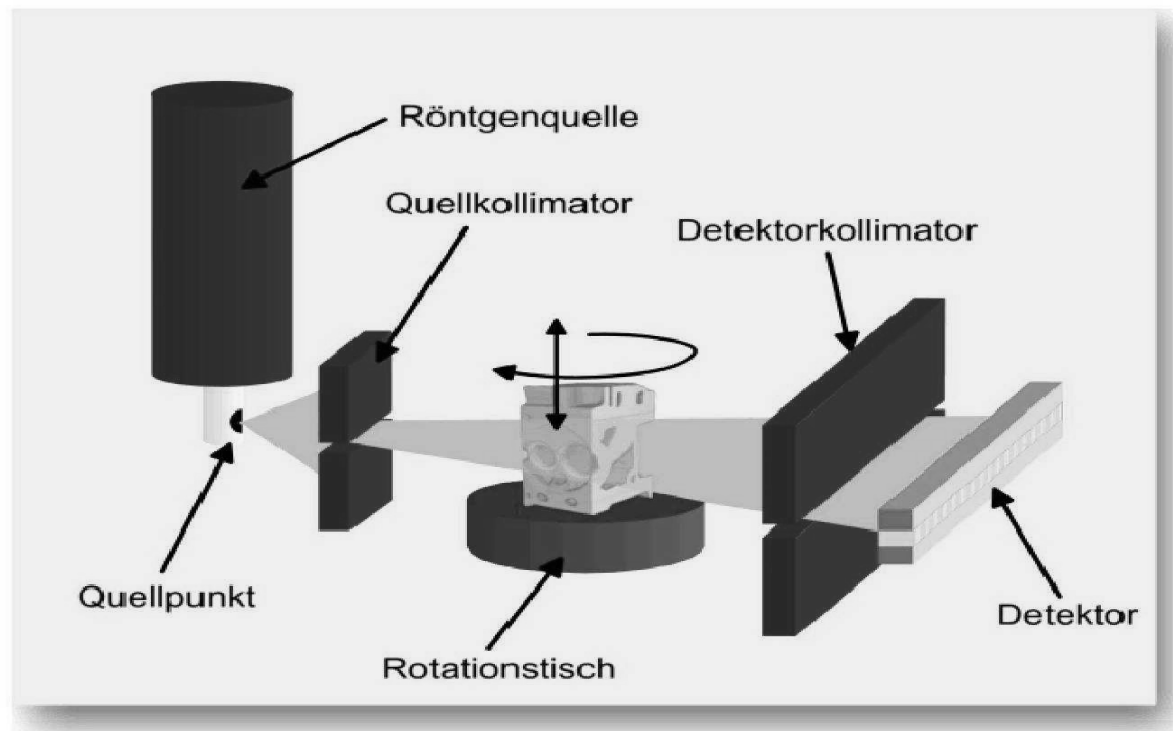


Abb. 7.15: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus des Computertomographen (CT), der für die Auswertung der Hochdrucksäulenversuche eingesetzt wurde

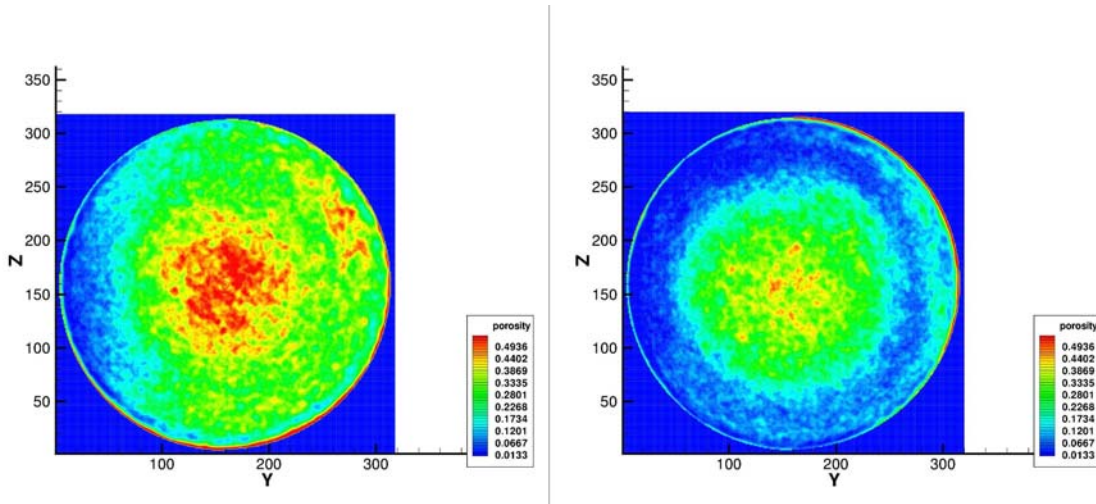


Abb. 7.16: CT-Schnittbilder des unreaktierten Versatzmaterials aus Versuch SV-PV-7 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung – Porositätsverteilung im unteren und oberen Bereich der Säule bei trockener Schüttung vor der Reaktion mit Salzlösung

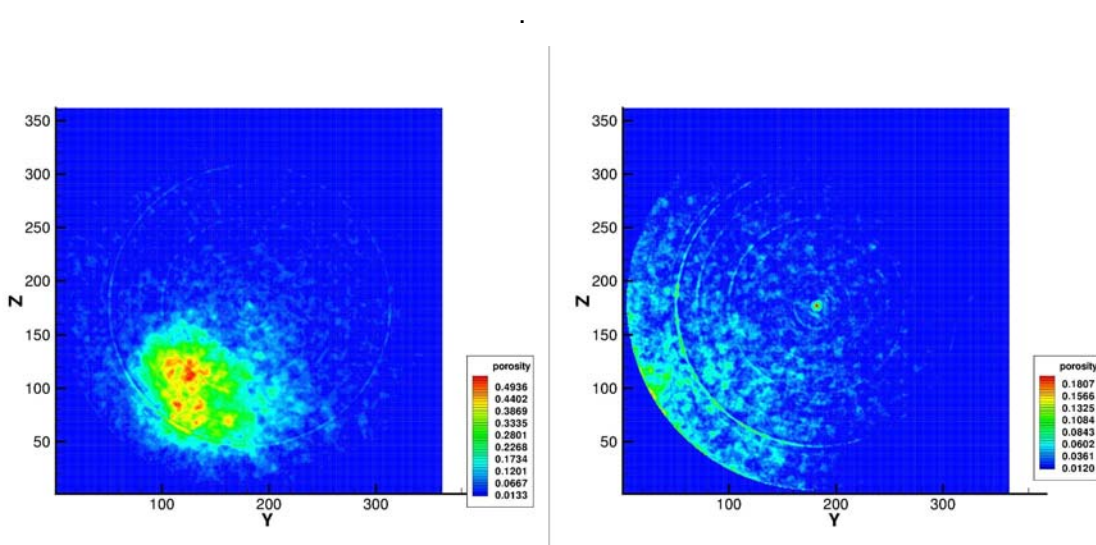


Abb. 7.17: CT-Schnittbilder des reaktierten Versatzmaterials aus Versuch SV-PV-7 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung – Porositätsverteilung im unteren und oberen Bereich der Säule nach Reaktionsende

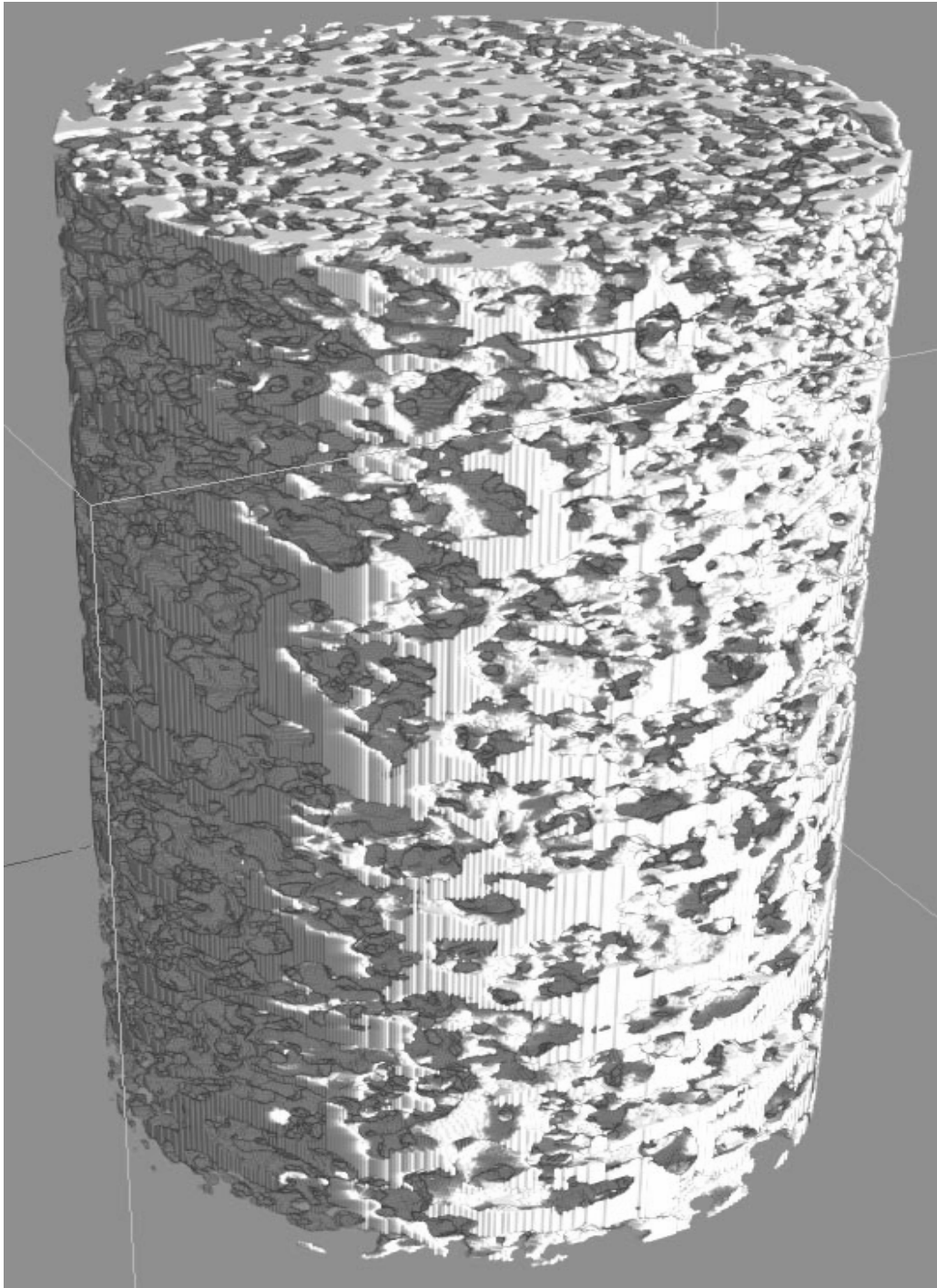


Abb. 7.18: Dreidimensionale Darstellung der Hohlräume im unreaktierten Versatzmaterial aus Versuch SV-PV-7 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - Hohlraum ist gelb dargestellt, dunkle Bereiche stellen den Feststoff dar

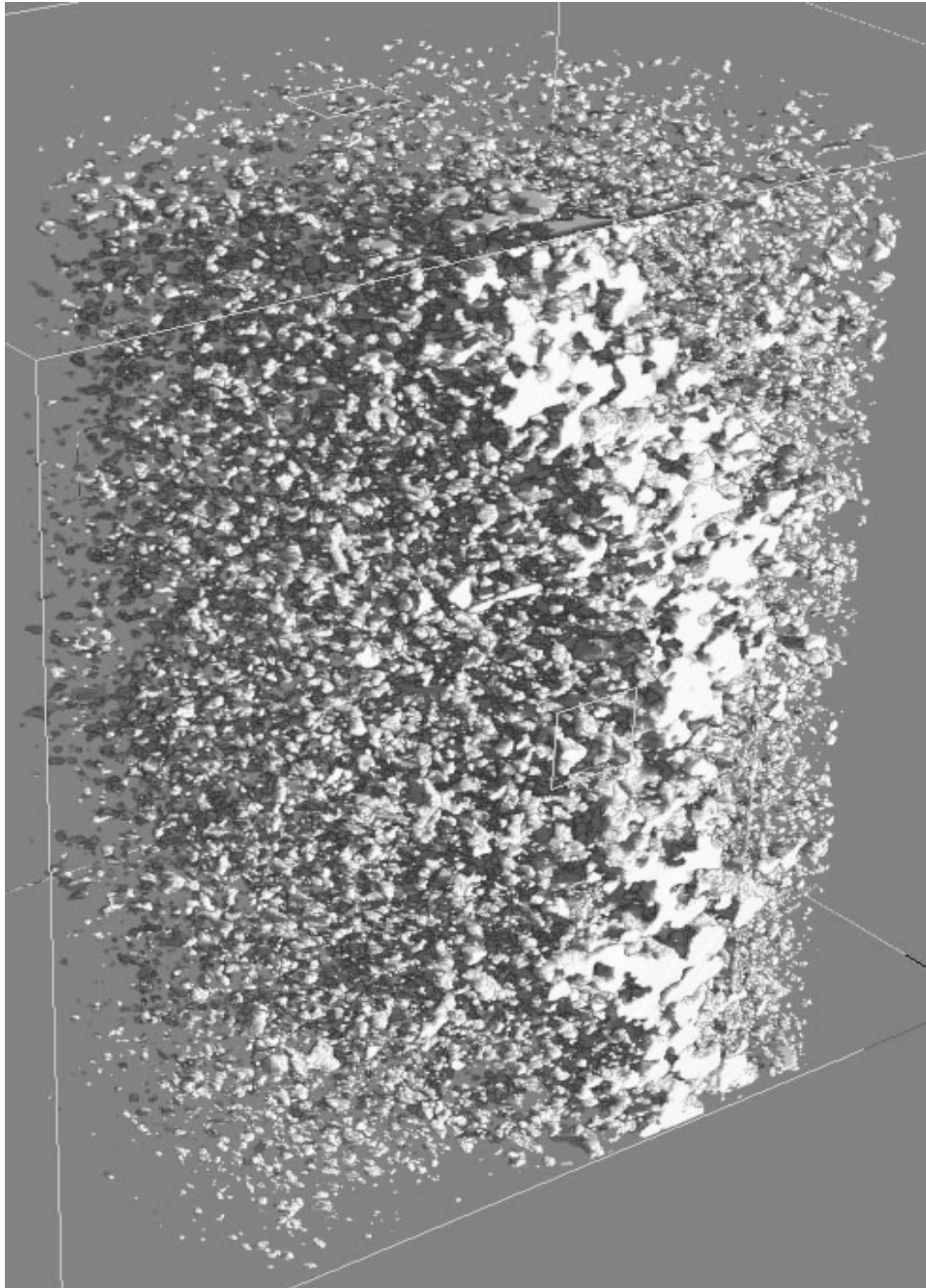


Abb. 7.19: Dreidimensionale Darstellung der Hohlräume im reagierten Versatzmaterial aus Versuch SV-PV-7 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung – Unterer Säulenbereich (Einströmbereich der Lösung): Hohlräume gelb, dunkle Bereiche Feststoff; auf der linken Seite sind isolierte Poren zu erkennen, auf der rechten Seite die zusammenhängenden Poren eines Lösungskanal

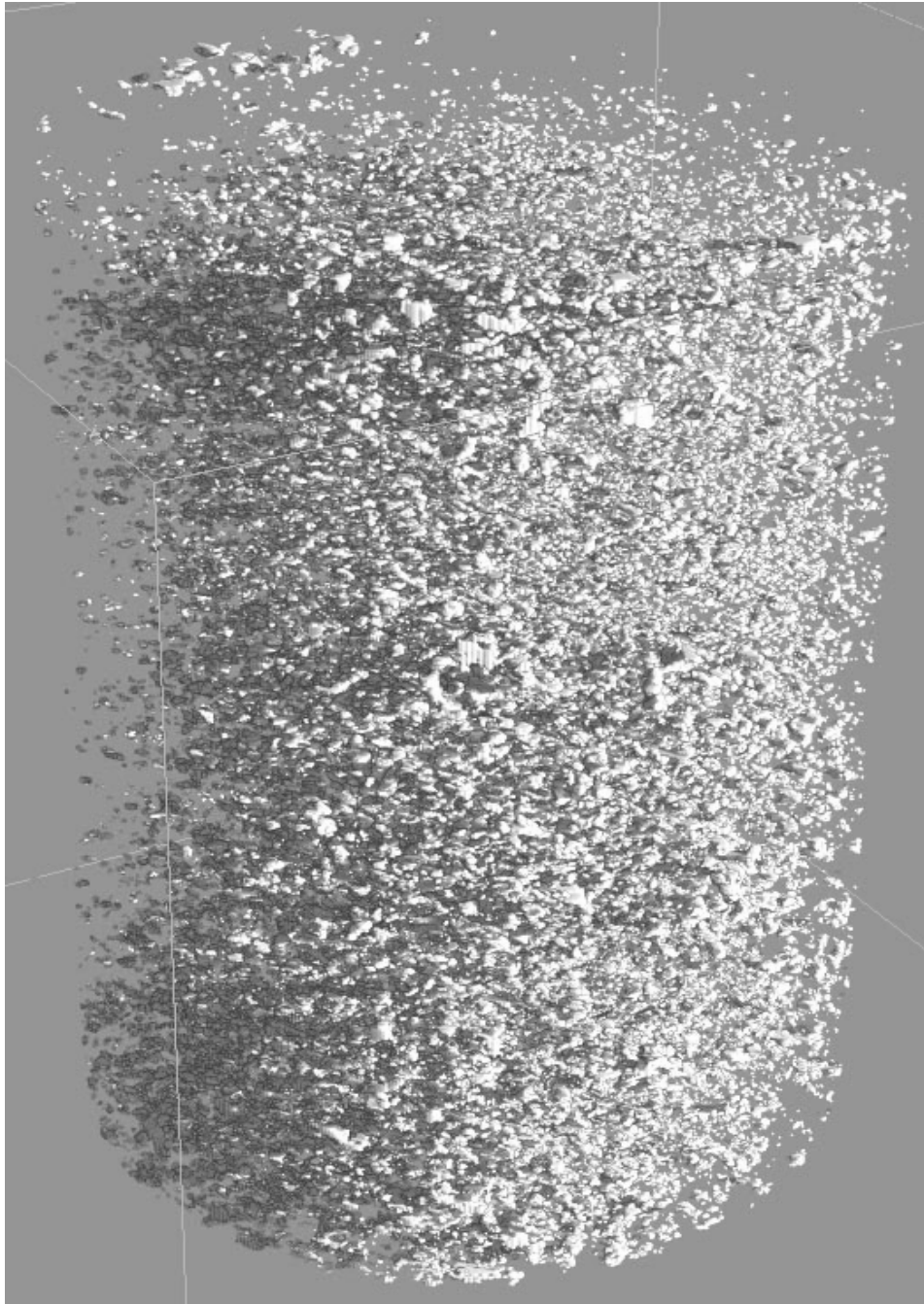


Abb. 7.20: Dreidimensionale Darstellung der Hohlräume im reagierten Versatzmaterial aus Versuch SV-PV-7 mit getrocknetem Kieserit, Sylvin und IP21-Lösung - Stopfenbereich: Hohlräume gelb, dunkle Bereiche Feststoff, auffällig ist, dass im Stopfenbereich nur geschlossene, isolierte Poren auftreten

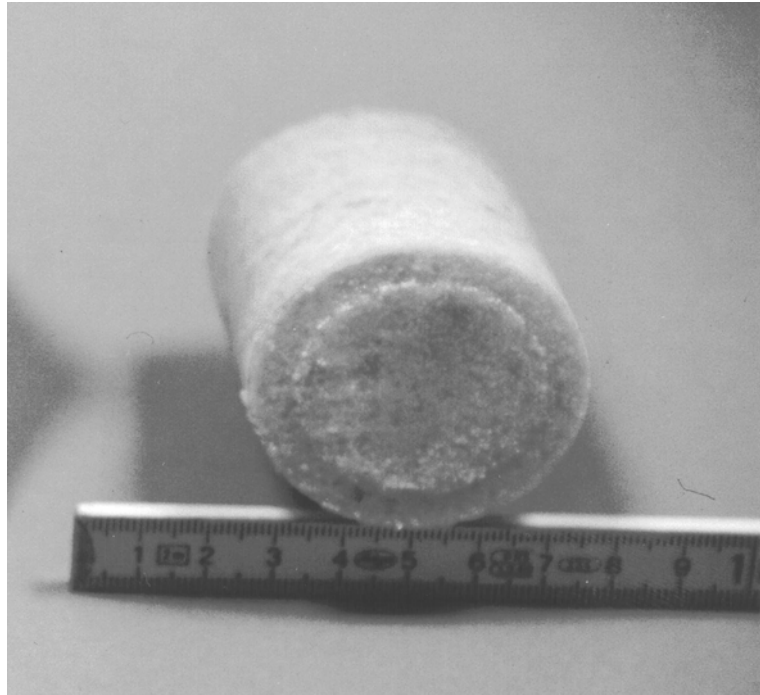


Abb. 7.21: Ausreagierter Probekörper für einaxiale Druckversuche, Versuch SV-KP

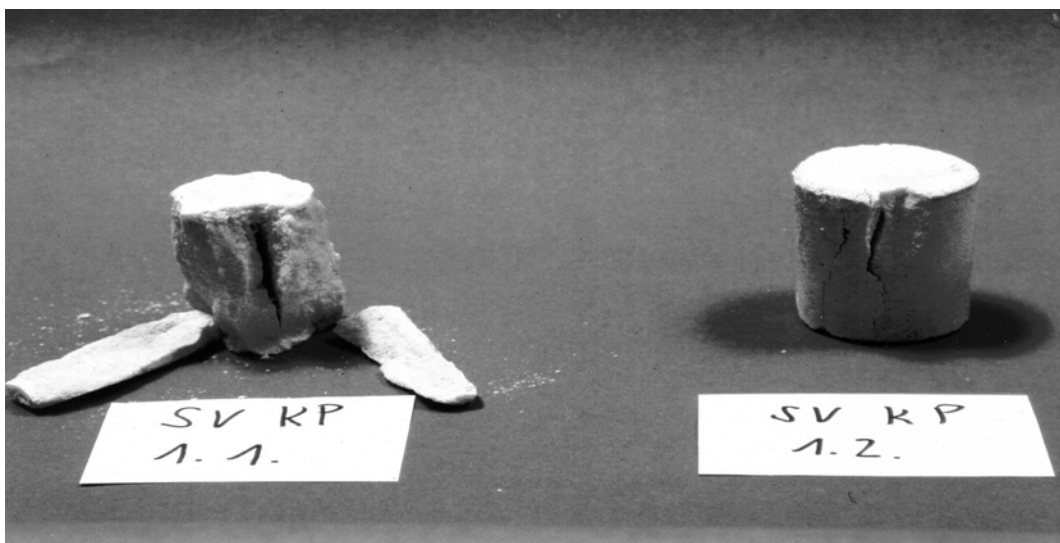


Abb. 7.22: Ausreagierte Probekörper aus dem Versuch SV-KP1.1 und SV-KP1.2 nach einaxialem Druckversuch – mit 13 - 15 KN entsprechen die mechanischen Kennwerte etwa denen von grobkörnigem Steinsalz

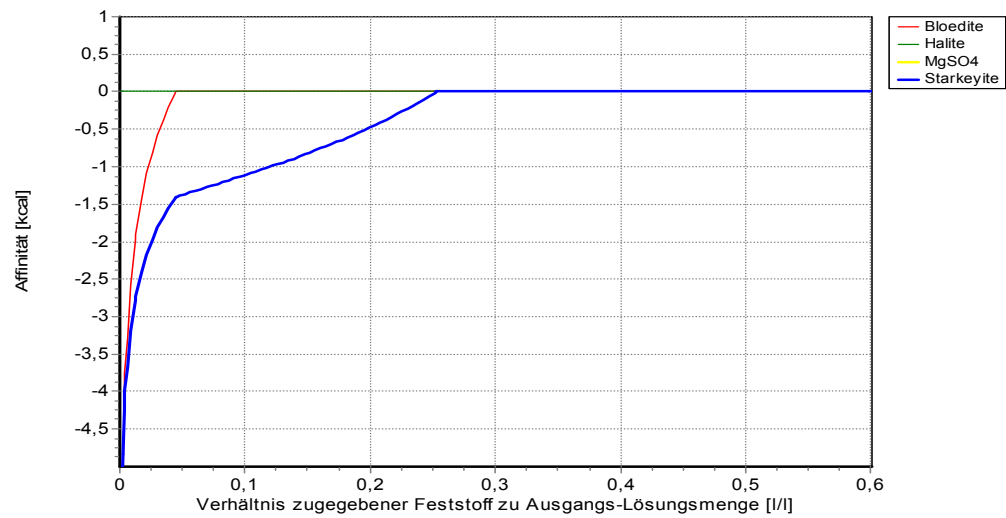
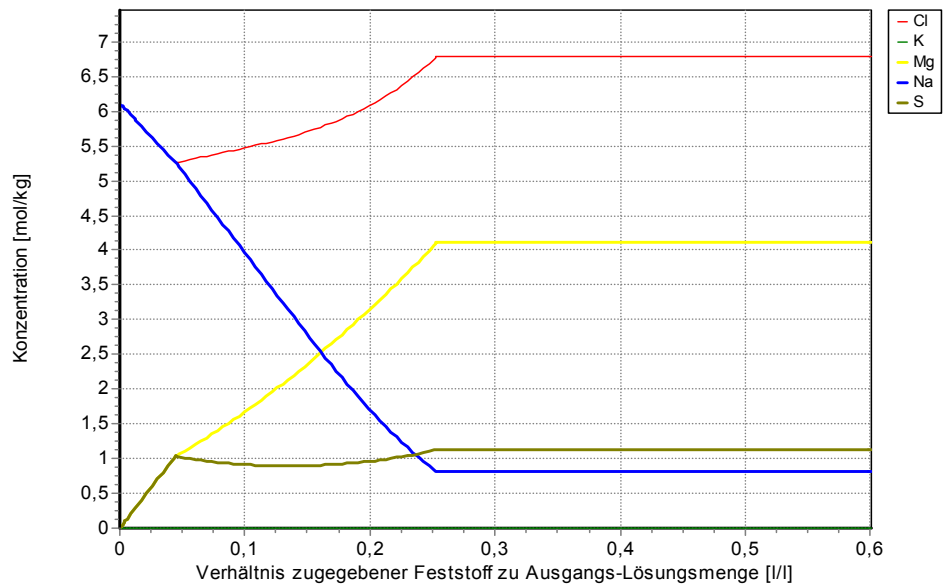


Abb. 8.1a: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit NaCl-Lösung - Lösungsentwicklung (oben), Mineralsättigungen (unten)

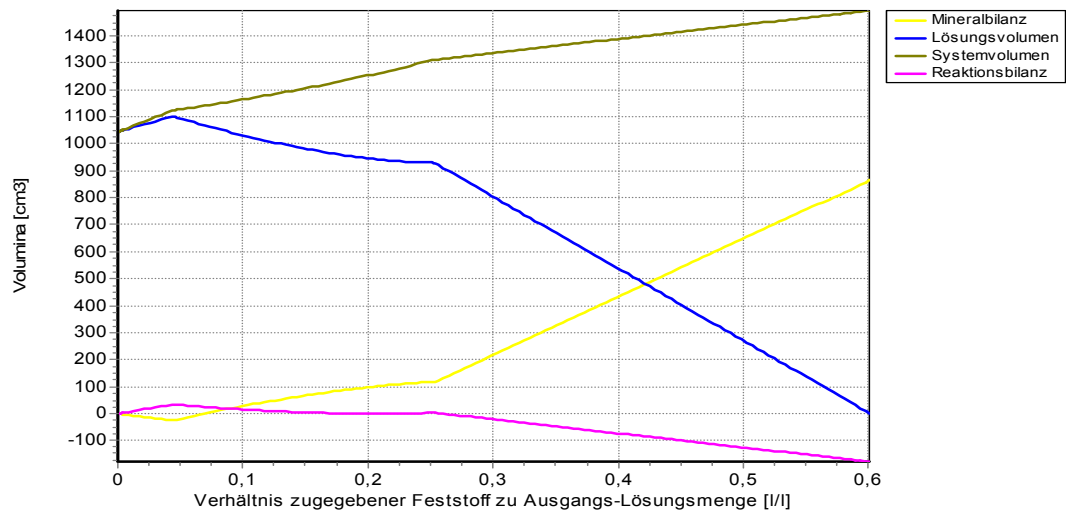
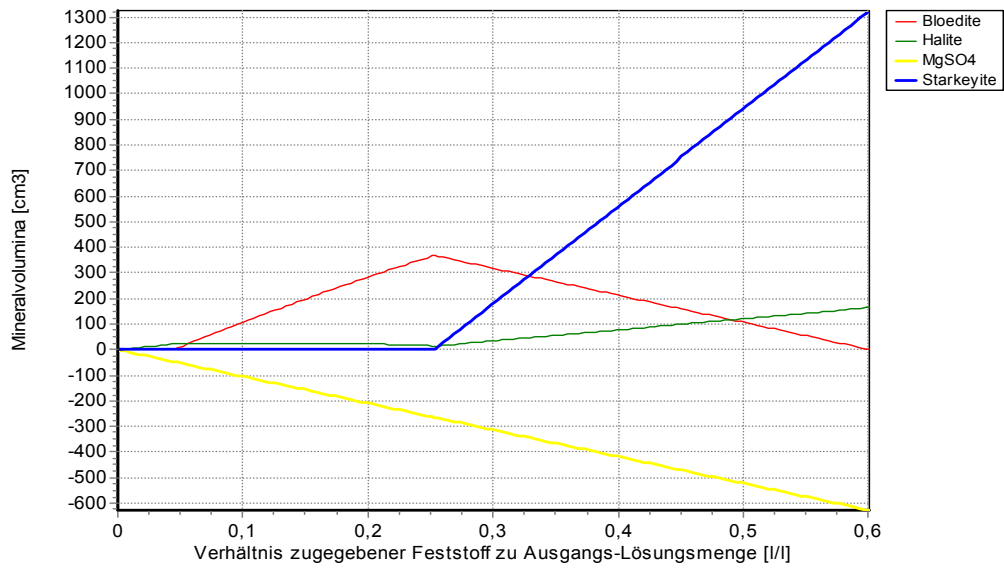


Abb. 8.1b: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit NaCl-Lösung - Mineralvolumina (oben), Volumenbilanzen, Wasserverbrauch (unten)

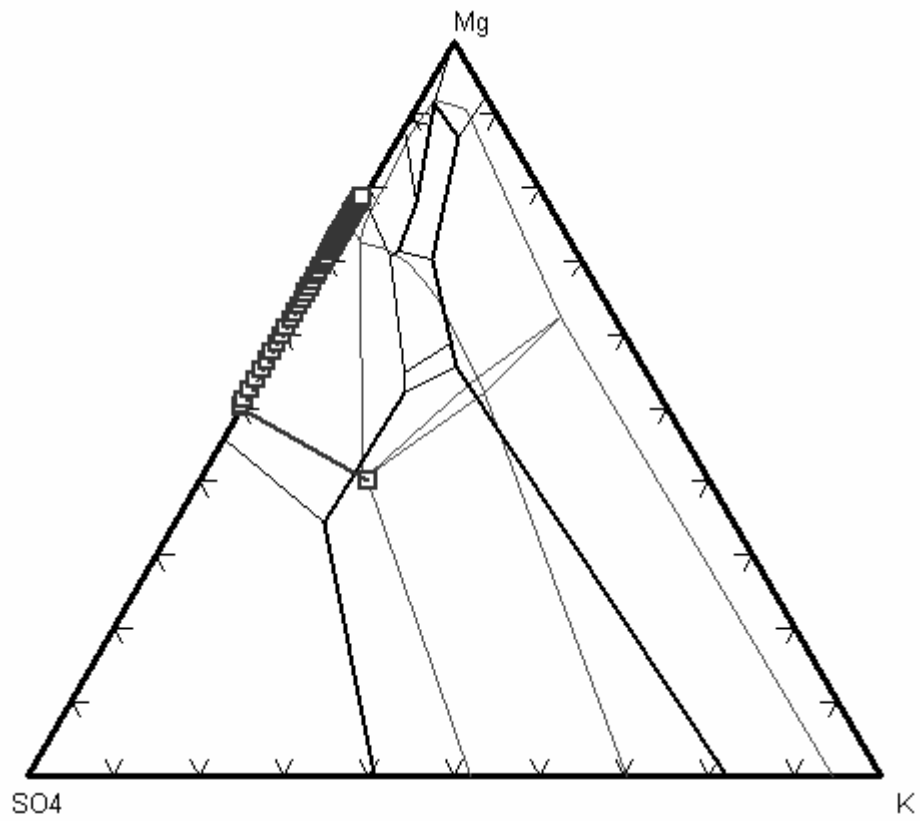


Abb. 8.1c: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit NaCl-Lösung - Reaktionspfad im Mg-SO₄-K₂-Dreieck

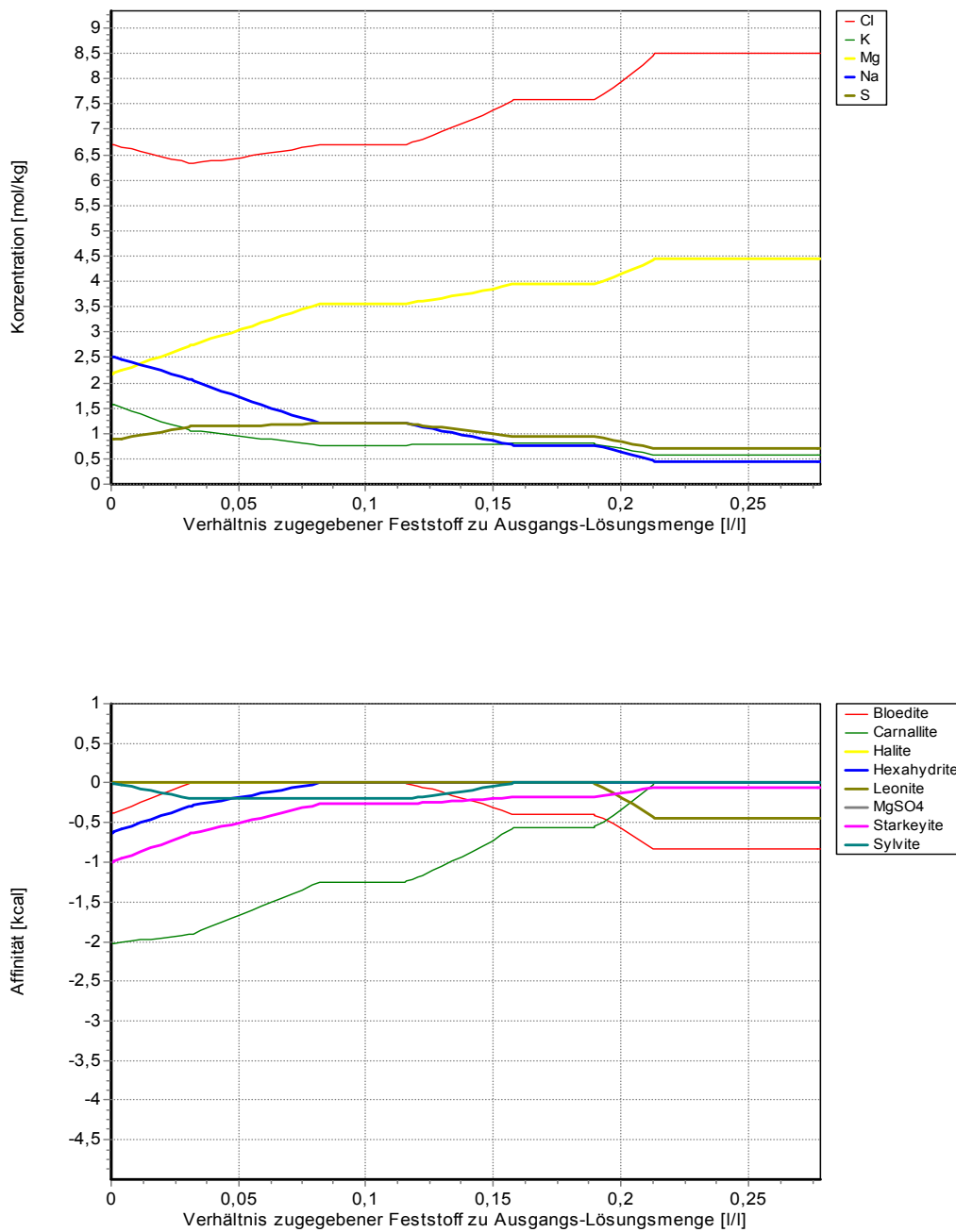


Abb. 8.2a: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit M-Lösung - Lösungsentwicklung (oben), Mineralsättigungen (unten)

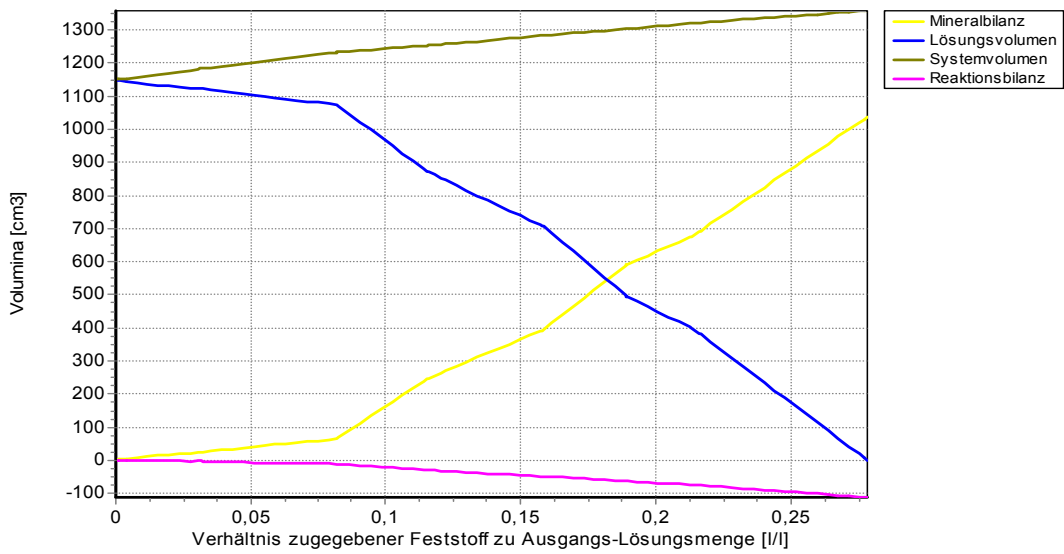
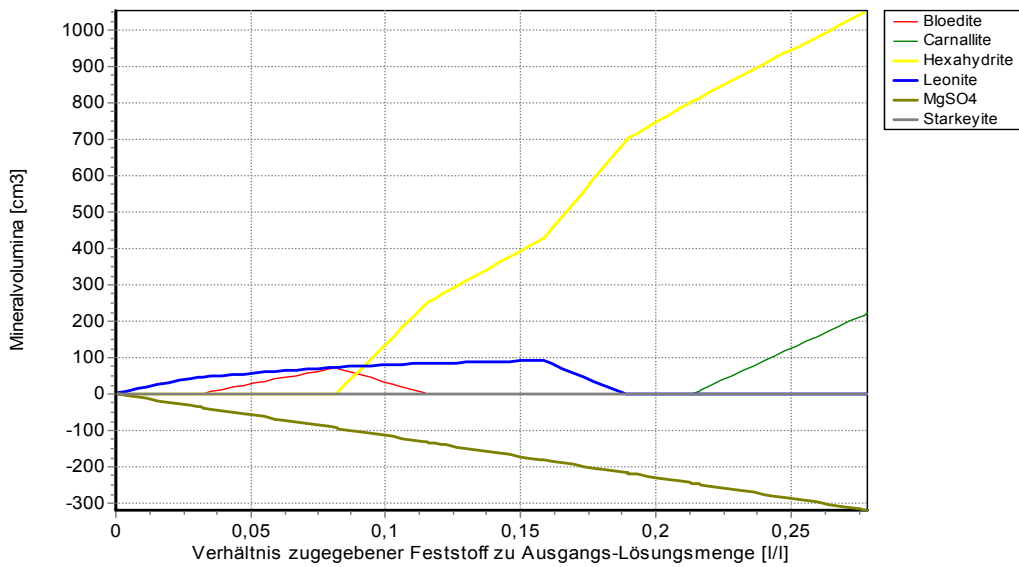


Abb. 8.2b: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit M-Lösung – Mineralvolumina (oben) Volumenbilanzen und Wasserverbrauch (unten)

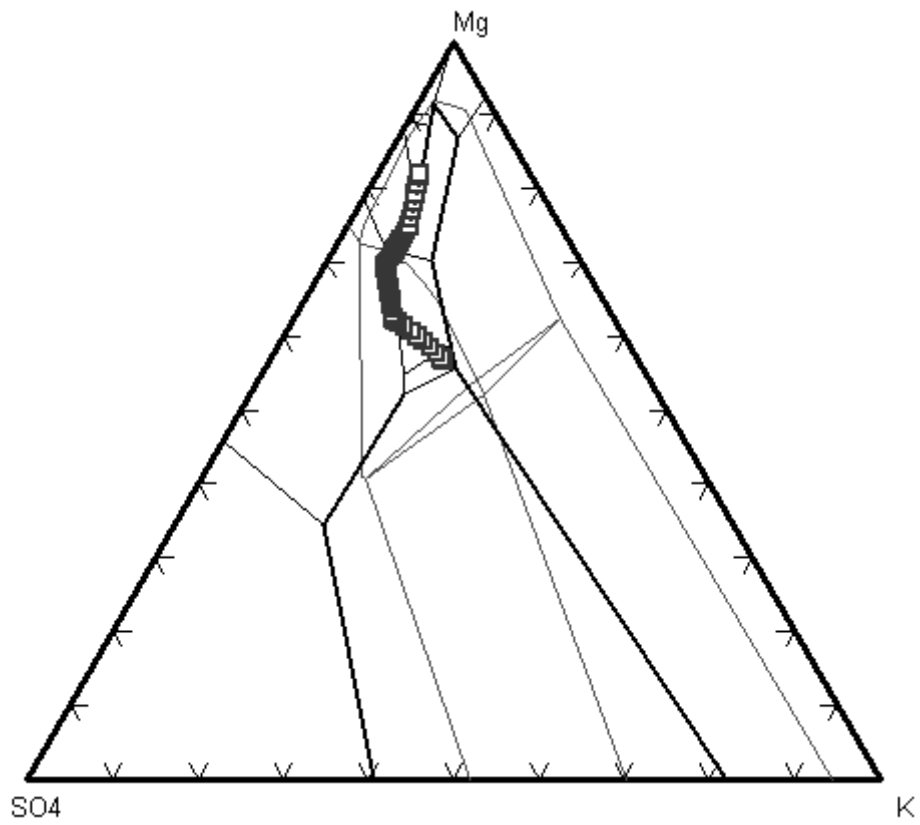


Abb. 8.2c: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit M-Lösung - Reaktionspfad im Mg-SO₄-K₂-Dreieck

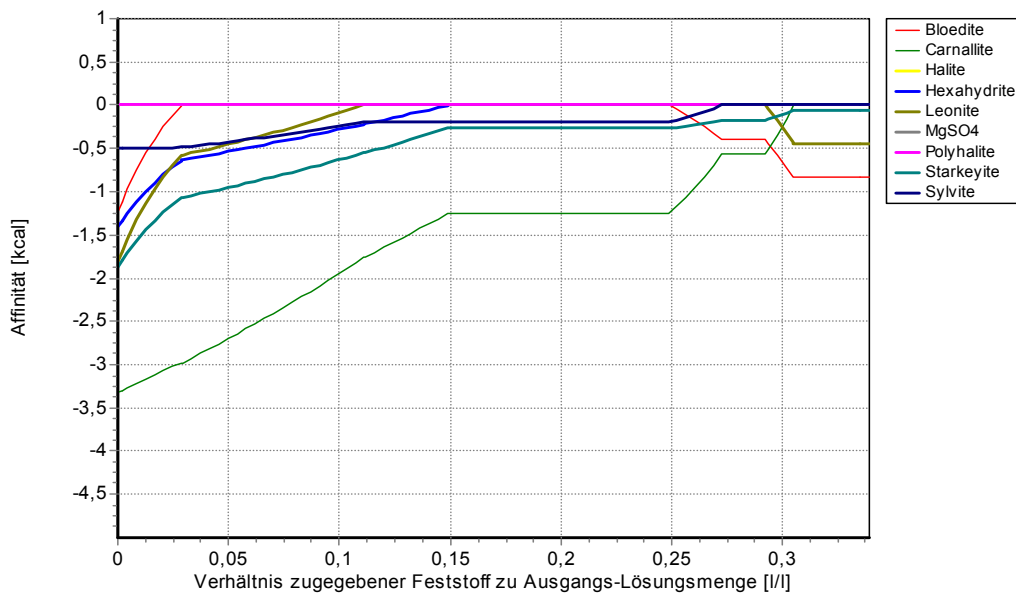
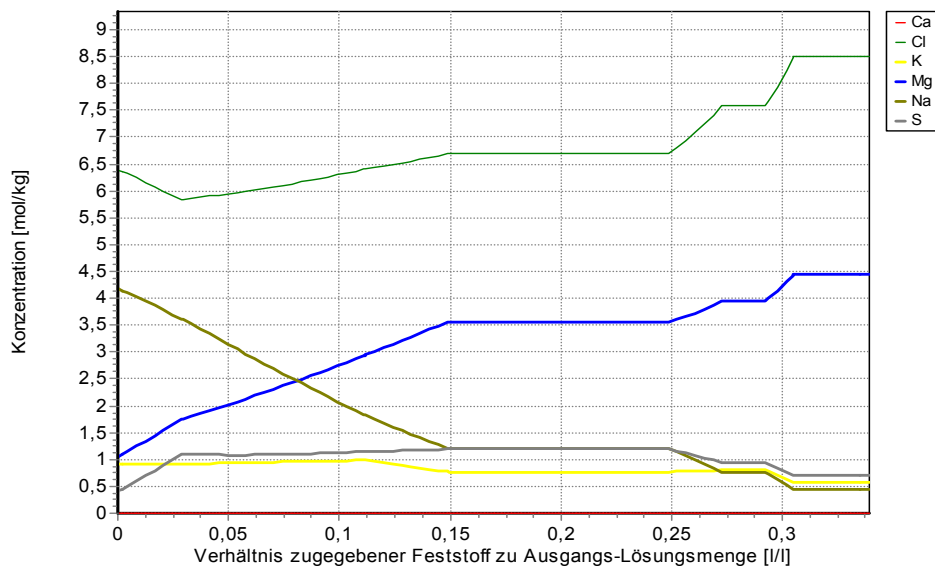


Abb. 8.3a: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit IP9-Lösung - Lösungsentwicklung (oben), Mineralsättigungen (unten)

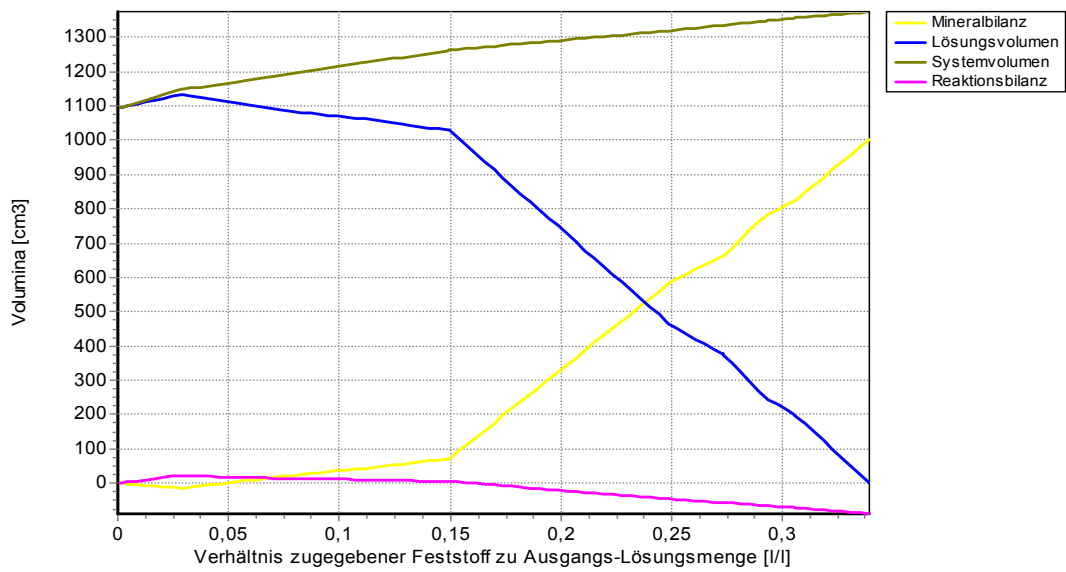
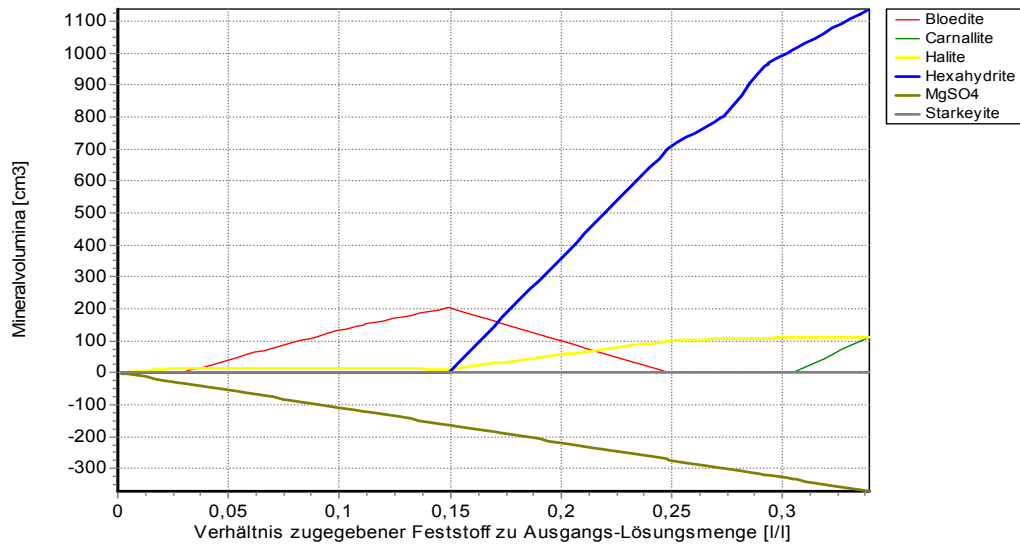


Abb. 8.3b: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit IP9-Lösung – Mineralvolumina (oben) Volumenbilanzen und Wasserverbrauch (unten)

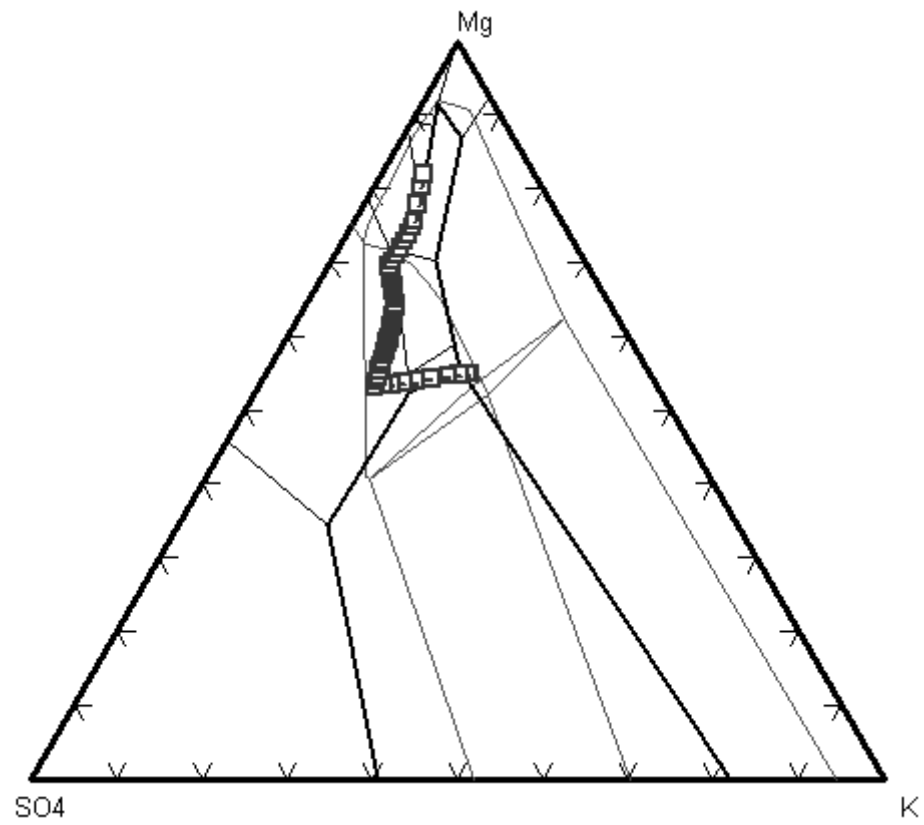


Abb. 8.3c: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit IP9-Lösung - Reaktionspfad im Mg-SO₄-K₂-Dreieck

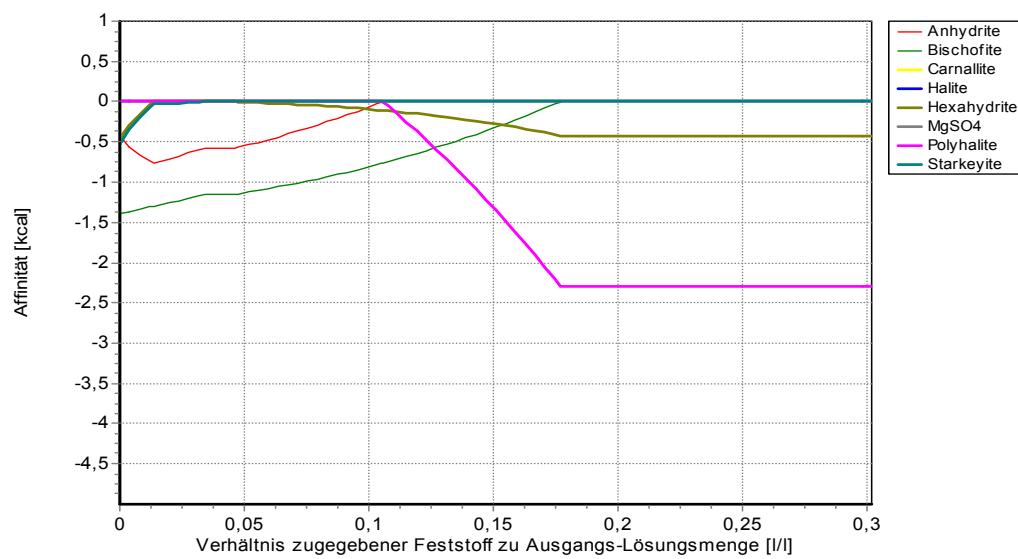
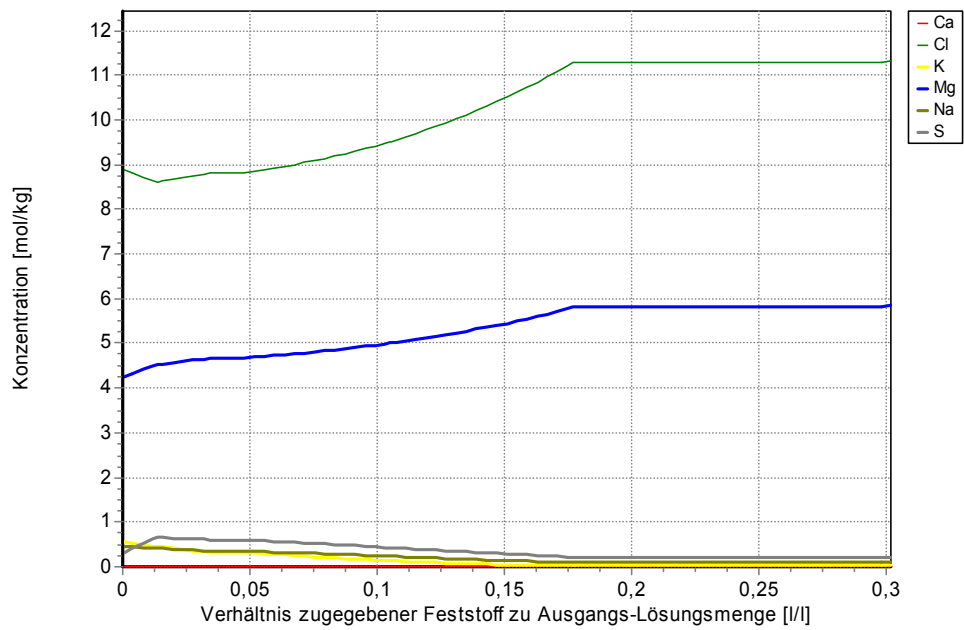


Abb. 8.4a: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit IP21-Lösung - Lösungsentwicklung (oben), Mineralsättigungen (unten)

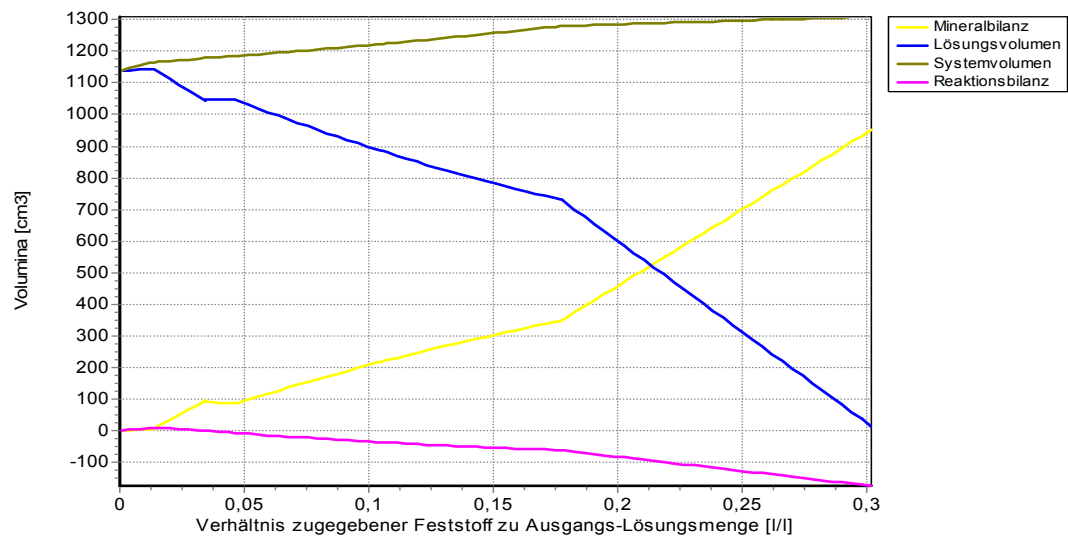
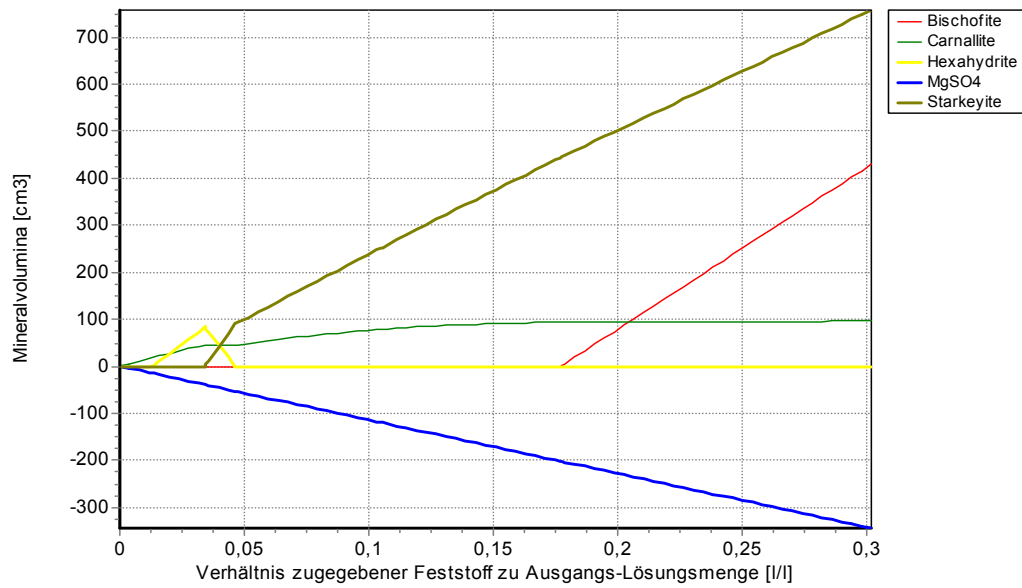


Abb. 8.4b: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit IP21-Lösung - Mineralvolumina (oben), Volumen-bilanzen und Wasserverbrauch (unten)

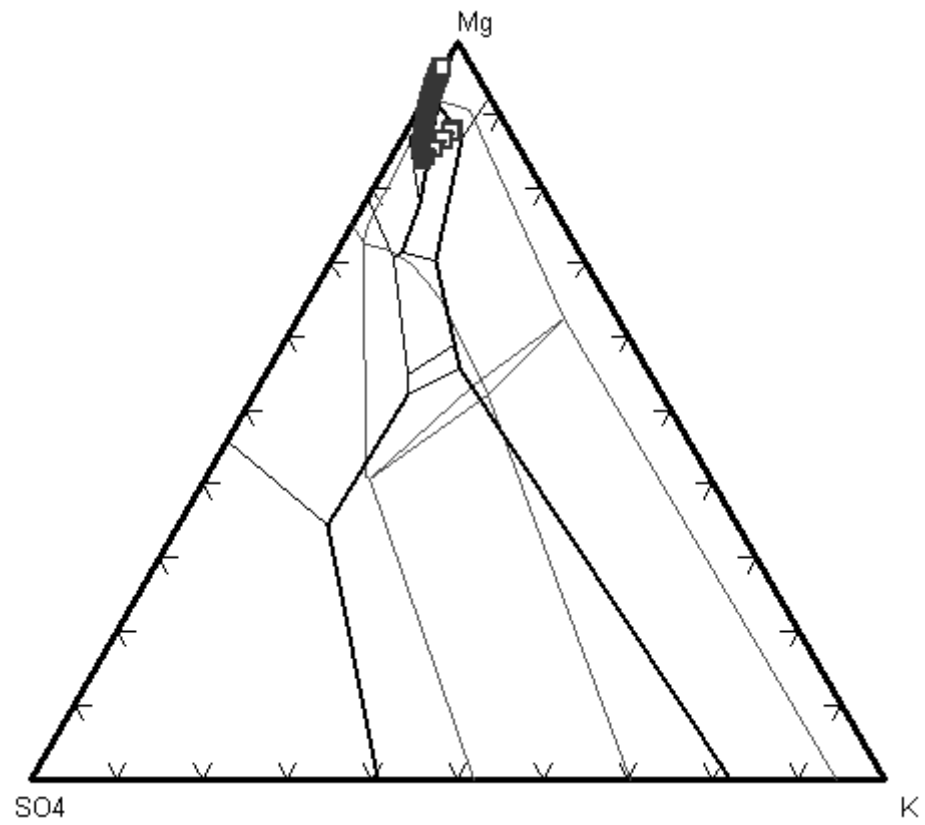


Abb. 8.4c: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit mit IP21-Lösung - Reaktionspfad im Mg-SO₄-K₂-Dreieck

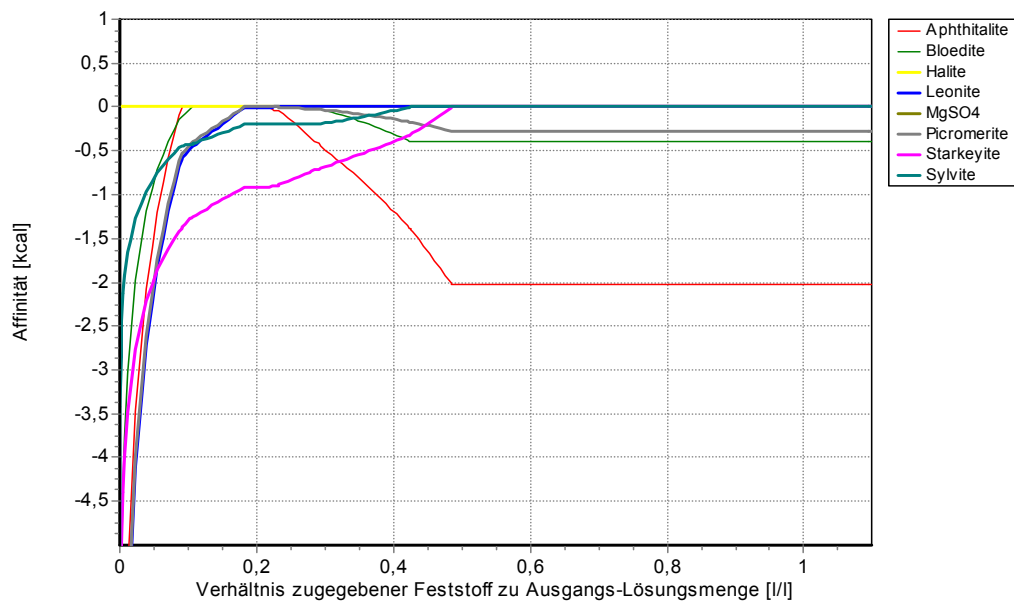
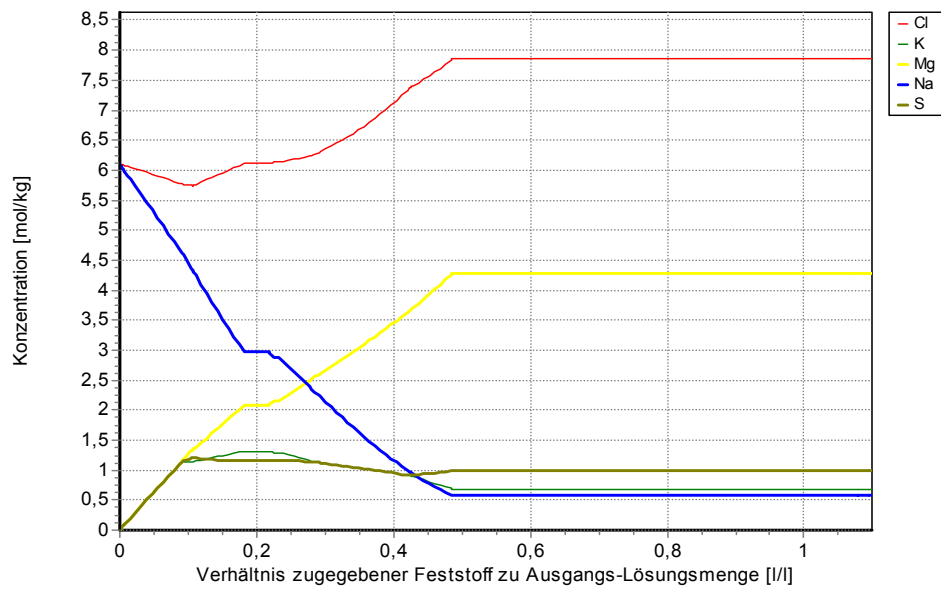


Abb. 8.5a: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvin mit NaCl-Lösung - Lösungsentwicklung (oben), Mineralsättigungen (unten)

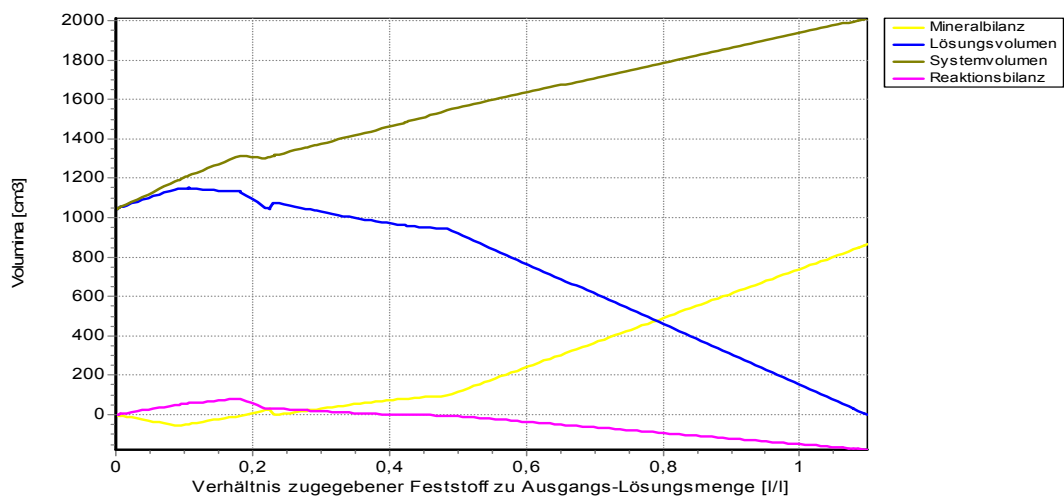
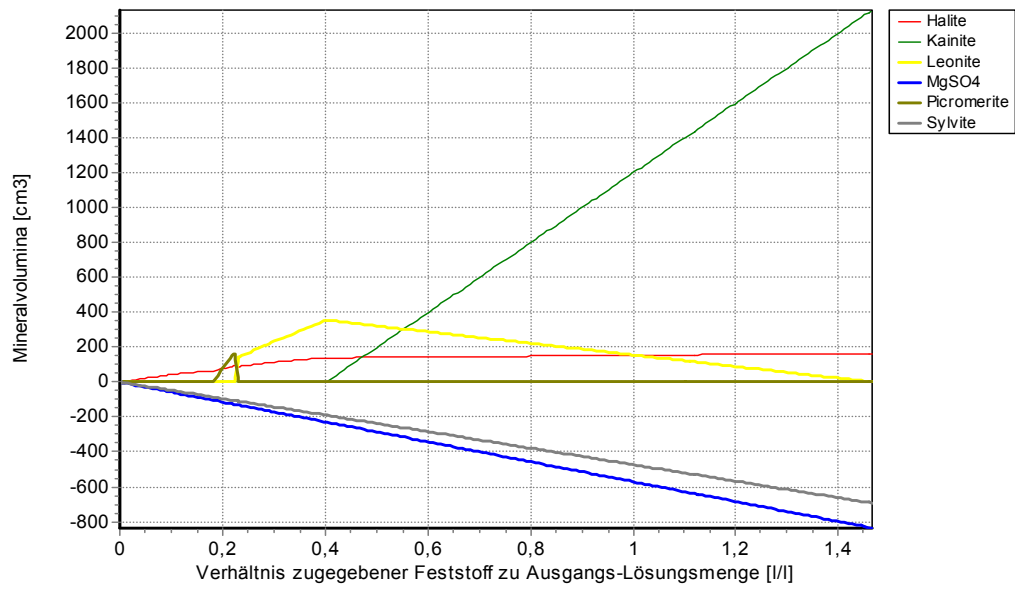


Abb. 8.5b: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvin mit NaCl-Lösung - Mineralvolumina (oben), Volumenbilanzen und Wasserverbrauch(unten)

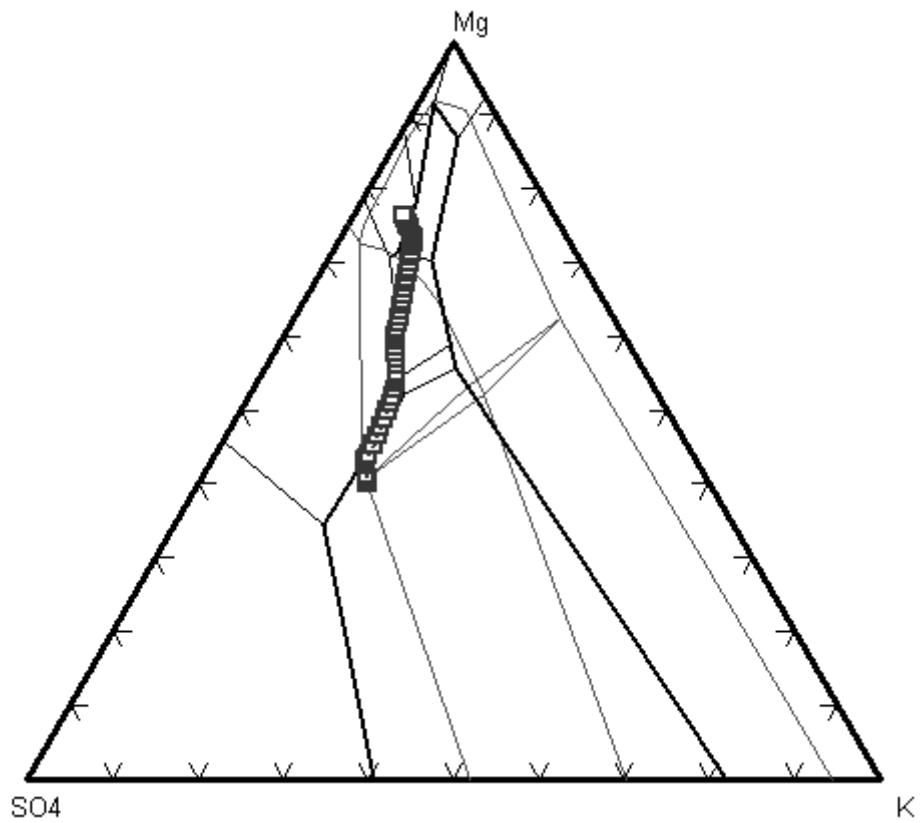


Abb. 8.5c: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von ge-trocknetem Kieserit und Sylvin mit NaCl-Lösung - Reaktionspfad im Mg-SO₄-K₂-Dreieck

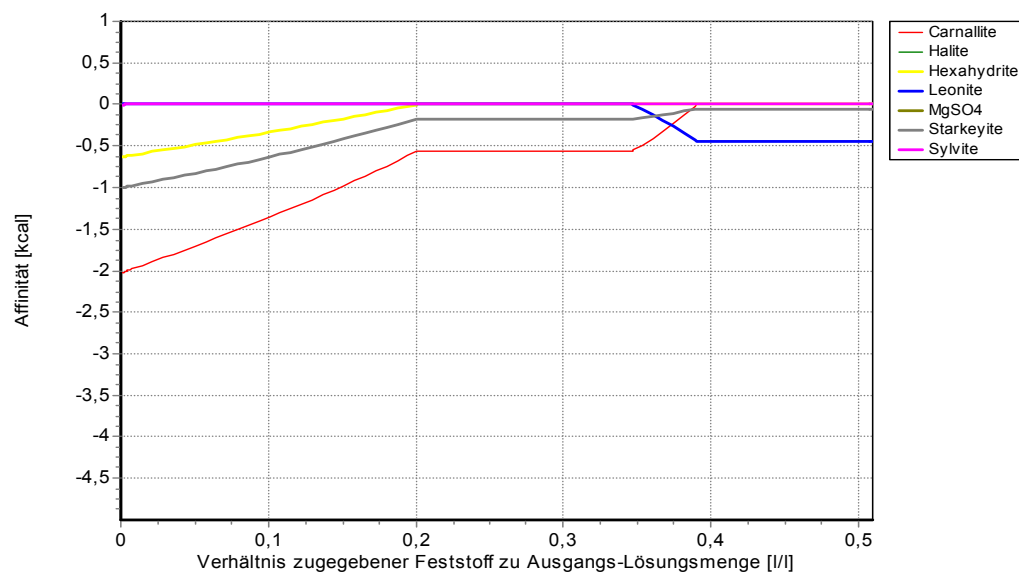
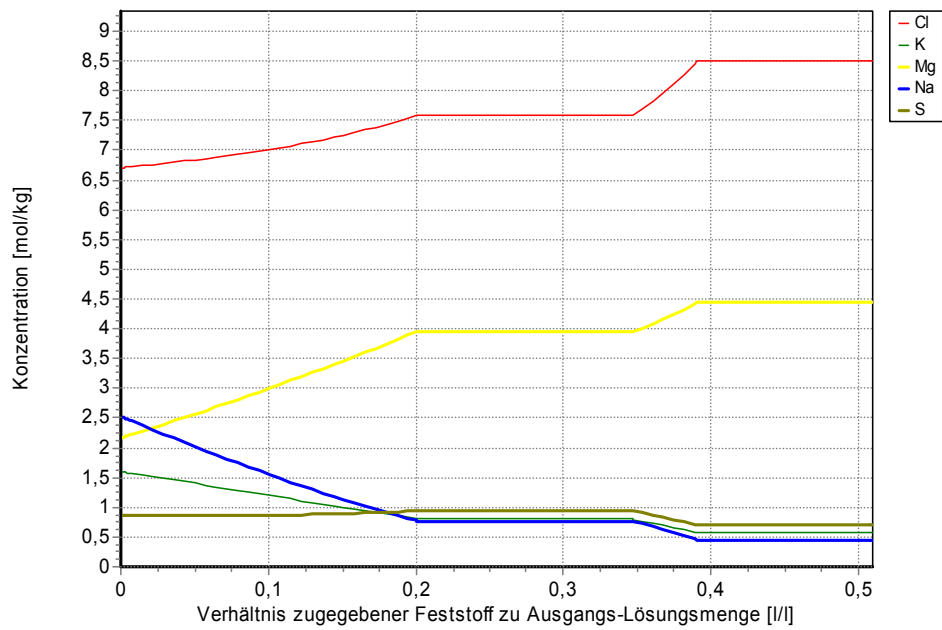


Abb. 8.6a: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvin mit M-Lösung - Lösungsentwicklung (oben), Mineralsättigungen (unten)

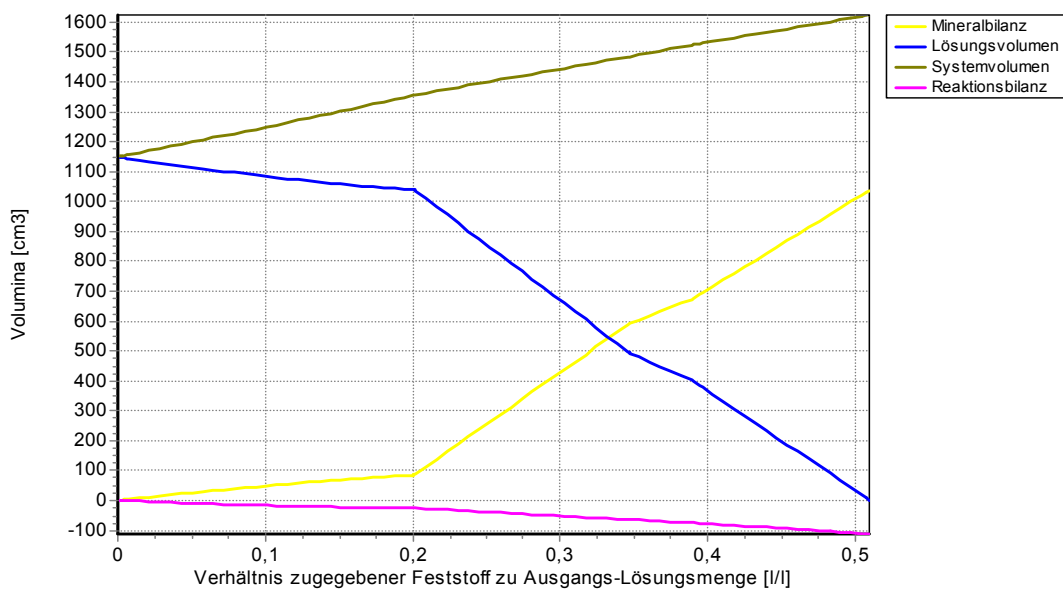


Abb. 8.6b: Geochemische Modellierung der metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvin mit M-Lösung - Mineralvolumina (oben), Volumenbilanzen und Wasserverbrauch (unten)

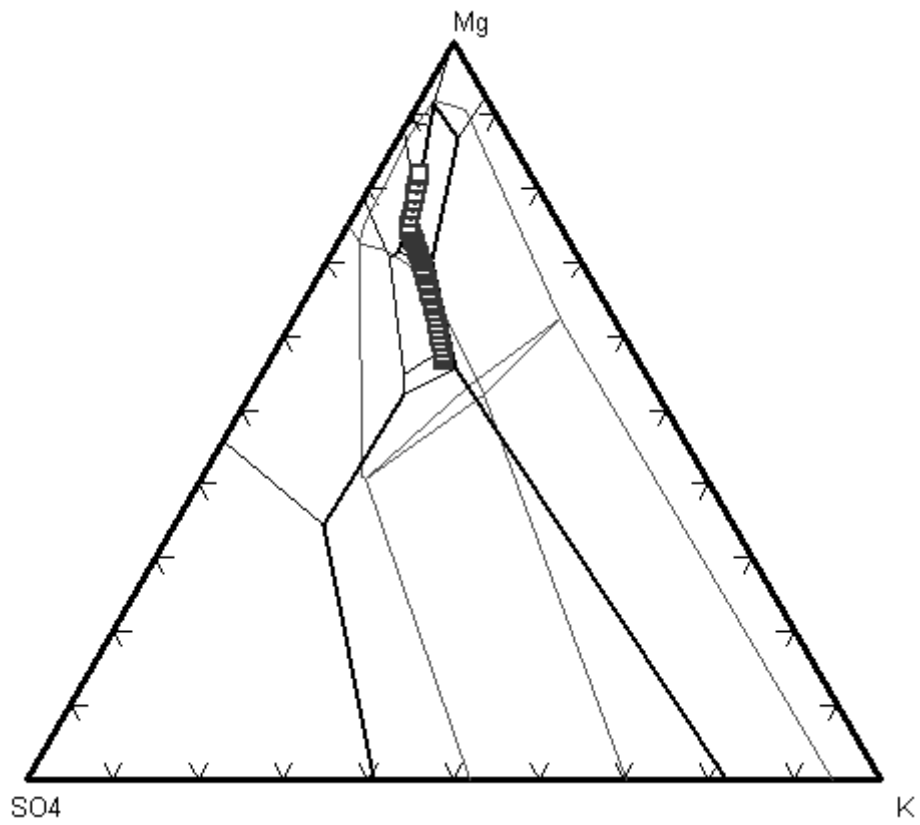


Abb. 8.6c: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvin mit M-Lösung - Reaktionspfad im Mg-SO₄-K₂-Dreieck

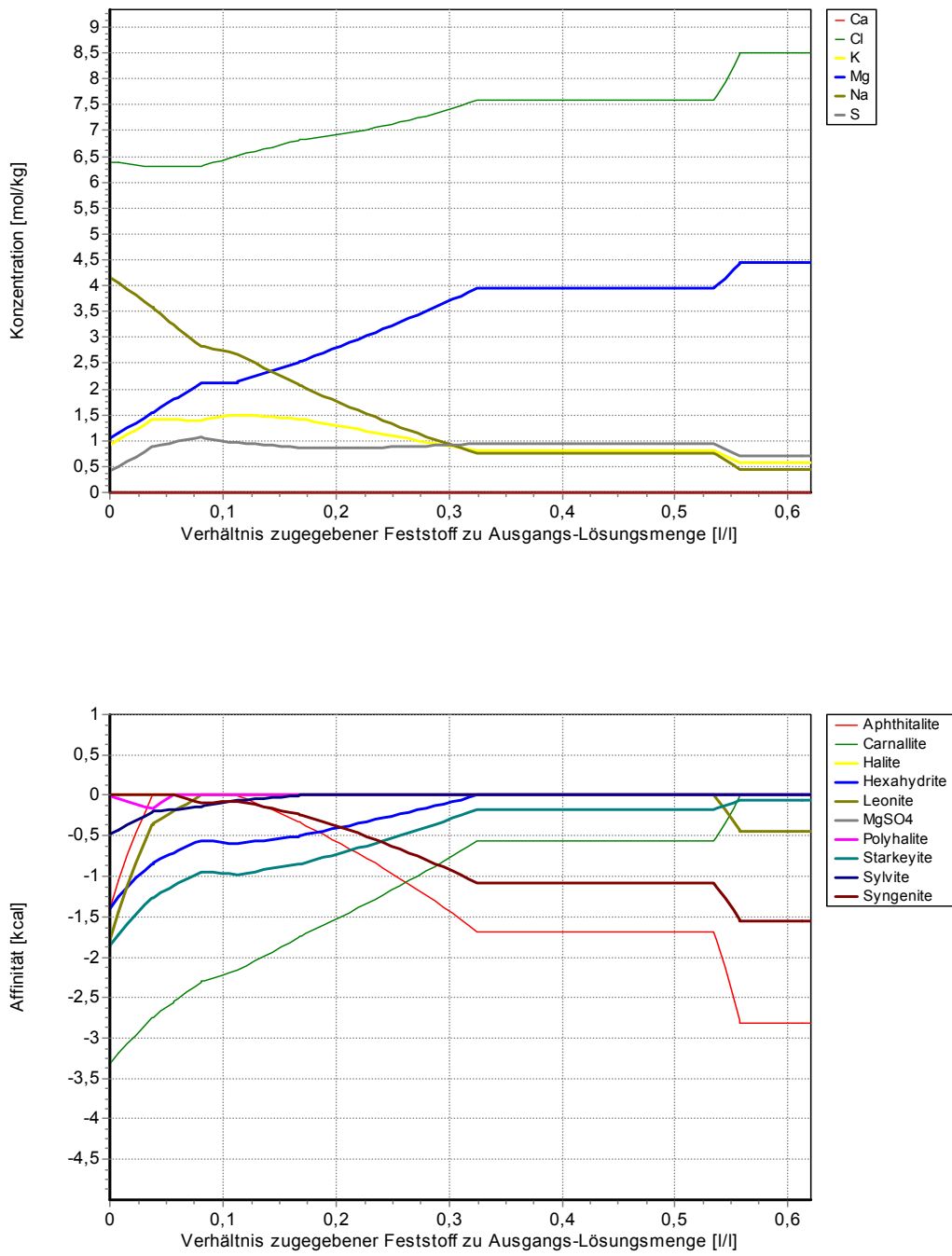


Abb. 8.7a: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvin mit IP9-Lösung - Lösungsentwicklung (oben), Mineralsättigungen (unten)

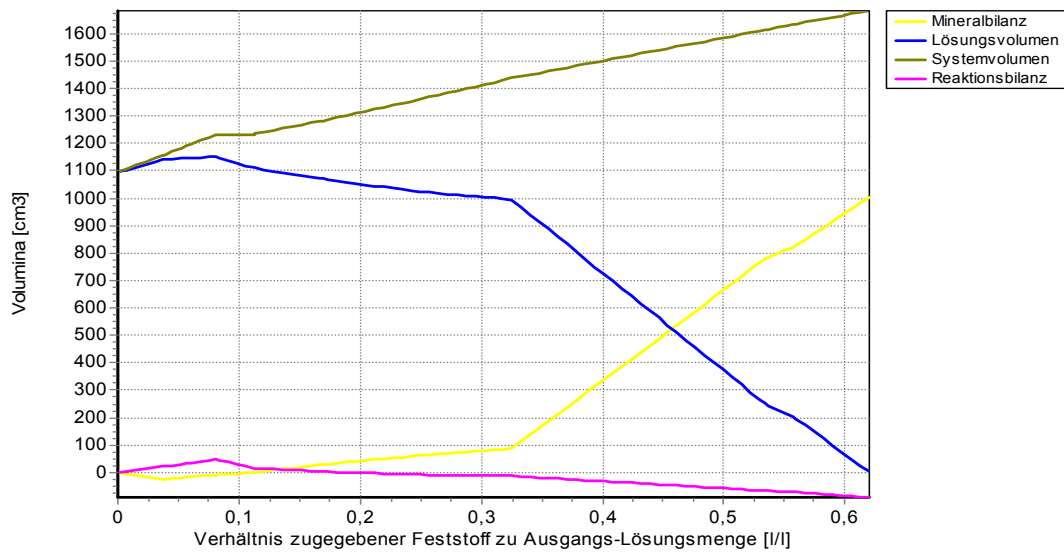
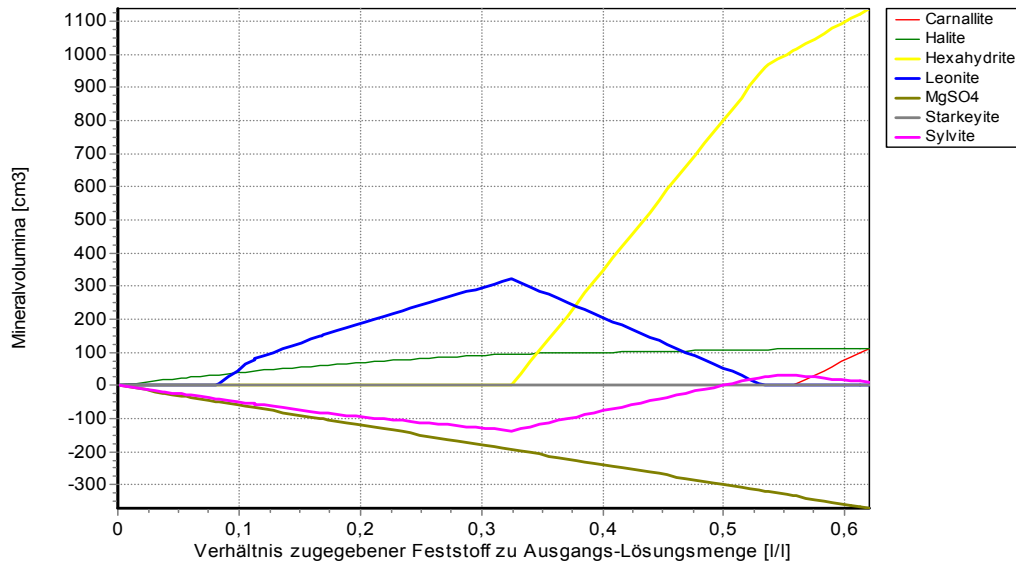


Abb.8.7b: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvin mit IP9-Lösung - Mineralvolumina (oben), Volumenbilanzen und Wasserverbrauch (unten)

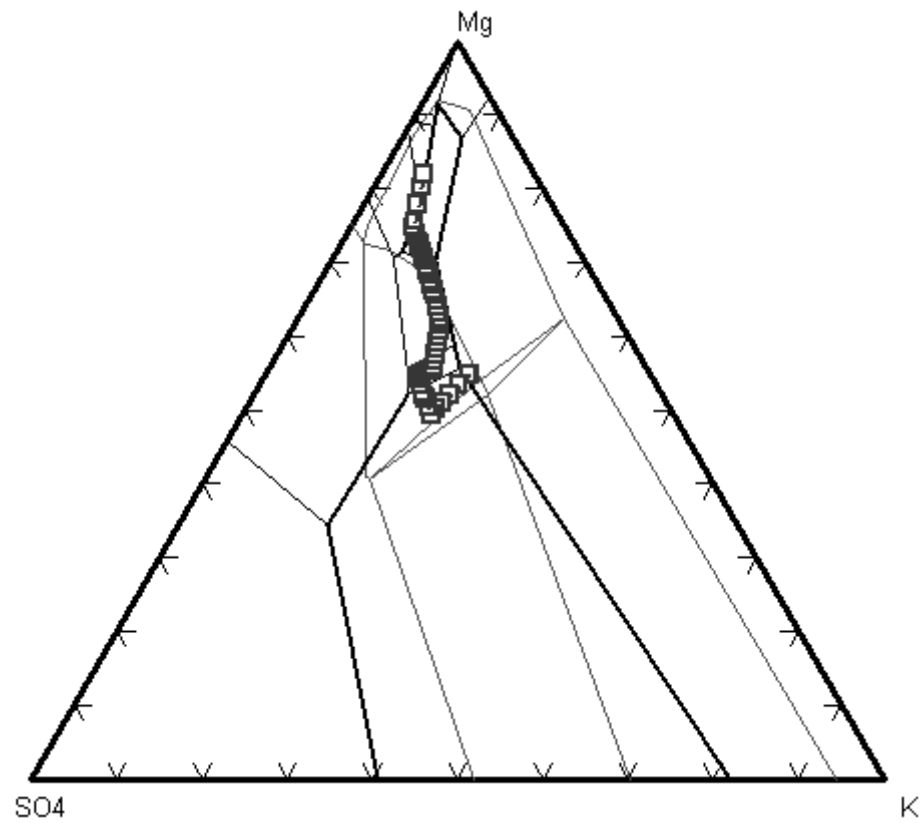


Abb. 8.7c: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvin mit IP9-Lösung - Reaktionspfad im Mg-SO₄-K₂-Dreieck

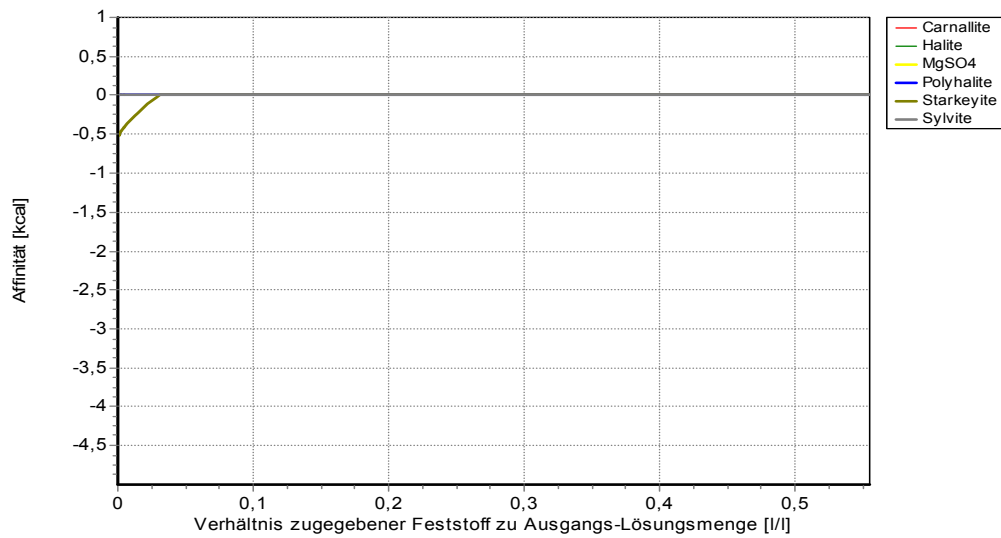
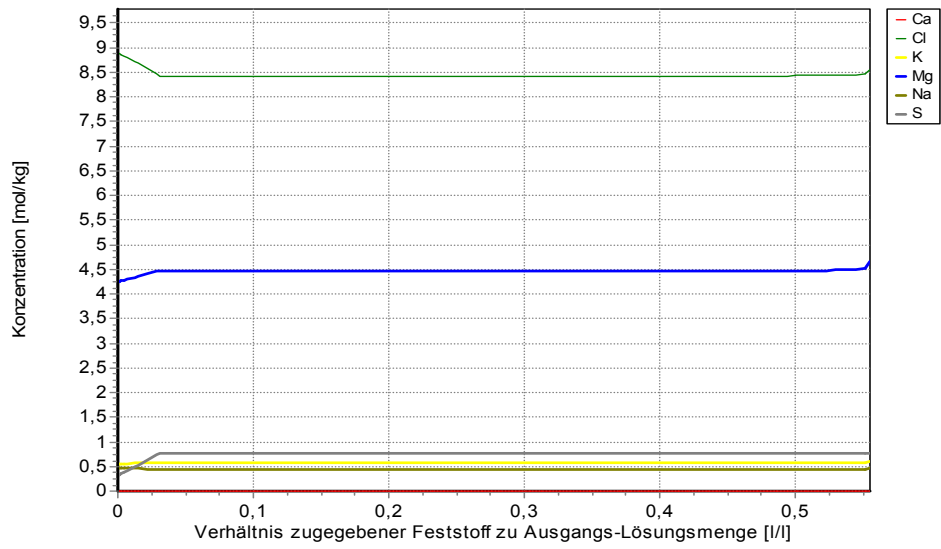


Abb. 8.8a: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvin mit IP21-Lösung - Lösungsentwicklung (oben), Mineralsättigungen (unten)

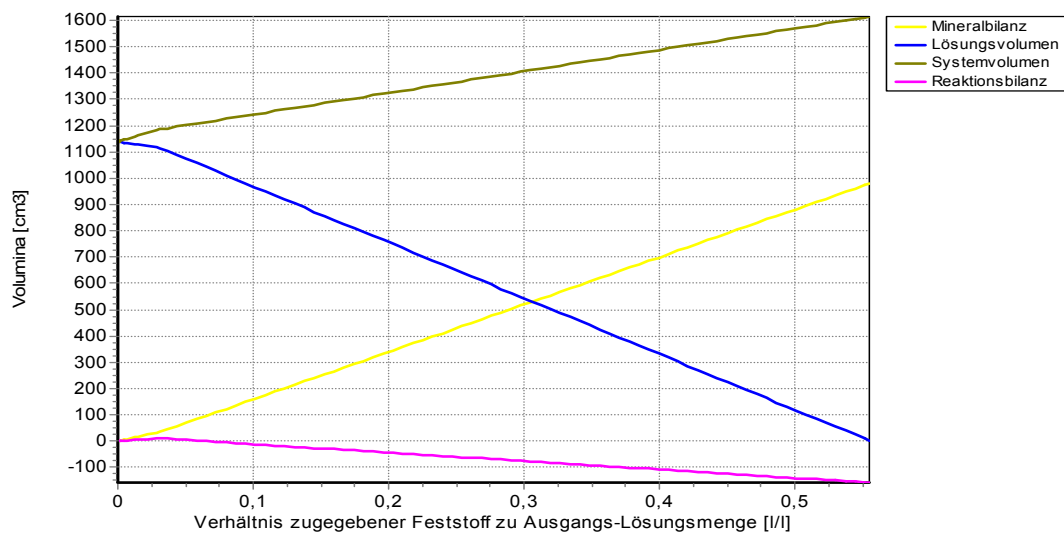
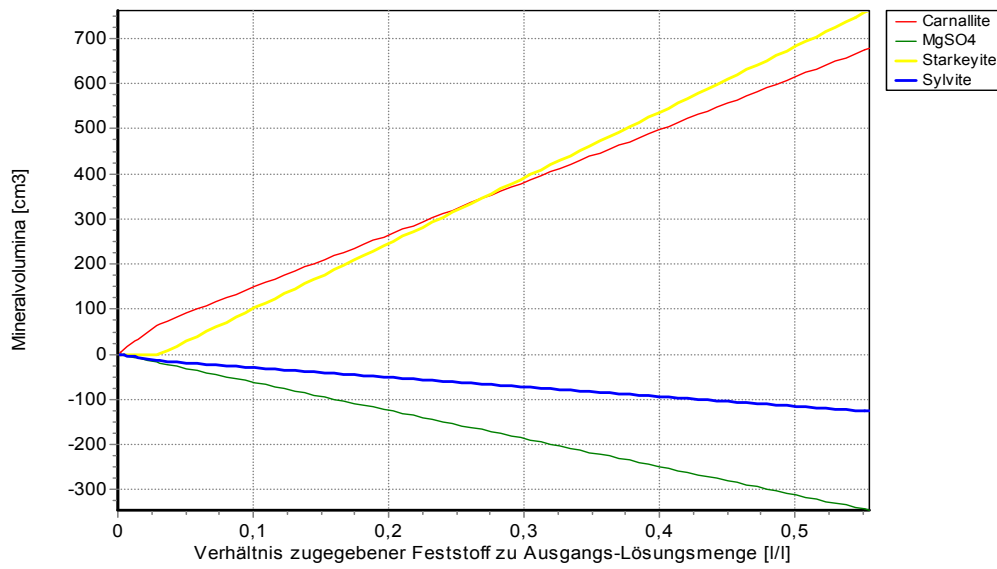


Abb. 8.8b: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvin mit IP21-Lösung - Mineralvolumina (oben), Volumenbilanzen und Wasserverbrauch (unten)

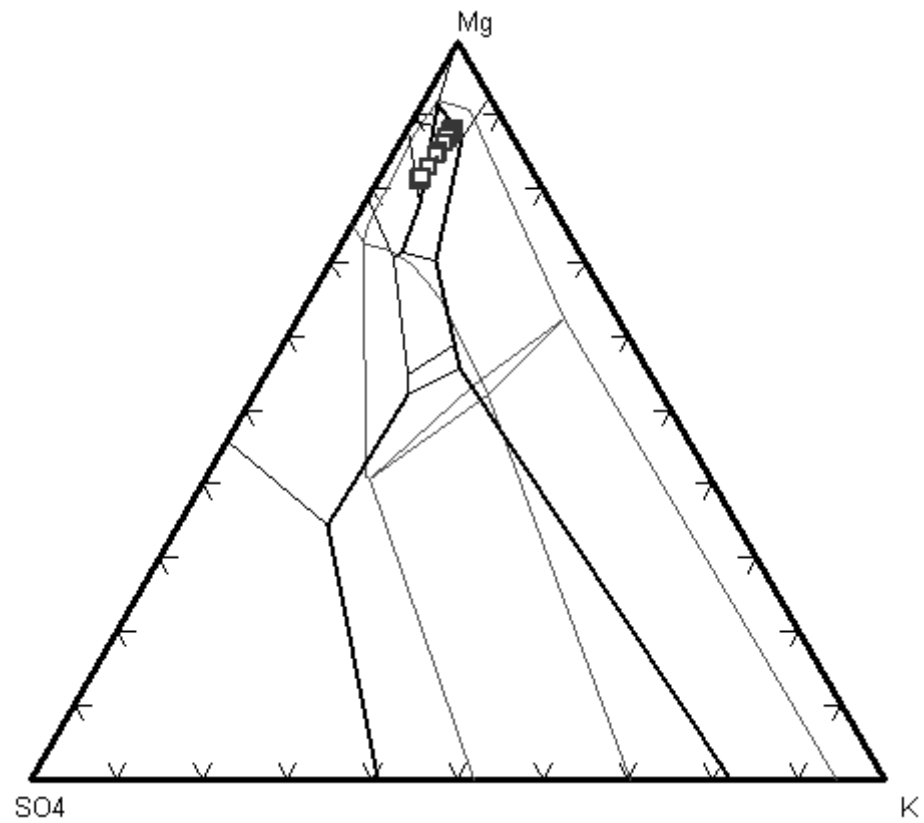


Abb. 8.8c: Geochemische Modellierung des metastabilen Reaktionsverlaufes von getrocknetem Kieserit und Sylvit mit IP21-Lösung - Reaktionspfad im Mg-SO₄-K₂-Dreieck

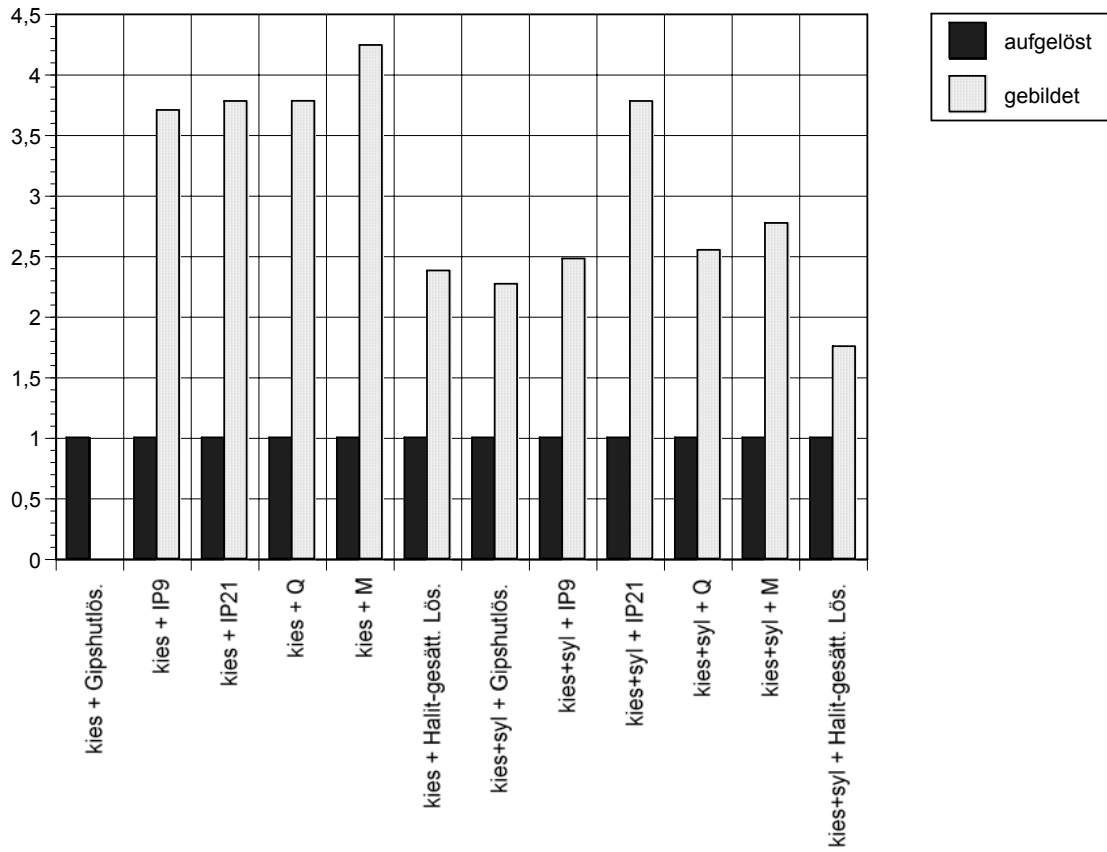


Abb. 8.9: Volumenbilanzen der modellierten Reaktionen am Ende des metastabilen Reaktionspfades bezogen auf 1 l Ausgangsmineralvolumen

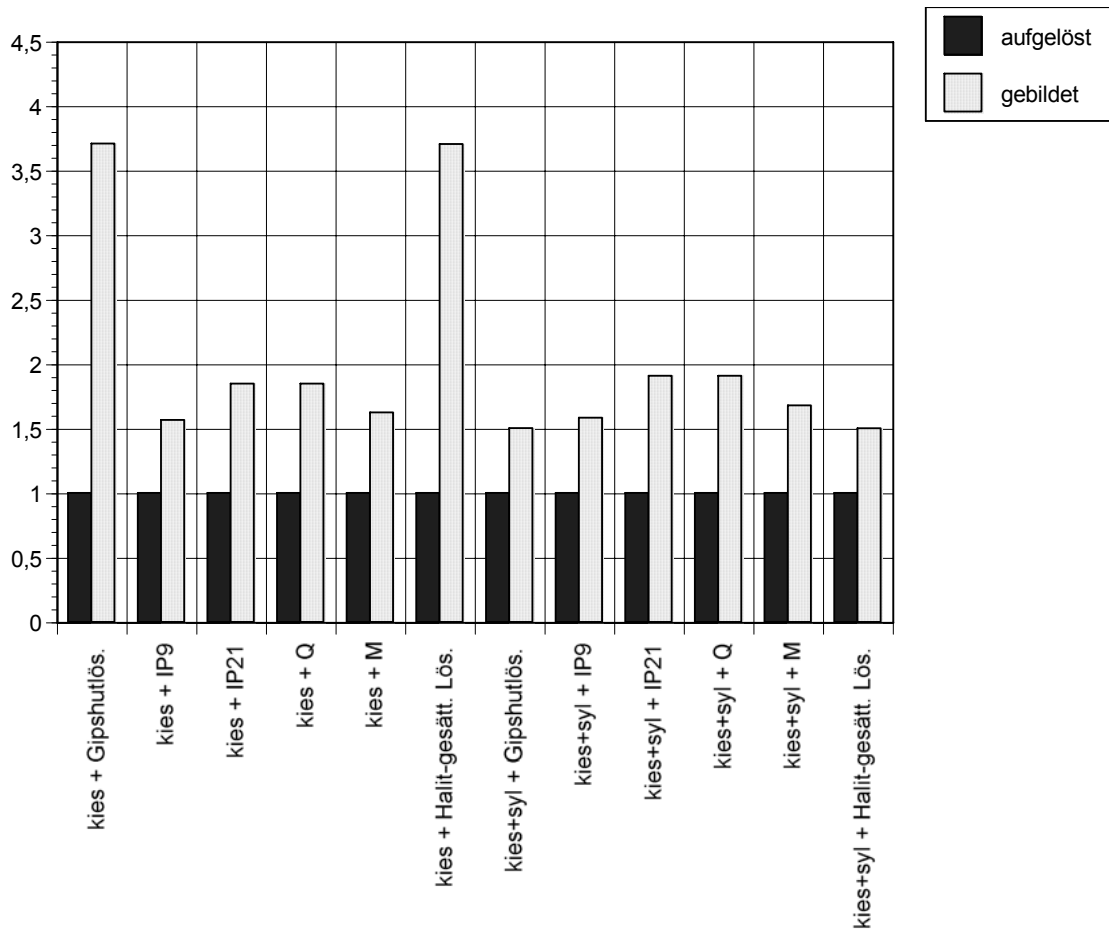


Abb. 8.10: Volumenbilanzen der modellierten Reaktionen am Ende des stabilen Reaktionspfades bezogen auf 1 l Ausgangsmineralvolumen

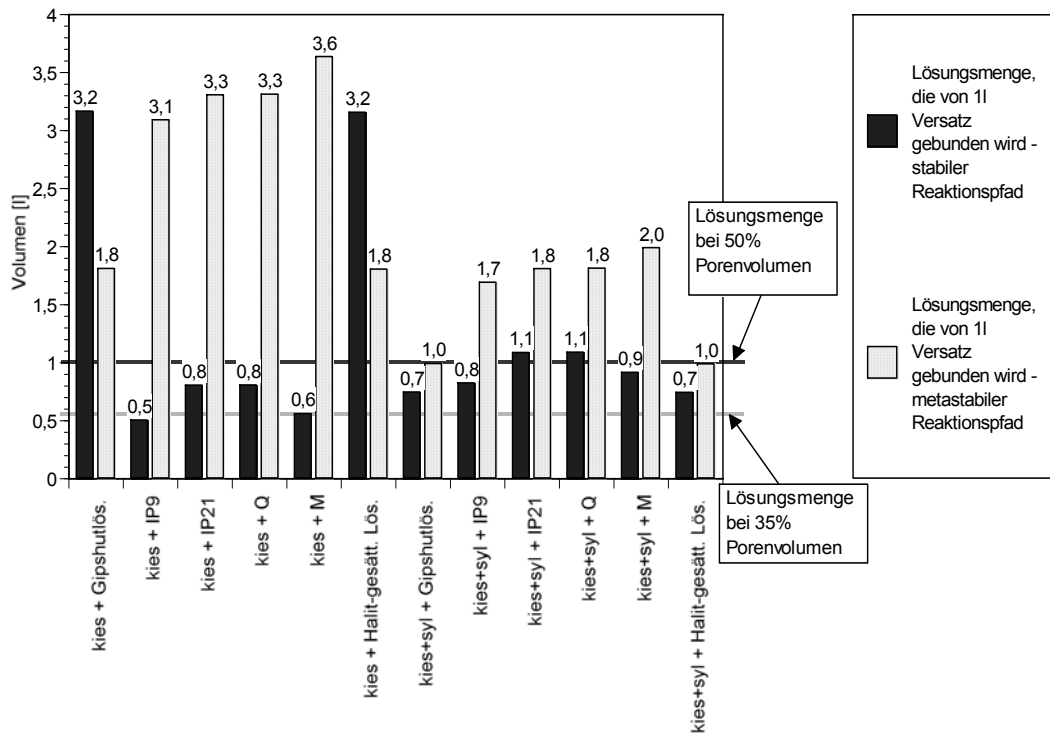


Abb. 8.11: Darstellung der an der Reaktion beteiligten Lösungsmenge bei 50 % und 35 % Versatzporenvolumen und der Lösungsmengen, die in den Reaktionen auf dem stabilen und metastabilen Reaktionspfad von 1 l Versatz gebunden werden können

Tab. 0.1: Zusammensetzung der in den Versuchen und in der geochemischen Modellierung eingesetzten Lösungen

	IP9-Lsg.	IP21-Lsg.	Q-Lsg.	M-Lsg.	Gipshut-lösung
Gleichgewicht zu Bodenkörpern:	Halit, Glauberit, Syngenit, Polyhalit	Halit, Kainit, Carnallit, Sylvin, Polyhalit	Halit, Kainit, Carnallit, Sylvin	Halit, Glaserit, Schönit, Sylvin	Halit, Anhydrit
Wasseraktivität	0,7189	0,5174	0,4174	0,6717	0,745
Dichte [g/cm ³]	1,241	1,295	1,292	1,285	1,20
Temperatur [°C]	25	25	25	25	25
Na [in mol/kg H ₂ O]	3,37	0,46	0,46	2,69	6,12
K [in mol/kg H ₂ O]	0,74	0,64	0,64	1,58	0,0
Ca [in mol/kg H ₂ O]	0,0048	0,0063	0,0	0,0	0,04
Mg [in mol/kg H ₂ O]	0,84	4,07	4,07	1,97	0,0
Cl [in mol/kg H ₂ O]	5,15	8,68	8,68	6,65	6,12
SO ₄ [in mol/kg H ₂ O]	0,32	0,28	0,28	0,78	0,04

Tab. 0.2: Zusammensetzung der eingesetzten Feststoffe (Salze)

Feststoff	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	Bemerkung
	% [m/m]	% [m/m]	% [m/m]	% [m/m]	% [m/m]	% [m/m]	
MgSO ₄ , wasserfrei	---	---	---	20,2	---	79,8	Merck, zur Analyse
Kieserit, wasserfrei	2,1	1,8	0,3	18,2	5,0	72,6	Kieserit, calciniert
Hartsalz Morsleben	25,9	1,8	1,3	5,4	47,5	19,3	entwässert bei 300 °C
Na ₂ SO ₄	32,4	---	---	---	---	67,6	Merck, zur Analyse
K ₂ SO ₄	44,9	--	---	---	---	55,1	Merck, zur Analyse
KCl	---	52,4	---	---	47,6	---	Merck, zur Analyse
CaCl ₂	---	---	36,1	---	63,9	---	Merck, wasserfrei gepulvert
CA 26	1,6	2,5	25,8	0,6	23,5	7,2	Reaktionsprodukte aus der Abgasreinig. u. Verbrennung
CA 34	1,1	0,1	34,1	0,1	60,5	---	Calciumchloridabfall
CA 157	1	---	18,7	---	---	2,5	Filterstaub aus Braunkohlenkraftwerk
CA 303	10,	1,5	6,4	1,5	0,1	1,3	Rest = Metalloxide + Silikate; Filterstäube aus Sonder- abfallverbrennungsanlage
CA 105					.		Entschweflungsschlacke
CA 301	23,5	4,3	0,83	0,15	25,2	27,8	Reaktionsprodukte aus Abgasreinigung von Sondermüllverbrennung
CA 104							Halden-Schlacke

Tab.0.3: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, wasserfrei mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff	Überste- hende Lösung
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]	[g]
1	MgSO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	2,035	--	2,035	1,249	0,61	0	100	613,8	
2	MgSO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	1,8549	--	1,8549	1,2519	0,67	0	100	674,9	
3	MgSO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	n.a.	--	n.a.	n.a.		n.a.			
4	MgSO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	2,0304	--	2,0304	3,0353	1,49	1,3313	56	1494,9	
5	MgSO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	1,9532	--	1,9532	3,1177	1,60	1,5607	50	1596,2	
6	MgSO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	n.a.	--	n.a.	n.a.		n.a.			
7	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	0	1,3142	1,3142	2,6284	1,2497	0,48	0	100	475,5	
8	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	0	1,25735	1,25735	2,5147	1,2449	0,50	0,0385	97	495,0	
9	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	0	1,35025	1,35025	2,7005	3,0079	1,11	2,3837	21	1113,8	
10	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	0	1,34965	1,34965	2,6993	3,0811	1,14	1,4838	52	1141,4	0,3128
11	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	0	1,2635	1,2635	2,527	1,2404	0,49	0	100	490,9	
12	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	0	1,28315	1,28315	2,5663	1,244	0,48	0,0145	99	484,7	
13	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	0	1,35315	1,35315	2,7063	3,0746	1,14	2,4532	20	1136,1	
14	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	0	1,2705	1,2705	2,541	3,1011	1,22	0,2178	93	1220,4	0,6449
15	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	60	1,2781	1,2781	2,5562	1,2618	0,49	0	100	493,6	
16	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	60	1,2290	1,2290	2,458	1,2445	0,51	0	100	506,3	
17	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	60	1,3506	1,3506	2,7012	3,0959	1,15	2,1928	29	1146,1	
18	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	60	1,42365	1,42365	2,8473	3,0267	1,06	2,2111	27	1063,0	

Forts. Tab. 0.3: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, wasserfrei mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt												
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]	
1	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Pentahydrat								304754	20460	284294
2	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Pentahydrat	Hexahydrat							353271	22220	331051
3	MgSO ₄	Halit												
4	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Pentahydrat								324661	16880	307781
5	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Pentahydrat								261153	16630	244523
6	MgSO ₄													
7	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Pentahydrat								161799	8340	153459
8	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Pentahydrat								129037	10240	118797
9	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Pentahydrat								141050	16860	124190
10	MgSO ₄	Halit	Hexahydrat									296474	96530	199944
11	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Pentahydrat								109922	8000	101922
12	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Pentahydrat								159485	7800	151685
13	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Pentahydrat								22264	5380	16884
14	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Pentahydrat								271859	98940	172919
15	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Pentahydrat								215151	27400	187751
16	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Pentahydrat								171658	10020	161638
17	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Pentahydrat								83951	6330	77621
18	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Pentahydrat								57373	4810	52563

Forts. Tab. 0.3: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, wasserfrei mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
1														
2														
3														
4	53629	45940	81350	209714	147,4	1,35	0,1351							
5	57573	41742	76588	205280	235,7	1,34	0,1343							
6														
7														
8														
9	58988	45309	85852	238663	230,5	1,37	0,1365							
10	38922	57582	78923	178994	249,3	1,32	0,1322	12009	6388	19,27	9506	23385	1,3	4,1042
11														
12	671,4	1150	7304	4716	n.a.	ca. 1,25	0,01							
13														
14	45867	36210	65974	179236	191,9	1,36	0,1355	77492	30504	189,7	25232	42291	1,29	
15														
16														
17	49834	36899	67381	183533	135,2	1,35	0,1351							
18	50191	32225	64320	180397	153,3	1,36	0,1357							

Tab. 0.4: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, wasserfrei mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff	Überstehende Lösung
					[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]	[g]
19	MgSO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	0	1,907	--	1,907	1,3066	0,69	0	100	685,2	
20	MgSO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	0	1,9813	--	1,9813	1,2923	0,65	3,2736	100	652,2	
21	MgSO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	0	1,9101	--	1,9101	3,0844	1,61	1,4621	53	1614,8	
22	MgSO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	0	1,743	--	1,743	3,0968	1,78	1,4848	52	1776,7	
23	MgSO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	60	1,9029	--	1,9029	1,3023	0,68	0	100	684,4	
24	MgSO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	60	1,8011	--	1,8011	1,2952	0,72	0	100	719,1	
25	MgSO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	60	1,9631	--	1,9631	3,2394	1,65	0,0334	99	1650,1	0,3836
26	MgSO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	60	1,9688	--	1,9688	3,2394	1,65	0,1142	96	1645,4	0,2346
27	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP21-Lösung	0	1,23335	1,23335	2,4667	1,2957	0,53	0	100	525,3	
28	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP21-Lösung	0	1,38495	1,38495	2,7699	1,2937	0,47	0	100	467,1	
29	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP21-Lösung	0	1,17685	1,17685	2,3537	2,7978	1,19	1,5224	46	1188,7	
30	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP21-Lösung	0	1,31835	1,31835	2,6367	2,9214	1,11	1,5709	46	1108,0	
31	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP21-Lösung	60	1,3836	1,3836	2,7672	1,2909	0,47	0	100	466,5	
32	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP21-Lösung	60	1,37515	1,37515	2,7503	1,2808	0,47	0	100	465,7	
33	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP21-Lösung	60	1,39315	1,39315	2,7863	3,1903	1,14	1,4521	54	1145,0	
34	MgSO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP21-Lösung	60	1,28155	1,28155	2,5631	3,131	1,22	1,4478	54	1221,6	

Forts. Tab. 0.4: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, wasserfrei mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt												
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]	
19	MgSO ₄	Starkeyit	Carnallit	Kieserit	Langbeinit	Halit						338661	10410	328251
20	MgSO ₄	Starkeyit	Bischofit	Blödit			Bischofit					397024	12360	384664
21	MgSO ₄	Starkeyit	Carnallit	Bischofit	Langbeinit	Sylvin						351772	8190	343582
22	MgSO ₄	Starkeyit	Bischofit	Carnallit	Kieserit	Langbeinit	Sylvin					366838	8650	358188
23	MgSO ₄	Starkeyit	Bischofit	Langbeinit	Sylvin							348209	4310	343899
24	MgSO ₄	Starkeyit	Epsomit	Bischofit	Langbeinit	Sylvin						265861	6460	259401
25	MgSO ₄	Starkeyit	Carnallit	Bischofit	Langbeinit	Sylvin						369588	18160	351428
26	MgSO ₄	Starkeyit	Carnallit	Bischofit	Pentahydrat	Kainit	Sylvin					403551	36510	367041
27	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Bischofit								180661	10970	169691
28	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Bischofit								112237	8070	104167
29	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Bischofit								260915	13620	247295
30	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Bischofit								224454	8360	216094
31	MgSO ₄	Halit	Starkeyit									169808	3600	166208
32	MgSO ₄	Halit	Starkeyit									184828	3600	181228
33	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Bischofit								185379	4620	180759
34	MgSO ₄	Halit	Starkeyit	Pentahydrat								242029	7270	234759

Forts. Tab. 0.4: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, wasserfrei mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
19														
20														
21	3556	1432	130655	54580	55,43	1,36	0,136							
22	3213	2004	136653	68475	54,1	1,36	0,1359							
23														
24														
25	1570	1875	115235	183769	149,6	n.b.	0,0334	17666	34477	95,76	177060	59547		
26	1739	1447	103943	137216	48,15	n.b.	0,1142	2107	4816	45,68	27441	14442		
27														
28														
29	2546	949,6	129725	79186	48,78	1,33	0,1328							
30	3121	896,4	144948	68040	49,38	1,34	0,1387							
31														
32														
33	4963	6958	109000	47059	76,36	1,34	0,1336							
34		236,8		353,7	n.a.	1,33	0,1334							

Tab.0.5: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet aller Korngrößen mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff	Überstehende Lösung
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]	[g]
179	Kieserit, getrocknet		IP9-Lösung	1440	4,6012	--	4,6012	1,1664	0,25	0	100	253,5	
180	Kieserit, getrocknet		IP9-Lösung	1440	4,1456	--	4,1456	1,2046	0,29	0	100	290,6	
181	Kieserit, getrocknet		IP9-Lösung	1440	4,4861	--	4,4861	2,9798	0,66	1,655	44	664,2	
182	Kieserit, getrocknet		IP9-Lösung	1440	4,5706	--	4,5706	2,9043	0,64	1,5048	48	635,4	
183	Kieserit, getrocknet		IP9-Lösung	4320	4,0805	--	4,0805	1,1483	0,28	0	100	281,4	
184	Kieserit, getrocknet		IP9-Lösung	4320	4,3958	--	4,3958	1,2302	0,28	0	100	279,9	
185	Kieserit, getrocknet		IP9-Lösung	4320	4,1374	--	4,1374	3,0836	0,75	0,6663	78	745,3	0,2469
186	Kieserit, getrocknet		IP9-Lösung	4320	4,2805	--	4,2805	3,084	0,72	1,2093	61	720,5	

Forts. Tab. 0.5: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet aller Korngrößen mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]
179	MgSO ₄	Starkeyit	Pentahydrat	Halit							186375	33189	153186
180	MgSO ₄	Pentahydrat	Starkeyit	Carnallit	Halit						176185	39477	136708
181	MgSO ₄	Pentahydrat	Starkeyit	Kainit	Halit						166494	38220	128274
182	MgSO ₄	Pentahydrat	Starkeyit	Kainit	Halit		Langbeinit	Halit			179997	33370	146627
183	MgSO ₄	Starkeyit	Pentahydrat	Kainit	Halit	Sylvin	Halit				172094	33180	138914
184	MgSO ₄	Starkeyit	Pentahydrat	Kainit	Halit						190606	35765	154841
185	MgSO ₄	Pentahydrat	Starkeyit	Kainit	Halit		Halit				190835	37379	153456
186	MgSO ₄	Starkeyit	Pentahydrat	Kainit	Halit		Polyhalit	Hexahydrat	Löweit	Thenardit	162214	25985	136229

Forts. Tab. 0.5: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet aller Korngrößen mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
179														
180														
181	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,32	0,1318							
182	45366	28270	67945	141845	127,2	1,32	0,1316							
183														
184														
185	34316	33486	76520	136457	91,82	1,34	0,1335	55817	25081	252	58844	134436		
186	36781	23391	73043	145113	106,1	1,32	0,132							

Tab. 0.6: Kurzzeitversuche Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet aller Korngrößen mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Eingesetzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
187	Kieserit, getrocknet		IP21-Lösung	1440	4,3777	--	4,3777	1,2747	0,29	0	100	291,2
188	Kieserit, getrocknet		IP21-Lösung	1440	4,3884	--	4,3884	1,2589	0,29	0	100	286,9
189	Kieserit, getrocknet		IP21-Lösung	1440	4,2161	--	4,2161	3,1899	0,76	1,887	41	756,6
190	Kieserit, getrocknet		IP21-Lösung	1440	4,1872	--	4,1872	3,1445	0,75	1,8176	42	751,0
191	Kieserit, getrocknet		IP21-Lösung	4320	4,3536	--	4,3536	1,2667	0,29	0	100	291,0
192	Kieserit, getrocknet		IP21-Lösung	4320	4,4599	--	4,4599	1,2272	0,28	0	100	275,2
193	Kieserit, getrocknet		IP21-Lösung	4320	4,1188	--	4,1188	3,119	0,76	1,7235	45	757,3
194	Kieserit, getrocknet		IP21-Lösung	4320	4,3041	--	4,3041	2,1016	0,49	1,7959	15	488,3

Forts. Tab. 0.6: Kurzzeitversuche Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet aller Korngrößen mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamt- wasser [mg/kg]	Haft- wasser [mg/kg]	Kristall- wasser [mg/kg]
187	MgSO ₄	Starkeyit	Hexahydrit	Langbeinit	Kieserit	Halit	Halit				182265	29998	152267
188	MgSO ₄	Starkeyit	Pentahydrit	Hexahydrit	Langbeinit	Polyhalit	Kainit				230179	31718	198461
189	MgSO ₄	Starkeyit	Carnallit	Pentahydrit	Polyhalit	Halit					236508	30592	205916
190	MgSO ₄	Starkeyit	Carnallit	Pentahydrit	Polyhalit	Halit	Gips	Halit			178172	27934	150238
191	MgSO ₄	Starkeyit	Carnallit	Hexahydrit	Polyhalit	Halit	Langbeinit	Halit	Kainit		184701	31181	153520
192	MgSO ₄	Carnallit	Hexahydrit	Pentahydrit	Kieserit	Langbeinit	Halit				198128	33469	164659
193	MgSO ₄	Starkeyit	Carnallit	Hexahydrit	Pentahydrit	Halit	Thenardit				198702	30486	168216
194	MgSO ₄	Starkeyit	Carnallit	Halit	Polyhalit	Sylvin	Thenardit	Langbeinit	Halit	Gips	150592	25802	124790

Forts. Tab. 0.6: Kurzzeitversuche Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet aller Korngrößen mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
187														
188														
189	3880	3531	122368	39810	59,97	1,35	0,1349							
190	3077	2631	125595	40730	61,48	1,35	0,1349							
191														
192														
193	1965	996,8	131303	35146	56,81	1,35	0,1345							
194	2003	941,2	131378	37888	54,49	1,35	0,1347							

Tab. 0.7: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 1 bis < 2 mm mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Eingesetzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
195	Kieserit, getrocknet, >1mm - 2mm		IP9-Lösung	1440	3,9077	--	3,9077	1,218	0,31	0,1058	91	311,7
196	Kieserit, getrocknet, >1mm - 2mm		IP9-Lösung	1440	3,7323	--	3,7323	1,1875	0,32	0,0318	97	318,2
197	Kieserit, getrocknet, >1mm - 2mm		IP9-Lösung	1440	3,9617	--	3,9617	3,0101	0,76	2,2287	26	759,8
198	Kieserit, getrocknet, >1mm - 2mm		IP9-Lösung	1440	3,9677	--	3,9677	2,9453	0,74	2,144	27	742,3
199	Kieserit, getrocknet, >1mm - 2mm		IP9-Lösung	4320	4,115	--	4,115	1,0912	0,27	0	100	265,2
200	Kieserit, getrocknet, >1mm - 2mm		IP9-Lösung	4320	4,1518	--	4,1518	1,2297	0,30	0	100	296,2
201	Kieserit, getrocknet, >1mm - 2mm		IP9-Lösung	4320	3,6769	--	3,6769	3,0384	0,83	2,0682	32	826,3
202	Kieserit, getrocknet, >1mm - 2mm		IP9-Lösung	4320	3,8256	--	3,8256	3,0503	0,80	2,1211	30	797,3

Forts. Tab. 0.7: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 1 bis < 2 mm mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]
195	MgSO ₄	Hexahydrite.	Pentahydrit	Langbeinit	Halit		Halit	Sylvin			189419	31800	157619
196	MgSO ₄	Hexahydrit	Pentahydrit	Langbeinit	Halit						302910	22488	280422
197	MgSO ₄	Pentahydrit	Hexahydrit	Halit			Sylvin	Kainit			256405	26736	229669
198	MgSO ₄	Pentahydrit	Hexahydrit	Langbeinit	Halit		Kainit				205757	26087	179670
199	MgSO ₄	Pentahydrit	Hexahydrit	Langbeinit	Halit		Halit	Anhydrit			155505	25022	130483
200	MgSO ₄	Pentahydrit	Langbeinit	Hexahydrit	Halit		D'Ansit	Halit	Sylvin		269465	34176	235289
201	MgSO ₄	Hexahydrit	Pentahydrit	Langbeinit	Halit		Sylvin	Arcanit			286504	31958	254546
202	MgSO ₄	Hexahydrit	Pentahydrit	Langbeinit	Halit		Gips	Kainit			231049	22954	208095

Forts. Tab. 0.7: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 1 bis < 2 mm mit IP9-Lösung

Versuchs-Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
195	18773	31858	85196	81014	141,8	1,32	0,0263							
196	21882	31526	79675	86395	124,7	1,27	0,0254							
197	52699	29630	64883	133722	100,5	1,38	0,1382							
198	49657	29782	65976	129145	96,2	1,36	0,1359							
199														
200														
201	42083	27633	64215	118696	66,36	1,3	0,2607							
202	42007	28885	67186	116984	54,82	1,3	0,2596							

Tab. 0.8: Kurzzeitversuche der Versuchgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 500 µm bis 1 mm mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
203	Kieserit, getrocknet, >500 µm - 1 mm		IP9-Lösung	1440	4,0373	--	4,0373	1,2152	0,30	0	100	301,0
204	Kieserit, getrocknet, >500 µm - 1 mm		IP9-Lösung	1440	4,3001	--	4,3001	1,2151	0,28	0	100	282,6
205	Kieserit, getrocknet, >500 µm - 1 mm		IP9-Lösung	1440	4,1644	--	4,1644	3,0478	0,73	1,8747	38	731,9
206	Kieserit, getrocknet, >500 µm - 1 mm		IP9-Lösung	1440	4,0522	--	4,0522	3,0107	0,74	1,732	42	743,0
207	Kieserit, getrocknet, >500 µm - 1 mm		IP9-Lösung	4320	4,3026	--	4,3026	1,2157	0,28	0	100	282,6
208	Kieserit, getrocknet, >500 µm - 1 mm		IP9-Lösung	4320	4,0512	--	4,0512	1,204	0,30	0	100	297,2
209	Kieserit, getrocknet, >500 µm - 1 mm		IP9-Lösung	4320	4,0806	--	4,0806	2,9144	0,71	1,0867	63	714,2
210	Kieserit, getrocknet, >500 µm - 1 mm		IP9-Lösung	4320	4,2225	--	4,2225	2,928	0,69	1,0406	64	693,4

Forts. Tab. 0.8: Kurzzeitversuche der Versuchgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 500 µm bis 1 mm mit IP9
Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]
203	MgSO ₄	Pentahydrat	Hexahydrat	Löweit	Polyhalit	Thenardit	Halit	Sylvin			208683	26358	182325
204	MgSO ₄	Pentahydrat	Langbeinit	Löweit	Thenardit	Gips	Halit	Tachhydrit	Langbeinit	Sylvin	292656	26126	266530
205	MgSO ₄	Hexahydrat	Pentahydrat	Löweit	Halit		Sylvin	Polyhalit			301877	26622	275255
206	MgSO ₄	Hexahydrat	Pentahydrat	Löweit	Langbeinit	Polyhalit	Gips	Halit			193265	23068	170197
207	MgSO ₄	Pentahydrat	Langbeinit	Gips	Halit	Sylvin							
208	MgSO ₄	Pentahydrat	Hexahydrat	Kainit	Arcanit	Langbeinit	Halit	Kainit			267173	28668	238505
209	MgSO ₄	Pentahydrat	Hexahydrat	Arcanit	Langbeinit	Halit	Kainit	Thenardit			280022	41357	238665
210	MgSO ₄	Pentahydrat	Hexahydrat	Arcanit	Langbeinit	Halit	Polyhalit	Halit			195496	21726	173770

Forts. Tab. 0.8: Kurzzeitversuche der Versuchgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 500 µm bis 1 mm mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
203														
204														
205	39841	28172	76834	144278	99,72	1,38	0,1378							
206	44709	34390	69597	123584	110,8	1,37	0,1369							
207														
208														
209	37155	31801	71963	124579	78,25	1,32	0,2636							
210	36288	33523	73855	125201	66,36	1,32	0,2638							

Tab. 0.9: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße >250 bis 500 µm mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	
211	Kieserit, getrocknet, >250 µm - 500 µm		IP9-Lösung	1440	3,9935	--	3,9935	1,2096	0,30	0	100	
212	Kieserit, getrocknet, >250 µm - 500 µm		IP9-Lösung	1440	3,7325	--	3,7325	1,2089	0,32	0	100	323,9
213	Kieserit, getrocknet, >250 µm - 500 µm		IP9-Lösung	1440	3,9148	--	3,9148	3,0058	0,77	1,5607	48	767,8
214	Kieserit, getrocknet, >250 µm - 500 µm		IP9-Lösung	1440	4,3337	--	4,3337	3,0009	0,69	1,373	54	692,5
215	Kieserit, getrocknet, >250 µm - 500 µm		IP9-Lösung	4320	4,3874	--	4,3874	1,2145	0,28	0	100	276,8
216	Kieserit, getrocknet, >250 µm - 500 µm		IP9-Lösung	4320	4,1634	--	4,1634	1,2239	0,29	0	100	294,0
217	Kieserit, getrocknet, >250 µm - 500 µm		IP9-Lösung	4320	4,2202	--	4,2202	3,0231	0,72	0,1355	96	716,3
218	Kieserit, getrocknet, >250 µm - 500 µm		IP9-Lösung	4320	4,2166	--	4,2166	3,0093	0,71	0,1735	94	713,7

Forts. Tab. 0.9: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße >250 bis 500 µm mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]
211	MgSO ₄	Pentahydrat	Hexahydrat	Langbeinit	Arcanit	Kainit	Thenardit	Halit			222436	21162	201274
212	MgSO ₄	Pentahydrat	Hexahydrat	Löweit	Carnallit	Arcanit	Halit				280053	28451	251602
213	MgSO ₄	Pentahydrat	Hexahydrat	Arcanit	Thenardit	Gips	Gips	Halit			277871	28486	249385
214	MgSO ₄	Pentahydrat	Hexahydrat	Löweit	Halit	Arcanit						28243	
215	MgSO ₄	Pentahydrat	Löweit	Hexahydrat	Arcanit	Kainit	Halit	Arcanit				21880	
216	MgSO ₄	Pentahydrat	Hexahydrat	Arcanit	Langbeinit	Gips	Vanthoffit					22566	
217	MgSO ₄	Pentahydrat	Hexahydrat	Kainit	Langbeinit	Halit						23472	
218	MgSO ₄	Hexahydrat	Pentahydrat	Langbeinit	Polyhalit	Halit						20888	

Forts. Tab. 0.9: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße >250 bis 500 µm mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
211														
212														
213	45022	33919	72118	154121	108,6	1,38	0,1376							
214	44932	30004	70116	152469	107,8	1,37	0,1366							
215														
216														
217	9630	17489	99622	64610	82,91	1,31	0,1307							
218	8773	16465	99516	60196	80,73	1,3	0,13							

Tab. 0.10: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 125 bis 250 µm mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff	Überste- hende Lösung
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]	[g]
219	Kieserit, getrocknet, >125 µm - 250 µm		IP9-Lösung	1440	4,112	--	4,112	1,2268	0,30	0	100	298,3	
220	Kieserit, getrocknet, >125 µm - 250 µm		IP9-Lösung	1440	4,0335	--	4,0335	1,2199	0,30	0	100	302,4	
221	Kieserit, getrocknet, >125 µm - 250 µm		IP9-Lösung	1440	3,994	--	3,994	3,0373	0,76	0,0415	99	760,5	0,7000
222	Kieserit, getrocknet, >125 µm - 250 µm		IP9-Lösung	1440	3,8438	--	3,8438	3,0483	0,79	0,0952	97	793,0	0,5780
223	Kieserit, getrocknet, >125 µm - 250 µm		IP9-Lösung	4320	4,0223	--	4,0223	1,2143	0,30	0	100	301,9	
224	Kieserit, getrocknet, >125 µm - 250 µm		IP9-Lösung	4320	3,9269	--	3,9269	1,2154	0,31	0	100	309,5	
225	Kieserit, getrocknet, >125 µm - 250 µm		IP9-Lösung	4320	4,0965	--	4,0965	2,9895	0,73	0	100	729,8	0,5707
226	Kieserit, getrocknet, >125 µm - 250 µm		IP9-Lösung	4320	4,0501	--	4,0501	3,0339	0,75	0	100	749,1	0,4573

Forts. Tab.0.10: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 125 bis 250 µm mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt												
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]	
219	MgSO ₄	Pentahydrat	Thenardit	Langbeinit	Gips	Halit							21748	
220	MgSO ₄	Pentahydrat	Kainit	Langbeinit	Arcanit	Thenardit							32159	
221	MgSO ₄	Pentahydrat	Hexahydrat	Kainit	Löweit	Langbeinit	Pentahydrat						24835	
222	MgSO ₄	Pentahydrat	Hexahydrat	Langbeinit	Kainit	Halit	Glauberit	Löweit					20569	
223	MgSO ₄	Pentahydrat	Arcanit	Thenardit	Langbeinit	Halit							14995	
224	MgSO ₄	Pentahydrat	Epsomit	Kainit	Thenardit	Gips							13612	
225	MgSO ₄	Pentahydrat	Arcanit	Kainit	Polyhalit	Gips							15658	
226	MgSO ₄	Pentahydrat	Kainit	Langbeinit	Gips	Halit	Sylvin						12935	

Forts. Tab.0.10: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 125 bis 250 µm mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
219														
220														
221	9769	15911	103483	64129	190,7	1,31	0,0261	67920	28444	156,5	47280	116599		
222	10420	15412	106583	67410	162,1	1,34	0,0267	66934	27730	152,7	51139	125767		
223														
224														
225								57113	24963	88,56	59240	153388		
226								51399	22404	76,85	65922	168137		

Tab. 0.11: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 63 bis 125 µm mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff	Überste- hende Lösung
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]	[g]
227	Kieserit, getrocknet, >63 µm - 125 µm		IP9-Lösung	1440	3,7442	--	3,7442	1,2272	0,33	0	100	327,8	
228	Kieserit, getrocknet, >63 µm - 125 µm		IP9-Lösung	1440	3,5605	--	3,5605	1,2288	0,35	0	100	345,1	
229	Kieserit, getrocknet, >63 µm - 125 µm		IP9-Lösung	1440	3,7408	--	3,7408	3,0316	0,81	1,2425	59	810,4	
230	Kieserit, getrocknet, >63 µm - 125 µm		IP9-Lösung	1440	3,0268	--	3,0268	3,061	1,01	0	100	1011,3	1,3903
231	Kieserit, getrocknet, >63 µm - 125 µm		IP9-Lösung	4320	3,6706	--	3,6706	1,2004	0,33	0	100	327,0	
232	Kieserit, getrocknet, >63 µm - 125 µm		IP9-Lösung	4320	3,7278	--	3,7278	1,2093	0,32	0	100	324,4	
233	Kieserit, getrocknet, >63 µm - 125 µm		IP9-Lösung	4320	3,7525	--	3,7525	3,0347	0,81	0	100	808,7	0,7949
234	Kieserit, getrocknet, >63 µm - 125 µm		IP9-Lösung	4320	3,8265	--	3,8265	2,9584	0,77	0	100	773,1	0,8924

Forts. Tab. 0.11: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 63 bis 125 µm mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]
227	MgSO ₄	Pentahydrat	Hexahydrat	Langbeinit	Kainit	Thenardit	Starkeyit					14823	
228	MgSO ₄						Halit					16125	
229	MgSO ₄	Starkeyit	Pentahydrat	Hexahydrat	Carnallit	Langbeinit						17436	
230	MgSO ₄	Pentahydrat	Hexahydrat	Langbeinit	Halit	Gips	Sylvin					15631	
231	MgSO ₄	Pentahydrat	Hexahydrat	Starkeyit	Kainit	Thenardit						19920	
232	MgSO ₄	Pentahydrat	Starkeyit	Hexahydrat	Kainit	Langbeinit						15326	
233	MgSO ₄	Pentahydrat	Starkeyit	Kainit	Langbeinit	Thenardit						15327	
234	MgSO ₄	Pentahydrat	Starkeyit	Hexahydrat	Kainit	Carnallit						16483	

Forts. Tab. 0.11: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 63 bis 125 µm mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
227														
228														
229	55674	25637	59116	153790	110,8	1,31	0,131							
230								69688	28242	160,7	39425	91294		
231														
232														
233								54758	23021	100,8	60107	158061		
234								53890	23132	104,9	58880	150870		

Tab. 0.12: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 1 bis < 2 mm mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungsrückhalt ung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
235	Kieserit, getrocknet, >1 mm - 2 mm		IP21-Lösung	1440	3,7479	--	3,7479	1,2853	0,34	0,1258	90	342,9
236	Kieserit, getrocknet, >1 mm - 2 mm		IP21-Lösung	1440	3,859	--	3,859	1,2929	0,34	0,0302	98	335,0
237	Kieserit, getrocknet, >1 mm - 2 mm		IP21-Lösung	1440	3,6251	--	3,6251	3,22	0,89	2,32	28	888,3
238	Kieserit, getrocknet, >1 mm - 2 mm		IP21-Lösung	1440	3,5602	--	3,5602	3,2087	0,90	2,3832	26	901,3
239	Kieserit, getrocknet, >1 mm - 2 mm		IP21-Lösung	4320	3,8173	--	3,8173	1,2819	0,34	0	100	335,8
240	Kieserit, getrocknet, >1 mm - 2 mm		IP21-Lösung	4320	3,6795	--	3,6795	1,284	0,35	0,0167	99	349,0
241	Kieserit, getrocknet, >1 mm - 2 mm		IP21-Lösung	4320	3,7046	--	3,7046	3,2028	0,86	2,1008	34	864,5
242	Kieserit, getrocknet, >1 mm - 2 mm		IP21-Lösung	4320	3,6474	--	3,6474	3,2099	0,88	2,0371	37	880,1

Forts. Tab. 0.12: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 1 bis < 2 mm mit IP21 Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9					
235	MgSO ₄	Langbeinit	Pentahydrat	Vanthoffit	Halit	Thenardit	Halit						12932		
236	MgSO ₄	Langbeinit	Polyhalit	Gips	Vanthoffit	D'Ansit							14018		
237	MgSO ₄	Langbeinit	Pentahydrat	Thenardit	Halit	Arcanit							14976		
238	MgSO ₄	Carnallit	Pentahydrat	Langbeinit	Halit								15024		
239	MgSO ₄	Pentahydrat	Langbeinit	D'Ansit	Halit	Polyhalit							15183		
240	MgSO ₄	Carnallit	Vanthoffit	Halit	Langbeinit	Thenardit							15144		
241	MgSO ₄	Vanthoffit	Langbeinit	Gips	Halit	Anhydrit							15231		
242	MgSO ₄	Arcanit	Langbeinit	Halit	Anhydrit	Thenardit	Sylvin						14898		

Forts. Tab. 0.12: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 1 bis < 2 mm mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
235	3238	1888	136050	46321	n.b.	1,36	0,0272							
236	2560	1040	132300	42946	n.b.	1,28	0,0256							
237	5254	6489	116800	50856	n.b.	1,3	0,1302							
238	6437	9959	112600	49837	n.b.	1,31	0,131							
239														
240	3335	1110	134475	45023	n.b.	1,32	0,0132							
241	4720	5203	121575	44803	n.b.	1,33	0,2666							
242	4282	4305	123150	44593	n.b.	1,33	0,266							

Tab. 0.13: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße >500 µm bis 1 mm mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
243	Kieserit, getrocknet, >500 µm - 1 mm		IP21-Lösung	1440	4,0871	--	4,0871	1,2586	0,31	0	100	307,9
244	Kieserit, getrocknet, >500 µm - 1 mm		IP21-Lösung	1440	4,0626	--	4,0626	1,2718	0,31	0	100	313,1
245	Kieserit, getrocknet, >500 µm - 1 mm		IP21-Lösung	1440	4,0098	--	4,0098	3,2024	0,80	1,9965	38	798,6
246	Kieserit, getrocknet, >500 µm - 1 mm		IP21-Lösung	1440	4,0035	--	4,0035	3,2001	0,80	2,0419	36	799,3
247	Kieserit, getrocknet, >500 µm - 1 mm		IP21-Lösung	4320	4,0251	--	4,0251	1,2822	0,32	0	100	318,6
248	Kieserit, getrocknet, >500 µm - 1 mm		IP21-Lösung	4320	4,0372	--	4,0372	1,2897	0,32	0	100	319,5
249	Kieserit, getrocknet, >500 µm - 1 mm		IP21-Lösung	4320	4,002	--	4,002	3,2158	0,80	1,9686	39	803,5
250	Kieserit, getrocknet, >500 µm - 1 mm		IP21-Lösung	4320	4,2083	--	4,2083	3,2091	0,76	1,7706	45	762,6

Forts.Tab.0.13: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße >500 µm bis 1 mm mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]
243	MgSO ₄	Bischofit	Langbeinit	Halit	Starkeyit	Leonit						13821	
244	MgSO ₄	Magnesium- sulfat	Glauberit	Langbeinit	Halit		Starkeyit	Vanthoffit				13994	
245	MgSO ₄	Carnallit	Halit	Magnesium- sulfat			Polyhalit	Sylvin				14182	
246	MgSO ₄	Carnallit	Magnesium- sulfat	Langbeinit	Halit	Pentahydrit	Halit	Sylvin				19903	
247	MgSO ₄	Magnesium- sulfat	Carnallit	Langbeinit	Halit	Leonit	Halit					21594	
248	MgSO ₄	Magnesium- sulfat	Carnallit	Hexahydrit	Halit	Langbeinit	Halit					20712	
249	MgSO ₄	Pentahydrit	Carnallit	Magnesium- sulfat	Langbeinit	Starkeyit	Leonit					21078	
250	MgSO ₄	Pentahydrit	Carnallit	Magnesium- sulfat	Langbeinit	Halit						22793	

Forts.Tab. 0.13: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße >500 µm bis 1 mm mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
243														
244														
245	2772	2370	127725	42985	n.b.	1,34	0,268							
246	2246	1422	130750	42995	n.b.	1,34	0,2674							
247														
248														
249	4825	4432	115975	41068	n.b.	1,32	0,2631							
250	2391	1536	126225	33977	n.b.	1,33	0,2669							

Tab. 0.14: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 250 bis 500 µm mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rück- haltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
251	Kieserit, getrocknet, >250 µm - 500 µm		IP21-Lösung	1440	4,075	--	4,075	1,2899	0,32	0	100	316,5
252	Kieserit, getrocknet, >250 µm - 500 µm		IP21-Lösung	1440	3,9948	--	3,9948	1,2893	0,32	0	100	322,7
253	Kieserit, getrocknet, >250 µm - 500 µm		IP21-Lösung	1440	4,1563	--	4,1563	3,1823	0,77	1,7882	44	765,7
254	Kieserit, getrocknet, >250 µm - 500 µm		IP21-Lösung	1440	4,0557	--	4,0557	3,1903	0,79	1,776	44	786,6
255	Kieserit, getrocknet, >250 µm - 500 µm		IP21-Lösung	4320	4,0431	--	4,0431	1,287	0,32	0	100	318,3
256	Kieserit, getrocknet, >250 µm - 500 µm		IP21-Lösung	4320	4,1788	--	4,1788	1,2893	0,31	0	100	308,5
257	Kieserit, getrocknet, >250 µm - 500 µm		IP21-Lösung	4320	3,9798	--	3,9798	3,1773	0,80	1,2899	59	798,4
258	Kieserit, getrocknet, >250 µm - 500 µm		IP21-Lösung	4320	4,1563	--	4,1563	3,2144	0,77	1,2542	61	773,4

Forts. Tab. 0.14: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 250 bis 500 µm mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]
251	MgSO ₄	Langbeinit	Leonit	Glauberit	Hexahydrit	Halit	Sylvin	Thenardit				19820	
252	MgSO ₄	Magnesium- sulfat	Starkeyit	Langbeinit	Hexahydrit	Halit	Halit	Sylvin				17116	
253	MgSO ₄	Carnallit	Pentahydrit	Magnesium- sulfat	Starkeyit	Halit	Starkeyit					18137	
254	MgSO ₄	Carnallit	Pentahydrit	Magnesium- sulfat	Halit	Starkeyit	Kohlenstoff				143128	89812	53316
255	MgSO ₄	Carnallit	Magnesium- sulfat	Starkeyit	Langbeinit	Halit	Kohlenstoff	Sylvin			141862	86861	55001
256	MgSO ₄	Bischofit	Magnesium- sulfat	Langbeinit	Hexahydrit	Starkeyit	Halit	Kohlenstoff	Sylvin		133239	79395	53844
257	MgSO ₄						Halit	Kohlenstoff	Sylvin		133852	78311	55541
258	MgSO ₄	Magnesium- sulfat	Carnallit	Starkeyit	Langbeinit	Halit	Kohlenstoff	Sylvin			154629	106857	47772

Forts. Tab. 0.14: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 250 bis 500 µm mit IP21-Lösung

Versuchs-Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
251														
252														
253	2557	1712	126900	40948	n.b.	1,33	0,2667							
254	2217	1257	128825	45612	7,551	1,33	0,2669							
255														
256														
257	3699	3572	122150	43605	n.b.	1,34	0,2675							
258	3353	2823	122550	43735	n.b.	1,34	0,2677							

Tab. 0.15: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 125 bis 250 µm mit P21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rück- haltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff	Überstehende Lösung
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]	[g]
259	Kieserit, getrocknet, >125 µm - 250 µm		IP21-Lösung	1440	4,0232	--	4,0232	1,2925	0,32	0	100	321,3	
260	Kieserit, getrocknet, >125 µm - 250 µm		IP21-Lösung	1440	3,9324	--	3,9324	1,2898	0,33	0	100	328,0	
261	Kieserit, getrocknet, >125 µm - 250 µm		IP21-Lösung	1440	3,9896	--	3,9896	3,2135	0,81	1,0873	66	805,5	
262	Kieserit, getrocknet, >125 µm - 250 µm		IP21-Lösung	1440	3,9084	--	3,9084	3,2082	0,82	1,0902	66	820,8	
263	Kieserit, getrocknet, >125 µm - 250 µm		IP21-Lösung	4320	4,0455	--	4,0455	1,2862	0,32	0	100	317,9	
264	Kieserit, getrocknet, >125 µm - 250 µm		IP21-Lösung	4320	4,2815	--	4,2815	1,2909	0,30	0	100	301,5	
265	Kieserit, getrocknet, >125 µm - 250 µm		IP21-Lösung	4320	4,0801	--	4,0801	3,1963	0,78	0,042	99	783,4	0,7778
266	Kieserit, getrocknet, >125 µm - 250 µm		IP21-Lösung	4320	3,995	--	3,995	3,1151	0,78	0	100	779,7	0,7355

Forts. Tab. 0.15: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 125 bis 250 µm mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamt- wasser [mg/kg]	Haft- wasser [mg/kg]	Kristall- wasser [mg/kg]
259	MgSO ₄	Starkeyit	Magnesium- sulfat	Langbeinit	Hexahydrat	Halit	Kohlenstoff	Sylvin			140885	96542	44343
260	MgSO ₄	Magnesium- sulfat	Starkeyit	Thenardit			Halit	Sylvin	Kohlenstoff		150943	90566	60377
261	MgSO ₄	Starkeyit	Magnesium- sulfat	Langbeinit	Sylvin	Halit	Sylvin	Kohlenstoff			152931	92223	60708
262	MgSO ₄	Carnallit	Starkeyit	Magnesium- sulfat	Halit	Sylvin	Kohlenstoff	Sylvin			153500	40317	113183
263	MgSO ₄	Magnesium- sulfat	Langbeinit	Starkeyit	Halit	Thenardit	Kohlenstoff	Halit	Sylvin		148920	40174	108746
264	MgSO ₄	Magnesium- sulfat	Langbeinit	Thenardit	Halit						181511	48048	133463
265	MgSO ₄	Magnesium- sulfat	Bischofit	Langbeinit	Thenardit	Halit	Halit				190646	51650	138996
266	MgSO ₄	Magnesium- sulfat	Starkeyit	Langbeinit	Bischofit	Kieserit	Kohlenstoff				140995	40044	100951

Forts. Tab. 0.15: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 125 bis 250 µm mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
259														
260														
261	6000	8441	107375	47709	n.b.	1,32	0,2649							
262	6535	9769	106450	49038	n.b.	1,31	0,2616							
263														
264														
265	2216	703,9	133075	40678	n.b.	1,34	0,0267	7973	13728	n.b.	99803	51405		
266								8711	14733	n.b.	98535	52763		

Tab. 0.16: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 63 bis 125 µm mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff	Überste- hende Lösung
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]	[g]
267	Kieserit, getrocknet, >63 µm - 125 µm		IP21-Lösung	1440	3,1225	--	3,1225	1,2847	0,41	0	100	411,4	
268	Kieserit, getrocknet, >63 µm - 125 µm		IP21-Lösung	1440	2,8677	--	2,8677	1,2889	0,45	0	100	449,5	
269	Kieserit, getrocknet, >63 µm - 125 µm		IP21-Lösung	1440	2,6466	--	2,6466	3,1912	1,21	1,057	67	1205,8	
270	Kieserit, getrocknet, >63 µm - 125 µm		IP21-Lösung	1440	2,8161	--	2,8161	3,2145	1,14	0,0392	99	1141,5	0,8258
271	Kieserit, getrocknet, >63 µm - 125 µm		IP21-Lösung	4320	2,966	--	2,966	1,2907	0,44	0	100	435,2	
272	Kieserit, getrocknet, >63 µm - 125 µm		IP21-Lösung	4320	3,0546	--	3,0546	1,2909	0,42	0	100	422,6	
273	Kieserit, getrocknet, >63 µm - 125 µm		IP21-Lösung	4320	3,3933	--	3,3933	3,2099	0,95	1,2118	62	946,0	
274	Kieserit, getrocknet, >63 µm - 125 µm		IP21-Lösung	4320	3,5574	--	3,5574	3,2023	0,90	1,4164	56	900,2	

Forts. Tab. 0.16: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 63 bis 125 µm mit IP21-Lösung

Versuchs-Nr.	Ausgangs-mineral 1	Reaktionsprodukt											Gesamt-wasser [mg/kg]	Haft-wasser [mg/kg]	Kristall-wasser [mg/kg]
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9					
267	MgSO ₄	Carnallit	Magnesium-sulfat	Langbeinit	Thenardit	Starkeyit	Sylvin	Kohlenstoff					146805	38788	108017
268	MgSO ₄	Magnesium-sulfat	D'Ansit	Hexahydrit	Kieserit	Starkeyit	Halit						293631	167056	126575
269	MgSO ₄	Pentahydrit	Starkeyit	Magnesium-sulfat	Langbeinit	Kieserit	Kohlenstoff	Halit					176737	44532	132205
270	MgSO ₄	Starkeyit	Magnesium-sulfat	Hexahydrit	Halit	Sylvin							76647	21471	55176
271	MgSO ₄	Magnesium-sulfat	Starkeyit	Langbeinit	Hexahydrit	Halit							62079	18018	44061
272	MgSO ₄	Carnallit	Magnesium-sulfat	Starkeyit	Kieserit	Halit							49263	10975	38288
273	MgSO ₄	Carnallit	Magnesium-sulfat	Langbeinit	Starkeyit	Kieserit							62763	12353	50410
274	MgSO ₄	Carnallit	Pentahydrit	Magnesium-sulfat	Langbeinit	Halit							135203	38732	96471

Forts. Tab. 0.16: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Magnesiumsulfat, Kieserit getrocknet der Korngröße > 63 bis 125 µm mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
267														
268														
269	8214	11538	106300	48309	n.b.	1,32	0,2638							
270	6814	607,5	134275	45093	n.b.	1,37	0,0273	9062	18185	n.b.	96243	41318		
271														
272														
273	6602	10105	108875	54481	17,68	1,33	0,1327							
274	5418	4725	116150	53782	59,1	1,32	0,1324							

Tab. 0.17: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Morsleben Hartsalz getrocknet mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
291	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP9-Lösung	1440	3,5365	--	3,5365	1,2196	0,34	0,7908	35	344,9
292	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP9-Lösung	1440	3,5583	--	3,5583	1,2311	0,35	0,8618	30	346,0
293	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP9-Lösung	1440	3,4937	--	3,4937	3,0645	0,88	2,8886	6	877,2
294	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP9-Lösung	1440	3,833	--	3,833	3,0580	0,80	2,777	9	797,8
295	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP9-Lösung	4320	4,0745	--	4,0745	1,2190	0,30	0,3214	74	299,2
296	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP9-Lösung	4320	4,1294	--	4,1294	1,2277	0,30	0,2806	77	297,3
297	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP9-Lösung	4320	3,7838	--	3,7838	3,0557	0,81	2,4939	18	807,6
298	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP9-Lösung	4320	4,2131	--	4,2131	3,0592	0,73	2,2794	25	726,1
299	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP9-Lösung	10080	4,0034	--	4,0034	1,1925	0,30	0,3618	70	297,9
300	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP9-Lösung	10080	3,5965	--	3,5965	1,2245	0,34	0,2984	76	340,5
301	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP9-Lösung	10080	3,6704	--	3,6704	3,0559	0,83	2,5171	18	832,6
302	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP9-Lösung	10080	3,7259	--	3,7259	3,0465	0,82	2,5965	15	817,7

Forts. Tab. 0.17: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Morsleben Hartsalz getrocknet mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt												
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]	
291	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Picromerit	Halit	Sylvin								124833	22819	102014
292	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Halit	Langbeinit	Blödit	Sylvin							139865	27903	111962
293	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Picromerit	Langbeinit	Halit	Sylvin							143107	23991	119116
294	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrit	Langbeinit	Halit	Sylvin								43630	
295	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrit	Hexahydrit	Kainit	Halit	Sylvin							38722	
296	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrit	Langbeinit	Halit	Kainit	Sylvin							34818	
297	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Picromerit	Langbeinit	Halit	Sylvin								30491	
298	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrit	Langbeinit	Halit	Sylvin								41064	
299	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrit	Langbeinit	Halit	Sylvin								38740	
300	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrit	Langbeinit	Halit	Sylvin	Kainit							39014	
301	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrit	Langbeinit	Halit									36976	
302	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrit	Langbeinit	Halit									37776	

Forts. Tab. 0.17: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Morsleben Hartsalz getrocknet mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
291	27431	25189	74405	117472	26,26	1,321	0,1321							
292	31058	23869	71614	128697	32,27	1,323	0,1323							
293	41126	26647	63242	135949	51,21	1,32	0,132							
294	50113	35437	55373	142962	79,44	1,325	0,1325							
295	15179	28169	84271	81276	15,4	1,315	0,1315							
296	16713	28671	83455	79700	24,66	1,317	0,1317							
297	43508	27478	60199	138590	67,78	1,324	0,1324							
298	45604	32374	56414	126259	75,22	1,314	0,1314							
299	16543	28404	81508	81335	15,83	1,313	0,1313							
300	16373	27732	80258	79000	43,46	1,31	0,131							
301	43074	26879	57779	131793	28,88	1,311	0,1311							
302	43439	25401	60118	143523	34,05	1,306	0,1306							

Tab. 0.18: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Morsleben Hartsalz getrocknet mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
303	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP21-Lösung	1440	3,3656	--	3,3656	1,2852	0,38	0,7702	40	381,9
304	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP21-Lösung	1440	3,3219	--	3,3219	1,2872	0,39	0,7662	40	387,5
305	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP21-Lösung	1440	3,6568	--	3,6568	3,2214	0,88	2,6709	17	880,9
306	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP21-Lösung	1440	3,7689	--	3,7689	3,2249	0,86	2,5734	20	855,7
307	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP21-Lösung	4320	4,1774	--	4,1774	1,2915	0,31	0,1691	87	309,2
308	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP21-Lösung	4320	4,0604	--	4,0604	1,2853	0,32	0,0799	94	316,5
309	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP21-Lösung	4320	4,2845	--	4,2845	3,2163	0,75	1,9428	40	750,7
310	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP21-Lösung	4320	3,9004	--	3,9004	3,2202	0,83	2,0081	38	825,6
311	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP21-Lösung	10080	3,8504	--	3,8504	1,2926	0,34	0,2529	80	335,7
312	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP21-Lösung	10080	3,87	--	3,87	1,2900	0,33	0,3403	74	333,3
313	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP21-Lösung	10080	3,9148	--	3,9148	3,2184	0,82	1,9797	38	822,1
314	Morsleben Hartsalz, getrocknet		IP21-Lösung	10080	4,193	--	4,193	3,2107	0,77	1,964	39	765,7

Forts. Tab. 0.18: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Morsleben Hartsalz getrocknet mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt												
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]	
303	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrit	Langbeinit	Halit	Sylvin								37689	
304	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrit	Langbeinit	Halit	Sylvin								37582	
305	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrit	Langbeinit	Carnallit	Halit	Sylvin							37758	
306	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Carnallit	Langbeinit	Halit	Sylvin								22986	
307	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrit	Halit	Sylvin									21516	
308	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrit	Carnallit	Halit	Sylvin								26788	
309	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrit	Halit	Sylvin			Sylvin						23509	
310	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrit	Halit	Sylvin			Sylvin						15745	
311	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrit	Carnallit	Halit	Sylvin								13037	
312	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Starkeyit	Pentahydrit	Halit	Sylvin		Halit	Sylvin					15808	
313	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrit	Halit	Sylvin									18438	
314	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Starkeyit	Carnallit	Pentahydrit	Halit	Sylvin							11888	

Forts. Tab. 0.18: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Morsleben Hartsalz getrocknet mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
303	6805	9976	103563	50822	63,9	1,328	0,1328							
304	5980	8323	106130	49677	59,41	1,329	0,1329							
305	6610	10126	99997	49101	61,32	1,324	0,1324							
306	5528	7224	104028	47826	65,65	1,323	0,1323							
307	1814	905,2	128640	42782	20,68	1,361	0,1361							
308	373,6	255	26599	8710	1,039	1,347	0,0269							
309	3322	3026	114168	41965	16,97	1,346	0,1346							
310	6161	9093	102093	44971	32,59	1,344	0,1344							
311	2193	1230	119793	36122	8,093	1,336	0,1336							
312	2387	1375	116700	37462	18,5	1,338	0,1338							
313	6029	8234	101313	42953	29,24	0,318	0,1318							
314	4893	6125	104373	45261	19,38	1,326	0,1326							

Tab. 0.19: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Morsleben Hartsalz getrocknet und Kieserit getrocknet mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
315	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP9-Lösung	1440	3,947	--	3,947	1,2088	0,31	0,2751	77	306,3
316	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP9-Lösung	1440	3,6961	--	3,6961	1,2227	0,33	0,4631	62	330,8
317	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP9-Lösung	1440	3,656	--	3,656	3,0587	0,84	2,5274	17	836,8
318	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP9-Lösung	1440	4,2309	--	4,2309	3,0558	0,72	2,4736	19	722,3
319	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP9-Lösung	4320	3,9804	--	3,9804	1,2221	0,31	0	100	307,0
320	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP9-Lösung	4320	4,0375	--	4,0375	1,2255	0,30	0	100	303,5
321	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP9-Lösung	4320	3,9803	--	3,9803	3,0671	0,77	2,0576	33	770,6
322	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP9-Lösung	4320	3,6525	--	3,6525	3,0726	0,84	2,2658	26	841,2
323	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP9-Lösung	10080	4,1521	--	4,1521	1,2134	0,29	0	100	292,2
324	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP9-Lösung	10080	4,0783	--	4,0783	1,2021	0,29	0	100	294,8
325	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP9-Lösung	10080	4,3491	--	4,3491	3,0656	0,70	1,8695	39	704,9
326	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP9-Lösung	10080	4,0644	--	4,0644	3,0545	0,75	1,5994	48	751,5

Forts. Tab. 0.19: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Morsleben Hartsalz getrocknet und Kieserit getrocknet mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamt- wasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]
315	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Langbeinit	Halit	Sylvin							12847	
316	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Langbeinit	Halit	Sylvin							15420	
317	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Langbeinit	Picromerit	Halit	Sylvin						16941	
318	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Langbeinit	Halit			Quarz	Sylvin	Kohlenstoff	Halit		130994	24583
319	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Langbeinit	Hexahydrat	Halit	Sylvin	Dolomit	Cristobalit	Halit	Sylvin		129275	26780
320	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Langbeinit	Halit	Sylvin		Dolomit	Cristobalit	Halit	Kohlenstoff		87663	10876
321	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Halit	Sylvin			Eitelit	Dolomit	Cristobalit	Halit		92585	11751
322	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Langbeinit	Halit	Sylvin		Perovskit	Natisite	Quarz	Halit		119508	23322
323	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Langbeinit	Halit	Sylvin		Melanterit	Halit	Sylvin			133919	29510
324	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Langbeinit	Halit	Sylvin		Eitelit	Cristobalit	Halit	Kohlenstoff		75471	10831
325	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Langbeinit	Halit	Sylvin		Melanterit	Halit	Quarz			95543	13809
326	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Langbeinit	Hexahydrat	Halit	Sylvin	Titanit	Rutil	Kupfersulfat	Bischofit		101649	120710

Forts. Tab. 0.19: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Morsleben Hartsalz getrocknet und Kieserit getrocknet mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
315								16870	29480	65,98	92122	88268		
316									29770	57,18	86134	92523		
317									27730	154,4	62813	150080		
318									26760	129,8	65106	149181		
319														
320														
321									29990	109,4	63083	135548		
322									27930	110,3	66791	142170		
323														
324														
325									34240	81,71	62924	156911		
326									36020	73,09	640400	148252		

Tab. 0.20: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Morsleben Hartsalz getrocknet und Kieserit getrocknet mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reaktions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
327	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP21- Lösung	1440	3,7488	--	3,7488	1,2727	0,34	0,0487	96	339,5
328	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP21- Lösung	1440	3,973	--	3,973	1,2520	0,32	0,035	97	315,1
329	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP21- Lösung	1440	3,9758	--	3,9758	3,1622	0,80	2,1505	32	795,4
330	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP21- Lösung	1440	4,1469	--	4,1469	3,1679	0,76	2,1859	31	763,9
331	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP21- Lösung	4320	3,9852	--	3,9852	1,2788	0,32	0,0313	98	320,9
332	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP21- Lösung	4320	4,0321	--	4,0321	1,2720	0,32	0,0094	99	315,5
333	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP21- Lösung	4320	4,0504	--	4,0504	3,1836	0,79	1,9542	39	786,0
334	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP21- Lösung	4320	4,0441	--	4,0441	3,1901	0,79	1,9449	39	788,8
335	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP21- Lösung	10080	4,3927	--	4,3927	1,2719	0,29	0	100	289,5
336	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP21- Lösung	10080	4,1847	--	4,1847	1,2706	0,30	0	100	303,6
337	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP21- Lösung	10080	4,3219	--	4,3219	3,1371	0,73	1,7561	44	725,9
338	Morsleben Hartsalz, getrocknet	Kieserit, getrocknet	IP21- Lösung	10080	4,0537	--	4,0537	3,1738	0,78	1,8256	42	782,9

Forts. Tab. 0.20: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Morsleben Hartsalz getrocknet und Kieserit getrocknet mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamt- wasser [mg/kg]	Haft- wasser [mg/kg]	Kristall- wasser [mg/kg]
327	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Hexahydrat	Halit	Sylvin		Perovskit	Kupfersulfat	Polyhalit	Quarz		105800	114361
328	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Halit	Sylvin			Dolomit	Polyhalit	Calcit			49846	51544
329	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Carnallit	Langbeinit	Halit	Sylvin	Polyhalit					67653	70955
330	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Carnallit	Picromerit	Langbeinit	Halit	Sodiumalum	Aragonit	Polyhalit	Quarz		105189	11361
331	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Carnallit	Hexahydrat	Gips	Halit	Kupfersulfat	Rutil	Quarz	Halit		97875	107480
332	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Carnallit	Polyhalit	Halit		Perovskit	Kohlenstoff	Cristobalit			59867	57063
333	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Carnallit	Hexahydrat	Langbeinit	Polyhalit	Perovskit	Calcit	Rutil	Cristobalit		60156	63333
334	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Carnallit	Langbeinit	Halit	Sylvin	Kohlenstoff	Halit	Sanderit	Magnesit		105633	73683
335	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Carnallit	Bischofit	Halit			Quarz	Kohlenstoff				94439	79917
336	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Hexahydrat	Langbeinit	Halit		Kohlenstoff					92372	57562
337	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Carnallit	Langbeinit	Halit	Sylvin	Quarz	Kohlenstoff				91976	59006
338	Halit, Sylvin, MgSO ₄	Pentahydrat	Langbeinit	Hexahydrat	Halit		Kohlenstoff					85778	41479

Forts. Tab. 0.20: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Morsleben Hartsalz getrocknet und Kieserit getrocknet mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
327									1243	192,5	125127	41785		
328									901,8	195,9	138880	46102		
329									6802	84,34	103693	48598		
330									12420	70,95	96412	53992		
331									1039	198	142317	46598		
332														
333									3506	80,54	116527	48389		
334									1517	54,37	123473	46381		
335														
336														
337									2051	57,28	118230	43595		
338									3065	64,73	115530	45422		

Tab. 0.21: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Natriumsulfat mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
35	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	0	3,895	--	3,895	1,249	0,32	1,2088	3	320,7
36	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	0	4,0312	--	4,0312	1,244	0,31	1,1996	4	308,6
39	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	3,8096	--	3,8096	1,2525	0,33	1,2378	1	328,8
40	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	3,5784	--	3,5784	1,2453	0,33	1,193	4	348,0
43	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	0	3,6145	--	3,6145	2,7956	0,77	2,8685	-3	773,4
44	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	0	4,2135	--	4,2135	2,9786	0,71	3,0331	-2	706,9
47	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	4,1927	--	4,1927	3,0845	0,74	3,1456	-2	735,7
48	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	4,1023	--	4,1023	3,0794	0,75	3,1497	-2	750,7
51	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	0	1,8971	1,8971	3,7942	1,249	0,33	1,2452	0	329,2
52	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	0	1,97955	1,97955	3,9591	1,2354	0,31	1,2224	1	312,0
55	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	60	1,98705	1,98705	3,9741	1,2501	0,31	1,2035	4	314,6
56	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	60	2,02405	2,02405	4,0481	1,2389	0,31	1,1949	4	306,0
59	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	0	1,87875	1,87875	3,7575	3,0945	0,82	3,1755	-3	823,6
60	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	0	1,95605	1,95605	3,9121	3,065	0,78	3,1684	-3	783,5
63	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP9-Lösung	60	2,0137	2,0137	4,0274	3,1099	0,77	3,1695	-2	772,2

Forts. Tab. 0.21: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Natriumsulfat mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]
35	Thenardit	Thenardit	Halit								21577	19820	1757
36	Thenardit	Thenardit	Halit								61550	33810	27740
39	Thenardit	Thenardit	Halit								13573	12210	1363
40	Thenardit	Thenardit	Halit								85805	11330	74475
43	Thenardit	Thenardit	Halit								14392	12030	2362
44	Thenardit	Thenardit	Halit								94986	14940	80046
47	Thenardit	Thenardit	Halit								7166	5700	1466
48	Thenardit	Thenardit	Halit								14080	11350	2730
51	Thenardit	Thenardit	Halit								6123	5400	723
52	Thenardit	Halit	Thenardit								18499	16510	1989
55	Thenardit	Thenardit	Halit								5709	5140	569
56	Thenardit	Thenardit	Halit								16609	15660	949
59	Thenardit	Thenardit	Halit								8198	7430	768
60	Thenardit	Thenardit	Halit								6527	6050	477
63	Thenardit	Halit	Thenardit								63945	2020	61925
64	Thenardit	Halit	Thenardit								79529	1430	78099

Forts. Tab. 0.21: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Natriumsulfat mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte g/cm ³	Masse [g]
35				n.a.	n.a.	n.a.	n.a.							
36	236868	62820	43841	306901	283,2	1,32	0,1316							
39	74765	24099	64814	263590	n.a.	1,31	0,1307							
40	109355	30947	21881	131796	15,55	1,31	0,1314							
43	98167	31944	22768	114723	335,8	1,29	0,0258							
44	78965	27208	65069	283390	8,582	1,27	0,1265							
47	63537	22107	65570	232142	n.a.	1,29	0,2586							
48	94684	30492	22360	106047	184,1	1,28	0,2569							
51	57310	23210	65325	210769	n.a.	1,29	0,2575							
52	95122	32284	24091	111287	134,1	1,29	0,2577							
55	109900	35455	25333	122668	127,5	1,29	0,257							
56	95477	31209	23087	113479	108,1	1,28	0,256							
59	99772	31815	23705	113717	117	1,28	0,2564							
60	98616	34356	24943	116191	128,1	1,3	0,2601							
63	90162	31066	22583	106025	257,1	1,3	0,2596							
64	88944	29953	22209	106106	119,5	1,29	0,2576							

Tab. 0.22: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Natriumsulfat mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reaktions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
37	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	0	3,7351	--	3,7351	1,3005	0,35	0,9525	27	348,2
38	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	0	3,9339	--	3,9339	1,2917	0,33	0,9349	28	328,4
41	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	60	3,8113	--	3,8113	1,3127	0,34	0,9451	28	344,4
42	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	60	3,674	--	3,674	1,2881	0,35	0,9459	27	350,6
45	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	0	3,7834	--	3,7834	2,3155	0,61	1,9067	18	612,0
46	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	0	4,3483	--	4,3483	3,2294	0,74	2,77	14	742,7
49	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	60	3,9568	--	3,9568	3,0554	0,77	2,5444	17	772,2
50	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	60	4,17	--	4,17	3,1257	0,75	2,6019	17	749,6
53	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP21-Lösung	0	1,86975	1,86975	3,7395	1,2961	0,35	1,0081	22	346,6
54	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP21-Lösung	0	1,82575	1,82575	3,6515	1,2925	0,35	1,0197	21	354,0
57	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP21-Lösung	60	2,0215	2,0215	4,043	1,3054	0,32	0,9162	30	322,9
58	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP21-Lösung	60	1,9137	1,9137	3,8274	1,2858	0,34	0,9518	26	335,9
61	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP21-Lösung	0	1,81655	1,81655	3,6331	3,1492	0,87	2,6598	16	866,8
62	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP21-Lösung	0	2,0268	2,0268	4,0536	3,175	0,78	2,7252	14	783,3
65	Na ₂ SO ₄ , wasserfrei	Steinsalz	IP21-Lösung	60	2,00295	2,00295	4,0059	3,155	0,79	2,6366	16	787,6

Forts. Tab. 0.22: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Natriumsulfat mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt												
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]	
37	Thenardit	Thenardit	Halit	Blödit								60761	29770	30991
38	Thenardit	Thenardit	Halit	Blödit								13059	11200	1859
41	Thenardit	Thenardit	Halit	Blödit	Carnallit							85488	17880	67608
42	Thenardit	Thenardit	Halit	Blödit	D'Ansit							13004	12070	934
45	Thenardit	Blödit	Thenardit	Halit	Carnallit							97791	16960	80831
46	Thenardit	Thenardit	Blödit	Halit	Carnallit							10821	4930	5891
49	Thenardit	Thenardit	Halit	Blödit								14119	11460	2659
50	Thenardit	Thenardit	Halit	Blödit								6680	6030	650
53	Thenardit	Halit	Thenardit	Blödit								6941	5570	1371
54	Thenardit	Halit	Thenardit	Blödit								6237	4830	1407
57	Thenardit	Thenardit	Halit	Blödit								17363	16410	953
58	Thenardit	Thenardit	Halit	Blödit								8136	7280	856
61	Thenardit	Halit	Thenardit	Hexahydrit								11039	10260	779
62	Thenardit	Halit	Thenardit	Blödit								61365	2370	58995
65	Thenardit	Halit	Thenardit	Hexahydrit								55324	3250	52074
66	Thenardit	Halit	Thenardit	Starkeyit								65569	4120	61449

Forts. Tab. 0.22: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Natriumsulfat mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
37	114920	31907	23040	158315	151,2	1,38	0,1382							
38	179505	56595	144293	602746	140,1	1,38	0,1377							
41	130533	36616	26390	181823	66,33	1,38	0,1382							
42	71106	24388	58087	254740	n.a.	1,38	0,1378							
45	96127	30340	23099	111926	172,4	1,33	0,2666							
46	63870	24120	67643	230023	9,92	1,35	0,2696							
49	95142	30175	22334	102170	148,7	1,33	0,2656							
50	63591	25282	63379	203498	6,64	1,35	0,2693							
53	60618	27600	65683	221975	n.a.	1,36	0,2713							
54	59467	27068	64137	216271	n.a.	1,36	0,2712							
57	59789	25026	61424	212037	n.a.	1,35	0,2702							
58	58532	24685	61797	214964	n.a.	1,36	0,2723							
61	49195	21582	51373	152130	n.a.	1,14	0,227							
62	59141	25897	73183	237721	n.a.	1,36	0,2729							
65	61813	26938	76291	243056	68,1	1,36	0,2727							
66	54701	24551	67652	214697	8,853	1,36	0,271							

Tab. 0.23: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Kaliumsulfat mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reaktions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungsrück- haltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/k]
67	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	4,9616	--	4,9616	1,2598	0,25	1,1696	7	253,9
68	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	4,8089	--	4,8089	1,2443	0,26	1,1482	8	258,7
69	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	4,9379	--	4,9379	3,0685	0,62	3,0114	2	621,4
70	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	5,3351	--	5,3351	3,0702	0,58	2,9964	2	575,5
71	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	1440	4,8473	--	4,8473	1,2493	0,26	1,1329	9	257,7
72	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	1440	4,566	--	4,566	1,2525	0,27	1,1508	8	274,3
73	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	1440	5,0677	--	5,0677	3,04	0,60	2,8501	6	599,9
74	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	1440	5,3451	--	5,3451	3,0464	0,57	2,8993	5	569,9
75	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	2880	4,8132	--	4,8132	1,2444	0,26	1,1088	11	258,5
76	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	2880	4,8486	--	4,8486	1,2431	0,26	1,1236	10	256,4
77	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	2880	5,0956	--	5,0956	3,0321	0,60	2,7867	8	595,0
78	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	2880	4,915	--	4,915	3,0882	0,63	2,8408	8	628,3
79	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	4320	4,6453	--	4,6453	1,2422	0,27	1,1038	11	267,4
80	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	4320	4,9706	--	4,9706	1,2421	0,25	1,0925	12	249,9
81	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP9-Lösung	4320	4,3849	--	4,3849	3,1004	0,71	2,3151	25	707,1

Forts. Tab. 0.23: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Kaliumsulfat mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]
67	Arcanit										55398	4300	51098
68	Arcanit										71457	3890	67567
69	Arcanit										42352	5800	36552
70	Arcanit										48868	1010	47858
71	Arcanit										58139	2560	55579
72	Arcanit										72225	3500	68725
73	Arcanit										64207	2120	62087
74	Arcanit										56688	2800	53888
75	Arcanit										61786	3060	58726
76	Arcanit										75938	2270	73668
77	Arcanit										89595	4640	84955
78	Arcanit										211495	79740	131755
79	Arcanit										244062	58960	185102
80	Arcanit										247516	41800	205716
81	Arcanit										188768	36480	152288
82	Arcanit										151471	7967	143504

Forts. Tab. 0.23: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Kaliumsulfat mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
67	21275	94240	21265	32838	76,19	1,22	0,1216							
68	21775	93068	21065	32728	68,25	1,21	0,1213							
69	57915	74400	20515	43705	136	1,24	0,1239							
70	57678	75235	20595	44963	128,4	1,24	0,1244							
71	21815	90140	21135	31870	67,54	1,21	0,1211							
72	21148	89873	21248	32209	47,39	1,21	0,1208							
73	33770	83863	21223	36803	74,34	1,22	0,1224							
74	33505	83435	21245	36893	66,27	1,23	0,1225							
75	22620	91753	22340	34247	52,88	1,22	0,1222							
76	24125	91238	22273	33627	40,95	1,22	0,122							
77	23998	88370	21420	35365	60,59	1,22	0,1218							
78	26753	88738	21220	34746	74,51	1,22	0,1222							
79	24535	89425	21398	31880	53,29	1,21	0,121							
80	23918	89193	21325	31630	50,93	1,2	0,2393							
81	28733	89340	21713	32669	62,03	1,22	0,1219							
82	32403	86495	21780	32719	45,89	1,22	0,1223							

Tab. 0.24: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Kaliumsulfat mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
83	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	60	4,9842	--	4,9842	1,2876	0,26	0,7452	42	258,3
84	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	60	4,9961	--	4,9961	1,2928	0,26	0,7565	41	258,8
85	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	60	4,6194	--	4,6194	3,2298	0,70	2,5479	21	699,2
86	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	60	4,9927	--	4,9927	3,2258	0,65	2,4737	23	646,1
87	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	1440	4,6844	--	4,6844	1,2882	0,27	0,7299	43	275,0
88	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	1440	4,8955	--	4,8955	1,2912	0,26	0,7139	45	263,8
89	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	1440	4,8415	--	4,8415	3,2464	0,67	2,395	26	670,5
90	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	1440	5,0692	--	5,0692	3,2279	0,64	2,4254	25	636,8
91	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	2880	4,6858	--	4,6858	1,2887	0,28	0,7165	44	275,0
92	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	2880	4,8841	--	4,8841	1,2833	0,26	0,72	44	262,8
93	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	2880	4,9476	--	4,9476	3,2493	0,66	2,3624	27	656,7
94	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	2880	5,1036	--	5,1036	3,2358	0,63	2,2707	30	634,0
95	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	4320	5,0054	--	5,0054	1,2885	0,26	0,7086	45	257,4
96	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	4320	4,9998	--	4,9998	1,2893	0,26	0,7274	44	257,9
97	K ₂ SO ₄ , wasserfrei		IP21-Lösung	4320	4,8159	--	4,8159	3,2207	0,67	2,3931	26	668,8

Forts. Tab. 0.24: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Kaliumsulfat mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt												
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]	
83	Arcanit											185995	46510	139485
84	Arcanit											176224	40200	136024
85	Arcanit											221639	38920	182719
86	Arcanit											223361	35800	187561
87	Arcanit											197163	19050	178113
88	Arcanit											219928	52530	167398
89	Arcanit											179590	53770	125820
90	Arcanit											280827	11440	269387
91	Arcanit											226463	18320	208143
92	Arcanit											250015	16220	233795
93	Arcanit											257424	16960	240464
94	Arcanit											219476	9990	209486
95	Arcanit											213604	16190	197414
96	Arcanit											239526	15140	224386
97	Arcanit											254457	15820	238637
98	Arcanit											300468	6170	294298

Forts. Tab. 0.24: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Kaliumsulfat mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
83	14710	84780	29205	39400	87,22	1,22	0,1219							
84	14945	84953	29635	40119	88,74	1,22	0,1221							
85	12200	44355	65188	76014	84,46	1,28	0,1278							
86	12355	49193	62908	73587	77,73	1,28	0,1282							
87	15525	84965	28675	38911	84,97	1,22	0,122							
88	15313	84843	28580	38551	90,65	1,21	0,1214							
89	12610	40930	65390	45452	67,22	1,26	0,1264							
90	12230	46120	62430	63579	67,21	1,27	0,1268							
91	15470	85240	28530	38351	60,59	1,22	0,1215							
92	15610	85920	28670	39160	72,52	1,22	0,1217							
93	12720	46770	59460	49677	57,84	1,26	0,1258							
94	13380	56560	53470	63400	75,61	1,26	0,1255							
95	16040	85930	29380	40359	62,43	1,21	0,1214							
96	14000	86450	29240	40149	65,6	1,22	0,1219							
97	12300	43750	62940	53153	53,12	1,26	0,2516							
98	13410	51690	58220	60493	56,46	1,26	0,2515							

Tab. 0.25: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Kaliumchlorid + Magnesiumsulfat 1 : 1 (mol) mit IP9-Lösung und mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reaktions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
99	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP9-Lösung	1440	1,0719	1,7306	2,8025	1,2159	0,43	0	100	433,9
100	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP9-Lösung	1440	1,1273	1,8201	2,9474	1,2081	0,41	0	100	409,9
101	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP9-Lösung	1440	1,0718	1,7304	2,8022	3,0369	1,08	1,5857	48	1083,8
102	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP9-Lösung	1440	1,1412	1,8424	2,9836	2,9273	0,98	1,3515	54	981,1
103	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP9-Lösung	4320	0,9388	1,5156	2,4544	1,2155	0,50	0	100	495,2
104	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP9-Lösung	4320	1,0268	1,6578	2,6846	1,2136	0,45	0	100	452,1
105	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP9-Lösung	4320	1,0139	1,6368	2,6507	3,0503	1,15	1,5656	49	1150,8
106	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP9-Lösung	4320	0,9969	1,6095	2,6064	3,0671	1,18	1,5544	49	1176,8
107	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP9-Lösung	10080	1,1516	1,8592	3,0108	1,1695	0,39	0	100	388,4
108	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP9-Lösung	10080	1,1046	1,7833	2,8879	1,1833	0,41	0	100	409,7
109	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP9-Lösung	10080	1,0318	1,6658	2,6976	3,0023	1,11	1,4307	52	1113,0
110	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP9-Lösung	10080	1,0071	1,626	2,6331	3,0069	1,14	1,2052	60	1142,0
111	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP21-Lösung	1440	1,0785	1,7412	2,8197	1,2776	0,45	0	100	453,1
112	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP21-Lösung	1440	1,0381	1,6759	2,714	1,2757	0,47	0	100	470,0
113	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP21-Lösung	1440	1,1354	1,8331	2,9685	3,212	1,08	1,1698	64	1082,0

Forts. Tab. 0.25: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Kaliumchlorid + Magnesiumsulfat 1 : 1 (mol) mit IP9-Lösung und mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt												
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]	
99	Sylvin	Pentahydrat	Sylvin									325713	6620	319093
100	Sylvin	Pentahydrat	Sylvin									262328	11570	250758
101	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Kainit								255792	12500	243292
102	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Kainit								118594	28480	90114
103	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Kainit			Halit					168888	33650	135238
104	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Kainit			Halit					217681	39670	178011
105	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Kainit	Pentahydrat		Halit					159429	37150	122279
106	Sylvin	Kainit	Sylvin	Starkeyit	Hexahydrat		Langbeinit					234318	9120	225198
107	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Kainit			Gips	Polyhalit	Arcanit			228767	7140	221627
108	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Kainit								202963	6280	196683
109	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Kainit	Langbeinit	Halit						173984	5820	168164
110	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Kainit	Halit									
111	Sylvin	Carnallit	Sylvin	Hexahydrat	Polyhalit									
112	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Carnallit	Chloromagnesit									
113	Sylvin	Carnallit	Sylvin	Kainit	Starkeyit									
114	Sylvin	Carnallit	Sylvin	Kainit	Chloromagnesit									

Forts. Tab. 0.25: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Kaliumchlorid + Magnesiumsulfat 1 : 1 (mol) mit IP9-Lösung und mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
99														
100														
101	41071	42252	83176	133338	80,49	1,31	0,131							
102	32898	40319	90897	122427	64,81	1,31	0,1306							
103														
104														
105	30020	39904	95291	119572	41,23	1,32	0,1321							
106	28383	37001	83120	109799	45,98	1,31	0,1313							
107														
108														
109	22383	31281	83657	86352	58,49	1,31	0,1307							
110	21804	31481	93849	95804	54,06	1,3	0,1302							
111														
112														
113	3469	2792	141740	42003	65,8	1,35	0,1347							
114	4484	4153	124915	40872	73,23	1,34	0,134							

Tab. 0.26: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Kaliumchlorid + Magnesiumsulfat 1 : 1 (mol) mit IP21-Lösung und mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reaktions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
115	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP21-Lösung	4320	1,0343	1,6699	2,7042	1,2471	0,46	0	100	461,2
116	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP21-Lösung	4320	1,0304	1,6636	2,694	1,2155	0,45	0	100	451,2
117	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP21-Lösung	4320	1,0664	1,7217	2,7881	3,0389	1,09	0,9183	70	1090,0
118	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP21-Lösung	4320	1,014	1,6371	2,6511	2,8852	1,09	0,7923	73	1088,3
119	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP21-Lösung	10080	0,9736	1,5718	2,5454	1,2267	0,48	0	100	481,9
120	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP21-Lösung	10080	0,9626	1,5541	2,5167	1,2578	0,50	0	100	499,8
121	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP21-Lösung	10080	0,9977	1,6109	2,6086	3,0844	1,18	0,9934	68	1182,4
122	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP21-Lösung	10080	0,9802	1,5826	2,5628	3,0072	1,17	1,1208	63	1173,4
123	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP9-Lösung	4320	1,6134	2,6049	4,2183	1,2199	0,29	0	100	289,2
124	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP9-Lösung	4320	1,6635	2,6856	4,3491	1,2033	0,28	0	100	276,7
125	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP9-Lösung	4320	1,5554	2,5113	4,0667	3,0078	0,74	0,1167	96	739,6
126	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP9-Lösung	4320	1,5159	2,4473	3,9632	3,0148	0,76	0,4272	86	760,7
127	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP21-Lösung	4320	1,5672	2,5302	4,0974	1,276	0,31	0	100	311,4
128	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP21-Lösung	4320	1,5717	2,5376	4,1093	1,283	0,31	0	100	312,2
129	KCl	MgSO ₄ , wasserfrei	IP21-Lösung	4320	1,6375	2,6437	4,2812	3,1667	0,74	0,106	97	739,7

Forts. Tab. 0.26: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Kaliumchlorid + Magnesiumsulfat 1 : 1 (mol) mit IP21-Lösung und mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]
115	Sylvin	Carnallit	Sylvin	Starkeyit	Kieserit	Polyhalit							
116	Sylvin	Carnallit	Sylvin	Starkeyit	Polyhalit								
117	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Carnallit	Polyhalit								
118	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Carnallit	Polyhalit								
119	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Carnallit	Polyhalit								
120	Sylvin	Carnallit	Sylvin	Polyhalit	Hexahydrit								
121	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Polyhalit	Carnallit	Blödit							
122	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Polyhalit	Carnallit	Kainit							
123	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Hexahydrit	Kainit	Polyhalit							
124	Sylvin	Hexahydrit	Sylvin	Starkeyit	Kainit	Polyhalit							
125	Sylvin	Kainit	Sylvin	Starkeyit	Carnallit	Leonit							
126	Sylvin	Kainit	Sylvin	Starkeyit	Arcanit	Polyhalit						66410	
127	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Carnallit	Hexahydrit	Polyhalit						90640	
128	Sylvin	Hexahydrit	Sylvin	Carnallit	Kainit	Starkeyit						169560	
129	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Carnallit	Bischofit							118100	
130	Sylvin	Starkeyit	Sylvin	Kainit	Bischofit							49760	

Forts. Tab. 0.26: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Kaliumchlorid + Magnesiumsulfat 1 : 1 (mol) mit IP21-Lösung und mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
115														
116														
117	4041	3403	153633	53220	56,07	1,35	0,1353							
118	1995	1197	130890	31252	57,43	1,35	0,1346							
119														
120														
121	1867	1031	156008	28522	91,68	1,34	0,1339							
122	2252	1439	124523	30122	64,38	1,33	0,1331							
123														
124														
125	24874	31991	64915	104582	399,2	1,31	0,0261							
126	24699	31683	78848	90338	59,02	1,31	0,1307							
127														
128														
129	2530	2035	111265	33214	313,8	1,35	0,0269							
130														

Tab.0.27: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Calciumchlorid mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reaktions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff	Überstehende Lösung
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]	[g]
131	CaCl ₂ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	3,1073	--	3,1073	1,1372	0,37	0	100	366,0	
132	CaCl ₂ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	2,7348	--	2,7348	1,198	0,44	0,0984	92	438,1	
133	CaCl ₂ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	3,0672	--	3,0672	3,0072	0,98	0,2942	90	980,4	1,0817
134	CaCl ₂ , wasserfrei		IP9-Lösung	60	2,9347	--	2,9347	2,395	0,82	0,3282	86	816,1	0,4459
135	CaCl ₂ , wasserfrei		IP9-Lösung	1440	2,9719	--	2,9719	1,1435	0,38	0,0477	96	384,8	
136	CaCl ₂ , wasserfrei		IP9-Lösung	1440	2,8714	--	2,8714	1,0852	0,38	0	100	377,9	
137	CaCl ₂ , wasserfrei		IP9-Lösung	1440	2,8942	--	2,8942	2,7486	0,95	0,2661	90	949,7	0,3963
138	CaCl ₂ , wasserfrei		IP9-Lösung	1440	3,0454	--	3,0454	2,7002	0,89	0,1832	93	886,6	0,3725

Forts. Tab. 0.27: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Calciumchlorid mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt												
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]	
131	CaCl ₂												58740	
132	CaCl ₂												148500	
133	CaCl ₂												154680	
134	CaCl ₂												53170	
135	CaCl ₂												101890	
136	CaCl ₂												89270	
137	CaCl ₂												117470	
138	CaCl ₂												43670	

Forts. Tab. 0.27: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Calciumchlorid mit IP9-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
131														
132	1697	9868	13732	238,9	274180	1,49	0,0297							
133	2971	26188	8497	534	297303	1,53	0,0305	44629	30998	51593	24176	2051		
134	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.b.	0,3282	45945	32829	44621	29957	1505		
135	2014	9481	14295	474,5	276940	1,49	0,0297							
136														
137	3196	13827	17125	342,6	297810	1,56	0,0311	23258	32616	73805	33615	292,8		
138	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.b.	0,1832	34364	33788	49731	27493	258,3		

Tab. 0.28:

Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Calciumchlorid mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff	Überstehende Lösung
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]	[g]
139	CaCl ₂ , wasserfrei		IP21-Lösung	60	2,6514	--	2,6514	1,2196	0,46	0	100	460,0	
140	CaCl ₂ , wasserfrei		IP21-Lösung	60	2,8607	--	2,8607	1,2209	0,43	0	100	426,8	
141	CaCl ₂ , wasserfrei		IP21-Lösung	60	2,8645	--	2,8645	2,576	0,90	0,3383	87	899,3	0,2346
142	CaCl ₂ , wasserfrei		IP21-Lösung	60	2,4289	--	2,4289	2,5629	1,06	1,3144	49	1055,2	
143	CaCl ₂ , wasserfrei		IP21-Lösung	1440	2,7675	--	2,7675	1,1682	0,42	0	100	422,1	
144	CaCl ₂ , wasserfrei		IP21-Lösung	1440	2,8817	--	2,8817	1,0578	0,37	0	100	367,1	
145	CaCl ₂ , wasserfrei		IP21-Lösung	1440	2,8888	--	2,8888	2,7625	0,96	0,4816	83	956,3	0,1829
146	CaCl ₂ , wasserfrei		IP21-Lösung	1440	2,7892	--	2,7892	2,7837	1,00	0,1512	95	998,0	0,0804

Forts. Tab. 0.28: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Calciumchlorid mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt												
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]	
139	CaCl ₂												45240	
140	CaCl ₂												81370	
141	CaCl ₂												120620	
142	CaCl ₂													
143	CaCl ₂													
144	CaCl ₂													
145	CaCl ₂													
146	CaCl ₂													

Forts. Tab. 0.28: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Calciumchlorid mit IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
139														
140														
141	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.b.	0,3383	6492	8455	17957	95156	2214		
142	1825	4927	23039	n.a.	275297	1,51	0,1508							
143														
144														
145	1920	3008	92483	133,5	237677	1,49	0,1493	4044	3335	18611	101101	840,9		
146	2761	6351	27525	131	238600	1,49	0,0297	4062	3485	18868	92293	1147		

Tab. 0.29: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 26 „Reaktionsprodukte aus der Abgasreinigung und Verbrennung“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tionszeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff	Über- stehende Lösung
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]	[g]
147	CA 26, Produkte a.d. Abgasreinig.		IP9-Lösung	60	1,5173	--	1,5173	1,1707	0,77	0,1007	91	771,6	
148	CA 26, Produkte a.d. Abgasreinig.		IP9-Lösung	60	1,2461	--	1,2461	1,1950	0,96	0,1156	90	959,0	
149	CA 26, Produkte a.d. Abgasreinig.		IP9-Lösung	60	1,4477	--	1,4477	3,0570	2,11	0,9699	68	2111,6	
150	CA 26, Produkte a.d. Abgasreinig.		IP9-Lösung	60	1,6052	--	1,6052	3,0122	1,88	0,6075	80	1876,5	
151	CA 26, Produkte a.d. Abgasreinig.		IP9-Lösung	1440	1,7754	--	1,7754	1,1045	0,62	0,0237	98	622,1	
152	CA 26, Produkte a.d. Abgasreinig.		IP9-Lösung	1440	1,6183	--	1,6183	1,1493	0,71	0,046	96	710,2	
153	CA 26, Produkte a.d. Abgasreinig.		IP9-Lösung	1440	1,9163	--	1,9163	2,8432	1,48	1,8004	37	1483,7	
154	CA 26, Produkte a.d. Abgasreinig.		IP9-Lösung	1440	1,8099	--	1,8099	3,0796	1,70	1,6712	46	1701,5	
155	CA 26, Produkte a.d. Abgasreinig.		IP21-Lösung	60	1,2749	--	1,2749	1,2427	0,97	0,1	92	974,7	
156	CA 26, Produkte a.d. Abgasreinig.		IP21-Lösung	60	1,63	--	1,63	1,2022	0,74	0,0192	98	737,5	
157	CA 26, Produkte a.d. Abgasreinig.		IP21-Lösung	60	1,3283	--	1,3283	3,1591	2,38	0,9515	70	2378,3	0,5795
158	CA 26, Produkte a.d. Abgasreinig.		IP21-Lösung	60	1,3108	--	1,3108	3,1726	2,42	1,4439	54	2420,4	
159	CA 26, Produkte a.d. Abgasreinig.		IP21-Lösung	1440	1,9641	--	1,9641	1,2376	0,63	0	100	630,1	
160	CA 26, Produkte a.d. Abgasreinig.		IP21-Lösung	1440	1,9396	--	1,9396	1,2642	0,65	0	100	651,8	
161	CA 26, Produkte a.d. Abgasreinig.		IP21-Lösung	1440	2,0009	--	2,0009	3,1333	1,57	1,4835	53	1565,9	
162	CA 26, Produkte a.d. Abgasreinig.		IP21-Lösung	1440	1,9715	--	1,9715	3,1046	1,57	1,1037	64	1574,1	

Forts. Tab. 0.29: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 26 „Reaktionsprodukte aus der Abgasreinigung und Verbrennung“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
147	2648	32445	94,24	881	247250	1,51	0,0301							
148	2937	23345	153	1503	206383	1,34	0,0268							
149	5011	26262	48,01	46997	201047	1,43	0,1426	91974	36764	853,3	23911	17365		
150	2740	26056	30,3	2084	217847	1,36	0,1356	88922	34013	914,6	23370	28720		
151	2345	25765	93,65	2660	238910	1,46	0,0146							
152	2592	25189	302,1	2057	237147	1,39	0,0278							
153	5726	27266	21,74	277,7	184823	1,41	0,1409							
154	11414	30321	26,2	326,8	165123	1,37	0,1365							
155	2639	94179	4923	851,4	238860	1,49	0,0298							
156	2133	38385	651	791,5	265887	1,51	0,0151							
157	3678	9976	32334	880,1	174860	1,43	0,1428	10255	20536	389,4	93879	25350		
158	3869	7324	38960	223,4	144913	1,39	0,1387							
159														
160														
161	2131	34275	477,1	676,8	252353	1,51	0,1511							
162	3416	9298	32587	353,4	176065	1,42	0,1423							

Tab. 0.30: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 34 „Calciumchlorid“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
163	CA 34, Calciumchlorid		IP9-Lösung	60	2,2619	--	2,2619	1,1458	0,51	1,4112	-23	506,6
164	CA 34, Calciumchlorid		IP9-Lösung	60	2,2084	--	2,2084	1,1471	0,52	1,5072	-31	519,4
165	CA 34, Calciumchlorid		IP9-Lösung	60	2,2412	--	2,2412	2,8333	1,26	3,9023	-38	1264,2
166	CA 34, Calciumchlorid		IP9-Lösung	60	2,2	--	2,2	2,9532	1,34	4,2676	-45	1342,4
167	CA 34, Calciumchlorid		IP9-Lösung	1440	2,3751	--	2,3751	1,2545	0,53	2,0976	-67	528,2
168	CA 34, Calciumchlorid		IP9-Lösung	1440	2,2984	--	2,2984	1,2225	0,53	2,0674	-69	531,9
169	CA 34, Calciumchlorid		IP9-Lösung	1440	2,5769	--	2,5769	3,0536	1,18	4,7507	-56	1185,0
170	CA 34, Calciumchlorid		IP9-Lösung	1440	2,2628	--	2,2628	3,0331	1,34	4,5731	-51	1340,4
171	CA 34, Calciumchlorid		IP21- Lösung	60	1,871	--	1,871	1,5441	0,83	1,5119	2	825,3
172	CA 34, Calciumchlorid		IP21- Lösung	60	2,3177	--	2,3177	1,0679	0,46	1,142	-7	460,8
173	CA 34, Calciumchlorid		IP21- Lösung	60	1,8867	--	1,8867	3,0810	1,63	3,4603	-12	1633,0
174	CA 34, Calciumchlorid		IP21- Lösung	60	1,9619	--	1,9619	3,0767	1,57	2,9584	4	1568,2
175	CA 34, Calciumchlorid		IP21- Lösung	1440	2,38	--	2,38	1,0389	0,44	0,5501	47	436,5
176	CA 34, Calciumchlorid		IP21- Lösung	1440	2,1976	--	2,1976	1,2345	0,56	0,9681	22	561,7
177	CA 34, Calciumchlorid		IP21- Lösung	1440	2,1925	--	2,1925	3,1161	1,42	3,7708	-21	1421,3
178	CA 34, Calciumchlorid		IP21- Lösung	1440	2,2101	--	2,2101	3,0531	1,38	3,8629	-27	1381,4

Forts. Tab. 0.30: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 34 „Calciumchlorid“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]
163	CA 34												
164	CA 34												
165	CA 34												
166	CA 34	Sylvin											
167	CA 34	Halit	Sylvin										
168	CA 34	Sylvin											
169	CA 34	Sylvin											
170	CA 34												
171	CA 34	Halit	Sylvin										
172	CA 34												
173	CA 34	Blödit											
174	CA 34										170384	35297	135087
175	CA 34										171217	31999	139218
176	CA 34										154817	42110	112707
177	CA 34										144377	36054	108323
178	CA 34										189865	39249	150616

Forts. Tab. 0.30: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 34 „Calciumchlorid“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
163	1638	13705	12457	256,2	211520	n.b.	n.b.							
164	1765	16088	12831	221,5	228613	1,49	0,149							
165	6395	20354	15980	194,7	175383	1,43	0,1427							
166	3915	20434	15614	226,7	173173	1,4	0,1403							
167	1676	15292	12226	145,9	227513	1,49	0,1484							
168	1666	17335	13699	250,5	220650	1,49	0,149							
169	1792	15851	9118	92,18	223760	1,47	0,1465							
170	1919	17276	9288	111,1	223553	1,47	0,1474							
171	1319	3197	44443	104,1	185317	1,45	0,1451							
172	1421	3932	43884	158,3	185893	1,43	0,1433							
173	1320	3228	46087	108,9	181477	1,47	0,1465							
174	1339	3830	44590	92,87	180980	1,47	0,1471							
175	1326	3579	38009	138,6	185800	1,42	0,1423							
176	1391	3627	37425	119,6	196830	1,45	0,1453							
177	1347	2261	45726	68,85	181747	1,47	0,1465							
178	1229	2808	47754	67,25	179260	1,45	0,145							

Tab. 0.31: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 157 „Braunkohlenfilterstaub“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
275	CA 157, Filterstaub aus BKKW		IP9-Lösung	1440	4,2206	--	4,2206	1,2075	0,29	0,0725	94	286,1
276	CA 157, Filterstaub aus BKKW		IP9-Lösung	1440	3,5877	--	3,5877	1,2433	0,35	0,2828	77	346,5
277	CA 157, Filterstaub aus BKKW		IP9-Lösung	1440	3,7962	--	3,7962	3,1091	0,82	2,051	34	819,0
278	CA 157, Filterstaub aus BKKW		IP9-Lösung	1440	3,7668	--	3,7668	3,0838	0,82	2,0299	34	818,7
279	CA 157, Filterstaub aus BKKW		IP9-Lösung	4320	3,38	--	3,38	1,2353	0,37	0	100	365,5
280	CA 157, Filterstaub aus BKKW		IP9-Lösung	4320	3,7958	--	3,7958	1,2275	0,32	0	100	323,4
281	CA 157, Filterstaub aus BKKW		IP9-Lösung	4320	3,6384	--	3,6384	3,0745	0,85	1,7497	43	845,0
282	CA 157, Filterstaub aus BKKW		IP9-Lösung	4320	3,7634	--	3,7634	3,0965	0,82	1,731	44	822,8
283	CA 157, Filterstaub aus BKKW		IP21- Lösung	1440	3,8545	--	3,8545	1,2898	0,33	0	100	334,6
284	CA 157, Filterstaub aus BKKW		IP21- Lösung	1440	3,883	--	3,883	1,2889	0,33	0	100	331,9
285	CA 157, Filterstaub aus BKKW		IP21- Lösung	1440	3,5785	--	3,5785	3,2224	0,90	1,6493	49	900,5
286	CA 157, Filterstaub aus BKKW		IP21- Lösung	1440	3,3539	--	3,3539	3,2216	0,96	1,7466	46	960,6
287	CA 157, Filterstaub aus BKKW		IP21- Lösung	4320	4,1378	--	4,1378	1,2970	0,31	0	100	313,5
288	CA 157, Filterstaub aus BKKW		IP21- Lösung	4320	4,0432	--	4,0432	1,2806	0,32	0	100	316,7
289	CA 157, Filterstaub aus BKKW		IP21- Lösung	4320	4,0057	--	4,0057	3,2060	0,80	1,5185	53	800,4
290	CA 157, Filterstaub aus BKKW		IP21- Lösung	4320	4,0031	--	4,0031	3,2142	0,80	1,5101	53	802,9

Forts. Tab.0.31: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 157 „Braunkohlenfilterstaub“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt												
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]	
275	CA 157	Quarz	Gismondin	Anhydrit	Gehlenit	Halit						139150	39389	99761
276	CA 157	Quarz	Gismondin	Anhydrit	Gehlenit	Halit						110183	31584	78599
277	CA 157	Quarz	Anhydrit	Gips	Gismondin	Gehlenit						109081	35036	74045
278	CA 157	Quarz	Anhydrit	Gismondin	Gehlenit	Gips						131261	35693	95568
279	CA 157	Gismondin	Quarz	Gehlenit	Anhydrit	Halit						155495	43953	111542
280	CA 157	Anhydrit	Quarz	Gismondin	Gehlenit	Halit						97821	32586	65235
281	CA 157	Gehlenit	Anhydrit	Gismondin	Quarz	Gips						100356	29401	70955
282	CA 157	Gips	Anhydrit	Gehlenit	Quarz	Halit						76384	16432	59952
283	CA 157	Quarz	Gismondin	Anhydrit	Gips	Gehlenit						84088	15691	68397
284	CA 157	Quarz	Anhydrit	Gismondin	Gehlenit	Gips						82671	17316	65355
285	CA 157	Quarz	Anhydrit	Gismondin	Gips	Kohlenstoff						87018	18334	68684
286	CA 157	Anhydrit	Quarz	Gehlenit	Gips	Kohlenstoff						136705	21758	114947
287	CA 157	Quarz	Anhydrit	Gismondin	Gehlenit	Gips						134618	22167	112451
288	CA 157	Quarz	Anhydrit	Gehlenit	Gismondin	Gips						151197	23681	127516
289	CA 157	Anhydrit	Quarz	Gehlenit	Gips	Kohlenstoff						156723	27824	128899
290	CA 157	Quarz	Anhydrit	Gismondin	Gehlenit	Gips						139224	21794	117430

Forts. Tab. 0.31: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 157 „Braunkohlenfilterstaub“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
275	99963	32064	n.b.	1058	3648	1,225	0,0245							
276	99360	43411	n.b.	1622	8129	1,2	0,12							
277	88695	39169	288,8	833,9	13850	1,232	0,1232							
278	90538	36719	31,96	542,1	13023	1,221	0,1221							
279														
280														
281	88478	40224	163,4	755,1	12683	1,219	0,1219							
282	94245	39371	n.b.	696,1	12143	1,219	0,1219							
283														
284														
285	10855	25277	38719	1019	59549	1,282	0,1282							
286	10328	25466	59554	1451	33783	1,25	0,125							
287														
288														
289	10623	27448	42808	310,1	52697	1,281	0,1281							
290	54558	24345	43900	315,9	44130	1,279	0,1279							

Tab. 0.32: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 303 „Filterstaub aus Sonderabfallverbrennungsanlage" mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
339	CA 303		IP9-Lösung	1440	2,0374	--	2,0374	1,2445	0,61	0,3852	69	610,8
340	CA 303		IP9-Lösung	1440	2,147	--	2,147	1,2432	0,58	0,309	75	579,0
341	CA 303		IP9-Lösung	1440	2,1606	--	2,1606	3,0895	1,43	2,691	13	1429,9
342	CA 303		IP9-Lösung	1440	2,2118	--	2,2118	3,1032	1,40	2,6719	14	1403,0
343	CA 303		IP9-Lösung	4320	2,318	--	2,318	1,2468	0,54	0,2565	79	537,9
344	CA 303		IP9-Lösung	4320	2,0892	--	2,0892	1,2445	0,60	0,1928	85	595,7
345	CA 303		IP9-Lösung	4320	2,3324	--	2,3324	3,089	1,32	2,6895	13	1324,4
346	CA 303		IP9-Lösung	4320	2,202	--	2,202	3,1129	1,41	2,6266	16	1413,7
347	CA 303		IP21-Lösung	1440	2,2204	--	2,2204	1,2976	0,58	0,0415	97	584,4
348	CA 303		IP21-Lösung	1440	2,2432	--	2,2432	1,2846	0,57	0,0484	96	572,7
349	CA 303		IP21-Lösung	1440	2,2768	--	2,2768	3,2332	1,42	2,7892	14	1420,1
350	CA 303		IP21-Lösung	1440	2,1557	--	2,1557	3,2412	1,50	2,6487	18	1503,5
351	CA 303		IP21-Lösung	4320	2,2948	--	2,2948	1,2959	0,56	0,0179	99	564,7
352	CA 303		IP21-Lösung	4320	2,271	--	2,271	1,2957	0,57	0,0437	97	570,5
353	CA 303		IP21-Lösung	4320	2,0407	--	2,0407	3,2158	1,58	2,7714	14	1575,8
354	CA 303		IP21-Lösung	4320	2,1005	--	2,1005	3,2233	1,53	2,7586	14	1534,5

Forts. Tab. 0.32: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 303 „Filterstaub aus Sonderabfallverbrennungsanlage“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Gesamt- wasser [mg/kg]	Haft- wasser [mg/kg]	Kristall- wasser [mg/kg]
339	CA 303	Gunningit	Titanit	Rutil	Perovskit	Melanterit	Anhydrit	Kohlenstoff				86368	54088
340	CA 303	Natriumcarbonat	Rutil	Titanit	Perovskit	Polyhalit	Kohlenstoff					102045	53448
341	CA 303	Titanit	Gehlenit	Polyhalit	Perovskit	Rutil	Halit	Magnesit	Kohlenstoff			106158	57965
342	CA 303	Titanit	Gehlenit	Rutil	Perovskit	Polyhalit						106108	76050
343	CA 303	Titanit	Paranatisit	Rutil	Dolomit	Eitelit	Kohlenstoff					108017	24361
344	CA 303	Titanit	Rutil	Perovskit	Dolomit	Eitelit						95867	78117
345	CA 303	Rutil	Gehlenit	Polyhalit	Perovskit	Dolomit	Sylvin					97828	97144
346	CA 303	Rutil	Titanit	Perovskit	Eitelit	Dolomit	Kohlenstoff					102731	63487
347	CA 303	Picromerit	Rutil	Sodiumalum	Quarz	Aragonit						100090	85462
348	CA 303	Kieserit	Rutil	Titanit	Sodiumalum	Aragonit						83224	69760
349	CA 303	Bischofit	Titanit	Rutil	Gehlenit	Perovskit						86669	94805
350	CA 303	Bischofit	Rutil	Perovskit	Titanit	Quarz	Gupeiit	Quarz	Kohlenstoff			232822	29058
351	CA 303	Titanit	Picromerit	Rutil	Perovskit	Kupfersulfat	Gupeiit	Quarz	Kohlenstoff			226743	25731
352	CA 303	Lanarkit	Titanit	Sodiumalum	Perovskit	Aragonit	Quarz	Kohlenstoff					44148
353	CA 303	Bischofit	Titanit	Aragonit	Rutil	Dolomit	Gupeiit	Kohlenstoff					35963
354	CA 303	Titanit	Picromerit	Aragonit	Kupfersulfat	Dolomit	Quarz	Kohlenstoff				212177	21841

Forts. Tab. 0.32: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 303 „Filterstaub aus Sonderabfallverbrennungsanlage“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
339								99810	33727	257,3	23907	299056	1,241	
340								84020	34193	218,9	24053	251746	1,264	
341								81080	33043	207,1	23570	242937	1,241	
342								84470	33003	193,5	23300	253094	1,242	
343								76690	36087	175,2	26257	229783	1,247	
344								77430	36137	170,3	25840	232000	1,247	
345								77410	33010	179,9	22910	231940	1,242	
346								78100	33860	185,2	24153	234008	1,265	
347								5724	7745	179,4	98823	17151	1,24	
348								5545	7537	88,97	99347	16614	1,2	
349								5906	7809	20,44	101630	17696	1,308	
350								5891	7737	33,18	101943	17651	1,309	
351								5181	5962	109,3	101063	15524	1,25	
352								5086	6315	248,7	100357	15239	1,24	
353								5789	7526	16,87	101580	17345	1,301	
354								5463	7312	10,73	101707	16369	1,298	

Tab. 0.33: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 105 „Entschwefelungsschlacke“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
355	CA 105		IP9-Lösung	1440	3,4339	--	3,4339	1,2429	0,36	0,9697	22	361,9
356	CA 105		IP9-Lösung	1440	3,5095	--	3,5095	1,252	0,36	0,9594	23	356,7
357	CA 105		IP9-Lösung	1440	3,3902	--	3,3902	3,1031	0,92	2,8147	9	915,3
358	CA 105		IP9-Lösung	1440	3,723	--	3,723	3,1119	0,84	2,7835	11	835,9
359	CA 105		IP9-Lösung	4320	3,571	--	3,571	1,2468	0,35	0,8942	28	349,1
360	CA 105		IP9-Lösung	4320	3,5677	--	3,5677	1,2443	0,35	0,9	28	348,8
361	CA 105		IP9-Lösung	4320	3,6407	--	3,6407	3,1125	0,85	2,6869	14	854,9
362	CA 105		IP9-Lösung	4320	3,4496	--	3,4496	3,1058	0,90	2,656	14	900,3
363	CA 105		IP21-Lösung	1440	3,5591	--	3,5591	1,2768	0,36	0,8762	31	358,7
364	CA 105		IP21-Lösung	1440	3,5509	--	3,5509	1,304	0,37	0,8578	34	367,2
365	CA 105		IP21-Lösung	1440	3,5174	--	3,5174	3,2489	0,92	2,4335	25	923,7
366	CA 105		IP21-Lösung	1440	3,5672	--	3,5672	3,249	0,91	2,1689	33	910,8
367	CA 105		IP21-Lösung	4320	3,4947	--	3,4947	1,3044	0,37	0,8898	32	373,3
368	CA 105		IP21-Lösung	4320	3,4169	--	3,4169	1,3103	0,38	0,9096	31	383,5
369	CA 105		IP21-Lösung	4320	3,5034	--	3,5034	3,2381	0,92	2,0099	38	924,3
370	CA 105		IP21-Lösung	4320	3,6613	--	3,6613	3,2279	0,88	2,209	32	881,6

Forts. Tab. 0.33: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 105 „Entschwefelungsschlacke“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											Gesamt- wasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9					
355	CA 105	Pentahydrat	Albit	Anhydrit	Gips	Quarz	Quarz	Gupeiit	Kohlenstoff				210828	21469	
356	CA 105	Gaylussit	Pentahydrat	Halit	Gips	Anhydrit	Gupeiit	Quarz	Fersilicite	Kohlenstoff			255206	34271	
357	CA 105	Gaylussit	Halit	Gips	Anhydrit	Quarz	Gupeiit	Kohlenstoff					221076	29258	
358	CA 105	Gaylussit	Pentahydrat	Halit	Gips	Anhydrit	Kohlenstoff	Gupeiit					134411	115023	
359	CA 105	Gaylussit	Halit	Gips	Anhydrit	Quarz	Gupeiit	Kohlenstoff					128677	105463	
360	CA 105	Gaylussit	Pentahydrat	Gips	Halit	Quarz									
361	CA 105	Gaylussit	Halit	Gips	Quarz	Anhydrit									
362	CA 105	Gaylussit	Anhydrit	Gips	Calcit	Quarz	Kohlenstoff						130389	111084	
363	CA 105	Pentahydrat	Gips	Halit	Quarz	Kohlenstoff	Sylvin	Kohlenstoff					125979	92325	
364	CA 105	Gips	Pentahydrat	Halit	Quarz	Anhydrit									
365	CA 105	Gips	Halit	Quarz	Kohlenstoff										
366	CA 105	Pentahydrat	Gips	Quarz	Halit	Kohlenstoff	Sylvin						128126	45551	
367	CA 105	Gips	Pentahydrat	Quarz	Halit	Sylvin	Sylvin						129012	32977	
368	CA 105	Gips	Quarz	Halit	Kohlenstoff	Sylvin							123401	34879	
369	CA 105	Gips	Halit	Quarz	Kohlenstoff								117273	43633	
370	CA 105	Pentahydrat	Gips	Quarz	Kohlenstoff		Sylvin						132852	42062	

Forts. Tab. 0.33: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 105 „Entschwefelungsschlacke“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
355								118200	13943	n.b.	n.b.	354158	1,223	
356								114300	15123	n.b.	n.b.	342472	1,23	
357								10100	24590	232,7	7194	30262	1,229	
358								111400	23390	152,2	6356	333783	1,222	
359								138100	18080	n.b.	n.b.	413783	1,25	
360								130500	17930	n.b.	n.b.	391012	1,248	
361								119200	23487	151,1	2870	357154	1,2222	
362								119300	22863	12,91	1047	357453	1,242	
363								104200	4615	597,8	14613	312210	1,221	
364								98590	4508	705	18147	295401	1,217	
365								33870	5410	601,2	60550	101483	1,236	
366								36310	5383	704,1	58073	108794	1,233	
367								94930	4912	742,8	14037	284435	1,213	
368								89520	5005	751,6	17883	268225	1,215	
369								38500	5466	783,9	54790	115356	1,23	
370								35070	5632	689,4	58977	105079	1,228	

Tab. 0.34: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 301 „Reaktionsprodukte aus Abgasreinigung von Sondermüllverbrennung“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
371	CA 301		IP9-Lösung	1440	1,5288	--	1,5288	1,1238	0,74	0,1062	91	735,1
372	CA 301		IP9-Lösung	1440	1,5563	--	1,5563	1,0991	0,71	0,1206	89	706,2
373	CA 301		IP9-Lösung	1440	1,5513	--	1,5513	2,7996	1,80	1,1881	58	1804,7
374	CA 301		IP9-Lösung	1440	1,3889	--	1,3889	2,7441	1,98	1,2545	54	1975,7
375	CA 301		IP9-Lösung	4320	1,6149	--	1,6149	1,0922	0,68	0,1458	87	676,3
376	CA 301		IP9-Lösung	4320	1,6541	--	1,6541	1,0761	0,65	0,0839	92	650,6
377	CA 301		IP9-Lösung	4320	1,5296	--	1,5296	2,6872	1,76	1,6487	39	1756,8
378	CA 301		IP9-Lösung	4320	1,7184	--	1,7184	2,7061	1,57	1,7609	35	1574,8
379	CA 301		IP21-Lösung	1440	1,6131	--	1,6131	1,2033	0,75	0,188	84	746,0
380	CA 301		IP21-Lösung	1440	1,7408	--	1,7408	1,2235	0,70	0,1742	86	702,8
381	CA 301		IP21-Lösung	1440	1,5653	--	1,5653	3,0389	1,94	0,9894	67	1941,4
382	CA 301		IP21-Lösung	1440	1,4664	--	1,4664	3,0233	2,06	1,1208	63	2061,7
383	CA 301		IP21-Lösung	4320	1,6171	--	1,6171	1,185	0,73	0,1464	88	732,8
384	CA 301		IP21-Lösung	4320	1,6194	--	1,6194	1,1649	0,72	0,1969	83	719,3
385	CA 301		IP21-Lösung	4320	1,5584	--	1,5584	2,9202	1,87	1,377	53	1873,8
386	CA 301		IP21-Lösung	4320	1,4966	--	1,4966	2,9339	1,96	1,423	51	1960,4

Forts. Tab. 0.34: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 301 "Reaktionsprodukte aus Abgasreinigung von Sondermüllverbrennung" mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]	
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9	Mineral 10	Mineral 11				
371	CA 301	D'Ansit	Thenardit	Wollastonit	Wurtzit	Halit									126975	37319
372	CA 301	D'Ansit	Thenardit	Wollastonit	Wurtzit	Halit	Sylvin								126398	40312
373	CA 301	D'Ansit	Wollastonit	Wurtzit	Halit	Gupeiit	Sylvin								112373	23472
374	CA 301	Blödit	D'Ansit	Wurtzit	Halit	Quarz	Halit	Kohlenstoff							91729	53390
375	CA 301	D'Ansit	Thenardit	Aphthitalit	Wurtzite	Halit	Kohlenstoff	Sylvin							90678	54867
376	CA 301	D'Ansit	Thenardit	Aphthitalit	Wurtzit	Halit	Kohlenstoff	Halit	Sylvin						86273	58153
377	CA 301	Blödit	D'Ansit	Aphthitalit	Wurtzit	Halit	Kohlenstoff	Halit	Sylvin						86906	74310
378	CA 301	D'Ansit	Blödit	Aphthitalit	Halit	Quarz	Halit	Kohlenstoff							93187	44476
379	CA 301	Blödit	Bischofit	Halit	Quarz	Sylvin	Gips	Kohlenstoff	Halit	Sylvin					95040	49938
380	CA 301	Blödit	Bischofit	Quarz	Halit	Sodiumalum	Thenardit	Kohlenstoff	Halit	Sylvin					79542	68385
381	CA 301							Kohlenstoff	Sodiumalum						77692	89456
382	CA 301															
383	CA 301	Blödit	Bischofit	Quarz	Halit	Gupeiit	Kohlenstoff								130389	111084
384	CA 301	Blödit	Bischofit	Quarz	Halit	Gupeiit	Sylvin	Kohlenstoff							125979	92325
385	CA 301															
386	CA 301															

Forts. Tab. 0.34: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 301 „Reaktionsprodukte aus Abgasreinigung von Sondermüllverbrennung“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
371								104467	37477	100,3	18853	138474	1,165	
372								119000	40370	134,2	20187	149121	1,28	
373	89937	36490	22307	84653	86,97	1,283		100380	38190	66,23	21107	122485	1,306	
374	88427	36310	22200	83175	112,2	1,271		97300	37137	75,61	20873	123693	1,28	
375								96640	42113	61,26	19797	105376	1,318	
376								95537	43647	117,2	18000	99244	1,3	
377								94837	38923	51,63	22167	126260	1,325	
378								96257	39367	48,37	21960	123134	1,299	
379								55447	30653	49,06	54950	167627	1,35	
380								63163	33247	70,47	50353	204161	1,277	
381	7944	13297	93050	31270	25,4	1,292		54357	31787	49,84	58197	159228	1,377	
382	7031	11833	93307	20555	27,16	1,296		52620	31380	71,08	58243	152826	1,377	
383								62940	33510	37,59	49147	134859	1,369	
384								60213	31880	33,64	52087	158199	1,379	
385	13180	21080	85283	70570	30,47	1,325		22630	35037	2,523	74630	85581	1,358	
386	12393	19890	85360	55530	58,82	1,34		21763	35473	n.b.	74387	84203	1,35	

Tab. 0.35: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 104 „Haldenschlacke“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Feststoff 1	Feststoff 2	Lösungstyp	Reak- tions- zeit	Feststoff 1	Feststoff 2	Einge- setzter Feststoff	Einge- setzte Lösung	Feststoff/ Lösung	Zentrifugat	Lösungs- rückhaltung	Ausgangs- lösung/ Feststoff
				[Minuten]	[g]	[g]	[g]	[g]	1 : X	[g]	[%]	[g/kg]
387	CA 104		IP9-Lösung	1440	3,4865	--	3,4865	1,1286	0,32	1,0895	3	323,7
388	CA 104		IP9-Lösung	1440	3,3915	--	3,3915	1,1493	0,34	1,1091	3	338,9
389	CA 104		IP9-Lösung	1440	3,5308	--	3,5308	2,878	0,82	2,8061	2	815,1
390	CA 104		IP9-Lösung	1440	3,851	--	3,851	2,8698	0,75	2,7741	3	745,2
391	CA 104		IP9-Lösung	4320	3,7864	--	3,7864	1,1304	0,30	0,9985	12	298,5
392	CA 104		IP9-Lösung	4320	3,4729	--	3,4729	1,116	0,32	0,9896	11	321,3
393	CA 104		IP9-Lösung	4320	3,5297	--	3,5297	2,8987	0,82	2,7492	5	821,2
394	CA 104		IP9-Lösung	4320	3,5044	--	3,5044	2,8496	0,81	2,72	5	813,1
395	CA 104		IP21-Lösung	1440	3,6012	--	3,6012	1,2453	0,35	1,1933	4	345,8
396	CA 104		IP21-Lösung	1440	3,6415	--	3,6415	1,2376	0,34	1,1577	6	339,9
397	CA 104		IP21-Lösung	1440	3,6873	--	3,6873	3,091	0,84	2,9254	5	838,3
398	CA 104		IP21-Lösung	1440	3,8477	--	3,8477	3,1116	0,81	2,9363	6	808,7
399	CA 104		IP21-Lösung	4320	3,5467	--	3,5467	1,2368	0,35	1,118	10	348,7
400	CA 104		IP21-Lösung	4320	3,5851	--	3,5851	1,2372	0,35	1,1003	11	345,1
401	CA 104		IP21-Lösung	4320	3,6493	--	3,6493	3,1174	0,85	2,8927	7	854,2
402	CA 104		IP21-Lösung	4320	3,7382	--	3,7382	3,0989	0,83	2,8868	7	829,0

Forts. Tab. 0.35: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 104 „Haldenschlacke“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Ausgangs- mineral 1	Reaktionsprodukt											Gesamtwasser [mg/kg]	Haftwasser [mg/kg]	Kristallwasser [mg/kg]
		Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8	Mineral 9					
387	CA 104	Quarz	Calcit	Halit	Gips	Kohlenstoff	Sylvin							128126	45551
388	CA 104	Quarz	Calcit	Gips	Halit	Kohlenstoff	Sylvin							129012	32977
389	CA 104	Quarz	Calcit	Gips	Halit	Sylvin								123401	34879
390	CA 104	Quarz	Calcit	Gips	Halit	Kohlenstoff								117273	43633
391	CA 104	Quarz	Calcit	Gips	Halit	Kohlenstoff	Sylvin							132852	42062
392	CA 104	Quarz	Calcit	Gips	Halit	Kohlenstoff								126975	37319
393	CA 104	Quarz	Calcit	Gips	Halit	Kohlenstoff	Sylvin							126398	40312
394	CA 104	Quarz	Calcit	Gips	Halit	Sylvin	Sylvin							112373	23472
395	CA 104	Quarz	Larnakite	Calcit	Gips	Sodiumalum	Halit	Kohlenstoff						91729	53390
396	CA 104	Zinkblödit	Quarz	Calcit	Gips	Halit	Kohlenstoff	Sylvin						90678	54867
397	CA 104	Gips	Quarz	Calcit	Sodiumalum	Thenardit	Kohlenstoff	Halit	Sylvin					86273	58153
398	CA 104	Zinkblödit	Quarz	Calcit	Sodiumalum	Gips	Kohlenstoff	Halit	Sylvin					86906	74310
399	CA 104	Quarz	Calcit	Nesquehonit	Sodiumalum	Gips	Hlite	Kohlenstoff						93187	44476
400	CA 104	Blödit	Quarz	Nesquehonit	Calcit	Sodiumalum	Gips	Kohlenstoff	Halit	Sylvin				95040	49938
401	CA 104	Gips	Quarz	Calcit	Picromerit	Sodiumalum	Thenardit	Kohlenstoff	Halit	Sylvin				79542	68385
402	CA 104	Calcit	Quarz	Gips	Picromerit	Thenardit	Kohlenstoff	Sodiumalum						77692	89456

Forts. Tab. 0.35: Kurzzeitversuche der Versuchsgruppe Sonderabfall CA 104 „Haldenschlacke“ mit IP9 und IP21-Lösung

Ver- suchs- Nr.	Überstehende Lösung nach Ende der Reaktion							Durchgetretene Lösung (Zentrifugat)						
	Zusammensetzung							Zusammensetzung						
	Na [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Ca [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Dichte [g/cm ³]	Masse [g]
387								63530	14460	812,3	9613	17149	1,147	
388								62750	13217	1023	8066	15393	1,14	
389								74577	23473	1652	16673	28284	1,175	
390								69663	20670	568,9	13493	23251	1,175	
391								60137	11497	1241	6133	14114	1,127	
392								63393	12937	1059	7526	13268	1,146	
393								72170	21143	547,5	13337	22207	1,184	
394								74613	21683	517,1	13947	22819	1,189	
395								17107	493	1942	56363	8191	1,191	
396								16237	1201	1684	52727	7121	1,164	
397								12833	3258	505,7	72797	10943	1,226	
398								13167	3016	571,4	69307	11343	1,211	
399								17257	369,3	2633	50237	3891	1,18	
400								17073	890,9	2355	52317	4807	1,197	
401								13417	2885	590,7	77067	7212	1,249	
402								12427	3355	415,7	73207	9376	1,227	

Tab. 0.36: Hochdrucksäulenversuche - Randbedingungen und Ergebnisse

Lfd. Nr.	Versuchsbezeichnung	Säulenfüllung	Lösung	Säulenlänge	Säulendurchmesser	Lage der Säule	Besonderheiten	Masse Feststoff	Masse Lösung in der Säule	Auffanglösung
				[mm]	[mm]			[g]	[g]	[g]
1	HV-1	Kieserit, getrocknet	IP21	250	21	senkrecht	HPLC-Säule	n.a.	n.a.	n.a.
2	HV-3	Morsleben Hartsalz, getrocknet + Kieserit, getrocknet 80 : 20	IP21	250	21	senkrecht	HPLC-Säule	117,3		11,0
3	HV-5	Kieserit, getrocknet	IP21	250	21	senkrecht	HPLC-Säule	118,9	47,83	keine
4	HV-6	BFA (CA 400)	IP21	250	21	senkrecht	HPLC-Säule	105,1	44,66	219,56
5	HV-7	KCl/Kieserit, getrocknet 1 : 1,5	IP21	250	21	senkrecht	HPLC-Säule	93,00	50,77	127,97
6	HV-8	Kieserit, getrocknet	IP21	2000	39	liegend	Glassäule	n.a.	n.a.	keine
7	HV-9	Kieserit, getrocknet	IP9	250	21	senkrecht	2 Säulen HPLC-Säulen hintereinander	Säule 1: 115,36 Säule 2: 101,40	Säule 1: 58,89 Säule 2: 106,05	Säule 1: 1,52 Säule 2: 3,12
8	PV-4	KCl/Kieserit (getrocknet) 1 : 1,5 incl. 1% Kainit	IP21	1000	40	liegend	HPLC-Säule	1617,5	953,61	338,58
9	PV-6	KCl/Kieserit (getrocknet) 1:1,5 incl. 1% Kainit	IP21	1000	70	liegend	HPLC-Säule	5021,83	2481,17	1083,56
10	PV-7	Kieserit, getrocknet	IP21	250	21	senkrecht	HPLC-Säule für Computertomographie	Säule unten: 102,65 Säule oben: 99,13	Säule unten: 48,61 Säule oben: 52,62	keine
11	PV-8	Kieserit, getrocknet	IP9	1000	40	liegend	2 Säulen HPLC-Säulen hintereinander	Säule 1: 1980,3 Säule 2: 1721,9	Säule 1: 703,7 Säule 2: n.b.	keine
12	PV-9	Kieserit, getrocknet	H ₂ O	1000	40	liegend	HPLC-Säule	1721,9	647,1	1016,8
13	PV-10	KCl/Kieserit (getrocknet) 1 : 1,5 incl. 1% Kainit	IP9	1000	40	liegend	HPLC-Säule	1730,0	740,0	57,83
14	KP-1	Kieserit, getrocknet	IP21	70	50	senkrecht	2 Kristallisationsdruckmesszellen hintereinander	Zelle 1: 182,64 Zelle 2: 183,53	n.a.	48,38

Tab. 0.37: Hochdrucksäulenversuche - Charakterisierung der Reaktionsprodukte

Lfd.Nr.	Versuchs- bezeichnung	Probenbezeichnung	Kristall-	Haft-	Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8
			wasser	wasser								
			[Gew.-%]	[Gew.-%]								
1	HV1	HDS A	29,64	1,87								
2	HV3	HDS 1	14,07	1,23								
		HDS 2	13,95	0,96								
		HDS 3	16,52	0,91								
3	HV5	Bodenkörper 1, unterste Schicht	17,06	0,74	Starkeyit	Thenardit	Polyhalit	Halit				
		Bodenkörper 3, oberer Teil der mittleren Schicht	20,76	0,41	Starkeyit	Carnallit	Halit					
		Bodenkörper 4, oberste Schicht	20,97	0,31	Starkeyit	Picromerit	Glauberit	Anhydrit	Halit			
4	HV6	BFA IP21 Versatzmaterial	0,00	0,00	Bischofit	Picromerit	Gips	Halit	Sylvin			
5	HV7	Bodenkörper 1, unterste Schicht, glatt	25,07	1,94	Carnallit	Langbeinit	Halit	Sylvin				
		Bodenkörper 2, mittlere, untere Schicht	0,00	1,10	Carnallit	Pentahydrat	Langbeinit	Sylvin	Halit			
		Bodenkörper 3, unterste Schicht rau	29,36	1,51	Carnallit	Pentahydrat	Langbeinit	Thenardit	Epsomit	Polyhalit	Sylvin	Halit
		Bodenkörper 4, oberste Schicht	23,98	0,67	Carnallit	Pentahydrat	Langbeinit	Sylvin	Halit			
		Bodenkörper 5, mittlere obere Schicht	26,81	0,52	Carnallit	Pentahydrat	Thenardit	Langbeinit	Kainit	Sylvin	Halit	
6	HV8	Bodenkörper 1	30,35	2,41	Hexahydrat	Kainit	Langbeinit	Halit	Sylvin	Pentahydrat		
		Bodenkörper 2	21,20	0,57	Starkeyit	Carnallit	Pentahydrat	Hexahydrat	Gips	Halit	Sylvin	
		Bodenkörper 3	23,87	0,61	Starkeyit	Anhydrit	Halit	Sylvin				
		Bodenkörper 4	22,87	0,78	Starkeyit	Carnallit	Pentahydrat	Kieserit	Polyhalit	Anhydrit	Halit	Sylvin
		Bodenkörper 5	22,67	0,91	Carnallit	Gips	Kieserit	Halit	Sylvin			
		Bodenkörper 6	19,90	0,79	Starkeyit	Carnallit	Kieserit	Polyhalit	Halit	Sylvin		
		Bodenkörper 7	16,97	0,22	Starkeyit	Carnallit	Gips	Anhydrit	Halit			
		Bodenkörper 8	22,72	0,32	Starkeyit	Carnallit	Hexahydrat	Polyhalit	Langbeinit	Sylvin	Halit	
		Bodenkörper 9	2,46	0,38	Magnesium- sulfat	Langbeinit	Halit	Sylvin				

Forts. Tab. 0.37: Hochdrucksäulenversuche - Charakterisierung der Reaktionsprodukte

Lfd.Nr.	Versuchsbezeichnung	Probenbezeichnung	Kristall-	Haft-	Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	Mineral 6	Mineral 7	Mineral 8
			wasser	wasser								
			[Gew.-%]	[Gew.-%]								
13	PV10	SV-PV-10 Probe 1 0-10cm	18,38	2,47	Kainit	Epsomit	Pentahydrat	Gips	Sylvin	Halit		
		SV-PV-10 Probe 2 10-20cm	16,78	2,51	Kainit	Leonit	Gips	Sylvin	Halit	Pentahydrat		
		SV-PV-10 Probe 3 20-30cm	16,31	1,61	Kainit	Epsomit	Leonit	Sylvin	Halit			
		SV-PV-10 Probe 4 30-40cm	16,04	2,39	Kainit	Pentahydrat	Gips	Sylvin	Halit			
		SV-PV-10 Probe 5 40-50cm	16,69	2,20	Kainit	Leonit	Pentahydrat	Gips	Sylvin	Halit		
		SV-PV-10 Probe 6 50-60cm	16,89	1,81	Kainit	Epsomit	Pentahydrat	Starkeyit	Anhydrit	Gips	Sylvin	Halit
		SV-PV-10 Probe 7 60-70cm	17,77	0,77	Kainit	Carnallit	Pentahydrat	Sylvin	Halit			
		SV-PV-10 Probe 8 70-80cm	18,44	0,73	Kainit	Carnallit	Pentahydrat	Anhydrit	Gips	Sylvin	Halit	
		SV-PV-10 Probe 9 80-90cm	16,93	0,37	Carnallit	Kainit	Starkeyit	Pentahydrat	Sylvin	Halit		
		SV-PV-10 Probe 10 90-100cm	16,40	0,69	Carnallit	Kainit	Langbeinit	Anhydrit	Sylvin	Halit		
14	KP-1	keine Proben										

Tab. 0.38: Reaktionen der Versatzstoffe MgSO₄-wasserfrei und MgSO₄-wasserfrei mit Sylvin im Kontakt zu sechs unterschiedlichen Salzlösungen

Bezeichnung der Rechnung	aufgelöste Minerale	Ausgangslösung	Reaktionstyp (stabil/metastabil)	Dichte der Ausgangslösung	Gebildete Mineralphasen	Unterdrückte Mineralphasen	Masse der Ausgangslösung	Volumen der Ausgangslösung
				[g/cm ³]			[kg]	[cm ³]
A1sCorr	MgSO ₄	Gipshutlösung	metastabil	1,2		kies, eps, hex	1,361	1134
A2s	MgSO ₄	IP9	metastabil	1,241	car hal hex pol syl	kai, kies, eps	1,423	1147
A4s	MgSO ₄	IP21	metastabil	1,295	an bi car hal stark	kai, kies, oxyc, bruc	1,481	1144
A5s	MgSO ₄	Q-Lösung	metastabil	1,292	bi car hal stark	kai kies	1,481	1146
A6s	MgSO ₄	M-Lösung	metastabil	1,285	car hal hex syl	kai kies eps merc	1,494	1163
a7s	MgSO ₄	Halit-gesättigte Lösung	metastabil	1,2	bloe hal stark	oxyc bruc hex eps	1,357	1131
B1sCorr	MgSO ₄ +KCl	Gipshutlösung	metastabil	1,2	car hal pol stark syl	kai, kies, oxyc, bruc, hex, eps	1,361	1134
b2s	MgSO ₄ +KCl	IP9	metastabil	1,241	car hal hex pol syl	kai, kies, merc	1,423	1147
B4s	MgSO ₄ +KCl	IP21	metastabil	1,295	car hal pol stark syl	kai, kies, oxyc, bruc, hex, eps	1,481	1144
B5s	MgSO ₄ +KCl	Q-Lösung	metastabil	1,292	car hal stark syl	kai kies hex	1,481	1146
B6s	MgSO ₄ +KCl	M-Lösung	metastabil	1,285	car hal hex syl	kai kies merc	1,494	1163
b7s	MgSO ₄ +KCl	Halit-gesättigte Lösung	metastabil	1,2	hal leo stark syl	kai, kies, oxyc, bruc, hex, eps	1,357	1131
A1	MgSO ₄	Gipshutlösung	stabil	1,2	eps, hal, anh	bloe	1,361	1134
A2	MgSO ₄	IP9	stabil	1,241	car hal kai kies pol		1,423	1147
A4	MgSO ₄	IP21	stabil	1,295	an bi car hal kies		1,481	1144
A5	MgSO ₄	Q-Lösung	stabil	1,292	bi car hal kies		1,481	1146
A6	MgSO ₄	M-Lösung	stabil	1,285	car hal kai kies		1,494	1163
A7	MgSO ₄	Halit-gesättigte Lösung	stabil	1,2	bloe eps hal		1,357	1131
B1	MgSO ₄ +KCl	Gipshutlösung	stabil	1,2	kar, kai, hal, kies, poly		1,361	1134
B2	MgSO ₄ +KCl	IP9	stabil	1,241	car hal kai kies pol		1,423	1147
B4	MgSO ₄ +KCl	IP21	stabil	1,295	car hal kai kies pol		1,481	1144
B5	MgSO ₄ +KCl	Q-Lösung	stabil	1,292	car hal kai kies		1,481	1146
B6	MgSO ₄ +KCl	M-Lösung	stabil	1,285	car hal kai kies		1,494	1163
B7	MgSO ₄ +KCl	Halit-gesättigte Lösung	stabil	1,2	hal kal leo		1,357	1131

Forts. Tab. 0.38: Reaktionen der Versatzstoffe MgSO₄-wasserfrei und MgSO₄-wasserfrei mit Sylvin im Kontakt zu sechs unterschiedlichen Salzlösungen

Bezeichnung der Rechnung	Volumen der aufgelösten Minerale	Volumen der gebildeten Minerale	Volumen der Endlösung	Mineral-Volumen-bilanz	Reaktions-Volumen-bilanz	Reaktions-Volumen-bilanz	Verhältnis der Volumina gebildeter zu aufgelöster Minerale	Aufgelöstes Mineralvolumen je l Lösung	Gebildete Mineralmenge je l Lösung	Gebundenes Lösungsvolumen je l Versatz
	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[%]	[]	[cm ³]	[cm ³]	[l]
A1sCorr	628	1495	0	867	-267	-15,2	2,38	628	1495	1,81
A2s	371	1376	0	1004	-142	-9,4	3,70	371	1376	3,09
A4s	346	1309	0	962	-181	-12,2	3,78	346	1309	3,30
A5s	347	1310	0	963	-183	-12,3	3,78	347	1310	3,31
A6s	320	1358	0	1038	-125	-8,4	4,24	320	1358	3,63
a7s	628	1493	0	865	-265	-15,1	2,38	628	1493	1,80
B1sCorr	1149	2015	0	867	-268	-11,7	1,75	1149	2015	0,99
b2s	680	1684	0	1004	-142	-7,8	2,48	680	1684	1,69
B4s	634	1616	0	982	-162	-9,1	2,55	634	1616	1,80
B5s	634	1616	0	982	-165	-9,2	2,55	634	1616	1,81
B6s	586	1623	0	1037	-125	-7,2	2,77	586	1623	1,99
b7s	1149	2014	0	865	-265	-11,6	1,75	1149	2014	0,98
A1	359	1330	0	971	-163	-10,9	3,71	359	1330	3,16
A2	2290	3583	0	1293	146	4,3	1,56	2290	3583	0,50
A4	1429	2638	0	1210	66	2,6	1,85	1429	2638	0,80
A5	1429	2638	0	1209	63	2,4	1,85	1429	2638	0,80
A6	2092	3397	0	1304	142	4,4	1,62	2092	3397	0,56
A7	359	1329	0	970	-161	-10,8	3,70	359	1329	3,15
B1	1531	2299	0	768	-366	-13,7	1,50	1531	2299	0,74
B2	1398	2212	0	814	-333	-13,1	1,58	1398	2212	0,82
B4	1057	2017	0	960	-184	-8,4	1,91	1057	2017	1,08
B5	1057	2017	0	960	-187	-8,5	1,91	1057	2017	1,08
B6	1277	2142	0	866	-297	-12,2	1,68	1277	2142	0,91
B7	1531	2298	0	767	-364	-13,7	1,50	1531	2298	0,74

14 Anlage: Literaturstudie

Titel: **An assessment of borehole sealing performance in a salt environment.**

Autor: Akgün-H

Quelle: Environmental Geology. 31; 1-2, Pages 34-41. 1997.

Titel: **Volume change in bedded gypsum of the Todilto Formation calculated from structural relief of overlying beds; a comparison with theoretical anhydrite/ gypsum phase change data.**

Autor: Anderson-Orin-J; Steiner-Maureen-B

Quelle: Geological Society of America, 1997 annual meeting. Abstracts with Programs - Geological Society of America. 29; 6, Pages 114. 1997.

Titel: **Einsatz von Massenreststoffen.**

Autor: anonymus

Quelle: BR. Baustoff-Recycling und Deponietechnik, Band 13 (1997) Heft 11/12, Seite 12 - 13

Titel: **Phase changes in mineralized filtration flows.**

Autor: Azizov-I-E

Quelle: Abstracts of the 16th General Meeting of the International Mineralogical Association. 16; Pages 22. 1994.

Titel: **Laboratory studies on factors that influence the strength of reinforced cemented sand.**

Autor: Basma-Adnan-A; Al-Homoud-Azm-S; Taqieddine-Salah; Al-Smadi-Malek-M

Quelle: Environmental & Engineering Geoscience. 3; 3, Pages 411-422. 1997.

Titel: **Abandon des cavites salines.**

Autor: Berest-P; Brouard-B; Durup-G

Quelle: Revue Francaise de Geotechnique. 82; Pages 23-36. 1998.

- Titel: **On the deformation mechanism map of rock salt.**
 Autor: Blum-W; Fleischmann-C.
 Quelle: In: The mechanical behavior of salt, (Hrsg.: H.R.Hardy jr., M.Langer),
 Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1988, Seite 7-22
- Titel: **Experimental simulation of the formation of fibrous veins by localised dissolution-precipitation creep.**
 Autor: Bons-Paul-D; Jessell-Mark-W
 Quelle: Mineralogical Magazine. 61; 1, Pages 53-63. 1997.
- Titel: **Untersuchungen zum belastungsabhängigen Durchlässigkeitsverhalten von Salzgestein für Gase unter besonderer Berücksichtigung der Porenraumbeladung.**
 Autor: Borgmeier-Michael
 Quelle: Diss., Techn. Univ. Clausthal-Zellerfeld, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen, 1992, 123 Seiten
- Titel: **Un modele de simulation des interactions entre sels et saumures. Translated Title: Simulation models of the interactions between salts and brines.**
 Autor: Bouhlila-Rachida
 Quelle: In: Peters-Norman-E; Coudrain-Ribstein-Anne (eds.): Hydrochemistry.- International Association of Hydrological Sciences. IAHS-AISH Publication. 244; Pages 45-52. 1997.
- Titel: **Marine evaporites, bittern seepage, and the genesis of subsurface brines.**
 Autor: Brantley-S-L; Donovan-B
 Quelle: Chemical Geology. 84; 1-4, Pages 187-189. 1990.
- Titel: **Aufarbeitung chloridischer Filterstäube.**
 Autor: Bruch-Karl-Hermann; Urbach-Ralf
 Quelle: Metallurgy II : EMC '94: from Agricola to the present (a meeting between West and East, responsibility for the future); GDMB Informationsgesellschaft, Clausthal-Zellerfeld; (1994) Seite 96 – 103

Titel: **Constitutive behavior of reconsolidating crushed salt.**
Autor: Callahan-G-D; Mellegard-K-D; Hansen-F-D
Quelle: IN: Orozco-Jorge; Schmitter-Juan (editors): International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 35 (1998); 4-5, Pages 422-423.

Titel: **Chalk formations as natural barriers towards radionuclide migration.**
Autor: Carlsen-Lars; Batsberg-Walther; Jensen-Bror-Skytte
Quelle: Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle. 6; 2, Pages 121-130. Harwood Academic Publishers. Chur-London-Paris 1985.

Titel: **Geological applications of high-resolution X-ray computed tomography.**
Autor: Carlson-William-D; Ketcham-Richard-A; Denison-Cambria; Rowe-Timothy; Kappelman-John
Quelle: In: Geological Society of America, 1997 annual meeting. Abstracts with Programs. 29; 6, Pages 294. 1997.

Titel: **Oedometer tests and permeability measurements on compacted granular salt.**
Autor: Chumbe-Dociteo; Lloret-Antoni; Alonso-Eduardo
Quelle: In: Kamon-Masashi (editor): Environmental geotechnics. Pages 31-36. A.A. Balkema. Rotterdam, Netherlands. 1996.

Titel: **Application of paste technology to surface disposal of mineral wastes.**
Autor: Cincilla-William-A; Landriault-David-A; Verburg-Rens
Quelle: In: Proceedings of the Fourth International Conference on Tailings and Mine Waste. 4; Pages 343-356. A. A. Balkema. Rotterdam, Netherlands. 1997.

Titel: Assessing deep-seated dissolution-subsidence hazards at radioactive-waste repository sites in bedded salt.

Autor: Davies-Peter-B

Quelle: Engineering Geology. 27; 1-4, Pages 467-487. 1989.

Titel: Centrifuge model studies of salt backfill.

Autor: De-Souza-Euler-M

Quelle: CIM Bulletin. 87; 976, Pages 43-52. 1994.

Titel: Interface precipitation affects the resistance to transport in layered jarosite/ fly ash.

Autor: Ding-M; Geusebroek-M; van-der-Sloot-H-A

Quelle: Journal of Geochemical Exploration. 62; 1-3, Pages 319-323. 1998.

Titel: Interaction of Fe³⁺, Ca²⁺, and SO₄²⁻ at the jarosite-alkaline coal fly ash interface.

Autor: Ding-M; van-der-Sloot-H-A; Geusebroek-M

Quelle: Proceedings of the 30th International Geological Congress. 30, Vol. 19; Pages 207-222. 1997.

Titel: Containment of solidified liquid hazardous waste in domal salt.

Autor: Domenico-P-A; Lerman-A

Quelle: Geological Society of America, 1992 annual meeting. Abstracts with Programs. 24; 7, Pages 128-129. 1992.

Titel: Zur Hydrogeologie der Sonderabfalldeponie Mönchshagen

Autor: Dörhöfer-G

Quelle: In: Striegnitz-M (editor): Sanierung von Altlasten, Deponien und anderen kontaminierten Standorten; Erfahrungen und Problemstellungen. Loccumer Protokolle. 3; Pages 122-146. 1986.

Titel: Versuche zur Schadstoff-Immobilisierung von Filterstaub aus der physikalischen Rauchgasreinigung einer Müllverbrennungsanlage mit Nassorption.

Autor: Dülmer-M; Schmitt-Riegraf-C.

Quelle: Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft. Beihefte zum European Journal of Mineralogy, Band 1996 (1996) Heft 1, Seite 46

Titel: Salt solution cavern disposal for toxic solid mining wastes.

Autor: Dusseault-Maurice-B; Davidson-Brett-C

Quelle: Proceedings of the Fourth International Conference on Tailings and Mine Waste. 4; Pages 317-326. A. A. Balkema. Rotterdam, Netherlands. 1997.

Titel: Chemische Aspekte bei der Abdichtung von Salzlösungszuflüssen im Kalibergbau durch eine gezielte Mineralsalzsynthese.

Autor: Emons-H-H; Ziegenbalg-G; Gaitzsch-H

Quelle: BHM. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte. 135 (1990); 8, Seiten 256-261.

Titel: Case studies of sealing methods and materials used in the salt and potash mining industries.

Autor: Eyermann-T-J; Van-Sambeck-L-L

Quelle: Buch: Albuquerque, Sandia National Laboratories: 95-1120, (1995) 74 Seiten

Titel: Diagenetical transformation of pores and their influence on flow properties depending on lithology.

Autor: Folle-S; Khan-F-A

Quelle: Oil.Gas, Hamburg, Band 14 (1988) Heft 2, Seite 22-25

Titel: Stochastic permeability models of fluid flow during contact metamorphism.

Autor: Gerdes-Martha-L; Baumgartner-Lukas-P; Person-Mark

Quelle: Geology (Boulder). 23 (1995); 10, Pages 945-948.

Titel: **Application of a model for simulating transport of reactive multispecies components to the study of the hydrochemistry of salt water intrusions.**

Autor: Gomis-Vicente; Boluda-Nuria; Ruiz-Francisco

Quelle: Journal of Contaminant Hydrology. 22 (1996); 1-2, Pages 67-81.

Titel: **Brines of Sowa Pan and adjacent areas, Botswana.**

Autor: Gould-D

Quelle: In: Anhaeusser-C-R; Maske-S (editors): Mineral deposits of Southern Africa. Pages 2289-2299. 1986.

Titel: **Querschnittabdichtungen von untertägigen Hohlräumen und von Bohrlöchern unter besonderer Berücksichtigung der Endlagerung radioaktiver Abfallprodukte. Teil III.**

Autor: Häfner-F; Heinrich-F; Sitz-P.

Quelle: Neue Bergbautech., Band 20 (1990) Heft 7, Seite 253-257.

Titel: **Underground injection of hazardous industrial waste in Louisiana.**

Autor: Hanor-Jeffrey-S

Quelle: Annual Meeting Abstracts - American Association of Petroleum Geologists and Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. 1993; Pages 113.

Titel: **Reconsolidating salt; compaction, constitutive modeling and physical processes.**

Autor: Hansen-F-D

Quelle: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 34 (1997); 3-4, Pages 492.

Titel: **Oilfield waste disposal in a salt cavern.**

Autor: Hickerson-Russ

Quelle: Proceedings of the Annual Underground Injection Control and Ground Water Protection Forum. 1995; Pages 123-135.

Titel: **Petrography, porosity and permeability; hydrochemical processes in a fractured, welded tuff aquifer near Creede, Colorado.**

Autor: Hoch-A-R; Reddy-Michael-M; Heymans-Michael-J

Quelle: Geological Society of America, 1997 annual meeting. Abstracts with Programs. 29 (1997); 6, Pages 134.

Titel: **Consolidation of crushed salt with added water.**

Autor: Holcomb-David-J

Quelle: Eos, Transactions, American Geophysical Union. 68 (1987); 44, Pages 1479.

Titel: **Moisture content - a major uncertainty in storage cavity closure prediction.**

Autor: Horsemann-S-T

Quelle: In: The mechanical behavior of salt, (Hrsg.: H.R.Hardy jr., M.Langer), Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1988, Seite 53-68

Titel: **Genesis of Kupferschiefer Cu-Ag deposits by convective flow of Rotliegendes brines during triassic rifting.**

Autor: Jowett-E-Craig.

Quelle: Econ. Geol., Band 81 (1986) Heft 8, Seite 1823-1837.

Titel: **Verfestigungsversuche an einer Müllverbrennungsasche aus der physikalischen Rauchgasreinigung mit Hilfe verschiedener Bindemittel zur Inertisierung umweltrelevanter Schadstoffe.**

Autor: Kermer-R; Schmitt-Riegraf-C.

Quelle: Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft. Beihefte zum European Journal of Mineralogy, Band 1996 (1996) Heft 1, Seite 137.

Titel: **Thermorheological behaviour of dry and wet carnallite-halite-kieserite rocks: an experimental study.**

Autor: Kern-H; Franke-J-H.

Quelle: In: The mechanical behavior of salt, (Hrsg.: H.R.Hardy jr., M.Langer), Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1988, Seite 197-210

Titel: Elektrische Leitfähigkeit und Gas-Permeabilität - Parameter zur Charakterisierung von thermischer Stabilität und Gefügeveränderungen in Carnallitit unter in-situ Bedingungen.

Autor: Kern-H; Popp-T.

Quelle: Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft. Beihefte zum European Journal of Mineralogy, Band 1990 (1990) Heft 1, Seite 125.

Titel: Potential anhydrite precipitation associated with deep injection of ground-water brine from Paradox Valley, Colorado.

Autor: Kharaka-Yousif-K; Evans-William-C; Ambats-Gil; Thordsen-James-J

Quelle: In: Morganwalp-David-W; Aronson-David-A: U.S. Geological Survey Toxic Substances Hydrology Program; proceedings of the technical meeting. Water-Resources Investigations - U. S. Geological Survey. Pages 927-933. 1996.

Titel: Brine handling and disposal by reinjection.

Autor: Knowles-D-W; Boytim-R-G; Linz-D-G

Quelle: Proceedings of the Annual Underground Injection Control and Ground Water Protection Forum. 1995; Pages 167-182.

Titel: Subsurface brine disposal in the Cambro-Lower Ordovician (Sauk Sequence) of central and western New York; implications for new salt-cavern gas-storage reservoirs.

Autor: Kolkas-Mossbah-M; Friedman-Gerald-M

Quelle: AAPG Bulletin. 81 (1997); 8, Pages 1390.

Titel: Numerical modeling of reactive and nonreactive solute transport in porous medium.

Autor: Korsakova-N-K

Quelle: Water Resources. 23(1996); 6, Pages 623-629.

Titel: Querschnittsabdichtung von untertägigen Hohlräumen und von Bohrlöchern unter besonderer Berücksichtigung der Endlagerung radioaktiver Abfallprodukte. Teil IV: Auswahl, Eigenschaften und Untersuchung von Abdichtungsmaterialien.

Autor: Krakau-Ulrike; Köckritz-Volker; Sitz-Peter.

Quelle: Neue Bergbautechnik, Band 20 (1990) Heft 11, Seite 429 - 433

Titel: Cementing halite in Triassic Bunter Sandstone (Tonder, southwest Denmark) as a result of hyperfiltration of brines.

Autor: Laier-T; Nielsen-B-L.

Quelle: Chemical geology, Band 76 (1989) Heft 3/4, Seite 353-363

Titel: Salt-dome-related diagenesis of Miocene sediment, Black Bayou Field, Cameron Parish, Louisiana.

Autor: Leger-William-R

Quelle: Master's, University of New Orleans. New Orleans, LA, United States. 1988

ebenfalls in: AAPG Bulletin. 72 (1988); 9, Pages 1115-1116.

Titel: Processes involved in salt-dome development; II, Thermal, gravitational, and chemical effects.

Autor: Lerche-Ian; O-Brien-J-J

Quelle: AAPG Bulletin. 69 (1985); 2, Pages 278.

Titel: Dissolved and gaseous contaminant transport in salt deposits.

Autor: Lerman-A; Domenico-P-A

Quelle: Chemical Geology. 107(1993); 3-4, Pages 427-429.

Titel: Durchströmungsversuche.

Autor: Martin-Margit; Kühn-Michael; Köckritz-Volker

Quelle: In: Peer Hoth (Hrsg.): Geowissenschaftliche Bewertungsgrundlagen zur Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen in Norddeutschland. - GeoForschungsZentrum, Potsdam (1997) Seite 73 - 76

- Titel: **Potash extraction from Cerro Prieto geothermal brine.**
 Autor: Mercado-Sergio; Hurtado-Roberto
 Quelle: Geothermics. 21 (1992); 5-6, Pages 759-764.
- Titel: **Thermal and chemical evolution of the caprock in the Salton Sea geothermal field, California.**
 Autor: Moore-Joseph-N; Adams-Michael-C
 Quelle: Geological Society of America, 99th annual meeting. Abstracts with Programs - Geological Society of America. 18 (1986); 6, Pages 699.
- Titel: **Ettringite solubility and geochemistry of the $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 - \text{H}_2\text{O}$ system at 1 atm pressure and 298 K.**
 Autor: Myneni-Satish-C-B; Traina-Samuel-J; Logan-Terry-J
 Quelle: Chemical Geology. 148 (1998); 1-2, Pages 1-19.
- Titel: **The solubility of calcite in sodium-calcium-chloride brines to 90 degrees C and evaluation of the interaction between calcium and carbonate ions.**
 Autor: Nagy-Kathryn-L; Morse-John-W
 Quelle: Geological Society of America, 99th annual meeting. Abstracts with Programs - Geological Society of America. 18 (1986); 6, Pages 701.
- Titel: **Permeability of flowable slurry materials containing foundry sand and fly ash**
 Autor: Naik-Tarun-R; Singh-Shiw-S
 Quelle: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 123 (1997); 5, Pages 446-452.
- Titel: **Der Einfluss von Entwässerungsreaktionen auf physikalische Gesteinseigenschaften - Simultane Messung der P- und S-Wellengeschwindigkeiten, der elektrischen Leitfähigkeit und der Gas-Permeabilität.**
 Autor: Popp-T; Kern-H.
 Quelle: Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft. Beihefte zum European Journal of Mineralogy, Band 1992 (1992) Heft 1, Seite 221

- Titel: **Water problems in Saskatchewan potash mining; what can be learned from them?.**
 Autor: Prugger-Fritz-F; Prugger-Arnfinn-F
 Quelle: CIM Bulletin. 84 (1991); 945, Pages 58-66.
- Titel: **Diagenetic carbonate and evaporite minerals in Rotliegend aeolian sandstones of the southern North Sea; their nature and relationship to secondary porosity development.**
 Autor: Pye-K; Krinsley-D-H.
 Quelle: Clay Miner., Band 21 (1986) Heft 4, Seite 443-457
- Titel: **Basin dewatering along the flanks of salt domes.**
 Autor: Ranganathan-Vishnu
 Quelle: Geological Society of America, 1989 annual meeting. Abstracts with programs. 21 (1989); 6, Pages 317.
- Titel: **Perched brine plumes above salt domes and dewatering of geopressed sediments.**
 Autor: Ranganathan-V; Hanor-J-S
 Quelle: Journal of Hydrology. 110 (1989); 1-2, Pages 63-86.
- Titel: **Penecontemporaneous diagenesis in continental saline sediments; bloeditization in Quero playa lake (La Mancha, central Spain).**
 Autor: Sanchez-Moral-Sergio; Ordonez-S; Garcia-del-Cura-M-A; Hoyos-M; Canaveras-J-C
 Quelle: Chemical Geology. 149 (1998); 3-4, Pages 189-207.
- Titel: **Brine disposal into a tight stress sensitive formation at fracturing conditions; design and field experience.**
 Autor: Settari-A; Warren-G-M; Jacquemont-J; Bieniawski-P; Dussaud-M
 Quelle: In: 1997 SPE annual technical conference and exhibition; Reservoir engineering. SPE - Society of Petroleum Engineers of AIME. 1997; Pages 529-543.

Titel: Querschnittsabdichtung von untertägigen Hohlräumen und von Bohrlöchern unter besonderer Berücksichtigung der Endlagerung radioaktiver Abfallprodukte. Teil V: Die Abdichtung von Bohrlöchern.

Autor: Sitz-Peter; Köckritz-Volker.

Quelle: Neue Bergbautechnik, Band 20 (1990) Heft 12, Seite 468 - 470

Titel: Querschnittabdichtungen von untertägigen Hohlräumen und von Bohrlöchern unter besonderer Berücksichtigung der Endlagerung radioaktiver Abfallprodukte. Teil II.

Autor: Sitz-P; Köckritz-V; Lersow-M.

Quelle: Neue Bergbautech., Band 20 (1990) Heft 6, Seite 204-208

Titel: Evaporite basin analysis.

Autor: Sonnenfeld-Peter

Quelle: In: Force-E-R; Eidel-J-J; Maynard-J-B (editors): Sedimentary and diagenetic mineral deposits; a basin analysis approach to exploration.- Reviews in Economic Geology. 5 (1991); Pages 159-169.

Titel: The effect of brine (inherent or added) on rheology and deformation mechanisms in salt rock.

Autor: Spiers-C-J; Urai-J-L; Liester-G-S.

Quelle: In: The mechanical behavior of salt, (Hrsg.: H.R.Hardy jr., M.Langer), Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1988, Seite 89-102

Titel: Influence of pH on the retention of heavy metal ions by fly ash.

Autor: Sridharan-A; Pandian-N-S; Rajasekhar-C

Quelle: In: Kamon-M (editor): Environmental geotechnics. Pages 603-608. Balkema. Rotterdam, Netherlands. 1996

Titel: Prediction of dilation and permeability changes in rock salt.

Autor: Stormont-J-C; Daemen-J-J-K; Desai-C-S

Quelle: International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 16 (1992); 8, Pages 545-569.

Titel: **The calculation of mass percentage of all sorts of compounds in rock salt and mirabilite.**

Autor: Sun-Zhouyi; Tang-Shuyun

Quelle: Kuangwu Yanshi = Journal of Mineralogy and Petrology. 16 (1996); 1, Pages 101-103.

Bemerkung: An der in der Literaturdatenbank GEOREF angegebenen Stelle befand sich folgender Artikel:

Titel: **A new system for determining zinc from ore and metals.**

Autor: Tang-Zuguang; Tan-Longhua; Huang Yimin

Quelle: Kuangwu Yanshi = Journal of Mineralogy and Petrology. 16 (1996); 6, Pages 100-102.

Titel: **Settlement of mine backfill under the overburden of a wet ash dam.**

Autor: van-Wyk-W-J; Blight-G-E

Quelle: In: Kamon-M (editor): Environmental geotechnics. Pages 423-428. Balkema. Rotterdam, Netherlands. 1996

Titel: **Dobyyvanie soli vrtmi z povrchu. (Salt exploitation by surficial drilling.)**

Autor: Vojtek-K

Quelle: Rudy. 37 (1989); 10, Pages 308-311.

Titel: **Sulfur and sulfide mineralization in Long Point Dome cap rock.**

Autor: Walter-Timothy-G

Quelle: In: Seni-S-J; Kyle-J-R; Price-P-E; Samuelson-F (eds.): Comparison of cap rocks, mineral resources, and surface features of salt domes in the Houston diapir province. Geol. Soc. Am., United States. 1986. Pages 209-221.

Titel: **The closure of WIPP disposal rooms filled with various waste and backfill combinations.**

Autor: Weatherby-J-Randall; Brown-W-T; Butcher-B-M

Quelle: In: Roegiers-Jean-Claude (editor): Rock mechanics as a multidisciplinary science; 32nd U.S. symposium. Proceedings - Symposium on Rock Mechanics. 32 (1991); Pages 919-928.

Titel: **Petrography and geochemistry of water-rock interactions in Richton Dome cap rock (southeastern Mississippi, U.S.A.).**

Autor: Werner-Matthew-L; Feldman-Mark-D; Knauth-L-Paul

Quelle: Chemical Geology. 74; 1-2, Pages 113-135. 1988.

Titel: **Convection in groundwater below an evaporating salt lake; 1. Onset of instability.**

Autor: Wooding-R-A; Tyler-Scott-W; White-Ian

Quelle: Water Resources Research. 33 (1997); 6, Pages 1199-1217.

Titel: **Spherical particles in the insoluble residue from natural salt; man-made contamination.**

Autor: Yushkin-N-P

Quelle: Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences. Earth Science Sections. 333 (1995); Pages 60-63.

Titel: **Evaluation of slag mix mud-to-cement bond properties.**

Autor: Zeringue-Amy

Quelle: In: 1997 SPE annual technical conference and exhibition; Formation evaluation and reservoir geology; Part II. SPE - Society of Petroleum Engineers of AIME. 1997; Pages 591-595.

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

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

Forschungsinstitute
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