



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

**Salzlösungszuflüsse im
Salzbergbau
Mitteldeutschlands**



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

Salzlösungszuflüsse im Salzbergbau Mitteldeutschlands

Erfassung und Bewertung
der chemischen und
physikalischen Analyse-
ergebnisse

Horst-Jürgen Herbert
Arnold Schwandt

Mit Beiträgen von
Christian Reichelt
Erhard Dittrich
Jörg Martin
Heinz-Dieter Gast

Oktober 2007

Anmerkung:

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02 C 0963 gefördert.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH und dem Büro Dr. Schwandt, Erfurt durchgeführt.

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

**GRS - 226
ISBN 978-3-939355-00-7**

Deskriptoren:

Bergbau, Chemische Analyse, Geochemie, Geochemische Modellierung, Geologie, Laugengefahr, Lösungszuflüsse, Salz, Salzlösungen, Tektonik

Inhaltsübersicht

1	Zusammenfassung	1
2	Einführung und Lösungsweg.....	9
2.1	Aufgabenstellung	9
2.2	Bearbeitungsmethodik	14
3	Übersicht des Bearbeitungsgebietes	19
3.1	Entwicklung der Mitteldeutschen Kaliindustrie	19
3.2	Bildung der Kalisalze.....	20
3.2.1	Primäre bis frühdiagenetische Flözdifferenzierung	21
3.2.2	Azsendente und deszendente Umbildung	23
3.2.3	Tektonische Beanspruchung im Meso- und Känozoikum	24
3.3	Ausbildung und Lage der Schichtenfolge.....	25
3.4	Tektonik.....	30
3.5	Hydrogeologie	37
4	Bisheriger Kenntnisstand zu Salzlösungen im Salzbergbau.....	41
4.1	Herkunft und Verteilung der Salzlösungen.....	41
4.2	Gliederung der Salzlösungszuflüsse nach Zuflussmenge und Chemismus	45
4.3	Chemische Zusammensetzung der Hauptkomponenten	49
4.4	Isotopenzusammensetzung – Stabile Isotope des Wassers.....	59
4.5	Teufenabhängigkeit des Lösungsschemismus und der Zuflussmenge	66
4.6	Zur Kalisalzverbreitung und chemischen Zusammensetzung der Salzlösungen im Untersuchungsgebiet.....	72
5	Erfassung der Analyseergebnisse der Salzlösungsvorkommen	75
5.1	Erfassung und Dokumentation	75
5.2	Plausibilitätsprüfung der Analysen	76
5.2.1	Magnesium-Gehalte	77
5.2.2	Dichteberechnungen	78

5.3	Nutzung der Analysenergebnisse	80
6	Bewertung der Salzlösungszuflüsse nach ihrer chemischen Zusammensetzung.....	83
6.1	Bandbreiten der Salzgehalte und Einteilung in Gruppen	84
6.2	Korrelation zwischen Lösungsschemismus und Mineral-Sättigungen	102
6.3	Sicherheitsrelevante Eigenschaften der Lösungen der einzelnen Lösungstypen.....	104
7	Geochemische Prozesse bei der Bildung von Salzlösungen	109
7.1	Bildung sulfathaltiger Lösungen	109
7.1.1	Eindunstung des Meerwassers	110
7.1.2	Lösungsmetamorphose.....	110
7.2	Bildung CaCl ₂ -haltiger Salzlösungen	126
7.3	Lösungszusammensetzungen in Abhängigkeit vom Kontakt mit unterschiedlichen Kaligesteinen.....	132
7.3.1	Allgemeine Zusammenhänge zwischen Hauptelementen, Spurenelementen und stabilen Isotopen in eingedunstetem Meerwasser und Metamorphoselösungen	132
7.3.2	Vergleich der Lösungen Mitteldeutschlands mit Metamorphoselösungen.....	134
7.4	Mögliche Aussagen zu Salzlösungen allein aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung.....	135
7.5	Anthropogen veränderte Lösungen – Technische Lösungen.....	137
8	Bewertung der Salzlösungsvorkommen nach der tektonischen Beanspruchung.....	139
8.1	Grundlagen	139
8.2	Haupttyp I.....	143
8.3	Haupttyp II.....	150
8.4	Nachsatz	155
9	Verwertbarkeit der Ergebnisse für die Standortcharakteristik und Standortauswahl von Bergwerken in Salzformationen	157

10	Literaturübersicht	161
11	Abbildungsverzeichnis.....	187
12	Tabellenverzeichnis	197

Anhang 1 Bilddokumentation

Anhang 2 Chemische und physikalische Analysenergebnisse der Salzlösungsvorkommen

Anhang 3 Zuordnung der Bezeichnungen der chemischen und physikalischen Analysenergebnisse der Salzlösungsvorkommen zu den Probenentnahmestellen

Die Anlagen 1 bis 3 sowie den vollständigen Bericht finden Sie auf der beiliegenden CD.

1 Zusammenfassung

In Mitteldeutschland sind seit mehr als 150 Jahren Steinsalz und Kalisalze in den Bergbaurevieren Nordharz, Südharz, Saale-Unstrut, Werra-Thüringen und Scholle von Calvörde abgebaut worden. Dabei wurde eine Vielzahl von Informationen über die beobachteten Salzlösungszuflüsse im Zusammenhang mit den jeweiligen geologischen, geomechanischen und bergmännischen Verhältnissen gewonnen.

Aufgabe des vorliegenden FuE-Vorhabens 02 C 0963 war die Erfassung und systematische Auswertung der Analysenergebnisse dieser Zuflüsse und ihre Zuordnung zu den geologischen Bedingungen der betreffenden Gebiete. Die Kenntnis der Herkunft und Entwicklung von möglichen Lösungszuflüssen und ihrer Zutrittswege stellt eine wichtige Grundlage für die Bewertung der Langzeitsicherheit von Untertagedeponien (UTD) für chemisch-toxische Abfälle, von Versatzbergwerken (UTV) und von Endlagern für radioaktive Abfälle in Salzformationen dar. Von Interesse sind die Untersuchungsergebnisse weiterhin für produzierende Kali- und Steinsalzgruben und solche, die geflutet oder verwahrt werden sollen oder bereits verwahrt sind.

Im vorliegenden Bericht wurden den Untersuchungsergebnissen die Formulierung der Aufgabenstellung sowie die Beschreibung der angewendeten Arbeitsmethodik vorangestellt. Bei der Darstellung des Bearbeitungsgebietes wurde zunächst auf die historische und technische Entwicklung des Kalibergbaus in Mitteldeutschland eingegangen und die Bildung der Kaliflöze erläutert. Weiterhin wurden die Schichtenfolge, die Tektonik und die Hydrogeologie in diesen Gebieten beschrieben. Die im Deckgebirge der Kalireviere vorhandenen Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter wurden tabellarisch aufgeführt.

Der bisherige Kenntnisstand zur Herkunft und Entstehung von Salzlösungen wurde dargestellt. Der Stoffbestand von salinaren Lösungen, bisherige Klassifizierungen nach dem Chemismus und Zusammenhänge zwischen der Teufe der Salzlösungsaustritte, deren Dichte und dem $MgCl_2$ -Gehalt wurden vorgestellt. Für das Saale-Unstrut- und das Nordharz-Revier wurden die Herkunft und die Verteilung der $CaCl_2$ -Gehalte erläutert.

Anschließend folgen im Bericht neue Daten, Auswertungen und Interpretationen. Aus dem Untersuchungsgebiet wurden 5901 Lösungsanalysen dokumentiert (Anhang 2). Dazu liegen folgende Angaben vor: Laufende Nr., Probenbezeichnung (verschlüsselt), Datum der Probennahme, geologische Position der Zutrittsstelle, Dichte [kg/l], Wassergehalt [g/l], chemische Zusammensetzung als fiktive Salzgehalte in [g/l] ($MgCl_2$, NaCl,

KCl, CaCl₂, MgSO₄ und CaSO₄). Der Wassergehalt wurde aus der Gesamtanalyse und der Dichte berechnet. In vielen Fällen liegen die Analysen zusätzlich als Ionengehalte (g/l bzw. mg/l) vor. Außerdem wurden der pH-Wert, Karbonathärte [°dH], HCO₃ und CO₃ [mval/l] angegeben. In manchen Fällen liegen auch Bestimmungen der Spurenelemente Fe³⁺, Fe²⁺, B, J, Li, Sr, Rb, Ba, Cu, Zn, Mn, Hg, NH₄, NO₃, H₂S und Öl in mg/l vor. Die wenigen Isotopenuntersuchungen beschränken sich auf ³H [TE], δD [‰] und δ¹⁸O [‰].

Die Analysen wurden anhand der Übereinstimmung des angegebenen Chemismus mit der gemessenen und berechneten Dichte auf ihre Plausibilität überprüft. Dabei stellte sich heraus, dass ein Teil der Analysen für die weitere Auswertung im Sinne der Aufgabenstellung nicht geeignet war. Da die Analysen teilweise über 100 Jahre alt sind, ist es kaum mehr möglich, die Gründe für fehlerhafte Bestimmungen und problematische Probenahme zu ermitteln. Bei der Auswertung wurden neben offensichtlich fehlerhaften Analysen auch solche nicht berücksichtigt, für die sich während des Beobachtungszeitraumes die Randbedingungen der Probenentnahme änderten. Dazu gehören Standlösungen, Proben aus Sammelbecken, Spülversatzlösungen, durch technische Aktivitäten veränderte Salzlösungen, Proben aus Zuflüssen mit sehr geringer Schüttungsrate (< 0,1 l/min) und Flutungslösungen.

Die Auswertung der Analysendaten wurde anhand der Salzgehalte durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass sowohl bei den einzelnen Zuflüssen als auch beim Vergleich der Zuflüsse untereinander in der Regel beträchtliche Schwankungsbreiten bestehen. Die Anzahl der Salzlösungszuflüsse mit über lange Zeiträume gleich bleibender Zusammensetzung ist gering. Aus den Analysendaten ist erkennbar, dass sich die chemische Zusammensetzung der Salzlösungszuflüsse im mitteldeutschen Salzbergbau in bestimmten, charakteristischen Bandbreiten der Makrokomponenten bewegt.

Bedingt durch die unterschiedliche Löslichkeit der Salze korrelieren hohe MgCl₂-Werte mit geringen NaCl-Werten. Umgekehrt weisen Salzlösungen mit hohen NaCl-Werten nur geringe MgCl₂-Konzentrationen auf. Viele Lösungen besitzen einen relativ hohen MgSO₄-Gehalt, z.B. bedingt durch den Kontakt mit Kieserit in den Kalisalzen, die Reduzierung der Schüttmenge, Eindunstungen u.a. Außerdem gibt es auch einige wenige Lösungen mit relativ hohem CaCl₂-Gehalt¹. CaCl₂ kann einerseits durch die Auflösung

¹ MgSO₄ und CaCl₂ können nicht gleichzeitig in einer Lösung auftreten. Nach der Reaktion MgSO₄ + CaCl₂ → CaSO₄ + MgCl₂ wird CaSO₄ als Gips ausgeschieden und die Lösung reichert sich an MgCl₂ an.

von Tachhydrit in die Lösung gelangen, andererseits ist es aber möglich, die auftretenden CaCl_2 -Gehalte durch Einwirkung von MgCl_2 -reichen Salzlösungen auf den Hauptdolomit oder auf den dolomitischen Teil des Grauen Salztons zu erklären.

Die Auswertung der Analysendaten erfolgte mittels graphischer Darstellungen der Salzgehalte und der Sättigungsverhältnisse der Lösungen. Die Zusammenhänge zwischen den Salzgehalten untereinander und den Sättigungsverhältnissen wurden dokumentiert und erklärt. Außerdem wurde die Bildung sulfathaltiger Lösungen sowie von CaCl_2 -haltiger Lösungen diskutiert. Aus dem Vergleich des Lösungsschemismus mit geochemischen Modellierungen, in denen mögliche Reaktionsverläufe zur Bildung der Lösungen berechnet wurden, lassen sich belastbare Anhaltspunkte für die genetische Entwicklung der Salzlösungen ableiten. Lösungen, die durch die Auflösung von unterschiedlichen Kalisalzen entstanden sind, unterscheiden sich eindeutig voneinander.

Die Kalisalze werden durch bestimmte Mineralparagenesen charakterisiert, die den maximalen MgCl_2 -Gehalt einer Lösung bestimmen. Da der MgCl_2 -Gehalt der Lösungen während der Lösungsmetamorphose stetig ansteigt, ist dieses Salz für eine Klassifizierung der Lösungen besonders gut geeignet. Alle anderen Salzgehalte können während der gleichen Reaktion ansteigen und abfallen. Sie eignen sich daher weniger für die genaue Charakterisierung der Lösungen. Daraus folgt, dass ein bestimmter MgCl_2 -Gehalt auf dem Reaktionspfad nur einmal auftreten kann, gleiche Gehalte der anderen Salze jedoch mehrfach. Auf empirische Weise sind schon frühere Bearbeiter der Laugenproblematik im Salzbergbau zu dieser Erkenntnis gelangt und haben sie in eigenen Klassifikationen (Schwandt 1969, v. Borstel 1993) berücksichtigt. In dieser Arbeit ist es zum ersten Mal gelungen, die Hintergründe dafür zu erkennen und zu quantifizieren. Möglich war dies durch die Kombination geologischer Erkenntnisse mit geochemischen Modellierungen. Als Ergebnis wird ein neues, einfaches Klassifizierungsschema vorgestellt, welches Rückschlüsse auf das Gefährdungspotential der Salzlösungen zulässt. Im neuen Klassifikationsschema von Herbert/Schwandt werden die Lösungstypen A, B, C, D und E unterschieden. Diese sind wie folgt charakterisiert:

- **Typ A**

Die Zuflüsse dieses Typs weisen einen MgCl_2 -Gehalt von mehr als 400 g/l auf. Sie sind bereits von früheren Bearbeitern geschlossenen Systemen zugeordnet worden, da die Zuflussmengen alle nach Erreichen eines Maximalwertes zurückgegangen und versiegt sind. Der größte Zufluss dieses Typs hatte eine Schüttungsmenge von rd. 0,5 Mio. m^3 . Er war im Hauptanhydrit über einem

1 Zusammenfassung

In Mitteldeutschland sind seit mehr als 150 Jahren Steinsalz und Kalisalze in den Bergbaurevieren Nordharz, Südharz, Saale-Unstrut, Werra-Thüringen und Scholle von Calvörde abgebaut worden. Dabei wurde eine Vielzahl von Informationen über die beobachteten Salzlösungszuflüsse im Zusammenhang mit den jeweiligen geologischen, geomechanischen und bergmännischen Verhältnissen gewonnen.

Aufgabe des vorliegenden FuE-Vorhabens 02 C 0963 war die Erfassung und systematische Auswertung der Analysenergebnisse dieser Zuflüsse und ihre Zuordnung zu den geologischen Bedingungen der betreffenden Gebiete. Die Kenntnis der Herkunft und Entwicklung von möglichen Lösungszuflüssen und ihrer Zutrittswege stellt eine wichtige Grundlage für die Bewertung der Langzeitsicherheit von Untertagedeponien (UTD) für chemisch-toxische Abfälle, von Versatzbergwerken (UTV) und von Endlagern für radioaktive Abfälle in Salzformationen dar. Von Interesse sind die Untersuchungsergebnisse weiterhin für produzierende Kali- und Steinsalzgruben und solche, die geflutet oder verwahrt werden sollen oder bereits verwahrt sind.

Im vorliegenden Bericht wurden den Untersuchungsergebnissen die Formulierung der Aufgabenstellung sowie die Beschreibung der angewendeten Arbeitsmethodik vorangestellt. Bei der Darstellung des Bearbeitungsgebietes wurde zunächst auf die historische und technische Entwicklung des Kalibergbaus in Mitteldeutschland eingegangen und die Bildung der Kaliflöze erläutert. Weiterhin wurden die Schichtenfolge, die Tektonik und die Hydrogeologie in diesen Gebieten beschrieben. Die im Deckgebirge der Kalireviere vorhandenen Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter wurden tabellarisch aufgeführt.

Der bisherige Kenntnisstand zur Herkunft und Entstehung von Salzlösungen wurde dargestellt. Der Stoffbestand von salinaren Lösungen, bisherige Klassifizierungen nach dem Chemismus und Zusammenhänge zwischen der Teufe der Salzlösungsaustritte, deren Dichte und dem $MgCl_2$ -Gehalt wurden vorgestellt. Für das Saale-Unstrut- und das Nordharz-Revier wurden die Herkunft und die Verteilung der $CaCl_2$ -Gehalte erläutert.

Anschließend folgen im Bericht neue Daten, Auswertungen und Interpretationen. Aus dem Untersuchungsgebiet wurden 5901 Lösungsanalysen dokumentiert (Anhang 2). Dazu liegen folgende Angaben vor: Laufende Nr., Probenbezeichnung (verschlüsselt), Datum der Probennahme, geologische Position der Zutrittsstelle, Dichte [kg/l], Wassergehalt [g/l], chemische Zusammensetzung als fiktive Salzgehalte in [g/l] ($MgCl_2$, NaCl,

KCl, CaCl₂, MgSO₄ und CaSO₄). Der Wassergehalt wurde aus der Gesamtanalyse und der Dichte berechnet. In vielen Fällen liegen die Analysen zusätzlich als Ionengehalte (g/l bzw. mg/l) vor. Außerdem wurden der pH-Wert, Karbonathärte [°dH], HCO₃ und CO₃ [mval/l] angegeben. In manchen Fällen liegen auch Bestimmungen der Spurenelemente Fe³⁺, Fe²⁺, B, J, Li, Sr, Rb, Ba, Cu, Zn, Mn, Hg, NH₄, NO₃, H₂S und Öl in mg/l vor. Die wenigen Isotopenuntersuchungen beschränken sich auf ³H [TE], δD [‰] und δ¹⁸O [‰].

Die Analysen wurden anhand der Übereinstimmung des angegebenen Chemismus mit der gemessenen und berechneten Dichte auf ihre Plausibilität überprüft. Dabei stellte sich heraus, dass ein Teil der Analysen für die weitere Auswertung im Sinne der Aufgabenstellung nicht geeignet war. Da die Analysen teilweise über 100 Jahre alt sind, ist es kaum mehr möglich, die Gründe für fehlerhafte Bestimmungen und problematische Probenahme zu ermitteln. Bei der Auswertung wurden neben offensichtlich fehlerhaften Analysen auch solche nicht berücksichtigt, für die sich während des Beobachtungszeitraumes die Randbedingungen der Probenentnahme änderten. Dazu gehören Standlösungen, Proben aus Sammelbecken, Spülversatzlösungen, durch technische Aktivitäten veränderte Salzlösungen, Proben aus Zuflüssen mit sehr geringer Schüttungsrate (< 0,1 l/min) und Flutungslösungen.

Die Auswertung der Analysendaten wurde anhand der Salzgehalte durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass sowohl bei den einzelnen Zuflüssen als auch beim Vergleich der Zuflüsse untereinander in der Regel beträchtliche Schwankungsbreiten bestehen. Die Anzahl der Salzlösungszuflüsse mit über lange Zeiträume gleich bleibender Zusammensetzung ist gering. Aus den Analysendaten ist erkennbar, dass sich die chemische Zusammensetzung der Salzlösungszuflüsse im mitteldeutschen Salzbergbau in bestimmten, charakteristischen Bandbreiten der Makrokomponenten bewegt.

Bedingt durch die unterschiedliche Löslichkeit der Salze korrelieren hohe MgCl₂-Werte mit geringen NaCl-Werten. Umgekehrt weisen Salzlösungen mit hohen NaCl-Werten nur geringe MgCl₂-Konzentrationen auf. Viele Lösungen besitzen einen relativ hohen MgSO₄-Gehalt, z.B. bedingt durch den Kontakt mit Kieserit in den Kalisalzen, die Reduzierung der Schüttmenge, Eindunstungen u.a. Außerdem gibt es auch einige wenige Lösungen mit relativ hohem CaCl₂-Gehalt¹. CaCl₂ kann einerseits durch die Auflösung

¹ MgSO₄ und CaCl₂ können nicht gleichzeitig in einer Lösung auftreten. Nach der Reaktion MgSO₄ + CaCl₂ → CaSO₄ + MgCl₂ wird CaSO₄ als Gips ausgeschieden und die Lösung reichert sich an MgCl₂ an.

von Tachhydrit in die Lösung gelangen, andererseits ist es aber möglich, die auftretenden CaCl_2 -Gehalte durch Einwirkung von MgCl_2 -reichen Salzlösungen auf den Hauptdolomit oder auf den dolomitischen Teil des Grauen Salztons zu erklären.

Die Auswertung der Analysendaten erfolgte mittels graphischer Darstellungen der Salzgehalte und der Sättigungsverhältnisse der Lösungen. Die Zusammenhänge zwischen den Salzgehalten untereinander und den Sättigungsverhältnissen wurden dokumentiert und erklärt. Außerdem wurde die Bildung sulfathaltiger Lösungen sowie von CaCl_2 -haltiger Lösungen diskutiert. Aus dem Vergleich des Lösungsschemismus mit geochemischen Modellierungen, in denen mögliche Reaktionsverläufe zur Bildung der Lösungen berechnet wurden, lassen sich belastbare Anhaltspunkte für die genetische Entwicklung der Salzlösungen ableiten. Lösungen, die durch die Auflösung von unterschiedlichen Kalisalzen entstanden sind, unterscheiden sich eindeutig voneinander.

Die Kalisalze werden durch bestimmte Mineralparagenesen charakterisiert, die den maximalen MgCl_2 -Gehalt einer Lösung bestimmen. Da der MgCl_2 -Gehalt der Lösungen während der Lösungsmetamorphose stetig ansteigt, ist dieses Salz für eine Klassifizierung der Lösungen besonders gut geeignet. Alle anderen Salzgehalte können während der gleichen Reaktion ansteigen und abfallen. Sie eignen sich daher weniger für die genaue Charakterisierung der Lösungen. Daraus folgt, dass ein bestimmter MgCl_2 -Gehalt auf dem Reaktionspfad nur einmal auftreten kann, gleiche Gehalte der anderen Salze jedoch mehrfach. Auf empirische Weise sind schon frühere Bearbeiter der Laugenproblematik im Salzbergbau zu dieser Erkenntnis gelangt und haben sie in eigenen Klassifikationen (Schwandt 1969, v. Borstel 1993) berücksichtigt. In dieser Arbeit ist es zum ersten Mal gelungen, die Hintergründe dafür zu erkennen und zu quantifizieren. Möglich war dies durch die Kombination geologischer Erkenntnisse mit geochemischen Modellierungen. Als Ergebnis wird ein neues, einfaches Klassifizierungsschema vorgestellt, welches Rückschlüsse auf das Gefährdungspotential der Salzlösungen zulässt. Im neuen Klassifikationsschema von Herbert/Schwandt werden die Lösungstypen A, B, C, D und E unterschieden. Diese sind wie folgt charakterisiert:

- **Typ A**

Die Zuflüsse dieses Typs weisen einen MgCl_2 -Gehalt von mehr als 400 g/l auf. Sie sind bereits von früheren Bearbeitern geschlossenen Systemen zugeordnet worden, da die Zuflussmengen alle nach Erreichen eines Maximalwertes zurückgegangen und versiegt sind. Der größte Zufluss dieses Typs hatte eine Schüttungsmenge von rd. 0,5 Mio. m^3 . Er war im Hauptanhydrit über einem

Carnallitverbreitungsgebiet gespeichert. Alle Zuflüsse des Lösungstyps A sind aus Carnalliten bzw. aus Carnalliten mit Tachhydrit zugetreten.

- **Typ B**

Die $MgCl_2$ -Gehalte dieses Typs liegen zwischen 400 und 320 g/l. Es besteht kein bekannter Kontakt zu Oberflächenwässern. Nach bisherigen Erkenntnissen stammen auch diese Lösungen aus geschlossenen Systemen. Hier gingen die Zuflussmengen mit der Zeit zurück. Die Zuflüsse traten überwiegend aus Verbreitungsgebieten von Carnallit, mit und ohne Tachhydrit, sowie vereinzelt aus den Mischsalzbereichen, bestehend aus Carnalliten und Hartsalzen aus.

Von der Menge her unkritische Zuflüsse der Typen A und B traten somit aus geschlossenen Reservoiren aus Carnalliten, mit und ohne Tachhydrit aus, die ans Beckentiefste gebunden sind.

- **Typ C**

Die $MgCl_2$ -Gehalte schwanken zwischen 320 und 150 g/l. Bei den Lösungen dieses Typs ist nicht in jedem Fall bekannt, ob sie Kontakt zu Oberflächenwässern hatten oder noch haben. Manche dieser Zuflüsse kamen aus dem Kainit, der aus der Lösungsmetamorphose von Carnallit durch Deckgebirgswässer hervorgegangen ist. Lösungen des Zuflusstyps C sind aus einer breiten Palette von Salzen ausgetreten: Mischsalzen, Hartsalzen und Sylviniten, in zwei Fällen sogar aus Carnalliten mit Tachhydrit, aber kaum aus verstaubten Hartsalzen.

- **Typ D**

Bei einem $MgCl_2$ -Gehalt unter 150 g/l ist dieser Typ NaCl-reich. Ob ein Kontakt zu Deckgebirgslösungen bestand, ist nicht in jedem Fall erwiesen, aber oft anzunehmen. Bei manchen Lösungen dieses Typs wurde im Laufe der geologischen Entwicklung der ursprüngliche Kontakt zu Deckgebirgswässern wieder unterbrochen. Beim Ausfluss aus Steinsalz- oder/und Kalisalzgebieten hatten diese Lösungen ein geringes Volumen und versiegten nach kurzer Zeit. Bei Salzlösungen aus anhydritischen oder karbonatischen Gesteinen (Anhydritmittel, Hauptanhydrit, Werra-Anhydrit, Hauptdolomit, Plattendolomit, Zechsteinkalk) waren die Gesamtzuflussmengen meist größer und ein Versiegen nicht immer zu beobachten. Lösungen des Typs D sind, soweit rekonstruierbar, ausschließlich an verstaubte und anhydritische Hartsalze gebunden. Zuflüsse aus Verstaubungszonen sind mit besonderer Vorsicht zu behandeln. Verstaub-

bungszonen sind immer ein Hinweis auf große Wassermengen, die in der geologischen Formation vorhanden waren und teilweise noch sind.

- **Typ E**

Abweichend von der dargestellten Methodik der Typisierung erfolgt die Ausweisung des Typs E. Er wird durch eine Bandbreite des $MgCl_2$ -Gehaltes zwischen 320 g/l und 0 g/l charakterisiert, d.h., er umfasst die Typen C und D. Bei den Salzlösungsaustritten dieses Typs ist in der Anfangsphase der $MgCl_2$ -Gehalt in der Regel hoch. Im Laufe der Zuflussentwicklung nimmt er deutlich ab. Dafür steigt der NaCl-Gehalt an, erreicht ein Maximum mit dem Verschwinden des $MgCl_2$ aus der Lösung, um danach infolge eintretender Halit-Untersättigung schnell abzufallen. In Verstaubungs- und einigen Hartsalzgebieten kann der $MgCl_2$ -Gehalt auch von Anfang an fehlen. Bei den im Untersuchungsgebiet beobachteten Zuflüssen des Typs E konnte oft ein Zusammenhang der Zuflüsse mit Wässern aus dem Deckgebirge durch zahlreiche, über längere Zeit vorgenommene Untersuchungen der Schüttungsmengen und des Chemismus, nachgewiesen werden. Zum Typ E können auch Zuflüsse gehören, die aus untersättigten Lösungen stammen sowie Zuflüsse aus Carnallititen und Hartsalzen.

Die Analyse der Verteilung der Kalisalze im Zechsteinbecken Mitteldeutschlands hat ergeben, dass primärsedimentäre Carnallitite im Zentrum des Beckens liegen und Hartsalze verstärkt zum Beckenrand hin auftreten. Folgende Abfolge der Kalisalze ist vom Beckenrand zum Beckenzentrum hin zu beobachten: Verstaubtes Hartsalz, anhydritisches Hartsalz, Sylvinit, kieseritisches Hartsalz, Mischsalz (kieseritisches Hartsalz mit Carnallit), Carnallit, bischofithaltiger Carnallit, bischofit- und tachhydrit-haltiger Carnallit. Die Anteile der Mg-haltigen Kalisalze Kieserit, Carnallit, Bischofit und Tachhydrit in den Kalisalzen steigt vom Beckenrand zum Beckenzentrum hin an. Dies ist dem Umstand zu verdanken, dass zum Beckenrand hin diese Salze zunehmend durch Prozesse der Lösungsmetamorphose aufgelöst und aus der primärsedimentären Mineralparagenese entfernt wurden. Da für das Weglösen größerer Mengen Mg-Salze auch größere Wassermengen erforderlich sind, müssen für die Lösungsmetamorphose am Beckenrand vergleichsweise größere Wassermengen zur Verfügung gestanden haben. Da zum Beckenrand hin im Allgemeinen die Wassermengen in den Salzformationen ansteigen und zu verstärkter Umwandlung der Kalisalze führen, ist damit zu erklären, dass in flacher Lagerung die lösungsfähigeren Salze zum Beckenrand hin ausdünnen und die wasserführenden Schichten im Liegenden und im Hangenden näher an lösungsfähige Gesteine heranreichen.

Zur Beurteilung des Gefährdungspotentials von Lösungszuflüssen bedarf es somit einer komplexen Analyse, zu der die Charakterisierung der chemischen Zusammensetzung ebenso gehört, wie die Einordnung der Salzlösungsvorkommen in die geologischen und tektonischen Verhältnisse. Eine rein chemisch-mineralogische Betrachtung ist nicht ausreichend.

Nach tektonischen Gesichtspunkten lassen sich 2 Haupttypen von Zuflüssen unterscheiden:

- **Haupttyp 1**

Diesem Haupttyp werden alle Salzlösungszuflüsse zugeordnet, die in horizontal- bis lokal steil gelagerten und unregelmäßig einfallenden oder verfalteten Salinarbereichen aufgetreten sind. Sie haben die größte flächenhafte Verbreitung innerhalb des Bearbeitungsgebiets und umfassen große Teile des thüringische Werra-Kalireviers, des Südharz-Kalireviers sowie des Saale-Unstrut- und des Nordharz-Kalireviers.

- **Haupttyp 2**

Zum Haupttyp 2 gehören die Abbaugelände an Sattelflanken und gefalteten Sattelzonen, die im Saale-Unstrut- und Nordharz-Kalirevier liegen. Die Sattelflanken sind im Top-Bereich abgelagert.

Inwieweit eine Unterteilung der Haupttypen nach Einzelstörungen, Störungszonen und Kreuzungsbereichen mehrerer Bruchstörungen oder auch nach Sattelzonen des Salinars vorgenommen werden kann, müsste durch eine Erweiterung der Datenbasis geprüft werden.

Aus den Daten zur allgemeinen hydrogeologischen Situation ist erkennbar, dass

- in Gebieten mit vergleichbarer stratigraphischer und tektonischer Situation mit zunehmender Teufe eine Erhöhung der Salzkonzentration und der Dichte der Lösungen auftreten. Dabei reduziert sich die Anzahl der Zuflüsse, wie auch die Zuflussmenge. Im Hauptanhydrit, dem wichtigsten Speichergestein für Salzlösungen innerhalb der Salzformation, kann eine deutliche, teufenabhängige Dichteschichtung der Lösungen beobachtet werden.
- hochkonzentrierte Salzlösungen führen in Kaliabbaugeländen zu einer begrenzten Durchfeuchtung der Salze. Beim Zutritt der Salzlösungen ins Grubengebäude kann durch Erosion der durchfeuchteten Salze eine Erweiterung der

Zuflusswege erfolgen, was zu einer schnellen Vergrößerung der Schüttmengen führt.

- durch Flutung oder durch Stapelung von gesättigten Salzlösungen in Grubenbauen i.d.R. keine bzw. nur unbedeutende Veränderungen des Chemismus der Salzlösungen auftreten. Dagegen bewirken untersättigte Salzlösungen eine Subrosion der Gesteine, die in Abhängigkeit von den in den Gruben anstehenden Salzen zu einer Aufsättigung der Lösungen führt. Die Auflösung beginnt an den Schichtgrenzen bzw. an bruchtektonisch oder auch geomechanisch beanspruchten Zonen.
- eingebrachte anthropogene Lösungen erhebliche Schwierigkeiten bei der Identifizierung der natürlichen Lösungszuflüsse verursachen können. Bereits geringe Mengen an Fremdwässern lassen z. B. die Nutzung von Tritium für eine Altersbestimmung nicht mehr zu. Die in vielen Fällen zur Abdichtung von Salzlösungszuflüssen genutzten Zemente verfälschen die ursprüngliche chemische Zusammensetzung der Salzlösungen durch die Bildung von CaCl_2 jahrzehntelang, wenn kein größerer Abzug der Salzlösungen aus den angefahrenen Speichern erfolgt.

In welchem Umfang eine Sedimentation von Auslaugungsrückständen die weitere Auflösung davon bedeckter salinärer Gesteine vermindert oder unterbindet, lässt sich nur für den konkreten Einzelfall aussagen. Durch Einzelbeispiele ist belegt, dass ungesättigte Salzlösungen über mehrere Kilometer Entfernung auf tonigen Rückständen in Steinsalzstrecken geflossen sind, ohne sich weiter aufzusättigen. Der gleiche Effekt tritt ein, wenn die Streckensohle durch sekundäre, schwerlösliche Salze (z. B. Gips) abgedeckt wird, die aus gesättigten Salzlösungen auskristallisiert sind.

Den entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung von Zuflussmenge und Chemismus der Salzlösungen üben die in den Zuflussbereichen entwickelten geologischen Verhältnisse aus. Dabei ist die Wirkungsweise sehr differenziert.

- In flacher Lagerung und bei regelmäßiger Ausbildung der Schichten aufgefahrene Grubenbaue, ohne erkennbare bruchtektonische Beanspruchung, sind fast immer salzlösungsfrei. In Ausnahmen beschränkt sich die Salzlösungsführung auf einzelne Nassstellen und die Ausbildung von Stalaktiten, bestehend aus Steinsalz und aus Sulfaten. Hier wurden die im Salzgebirge noch vorhandenen, sehr geringen Salzlösungsmengen ausgepresst. Die wenigen Salzlö-

sungsvorkommen verteilen sich auf große Aufschlussflächen in den einzelnen Abbaurevieren.

- Mit dem Auftreten von bruchtektonischen Strukturformen innerhalb der salinaren Schichtenfolge und des Prä- und Postsalinars setzen Salzlösungszuflüsse ein. In Abhängigkeit von der jeweiligen tektonischen Situation und der vorliegenden Ausbildung der Schichtenfolge ist die Zuflussmenge sehr unterschiedlich. Die größten Zuflussmengen treten auf, wenn sich Bruchstörungen verschneiden oder Sattelzonen kreuzen. Fehlen diese Bruchstrukturen, so sind selbst in weiträumig aufgeschlossenen Abbaugebieten keine relevanten Salzlösungsvorkommen nachweisbar.

Für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit von UTD's, UTV's oder eines Endlagers in Salzformationen sind in Mitteldeutschland folgende Bedingungen besonders günstig:

- Das Vorhandensein von Salzformationen in flacher Lagerung, deren Gefährdungspotential durch Salzlösungszutritte durch komplexe Gefährdungsanalysen gut abschätzbar ist. Bereiche mit besonders geringem Gefährdungspotential konnten in dieser Arbeit nachgewiesen werden.
- Die Ausbildung von Steinsalzlagerstätten in flacher bis welliger Lagerung und mit Mächtigkeiten des Staßfurtsteinsalzes von 500 bis 1200 m in bergmännisch beherrschbaren Teufen.
- Nachweis von Bereichen geringer Bruchtektonik im Deckgebirge und im Salinar.
- Das Vorhandensein ausreichend mächtiger Barrieren gegen wasserführende Schichten im Hangenden und Liegenden.

2 Einführung und Lösungsweg

2.1 Aufgabenstellung

Bei der seit über 150 Jahren stattfindenden Gewinnung von Kali- und Steinsalz ist ein direkter Zusammenhang der Salzlösungszuflüsse in den Gruben mit den geologischen und geomechanischen Verhältnissen sowie der bergmännischen Situation festgestellt worden. Gegenstand des FuE-Vorhabens ist die allgemeine und spezielle Erfassung und Nutzung chemischer und physikalischer Analysendaten aus Lösungszuflüssen in Verbindung mit der Bewertung der geologischen Situation. Das Ziel ist es, belastbare Kriterien für die Dichtheit von geologischen Barrieren für Produktionsgruben, Endlager, Untertage-Deponien und Versatzbergwerke zu finden.

Wie aus Ergebnisberichten und Beobachtungen (Seifert, Schwandt 1997; u. a.) zu entnehmen ist, sind in Mitteldeutschland insgesamt nahezu 140 Millionen m³ Wasser und Salzlösungen in die Kali- und Steinsalzgruben zugelaufen oder ihnen zugeleitet worden (Schwandt, Seifert 1999). Teilweise sind die natürlichen Zuflüsse nachträglich aus den Gruben gepumpt worden. Von diesen Zuflüssen ist ein umfangreiches Analysenmaterial vorhanden, welches im Rahmen dieser Arbeit übersichtlich ausgewertet werden muss. Die Bearbeiter haben in ihrer teilweise über 40-jährigen Tätigkeit mehr als 800 Salzlösungszuflüsse untersucht und dabei über 30.000 chemische Einzelwerte ausgewertet. Vereinbarungsgemäß sollen davon etwas mehr als 3000 der besonders relevanten Analysenergebnisse detailliert ausgewertet werden. Dabei sind schwerpunktmäßig Zuflüsse mit langer Lebensdauer zum Erkennen von Veränderungen des Chemismus zu berücksichtigen.

Eine genetische Bewertung der Salzlösungsvorkommen erfolgt im Rahmen dieses Vorhabens nur im begrenzten Umfang. Für eine vollständige Bewertung ist das angewendete Untersuchungsspektrum zu klein. Dies trifft insbesondere für geomechanische Bewertungen sowie hydrodynamische Untersuchungen zu. Auch der geologische und hydrogeologische Bearbeitungsumfang müsste teilweise erweitert werden.

Eine vollständige und komplexe Dokumentation aller bisher in den Salzbergwerken Mitteldeutschlands aufgetretenen Zuflüsse von Salzlösungen und Wässern liegt bisher nicht vor. Die vorhandenen Darstellungen sind unvollständig. Sie beschränken sich meist auf spezielle Aussagen und Einzelaspekte.

Tab. 2-1 Erforderliche Daten und Informationen für die Klärung der Genese von Lösungen im Salzgebirge (nach Herbert 2000)

Zu Lösungen und Gasen	Zur Salzformation zum Deckgebirge	Zum Bergwerk	Zur geochemischen Modellierung
<p>Lösungen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zuflussrate <p>Physikalische Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dichte - Temperatur - Druck - elektrische Leitfähigkeit <p>Chemische Zusammensetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> - pH-Wert - Hauptelemente Na, K, Ca, Mg, Cl, S - Spurenelemente Br, B, Li, Rb, Sr, Fe - Isotopen: ¹⁸O, D, H, ³⁴S <p>Gase</p> <ul style="list-style-type: none"> - Art der Gase - Menge der Gase - Temperatur - Druck - Bindungsform <ul style="list-style-type: none"> · freie Gase · gelöste Gase - Isotopenzusammensetzung 	<p>Geologie</p> <ul style="list-style-type: none"> - Stratigraphie - Tektonik <ul style="list-style-type: none"> · groß- und kleinräumiges rupturales Inventar <p>Mineralogie / Petrographie</p> <ul style="list-style-type: none"> - Gesteinstypen - mineralogische Zusammensetzung - Gefüge - Flüssigkeitseinschlüsse - Genese und Metamorphose der Salzformation <p>Gebirgsmechanik</p> <ul style="list-style-type: none"> - Konvergenzverhalten - Spannungsverhalten <p>Geophysik</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lokalisierung von: <ul style="list-style-type: none"> · Lösungsreservoirien · Fließwegen · mikroseismischen Ereignissen 	<p>Grubengebäude</p> <ul style="list-style-type: none"> - Grubenrisse - Lage der Erkundungsbohrungen - Lage der Wasserwarnlinie - Lage der Sicherheitspfeiler zum <ul style="list-style-type: none"> · Deckgebirge · Nachbargruben · Tiefbohrungen · Auflockerungszone - Aufschlussverhältnisse - Lage potentiell lösungsführender Horizonte wie A3, Na3am, Ca2 - Informationen zu technischen Lösungen <ul style="list-style-type: none"> · Betriebslösungen · Bohrspüllösungen · Spüllösungen · Versatzlösungen · Wetterlaugen 	<p>Eingabedaten</p> <ul style="list-style-type: none"> - chemische Zusammensetzung der Lösung - Dichte - Temperatur - Reaktanden - Auflösungsraten <p>Modelle zur Berechnung von Aktivitätskoeffizienten</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pitzer-Modell <p>Thermodynamische Datenbasis</p> <ul style="list-style-type: none"> - Wechselwirkungskoeffizienten zwischen Ionen und Spezies in der Lösung - Löslichkeitsdaten - Temperaturabhängigkeiten - Druckabhängigkeiten <p>Ergebnisse der Modellierung</p> <ul style="list-style-type: none"> - Entwicklung der Lösungszusammensetzung - Speziation in der Lösung - Sättigungswerte der Bodenkörper - Stoffumsätze - Reaktionsgleichungen

Wissenschaftlich begründete Aussagen einschließlich der Ableitung von Schlussfolgerungen zur Bergbausicherheit wurden in der Regel nur für einzelne Bergwerke angefertigt, bei denen eine langfristige Nutzung möglich schien. Hierzu gehören die Kalibergwerke Zielitz und Unterbreizbach, die Grube Teutschenthal, das Steinsalzbergwerk Bernburg, die Bergwerke Sondershausen und Bleicherode. Aber selbst die älteste und sehr umfassende Untersuchung von Baumert (1928) stellt die zum damaligen Zeitpunkt vorhandenen Untersuchungsergebnisse unvollständig dar, weil die meisten geochemischen Analysenergebnisse bei den Betreibern unter Verschluss standen oder verschlüsselt waren. Gleiches trifft für die Untersuchungen von Koch, Kockert und Grunewald (1968) an Salzlösungen und Wässern zu. Von Schwandt (1969) wurde schwerpunktmäßig die Verknüpfung der Zuläufe mit den geologischen Verhältnisse in Austrittsgebieten der Salzlösungsvorkommen im Saale-Unstrut- und im Nordharz-Kaligebiet dargestellt. Koch (1985) erweiterte diese Aussagen auf das Werra-Kaligebiet. Von Borstel (1992) und Herbert (2000) stützen sich bei ihren Übersichtsdarstellungen auf die Untersuchungsergebnisse, die sie bei FuE-Arbeiten zur Bewertung von Endlagern bzw. Deponiegruben erarbeitet hatten.

In der hier zu erstellenden Dokumentation sollen die statistisch abgesicherten Beziehungen zwischen dem Chemismus der Salzlösungszutritte und dem geologisch-technischen Umfeld anhand des umfangreichen, in Mitteldeutschland vorhandenen Datenmaterials berücksichtigt werden. Im Einzelnen handelt es sich um:

- die Beziehungen des Chemismus der Salzlösungen zur Ausbildung der Salze innerhalb der Schichtenfolge, getrennt nach Vertaubung, Hartsalz, Carnallit, Anhydrit und Steinsalz,
- die Beziehungen des Chemismus der Lösungen zur Bruchtektonik bei flacher, halbsteiler und steiler Lagerung sowie bei starker Verfaltung oder auch salzstockartiger Aufpressung und
- die Beziehungen des Chemismus der Lösungen zur Subrosion.

Die Erfassung und Bewertung der Salzlösungsvorkommen in den Grubenbetrieben sind wichtige Voraussetzungen für die Beurteilung der Bergbausicherheit der produzierenden Gruben und die Erarbeitung von qualifizierten Langzeitsicherheitsnachweisen für Endlager und Untertagedeponien (UTD) sowie Bergwerke mit einer untertägigen Verwertung der Abfälle als Versatz (UTV). Zur Beurteilung der Bergbausicherheit werden hierzu gegenwärtig vor allem die praktischen Erfahrungen der Betreiber genutzt. Die Bewertung der Langzeitsicherheit stützt sich darüber hinaus auf geologisch-hydrogeologische sowie geomechanische Modelle, die sowohl aus den praktischen Beobachtungen als auch aus theoretischen Überlegungen entwickelt werden.

Der Kalibergbau in Mitteldeutschland ist durch eine große Anzahl von Salzlösungsvorkommen in den Kaligruben charakterisiert. Er weist eine differenzierte geologische Ausbildung auf, die zur Entwicklung und Einführung von unterschiedlichen Abbauprozessen geführt hat. Insgesamt umfasst das Bearbeitungsgebiet die Kalireviere Werra (Raum Thüringen), Südharz, Saale-Unstrut, Nordharz und die Scholle von Calvörde. Es wurden durch mehr als 150 Schächte aufgeschlossen (Abb. 2-1). In den Grubenbetrieben wurden mehr als 800 Zuflüsse von Salzlösungen und Wässern festgestellt und der größte Teil davon geologisch bewertet. Dabei sind auch verschlüsselte Analysenwerte von Salzlösungen benutzt worden (Abb. 2-2).

Die chemischen Analysen über die Salzlösungszutritte bilden für die zu treffenden Aussagen dieses Berichts die wesentliche Grundlage. Eine Verknüpfung der chemischen und physikalischen Analysenwerte mit geologischen Fakten, wie Teufe, Ausbil-

dung des Kaliflözes, Tektonik u. a. kann zu einer entscheidenden Verbesserung der Abschätzung der Einwirkungen der bergbaulichen Tätigkeit auf die Tagesoberfläche führen (Absenkungen und seismische Erschütterungen).

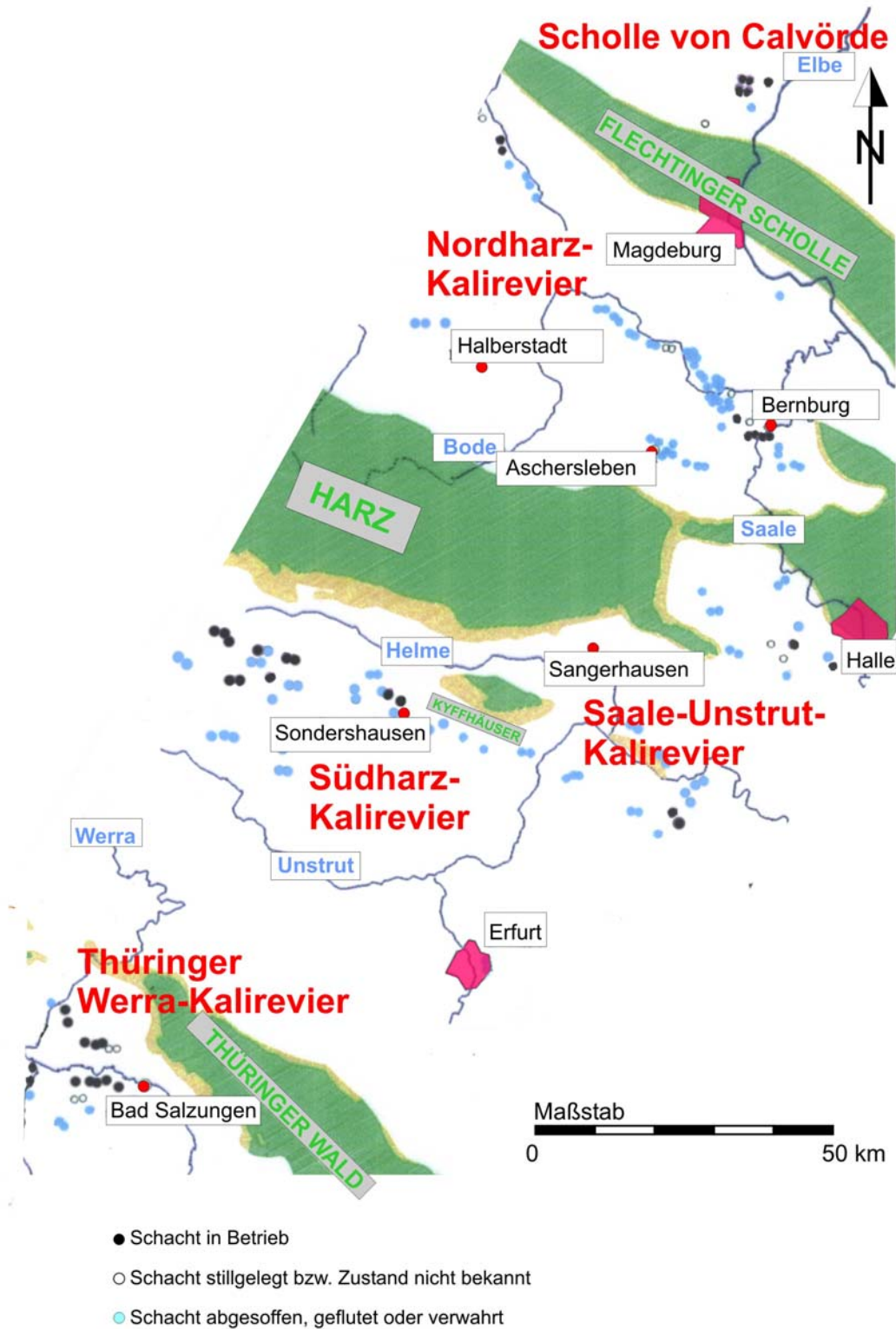


Abb. 2-1 Übersicht des Bearbeitungsgebiets (nach Schwandt 2005)

H. M. 299
Nr. 4/6. 62
Hochgeehrter Herr Berginspektor
Die mir übersandten Grubenwässer sind sämmtlich
wider Vermuthen arm an Chlorkalium:
No. 1, bezeichnet „Holz“ hat spez. Gew. v. 1,26 und enthält
1,3 % KCl.
No. 2 bezeichnet „Sohle“ hat spez. Gew. v. 1,29 und enthält
4,5 % KCl.
No. 3 bezeichnet „Stoß“ hat spez. Gew. v. 1,337 und enthält
2,06 % KCl.
Es grüßt Sie mit besonderer Hochachtung
F. Michels.
Staffurt, 3. Juni 1862.

Die Proben ... sind aus den Sohlwässern, von der
Zimmerung („Holz“) und am Stoße der südlichen und
nördlichen Ausrichtungsorter unter dem Mergel
in den Abraumsalzen entnommen, weshalb
der so geringe Gehalt an leichtlöslichen
Salzen sehr auffällig ist u. sich nur aus der
geringen Löslichkeit der Salze in kaltem
Wasser erklärlich macht.
Nachrichtlich ad acta Nr. 4/6. 62
H. M. 299

Abschrift

Hochgeehrter Herr Berginspektor.

Die mir übersandten Grubenwässer sind sämmtlich
wider Vermuthen arm an Chlorkalium:

No. 1, bezeichnet „Holz“ hat spez. Gew. v. 1,26 und enthält
1,3 % KCl.

No. 2 bezeichnet „Sohle“ hat spez. Gew. v. 1,29 und enthält
4,5 % KCl.

No. 3 bezeichnet „Stoß“ hat spez. Gew. v. 1,337 und enthält
2,06 % KCl.

Es grüßt Sie mit besonderer Hochachtung

F. Michels.

Staffurt, 3. Juni 1862

Bemerkung des Empfängers:

Die Proben ... sind aus den Sohlwässern, von der
Zimmerung („Holz“) und am Stoße der südlichen und
nördlichen Ausrichtungsorter unter dem Mergel
in den Abraumsalzen entnommen, weshalb
der so geringe Gehalt an leichtlöslichen
Salzen sehr auffällig ist u. sich nur aus der
geringen Löslichkeit der Salze in kaltem
Wasser erklärlich macht.

Nachrichtlich ad acta

M. 4./6. 62

Unterschrift

Abb. 2-2

Erste Dokumentation des Chemismus der Salzlösungsaustritte im Kali-
bergbau, Gruben von der Heydt, von Manteuffel (ergänzt nach Seifert,
Schwandt 1997)

2.2 Bearbeitungsmethodik

Die in die Grubenbaue zusitzenden oder im Umfeld der Grubenbaue erbohrten Salzlösungen wurden durch folgende Untersuchungsverfahren auf ihre chemische und physikalische Zusammensetzung bewertet:

- Makrochemische Untersuchungsverfahren mit gleichzeitiger Bestimmung der Dichte und teilweise auch des pH-Wertes. Diese Untersuchungen wurden seit Beginn des Kalibergbaus für ausgewählte chemische Verbindungen vorgenommen. Die ermittelten Ergebnisse wurden dabei oft verschlüsselt, was die Auswertung der Analysenwerte nur für einen begrenzten Personenkreis ermöglichte. Abb. 2-2 zeigt dies am Beispiel der ersten bekannten Salzlösungsanalyse überhaupt aus dem Jahr 1862. Einige Analysenwerte sind bis heute nicht entschlüsselt. Dieser Sachverhalt sollte verhindern, dass die Erkenntnisse, die auch bis zur Aufgabe der Kaligruben durch Salzlösungszutritte geführt haben, durch konkurrierende Kalibetriebe genutzt werden konnten.
- Makro- und mikrochemische Untersuchungsverfahren kamen grundsätzlich ab 1980 für nahezu jedes Salzlösungsvorkommen mindestens einmal im Jahr zum Einsatz. Die Untersuchungen wurden im damaligen Kaliforschungsinstitut in Sondershausen vorgenommen. Die dabei im Einzelnen durchgeführten Bestimmungen sind im Anhang 2: Chemische und physikalische Analysenergebnisse der Salzlösungsvorkommen, Teil 1 und 2, erkennbar.
- Isotopenchemische Untersuchungen wurden bei Kooperationspartnern der Kaliindustrie durchgeführt, kam aber nur in ausgewählten Fällen zur Anwendung. Für diese Untersuchungen wurden auch analysenmethodische Entwicklungen durchgeführt. Es handelte sich dabei um rationellere Verfahren zur Messung von Tritium und Kohlenstoff.

Die Erfassung und Auswertung der Analysen für das FuE-Vorhaben wird entsprechend den im Antrag zum FuE-Vorhaben vorgegebenen **Teilzielen** vorgenommen.

Teilziel 1

- Erarbeitung eines einheitlichen Datenformates zur Darstellung aller relevanten und verfügbaren Daten und Abstimmung mit potentiellen Nutzern
- Festlegung der Kriterien für die Auswahl der chemischen Analysen nach Zuflussdauer, Veränderung des Chemismus und Relevanz für die Lösungsgenese

- Sichtung der Archive hinsichtlich der für die Nutzung geeigneten Datenbestände und deren Bewertung
- Vorbereitung der Primärdaten für eine einheitliche Erfassung

Teilziel 2

- Umrechnung der Werte in einheitliche Dimensionen
- Übertragung der Daten in das festgelegte Formblatt und in die Datenbank
- Kontrolle der erfassten Primärdaten auf Plausibilität und Aussortierung von Ausreißern
- Ergänzung der Daten durch standardisierte Angaben über die geologische Situation im Bereich der Zuflussstellen. Dabei werden stratigraphische, tektonische und räumliche Daten, soweit verfügbar, eingearbeitet.
- Thermodynamische Berechnung der Gleichgewichtszustände der Proben und Erstellung eines Reaktionsmodells der Lösungsentwicklung durch geochemische Modellierung.

Teilziel 3

- Typisierung des Chemismus der Lösungen an den Zuflussstellen auf der Grundlage der geochemischen Analysen und der geologischen Verhältnisse anhand der mit dem geochemischen Rechenprogramm EQ3 ermittelten Mineralsättigungen
- Zuweisung der Lösungsgruppen zu Gefährdungsklassen für die Langzeitentwicklung der Zuflüsse
- Erarbeitung von Methoden zur Reduzierung des Untersuchungsaufwandes für die Einschätzung der hydrogeologischen Gefährdung von Endlagern, UTD und UTV für die langzeitige Abfalldponierung, -Verwertung oder Endlagerung radioaktiven Materials

Zur Erreichung dieser Zielstellungen wird die Bearbeitung des FuE-Vorhabens in drei **Arbeitspaketen (AP)**, entsprechend den Ausführungen im Angebot, vorgenommen. Es werden folgende Aufgaben den Arbeitspaketen zugeordnet:

AP 1

Die zu erfassenden chemischen und physikalischen Analysenwerte sind gegenwärtig in Analysenformularen, Analysenbüchern, Berichten und Diagrammen dargestellt. Durch die Sichtung der Archive ist überprüft worden, inwieweit weitere zur Nutzung geeignete Daten vorhanden sind. Aus der gesamten verfügbaren Datenbasis wurden 5901 der relevanten Analysen nach vorher festgelegten Kriterien ausgewählt.

Für die einheitliche Darstellung wurden geeignete Datenformate erarbeitet und mit den potentiellen Nutzern abgestimmt.

AP 2

Die erfassten Daten werden in eine einheitliche Form, die die weitere Bearbeitung erleichtert, umgerechnet. Geologische und bergmännische Angaben werden für diese Arbeit einheitlich definiert und angewendet. Die so standardisierten Daten werden in eine ORACLE Datenbank übertragen und mittels des vorhandenen LIMS „Blome-system“ nach ähnlichen Kriterien und Methoden wie neue Analysen erfasst und ausgewertet. Dazu gehört im ersten Schritt eine Überprüfung auf Plausibilität und Ausreißer. Für die geologischen und bergmännischen Daten wird untersucht, inwieweit eine spezielle Datenbanktabelle der Probennahmestellen angelegt werden kann. Zur geochemischen Charakterisierung werden die vereinheitlichten Daten mit geochemischen Rechenprogrammen z.B. EQ3/6 auf ihre Sättigungsverhältnisse untersucht und geeignete Reaktionspfadmodelle erstellt und berechnet.

AP 3

Den Schwerpunkt des Abschlussberichtes bildet die Darstellung der chemischen und physikalischen Analysenwerte. Deren Modellierung wird überwiegend auf die Zuflüsse beschränkt, welche über lange Zeit aktiv waren. Dabei werden die Modellierungsergebnisse durch geologische und bergmännische Bewertungen präzisiert.

Die mit hohem finanziellem Aufwand erarbeiteten Programme (Herrmann et al. 1978; GRS et al. 1998) zur Nutzung der chemischen Analysen für die Erarbeitung von Langzeitsicherheitsnachweisen wurden bisher nur teilweise angewendet. Hierfür fehlte eine Bereitstellung und Validierung der in der Praxis gewonnenen chemischen und physikalischen Ergebnisse. Es ist notwendig, diesen Rückstand auszugleichen und die bisher nicht genutzten chemischen und physikalischen Untersuchungsergebnisse zu Salzlö-

sungsvorkommen zu erfassen und der Auswertung zuzuführen. Damit werden geochemische Modellvorstellungen weiterentwickelt und verfeinert und somit auch die tatsächlichen Verhältnisse realitätsnah abgebildet.

Zu den erfassten Analysen liegen folgende Informationen vor: Probenbezeichnung verschlüsselt (z. B. CG02.003; C = Kalirevier, G = Bergwerk, 02 = Zufluss Nr. 2; 003 = 3. Analyse des Zuflusses Nr. 2, Datum der Probennahme, Geologische Position der Zuflussstelle, Dichte, pH-Wert, Karbonathärte, HCO_3 , CO_3 , chemische Zusammensetzung (i.d.R. als g/l der Salze MgCl_2 , NaCl , KCl , CaCl_2 , MgSO_4 und CaSO_4). Der Wassergehalt wurde analytisch aus der Gesamtanalyse und der Dichte errechnet. In einigen Fällen liegen die Analysen zusätzlich in der Form von Ionen in g/l bzw. mg/l vor. Als Spurenbestandteile wurden in manchen Fällen Fe^{3+} , Fe^{2+} , Bor, Jod, Lithium, Strontium, Rubidium, Barium, Kupfer, Zinn, Mangan und Quecksilber, vereinzelt auch NO_3 und Öl bestimmt und in mg/l angegeben. Die wenigen Isotopenuntersuchungen beschränken sich auf Tritium, Deuterium und d^{18}O .

Für die Darstellung der Daten im Anhang 2 wurde die Reihenfolge der o.g. Informationen nachträglich umgestellt, um durch geeignete Anordnung Leerräume in den Tabellen zu vermeiden.

3 Übersicht des Bearbeitungsgebietes

3.1 Entwicklung der Mitteldeutschen Kaliindustrie

Die Entwicklung der Kaliindustrie begann in Deutschland in der Stadt Staßfurt, die bereits durch den Betrieb einer Saline Erfahrung im Umgang mit Steinsalz hatte. Im Jahre 1856 trafen die beiden ersten, auf Steinsalz angesetzten Schächte „von der Heydt“ und „von Manteuffel“ unter anderem auch auf buntes, bitteres Salz, welches auf Halde gegeben wurde, da es dafür zu dieser Zeit keinen Absatz gab („Abraumsalze“). Mit diesen im Bittersalzquerschlag aufgeschlossenen Salzen wurden gleichzeitig Salzlösungen und Gase angetroffen. Damit kündigten sich gleich zu Beginn des Aufschlusses von Kalisalzen – im allerersten Querschlag – zwei Gefahren an, die dem Kalibergbau später große Sorgen bereiteten und heute noch mit Respekt bearbeitet werden.

Der Chemiker A. Frank erkannte als erster die Möglichkeiten der Verwendung der Abraumsalze zur landwirtschaftlichen Düngung und ließ im Jahre 1861 die erste Kalifabrik in Staßfurt errichten. Ab Anfang November 1861 ist in dieser Fabrik Kaliumchlorid produziert worden, und damit wurde Staßfurt die Wiege des Kalibergbaus. In der Folgezeit sind in für heutige Begriffe unwahrscheinlich kurzen Zeitabständen zahlreiche Schächte geteuft und Kaliwerke in Betrieb genommen worden. Bekannte Gruben aus dieser Gründerzeit sind im Staßfurter Raum z.B. Leopoldshall, Westeregeln, Neustaßfurt, Berlepsch-Maybach. Es folgten im Nordharzbereich Aschersleben und Solvayhall.

Im Südharzgebiet wurde 1889 westlich von Nordhausen die Bohrung Kehmstedt 1 auf Kalisalz fündig. Das erste Kaliwerk 1896 in Sondershausen eröffnet. Es folgten dann u.a. die Kaliwerke Bleicherode, Sollstedt, Volkenroda und im Jahre 1911 Bischofferode.

Im Werragebiet konnte 1893 die erste Bohrung Kalisalz nachweisen. Im Jahre 1900 ging die Gewerkschaft Bernhardshall bei Bad Salzungen in Betrieb. Die erste Fabrik begann in Kaiseroda I 1901 mit der Hartsalzverarbeitung. Sie wurde 1904 um eine Kaliumsulfat- und Glaubersalzfabrikation erweitert.

Die rasche Entwicklung der Kaliindustrie in Deutschland und die anfangs weltweite Monopolstellung Deutschlands führte zur Eröffnung einer Vielzahl von z.T. auch kleineren Betrieben. Diese wirtschaftlich unzweckmäßige Entwicklung veranlasste die

Reichsregierung 1921 zum Erlass der sog. Stilllegungsverordnung. Ab 1925 schrumpfte die Zahl der Produktionsbetriebe merklich. Bis 1938 hatten sich die Kalisalz fördernden und verarbeitenden Betriebe in 6 Konzerne zusammengeschlossen.

Die Anzahl der Salzbergwerksanlagen im Zechstein Deutschlands und ihr derzeitiger Zustand ist der folgenden Tab. 3-1 zu entnehmen.

Tab. 3-1 Zustand der Salzbergwerke im Zechstein Deutschlands (teilweise nach Schwandt, Seifert 1999)

Revier	Anzahl			Zustand der Bergwerke		
	Bergwerke	Schächte	Abteuf-Schächte	offen	ersoffen	nicht bekannt
Werra-Fulda	6	26	4	6		
Südharz	14	40	3	7	7	
Saale-Unstrut Nordharz	56	89	6	8	45	3
	76	155	13	21	52	3
Hannover	29	76	5	5	11	13
Norddeutschland	8	12	2	2	6	
	37	88	7	7	17	13
Gesamt	113	243	20	28	69	16

Diese Übersicht zeigt deutlich, dass die Mehrzahl der aufgebauten Bergwerke im Untersuchungsgebiet liegt (Werra-Fulda, Südharz, Saale-Unstrut und Nordharz).

3.2 Bildung der Kalisalze

Nachfolgende Ausführungen stützen sich auf lagerstättengenetische Vorstellungen, die z. T. bereits vor mehr als 50 Jahren für das Untersuchungsgebiet erarbeitet wurden und sich in der Praxis bei der Erkundung von bauwürdigen Salzen bewährt haben. Es werden weiterhin publizierte Einzelbefunde und Resultate verschiedener Autoren zur Flözgenese und zur Lösungsansprache herangezogen.

Das Ziel ist die Erklärung der petrographischen Differenzierung der Kaliflöze in Carnallit, Hartsalz und Vertaubungen. Diese Vorgänge ereigneten sich während der Sedimentation bzw. der Diagenese sowie durch später eindringende ascendente und deszendente Umbildungslösungen in die Kaliflöze im Rahmen der mesozoischen und känozoischen Tektonik.

3.2.1 Primäre bis frühdiagenetische Flözdifferenzierung

Nach Richter-Bernburg (1953) bildeten sich die unterschiedlichen Kalisalze im Sedimentationsbecken aus einer Schichtung der Mutterlösung nach Dichte und Konzentration. Im Bereich des Kaliflözes werden vom Beckenrand zum Beckeninneren zunächst Steinsalz (Vertaubung), dann Hartsalz und schließlich Carnallitit ausgefällt (Abb. 3-1 und Abb. 3-2). Das Sedimentbecken der übergeordneten Norddeutsch-Polnischen Senke (Zechstein-Becken) mit ihren Teilbecken sind paläogeographische Bildungen des Jungpaläozoikums (Lotze 1957; Richter-Bernburg 1953; Seidel u.a. 1966). Diese Becken sind nach dem Ende der variszischen Einengungstektonik im Zuge der spätvariszischen Inversionstektonik (Hebungen/Senkungen) auf dem gefalteten variszischen Sockel entstanden. Ihre Entwicklung setzt sich meist nahtlos in das Mesozoikum hinein fort.

Valjaško (1960, 1962) führt als Ursachen für unterschiedliche Mineralisationen die zusätzliche Wirkung metastabiler Gleichgewichte bei der Präzipitation sowie bei den späteren diagenetischen Veränderungen der Salinarabfolge an.

Da bei der Sedimententwässerung im Zuge der Diagenese (Chodkov 1976; Kudrjašov 1975) bei chloridischen Gesteinen der Porenraum sehr schnell abnimmt (Braitsch 1962; Garrett 1970; Kühn 1979) und eine schnelle Verdünnung der Beckenlösung nach Abschluss der Kalisalzabscheidung erfolgt, ist es praktisch ausgeschlossen, dass größere Mengen an Mutterlösungen erhalten geblieben sind. Eine Zuordnung von Lösungen, z. B. im Hauptanhydrit als reliktsche Mutterlösungen des Kaliflözes Staßfurt, scheidet nach diesen genetischen Vorstellungen aus.

Die beobachtete Faziesdifferenzierung der Kaliflöze wird von Richter-Bernburg (1953) als primäre Zonierung innerhalb des Sedimentbeckens angesehen. Als Beweise für das Vorhandensein von primären Differenzierungen bei der Sedimentation werden u.a. gewertet:

- Großflächige Übereinstimmung der Lage von Hauptdolomit- und Hartsalzverbreitungsgebieten im Kaliflöz Staßfurt.
- Großräumige Übereinstimmung der Lage der Stinkschiefer-Fazies und der Carnallititverbreitung im Kaliflöz Staßfurt
- Laterale und lokal auch vertikale Faziesübergänge in der Reihenfolge: Vertaubung – Hartsalz – Carnallitit (Phasenkette).

- Vertikale Phasensukzession Steinsalz – Hartsalz – Carnallit – Hartsalz – Steinsalz auf weite Erstreckungen.

Das in den Kaliflözen vorliegende Hartsalz soll nach Richter-Bernburg (1953) nicht generell eine primäre Paragenese zu sein. Sekundäre, frühdiagenetische Vorgänge, z.B. Laugenverdünnungen im Zechsteinbecken kurz nach Ablagerung der Kalisalze, können modifizierend gewirkt haben.

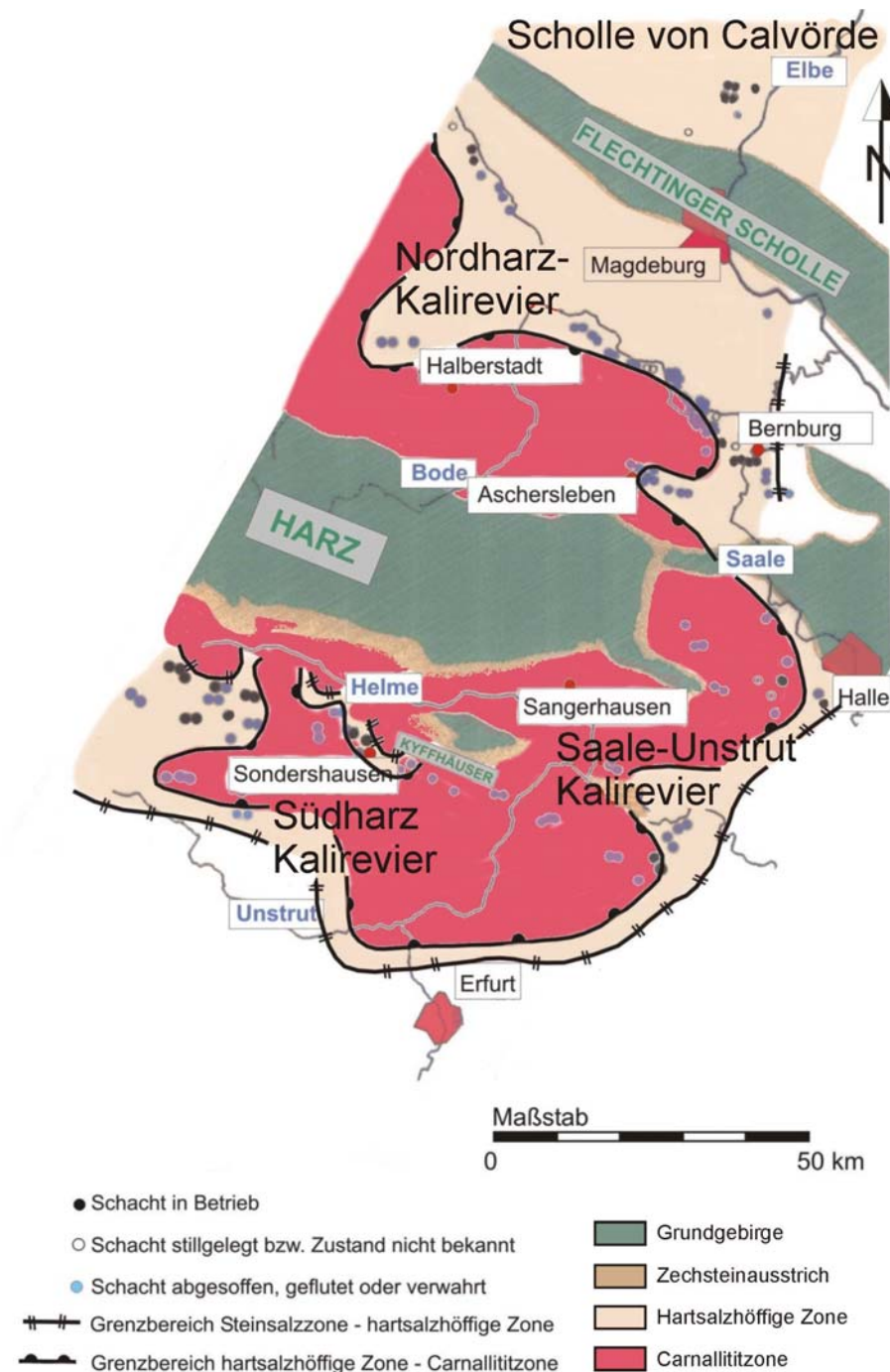


Abb. 3-1 Verbreitung und Ausbildung des Kaliflözes Staßfurt in Mitteldeutschland nach Schwandt (2006)

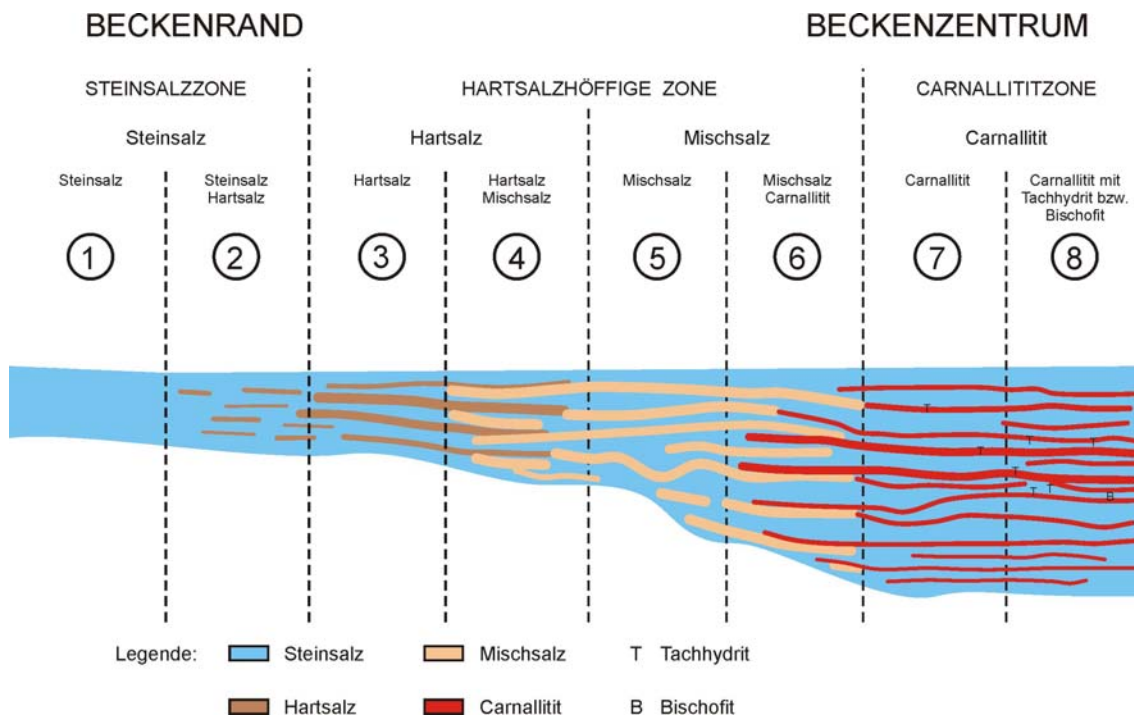


Abb. 3-2 Primäre bis fröhdiagenetische Faziesdifferenzierung des Kaliflözes Staßfurt im Raum Mitteldeutschland – Schema

3.2.2 Aszendente und deszendente Umbildung

Zur Beurteilung einer sekundären Hartsalzbildung sind umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden. Ein Ausgangspunkt dazu war der Widerspruch zwischen den Ergebnissen der grundlegenden physikalisch-chemischen Modellversuche von Van't Hoff (1912), insbesondere zur Bildungstemperatur von Kieserit neben Sylvin sowie Halit und den entsprechenden Lagerstättenbefunden. Ausgehend von der für die Entstehung der weit verbreiteten kieseritischen Hartsalze notwendigen Temperatur von 72°C bzw. 83°C entwickelte sich, verbunden mit Untersuchungsergebnissen von Arrhenius, Rinne, Lachmann, D. Fulda und Jänicke, die Theorie der Geothermalmetamorphose.

In der Mehrzahl der Untersuchungen wird eine sekundäre Bildung des Hartsalzes durch eine metamorphe und metasomatische Durchtränkung der Kaliflöze durch Salzlösungen angenommen. Dabei wird übereinstimmend die Umbildung auf niedriger konzentrierte, flözfremde Lösungen zurückgeführt, die aus tieferen Schichten aufstiegen. Bei den einzelnen Autoren bestehen unterschiedliche Auffassungen zum Charakter und zur Herkunft der Umbildungslösungen z.Zt. des Lösungsaufstieges und zum

Verbleib der Lösungen nach der Flözumbildung. Nach Borchert et al. (1954) und Borchert (1963) sind z.B. die zur Umbildung des Kaliflözes Staßfurt benötigten Salzlösungen auf die Gips-Anhydrit-Dehydratation des Basalanhydrits zurückzuführen. Gips-Dehydratation, Lösungsaufstieg und Reaktionen im Flöz Staßfurt werden als an intrakrustale Umbildungen gedeutet. Nach diesem Modell sind die im Hauptanhydrit auftretenden Lösungen als Umbildungsreliktlösungen zu deuten, die nach der Flözumbildung den Grauen Salzton durchdrangen und im klüftigen Hauptanhydrit gespeichert worden sind.

Aus den Untersuchungen von Döhner et al. (1968) zur genetischen Entwicklung des Kaliflözes Staßfurt ergab sich, dass in dessen oberem Grenzbereich bereits vor der Sedimentation des Grauen Salztons die oberen Flözpartien wieder in unterschiedlichem Maße aufgelöst wurden. Hierbei kam es zu umfangreichen Mineralneubildungen. Nach den Befunden über die Veränderungen der Mineralassoziationen wurde dabei das von der Sedimentation her bereits differenzierte Flöz nochmals überprägt. Die sedimentär vorgegebene Flözdifferenzierung Steinsalz/Hartsalz/Carnallit wird hiernach durch deszendente Lösungen bewirkt, die aber noch vor der Sedimentation des Grauen Salztons vornehmlich den oberen Bereich des Kalilager überprägt haben.

Aus dem von Döhner et al (1968) entwickelten und in der Praxis bestätigten Modell ergibt sich die Konsequenz, dass die Restlösungen aus der aszendenten wie auch der deszendenten Umbildung des Flözes Staßfurt innerhalb des Zechsteinbeckens verblieben sind und dann von den niedriger konzentrierten Lösungen der Leine-Folge wieder aufgenommen wurden.

3.2.3 Tektonische Beanspruchung im Meso- und Känozoikum

Umbildungen durch tektonisch mobilisierte Lösungsanteile waren offensichtlich nur lokal wirksam. Die damit verbundenen Mineralumbildungen sind im Detail noch wenig erfasst und in ihrer genetischen Stellung auch nicht immer eindeutig. Bergbausicherheitlich bedeutende Salzlösungszuflüsse waren dabei aber nicht beteiligt.

Demgegenüber ist die Verbreitung der durch Hutbildung und geologisch junge Ablauung gebildeten Salzgesteine (Kainithut) größer. Mit der Entwicklung von Salzsätteln und Salzstöcken gelangten durch die Heraushebung der Schichten größere Teile des Salinars in Subrosionsbereiche. Die bekanntesten auf die Einwirkung von Deckgebirgswässern zurückzuführenden Bildungen sind die kainitischen Hutgesteine. Mit fort-

schreitender Wassereinwirkung entwickeln sich Hutvertaubungen, aus denen tonig-anhydritische Residuate mit unterschiedlich intensiver Vergipsung hervorgingen.

Nach diesem Kenntnisstand ist die petrographische Differenzierung der Flöze das Ergebnis mehrerer, ursächlich voneinander unabhängiger Vorgänge, deren Wirkungen sich jedoch überlagern können. Hinsichtlich ihrer Verbreitung und ihrer Auswirkungen auf den Stoffbestand des Flözes kommt den beiden permischen Umbildungsprozessen die wichtigste Rolle zu.

3.3 Ausbildung und Lage der Schichtenfolge

Die Grubenbetriebe der in diesem Bericht behandelten Kalireviere bauen und bauten in der geologischen Formation des Zechsteins. Über die Stellung des Zechsteins in der Erdgeschichte informiert Tab. 3-2. Der daraus zu entnehmende Zeitraum von 5 Millionen Jahren für die produktiven Folgen Werra-Staßfurt-Leine ist gegenüber anderen erdgeschichtlichen Epochen eher als kurz anzusprechen.

Die Sedimentation im Zechstein ist gekennzeichnet durch eine vom Eindunstungsprozess des Meerwassers in der Ablagerungsbucht des Ozeans vorgegebene Abfolge der abgesetzten Schichten (zunehmende Konzentration der gelösten Inhaltsstoffe). Die salinare Abfolge gliedert sich – vereinfacht dargestellt – wie folgt: Der daraus zu entnehmende Zeitraum von ca. 5 Millionen Jahren für die produktiven Folgen Werra-Staßfurt-Leine ist gegenüber anderen erdgeschichtlichen Epochen als sehr kurz anzusprechen.

Die Sedimentation im Zechstein ist gekennzeichnet durch den Eindunstungsprozess des Meerwassers in Ablagerungsbuchten am Rande des Ozeanbeckens. Daraus ergibt bei zunehmender Konzentration der gelösten Inhaltsstoffe die charakteristische salinare Abfolge.

oben	Rückzugsanhydrit	Ar
	Decksteinsalz	Nar
	Kaliflöz	K
	Steinsalz	Na
	Anhydrit	A
	Karbonat	Ca
	Tonstein	T
unten	Sandstein	S

Tab. 3-2 Zeitliche Stellung des Zechstein in der Erdgeschichte

Gruppe	Deutschland		
	Stufe	Formation/Folge	Alter In 10 ⁶ Jahre
Quartär			1,8
Tertiär			65
Kreide			142
Jura			200
Trias	Keuper		235
	Muschelkalk		243
	Buntsandstein	Oberer (Röt)	246,5
		Mittlerer	248
		Unterer	251
Perm	Zechstein	Aller bis Fulda	253
		Leine	254,5
		Staßfurt	256
		Werra	258
	Rotliegendes		301,5
Karbon			358
Devon			417,5
Silur			443
Ordovizium			495
Kambrium			545
Präkambrium			

Im Zechstein werden gegenwärtig sieben salinare Folgen ausgeschieden, über welche im Einzelnen die stratigraphische Tab. 3-3 informiert. Sie sind idealisiert dargestellt und berücksichtigen die in der Praxis bereits seit längerer Zeit eingeführten – nicht immer aktuellsten – Bezeichnungen der Salzgesteine und deren stratigraphische Zuordnung. Es entfällt damit auch die Zuordnung des Roten und des Grauen Salztone zu den jeweils angrenzenden Folgen. Die Folgen des Z1 bis Z4 sind im Bearbeitungsgebiet vollständig entwickelt und erreichen in ihren Typusgebieten jeweils über 100 m Mächtigkeiten. Die Folgen Z5 bis Z7 sind geringer mächtig und die Salinar führenden Bereiche sind auf nördliche Beckenbereiche beschränkt.

Paläogeographisch gesehen wurde der Zechstein in Mitteleuropa in einem WNW-ESE streichenden Becken abgelagert, welches im NW Verbindung zum Ozean hatte (Abb. 3-3). Die größte Längserstreckung beträgt ca. 1800 km, von Litauen im Osten bis Mittelengland im Westen. Die maximale N-S-Ausdehnung zwischen dem Nordteil von Dänemark und dem Oberrhein erreicht rund 1000 km. An der SW-Grenze dieses Zentraleuropäischen Zechsteinbeckens zweigen sich drei kleinere, SW-NE streichende Nebenbecken ab:

- das Niederrheinische Becken
- das Werra-Fulda-Becken
- das Fränkische Becken.

Tab. 3-3 Idealierte stratigraphische Gliederung des Zechsteins im Bearbeitungsgebiet (teilweise nach Käding 2000, Hiete et al. 2006, Hug et al. 2006)

Zechstein-Folge	Untergliederung	Symbol	Steinsalz-mächtigkeit	Hauptverbreitung			
Fulda Z7	Obere Folge Untere Folge	Z7Tr Z7T		Nord- deutschland			
Friesland Z6	Friesland-Steinsalz Friesland-Anhydrit	Na6 A6	20 m				
	Friesland-Ton	T6					
Ohre Z5	Oberer Ohre-Ton	T5r	30 m				
	Grenzanhydrit Ohre-Steinsalz	A5r Na5					
	Lagenanhydrit	A5					
	Salzbrockenton	T5					
Aller Z4	Aller-Steinsalz Pegmatit-Anhydrit	Na4 A4	100 m	Nordharz			
	Roter Salzton	T4					
	Leine-Steinsalz Kaliflöz Riedel Leine-Steinsalz Kaliflöz Ronnenberg Leine-Steinsalz Hauptanhydrit	Na3 K3Ri Na3 K3Ro Na3 A3			ges. 150 m		
Plattendolomit Grauer Salzton	Ca3 T3						
Staßfurt Z2	Gebänderter Deckanhydrit Kaliflöz Staßfurt Staßfurt-Steinsalz Basalanhydrit	A2r K2 Na2 A2	500 m			Südharz Saale-Unstrut Nordharz	
	Hauptdolomit/Stinkschiefer	Ca2					
	Werra Z1	Oberer Werra-Anhydrit Oberstes Werra-Steinsalz Oberer Werra-Anhydrit Oberer Werra-Ton Ob. Werra-Steinsalz Kaliflöz Hessen Mittl. Werra-Steinsalz Kaliflöz Thüringen Unt. Werra-Steinsalz Werra-Anhydrit			A1rβ Na1r A1rα T1r Na1 K1H Na1 K1Th Na1 A1		ges. 250 m
		Zechsteinkalk Kupferschiefer Zechsteinkonglomerat		Ca1 T1 S1			

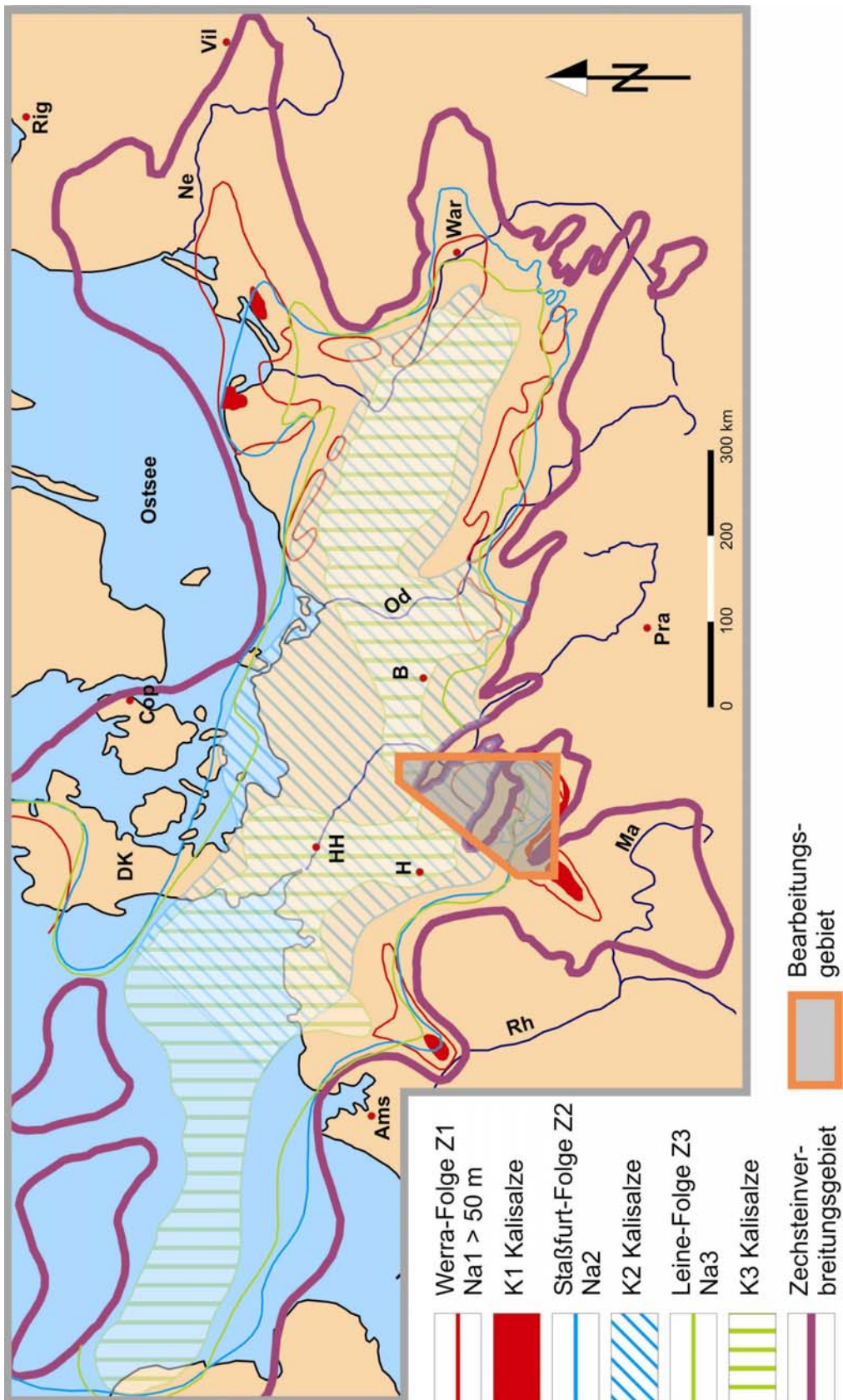


Abb. 3-3 Zechstein im Zentraleuropäischen Becken, schematische Darstellung der Verbreitung ausgewählter Salzsichten (nach lithologischen Karten von Zharkov 1984)

Im Werra-Fulda-Becken, im Niederrheinischen Becken sowie in zwei Teilbecken in Nordpolen kam es zum ersten Höhepunkt der salinaren Sedimentation mit den Kalisalzen der Werra-Folge (Z1). Die salinaren Folgen des Z2 bis Z7 sind in diesen Becken nur rudimentär oder nicht entwickelt (Randfazies). Die Schichtlagerung im Werra-Fulda-Becken ist im Allgemeinen als „flach“ anzusprechen. Im südlichen Werra-Gebiet gibt es aber halokinetisch beeinflusste Steilstellungen des Kaliflözes Thüringen, in denen diese diapirartig bis in das Niveau von Flöz Hessen aufgedrungen sind.

Die Kalireviere Südharz und Saale-Unstrut liegen im SW-Bereich des Zentraleuropäischen Zechsteinbeckens. Das Staßfurt-Kaliflöz (K2) markiert hier den zweiten salinaren Höhepunkt des Zechsteins. Die saline Abfolge des Z1 erreicht hier nur das Stadium der Steinsalzausscheidung (Na1).

Im Südharz-Revier ist das Kaliflöz Stassfurt in Hartsalz- und Carnallit-Fazies entwickelt. Das Staßfurt-Steinsalz ist unterschiedlich mächtig (30 m bis über 200 m), wobei die Mächtigkeiten von W nach E ansteigen. Im Zechstein 3 ist das Leine-Steinsalz (Na3) mit schwankenden Mächtigkeiten vorhanden (0 m bis 150 m). Die Lagerungsverhältnisse sind verhältnismäßig einfach. Die Schichten fallen flach bis mäßig steil, generell nach SW zur Thüringer Senke zu, ein.

Das Saale-Unstrut-Revier ist gekennzeichnet durch ein in der Regel bis zu 500 m mächtiges Staßfurt-Steinsalz (Na2). Den salinaren Höhepunkt bildet das Kaliflöz Staßfurt (K2). Das folgende Leine-Steinsalz ist ebenfalls vorhanden, aber oft unter 50 m mächtig. Die Lagerung ist im Unstrut-Gebiet durch die NW-SE streichende Hermundurische Scholle bestimmt, von der aus die Schichten der Lagerstätte nach NE und SW zu einfallen. Im Raum westlich von Halle/Saale ist großräumig eine vom Teuschenthaler Sattel abfallende muldenförmige Lagerung entwickelt, zu der im SW-Teil auch die Querfurter Mulde gehört. Im NE-Teil sind die Bennstedt/Nietlebener- sowie die Mansfelder Mulde ausgebildet. Bemerkenswert ist weiterhin die im Raum Teuschenthaler und Roßlebener Sattel lokal entwickelte große Mächtigkeit des Staßfurt-Steinsalzes von über 500 m.

Im Nordharz-Revier ist das Kaliflöz Staßfurt (K2) ebenfalls der saline Höhepunkt. Das Steinsalz (Na2) ist sehr mächtig (bis > 1000 m). Das Leine-Steinsalz (Na3) ist in typischer Ausbildung und Mächtigkeit vorhanden (bis 150 m). Die Kaliflöze K3 sind allenfalls im NW angedeutet. Die Zechsteinschichten sind in NW-SE-streichenden Salzsätteln aufgedrungen (z.B. Staßfurter Sattel), welche steile bis nahezu senkrechte Flanken haben. Die Sattelköpfe sind durch die oberflächennahe Auflösung der Salze

bestimmt; es haben sich Auslaugungsgebiete mit Gips, Einsturzgebirge und tertiär-quartären Sedimentefüllungen gebildet.

Die untersuchten Kaliabbaureviere erstrecken sich somit vom südlichen Randbereich des Zechsteins (Werra-Revier) bis an das Beckeninnere (Nordharz-Revier) des Zentraleuropäischen Zechsteinbeckens. Dabei beträgt die NNE-SSW-Erstreckung des Bearbeitungsgebietes rund 200 km. Die größte WNW-ESE-Ausdehnung erreicht ca. 100 km.

3.4 Tektonik

Die Bedeutung der Tektonik, insbesondere der Bruchtektonik, für die Prognostizierung von Problemzonen im Salzbergbau ist über Jahrzehnte hinweg zu wenig beachtet worden. Zu Beginn des Kaliabbaus wurde der Kainitabbau für das Absaufen der Gruben durch Wässer aus dem Deckgebirge am Staßfurt-Egelner-Sattel und am Ascherslebener Sattel verantwortlich gemacht, obwohl mehr als 90% der Kainitvorkommen problemlos abgebaut werden konnten (Spackeler 1950; Gimm 1968; Fulda, D. et al. 1990). Heute wissen wir, dass das Anfahren von Querstörungen, die durch geologische Deckgebirgskartierungen und Aufnahmen in den Gruben erfasst werden können, eine Hauptursache für das Auftreten von Wasserzuflüssen aus dem Deckgebirge waren und sind.

In den nachfolgenden Bemerkungen zur Tektonik werden daher die für die Beurteilung der Salzlösungszuflüsse wichtigen tektonischen Sachverhalte dargestellt. Die direkten Beziehungen zwischen Tektonik und den Salzlösungsvorkommen werden nach der Erläuterung der hydrogeologischen Verhältnisse und der Beschreibung der Salzlösungsvorkommen des Untersuchungsgebietes im Kapitel 8 aufgezeigt.

Nach den Lagerungsverhältnissen lassen sich im Kalibergbau Mitteldeutschlands zwei Strukturtypen unterscheiden. Die größte Verbreitung weisen die weiträumig horizontal bis flachwellig lagernden, schichtförmigen Lagerstätten auf (Haupttyp I). Sie sind vorwiegend im thüringischen Werra-Kalivier, im Südharz-Kalirevier sowie außerhalb von Sattelzonen im Saale-Unstrut- und im Nordharz-Kalirevier entwickelt. Ihr Anteil an der aufgeschlossenen Abbaufäche beträgt über 70 %.

Der zweite Lagerungstyp ist an Sattelstrukturen gebunden, deren Flanken mittelsteil bis vertikal einfallen können und am Top des Sattels in der Regel eine Ablaugsfläche aufweisen. Hierzu gehören die am Roßlebener Sattel, Teutschenthaler Sattel,

Bernburger Hauptsattel, Staßfurt-Egelner Sattel u. a. aufgeschlossenen Grubenfelder. Ihr Anteil an der gesamten abgebauten Fläche liegt bei etwa 20 %. Die geringsten Aufschlussflächen innerhalb dieses 2. Haupttyps weisen diapirartige Salzaufpressungsgebiete auf, die weniger als 5 % der Aufschlussfläche einnehmen. Sie haben eine langgestreckte bis rundlich-ovale Form mit komplizierter innerer Tektonik, bestehend aus zahlreichen, in der Regel kulissenartig nach der Teufe abtauchenden Faltensträngen. Die Kali- oder Steinsalze sind durch die Sattelbildung örtlich angeschwollen oder, meist an den Sattelflanken, verdrückt. Die faziellen Verhältnisse bedingten unterschiedliche Verformungseigenschaften, die zu überaus komplizierten Lagerungsverhältnissen in den Sattelstrukturen führten. Diapirartige Lagerstätten sind im Bereich des Allertalgrabens aufgeschlossen. Weitere lokale Diapirdurchbrüche sind am Bernburger Hauptsattel, am Staßfurt-Egelner Sattel und am Teutschenthaler Sattel auszuhalten.

Die Kenntnisse über die bruchtektonischen Deformationen der Schichten im Deckgebirge und im Salinar haben sich in den letzten Jahrzehnten wesentlich erweitert. Dies vor allem aufgrund von Kartierarbeiten, geophysikalischen Messungen und/oder bohrtechnischer Erkundungen.

In den frühen Erkundungs- und Abbauphasen, zum Beispiel des Werra-Kaligebietes, hatte bereits Dietz (1928) einzelne Störungen im Deckgebirge erkannt (Abb. 3-4). Der damals noch junge Bergbau konnte noch mit einer empirisch ausreichend erscheinenden Dimensionierung der Abbauhohlräume, ohne spezifische Kenntnis der Bruchtektonik des Deckgebirges, auskommen. Die intensive Nutzung der Lagerstätten, die nicht allein in der Gewinnung beider Kaliflöze der Werrafolge, sondern auch in einer Senkung der Abbauverluste ihren Niederschlag fand, erforderte detailliertere Kenntnisse über die bruchtektonische Zerteilung des Gebirges im Bereich der Grubenbaue und des postsalinaren Deckgebirges (Knoll et al. 1980). Mit den übertägigen Kartierungsarbeiten von Grumbt & Lützner (1966), Lützner et al. (1981) wurde eine Basis für die Einbeziehung des tektonischen Baues in bergbausicherheitliche Belange vorgelegt. Diese allein auf geologischen Kartierungsergebnissen basierenden Resultate wurden später durch die Anwendung fernerkundlicher Methoden ergänzt (Rauche, Franzke, 1990 u.a.).

Nach dem Vorbild des thüringischen Werra-Kaligebietes erfolgte später die tektonische Bearbeitung im Südharz-Revier (Abb. 3-5) und anderen Kalirevieren, jedoch in wesentlich geringerem Umfang. Durch die zunehmende Erfahrung der Bearbeiter wurden aber vergleichbaren Ergebnisse erzielt.

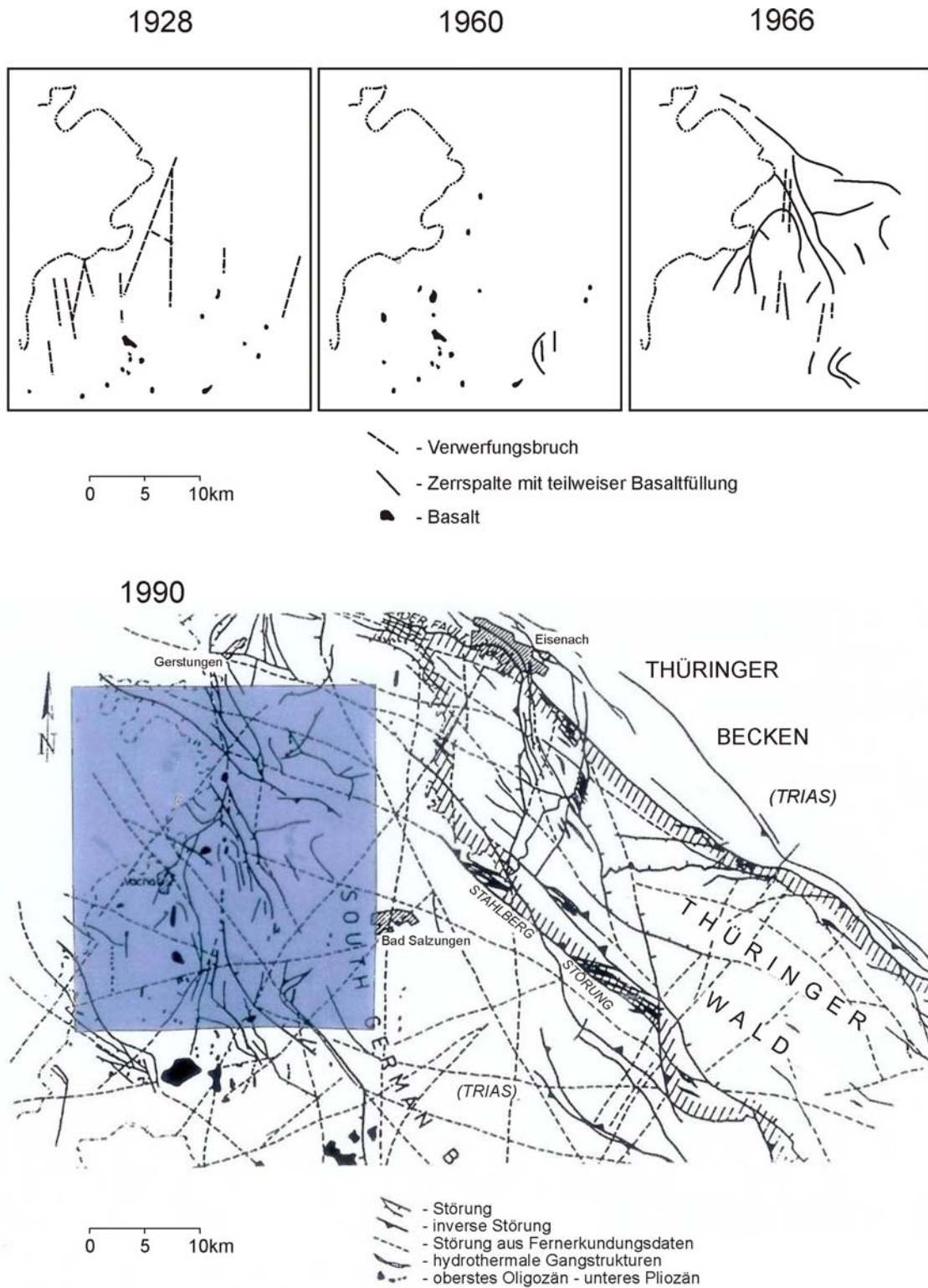
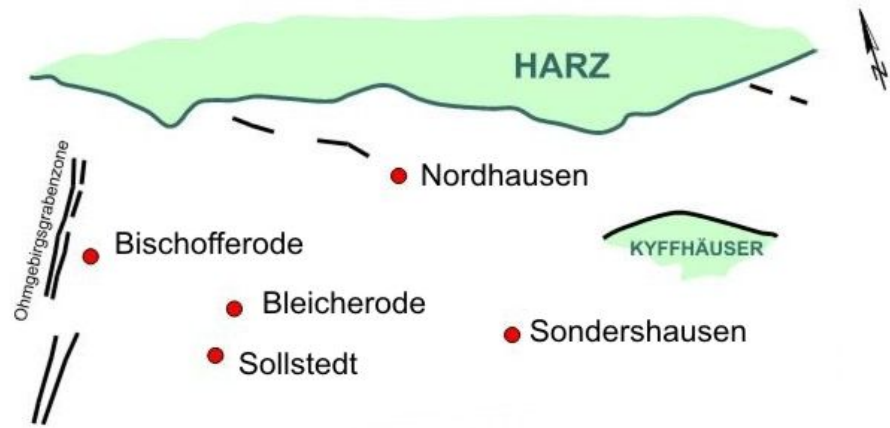
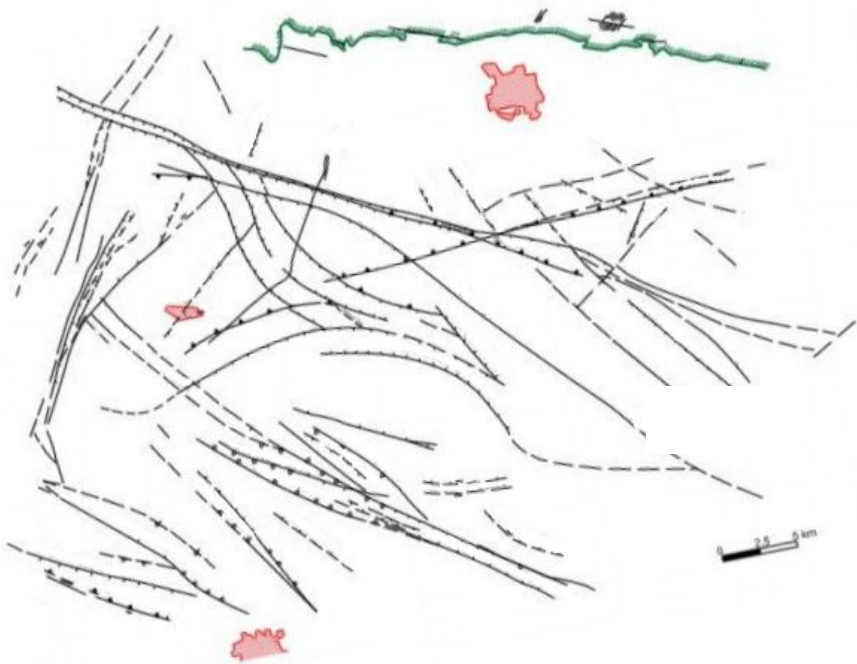


Abb. 3-4 Entwicklung der Kenntnisse zur Bruchtektonik im thüringischen Werra-Kali-Revier (nach Schwandt 2000)

1955



1989



1992

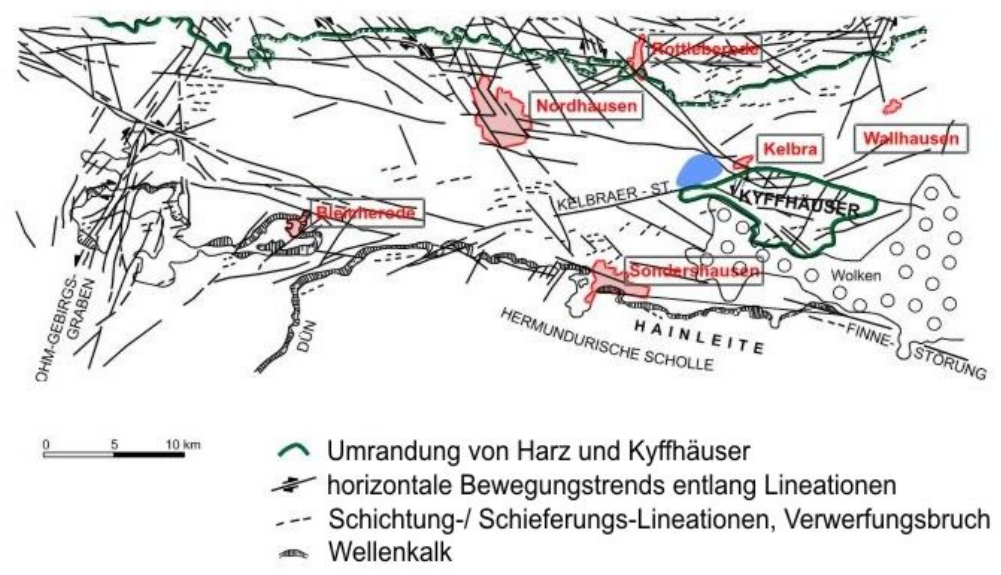


Abb. 3-5 Entwicklung der Erkenntnisse zur Bruchtektonik im Südharz-Kalirevier (nach Schwandt 2006)

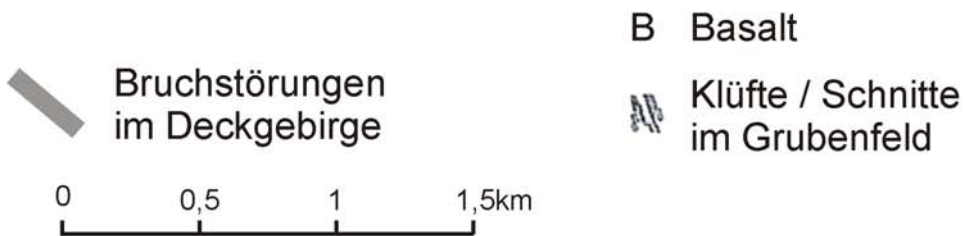
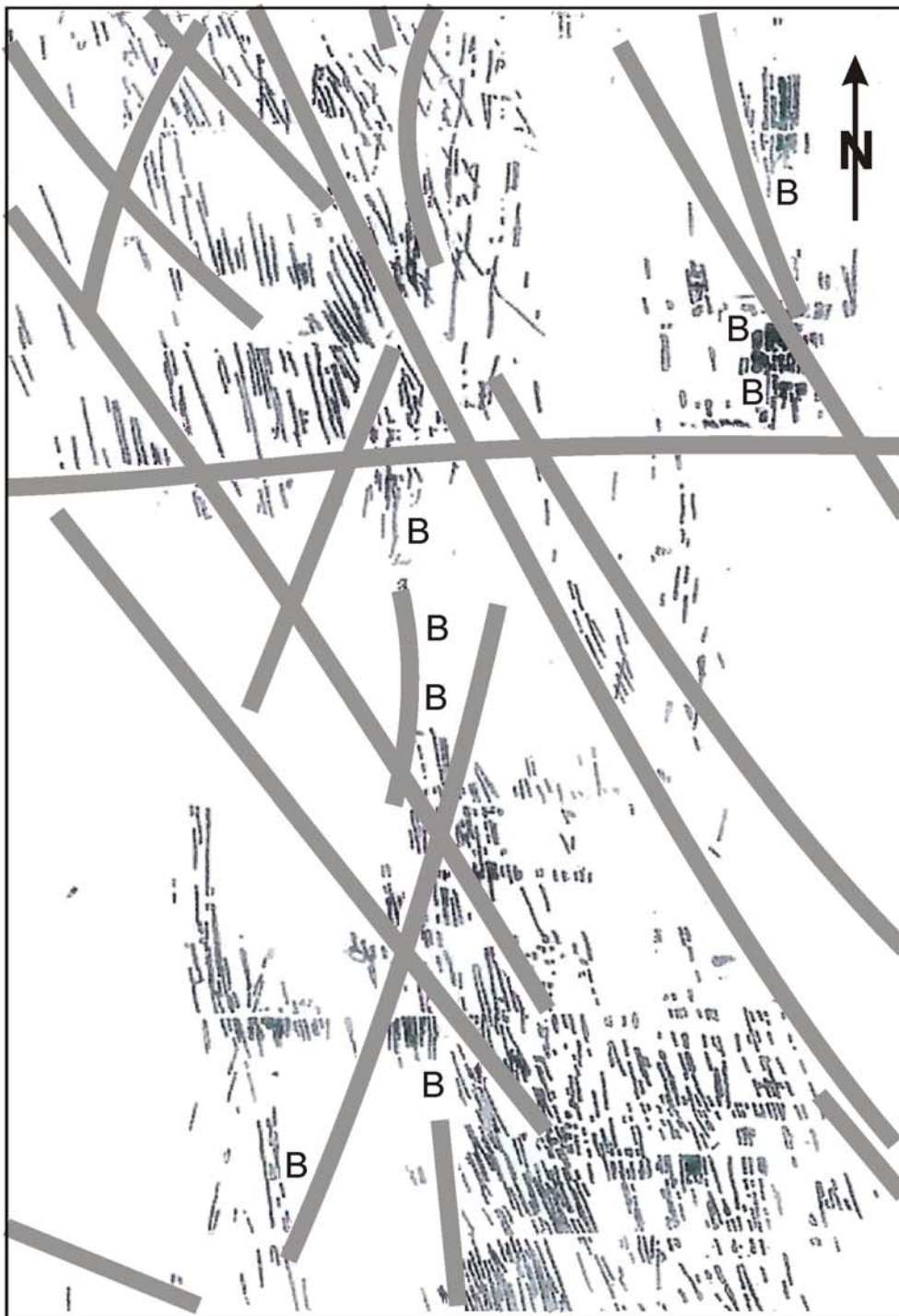


Abb. 3-6 Lageabhängigkeiten von Bruchstörungen im Deckgebirge und Salinar-Flöz Thüringen (nach Schwandt 2006)

Vor allem wurden in dieser Zeit Untersuchungen zur Bruchtektonik im Salinarkörper vorgenommen (Schwandt, 2006). Aus den vorliegenden Ergebnissen ist erkennbar, dass die strukturelle Formung sowohl das Deckgebirge als auch das Salinar umfasst (Abb. 3-6). Das Deckgebirge, vor allem der Untere und Mittlere Buntsandstein, in geringerem Umfang auch Teile des Muschelkalks, enthalten kompetente, also im Wesentlichen durch Bruchverformung reagierende Schichtkomplexe. Demgegenüber muss dem Salzgebirge des Zechsteins – ebenfalls als tektonisches Stockwerk in seiner Gesamtheit betrachtet – der Charakter eines inkompetenten, gegenüber den anliegenden Paläo-Spannungsfeldern fließverformten Gebirgskomplexes zugesprochen werden. Wichtig ist die mechanische Abkopplung des Salinars von Prä- und vom Postsalinar. Dies verursachte im Deckgebirge eine streckungsbezogene Verformung (Domino-Verformung), deren Ursache und Pendant das differentielle plastische Fließen des Salinargebirges war, dessen rigide reagierende Horizonte jedoch bruchtektonisch verformt wurden (A3 und weitere Sulfat- und Karbonateinlagerungen).

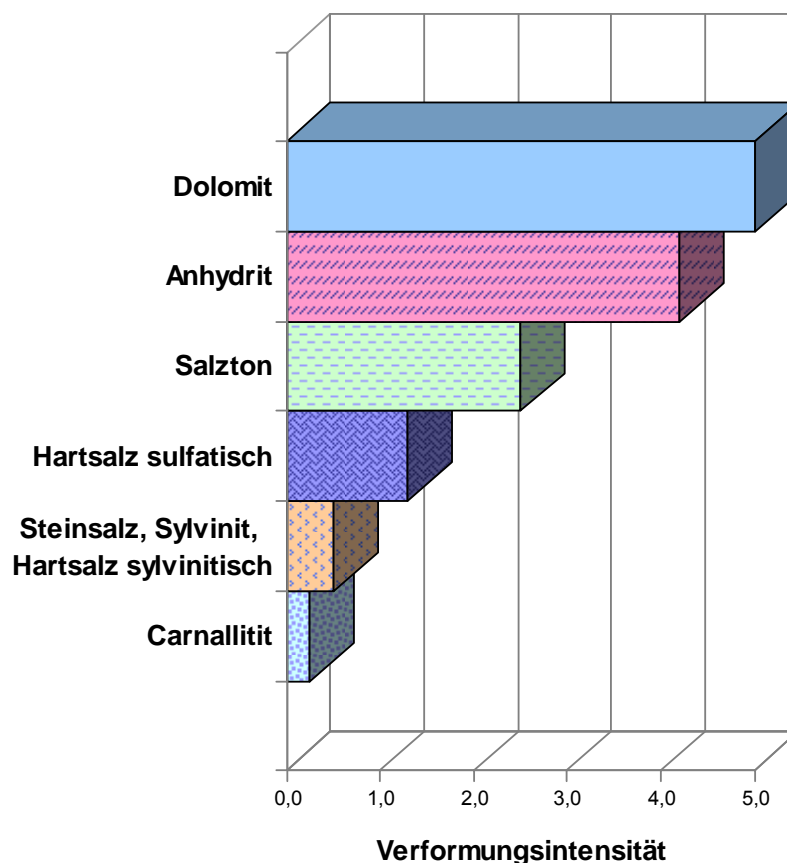


Abb. 3-7 Beziehungen zwischen petrographischer Ausbildung der Salzgesteine und Verformungsintensität (Schwandt 2005)

Vergleicht man in den Abbaugebieten das generelle Auftreten von Klüften und deren Dichte (Kluftkörper), lassen sich Relationen nachweisen, die von der Viskosität der

Salinargesteine bestimmt werden (Abb. 3-7). Mit abnehmendem Deformationswiderstand bzw. zunehmender Viskosität sinkt die Neigung, rupturelle Trennflächen auszubilden. Klüftungserscheinungen nehmen folglich von Carnallit über sylvinitisches Hartsalz und Steinsalz, sulfatisches Hartsalz, Salzton, Anhydrit bis zu Dolomiten zu. Ob auch Trennflächen in den hochviskosen Kalisalzen auftreten, hängt jedoch auch wesentlich von der Belastungsgeschwindigkeit (Strainrate) ab. Bei hoher Belastungsgeschwindigkeit können also auch in Kalisalzen Klüfte gebildet werden, deren Verheilung durch Rekristallisation oder Korngrenzengleiten (plastisches Fließen) in nachfolgenden Ruhephasen relativ erfolgt.

Die höhere Rupturedichte in den hochviskosen (spröden) Gesteinen führte dazu, dass Salzlösungen schwerpunktmäßig nur in den karbonatischen und anhydritischen Schichten gespeichert werden können. Es ist zu beachten, dass auf Grund der Materialeigenschaften der Salzgesteine diese Brüche im frischen Aufschluss auch maskiert sein können. Obgleich latent vorhanden, werden sie aber erst als Folge der Hohlraumkonvergenz infolge bergmännischer Einwirkungen geöffnet und damit sichtbar gemacht (Abb. 3-8).

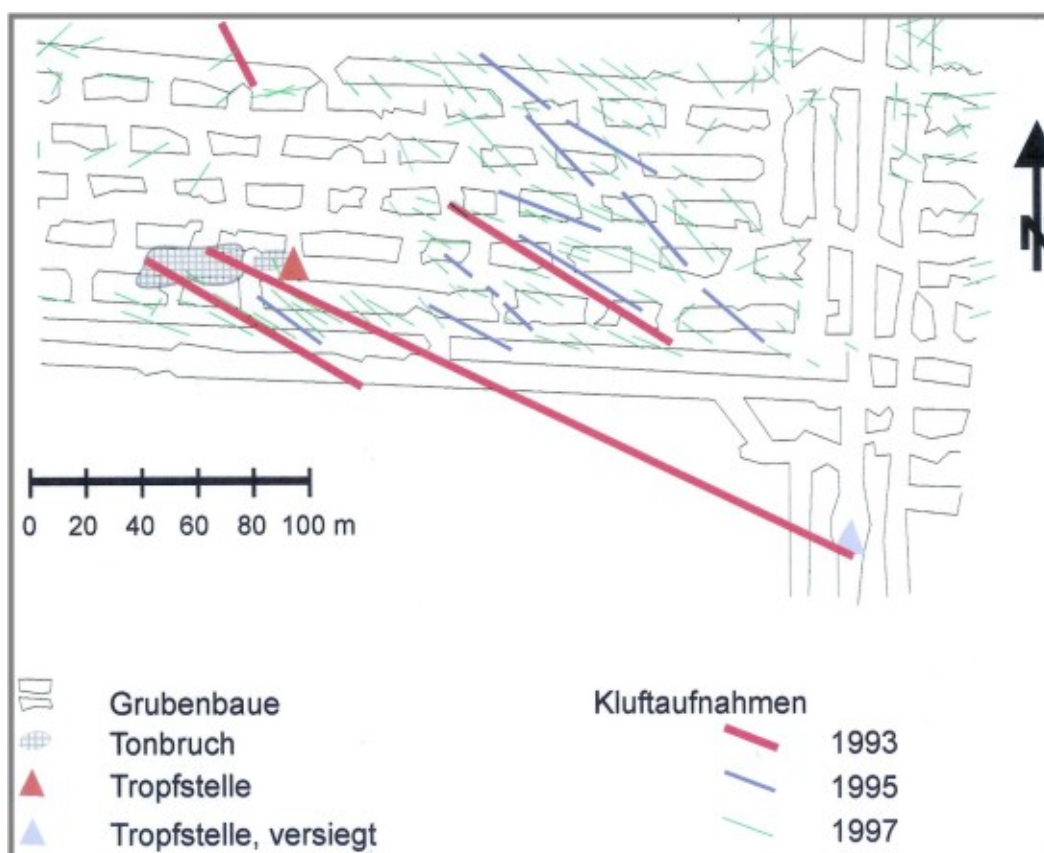


Abb. 3-8 Zeitliche Entwicklung der Erkennbarkeit von Klüften (nach Schwandt 2005)

In Bruchzonen des Deckgebirges ist eine erhöhte Gesteinszerteilung an Rupturen (Störungen, Klüftzonen) zu beobachten, da vor allem größere Störungen von einem unterschiedlich breiten Hof von subparallelen Kleinstörungen und Klüften begleitet werden. Diese Zerteilung klingt allmählich zu den Flanken hin ab, so dass außerhalb der Störungszonen im Wesentlichen nur noch die von der Diagenese der Gesteine herrührende bankinterne Klüftung existiert (Abb. 3-9).

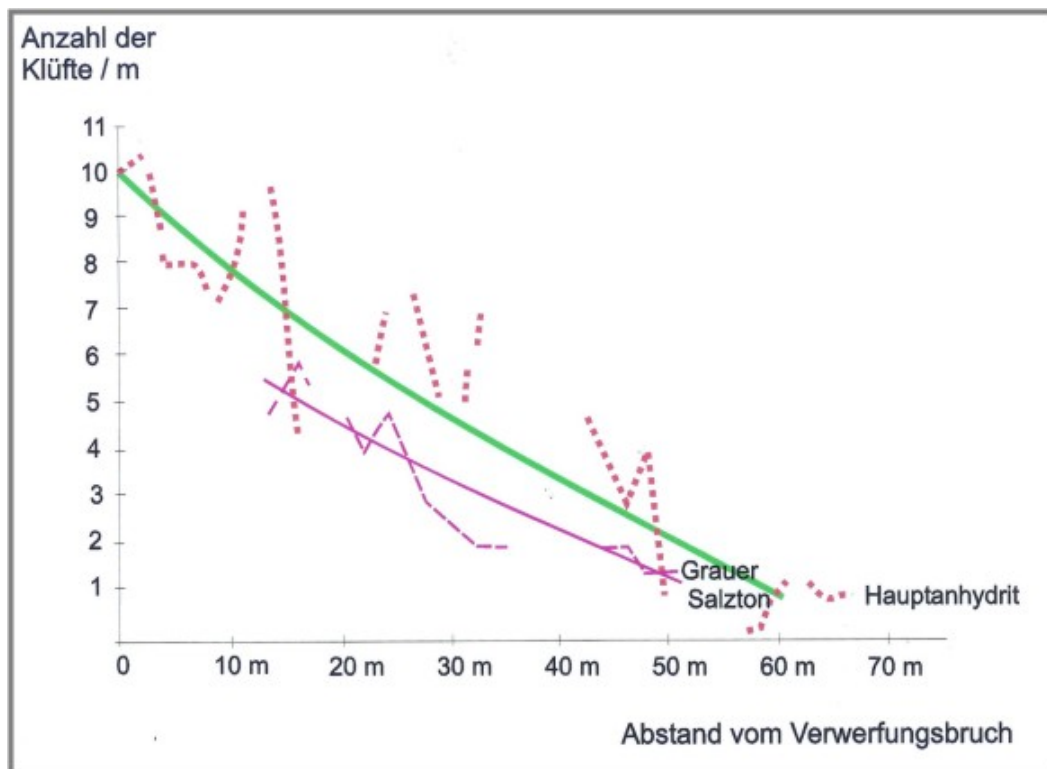


Abb. 3-9 Materialabhängige Verteilung der Klüftdichten vom Abstand eines Verwerfungsbruchs (Schwandt 1993)

3.5 Hydrogeologie

Durch das Abteufen von nahezu 250 Kalischächten, das Niederbringen von Erkundungsbohrungen zum Nachweis von Kali- und Steinsalz, Kupferschiefer, Erdöl – Erdgas, Kohlensäure, von Wasser, von Versenkräumen für Kaliendlaugen u.a. sind die im Bearbeitungsgebiet herrschenden hydrogeologischen Verhältnisse relativ gut bekannt. Das lässt folgende, allgemeine hydrogeologische Aussagen zu:

- Die Wasser- und Salzlösungsführung im Salinarstockwerk konzentriert sich auf die karbonatischen und sulfatischen Anteile der Schichtenfolge. Dabei wird die auftretende Menge der Salzlösungen und Wässer von der Kapazität offener Klüfte der Schichtfolge bestimmt, die generell mit der Teufe abnimmt.

- Die gespeicherten Salzlösungen können bis zu ihrer Aufsättigung weiterhin das Salinar subrodieren, wenn ihre natürliche Abführung durch geeignete hydraulische Gradienten im Gebirge gesichert ist.
- Die salinaren Gesteine ordnen sich mit zunehmender Löslichkeit wie folgt:
 - Sulfat (Anhydrit Gips)
 - Natriumchlorid (Steinsalz)
 - Komplexe Chloride und Sulfate („Kalisalz“)
- In bruchtektonisch stark beanspruchten Gebieten können auch Grundwasserringleiter des Salinars eine geschlossene Salzlösungs- und Wasserführung aufweisen. Hier sind Salzlösungen und Wässer in unterschiedlichen Mengen gespeichert. Dies hängt von der Intensität der tektonischen Aufweitung des im Hauptanhydrit vorhandenen Kluffinventars ab. Die größte im Bearbeitungsgebiet nachgewiesene Salzlösungsmenge, die aus einem geschlossenen System im Hauptanhydrit austrat, betrug rd. 5 Millionen m³.

Die hydrogeologischen Bedingungen sind in den einzelnen Kalirevieren unterschiedlich, weshalb sie auch einzeln besprochen werden.

Im Werra-Revier kann das Grundwasser vom Ausgehenden des Zechsteins, der mehr oder weniger horizontal bis flach gelagert ist, vor allem an markanten Verwerfungen, wo auch die Schichtfolge aufgestellt ist, in die Grundwasserleiter der Lagerstätte eintreten (siehe Tab. 3-4).

Die Auflösung von Steinsalz setzt ein, wenn durch Verwerfungen, Kluffzonen oder durchlässige Großklüfte Wasser in den Salzkörper eintritt. Während sich am Ausgehenden des Zechsteins eine großräumige, dem Ausstrich der Störung folgende Senke bildet, treten im Einfallen der salinaren Schichten in unterschiedlicher Entfernung vom Salzhang lösungsbedingte Einzelsenken oder Gruppen von Senken auf, die offensichtlich an markante Störungen oder deren Kreuzungen gebunden sind. Auch Zutritte aus dem Liegenden sind möglich, wenn die Störungen bis zum Salzgebirge durchgeschlagen sind. Derartige, für aufsteigende Lösungen wegsame Störungen oder aufgeweitete Kluffzonen stehen durch den in der Rhön im Jungtertiär aktiven Riftbasaltvulkanismus zur Verfügung.

Tab. 3-4 Grundwasserleiter/Grundwassergeringleiter im Werra-Revier (nach Ditt-
rich 2005)

Grundwasserleiter	Grundwassergeringleiter
Buntsandstein, geklüftet, geringe Teufe	Buntsandstein
klüftiges, hartes Einsturzgebirge	toniges Einsturzgebirge
	„Obere Letten“ T3r/4
Plattendolomit Ca3	
	„Untere Letten“ T2r/3
	Staßfurt-Steinsalz Na2
Oberer Werra-Anhydrit A1r	
	Braunroter Salzton T1r/3
	Werra-Steinsalz Na1
Unterer Werra-Anhydrit A1	
Zechsteinkalk Ca1	

Für das Werra-Gebiet steht seit 1968 (Grumbt und Lützner 1983) eine gute geologi-
sche Neukartierung der Oberfläche zur Verfügung (in GK25-Qualität). Das hat die Kor-
relation von Untertage- und Übertage-Situation erleichtert bzw. überhaupt erst
ermöglicht sowie die strukturelle Bewertung der hydrogeologischen Situation zugelas-
sen.

Im Südharz und Saale-Unstrut-Gebiet erfolgt der Zutritt von Wässern vom Ausgehen-
den des Salinars an der Grundgebirgshochlage des Harzes, des Kyffhäusers und des
Bottendorfer Höhenzuges oder über oberflächennahe Sattelstrukturen des Deckgebir-
ges. Die hydrogeologisch wirksamen Schichten sind in Tab. 3-5 aufgeführt.

Tab. 3-5 Grundwasserleiter/Grundwassergeringleiter im Südharz-Revier

Grundwasserleiter	Grundwassergeringleiter
Buntsandstein, geklüftet, geringe Teufe	Buntsandstein
klüftiges, hartes Einsturzgebirge	toniges Einsturzgebirge / Aller- Steinsalz Na4
	Aller-Ton T4
	Leine-Steinsalz Na3
Hauptanhydrit A3	
	Grauer Salzton
Deckanhydrit A2r	
	Staßfurt-Steinsalz Na2
Hauptdolomit Ca2	
Oberer Werra-Anhydrit A1r	
	Werra-Steinsalz Na1

Die Verbindung von Untertage- mit Übertagebefunden ist allenfalls in den Bereichen gewährleistet, in denen auch Kupferschieferbergbau umging. Ansonsten ist davon auszugehen, dass Neukartierungen GK25 nicht zur Verfügung stehen.

Das Nordharz-Gebiet ist hydrogeologisch nach den Angaben in der Tab. 3-6 charakterisiert. In der Tabelle sind die hydrologisch wirksamen Schichten aufgeführt.

Das in diesem Revier häufig eingetretene Absaufen der Gruben war oft eine Folge eines nach heutigem Kenntnisstand risikoreichen Abbaus von Kalisalzen, insbesondere von Kainitit, da in der unmittelbaren Umgebung Bruchstörungen im Deckgebirge und im Salinar auftraten.

Tab. 3-6 Grundwasserleiter/Grundwassergeringleiter im Nordharz-Revier

Grundwasserleiter	Grundwassergeringleiter
quartäre und tertiäre Sande und Kiese	tertiäre Tone
Buntsandstein mit Rogensteinbänken geklüftet, geringe Teufe	Buntsandstein
klüftiges Einsturzgebirge: kluft- und hohlraumführende Gipse und Anhydrite (Gipshut)	toniges Einsturzgebirge
	Aller-Steinsalz Na4
	Aller-Ton T4
Anhydritmittel im Na3	Leine-Steinsalz Na3
Hauptanhydrit A3	
	Grauer Salzton
	Staßfurt-Steinsalz Na2

Das in diesem Revier mehrfach eingetretene Absaufen von Gruben war oft eine Folge eines nach heutigem Kenntnisstand risikoreichen Abbaus von Kalisalzen, insbesondere von Kainitit, da in der unmittelbaren Umgebung Bruchstörungen im Deckgebirge und im Salinar auftraten.

Diese hydrogeologischen Voraussetzungen sind grundlegend für die Anlage und Abauführung eines Bergwerkes im Salzgebirge, um sich vor Zuflüssen und letztlich dem Ersaufen der Bergwerke zu schützen.

4 Bisheriger Kenntnisstand zu Salzlösungen im Salzbergbau

Die Beschreibung des Kenntnisstandes zu den Lösungsvorgängen im Salinar erfolgt zunächst ohne die Einbeziehung der im Anhang aufgeführten chemischen Analysen. Letztere werden dann ab Kap. 5 in die Untersuchungen einbezogen.

4.1 Herkunft und Verteilung der Salzlösungen

Die Entstehung und Herkunft von Salzlösungen in Kali- und Salzbergwerken wurde von Baumert (1928), Spackeler (1950), Gimm (1968), Herrmann et al. (1978), Kockert (1968), Schwandt (1991, 1993), Herbert (2000) u.a. untersucht. Es kann erstens zwischen Lösungen unterschieden werden, die ihren Ursprung in der Salzformation selbst haben, und zweitens solchen, die von außen, d.h. über tektonische Aktivitäten aus dem Deckgebirge oder aus dem Liegenden in die Salzformation eindringen konnten. Ferner sind Lösungen technologischen Ursprungs gesondert auszuhalten.

An die Salzformation primär gebundene Lösungen und später zugeführte Wässer können in Form von Flüssigkeitseinschlüssen in Salzmineralen, als Wasser auf den Korngrenzflächen, als Kristallwasser in hydratisierten Mineralen und als freie Lösungen auf Klüften, Störungen, Schichtflächen und anderen Unstetigkeiten auftreten. Die Herkunft dieser Lösungen kann auf die Bildungszeit der Salzformation zurückgehen (Urlaugen, connate waters) oder auf spätere Prozesse der Lösungsmetamorphose sowie auf noch spätere, tektonisch gesteuerte Zuläufe. Die Metamorphoselösungen gehen auf Wässer zurück, die möglicherweise aus der frühen Gipsentwässerung stammen (Borchert 1959) oder in Folge tektonischer Bewegungen, z. B. während des Salzaufstiegs, aus dem Deckgebirge in die Salzformation eingedrungen sind. Sie haben auf ihrem Weg durch die Salzformation die Kalilager teilweise oder vollständig umgebildet und sind später größtenteils wieder ausgepresst worden. Reste können im Kornverband und auf Mikrorissen im Steinsalz oder auf Klüften in anhydritischen Speichergesteinen, wie z.B. dem Hauptanhydrit (A3) oder den Anhydritmitteln (Na3am), zurückgeblieben sein. Während es viele Beispiele für Metamorphoselösungen gibt, sind Reste eingedunsteten Meerwassers in den deutschen Zechsteinevaporiten nur in sehr geringen Mengen nachgewiesen.

In einem gegebenenfalls vorzusehenden Endlagerbergwerk mit wärmeproduzierenden hochradioaktiven Abfällen würde das Steinsalz im unmittelbaren Einlagerungsbereich auf maximal 200 °C aufgeheizt. Hier könnten thermisch aus den Gesteinen ausgetrie-

bene Lösungen, vor allem durch die Freisetzung des Haftwassers an den Korngrenzflächen, durch Freisetzung des Kristallwassers hydratisierter Salzminerale wie Polyhalit, Kieserit oder Carnallit und durch thermisch bedingte Migration von Flüssigkeitseinschlüssen entstehen und migrationsfähige Fluide bilden (Gies et al. 1990).

Von außen in die Salzformation eintretende Salzlösungen werden in der Literatur als Tageslaugen (Spackeler 1950, Gimm 1968) oder als Infiltrationslösungen (Kockert 1968) bezeichnet, wenn sie aus dem Grund- oder Oberflächenwasser bzw. wenn sie aus dem Liegenden kommen. In die Salzformation eindringende Formations- und Tageswässer können am ehesten zum Absaufen von Bergwerken führen, weil das Reservoir, aus dem sie stammen, im Vergleich zum Bergwerksvolumen praktisch unbegrenzt groß und „offen“ ist. Bei Metamorphoselösungen wird im Gegensatz von einem begrenzten, weil „geschlossenen“ Lösungsreservoir ausgegangen, welches vom Deckgebirge isoliert, im Innern der Salzformation selbst liegt. Gleiches gilt für die eingedunsteten Meereswässer (Urlaugen), soweit solche nachgewiesen werden können.

Der Eintritt von Wässern oder Salzlösungen aus einem offenen System in ein Grubengebäude erfolgt über die genannten Diskontinuitäten (Klüfte, Spalten, Rachen, Störungen, Schichtflächen, Aquifere) in die Grubenräume. Diese zuführenden Strukturelemente werden detailliert im Kap. 8 beschrieben.

In Kali- und Salzbergwerken treten häufig auch Lösungen auf, die durch technische Prozesse entstanden sind. Dazu gehören Betriebs-, Schacht-, Bohrspülungs-, Spülversatz-, Versatzlösungen und durch die Bewetterung kondensierende Wetterlaugen. Diese werden im erforderlichen Umfang zu Vergleichszwecken genutzt.

Eine besondere Bedeutung haben in den letzten Jahrzehnten eingeleitete Salzlösungen und Wässer zur Verwahrung von Salzgruben erlangt. Mehr als ein Drittel der in die Grubenbaue eingebrachten Wässer oder Salzlösungen dienten diesem Zweck. Die Gesamtbilanz der im mitteldeutschen Salzbergbau aufgetretenen und eingeleiteten Salzlösungen ist aus der Abb. 4-1 zu ersehen. Daraus ist erkennbar, dass die Hauptzuflüsse aus dem Hangenden in die Grubenbaue eintraten. Hier erfolgt von Grundwasserleitern aus über offene Systeme der Zutritt von Wässern in das Salzgebirge. Diese wurden im Einzelnen in Kap. 3.5 aufgeführt und in die Schichtenfolge eingeordnet.

Im Werra-Gebiet ist für Wasserzutritte aus dem Hangenden in erster Linie der Plattendolomit verantwortlich zu machen, während die Zutritte aus dem Liegenden vom Zechsteinkalk herzuleiten sind, der außerdem noch CO₂ führen kann.

Im Südharz-Gebiet erfolgen die Zuflüsse aus dem liegenden Hauptdolomit/Stinkschiefer, seltener über den hangenden Hauptanhydrit.

Im Saale-Unstrut-Gebiet und im Nordharz-Bereich treten Zuflüsse direkt aus dem Einsturzgebirge oder über den Hauptanhydrit zu. Zuflüsse aus dem Liegenden sind kaum bekannt.

Zahlenmäßige Angaben zu den Zuflussmengen enthält Abb. 4-1.

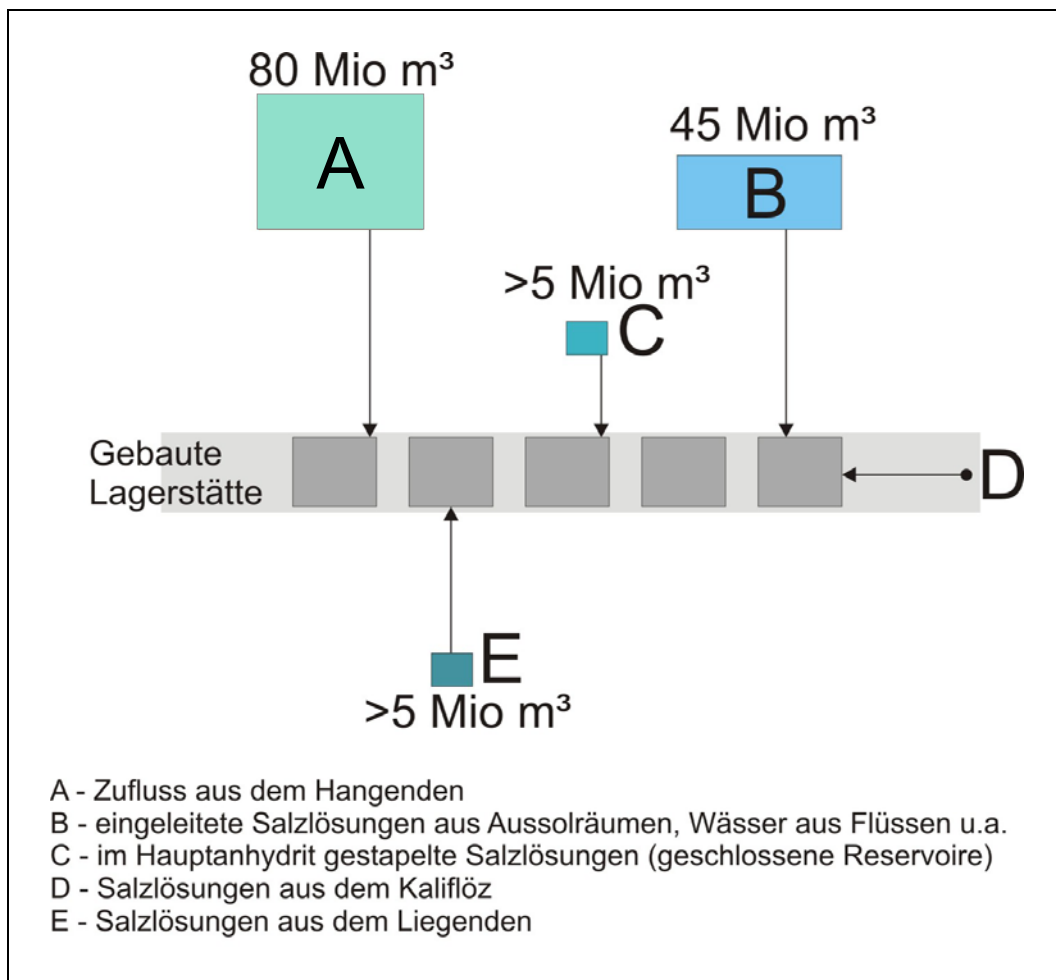


Abb. 4-1 Herkunft der Salzlösungen und Wässer in den Salzgruben Mitteldeutschlands (ergänzt nach Schwandt, Seifert 1999)

Die Verteilung der Gesamtzuflüsse auf die einzelnen Bergwerke des Bearbeitungsgebietes zeigt Abb. 4-2. Es gibt in allen Teilbereichen Maximalzuflüsse von über 1 Million

m³; die größte Teilsumme der Zuflüsse tritt im Nordharz-Gebiet auf. Die zeitliche Verteilung von Zuflüssen und ihr beobachtetes Eindringen in die Bergwerke über mehr als ein Jahrhundert ist der Abb. 4-3 dokumentiert. Deutlich fällt ein Maximum in der Zeitspanne von 1896 bis 1913 im Nordharzgebiet auf. Es wird durch mehrere absaufende Gruben am Staßfurter Sattel bedingt. Von 1970 bis 1979 erfolgte eine gezielte Einleitung von Wässern und Salzlösungen im Nordharz-Kaligebiet zur Sicherung der Stabilität der Tagesoberfläche. Ab 1990 lässt sich die beginnende Flutung der Bergwerke im Südharz erkennen.

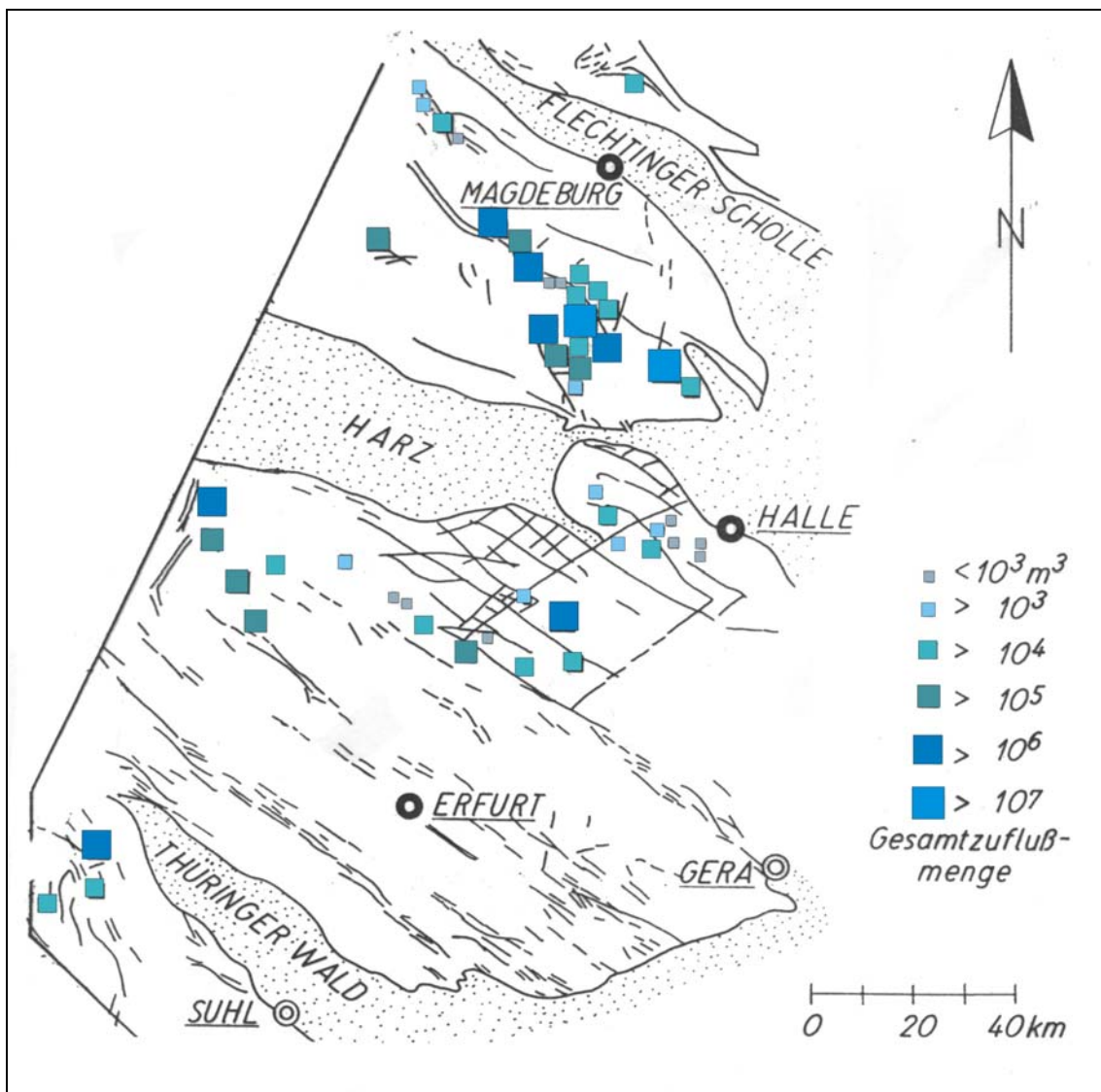


Abb. 4-2 Gesamtzuflussmengen von Salzlösungen und Wässern bezogen auf das jeweilige Grubenfeld im Bearbeitungsgebiet (ergänzt nach Schwandt 1991)

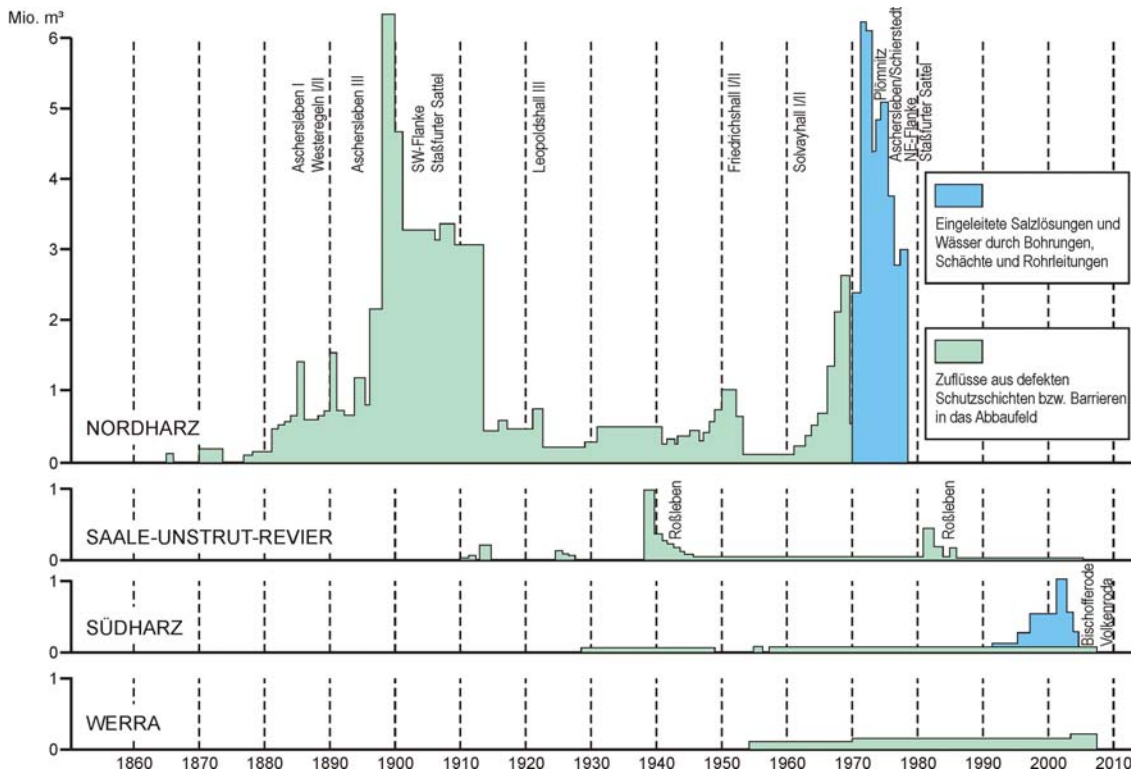


Abb. 4-3 Entwicklung der Zufluss- und Einleitungsmengen von Salzlösungen und Wässern in den Salzgruben Mitteldeutschlands ohne Abzug der abgepumpten Mengen (ergänzt nach Schwandt 1985)

4.2 Gliederung der Salzlösungszuflüsse nach Zuflussmenge und Chemismus

Nach der zeitlichen Entwicklung der Zuflussmengen wurden durch Schwandt (1978) die Salzlösungen eingeteilt in:

Haupttyp I: Austritte, deren Schüttung generell abnimmt.

Ia: Geringe Austritte mit gleichmäßiger Schüttung von relativ langer Dauer (Jahre) mit oft sehr langsamer Verringerung der Schüttungsmengen.

Ib: Zuläufe mit einem Maximum zu Beginn der Entwicklung oder nach gewisser Anlaufzeit mit nachfolgender allmählicher Abnahme der Schüttung.

Haupttyp II: Austritte, deren Schüttung generell ansteigt.

Ila: Die Schüttung ist zunächst gering, dann aber laufend und sprunghaft ansteigend.

Ilb: Die Anfangsschüttung verringert sich zunächst, dann Anstieg wie in Ila.

In Tab. 4-1 wird die von Herrmann et al. (1978) entwickelte Klassifikation der Salzlösungen aus den Kali- und Steinsalzgruben nach dem Chemismus wiedergegeben. Die Salzlösungen werden in Süßwasser, Salzwasser, schwach konzentrierte, konzentrierte und stark konzentrierte Salzlösungen unterteilt. Dabei wurden zur Abgrenzung die in den Salzlösungen vorhandenen Gehalte an NaCl, KCl, MgCl₂ und CaCl₂ benutzt. Diese Gliederung wurde bei der Erfassung und Bewertung der Salzlösungen auch in der mitteleuropäischen Kaliindustrie angewendet.

Tab. 4-1 Klassifikation der Salzlösungen nach dem Chemismus aus den Kali- und Salzgruben (Herrmann et al. 1978)

Hauptgruppe	Untergruppe	Bezeichnung der Lösungen	mol/1000 mol H ₂ O	g/100 g Lösung (Massenanteil in %)	g/100 ml Lösung	Dichte (20°C) [g/cm ³]
1		<i>Süßwasser</i>		bis 0,1	bis 1	bis 1,0001 ± 0,0005
2	A B C D	NaCl-Lösung KCl-Lösung MgCl ₂ -Lösung CaCl ₂ -Lösung	NaCl > KCl und MgCl ₂ KCl > NaCl und > MgCl ₂ MgCl ₂ > NaCl und > KCl CaCl ₂ > 0	> 0,1 bis 3,5	> 1 bis 35	> 1,0005 bis 1,03 ± 0,01
3	A B C D	<i>Schwach konzentrierte Lösungen</i> NaCl-Lösung KCl-Lösung MgCl ₂ -Lösung CaCl ₂ -Lösung	NaCl > KCl und MgCl ₂ KCl > NaCl und > MgCl ₂ MgCl ₂ > NaCl und > KCl CaCl ₂ > 0	>3,5 bis 14	>35 bis 150	> 1,02 bis 1,11 ± 0,01
4	A B C D	<i>konzentrierte Lösungen</i> NaCl-Lösung KCl-Lösung MgCl ₂ -Lösung CaCl ₂ -Lösung	NaCl > KCl und MgCl ₂ KCl > NaCl und > MgCl ₂ MgCl ₂ > NaCl und > KCl CaCl ₂ > 0	>14 bis 27	> 150 bis 350	> 1,10 bis 1,24 ± 0,02
5	A B C D	<i>Stark konzentrierte Lösungen</i> NaCl-Lösung KCl-Lösung MgCl ₂ -Lösung CaCl ₂ -Lösung	NaCl > KCl und MgCl ₂ KCl > NaCl und > MgCl ₂ MgCl ₂ > NaCl und > KCl CaCl ₂ > 0	> 27	> 350	> 1,22

Eine Klassifikation von Salzlösungen nach dem Chemismus gibt Schwandt (1978) (s Abb. 4-4):

- Haupttyp A:** MgCl₂-reiche Salzlösungsaustritte
- A1:** maximale MgCl₂-Gehalte über 400 g/l, enthalten CaCl₂ oder MgSO₄, NaCl bis 50 g/l
 - A2:** MgCl₂-Gehalte unter 390 g/l, minimal 140 g/l
- Haupttyp B:** NaCl-angereicherte Zuflüsse, Gehalte 320 bis 100 g/l, MgCl₂ und KCl vorhanden
- Haupttyp C:** Zeitweise MgCl₂-/NaCl-angereicherte Salzlösungen

v. Borstel (1993) unterscheidet 5 Typen des Zuflussverhaltens:

- Haupttyp A:** Geringer, weitgehend konstanter Austritt
Langsam auslaufendes Lösungsreservoir unter geringem Druck (geschlossenes System). Chemismus bleibt konstant
- Haupttyp B:** Maximale Schüttung zu Beginn, mit der Zeit geringer werdend.
- Haupttyp C:** Zufluss erhöht sich nach Beginn bis zu einem Maximum und nimmt dann ab. Starke Schwankungen des Chemismus
- Haupttyp D:** Zufluss über Jahre hinweg konstant, dann plötzlich ansteigend.
Zu Beginn noch gesättigt, aber mit der Zeit Konzentration abnehmend.
- Haupttyp E:** Plötzlicher großer Zufluss, erhöht sich zügig.
Grundwassersystem angefahren!

Insgesamt ist festzustellen, dass eine einheitliche und befriedigende Aufgliederung der Salzlösungen und der Entwicklung ihrer Zuflussmengen und des Chemismus bisher nicht vorliegt. Sie wäre aber für eine Bewertung der Langzeitsicherheit von Bergwerken mit Salzaufschlüssen dringend erforderlich.

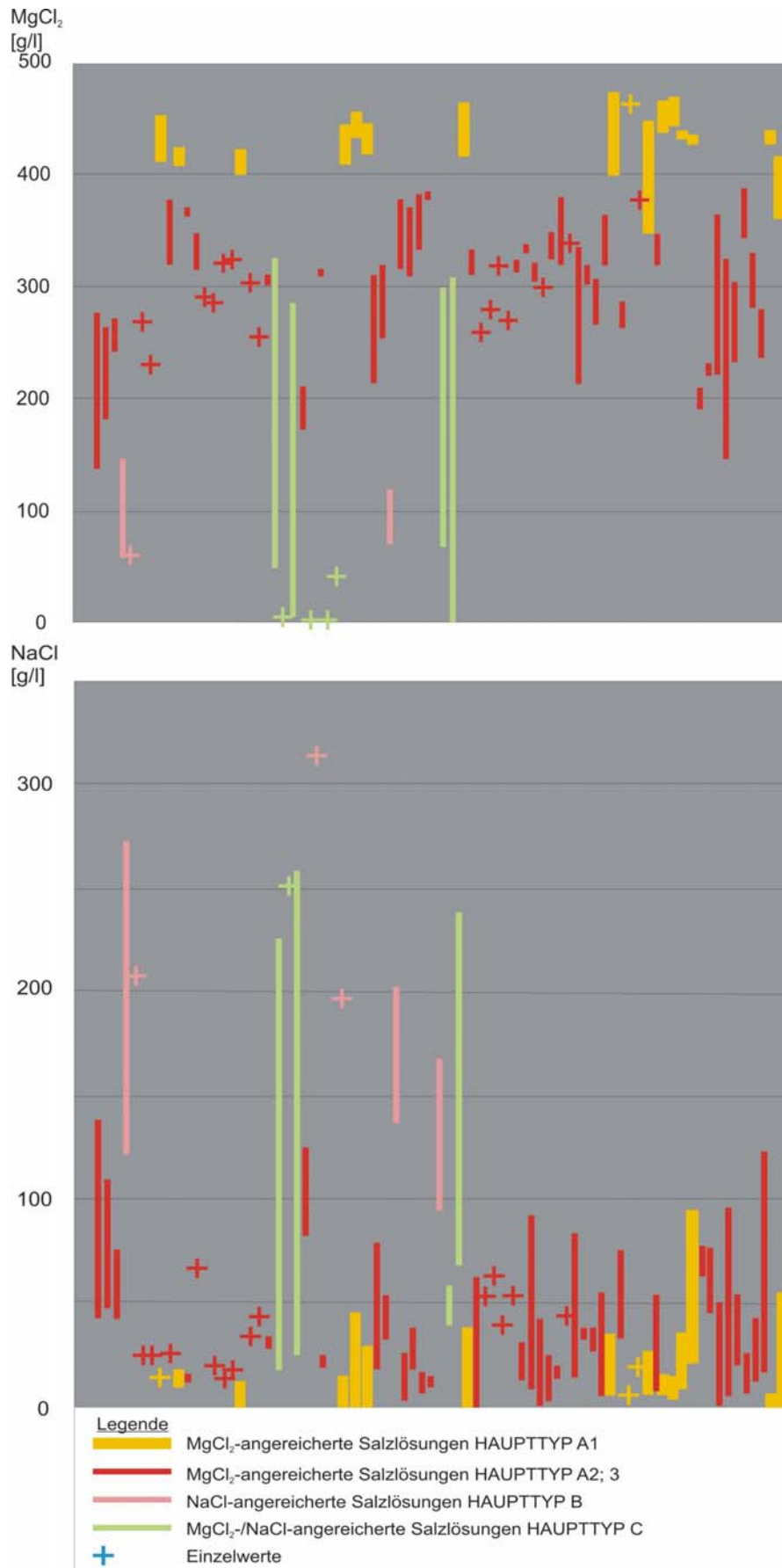


Abb. 4-4 Maximale und minimale $MgCl_2$ - und NaCl-Gehalte der Salzlösungszuflüsse im Saale-Unstrut- und Nordharz-Kaligebiet (nach Schwandt 1978)

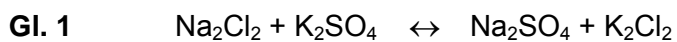
4.3 Chemische Zusammensetzung der Hauptkomponenten

Es ist allgemein bekannt, dass die natürlichen Salzlösungen in den Salzgruben wie auch das Meerwasser und die daraus gebildeten Salzminerale folgende Hauptkomponenten enthalten: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , eine Reihe wichtiger Spurenkomponenten wie Br^- , Li^+ , BO_3^- , Rb^+ , Sr^{2+} , Fe^{2+} etc. und Wasser. Es sind also, wenn man Neben- und Spurenkomponenten vernachlässigt, Sechs-Komponenten- oder hexäre Lösungen.

Die erste systematische wissenschaftliche Untersuchung der komplexen Salzlösungen und ihrer Teilsysteme geht auf Van't Hoff (1905, 1909) zurück, dessen grundlegende Erkenntnisse bis heute gültig geblieben sind. Sie werden von Herbert (2000) wie folgt beschrieben:

Van't Hoff's Durchbruch bei der Bestimmung der Stabilitätsverhältnisse der Salzlösungen wurde durch die Erkenntnis ermöglicht, dass beim Eindunsten einer Salzlösung in vielen Fällen metastabile Bodenkörper entstehen, die eine höhere Löslichkeit besitzen als die stabilen Bodenkörper. Durch Löslichkeitsbestimmungen wurde eine zuverlässige Beurteilung der Stabilitätsverhältnisse möglich. Zum direkten Nachweis metastabiler Bodenkörper benutzte Van't Hoff Differentialdampfdruckmessungen. Er ging davon aus, dass die stabilen Bodenkörper, die jeweils den niedrigeren Dampfdruck besitzen, in der Regel Entwässerungsprodukte zunächst entstandener wasserreicherer Verbindungen sind. Die wasserärmeren Verbindungen müssen aber im Gleichgewicht stehen mit einer Lösung, die einen kleineren Dampfdruck besitzt als das wasserreichere Hydrat. Zum Beispiel besitzt bei 25° C eine an Halit, Epsomit und Carnallit gesättigte Lösung einen kleineren Dampfdruck als Epsomit. Die Lösung wirkt also wasserentziehend auf den Epsomit. Hieraus ergibt sich, dass der Epsomit nicht der stabile Bodenkörper in der Lösung ist.

Das hexäre NaCl-gesättigte System Na-K-Ca-Mg-Cl-SO₄ besteht aus den einfachen Salzen NaCl, CaSO₄, KCl, MgCl₂, Na₂SO₄ und Wasser. Darin treten fünf reziproke Salzpaare auf (s. Gl. 1 bis 5). Eine Lösung mit zwei einfachen Salzen z.B. K₂Cl₂ + MgSO₄ kann durch Verdunstung zwei andere einfache Salze K₂SO₄ + MgCl₂ ergeben. Eine solche Kombination von Salzen wird als reziprokes Salzpaar bezeichnet (z.B. Krauskopf 1979).





Die Zusammensetzung einer Lösung mit einem reziproken Salzpaar kann angegeben werden, wenn die Konzentrationen von drei der vier enthaltenen Ionen bekannt sind. Durch die Bedingung der Elektroneutralität ist die Konzentration des vierten Ions festgelegt. Wichtige Fragen, die sich im Zusammenhang mit Lösungen mit reziproken Salzpaaren stellen, sind z.B.: Wie viele Salze können gleichzeitig aus einer solchen Lösung auskristallisieren? Können Doppelsalze vorhanden sein? Wenn ja, wie viele gleichzeitig? Antworten auf diese Fragen gibt eine als Phasenregel bekannte Verallgemeinerung.

$$P + F = K + 2$$

(Zahl der Phasen + Zahl der Freiheitsgrade = Zahl der Komponenten + 2. Die 2 steht in der Regel für Temperatur und Druck). Am Beispiel der Q-Lösung aus dem NaCl-gesättigten quinären System Na-K-Mg-Cl-SO₄ sei gezeigt, welche Informationen darüber zu gewinnen sind. Eine Q-Lösung steht im mittleren Temperaturbereich per Definition mit den Bodenkörpern Halit, Sylvin, Carnallit und Kainit im Gleichgewicht. Die Zahl der Phasen im System beträgt 6, d.h. vier feste Phasen (die Bodenkörper), eine flüssige Phase (die Lösung) und eine Gasphase (die Dampfphase über der Lösung). Die Komponenten sind NaCl, KCl, MgCl₂, Na₂SO₄ und Wasser. Die Zahl der Freiheitsgrade beträgt in diesem System somit 1, weil:

$$6 + 1 = 5 + 2$$

Freiheitsgrade sind im Allgemeinen der Druck oder die Temperatur. Bei festgelegtem Druck (1 atm) ist die Lösung über einen weiten Temperaturbereich existent, d.h. sie bleibt mit den gleichen Bodenkörpern Halit, Carnallit, Sylvin und Kainit im Gleichgewicht, verändert aber ihre Zusammensetzung (monovariante Lösung). Werden Temperatur und Druck festgesetzt, z.B. bei 25°C und 1 atm, ist die Zusammensetzung nicht mehr variabel. Das System ist invariant, d.h. die Q-Lösung ist unter diesen Bedingungen eine invariante Lösung. Der Dampfdruck ist von der Zusammensetzung der Lösung abhängig. Ähnliches gilt für das Volumen. Auch dieses ist durch die anderen Faktoren festgelegt und damit nicht mehr frei veränderbar. Das Phasengesetz erlaubt keine Aussagen über die Art der auftretenden Phasen und ihre Stabilitätsbereiche. Diese müssen experimentell bestimmt werden.

Um das gesamte hexäre System beschreiben zu können, müssen die Stabilitätsbedingungen in den Einzelsystemen und in allen Randsystemen der komplexeren Systeme bekannt sein. Zum Beispiel setzt sich das quaternäre System Na-K-Mg-Cl, mit den hypothetischen Salzen NaCl, KCl und $MgCl_2$ aus den drei ternären Randsystemen, Na-K-Cl (mit den Salzen NaCl und KCl), Na-Mg-Cl (mit NaCl und $MgCl_2$) und K-Mg-Cl (mit KCl und $MgCl_2$) zusammen. Ist jedes dieser Teilsysteme bekannt, kann auch das Gesamtsystem beschrieben werden. Zur Beschreibung des NaCl-gesättigten hexären Systems Na-K-Ca-Mg-Cl- SO_4 müssen die Stabilitätsbedingungen in den vier NaCl-gesättigten quinären Randsystemen, Na-K-Mg-Cl- SO_4 , Na-Ca-Mg-Cl- SO_4 , Na-K-Ca-Cl- SO_4 und Na-K-Ca-Mg-Cl bekannt sein. Zwei weitere Randsysteme des hexären Systems, in denen jeweils Na und Cl fehlt, brauchen normalerweise nicht betrachtet zu werden, da diese Elemente in Salzformationen immer vorhanden sind.

Das wichtigste quinäre Randsystem des hexären Systems ist das Ca-freie NaCl-gesättigte System Na-K-Mg-Cl- SO_4 . Mit steigenden Mg-Gehalten fallen die Ca-Gehalte in den Salzlösungen und werden bei hohen Mg-Gehalten vernachlässigbar klein. Bei der Aufbereitung der Kalisalze im Heißlöseverfahren entstehen Mg- und K-reiche Lösungen mit sehr niedrigen Ca-Gehalten. Zur Beschreibung dieser Lösungen reicht das Ca-freie quinäre System Na-K-Mg-Cl- SO_4 aus. Entsprechend gut ist dieses System in einem weiten Temperaturintervall untersucht worden. Die Ca-Salze waren für die Kaliindustrie, die die Untersuchung der Salzsysteme maßgeblich betrieben hat, nur insoweit von Interesse, als manchmal Ausfällungen von sulfatischen Ca-Mineralen den Produktionsprozess störten. Das hexäre System mit Ca ist darum auch weniger gut bekannt, vor allem fehlen wichtige Daten für höhere Temperaturen.

Für die Endlagerung in Steinsalzformationen ist das hexäre System mit Ca von besonderer Bedeutung, weil in den Endlagerhorizonten neben Steinsalz auch immer Anhydrit ($CaSO_4$) und häufig Polyhalit ($K_2MgCa_2(SO_4)_4 \cdot 7H_2O$) auftreten. Die Mg-Gehalte der Lösungen, die durch den Kontakt mit diesen Mineralen entstehen, sind relativ niedrig. Entsprechend höher sind die Ca-Gehalte. Für die Beschreibung solcher Lösungen ist das quinäre Ca-freie System nicht ausreichend. Es müssen die Stabilitätsverhältnisse im komplexeren Ca-führenden hexären System betrachtet werden.

Die Ergebnisse der umfangreichen Löslichkeitsbestimmungen an Salzen der ozeanischen Salzablagerungen wurden erstmalig von D'Ans (1933) in einem Tabellenwerk zusammengestellt. In den 50-er Jahren wurde von Sdanowski et al. (1953, 1954) eine noch umfangreichere Datensammlung veröffentlicht, die auch die Ergebnisse der rus-

sischen Löslichkeitsuntersuchungen enthält. Weitere Löslichkeitsbestimmungen wurden in den 50-er Jahren am Kaliforschungsinstitut in Hannover durchgeführt und von Authenrieth (1953, 1954, 1955, 1958) und von Authenrieth und Braune (1959a, b, 1960a, b) veröffentlicht. Später kamen umfangreiche Untersuchungen des NaCl-gesättigten, Ca-freien quinären und des Ca-führenden hexären Systems in einem wesentlich erweiterten Temperaturbereich (-35° bis $+200^{\circ}$ C) durch die Freiburger Schule dazu. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien die Arbeiten von Beck et al. (1981a, b), Menzel und Holldorf (1988), Menzel et al. (1988), Kropp und Holldorf (1988), Kropp et al. (1988), Ziegenbalg et al. (1991) und Fanghänel (1992) genannt.

Auf diesem experimentellen Datenmaterial basiert die thermodynamische Datenbasis von Harvie, Møller und Weare (1984), die heute eine korrekte Modellierung der Salzsysteme (einschließlich des quinären und hexären Systems) bei 25° C zulässt. An der thermodynamischen Datenbasis zur Modellierung der Salzsysteme bei niedrigeren und vor allem bei höheren Temperaturen wird in Deutschland (TU Bergakademie Freiberg und Universität Göttingen) als auch in den USA (University of California, San Diego) gearbeitet. Auch hierfür wird das vorhandene experimentelle Datenmaterial verwendet. Ein 1995 gegründeter Arbeitskreis für geochemische Modellierung des Bundesamtes für Strahlenschutz, das die endlagerbezogenen Arbeiten in Deutschland koordiniert, führt z. Zt. eine Bestandsaufnahme des gesamten vorhandenen Datenmaterials durch und erarbeitet Empfehlungen für die gezielte Bestimmung der noch fehlenden experimentellen Daten. Erst wenn dieser Prozess abgeschlossen ist, kann eine vollständige, in sich konsistente thermodynamische Datenbasis geschaffen werden, mit der die Modellierung der ozeanischen Salzsysteme im gesamten Temperaturintervall -35° bis $+200^{\circ}$ C korrekt möglich sein wird.

In Tab. 4-2 sind die invarianten Punkte der vier NaCl-gesättigten quinären Randsysteme des hexären Systems und in Abb. 4-5 die invarianten Punkte des hexären Systems bei 25° C zusammengestellt. Die Tabelle zeigt die in der Literatur gebräuchlichen Bezeichnungen der verschiedenen Lösungen, ihre auf 100 normierte Zusammensetzung, die Bodenkörper, mit denen die Lösungen bei der angegebenen Temperatur im Gleichgewicht stehen, und die Wasseraktivität der Lösungen. Der Wert der Wasseraktivität mal 100 entspricht dem Wert der relativen Luftfeuchtigkeit in % über diesen Lösungen. Eine ausführliche Beschreibung der verschiedenen Systeme der ozeanischen Salze findet sich in Braitsch (1962).

Tab. 4-2 Jänecke-Koordinaten der invarianten Lösungen (IP) der vier quinären NaCl-gesättigten Randsysteme des hexären Systems der Salze ozeanischer Salzablagerungen bei 25 °C und 1 atm (nach Eugster et al. 1980)

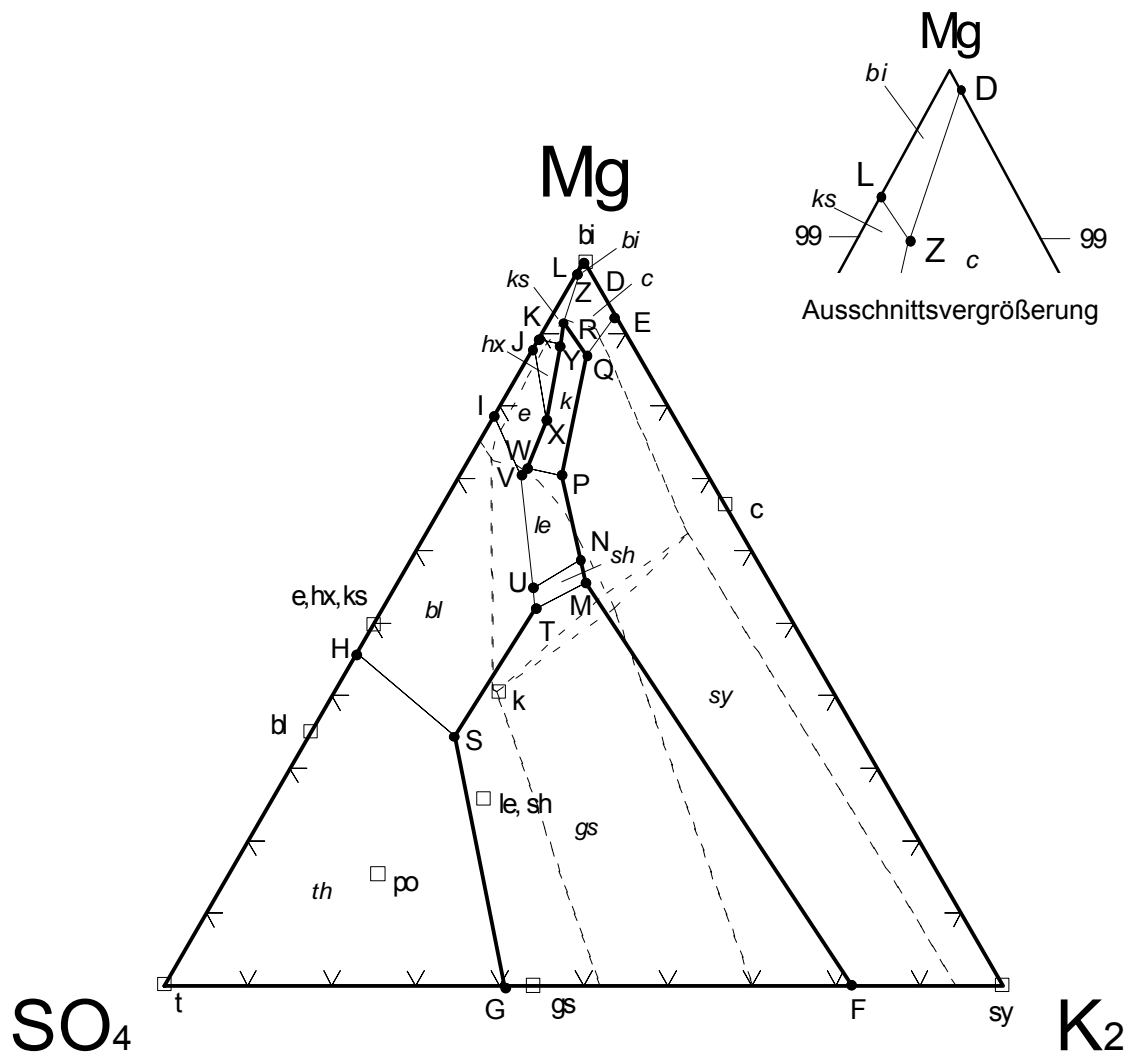
Invariante Lösungen			Jänecke-Koordinaten			
I.P.	Bodenkörper	aH ₂ O	K ₂	Mg	Ca	SO ₄
System Na-K-Mg-Cl-SO ₄						
S	m, bl, gs	0,7137	18,64	34,26	–	47,10
T	bl, gs, sh	0,6831	17,27	52,76	–	29,97
M	gs, sh, sy	0,6717	21,76	55,69	–	22,55
N	sh, le, sy	0,6693	20,92	56,88	–	22,20
P	le, k, sy	0,6046	10,62	71,28	–	20,74
W	e, k, le	0,6048	8,56	70,70	–	20,74
V	e, bl, le	0,6236	8,71	67,83	–	23,46
u	bl, sh, le	0,6693	14,36	58,48	–	27,16
X	e, hx, k	0,5675	5,01	78,71	–	16,28
Y	hx, ks, k	0,4983	2,14	86,62	–	11,24
R	ks, c, k	0,4683	2,05	90,38	–	7,57
Q	k, c, sy	0,4174	5,90	87,53	–	6,57
z	ks, ca, bi	0,3382	0,17	98,80	–	1,03
System Na-Ca-Mg-Cl-SO ₄						
K1	tc, ant, a	0,1600	–	21,64	78,36	0,00
K2	bi, ta, a	0,1803	–	32,84	67,16	0,00
K3	bi, ks, a	0,3383	–	98,90	0,01	1,09
K4	ks, hx, a	0,4983	–	88,78	0,01	11,21
K5	hx, e, a	0,5675	–	84,49	0,02	15,49
K6	e, bl, a	0,6448	–	76,91	0,03	23,06
K7	bl, gb, a	0,6686	–	75,29	0,04	24,67
K8	bl, th, gb	0,7283	–	47,10	0,04	52,87
System Na-K-Ca-Cl-SO ₄						
M1	th, gs, gb	0,7288	38,38	–	0,08	61,54
M2	gs, gb, sg	0,7288	46,64	–	0,12	53,24
M3	gb, sg, a	0,7353	70,24	–	1,43	28,33
M4	sg, sy, a	0,7214	91,16	–	3,30	5,54
M5	ant, sy, a	0,2189	2,34	–	97,66	0,00
M6	sg, sy, gs	0,7189	79,28	–	0,15	20,57
System Na-K-Ca-Mg-Cl						
S1	ant, c, sy	0,2053	2,15	6,48	91,37	–
S2	bi, tc, c	0,1801	0,14	32,79	67,06	–
S3	tc, ant, c	0,1589	0,26	21,30	78,44	–

Die interessierenden NaCl-gesättigten quinären und hexären Salzlösungen sind Lösungen mit mehreren reziproken Salzpaaren. Eine wichtige praktische Frage die sich stellt, ist ob und wie der Kristallisationspfad solcher Lösungen graphisch dargestellt werden kann.

In einer Lösung mit einem reziproken Salzpaar hat man drei unabhängige Variablen. Die vierte ist durch die Konzentration der andern drei festgelegt. Daraus folgt, dass ein vollständiges Diagramm entweder dreidimensional sein muss, oder eine zweidimensionale Projektion darstellt. Die in neueren Arbeiten am häufigsten verwendete Art der Darstellung ist eine Dreiecksdarstellung, welche von Jänecke (1912) vorgeschlagen wurde, und als Jänecke-Projektion oder -Dreieck bekannt ist. Das Jänecke-Dreieck ist eine Anpassung an eine Diagrammform, die in der Petrologie häufig gebraucht wird, wenn es darum geht, veränderliche Verhältnisse zwischen drei Größen darzustellen. Es sollen z.B. die Zusammensetzungen aus Mischungen mit verschiedenen Anteilen der Substanzen A, B und C dargestellt werden. In einem gleichseitigen Dreieck steht jede Ecke für 100 % von einer der drei Substanzen. Die gegenüberliegende Ecke steht entsprechend für 0 % dieser Substanz. Um die Mischung von 65 % A, 25 % B und 10 % C darzustellen, zeichnet man eine Linie durch alle Punkte mit 65 % A und eine zweite Linie durch alle Punkte mit 25 % B. Der Schnittpunkt der beiden Linien liegt bei 10 % der Entfernung zu C. In der Dreiecksdarstellung können somit drei Substanzen dargestellt werden, wobei nur zwei davon variabel sind. Die dritte ist durch die beiden anderen festgesetzt.

Bei der Darstellung einer Lösungszusammensetzung mit einem reziproken Salzpaar wird wie folgt vorgegangen: Die Zusammensetzung wird zunächst in Mol-Gew.-% der vier Ionen ausgedrückt. Danach wird die Summe der Mol-% von drei Ionen auf 100 normiert. Für das Salzpaar AC und BD kann man z.B. die Summe der drei Ionen $(A^{2+}) + (B^{2+}) + (C^{2-}) = 100$ angeben. Daraus ergibt sich $(D^{2-}) = 2(A^{2+}) + 2(B^{2+}) - 100$. A^{2+} , B^{2+} und C^{2-} werden in die Ecken eines Dreiecks gesetzt und die Verhältnisse werden wie beschrieben eingezeichnet. Diese Vorgehensweise reduziert drei Variable auf zwei, da Verhältnisse anstatt Absolutwerte verwendet werden. Das Jänecke-Dreieck stellt somit relative Anteile verschiedener Ionen oder Salze in Lösung, nicht aber deren tatsächliche Konzentrationen dar.

Die Lösungen in Salzformationen sind in aller Regel NaCl-gesättigt. Bei der Darstellung der Hauptkomponenten kann daher ohne großen Informationsverlust auf NaCl verzichtet werden. Jedes der vier quinären Randsysteme des hexären Systems ist somit auf drei Komponenten reduzierbar, die in einer Dreiecksdarstellung eingezeichnet werden können. Quinäre, Ca-freie, NaCl-gesättigte Salzlösungen können im Dreieck $Mg-SO_4-K_2$ dargestellt werden.



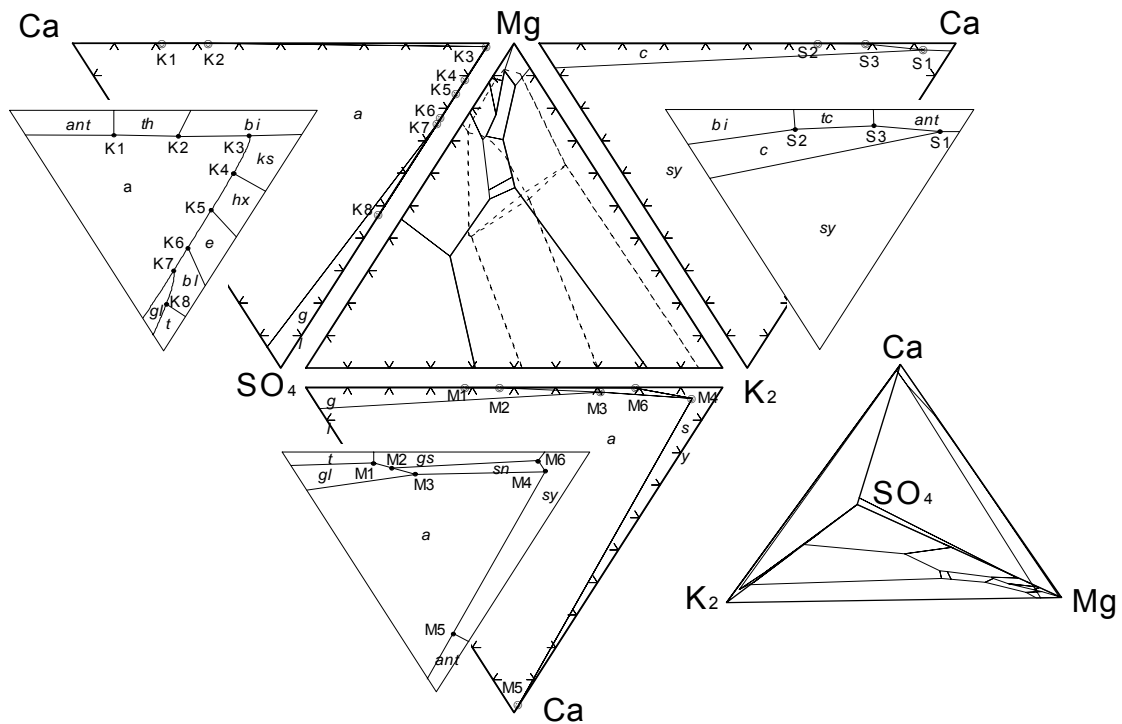
- Legende:**
- Großbuchstaben an den Eckpunkten des Dreiecks = Komponenten
 - Großbuchstaben im Dreieck = invariante Lösungen
 - Kleinbuchstaben = Abkürzungen von Salzmineralnamen (Tab. 7-1)
 - Kleinbuchstaben kursiv = Stabilitätsfelder von Salzmineralen
 - + Kleinbuchstaben = darstellende Punkte von 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. 4-5 Darstellung des NaCl-gesättigten quinären Systems Na-K-Mg-Cl-SO₄-H₂O. 25°C-Isotherme bei 1 atm (nach Braitsch 1962)

Abb. 4-5 zeigt die 25 °C-Isotherme des quinären NaCl-gesättigten Systems Na-K-Mg-Cl-SO₄-H₂O nach Braitsch (1962) in der Jänecke-Projektion. Die Verbindungslinien

zwischen den invarianten Punkten markieren die Feldgrenzen der Stabilitätsfelder von Salzmineralen, die mit den entsprechenden Lösungen im Gleichgewicht stehen. So sind z.B. die Lösungen P, Q, R, Y, X und W alle mit Kainit im Gleichgewicht, da ihre Verbindungslinien das Kainitfeld umspannen. Entsprechend sind die Lösungen F, M, N, P, Q und E mit Sylvin im Gleichgewicht. Die Lösungen P und Q sind sowohl mit Sylvin als auch mit Kainit im Gleichgewicht, da sie an den Grenzen der Stabilitätsfelder beider Minerale liegen. Der darstellende Punkt eines Salzminerals, auch Salzpunkt genannt, muss nicht im Stabilitätsfeld dieses Minerals liegen. So liegt z.B. der darstellende Punkt des Kainits im Glaseritfeld. Die Grenzlinien zwischen den Stabilitätsfeldern sind nach Jänecke (1923) und Braitsch (1962) entweder Kristallisationsbahnen oder Überschreitungslinien. Lösungszusammensetzungen, die sich auf Kristallisationsbahnen (in Abb. 4-5 dick ausgezogen) befinden, können gleichzeitig Bodenkörper der angrenzenden Felder ausscheiden. Hierbei ändert sich die Zusammensetzung der Lösung entlang der Grenzkurve bis zu einem Endpunkt. Kristallisationsbahnen zeichnen sich dadurch aus, dass die Salzpunkte zu beiden Seiten der Linien liegen. Bei den Überschreitungslinien liegen die Salzpunkte beider Bodenkörper auf der gleichen Seite der Grenzlinie. Falls bei der isothermen Ausscheidung der erste Bodenkörper bei Erreichen der Grenzlinie entfernt wird, tritt die Lösung unter Ausscheidung des zweiten Bodenkörpers in das zweite Stabilitätsfeld ein.

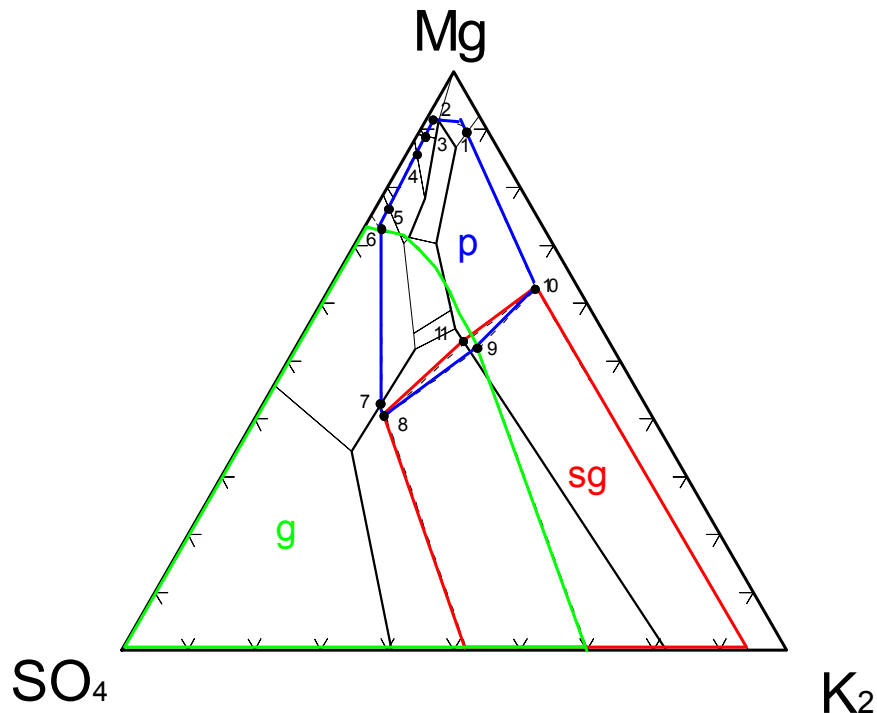
Für die Charakterisierung einer quinären Lösung reicht die Darstellung in einem Dreieck aus. Für eine hexäre Lösung benötigt man die Projektionspunkte in den vier Dreiecken der vier quinären Randsysteme des hexären Systems. Die Lösung muss in den Dreiecken $\text{Mg-K}_2\text{-SO}_4$, Ca-Mg-SO_4 , $\text{Ca-SO}_4\text{-K}_2$ und $\text{Ca-K}_2\text{-Mg}$ eingetragen werden. Diese vier Dreiecke kann man sich auch als Begrenzungsflächen eines Tetraeders mit den Ecken Mg, K_2 , SO_4 und Ca vorstellen, die in die Ebene aufgeklappt sind. Der darstellende Punkt einer hexären Lösung liegt im Inneren des Pyramidenraumes. Die Darstellung in den vier Dreiecken ist eine Projektion auf die Begrenzungsflächen des Tetraeders.



Legende: Großbuchstaben in den Dreiecken = invariante Lösungen der quinären Randsysteme des hexären Systems
 Kleinbuchstaben = Stabilitätsfelder von Salzmineralen

Abb. 4-6 Darstellung des NaCl-gesättigten hexären Systems Na-K-Ca-Mg-Cl-SO₄, 25°C-Isotherme bei 1 atm. Aufgeklappte Tetraederform (nach Eugster et al. 1980)

Abb. 4-6 (Herbert 2000) zeigt die genannten vier Dreiecke mit ihren invarianten Lösungen und Stabilitätsfeldern. Da die Stabilitätsfelder der meisten Minerale in den drei Ca-führenden Dreiecken zu klein sind, um richtig in Erscheinung zu treten, sind diese in den seitlich eingefügten kleineren Dreiecken als Prinzipskizzen getrennt dargestellt. Im Mg-SO₄-K₂-Dreieck sind mit durchgezogenen Linien die Begrenzungen der Stabilitätsfelder der Bodenkörper des quinären Randsystems Na-K-Mg-Cl-SO₄ und mit gestrichelten Linien die Begrenzungen der Stabilitätsfelder der Minerale des hexären Systems dargestellt. Die Stabilitätsfelder der Minerale des hexären Systems sind aus dem Tetraederraum auf die Ca-freie Grundfläche projiziert worden. Zur besseren Übersicht sind in Abb. 4-7 (Herbert 2000) die Grenzlinien der Stabilitätsfelder dieser Minerale farbig eingezeichnet. Mit den Punkten 1 bis 11 sind die invarianten Lösungen des hexären Systems auf das Basisdreieck eingezeichnet.



Legende: Punkte 1 – 11 = invariante Lösungen des hexären Systems
 Polyhalitfeld = blau, Syngenitfeld = rot, Glauberitfeld = grün

Abb. 4-7 Projektion des hexären Systems Na-K-Ca-Mg-Cl-SO₄ auf das Ca-freie quinäre System. 25°C-Isotherme bei 1 atm (nach Eugster et al. 1980)

Neben- und Spurenbestandteile

Eine Beziehung zwischen der Genese von salinaren Lösungen und deren Anteilen an Neben- und Spurenelementen ist im Wesentlichen bei Br und Li sowie untergeordnet bei Rb und Sr gegeben. Manchmal können auch Fe²⁺-Gehalte wertvolle Informationen zur Herkunft der Lösungen geben (s. Kapitel 8.2.2 bei Herbert (2000)). Andere Spurenelemente, z.B. auch Schwermetalle, spielen bei Routineuntersuchungen zur Klärung der Genese der Lösungen aus Kali- und Steinsalzwerken nur eine untergeordnete Rolle. Sie sind meist nur bei speziellen Fragestellungen von Bedeutung, z.B. bei der Untersuchung des Auslaugverhaltens von toxischen Schwermetallen aus Abfällen durch Salzlösungen. Untersuchungen zu den natürlichen Neben- und Spurenelementgehalten in Salzlösungen wurden beispielsweise von Kühn (1955, 1972), Herrmann (1961), Koch et al. (1968), Peters (1985) u. a. durchgeführt.

4.4 Isotopenzusammensetzung – Stabile Isotope des Wassers

Zur Klärung der Herkunft und Entstehung von Salzlösungen können die Verteilungen der Isotope ^{18}O , Deuterium und Tritium in der Wasserkomponente der Lösungen wichtige Beiträge leisten. Natürliche Wässer sind ein Gemisch von neun verschiedenen Wassermolekülen mit den stabilen Isotopen H, D, ^{16}O , ^{17}O und ^{18}O . Während der Verdunstung, während des Niederschlags und im Laufe der Wechselwirkungen Wasser/Gestein ändern sich die Verhältnisse dieser verschiedenen Moleküle. Ein Wasser der Zusammensetzung HH^{16}O hat z.B. einen höheren Dampfdruck als eins mit der Zusammensetzung HD^{16}O oder HH^{18}O , d.h. die Dampfdrücke der Wassermoleküle mit leichteren Isotopen sind höher als die mit schwereren Isotopen. Während der Verdunstung gehen die leichteren Moleküle bevorzugt in die Dampfphase. Im Zyklus des meteorischen Wassers gibt es wiederholte Verdunstungs- und Niederschlagsphasen, wodurch die Isotopenzusammensetzung natürlicher Wässer sehr variabel ist. Übersichten über die Isotopenfraktionierung des Wassers werden in den Arbeiten von Epstein (1959), Dansgaard (1964), Garlick (1974), Faure (1977) u.a. gegeben.

Wegen der geringeren Häufigkeit der schweren stabilen Isotope des Sauerstoffs und Wasserstoffs sind Wassermoleküle mit der Zusammensetzung HH^{16}O sehr viel häufiger als solche der Zusammensetzung HD^{16}O bzw. HH^{18}O . In Wasserproben werden üblicherweise die Verhältnisse D/H und $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ gemessen, weil darin die drei häufigsten Isotope des Wasserstoffs und Sauerstoffs enthalten sind, die auch am einfachsten zu messen sind. Liegen aus einer Wasserprobe die Verhältnisse HDO/HHO und $\text{HH}^{18}\text{O}/\text{HH}^{16}\text{O}$ vor, ist es möglich, rechnerisch die Verhältnisse der anderen Isotopen-Spezies der Wassermoleküle zu ermitteln.

Die Verhältnisse der stabilen Isotope werden nicht als Absolutwerte, sondern als prozentuale Massendifferenz der schwereren Isotope gegenüber einem willkürlich gewählten Standard angegeben. Mit speziellen Massenspektrometern ist es möglich, Unterschiede in den Isotopenverhältnissen mit hoher Präzision zu messen, während absolute Gehalte nicht so genau bestimmbar sind. Die $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ - und D/H-Verhältnisse werden daher in der δ -Schreibweise angegeben.

$$\delta(\text{‰}) = (R_{\text{Probe}} - R_{\text{Standard}}) / R_{\text{Standard}} \cdot 1000$$

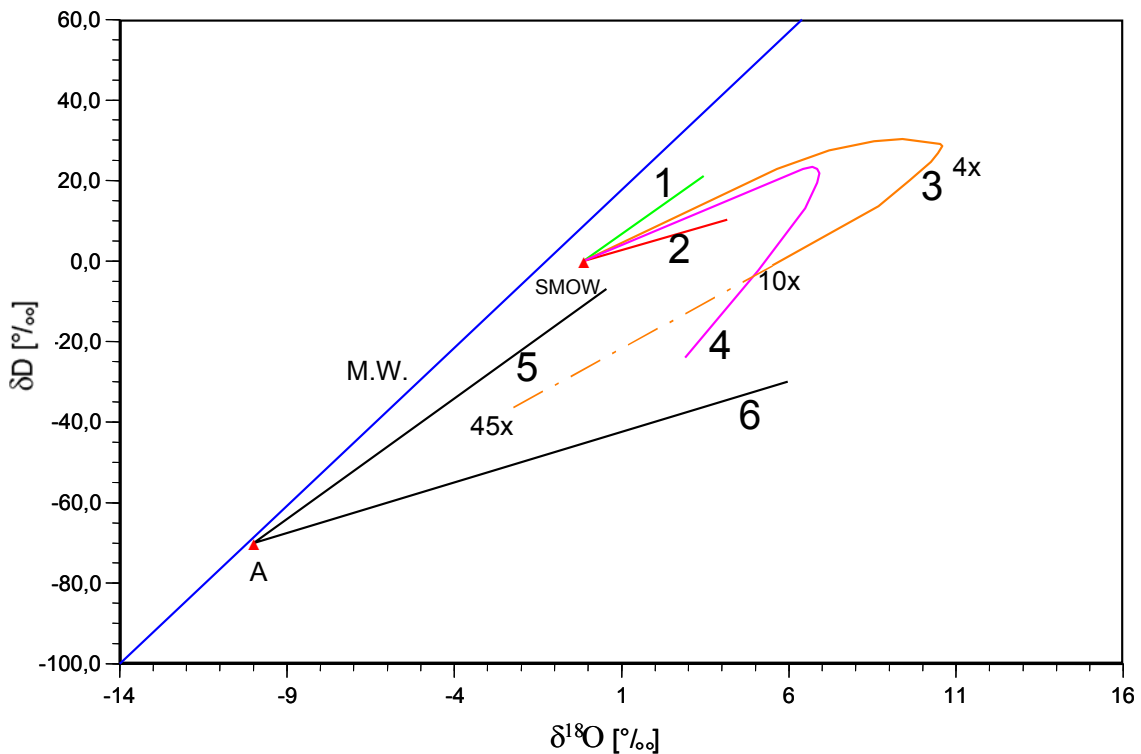
R steht für die Isotopenverhältnisse D/H oder $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. Als Standard wird der von Craig (1961a) definierte SMOW (standard mean ocean water) benutzt. Die Isotopenzusam-

mensetzung der Ozeane ist in einer ersten Näherung homogen und mit $\delta D = 0$ und $\delta^{18}O = 0$ festgesetzt. Hat z.B. ein Wasser einen $\delta^{18}O$ -Wert von 3 ‰ und einen δD -Wert von -10 ‰ heißt dies, dass das Wasser gegenüber dem SMOW-Standard um 3 ‰ an ^{18}O angereichert und um 10 ‰ an D abgereichert ist.

Meteorische Wässer zeigen eine starke Kovarianz der δD - und $\delta^{18}O$ -Werte. Aus der Auftragung der Isotopenzusammensetzungen meteorischer Wässer aus weltweiten Messungen in allen Klimazonen ins $\delta^{18}O/\delta D$ - Diagramm (Craig 1961b) ergibt sich die Meteorische Wasserlinie (s. Abb. 4-8). Meteorische Wässer, welche auf die Verdunstung von Meerwasser zurückgehen, sind gegenüber dem SMOW an ^{18}O und D abgereichert. Im allgemeinen gilt, dass mit größerer Entfernung vom Ozean das Klima kälter wird, wodurch die Niederschlagswässer auf der meteorischen Wasserlinie tiefer zu liegen kommen.

Auch bei der Eindunstung des Meerwassers zeigen die Isotope ^{18}O und D ein charakteristisches Verhalten. Während der frühen Phasen der Eindunstung werden bevorzugt die leichteren Isotope mit dem verdampfenden Wasser abgeführt, wodurch es zu einer Anreicherung der schwereren Isotope in der Restlösung kommt. Abb. 4-8 (Herbert 2000) zeigt die von verschiedenen Autoren angegebenen Kurvenverläufe bei der Eindunstung von Meerwasser und von meteorischem Wasser für verschiedene Luftfeuchtigkeiten. Die Meerwassereindunstungskurve 3 wurde von Holser (1979) und 4 von Pierre et al. (1984) bestimmt. Solche Kurven sind bei mittleren Luftfeuchtigkeiten zu erwarten. Die δ -Werte verändern sich im Anfangsstadium der Eindunstung zu positiven Werten. Nach Knauth und Beeunas (1985) gilt Linie 1 für hohe Luftfeuchtigkeiten (Meerwassereindunstung in Küstengebieten) und Linie 2 für niedrige Luftfeuchtigkeiten (Meerwassereindunstung in extrem aridem Klima).

Bei starker Eindunstung, über das Stadium der Halitausscheidung hinaus, ist die Isotopenfraktionierung nur lückenhaft bekannt. Experimentelle Untersuchungen von Gonfiantini (1965) und Sofer und Gatt (1975) sowie Analysen von natürlichen eingedunsteten Meeresswässern von Holser (1979) zeigen, dass bei der Meerwassereindunstung die progressive Anreicherung von schweren Isotopen in der Restlösung sich nur bis zu einer Eindunstungsrate von 4x fortsetzt, ab welcher sich die Kurve umkehrt (s. Abb. 4-8). Wu et al. (1984) bestätigen einen solchen Knick in der Eindunstungskurve und geben einen Abfall der $\delta^{18}O$ -Werte vom Beginn der Halitausscheidung bis zur Bischofitausscheidung von 19 ‰ an.



Linien 1 und 5 = Eindunstungsverläufe bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit, Linien 2 und 6 = bei niedriger relativer Luftfeuchte, 4x, 10x, 45x = Eindunstungsrate² – Meteorische Wasserlinie nach Craig (1961b), Eindunstungsverläufe 1,2,5 und 6 nach Knauth und Beeunas (1985), 3 nach Holser (1979) und 4 nach Pierre et al. (1984)

Abb. 4-8 $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ -Diagramm mit Meteorischer Wasserlinie (M.W.), dem SMOW-Standard, einem meteorischen Wasser der Zusammensetzung A sowie unterschiedlichen Eindunstungsverläufen des Meerwassers (1,2,3,4) und eines meteorischen Wassers (5,6) (nach Herbert 2000).

Während der Verdunstung steigt die Menge des Wassers, welches in den Hydratsphären um die Kationen gebunden ist. Der Isotopenaustausch zwischen diesem Wasser, dem freien Wasser, dem verdampfenden Wasser und dem Wasser in der Luftfeuchtigkeit wird als Ursache für den Knick in der Eindunstungskurve des Meerwassers angesehen. Die Form des Knicks ist wahrscheinlich abhängig von der lokalen relativen Luftfeuchtigkeit, der Temperatur, der Windgeschwindigkeit und anderen klimatischen Bedingungen (Holser 1979). Die Halitausscheidung beginnt bei einer Eindunstungsrate von ca. 11x und hält bis 45x an. Die Eindunstungskurve von Holser (1979) wurde durch ^{18}O und D-Messungen von Knauth und Beeunas (1985) an primären Flüssigkeitsein-

² Eindunstungsrate = Gewicht des Wassers im Original-Meerwasser geteilt durch das Gewicht des Wassers in der Restlösung

schlüssen (sogen. chevron type fluid inclusions) im permischen Steinsalz des Palo Duro Basin/Texas bestätigt und um den gestrichelten Verlauf der Kurve 3 in Abb. 4-8 verlängert.

Zur Untersuchung der Herkunft der Lösungen in Salzformationen mittels stabiler Isotope werden die δ -Werte des Wassers dieser Lösungen bestimmt und mit den verschiedenen möglichen Bereichen für Wässer unterschiedlicher Herkunft verglichen. Liegt z.B. die Isotopenzusammensetzung von Flüssigkeitseinschlüssen aus einem Salzvorkommen auf der meteorischen Wasserlinie, ist das ein Hinweis darauf, dass das eingeschlossene Wasser meteorischen Ursprungs sein könnte. Liegen die darstellenden Punkte der Flüssigkeitseinschlüsse im Bereich eingedunsteter Meereswässer, ist das ein starkes Argument dafür, dass möglicherweise Meerwasser bei der Halitaausscheidung im Steinsalz eingeschlossen wurde.

Diagramme, die eine eindeutige Unterscheidung eingedunsteter Meereswässer von Mischwässern oder Metamorphoselösungen ermöglichen, hat Knauth (1988) veröffentlicht. Aus Literaturdaten hat Knauth einen Zusammenhang zwischen dem Chemismus der Lösungen in unterschiedlichen Eindunstungsstadien des Meerwassers und der sich dabei einstellenden Isotopenzusammensetzung erkannt. Die Zusammenhänge zwischen den Na-, Cl- und Br-Gehalten einerseits und dem D-Gehalt der eindunstenden Meereswässer andererseits sind in Abb. 4-9 dargestellt. Die Diagramme beruhen auf Analysen von Meerwasserproben unterschiedlichen Eindunstungsgrades aus den Eindunstungsbecken Ojo de Liebre und Salina Ometepec an den Küsten der Halbinsel Baja California/Mexiko. Isotopenzusammensetzungen, die in allen drei Diagrammen innerhalb der Bandbreite der eingezeichneten Eindunstungspfade liegen, können mit ziemlicher Sicherheit als Meereswässer angesprochen werden. Aus den Diagrammen lässt sich zudem das Eindunstungsstadium ermitteln. Wässer, die außerhalb der Eindunstungspfade liegen, haben eine andere Herkunft.

Die Unterscheidung von Salzlösungen unterschiedlicher Herkunft mit entsprechend unterschiedlichem Gefährdungspotential anhand der stabilen Isotopenzusammensetzungen hatte vor allem im Salzbergbau der ehemaligen DDR Tradition. 1982 veröffentlichten Schmiedl et al. ein Diagramm (Abb. 4-10), in dem Felder mit Wässern unterschiedlicher Herkunft eingezeichnet sind.

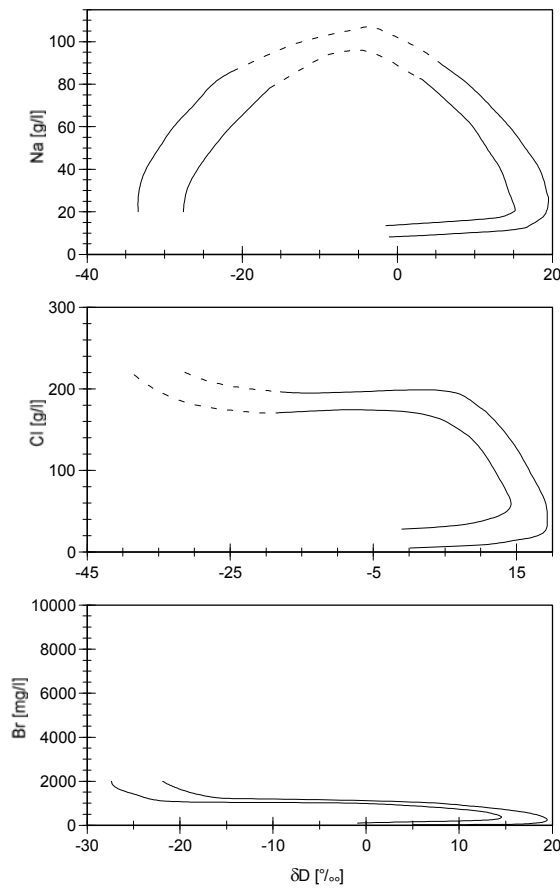
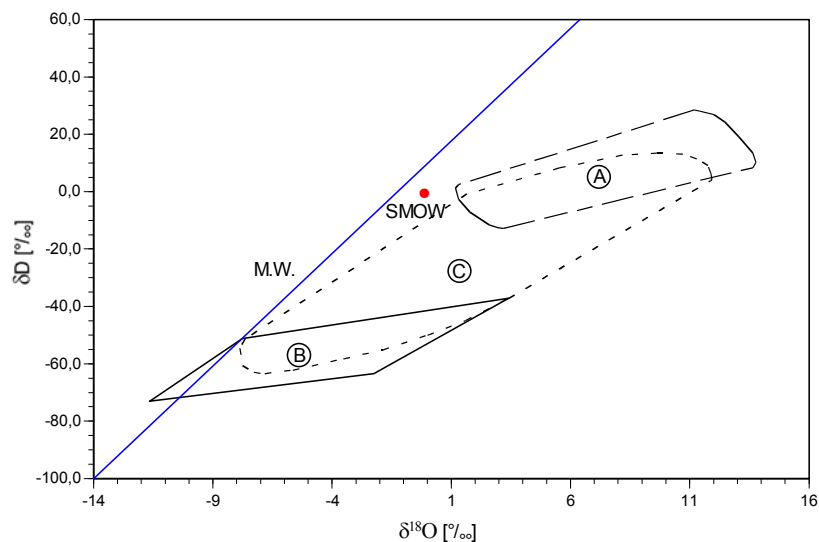


Abb. 4-9 Der Eindunstungspfad des Meerwassers - Zusammenhänge zwischen chemischer Zusammensetzung und Isotopenzusammensetzung der Lösungen (aus Knauth 1988).



A= Meerwasser und saline Reliktlösungen, B = meteorische Infiltrationswässer und Lösungen, C = Mischlösungen (nach Herbert 2000).

Abb. 4-10 Diagramm zur qualitativen Bewertung von Salzlösungsvorkommen anhand von δD und $\delta^{18}O$ -Analysen (nach Schmiedl et al. 1982 mit Ergänzungen).

Die eigenen Isotopenuntersuchungen (in Nishri et al. 1988 und Herbert 2000) zeigen, dass das Diagramm von Schmiedl et al. (1982) für den praktischen Gebrauch gut geeignet ist. In Abb. 4-11 sind die Isotopenzusammensetzungen von Salzlösungen unterschiedlicher Herkunft, Zusammensetzung und Genese aus dem Salzbergwerk Asse, dem Deckgebirge der Asse und einer Schachtanlage aus Norddeutschland zusammengestellt. Die Daten stammen von Metamorphoselösungen, von Misch- und Deckgebirgslösungen, von Gipshut-, Grund- und Niederschlagswässern, sowie von technischen Lösungen. Die Daten sind in Abb. 4-11 vor dem Hintergrund der von Schmiedl et al. definierten Felder sowie der Meerwassereindunstungspfade von Holser (1979) und Pierre et al. (1984) dargestellt.

Aus Abb. 4-11 wird deutlich, dass sich Salzlösungen unterschiedlicher Herkunft anhand der stabilen Isotope des Wassers gut unterscheiden lassen.

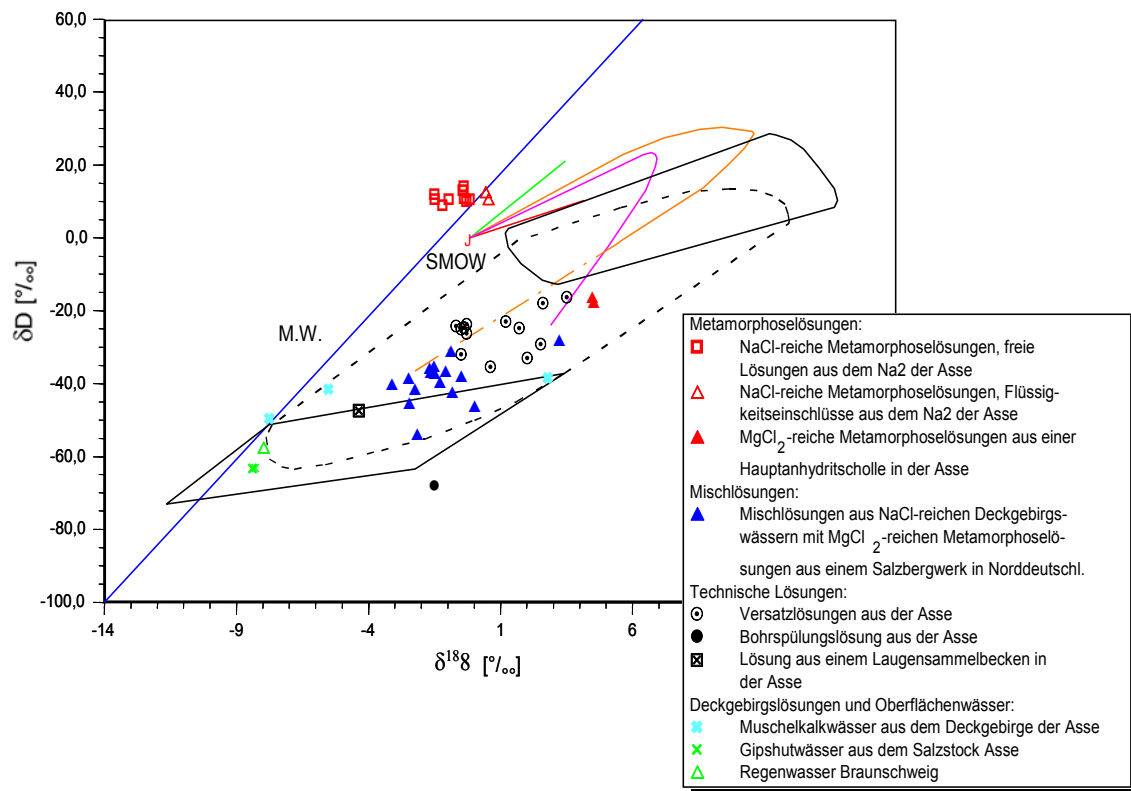


Abb. 4-11 Untersuchungsergebnisse von Salzlösungen unterschiedlicher Herkunft und Entstehung im δD und $\delta^{18}O$ -Diagramm (nach Herbert 2000)

Für die Beurteilung der Salzlösungen sind unter bestimmten Bedingungen weiterhin Tritium und das Kohlenstoffisotop ^{14}C von Bedeutung. Der Nachweis des dreiwertigen Wasserstoffisotops Tritium T in Salzlösungen kann ein Hinweis auf einen Zufluss von „rezentem“ Wasser sein. Die geringe Halbwertszeit (12,3 Jahre) und die stattgefundenen Kernwaffentests schränken seine Brauchbarkeit jedoch ein.

Das radiogene Kohlenstoffisotop ^{14}C gelangt als H_2CO_3 oder CO_2 in den Grundwasserkreislauf. Auf Grund seiner Halbwertszeit von 5730 Jahren ist es möglich, ^{14}C zur Datierung von Lösungen mit einem Alter von 1000 bis 50000 Jahren heranzuziehen. Auch hier haben Kernwaffentests auf die natürliche Ausgangslage Einfluss genommen.

Zur Identifizierung einer Zuflusslösung als Infiltrationslösung oder Reliktlösung wurde in der mitteldeutschen Kaliindustrie ein auf das Element Brom ausgerichtetes Verfahren entwickelt (Abb. 4-12). Man bestimmt den Gehalt der Lösung an Br, NaCl, KCl, MgCl_2 und CaCl_2 , ferner den Bromgehalt der in der Grube anstehenden Minerale Halit, Sylvin und Carnallit. Die Bestimmung erfolgt letztlich über das Diagramm Abb. 4-12 rechts unten.

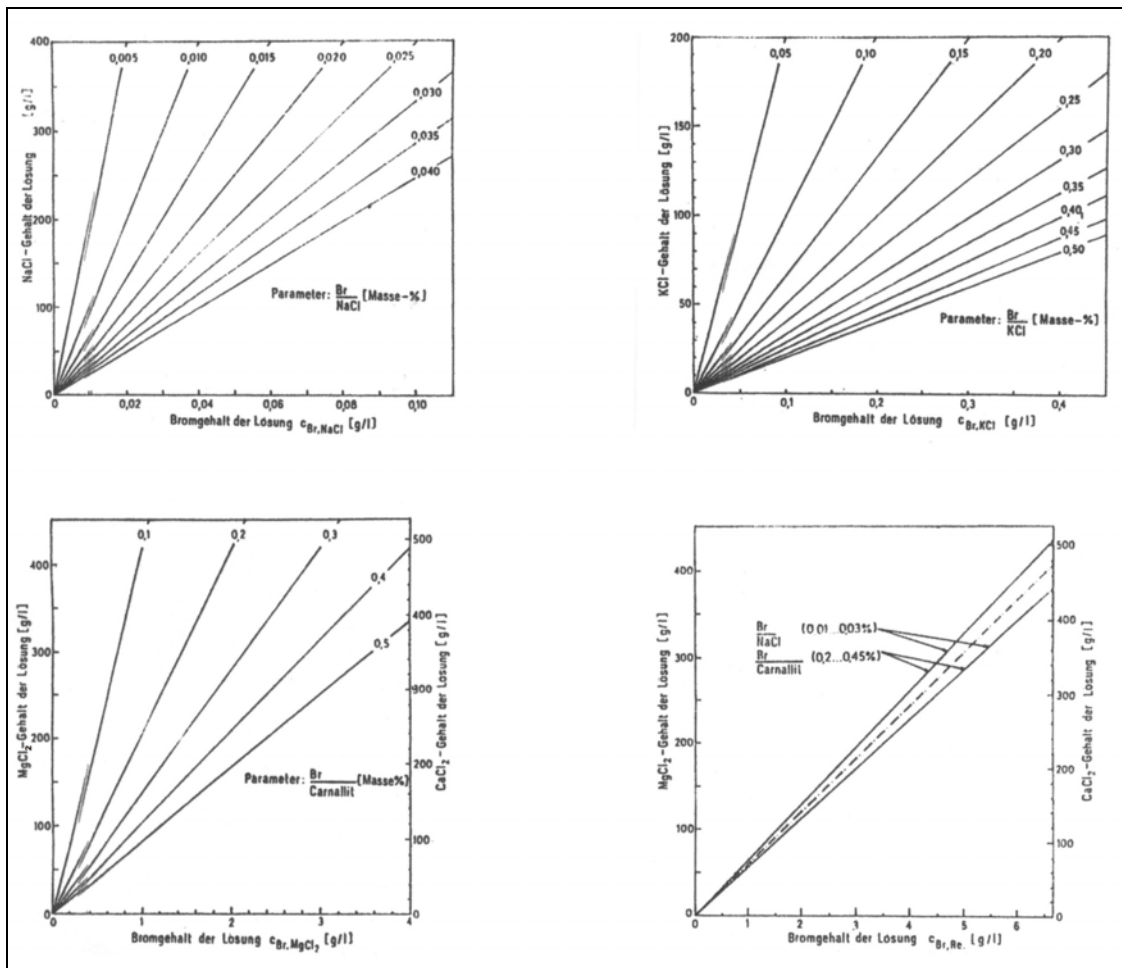


Abb. 4-12 Diagramme zur Ermittlung des Bromhaltes (nach Schmiedl et al. 1982)

4.5 Teufenabhängigkeit des Lösungschemismus und der Zuflussmenge

Der Zusammenhang zwischen der Teufenlage der Salzlösungsaustritte und ihrem Chemismus sowie ihrer Dichte und der Zuflussmengen ist in zahlreichen Gruben nachgewiesen. Nachfolgend werden einige Beispiele diskutiert.

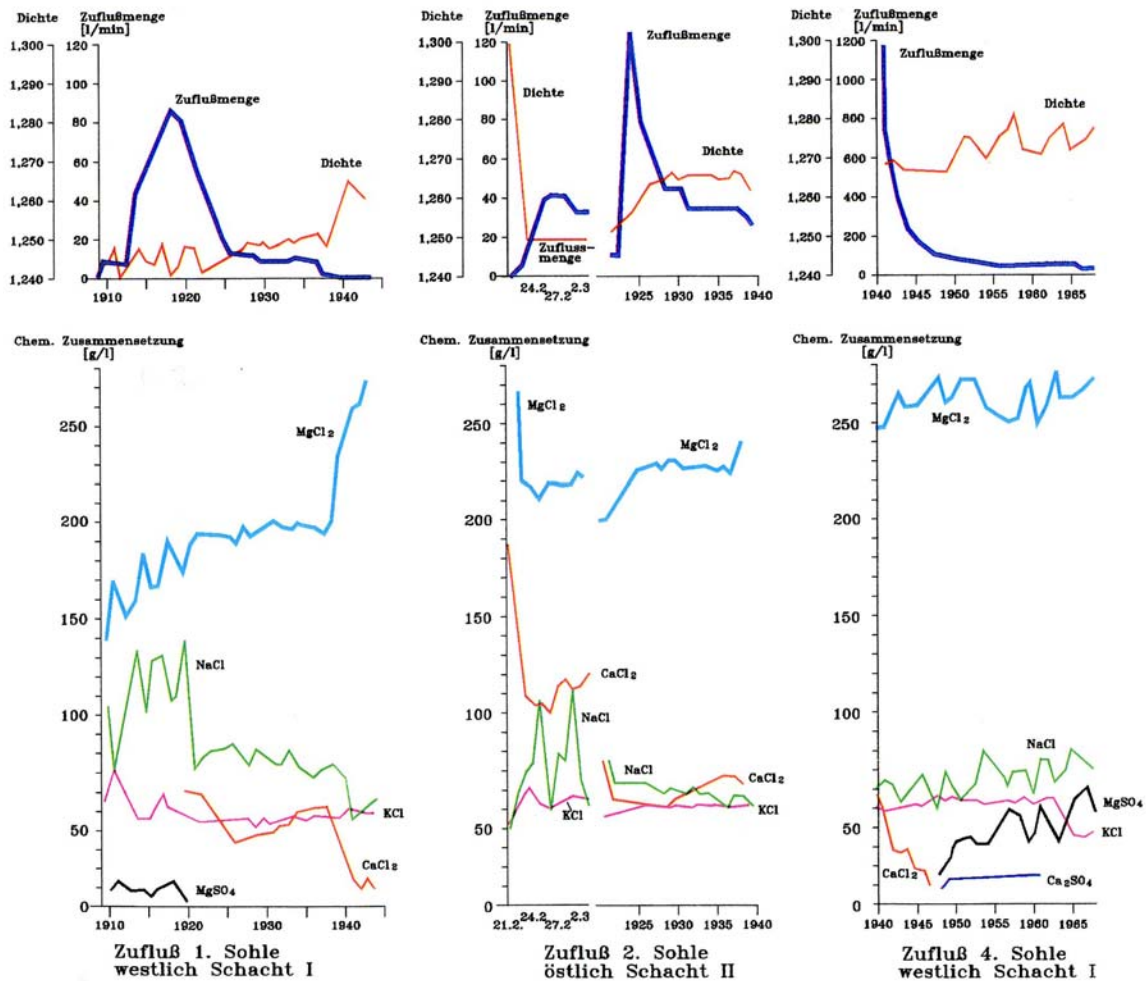


Abb. 4-13 Entwicklung der Zuflussmenge, Dichte und chemischen Zusammensetzung der Salzlösungsaustritte 1., 2. und 4. Sohle (DB 01, DB 02 und DB 03) im Grubenfeld Roßleben (nach Schwandt 1978)

Die in der Grube Roßleben von der 1. bis zur 4. Sohle beobachtete Zunahme der Dichte und der $MgCl_2/CaCl_2$ -Gehalte sind durch mehr als 500 chemische Analysen belegt (Abb. 4-13). Die Zutritte kommen aus dem Hauptanhydrit, wo sie gespeichert waren. Nach der Teufe ist eine Zunahme der Dichte und folglich des $MgCl_2$ - Gehaltes nachweisbar.

In Abb. 4-14 ist die zeitliche Entwicklung eines Zuflusses und seines Chemismus bei Verlagerung der Austrittsstelle der Salzlösungen im Hauptanhydrit der Grube Neustaßfurt VI/VII dargestellt. Die neue, rund 100 m tiefer gelegene zweite Austrittsstelle weist eine markante Zunahme der Dichte und des $MgCl_2$ -Gehalts auf und bestätigt eine Schichtung nach der Schwere. Derartige Beispiele sind aus zahlreichen weiteren Gruben bekannt.

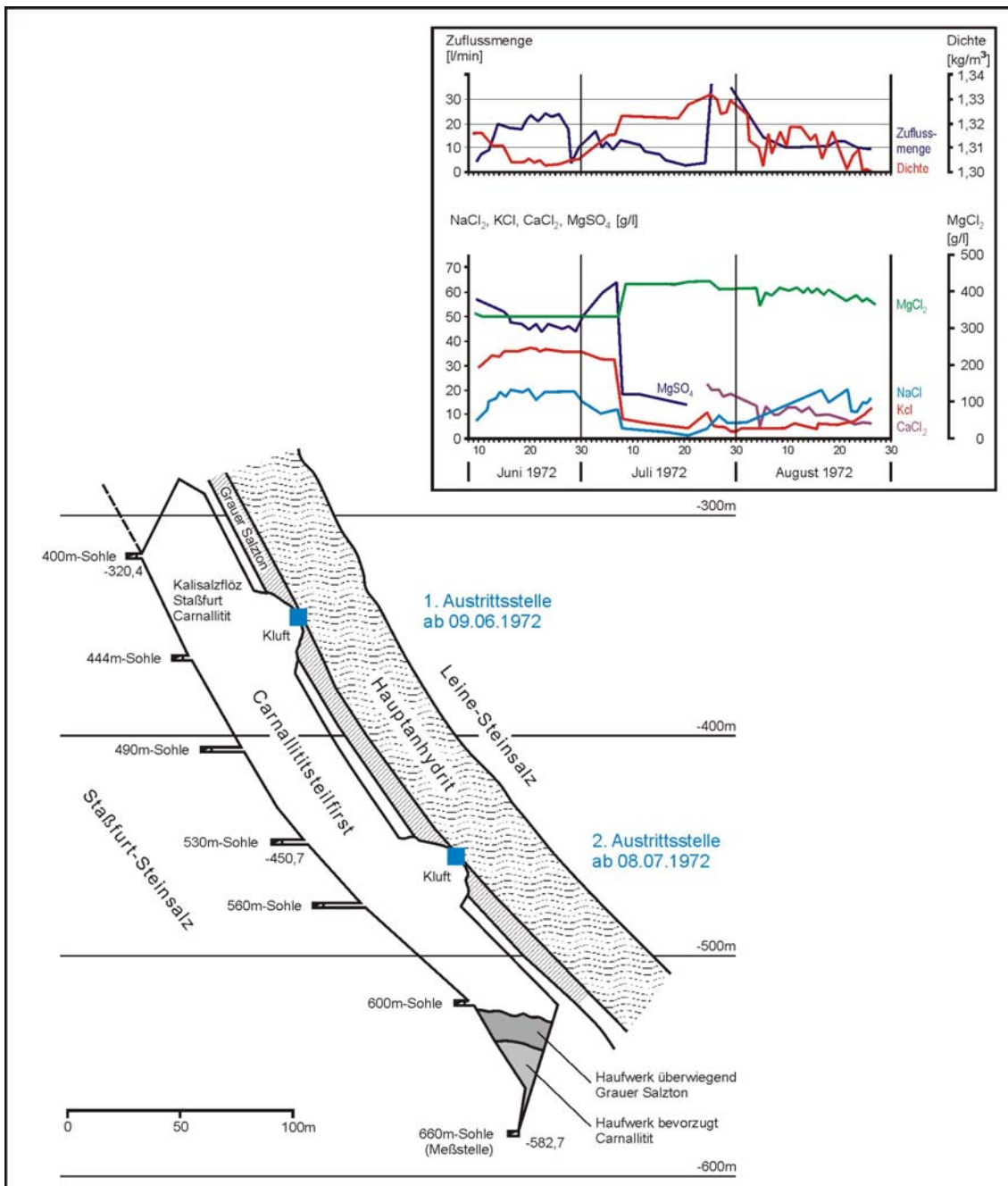


Abb. 4-14 Geologischer Schnitt mit Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Zuflussmenge und Dichte sowie der chemischen Zusammensetzung der Salzlösungen; Austrittsstelle 400 – 444 / 12, Grube Neustaßfurt VI/VII (nach Schwandt 1991a)

Der bestehende generelle Zusammenhang zwischen Teufe und Dichte sowie MgCl_2 -Gehalt an den Salzlösungsaustritten an der NE-Flanke des Staßfurter Sattels ist aus (Abb. 4-15) zu ersehen.

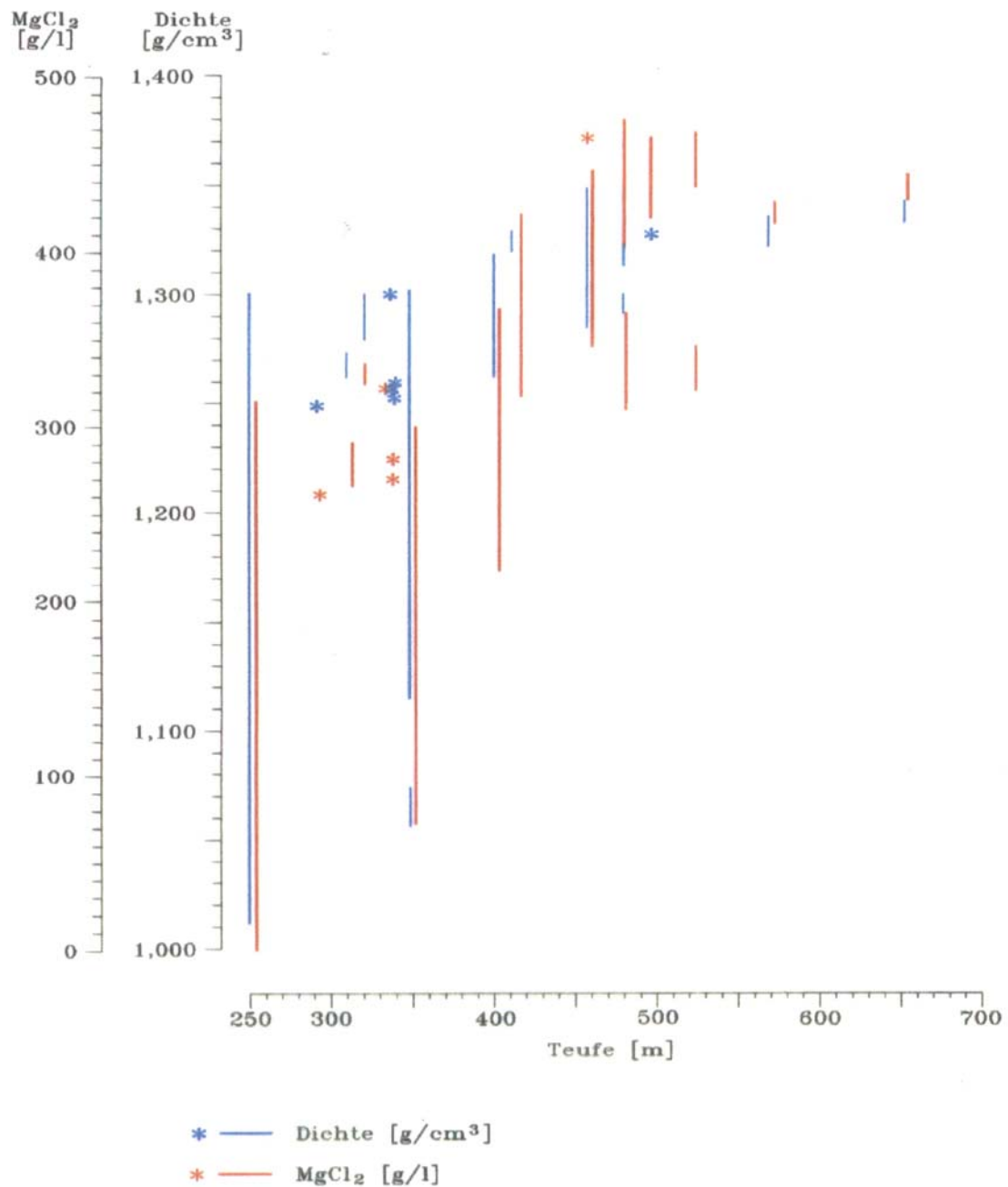


Abb. 4-15 Zusammenhänge zwischen Teufe und Schwankungsbreite der Dichte sowie des MgCl_2 -Gehalts der Salzlösungszutritte aus dem Hauptanhydrit in den Gruben an der NE-Flanke des Staßfurter Sattels (nach Schwandt et al. 1991)

Die Gesamtmineralisation der Salze und damit ihre Dichtewerte weisen eine Abhängigkeit von der Zutrittsteufe auf. Die Zutritte in geringerer Teufe als 400 m waren generell durch Dichten unter $1,3 \text{ g/cm}^3$ charakterisiert. Die Gesamtmineralisation nimmt mit der Teufe stetig zu, dagegen die Schwankungsbreite und der MgCl_2 -Gehalt $> 450 \text{ m}$ Teufe ab.

Derartige Zusammenhänge zwischen Teufe und Schwankungsbreite der Dichte sowie MgCl_2 -Gehalt sind durch Schwandt (1978) auch im Abbaubereich Aschersleben-Schierstedt beobachtet worden:

Die beim Chemismus bestehende Teufenabhängigkeit ist auch bei den beobachteten Schüttungsmengen nachvollziehbar (Abb. 4-16).

Im Saale-Unstrut- und Nordharz-Kaligebiet sind die Lösungszutritte überwiegend in Teufenbereichen oberhalb 500 m beobachtet worden. Die meisten Zuflussstellen und die größten Austrittsmengen mit Zuflussraten über 100 l/min und Gesamtmengen von über 1 Million m^3 liegen in diesem Bereich. Unterhalb 500 m lagen die Zuflussraten stets unter 50 l/min und die Gesamtzuflussmengen unter 0,1 Millionen m^3 . In bergmännischen Aufschlüssen unterhalb 700 m sind nur Tropfstellen nachgewiesen worden. Grubenbaue unterhalb 800 m Teufe waren Zuflussfrei. Dieser Zusammenhang wird besonders deutlich bei Darstellung des Parameters „Zuflussmenge in Liter pro Quadratmeter bergmännisch aufgeschlossener Fläche“ (l/m^2). Auf 100 bis 200 m Teufendifferenz verändert sich dieser um 1 bis 2 Zehnerpotenzen.

Die 30 registrierten Salzlösungszuflüsse in den Gruben an der NE-Flanke des Staßfurter Sattels lassen gleichfalls eine klare Beziehung zur Teufe ihres Auftretens erkennen. Die größten Schüttungsmengen sind durch einen Zufluss verursacht, der oberhalb 300 m Teufe in die Grubenbaue eintrat. Er repräsentiert mehr als 75 % der Gesamtzuflussmenge und bewirkte letztlich die Aufgabe der Grube Friedrichshall I/II. Nach der Teufe ist eine kontinuierliche Abnahme der Zuflussmengen zu beobachten. Im Teufeintervall 600–700 m traten nur noch ca. 100 m^3 Salzlösungen in die Grubenbaue ein. Diese Ergebnisse weisen eine gute Übereinstimmung mit den Untersuchungen von Schwandt (1969) an über 100 Zuflüssen im Saale-Unstrut- und Nordharz-Kaligebiet auf. Bei einem direkten Vergleich sind hier die unterschiedlichen Mengenangaben (l/m^2 aufgeschlossener Fläche bzw. m^3) zu beachten. Eine Übertragung dieser Aussagen auf andere Abbaugelände mit Zechsteinausbildung ist im Zusammenhang mit einer vergleichenden Betrachtung der geologisch-hydrogeologischen und geomechanischen Kriterien zulässig.

Nahezu alle dokumentierten Salzlösungsaustritte im Saale-Unstrut- und Nordharz-Kalirevier waren – wie am Beispiel der Nordostflanke des Staßfurter Hauptsattels aufgezeigt – an den Hauptanhydrit gebunden (Abb. 4-17).

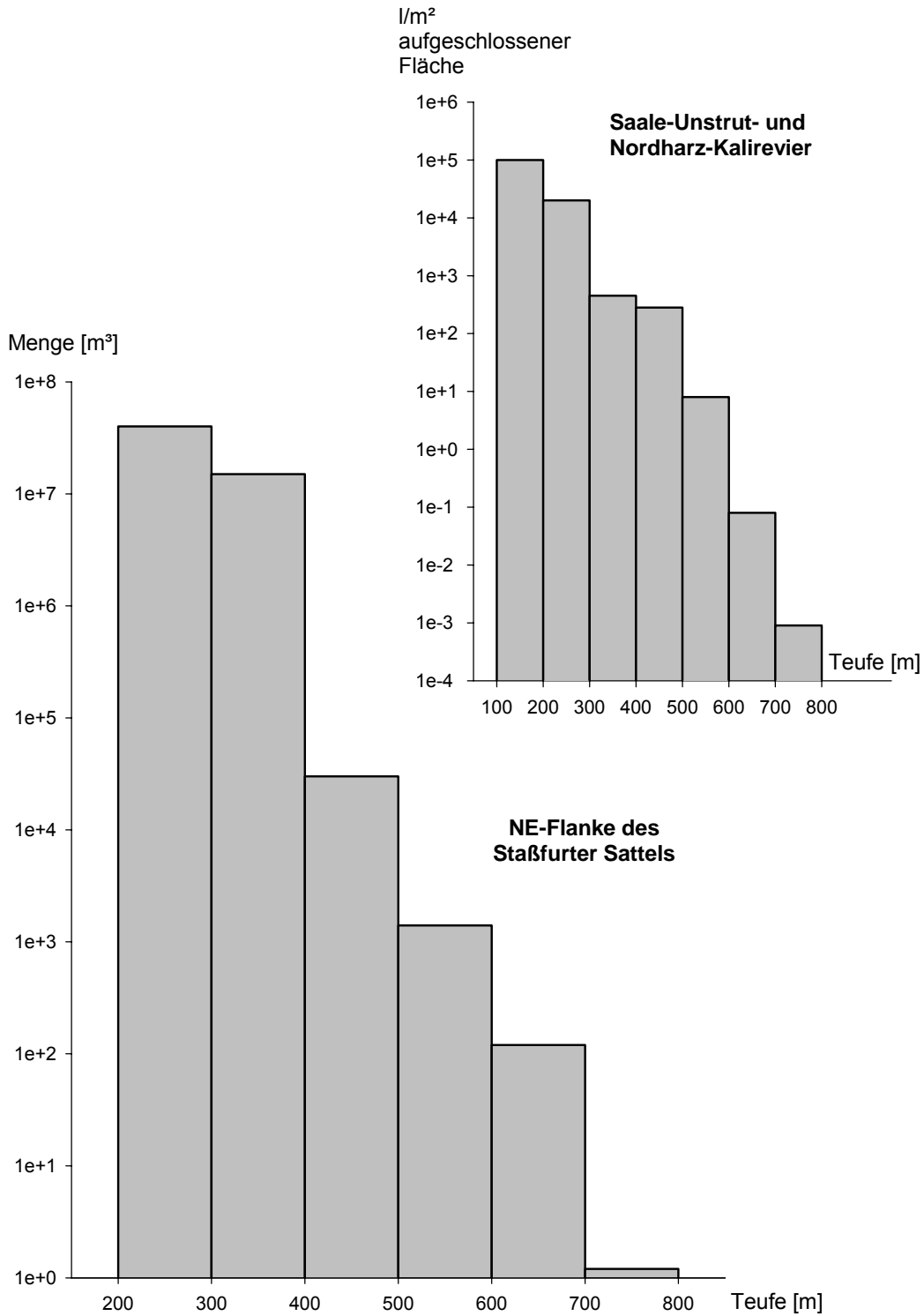


Abb. 4-16 Zusammenhänge zwischen Teufe und Gesamtzuflussmenge der Salzlösungen in den Gruben an der NE-Flanke des Staßfurter Sattels mit vergleichsweiser Darstellung für das Saale-Unstrut- und Nordharz-Kalirevier

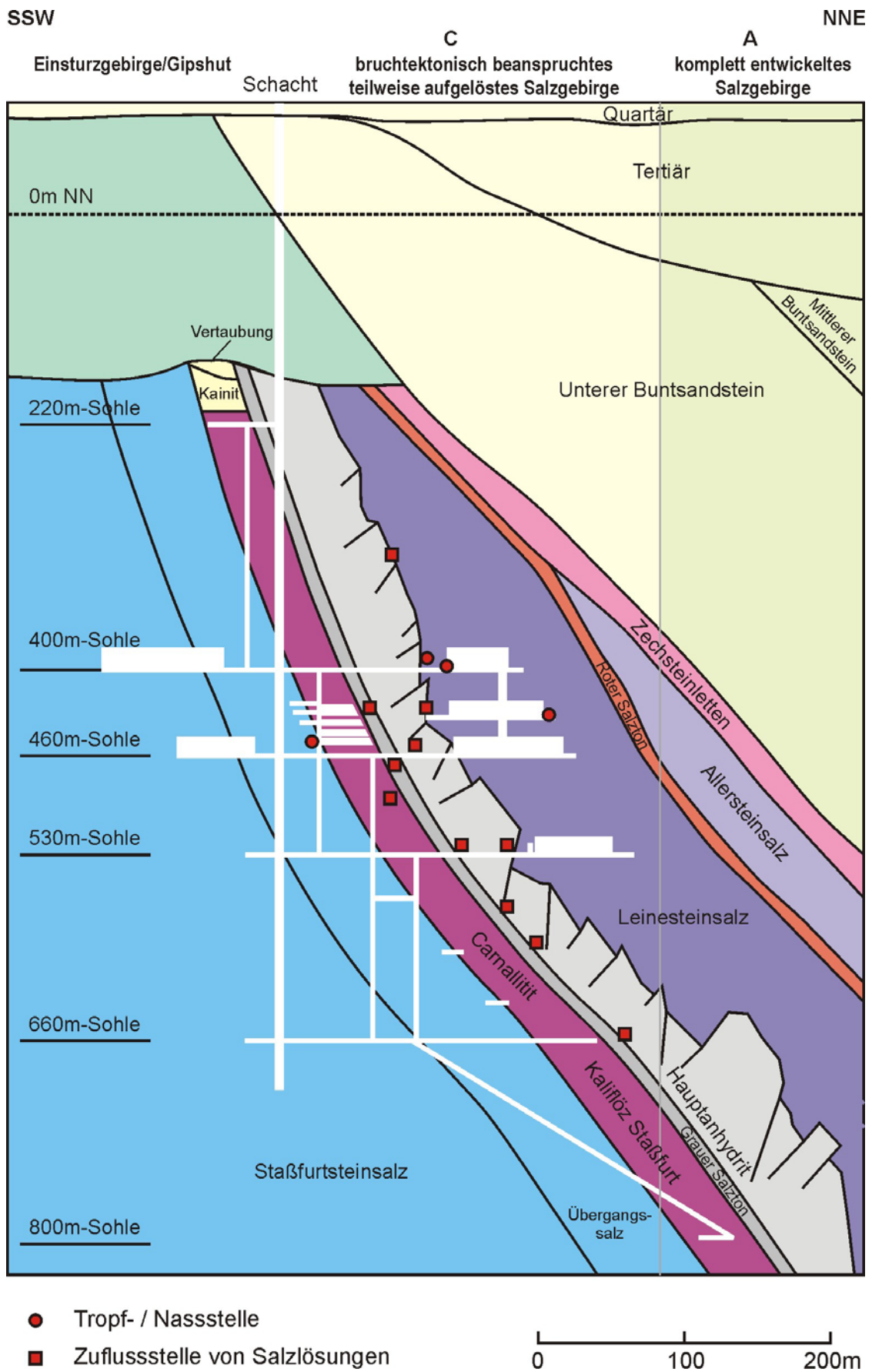


Abb. 4-17 Geologische Position der Salzlösungsvorkommen an der NE-Flanke des Staßfurter Sattels

4.6 Zur Kalisalzverbreitung und chemischen Zusammensetzung der Salzlösungen im Untersuchungsgebiet

Mit den in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts durchgeführten Erkundungsarbeiten konnte eine Hartsalzverbreitung etwa parallel zum Zechsteinrand nachgewiesen werden. Der rund 0,5 – 40 km breite Hartsalzsaum grenzt zum Beckeninnern an Carnallitit und zum Beckenrand an Vertaubungen (Abb. 3-1 und Abb. 3-2). Im Liegenden der Vertaubungszonen sind im Bereich des Staßfurtsteinsalzes oft mächtige Anhydritlagen nachweisbar. Diese dokumentieren den Beckenrand. Unterhalb der Anhydrite liegen Stinkschiefer und/oder Hauptdolomit. Vor allem der Hauptdolomit führt in der Regel Lösungen mit ca. 100 g/l CaCl_2 . Nach dem Eintreten ins Kalilager reduzieren sich diese Gehalte.

Die CaCl_2 -Gehalte der Salzlösungsaustritte verteilen sich im Wesentlichen auf das westliche Südharz-Kaligebiet sowie auf den Raum Saale–Unstrut, und mit Einschränkungen auch auf das Nordharz-Kalirevier. Nahezu alle Salzlösungsaustritte im westlichen Südharz-Kalirevier führten bzw. führen CaCl_2 . Die Lösungszutritte gelangten über Klüfte aus dem Hauptdolomit über das Staßfurtsteinsalz in die im Kalisalzflöz aufgefahrenen Grubenräume.

Bei mehr als 50% der Salzlösungsvorkommen im Saale-Unstrut-Kaligebiet sind erhebliche CaCl_2 -Gehalte bestimmt worden. In diesem Gebiet gehen die CaCl_2 -Gehalte nicht auf den Hauptdolomit zurück, sondern auf das Einwirken von MgCl_2 -reichen Salzlösungen auf den dolomitischen Teil des Grauen Salztone. Die im Nordharz-Kaligebiet nachgewiesenen Salzlösungen mit CaCl_2 -Gehalten verteilten sich auf einzelne Vorkommen am Staßfurter- und Bernburger-Sattel sowie im Allertalgraben. Im Raum Teutschenthaler Sattel und im Mittelteil des Staßfurter Sattels weisen die Carnallitite Tachhydrit auf. Entsprechend treten auch in den dort zutretenden Lösungen CaCl_2 -Gehalte auf. Jedoch sind, wie schon gezeigt, Lösungen mit CaCl_2 sehr viel weiter verbreitet, als das Verbreitungsgebiet des Tachhydrits.

Eine Abnahme der MgCl_2 -Gehalte der Lösungen ist generell von Norden nach Süden zu verzeichnen.

Die bei den CaCl_2 -Werten festgestellten Zusammenhänge zwischen Zechsteinrand und Zechsteinbecken sind auch bei den MgCl_2 -Werten nachweisbar. Der nördlichste Teil des Untersuchungsgebietes liegt im Zentrum des Zechsteinbeckens. Hier treten Carnallitite z. T. auch mit Bischofit- und Tachhydrit-Gehalten mit den höchsten MgCl_2 -

Gehalten in den Lösungen auf. Mit zunehmender Annäherung an den Beckenrand gehen die Carnallitite über in Mischsalze (Carnallitit + Hartsalz), Hartsalze (kieseritisches Hartsalz, sylvinitisches Hartsalz, anhydritisches Hartsalz) und schließlich in Vertaubungen. In der gleichen Reihenfolge fallen die MgCl_2 -Gehalte der zutretenden Lösungen ab.

5 Erfassung der Analysenergebnisse der Salzlösungs- vorkommen

5.1 Erfassung und Dokumentation

Erfasst wurden Analysenergebnisse bis 1989. Die Prämissen zur Erfassung und Dokumentation der Analysenergebnisse sind in diesem Bericht vollständig bei den vorgegebenen Teilzielen und Arbeitspaketen im Kapitel 2.2 „Bearbeitungsmethodik“ genannt und komplett berücksichtigt.

Die in den FuE-Bericht aufgenommenen Analysenergebnisse verteilen sich ungleichmäßig auf die mitteldeutschen Kalibergwerke. Die vollständigsten Dokumentationen liegen von den Bergwerken Aschersleben, Solvayhall und Roßleben vor. Lückenhafte Angaben dagegen sind von den Bergwerken am Staßfurter Sattel, im Raum des Teutschenthaler Sattels und der Mansfelder Mulde erfasst. Bei diesen Analysen ist teilweise die Zuordnung zu bestimmten Zuflussbereichen problematisch.

In die Datenbank und zur weiteren Auswertung wurden nur solche Analysenergebnisse aufgenommen,

- die eindeutig einem bestimmten Zufluss zugeordnet werden können und für
- die sich während der Beobachtungszeit die Randbedingungen der Probenahme nicht geändert haben. Ausgeschlossen wurden deshalb Standlaugen, Proben aus Sammelbecken, Spülversatzlösungen, durch technische Aktivitäten veränderte Salzlösungen, Proben aus Zuflüssen mit geringen Schüttungsraten ($< 0,1$ l/min) und Flutungslösungen.

Zur Dokumentation der zu jeder Analyse bestimmten Einzelkomponenten, berechneten Werte und speziellen Angaben wurde ein neues Analysenformular entwickelt. Es lässt auf insgesamt 3 DIN A4-Seiten eine übersichtliche Erfassung von 39 Analysen mit max. 42 spezifischen Einzelangaben je Analyse zu. Damit werden gleichzeitig 99,9 % der Analysenwerte erfasst. Nicht berücksichtigt sind Einzelangaben von SO_3 , HPO_4 , Na_2SO_4 und K_2SO_4 .

In die 3 neuen DIN A4-Blätter können folgende Angaben eingefügt werden:

- LNr., Bezeichnung, Datum der Probennahme, geologische Position
- Dichte [kg/l], pH, Karb.-H [°dH], HCO₃ [mval/l]
- Na, K, Ca, Mg, Cl, Br, alle in [g/l]
- CO₃ [mval/l], SO₄ [g/l]
- MgCl₂, NaCl, KCl, CaCl₂, MgSO₄, CaSO₄, H₂O alle [g/l]
- Fe III, Fe II, B, J, Li, Sr, Rb, Ba, Cu, Zn, Mn, Hg, NH₄, NO₃, Öl, H₂S alle in [mg/l]
- T[TE], delta-D, delta-¹⁸O beide in [‰].

5.2 Plausibilitätsprüfung der Analysen

Das insgesamt verfügbare Datenmaterial umfasst 5901 Analysen unterschiedlicher Aussagekraft (Anhang 2). Es gibt dabei auch einige Analysen, die unvollständig sind.

Bei der Mehrzahl der Analysen liegen die Ergebnisse in Form der fiktiven Salze MgCl₂, NaCl, KCl, CaCl₂, MgSO₄ und CaSO₄ in g/l vor. Für die gleichen Proben werden manchmal zusätzlich einzelne Ionenkonzentrationen z.B. Mg²⁺ und Cl⁻ in g/l angegeben. Berechnet man aus den angegebenen Salzkonzentrationen die Ionenkonzentrationen, ist in der Regel wenig Übereinstimmung mit den angegebenen (gemessenen) Ionenkonzentrationen festzustellen. Dies ist in Abb. 5-1 am Beispiel der Probennahmestelle DB 01 dargestellt. Gemessen werden Ionenkonzentrationen, und nicht Salzkonzentrationen, d.h. die Mehrzahl der Analysen gibt nicht gemessene, sondern umgerechnete Werte an. Es stellt sich die Frage, wie belastbar die Analysen für derartige Betrachtungen sind.

Für 5751 Analysen werden fiktive Salzgehalte mitgeteilt, 80 % davon jedoch ohne Angaben zu Ca-Salzen. Bei 756 Analysen werden nur der MgCl₂-Gehalt und teilweise einzelne Ionen angegeben.

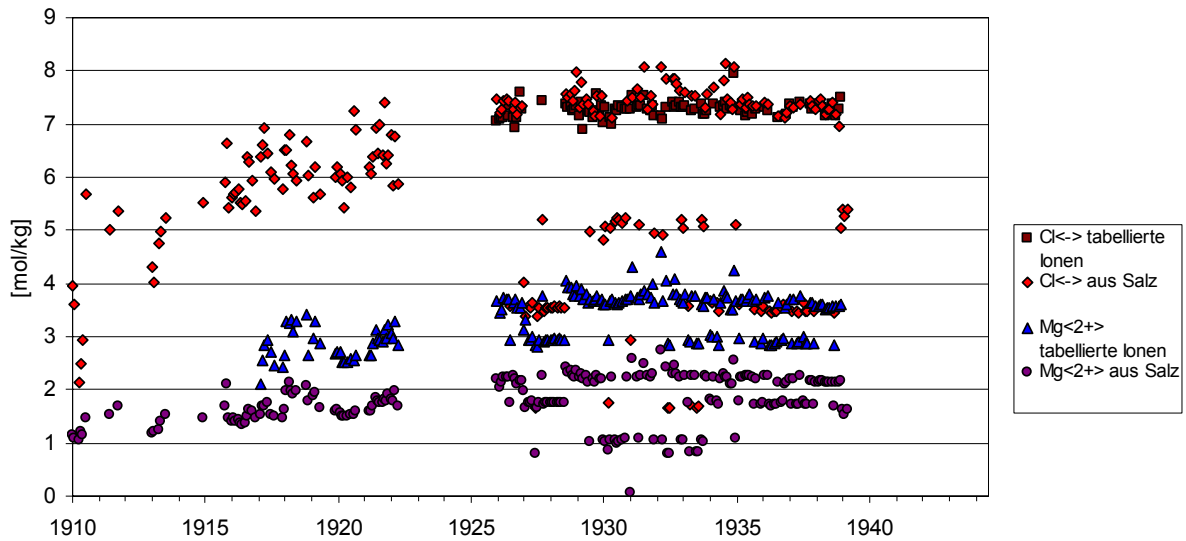


Abb. 5-1 Probennahmestelle DB 01: Vergleich der angegebenen Ionengehalte mit den aus den Salzgehalten berechneten Werten

Zu 105 Proben werden keine Angaben gemacht bzw. es ist nur ein einziges Ion angegeben. Bei 24 Proben sind zwar mehrere Ionen angegeben, jedoch liegt hier der Ladungsbilanzfehler über 10 %, so dass von einer unvollständigen Analyse ausgegangen werden muss. Bei 21 Proben liegt der Ladungsbilanzfehler deutlich unter 5 % und lässt sich leicht mit fehlenden Angaben zu Nebenbestandteilen erklären.

Zu den Neben- und Spurenbestandteilen liegen nur vereinzelt Angaben vor. So gibt es beispielsweise zu Br 699 Einzelwerte, zu Fe 390, zu B 374 zu Li 309 und zu Sr 286.

Bei 2504 Analysen wird zusätzlich zum fiktiven Salzgehalt auch noch ein Cl^- -Wert angegeben, der im Gegensatz zu den Mg^{2+} -Gehalten zu den Salzgehalten passt.

5.2.1 Magnesium-Gehalte

Bei 1422 Analysen mit den Bezeichnungen DB 01 bis DB 19 sind sowohl Mg^{2+} als auch die Salzgehalte von MgCl_2 und ggf. MgSO_4 angegeben. Berechnet man für diese Analysen mit den angegebenen Mg^{2+} -Gehalten den Ladungsbilanzfehler gemäß [1]

$$\text{Ladungsbilanzfehler [\%]} = \frac{\left| \sum eq^+ - \sum eq^- \right|}{\sum eq^+ + \sum eq^-} \quad [1]$$

so haben nur 2 Analysen Ladungsbilanzfehler von weniger als 5 %. Der mittlere Ladungsbilanzfehler liegt bei 22 %.

Eine EQ3-Rechnung mit diesen Gehalten liefert z.B. für DB 03.001 eine Übersättigung an Carnallit (+ 1,37 kcal), Halit (+ 0,84 kcal) und Sylvin (+0,69 kcal). Eine derartige Übersättigung ist unrealistisch, die Salze würden in kürzester Zeit ausfallen.

Verwendet man statt der angegebenen Mg^{2+} -Gehalte die aus den angegebenen Salzgehalten zurückgerechneten Werte, ergibt sich ein wesentlich besseres Bild. Der mittlere Ladungsbilanzfehler liegt bei 1,5 % und lässt sich durch unvollständige Analysenangaben bei den Nebenbestandteilen erklären. Von den 1422 Proben haben so 1330 Proben Ladungsbilanzfehler unter 5 %. (Sind nur Salzgehalte angegeben, ist der Ladungsbilanzfehler naturgemäß 0!)

Eine EQ3-Rechnung mit der o.a. DB 03.001 liefert so für Halit -0,11 kcal und Sylvin -0,06 kcal, also praktisch Sättigung an beiden Mineralen, und für Carnallit -0,38 kcal, also leichte Untersättigung.

Für DB 01 bis DB 03 gibt es Tabellen mit Jahresmittelwerten. Diese Tabellen beruhen allerdings auf einer größeren Anzahl an Datensätzen, als die zur Verfügung stehenden. Ein Vergleich dieser Werte mit aus unseren Daten berechneten Jahresmittelwerten zeigt bei Verwendung der aus den Salzgehalten zurückgerechneten Mg^{2+} -Gehalte eine wesentlich bessere Übereinstimmung bei allen Hauptbestandteilen (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}).

Wegen der fehlenden Belastbarkeit der tabellierten Ionengehalte werden mit Ausnahme der o. a. 21 „vollständigen“ Analysen alle Angaben und Auswertungen auf die Salzgehalte bezogen bzw. aus den Salzgehalten berechnet.

5.2.2 Dichteberechnungen

Betrachtet man bei DB 01 das Zeitintervall 1926 bis 1939, das durch besonders viele Analysen belegt ist, genauer, fällt auf, dass die meisten Analysen eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und aus Salzgehalten berechneten Dichten zeigen. Dies sollte eigentlich für alle Analysen so sein. Es gibt jedoch, wie aus Abb. 5-2 zu ersehen ist, im gleichen Zeitraum auch eine ganze Reihe von Analysen, deren rechnerische Dichten deutlich niedriger sind als die gemessenen (s. Feld 2 und 3). Die berechneten Dichten im Feld 3 sind sicherlich nicht realistisch, weil sie aufgrund un-

vollständig vorliegender Salzgehalte berechnet wurden (meist nur MgCl_2 angegeben). Die niedrigen Dichten im Feld 2 allerdings wurden aus „vollständig“ angegebenen Salzgehalten berechnet. Hier sind mit hoher Wahrscheinlichkeit die Analysen falsch, weil die Dichten ziemlich konstant um einen einheitlichen Faktor unter dem erwartungsgemäßen Wert von $\sim 1,25 \text{ kg/l}$ liegen. Vergleicht man die Salze dieser Analysen mit denen höherer Dichten fällt auf, dass nur die MgCl_2 -Gehalte niedriger sind als normal, während sich alle andern Salze nicht unterscheiden (In Abb. 5-3 sieht man im rot markierten Feld zwei blaue Punktfolgen, eine bei ca. 200 g/l MgCl_2 und eine zweite bei knapp 100 g/l MgCl_2). Die MgCl_2 -Gehalte dieser Analysen mit den berechneten niedrigen Dichten sind offensichtlich falsch.

Bei den für die weitere Auswertung im Sinne der Aufgabenstellung nicht geeigneten Analysen handelt es sich um Ergebnisse, die teilweise vor mehr als 100 Jahren bestimmt wurden. Es ist heute kaum möglich, die Gründe für fehlerhafte Analysen und problematische Probennahme zu ermitteln.

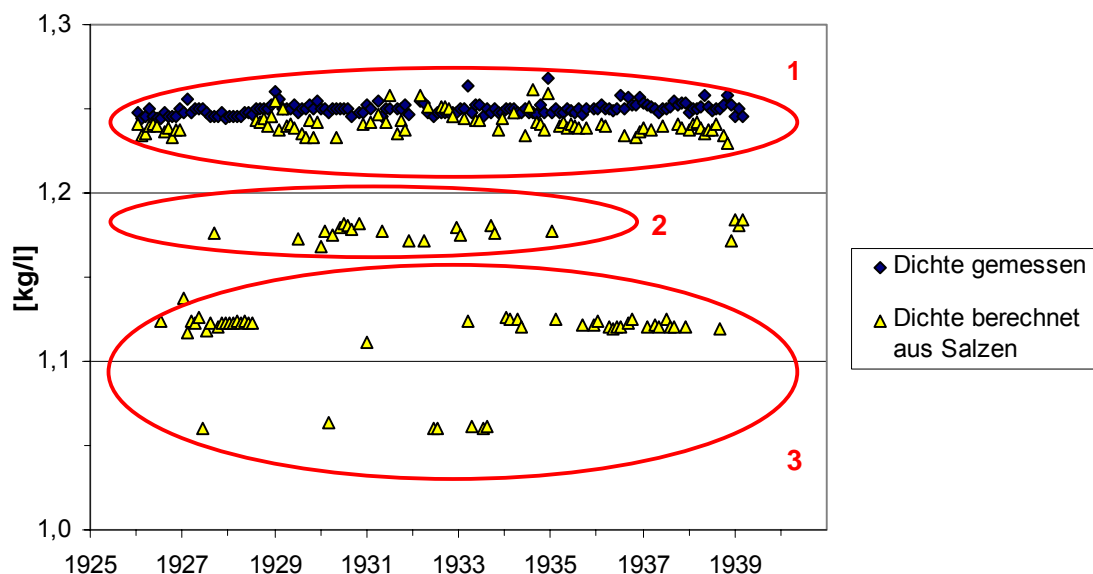


Abb. 5-2 Probennahmestelle DB 01: Vergleich der gemessenen Dichten mit den berechneten Werten, Ausschnitt für die Jahre 1926 bis 1939 (Erläuterungen im Text)

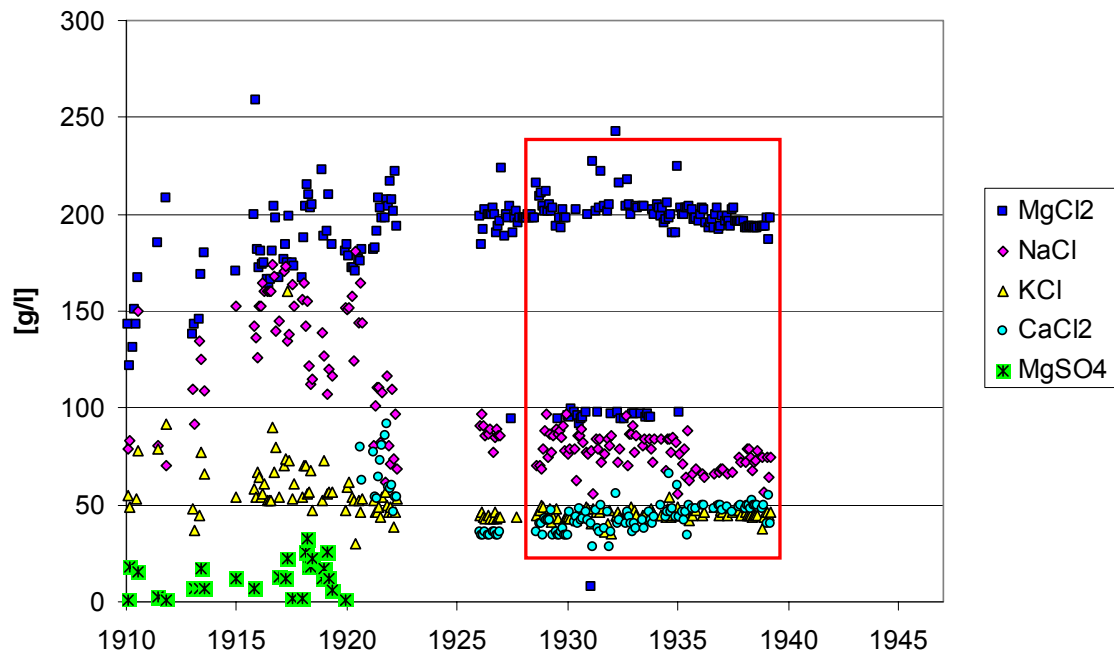


Abb. 5-3 Probennahmestelle DB 01: Salzgehalte

5.3 Nutzung der Analysenergebnisse

Zur Erreichung der Zielstellung der Arbeit sollten im FuE-Bericht mindestens 3000 chemische Analysen aufgenommen und ausgewertet werden. Diese Anzahl wurde durch die Bearbeiter auf 5901 erhöht, um die Aussagefähigkeit zu verbessern, nachdem bei einem Teil der Analysen Widersprüche und Ungenauigkeiten festgestellt werden mussten.

In den Analysenformeln sind im Wesentlichen die Hauptkomponenten MgCl_2 , NaCl , KCl , CaCl_2 sowie MgSO_4 und CaSO_4 erfasst. Einzelne Werte von Spurenelementen und auch Isotopen sind bei < 10 % der Analysenbestimmungen angegeben.

Auf Grund dieses Sachverhalts beschränkt sich die Auswertung auf die Hauptkomponenten. Auf eine Einbeziehung der Spurenelemente und auch der einzelnen Isotopenwerte musste verzichtet werden, da die Widersprüche zu den Hauptkomponenten zu groß waren und die Analysenanzahl der Werte zu gering.

Insgesamt konnten in die Auswertung 5124 chemische Analysen einbezogen werden. Sie stellen – trotz unregelmäßiger räumlicher Verteilung – eine gute Grundlage für die Beurteilung der Salzlösungszuflüsse durch chemische Analysen dar.

Die 5124 Analysen stammen aus 5 Kalirevieren und umfassen 230 Zuflussstellen in 28 Gruben.

Für die Nichtberücksichtigung der 777 Analysen waren unterschiedliche Gründe verantwortlich. Einzelanalysen wurden ebenso von der Auswertung ausgenommen wie Analysen, an deren Vertrauenswürdigkeit berechnete Zweifel bestanden. In der Auswertung enthalten sind allerdings auch einige unvollständige Analysen. So liegen zwar von allen verwendeten Analysen die $MgCl_2$ -Gehalte vor, aber nicht immer alle anderen Salz-Gehalte. Dies erkennt man an unterschiedlichen Zahlen in Klammern auf der Abszisse der Abbildungen. Die Zahlen zeigen an, wie viele Einzelwerte für die Darstellung der Bandbreiten und die Mittelwertbildung zur Verfügung standen.

Die Bezeichnung der Zuflüsse besteht aus zwei Buchstaben und fünf Ziffern. Der erste Buchstabe bezieht sich auf das Kalirevier, der zweite Buchstabe auf die Kaligrube und die ersten beiden Ziffern der nachfolgenden Zahl auf die Nr. des Zuflusses aus dieser Grube. Die letzten drei Ziffern (nach dem Punkt) bezeichnen die laufende Nr. der Probe von diesem Zufluss. Dieses Ordnungsprinzip wurde in der Regel eingehalten. Abweichungen sind nur in Einzelfällen zugelassen worden.

6 Bewertung der Salzlösungszuflüsse nach ihrer chemischen Zusammensetzung

Die stürmische Entwicklung des Kalibergbaus Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts in Deutschland musste durch Lösungszuflüsse und das Absaufen ganzer Gruben immer wieder Rückschläge hinnehmen. Früh wurde der hohe Stellenwert zuverlässiger Informationen über die Herkunft und die Genese der Lösungen zur Gefahrenabwehr erkannt. Unterschiedliche Klassifizierungsschemata zur Charakterisierung von Salzlösungen (Kapitel 4) wurden entwickelt und immer wieder dem jeweiligen Kenntnisstand der Lösungsschemie angepasst. Analytische Klassifizierungen aufgrund der fiktiven Salzgehalte der Lösungen, MgCl_2 -, NaCl -, KCl -, MgSO_4 -, CaSO_4 - und CaCl_2 -Gehalte, dominierten lange Zeit (Baumert 1928, 1953, Fulda 1939, Hartwig 1954, Schwandt 1969, Herrmann 1961, Herrmann et al. 1978, von Borstel 1999). Später, mit der verbesserten Isotopenmesstechnik, wurden die stabilen Isotope des Wassers der Salzlösungen in die Klassifizierung einbezogen (Schmiedl et al. 1982, Nishri et al. 1988). Als Folge der Fortschritte der geochemischen Modellierung hochsalinärer Lösungen auf thermodynamischer Basis mit dem Pitzer-Modell wurden Ende der 90-er Jahre erste erfolgreiche Versuche unternommen, die älteren analytischen Klassifizierungen durch thermodynamische Berechnungen abzulösen (Herbert 2000). Die geochemischen Modellrechnungen auf thermodynamischer Basis erlauben eine detaillierte qualitative und quantitative Betrachtung sowohl der Sättigungsverhältnisse der Lösungen als auch der Feststoff-Lösungs-Reaktionen, die zu einer gegebenen Lösungszusammensetzung führen. Damit wurde ein vertieftes Verständnis der komplexen Zusammenhänge im betrachteten Sechskomponentensystem $\text{Na-K-Ca-Mg-Cl-SO}_4$ der Salze ozeanischer Salzablagerungen möglich.

In diesem Bericht wird versucht, eine Brücke zu schlagen zwischen den zwangsläufig vereinfachenden analytischen Klassifizierungen und der modernen thermodynamischen Betrachtung von Salzlösungen. Mit der Entwicklung eines einfach zu handhabenden Instruments, das weiterhin auf die analytische Klassifizierung zurückgreift, gleichzeitig aber auf thermodynamischer Grundlage beruht, wird versucht, den praktischen Belangen der Bergbausicherheit Rechnung zu tragen. Das hier vorgestellte Klassifizierungsmodell ist eine Vorstufe zur weiteren detaillierten wissenschaftlichen Bearbeitung der Salzlösungszuflüsse mit allen, heute zur Verfügung stehenden Instrumentarien der Thermodynamik und der Isotopenanalytik.

6.1 Bandbreiten der Salzgehalte und Einteilung in Gruppen

Es kann davon ausgegangen werden, dass Lösungen mit gleichen Zusammensetzungen gleiche Sättigungswerte an gleichen Bodenkörpern zeigen und durch gleichartige Wasser/Salz-Reaktionen entstanden sind. Diese Zusammenhänge berechtigen zur Einführung einer Vereinfachung in die Betrachtungen, wenn es gelingt einfache Kriterien zu finden, die die komplexen genetischen Beziehungen klar widerzuspiegeln vermögen.

Klare einfache Zusammenhänge gibt es in Halit-gesättigten Lösungen nur zwischen MgCl_2 und NaCl . Die NaCl -Gehalte fallen immer mit steigenden MgCl_2 -Gehalten. Das Verhalten von KCl in Lösung ist komplizierter und hängt von den anstehenden Mineralen und dem Reaktionsfortschritt ab. Mit steigendem MgCl_2 -Gehalt kann der KCl -Gehalt sowohl ansteigen als auch fallen, je nachdem, welcher Prozess in welchem Stadium der Entwicklung zugrunde liegt. In einer Halit-gesättigten Lösung steigt der KCl -Gehalt bis zum Erreichen der Sylvin-Sättigung bei steigenden MgCl_2 -Gehalten an. Danach fällt er wieder, weil durch die dann einsetzende Kainit- und später Carnallit-Bildung der Lösung wieder KCl entzogen wird. Noch komplizierter sind die Zusammenhänge zwischen MgCl_2 -Gehalten und MgSO_4 - bzw. CaCl_2 -Gehalten in der Lösung. Im Abschnitt 7 werden diese Zusammenhänge erläutert. Nur mit quantitativen geochemischen Modellrechnungen und einem realistischen Entstehungsmodell ist es möglich, die komplexen Zusammenhänge zwischen allen Salzen in Lösung vor dem Hintergrund ihrer genetischen Entwicklung im Detail zu verstehen. Dies trifft in ganz besonderem Maße für die Interpretation der MgSO_4 - und CaCl_2 -Gehalte zu.

Wenn also eine vereinfachende Betrachtung und Einteilung der Lösungen in Lösungstypen mit unterschiedlicher Genese und unterschiedlichem Gefährdungspotential überhaupt möglich sein sollte, kommt von allen Salzen nur MgCl_2 in Frage.

Um dies zu überprüfen, wurden für die Beurteilung des umfangreichen Analysenmaterials, ähnlich wie es schon Schwandt 1969 getan hatte, die fiktiven Salzgehalte der Lösungen dargestellt und Lösungstypen mit ähnlichen MgCl_2 -Gehalten definiert (Abb. 6-1). Die gewählte Einteilung wurde für die andern Salze beibehalten (Abb. 6-2 bis Abb. 6-5). Es zeigte sich, dass die neu definierten Lösungstypen nur wenige Überschneidungen aufweisen. Von den diesen Lösungstypen zugeordneten Einzelanalysen wurden die Sättigungen berechnet und ausgewertet (s. u.). Auch hier zeigte sich, dass die Lösungen eines Lösungstyps sehr ähnliche Sättigungsverhältnisse aufweisen und sich deutlich von den Lösungen der anderen Lösungstypen unterscheiden. Eine nähe-

re Betrachtung der Entstehung der Lösungen und der geologischen Randbedingungen, unter denen sie auftraten, zeigte weiterhin, dass die Lösungen eines Lösungstyps gemeinsame Eigenschaften aufweisen (s. Kapitel 7). Die Einteilung in Lösungstypen nach dem alleinigen Kriterium MgCl_2 -Gehalte schien also durchaus sinnvoll zu sein.

Die Salzgehalte und die Lösungstypen werden im Folgenden beschrieben.

MgCl_2 - und NaCl -Gehalte

Für die nachstehende Auswertung wurden von den insgesamt 5901 vorliegenden Einzelanalysen 5124 Analysen verwendet (Abb. 6-1 – Abb. 6-5). Es handelt sich dabei um mehrfach bis 1990 beprobte Lösungszuflüsse in Kaligruben.

Die MgCl_2 -Gehalte aller untersuchten Lösungen liegen zwischen 0 bis über 500 g/l. Innerhalb dieses weiten Bereiches wurden die Lösungstypen A, B, C, D und E (Abb. 6-1) unterschieden.

Lösungstyp A umfasst Lösungen mit MgCl_2 -Gehalten, die in der Regel über 400 und unter 500 g/l liegen (Abb. 6-1). Nur vereinzelte sind Lösungen etwas außerhalb dieser Bandbreite bestimmt worden. Alle Mittelwerte der MgCl_2 -Gehalte der Einzelanalysen der Zuflüsse, die diesem Lösungstyp zugeordnet wurden, liegen innerhalb dieses Bereiches. Der Mittelwert aller 431 Einzelanalysen liegt bei 436 g/l. Lösungen des Lösungstyps A treten bevorzugt im Nordharz-Kalirevier einschließlich der „Scholle von Calvörde“ (384 Einzelanalysen) und untergeordnet im Saale-Unstrut-Revier auf (47 Einzelanalysen). Weder im Revier Thüringen-Werra noch im Südharz wurden Lösungen mit so hohen MgCl_2 -Gehalten angetroffen. Die 384 Analysen aus dem Nordharz stammen aus 6 Kaligruben mit insgesamt 7 Zuflüssen. Im Saale-Unstrut-Revier wurden die 47 Lösungen dieses Typs in zwei Kaligruben mit jeweils einem Zufluss beprobt.

Die NaCl -Gehalte der Lösungen des Typs A sind sehr niedrig (Abb. 6-2). Sie liegen im Mittel bei 12 g/l.

Lösungstyp B ist durch Lösungen mit MgCl_2 -Gehalten gekennzeichnet, die in der Regel zwischen 320 und 400 g/l liegen (Abb. 6-1). Nur wenige Einzelanalysen zeigen leicht höhere oder leicht niedrigere Werte. Die Mittelwerte der Lösungen jedes einzelnen Zuflusses verteilen sich innerhalb der genannten Bandbreite. Der Mittelwert aller 195 Analysen dieses Lösungstyps wurde mit 350 g/l MgCl_2 errechnet. Auch bei diesem

Typ stammt die Mehrheit der Analysen (179) aus dem Nordharzgebiet und zwar aus 5 Gruben mit 10 Zuflussstellen. Nur 16 Analysen kommen von einer Zuflussstelle aus einer Grube des Saale-Unstrut-Reviere.

Entsprechend den niedrigeren $MgCl_2$ -Gehalten der Lösungen des Typs B (im Vergleich zum Typ A) sind die $NaCl$ -Gehalte dieser Lösungen etwas höher, im Mittel um 19 g/l (Abb. 6-2).

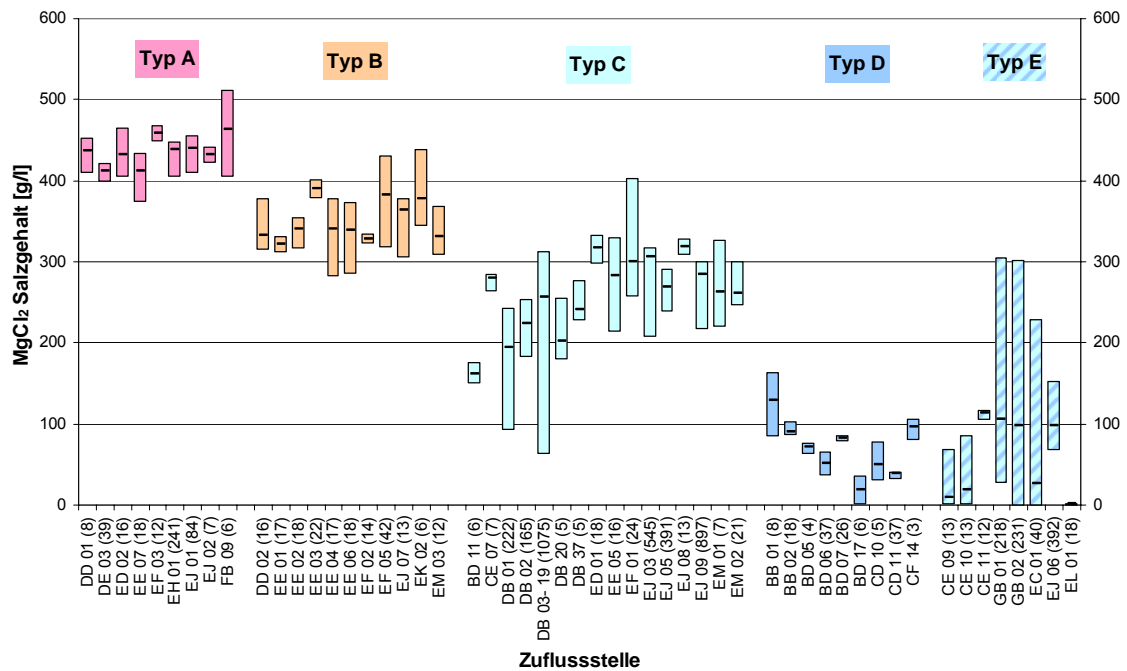


Abb. 6-1 $MgCl_2$ -Gehalte der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen

Mit 3417 Einzelanalysen aus allen 4 Kalireviere (Thüringen-Werra, Südharz, Saale-Unstrut und Nordharz), 8 Gruben und 16 Zuflüssen gehören die weitaus meisten der untersuchten Lösungen dem **Lösungstyp C** an. Die Lösungen dieses Typs zeigen eine deutlich größere Streuung der $MgCl_2$ -Gehalte als die der Typen A und B. Insgesamt sind die $MgCl_2$ -Gehalte auch deutlich niedriger. Die $MgCl_2$ -Gehalte der Einzelanalysen dieses Lösungstyps liegen zwischen 150 und 320 g/l. Der Mittelwert aller Einzelanalysen beträgt rund 260 g/l. Auch hier befinden sich nur wenige Einzelanalysen außerhalb der genannten Bandbreite. Abb. 6-1 macht deutlich, dass nach oben leichte Überschneidungen mit Analysen des Typs B und nach unten mit solchen des Typs D auftreten.

Die $NaCl$ -Gehalte (Abb. 6-2) liegen im Mittel um 48 g/l. Nur wenige Einzelanalysen gehen über 100 g/l hinaus.

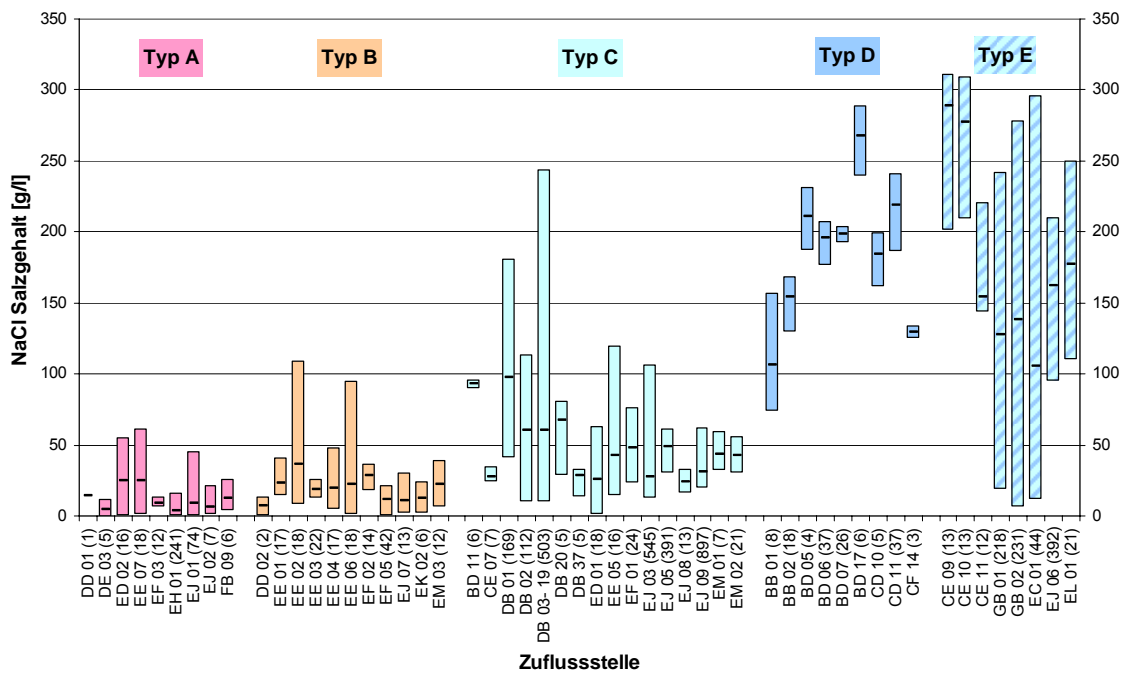


Abb. 6-2 NaCl-Gehalte der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen

Zum **Lösungstyp D** gehören 144 Lösungen aus zwei Kalirevieren (Thüringen-Werra und Südharz), aus 4 Gruben und 9 Zuflüssen. Die $MgCl_2$ -Gehalte der Einzelanalysen dieses Lösungstyps liegen in der Regel unter 150 g/l bis $MgCl_2$ -frei bei NaCl-Gehalten zwischen 100 und 300 g/l. Der Gesamtmittelwert der $MgCl_2$ -Gehalte ist mit 70 g/l sehr niedrig und der Mittelwert der NaCl-Gehalte mit ca. 185 g/l entsprechend hoch. Nur ein Zufluss hat einen $MgCl_2$ -Mittelwert über 100 g/l. Die $MgCl_2$ -Mittelwerte aller anderen Zuflüsse befinden sich darunter.

Der **Lösungstyp E** umfasst die gesamte Bandbreite der Lösungstypen C und D. Bei den Einzelanalysen der Zutrittsstellen diesen Typs korrespondieren zwar zu Beginn die $MgCl_2$ - und die NaCl-Gehalte wie bei denen der Typen C und D, im Laufe der Entwicklungsgeschichte dieser Zutritte sinken jedoch trotz niedriger $MgCl_2$ -Gehalte auch die NaCl-Gehalte. Damit sind diese Lösungen dann nicht mehr Halit-gesättigt.

Mit 937 Einzelanalysen aus den Kalirevieren Südharz und Nordharz ist dies die zweitgrößte Gruppe der untersuchten Lösungen. Sie kommen aus 8 Zuflüssen in 5 Gruben. Obwohl der $MgCl_2$ -Mittelwert mit ca. 59 g/l noch niedrigerliegt als der des Lösungstyps D, ist wegen der teilweise ungesättigten Verhältnisse auch der NaCl-Mittelwert mit ca. 179 g/l niedriger. Dabei zeigen die Einzelwerte der NaCl-Gehalte die größte Bandbreite aller untersuchten Lösungstypen. Der Zufluss EC 01 umfasst z.B. den Bereich von ca. 295 bis 12 g/l.

KCl-Gehalte

Betrachtet man die KCl-Gehalte (Abb. 6-3), ist bei den Lösungstypen A, B und C ein ähnliches Muster wie bei den NaCl-Gehalten festzustellen. Mit fallenden $MgCl_2$ -Gehalten steigen die KCl-Gehalte. Insgesamt ist jedoch festzustellen, dass die Überschneidungen zwischen den Lösungstypen so groß sind, dass allein auf der Grundlage der KCl-Gehalte eine Abgrenzung zwischen den Gruppen nicht möglich wäre.

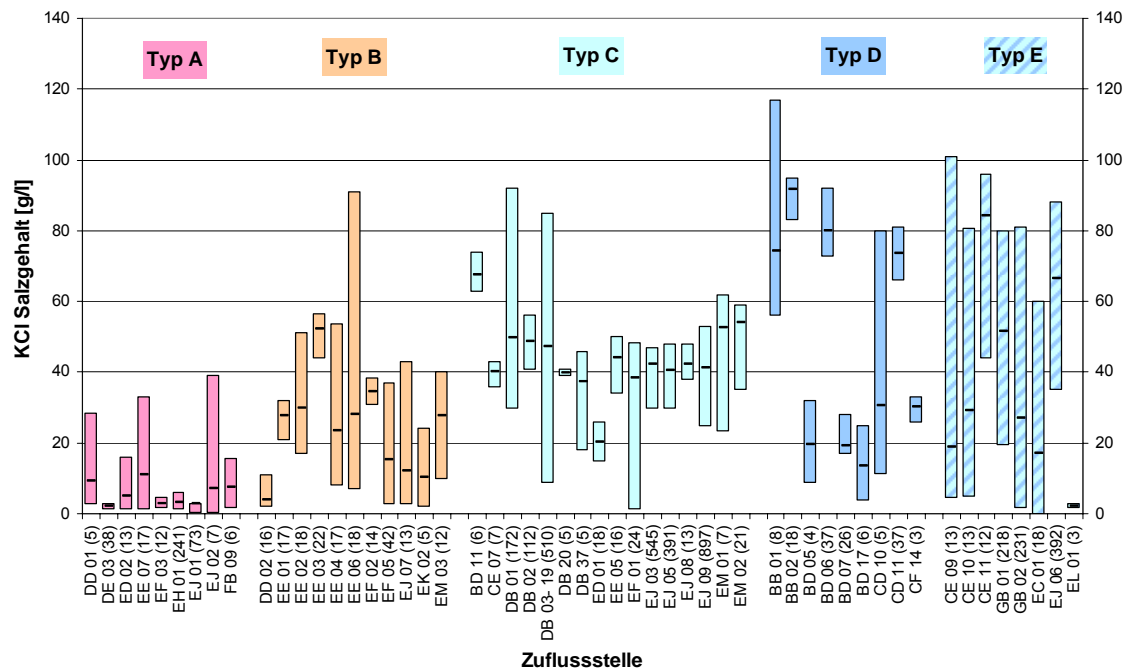


Abb. 6-3 KCl-Gehalte der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen

Auch bei etwa der Hälfte der Lösungen des Typs D ist der oben beschriebene Trend zu steigenden KCl-Gehalten bei fallenden $MgCl_2$ -Gehalten zu erkennen. Bei der andern Hälfte der Lösungen dieses Typs sind die KCl-Gehalte jedoch trotz niedriger $MgCl_2$ -Gehalte deutlich geringer, niedriger sogar als bei Typ C. Dies muss Gründe haben, die allein aus der Betrachtung der Analysendaten nicht zu erkennen sind. Die in Kapitel 7 beschriebenen geochemischen Modellierungen zeigen plausible Erklärungen für dieses Verhalten auf. Es ist zu erkennen, dass die KCl-Gehalte allein die Einteilung in Lösungstypen nur sehr grob widerspiegeln.

$MgSO_4$ - und $CaCl_2$ -Gehalte

$MgSO_4$ tritt in 3826 von den insgesamt betrachteten 5124 Einzelanalysen auf, $CaCl_2$ dagegen nur in 646 Analysen (Abb. 6-4 und Abb. 6-5). 652 Einzelanalysen sind un-

vollständig, d.h. es liegen keine Angaben über diese Salze vor. Diese Zahlenrelation zeigt, dass Lösungen des Sulfat-Typs auch in Mittelddeutschland bei weitem überwiegen.

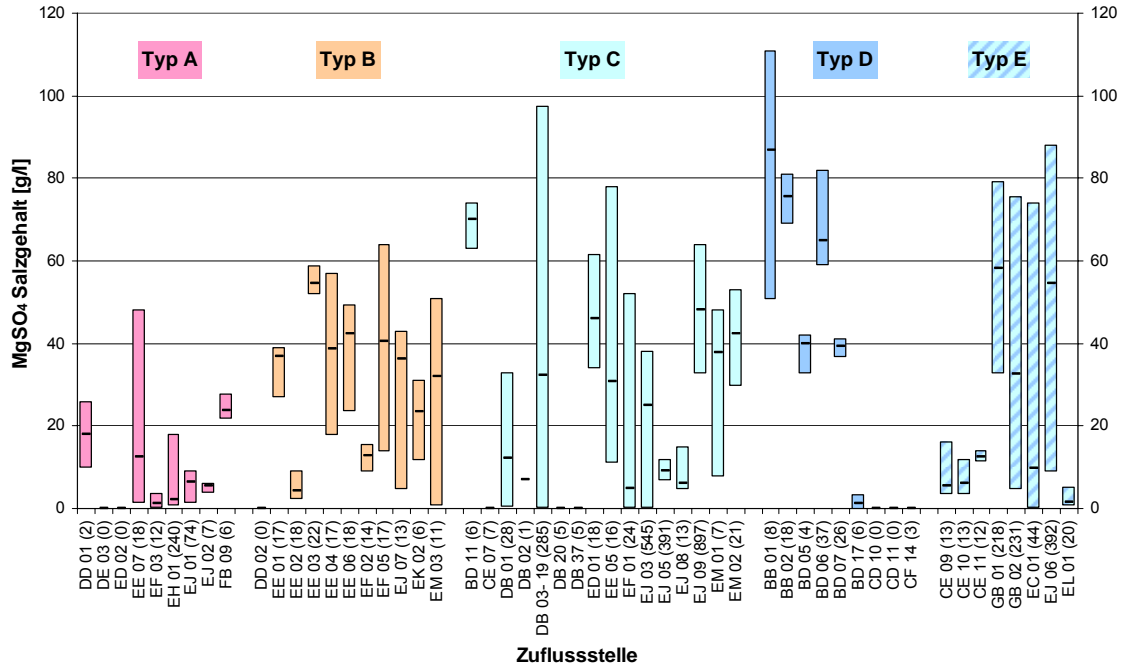


Abb. 6-4 $MgSO_4$ -Gehalte der untersuchten Salzlösungen Mittelddeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen

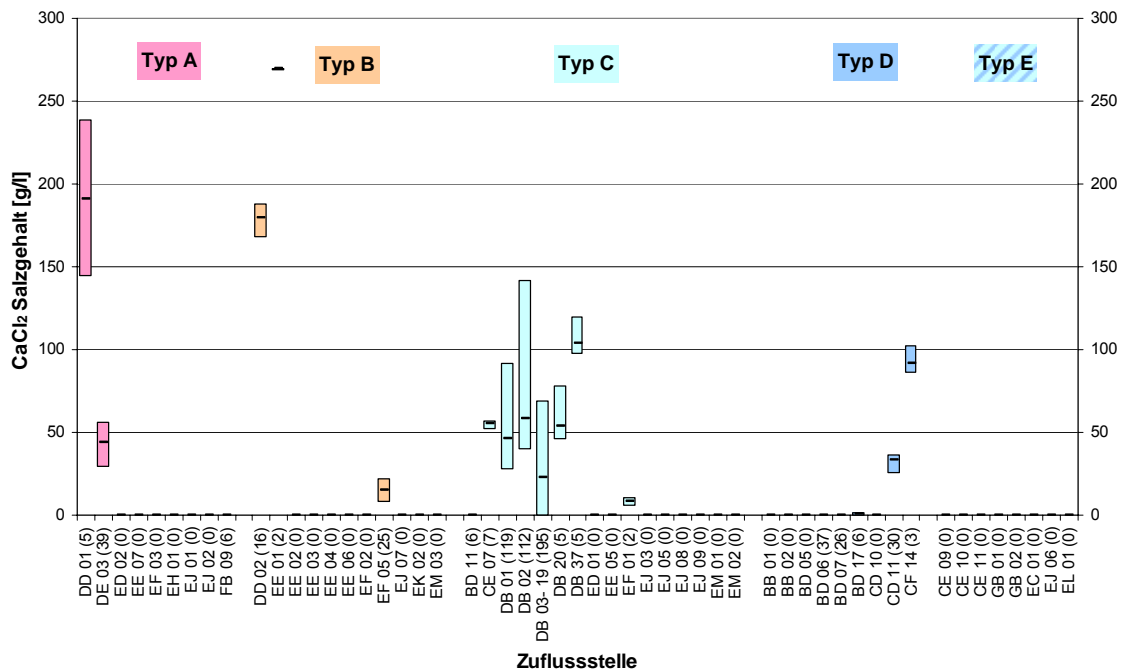


Abb. 6-5 $CaCl_2$ -Gehalte der untersuchten Salzlösungen Mittelddeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen

Tab. 6-1 Verteilung der MgCl₂-Einzelanalysen der Kaliwerke Mitteldeutschlands auf die Lösungstypen (5124 Einzelanalysen)

Lösungstyp Gesamtzahl Einzelanalysen	Kalirevier	Anzahl Kaligruben	Anzahl Zuflüsse	Zahl Einzelanalysen	Gesamt- mittelwert [g/l]
A 431	Saale-Unstrut	2	2	47	436
	Nordharz	6	7	384	
B 195	Saale-Unstrut	1	1	16	350
	Nordharz	5	10	179	
C 3417	Thüringen-Werra	1	1	6	260
	Südharz	1	1	7	
	Saale-Unstrut	1	5	1472	
	Nordharz	5	9	1932	
D 144	Thüringen-Werra	2	6	99	70
	Südharz	2	3	45	
E 937	Südharz	1	3	38	59
	Nordharz	4	5	899	

Tab. 6-2 Verteilung der NaCl-Einzelanalysen der Kaliwerke Mitteldeutschlands auf die Lösungstypen (4388 Einzelanalysen)

Lösungstyp Gesamtzahl Einzelanalysen	Kalirevier	Anzahl Kaligruben	Anzahl Zuflüsse	Zahl Einzelanalysen	Gesamt- mittelwert [g/l]
A 380	Saale-Unstrut	2	2	6	12
	Nordharz	6	7	374	
B 181	Saale-Unstrut	1	1	2	19
	Nordharz	5	10	179	
C 2739	Thüringen-Werra	1	1	6	48
	Südharz	1	1	7	
	Saale-Unstrut	1	5	794	
	Nordharz	5	9	1932	
D 144	Thüringen-Werra	2	6	99	185
	Südharz	2	3	45	
E 944	Südharz	1	3	38	179
	Nordharz	4	5	906	

Tab. 6-3 Verteilung der KCl-Einzelanalysen der Kaliwerke Mitteldeutschlands auf die Lösungstypen (4399 Einzelanalysen)

Lösungstyp Gesamtzahl Einzelanalysen	Kalirevier	Anzahl Kaligruben	Anzahl Zuflüsse	Zahl Einzelanalysen	Gesamt- mittelwert [g/l]
A 412	Saale-Unstrut	2	2	43	6
	Nordharz	6	7	369	
B 194	Saale-Unstrut	1	1	16	24
	Nordharz	5	10	178	
C 2749	Thüringen-Werra	1	1	6	44
	Südharz	1	1	7	
	Saale-Unstrut	1	5	804	
	Nordharz	5	9	1932	
D 1044	Thüringen-Werra	2	6	99	48
	Südharz	2	3	45	
E 194	Südharz	1	3	38	37
	Nordharz	4	5	862	

Tab. 6-4 Verteilung der MgSO₄-Einzelanalysen der Kaliwerke Mitteldeutschlands auf die Lösungstypen (3826 Einzelanalysen)

Lösungstyp Gesamtzahl Einzelanalysen	Kalirevier	Anzahl Kaligruben	Anzahl Zuflüsse	Zahl Einzelanalysen	Gesamt- mittelwert [g/l]
A 359	Saale-Unstrut	1	1	2	10
	Nordharz	5	6	357	
B 153	Nordharz	5	10	153	32
C 2269	Thüringen-Werra	1	1	6	23
	Südharz	1	1	7	
	Saale-Unstrut	1	5	324	
	Nordharz	5	9	1932	
D 102	Thüringen-Werra	2	6	99	44
	Südharz	2	1	3	
E 943	Südharz	1	3	38	23
	Nordharz	4	5	905	

Tab. 6-5 Verteilung der CaCl₂-Einzelanalysen der Kaliwerke Mitteldeutschlands auf die Lösungstypen (646 Einzelanalysen)

Lösungstyp Gesamtzahl Einzelanalysen	Kalirevier	Anzahl Kaligruben	Anzahl Zuflüsse	Zahl Einzelanalysen	Gesamt- mittelwert [g/l]
A 50	Saale-Unstrut	2	2	44	78
	Nordharz	1	1	6	
B 43	Saale-Unstrut	1	1	16	155
	Nordharz	2	2	27	
C 451	Thüringen-Werra	1	1	6	43
	Südharz	1	1	7	
	Saale-Unstrut	1	5	436	
	Nordharz	1	1	2	
D 102	Thüringen-Werra	1	3	69	25
	Südharz	2	2	33	

MgSO₄ und CaCl₂ können nicht gleichzeitig und nebeneinander in einer Salzlösung auftreten. Wenn eine Lösung MgSO₄ enthält, enthält sie kein CaCl₂ und umgekehrt. Es gibt jedoch auch Lösungszuflüsse, bei denen die anfänglich vorhandenen MgSO₄-Gehalte abnehmen und von steigenden CaCl₂-Gehalten abgelöst werden (z.B. im Saale-Unstrut-Revier in den Zuflüssen DB 01 – DB 37).

Die MgSO₄-Gehalte weisen generell ein ähnliches Verhalten auf wie die NaCl-Gehalte und in Teilen die KCl-Gehalte. Die Gehalte steigen mit fallendem MgCl₂-Gehalt leicht an. Dies bestätigen auch die allerdings stark schwankenden Werte in Tab. 6-1. Deutlich wird aber, dass sich MgSO₄ nicht für eine Typisierung der Lösungen eignet, da die Schwankungen zu groß sind. Diese Aussage trifft auch für die CaCl₂-Gehalte zu. Erstens weisen nur knapp 15 % aller untersuchten Lösungen CaCl₂-Gehalte auf und zweitens sind die Streuungen extrem. Eine Typisierung der Lösungen auf Grundlage der CaCl₂- und MgSO₄-Gehalte ist nur qualitativ möglich. Es ist sinnvoll Lösungen mit CaCl₂-Gehalten von solchen mit MgSO₄-Gehalten zu unterscheiden.

Während die MgSO₄-Gehalte auf die Auflösung von Kieserit leicht zurückzuführen sind, sind die CaCl₂-Gehalte in den Salzlösungen (Abb. 6-6) bisher nicht zufrieden stellend erklärt worden. In Kapitel 7.2 wird ein Modell vorgestellt, das die komplexen Beziehungen zwischen diesen beiden Salzen ebenso erklärt wie die Entstehung von CaCl₂ und aufzeigt, von welchen Prozessen die Absolutgehalte dieser Salze in Lösung abhängen.

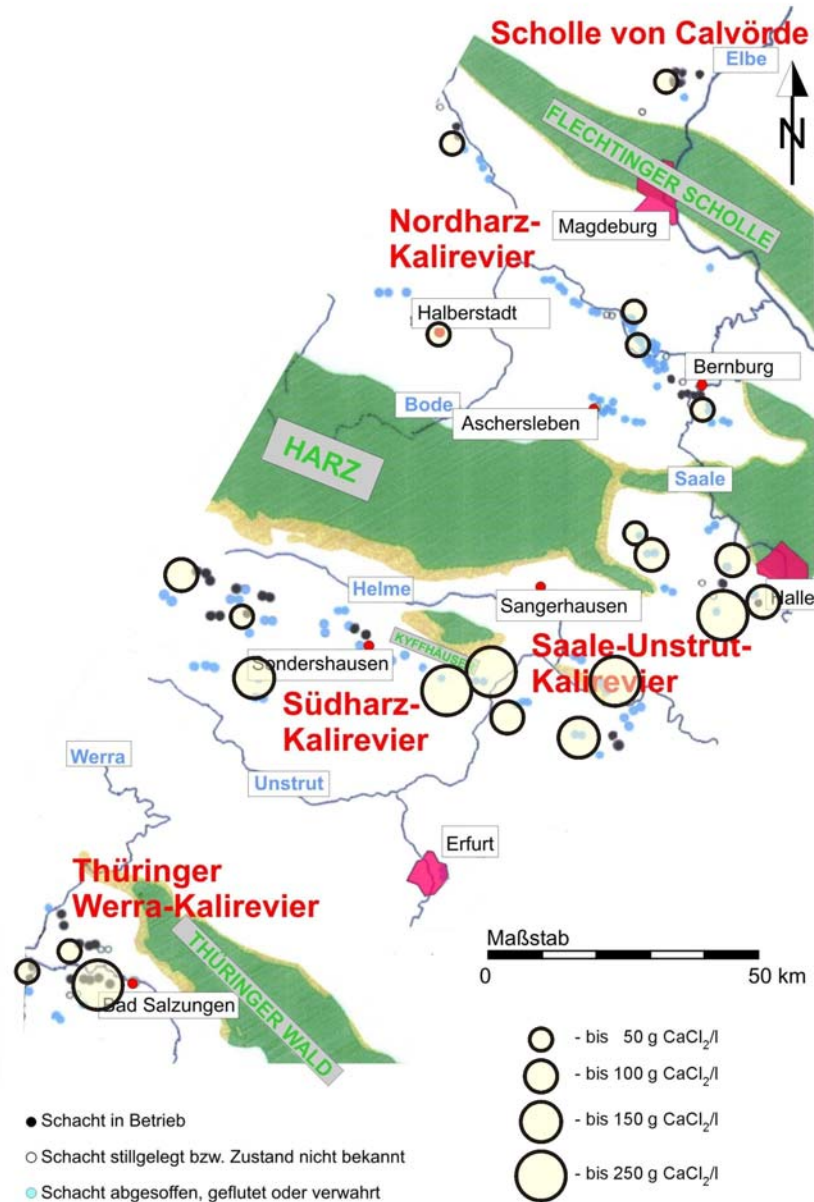


Abb. 6-6 Verteilung der maximalen CaCl₂-Gehalte der Salzlösungen in den Salzgruben Mitteldeutschlands

Einzelanalysen und Lösungstypen im Jänecke-Dreieck

Um einen besseren Überblick über die Mengenverhältnisse zwischen den Ionen in Lösung und damit auch zwischen den Salzen zu erhalten, wurden alle untersuchten Einzelanalysen im Jänecke-Dreieck dargestellt (Abb. 6-7 und Abb. 6-8). Dabei wurden für die Analysen, die allein nach den MgCl₂-Gehalten den Lösungstypen A, B, C und D zugeordnet worden waren, unterschiedliche Farben verwendet. Um das Bild nicht zu verfälschen, wurden nur vollständige Analysen, d.h. solche, bei denen Werte für MgCl₂, MgSO₄ und KCl vorlagen, in die Darstellung aufgenommen. Aus dem Projektionspunkt

jeder Einzelanalyse im Jänecke-Dreieck ergeben sich (wie im Kapitel 4 erklärt) die Bodenkörper, an denen die Lösungen gesättigt sind.

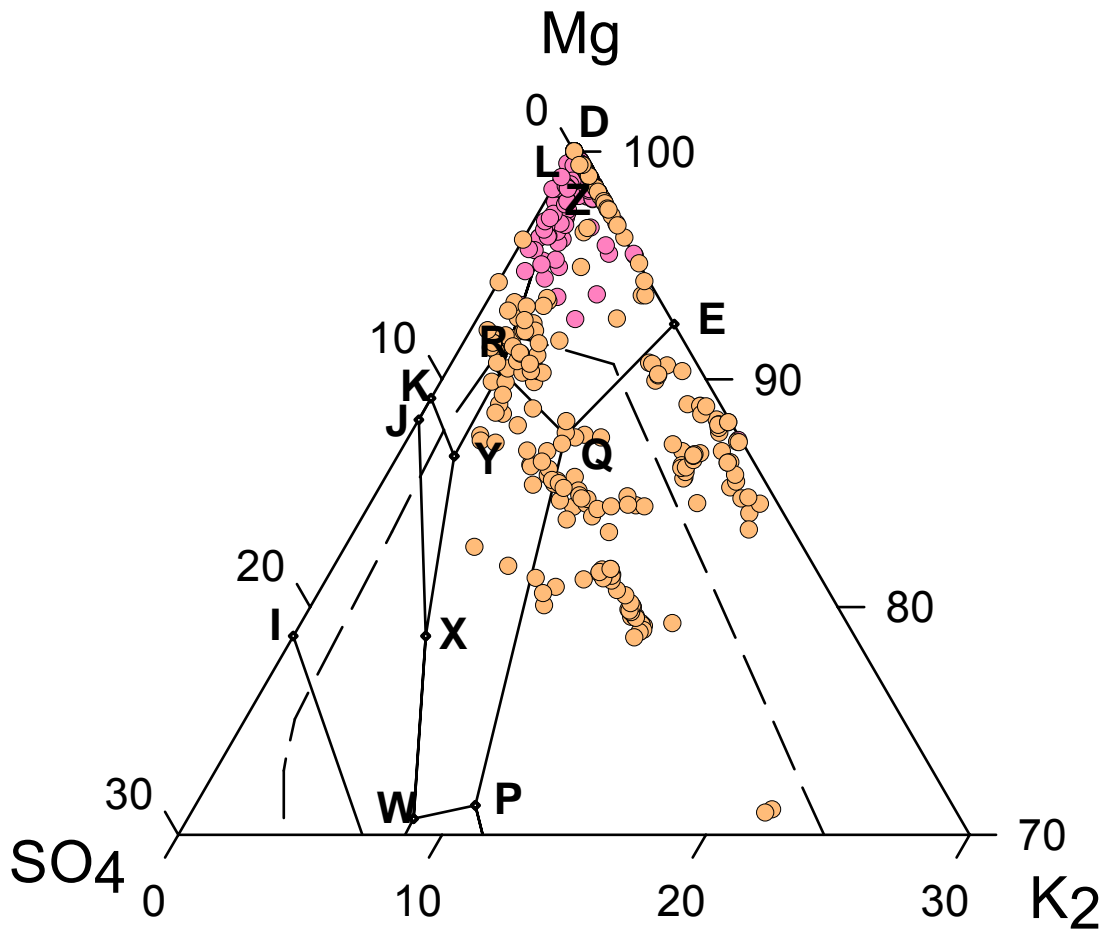


Abb. 6-7 Lösungen des Lösungstyps A (pink) und B (orange) im Mg-SO₄-K₂-Dreieck (vergrößerter Ausschnitt mit mehr als 70% Mg)

Die Felder, die die Lösungstypen im Jänecke-Dreieck belegen, unterscheiden sich deutlich. Überschneidungen gibt es zwar, vor allem zwischen Typ B und C, trotzdem wird deutlich, dass ein bestimmter MgCl₂-Gehalt in bestimmten Grenzen den Gehalt an KCl und MgSO₄ bedingt. Die Einteilung in Lösungstypen ist also sinnvoll und kann beibehalten werden.

Die CaCl₂-haltigen Lösungen sind in dieser Darstellung nicht enthalten. Mit einer etwas aufwendigeren Programmierung hätte auch die aufgeklappte Tetraederdarstellung mit Ca (für CaCl₂) in der Spitze der Pyramide (s. Abb. 4-6) gezeichnet werden können. Damit wären jedoch immer noch keine quantitativen Angaben zu den Sättigungsverhältnissen verfügbar gewesen, so dass darauf verzichtet wurde. Mittels EQ3-Rechnungen wurden die quantitativen Sättigungen direkt bestimmt (Kap. 6.2).

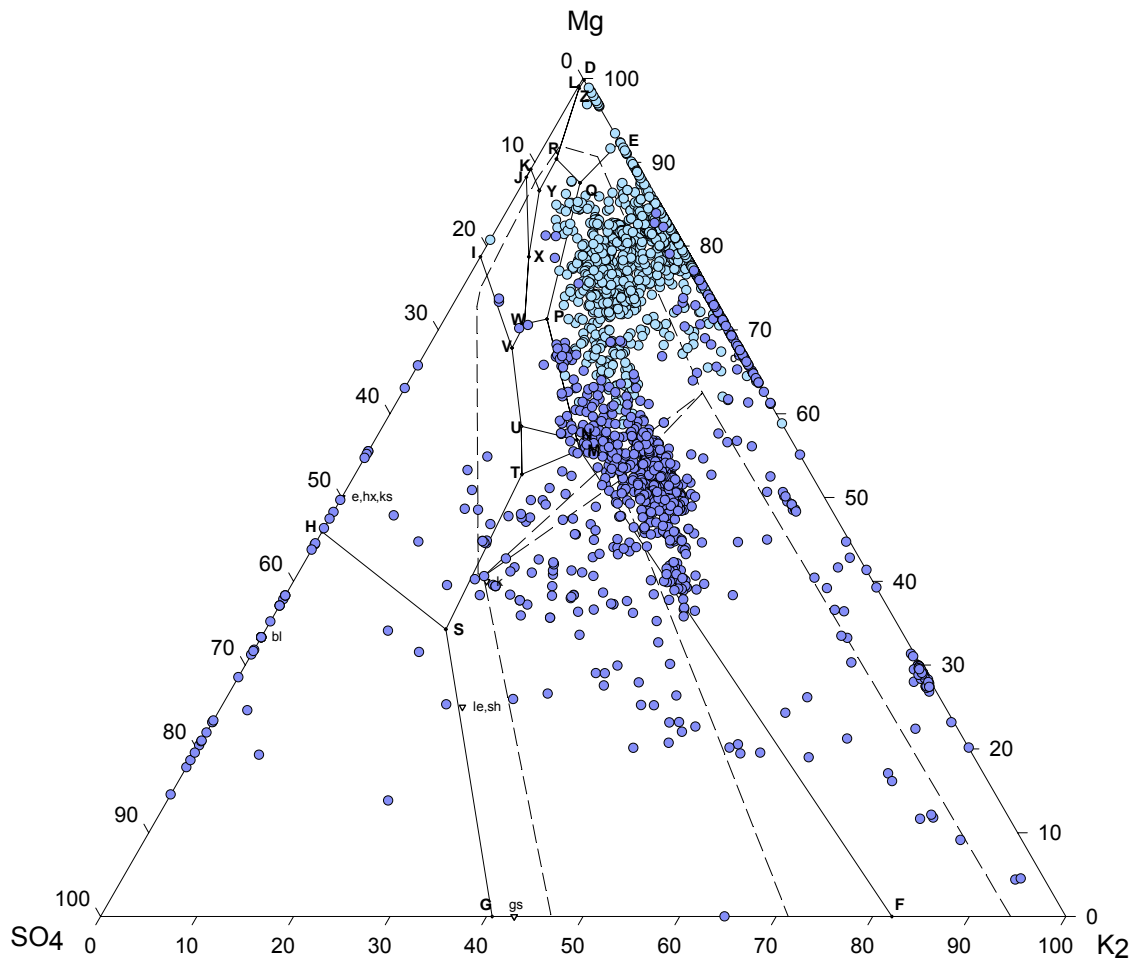


Abb. 6-8 Lösungen des Lösungstyps C (hellblau) und D (blau) im Mg-SO₄-K₂-Dreieck

Die Einteilung und Zuordnung der Lösungen zu den Lösungstypen wurde auch bei der Darstellung der Sättigungsverhältnisse beibehalten. Am Ende dieses Kapitels werden die berechneten Sättigungen dargestellt und kurz kommentiert. In Kapitel 7 wird auf die Reaktionen eingegangen, durch die die gemessenen Salzgehalte und die resultierenden Sättigungswerte zustande gekommen sein könnten.

Besonders aus der Betrachtung der Bischofit-Sättigung wird deutlich, dass zwischen der analytischen Klassifizierung aufgrund der MgCl₂-Gehalte und der thermodynamischen Betrachtung tatsächlich enge Beziehungen bestehen.

Halit-Sättigung

Abb. 6-9 zeigt die Halit-Sättigung der untersuchten Lösungen. Wie nicht anders zu erwarten war, ist die große Mehrzahl der Analysen Halit-gesättigt. Einzelne Abweichungen von dem Kriterium Sättigung (Affinität im Bereich $\pm 0,5$ kcal) müssen einzeln

betrachtet und diskutiert werden. Bei Werten deutlich über +0,5 kcal handelt es sich erfahrungsgemäß um leicht eingedunstete Lösungen. Bei Tropfstellen mit geringer Schüttung kann es bereits bei der Probennahme zu deutlichen Eindunstungseffekten kommen. Mögliche analytische Fehler wurden im Kapitel 5.2 diskutiert. Tatsächliche Halit-Untersättigungen treten nur bei Zuflüssen des Lösungstyps D auf, z.B. EC 01, GB 02 und CD 10. Der Zufluss CD geht auf Dolomitwasser zurück, die aus dem Liegenden in die Salzformation eingedrungen sind. Tabelle 6 im Anhang 2 zeigt, dass sich die Halit-Untersättigung bei diesen Zuflüssen im Laufe der Zeit langsam vergrößert hat. Solche Entwicklungen führen in der Regel zum Absaufen der Gruben. Beispiele dafür sind Aschersleben I, Westeregeln I/II, Leopoldshall I/II, Friedrichshall I/II, Solvayhall (s. ausführliche Beschreibung bei Schwandt 1969).

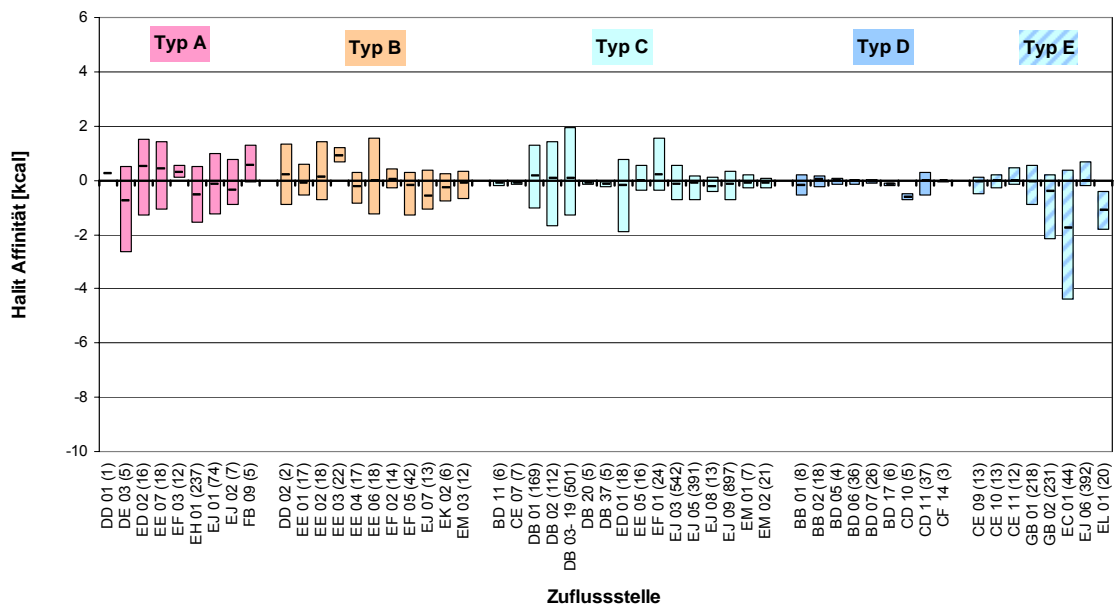


Abb. 6-9 Halit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen

Sylvin-Sättigung

In Abb. 6-10 ist die Sylvin-Sättigung der Lösungen dargestellt. Generell fällt auf, dass die Lösungen des Typs A eine signifikante Sylvin-Untersättigung aufweisen, während die Lösungen des Typs B und C in der Regel Sylvin-gesättigt sind. Von Sylvin-Sättigung bis zu starker Untersättigung reichen die Werte der Lösungen des Typs D. Eine Korrelation der Werte der Sylvin-Sättigungen mit den Lösungstypen ist nur bei einer detaillierten Betrachtung der Entstehung dieser Lösungen mittels eines realitätsnahen Modells und geochemischer Modellierung (s. Kapitel 7) möglich.

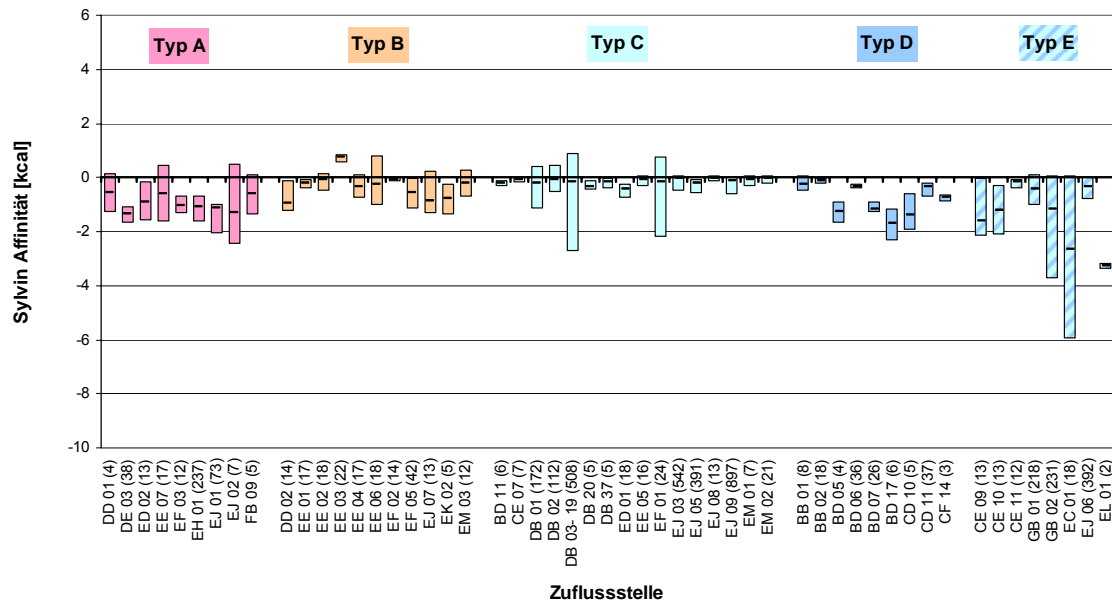


Abb. 6-10 Sylvin-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen

Carnallit-Sättigung

Die Lösungen der Typen A und B sind an Carnallit gesättigt (Abb. 6-11). Übersättigungen können theoretisch nicht auftreten und sind auf problematische Probennahme (Eindunstung bei niedrigen Schüttungen) oder Analysenfehler zurückzuführen. Auch die Mehrzahl der Lösungen des Typs C liegt nahe an der Sättigung. Entsprechend ih-

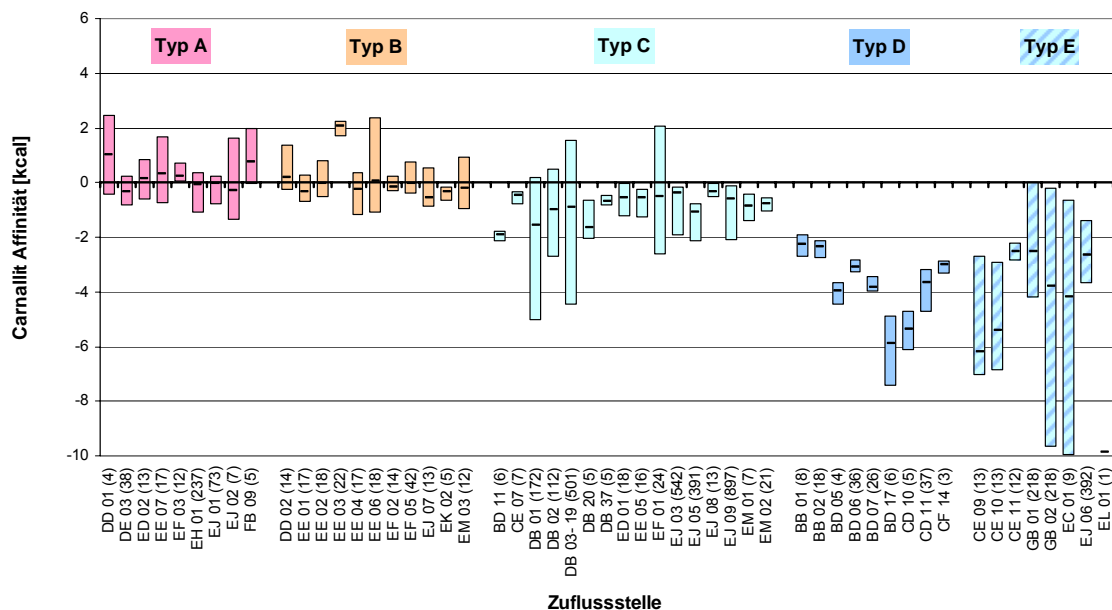


Abb. 6-11 Carnallit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen

ren niedrigeren $MgCl_2$ -Gehalten zeigen sie aber auch niedrigere Carnallit-Sättigungen. Alle Lösungen des Typs D sind stark bis sehr stark Carnallit-untersättigt.

Eine Korrelation der Werte der Carnallit-Sättigungen mit den Lösungstypen ist nur bei detaillierter Betrachtung (s. Kapitel 7.1.2) möglich.

Bischofit-Sättigung

Die Werte der Bischofit-Sättigung zeigen die beste Korrelation mit den $MgCl_2$ -Gehalten. Wie die $MgCl_2$ -Gehalte der einzelnen Lösungstypen fallen auch die Bischofit-Sättigungen von Typ A über B und C deutlich ab. Für Lösungstyp A ergibt sich eine mittlere Bischofit-Affinität von -0,221, für Typ B von -1,049, für Typ C von -2,26 und für Typ D von -4,779. Die sehr deutliche Korrelation der Bischofit-Sättigungen mit den $MgCl_2$ -Gehalten ergibt sich aus der ständigen Anreicherung an Mg im Laufe der Reaktion (Abb. 6-12).

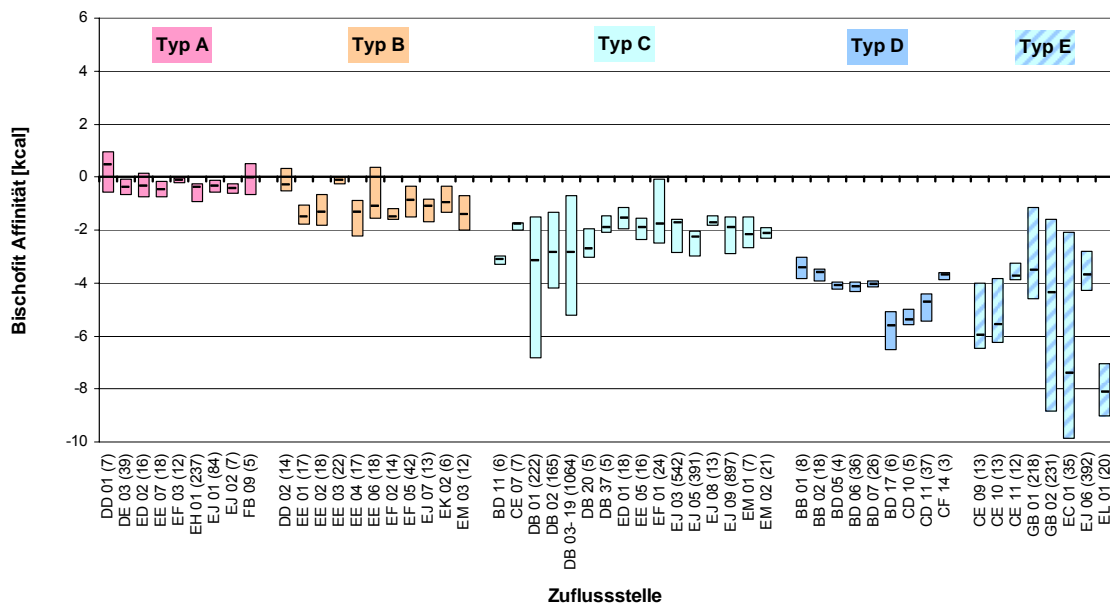


Abb. 6-12 Bischofit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen

Weitere Mineral-Sättigungen

Weitere Mineralsättigungen der untersuchten Lösungen sind der Vollständigkeit halber in Abb. 6-13 - Abb. 6-18 dargestellt. Eine Korrelation mit den Lösungstypen ist nicht oder nur bedingt bei detaillierter Betrachtung möglich.

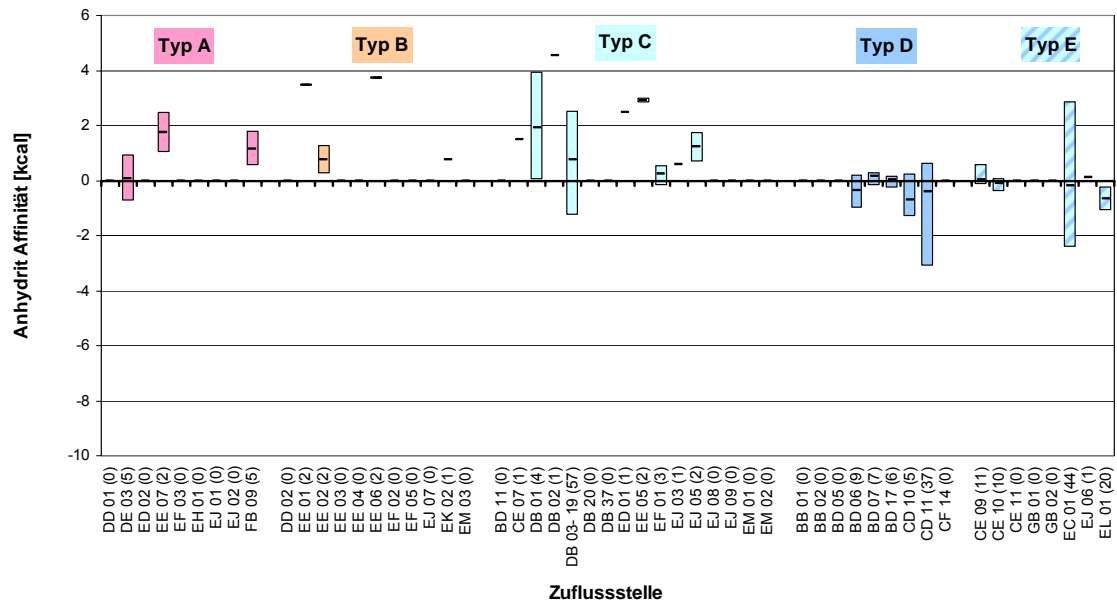


Abb. 6-13 Anhydrit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen

Die wenigen Lösungen, für die Sättigungen an Anhydrit und Polyhalit ausgerechnet werden konnten, sind ein Indiz dafür, dass die für die Berechnung dieser Sättigungswerte benötigten Ca-Gehalte nur in wenigen Fällen vorliegen. Die niedrigen Ca-Gehalte in hochsalinaren und Mg- und Sulfat-reichen Lösungen waren für die Kaliindustrie nicht von Interesse. Entsprechend sind auch die wenigen vorliegenden Werte mit z. T. großen Fehlern behaftet. Mit fallenden $MgCl_2$ -Gehalten in der Lösung nehmen die $CaSO_4$ -Gehalte zu, so dass die Ca-Gehalte leichter und genauer zu bestimmen

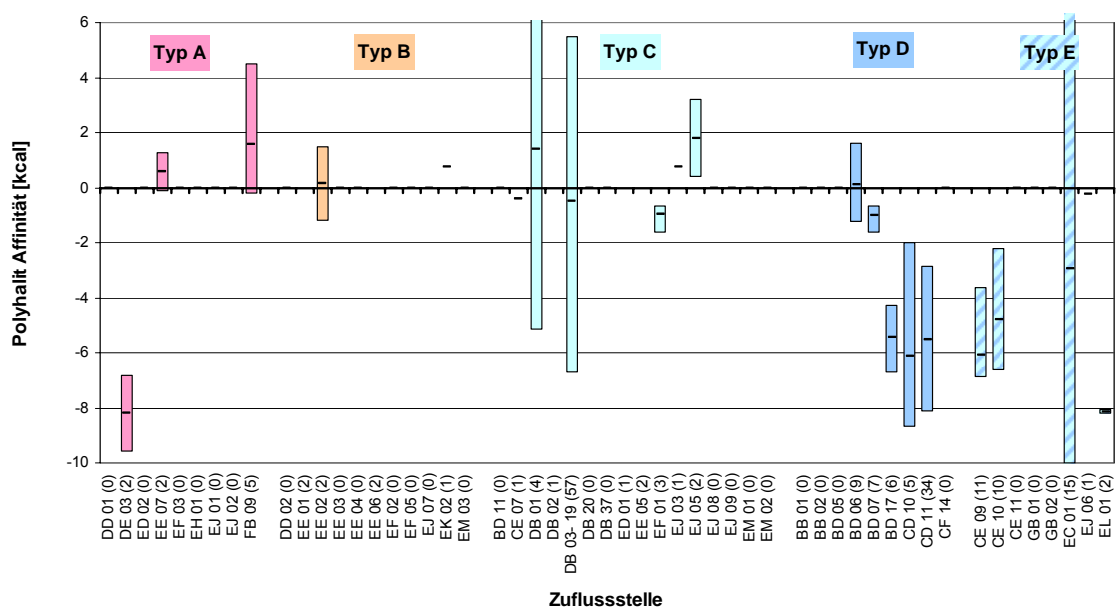


Abb. 6-14 Polyhalit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen

sind. Entsprechend liegen die zuverlässigsten Anhydrit- und Polyhalit-Affinitäten für Lösungen des Typs D vor. In den Ca-reichen CaCl_2 -Lösungen liegt kein Sulfat vor, entsprechend gibt es auch keine Sättigungswerte an Sulfat-haltigen Mineralen (Anhydrit, Polyhalit, Kainit und Kieserit). Soweit solche in Lösungszuflüssen auftreten, handelt es sich um Zuflüsse, die im Laufe ihrer Schüttung von CaCl_2 - zu MgSO_4 -Lösungen oder umgekehrt gewechselt sind.

Abb. 6-15 zeigt die Kainit- und Abb. 6-16 die Kieserit-Sättigungen der untersuchten Lösungen. Wie schon gezeigt, treten diese Bodenkörper nur dann auf, wenn die Lösungen MgSO_4 (und KCl) enthalten. Der Grad der Sättigung an diesen Mineralen ist bei Lösungen, die durch Lösungsmetamorphose entstanden sind, abhängig vom CaCl_2 -Gehalt der in die Salzformation eindringenden Lösung, von der Verfügbarkeit von Sylvit, Carnallit und Kieserit im aufgelösten Gestein und vom Reaktionsfortschritt

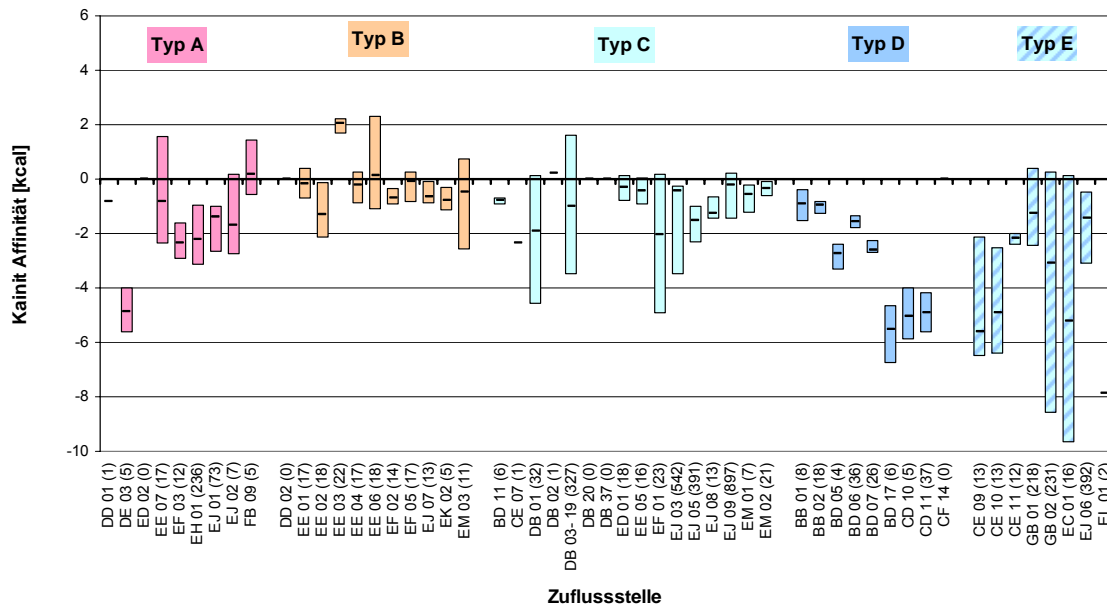


Abb. 6-15 Kainit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mittelddeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen

auf dem Weg zum Gleichgewicht mit diesen Bodenkörpern. Eine detailliertere Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Reaktionsfortschritt, Lösungsschemismus und Sättigungsgrad an Kainit und Kieserit findet sich in Kapitel 7.

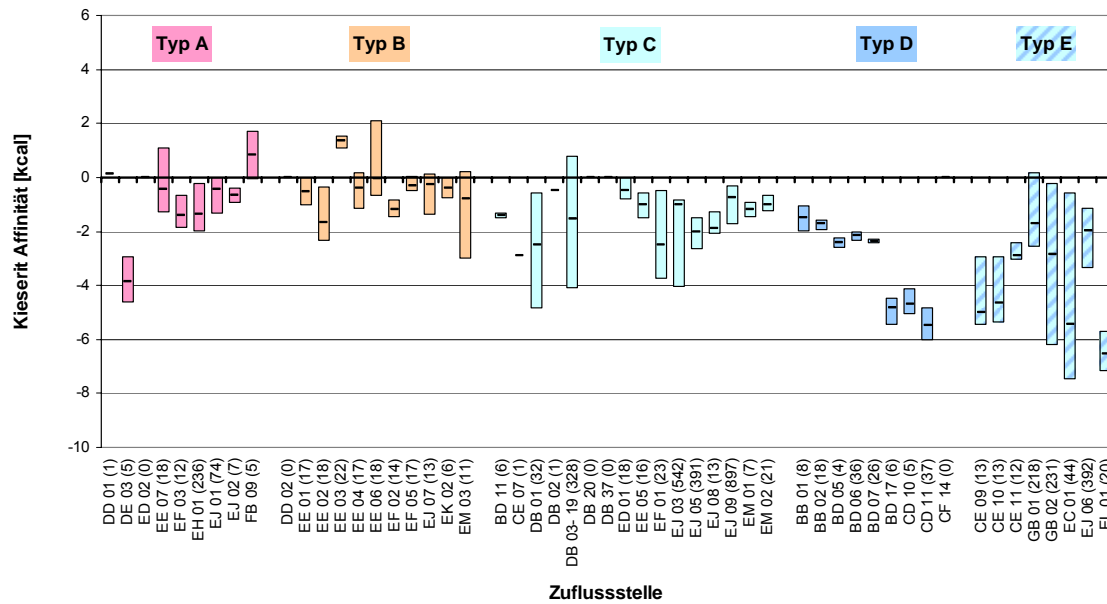


Abb. 6-16 Kieserit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen

In Abb. 6-17 sind die Antarcticit- und in Abb. 6-18 die Tachhydrit-Sättigungen dargestellt. Diese Bodenkörper sind nur in $MgSO_4$ -freien, $CaCl_2$ -haltigen Lösungen zu erwarten.

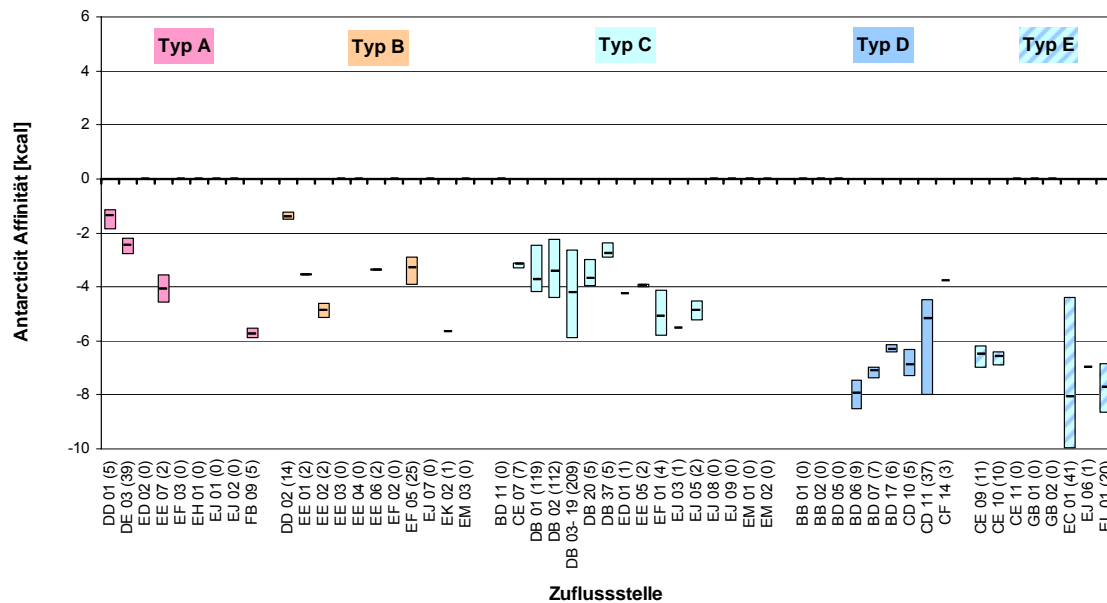


Abb. 6-17 Antarcticit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen

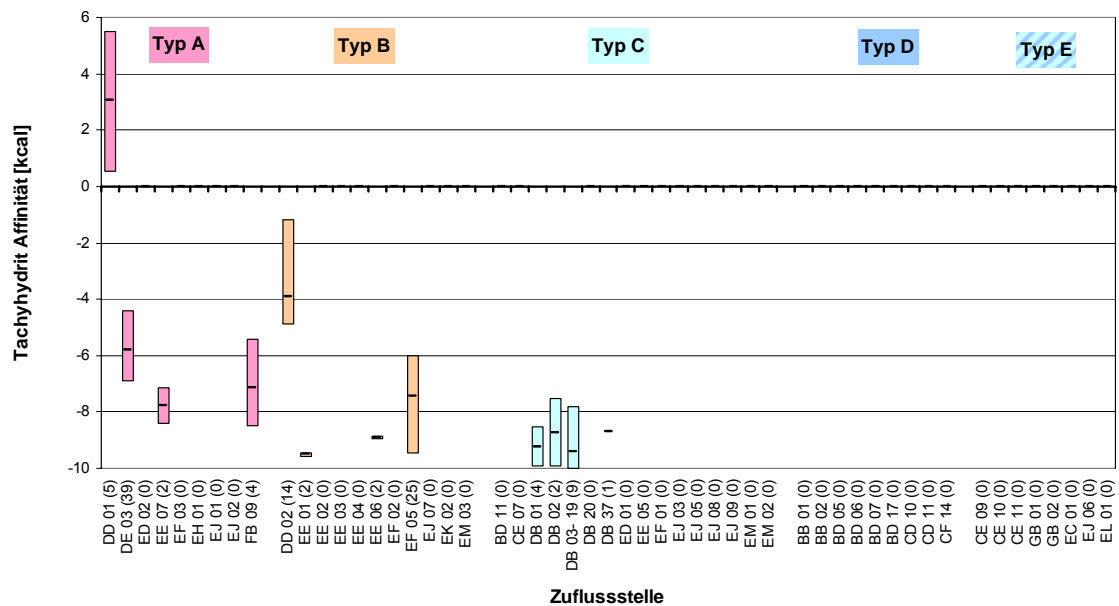


Abb. 6-18 Tachyhydrit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen

6.2 Korrelation zwischen Lösungsschemismus und Mineral-Sättigungen

Salzlösungen können durch Eindunstung von Meerwasser ebenso entstehen wie durch Auflösung von Salzen. Die folgenden quantitativen Betrachtungen dieser Prozesse sollen die Entwicklung der Salzgehalte und die erreichbaren Maximalmengen an den fiktiven Salzen $MgCl_2$, $NaCl$, KCl , $MgSO_4$ und $CaSO_4$ aufzeigen. Diese EQ3/6-Berechnungen liefern die Grundlage für die Beurteilung, ob die empirisch, aufgrund von langjährigen Erfahrungen, nach dem $MgCl_2$ -Gehalt aufgestellten Lösungstypen eine belastbare thermodynamische Grundlage haben. Kann diese Frage positiv beantwortet werden, ergeben sich aus dem Vergleich von gemessenem Lösungsschemismus und berechneten Reaktionsverläufen präzise Anhaltspunkte für die genetische Einordnung einer Salzlösung. Es könnte dann z. B. (Gleichgewicht vorausgesetzt) schon allein aufgrund des $MgCl_2$ -Gehaltes eingeschätzt werden, ob eine Lösung durch Kontakt mit Hartsalz oder mit Carnallit entstanden ist. Eine nähere Betrachtung könnte eventuell sogar eine weitergehende Differenzierung nach der mineralogischen Zusammensetzung dieser Kalisalze ermöglichen. Tab. 6-6 zeigt die Zusammensetzung der Ausgangslösung und Tab. 6-7 Beispiele für die Zusammensetzung der untersuchten Kalisalze. Die Abb. 7-2 bis Abb. 7-17 zeigen die berechneten Reaktionsverläufe dargestellt als Entwicklung der Salzgehalte in g/l. Diese Darstellung erleichtert den Vergleich mit den untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands.

Tab. 6-6 Zusammensetzung der Ausgangslösung

Ausgangslösung [mol/kg H ₂ O] (gesättigt an Calcit, Dolomit, Halit)	
Na ⁺	6,0678
K ⁺	1,00E-10
Ca ⁺⁺	0,038012
Mg ⁺⁺	0,012453
Cl ⁻	6,0678
SO ₄ ⁻	0,050456
HCO ₃ ⁻	0,22104
H ⁺	8,3571

Tab. 6-7 Beispiele für mineralogische Zusammensetzungen typischer Carnallitite (Staßfurter Sattel) und Hartsalze (Nordostflanke des Rosslebener Sattel)

Carnallit Staßfurter Sattel nach E. Fulda (1935)		Carnallit Staßfurter Sattel nach Hänsch (1953)	
Anhydrit	2,0 %	KCl	12,40 %
Carnallit	55,0 %	MgCl ₂	15,93 %
Halit	26,0 %	NaCl	33,46 %
Kieserit	17,0 %	MgSO ₄	13,91 %
Polyhalit		CaSO ₄	1,70 %
Sylvin		CaO	0,75 %
Ton / Unlöslich		H ₂ O	25,50 %
		Unlösliches	0,85 %

Mineralgehalt [%]	Sylvinitisches Hartsalz	Kieseritisches Hartsalz	Polyhalitisches Hartsalz	Langbeinitisches Hartsalz
Halit	40 - 65	50 - 60	45 - 55	40 - 45
Sylvin	20 - 35	10 - 20	15 - 25	5 - 10
Langbeinit	2 - 3	1 - 2	3 - 5	10 - 50
Polyhalit	3 - 5	2 - 4	10 - 15	2 - 5
Kieserit	2 - 6	15 - 25	5 - 6	8 - 12
Kainit	1 - 4	1 - 2	2 - 6	1 - 2
Anhydrit	0,5 - 1	0,5 - 1	1 - 1	1 - 2
Carnallit	1 - 1	1 - 1	1 - 2	1 - 1
Ton / Unlöslich	1 - 1	1 - 1	1 - 2	1 - 2

Hartsalz an der Nordostflanke des Rosslebener Sattels

Mineralgehalt [%]	Polyhalitregion	Carnallitischer Kieserithalit	Anhydritischer Carnallithalit	Sylvinitischer Kieseritanhydrithalit
	nach Fulda (1935)			
Anhydrit	1,1 - 1,1	0,4 - 0,4	0,8 - 3,6	3,4 - 5,6
Carnallit	0,05 - 0,05	14,9 - 22,4	6,0 - 6,0	0,7 - 0,7
Halit	93,5 - 93,5	46,5 - 53,0	86,0 - 95,0	82,0 - 87,0
Kieserit		30,6 - 30,9	1,8 - 1,8	3,6 - 5,0
Polyhalit	5,2 - 5,2		0,8 - 0,8	0,5 - 0,7
Sylvin				2,3 - 5,9
Ton / Unlöslich	0,15 - 0,15			

6.3 Sicherheitsrelevante Eigenschaften der Lösungen der einzelnen Lösungstypen

Für die große Mehrheit der erfassten Salzlösungszutritte lassen die MgCl_2 -Gehalte eine übersichtliche und zwanglose Gruppierung in die Lösungstypen A, B, C und D zu. Überschneidungen gibt es zwar, aber über die Betrachtung der Mittelwerte der MgCl_2 -Gehalte ist eine klare Zuordnung der Lösungen zu den Gruppen fast immer möglich. Die jahrzehntelangen praktischen Erfahrungen der Grubengeologen mit der Entwicklung der hier beschriebenen Salzlösungen erlaubt eine Einschätzung ihres Gefährdungspotentials.

– Lösungstyp A

Lösungen des Typs A, mit MgCl_2 -Gehalten über 400 g/l, sind von früheren Bearbeitern geschlossenen Systemen zugeordnet worden, da die Zuflussmengen nach Erreichen eines Maximums zurückgingen. Alle diese Zuflüsse sind versiegt. Beispiele sind: DD 01, DE 03, ED 02, EE 07, EF 03, EH 01, EJ 01, EJ 02 und Einzelbestimmungen FB 01, FB 09, FB 11, FB 24. Der größte Zufluss dieses Typs hatte eine Gesamtzuflussmenge von rund einer halben Million m^3 .

– Lösungstyp B

Die MgCl_2 -Gehalte des Lösungstyps B liegen zwischen 320 und 400 g/l. Bei den Lösungen dieses Typs besteht kein bekannter Kontakt zu Oberflächenwässern. Nach früheren Bearbeitern (Spackeler 1957, Schwandt 1978, 1993) stammen auch diese Lösungen mit hoher Wahrscheinlichkeit aus geschlossenen Systemen. Auch hier gingen die Zuflussmengen mit der Zeit in der Regel zurück. Beispiele DD 02, EE 01-EE 06, ED 01, EF 02, EF 05, EJ 07, EK 02, EM 03.

– Lösungstyp C

Die MgCl_2 -Gehalte liegen in der Regel zwischen 150 und knapp über 320 g/l. Bei den Lösungen dieses Typs ist nicht in jedem Fall bekannt, ob sie Kontakt zum Oberflächenwasser hatten oder noch haben. Manche dieser Zuflüsse kamen aus dem Kainithut, der aus der Lösungsmetamorphose von Carnallit durch Deckgebirgswässer hervorgegangen ist. Beispiele für diesen Typ sind die Zuflüsse: BD 11, CE 07, DB 01, DB 02, DB 03-19, DB 20, DB 37, ED 01, EE 05, EF 01, EJ 03, EJ 05, EJ 08-09; EM 01-02.

– Lösungstyp D

Dieser Typ weist die niedrigsten MgCl_2 -Gehalte (unter 150 g/l) und entsprechend die höchsten NaCl-Gehalte (100 – 300 g/l) auf. Ein Kontakt zu Deckgebirgslösungen ist nicht in jedem Fall erwiesen, aber in der Regel anzunehmen. Bei manchen

Lösungen dieses Typs wurde im Laufe der geologischen Entwicklung der ursprüngliche Kontakt zu Deckgebirgswässern wieder unterbrochen. Beim Anfahren der Lösungsvorkommen kam es zum Ausfluss aus geschlossenen Systemen, die versiegten. Lösungsvorkommen in Steinsalz- oder Kalisalzbereichen hatten geringe Volumina und versiegten schnell. Waren die Lösungen dagegen in anhydritischen oder karbonatischen Gesteinen (Anhydritmittel, Hauptanhydrit, Werraanhydrit, Hauptdolomit, Plattendolomit, Zechsteinkalk) gespeichert, waren die Gesamtzuflussmengen größer. Beispiele: BB 01, BB 02, BD 05-07, BD 16, BD 17, CD 10-11, CE 12-15, CF 14.

– **Lösungstyp E**

Abweichend von der Methodik der Typisierung nach dem $MgCl_2$ -Gehalt erfolgte die Ausweisung eines **Lösungstyps E**. Die Bandbreite der $MgCl_2$ -Gehalte liegt bei den Lösungen dieses Typs zwischen 320 g/l und 0 g/l und umfasst Lösungen, die unter den Lösungstypen C und D bereits besprochen wurden. Der wichtigste Unterschied zu den Lösungstypen C und D liegt in dem Umstand, dass bei allen Zuflüssen des Typs E ein Kontakt mit dem Deckgebirge nachgewiesen ist und die Gruben über diese Zuflüsse abgesoffen sind. Bei den Salzlösungszutritten dieses Typs ist der $MgCl_2$ -Gehalt in der Anfangsphase hoch. Im Laufe der Zuflussentwicklung nimmt er ab und lässt den NaCl-Gehalt kurzfristig ansteigen und danach wieder abfallen. Der kurzfristige Anstieg der NaCl-Gehalte ist auf eine zunehmende Untersättigung an Mg-reichen Mineralen zurückzuführen. Bei den im Untersuchungsgebiet beobachteten Zuflüssen des Typs E konnte ein Zusammenhang der Zuflüsse mit dem Deckgebirge durch zahlreiche Detailuntersuchungen und oft langfristige Beobachtungen nachgewiesen werden. Beispiele: CE 09-11, GB 01-02, EC 01, EJ 06, EL 01. Eine ausführliche Beschreibung der Entwicklung von Lösungen, die zum Absaufen einer Grube führen, findet sich in Herbert (2000). Aus dieser Unterlage stammen auch die Abb. 6-19 bis Abb. 6-21.

Die Lösungsentwicklung vom ersten Auftritt des Zuflusses bis zum Absaufen der Grube, wie sie sich im Jänecke-Dreieck darstellt, zeigt Abb. 6-22.

Die Beurteilung des Gefährdungspotentials von Lösungszuflüssen ist trotz der o.g. typischen Beispiele allein auf Grund der Charakterisierung der chemischen Zusammensetzung und der Typisierung der Salzlösungsvorkommen nicht generell möglich. Fest steht nur, dass Lösungen des Typs A unkritisch sind, während Lösungen des Typs E zum Absaufen führen. Da sich die potentiell gefährlichen Lösungen jedoch auch auf die Lösungstypen B, C und D verteilen, ist es wichtig, die Aussagen nicht aus Einzelwerten

herzuleiten, sondern die gesamte Lösungsentwicklung zu betrachten. Um das Gefährdungspotential frühzeitig richtig einzuschätzen, sind neben den chemischen Kriterien noch andere Kriterien heranzuziehen.

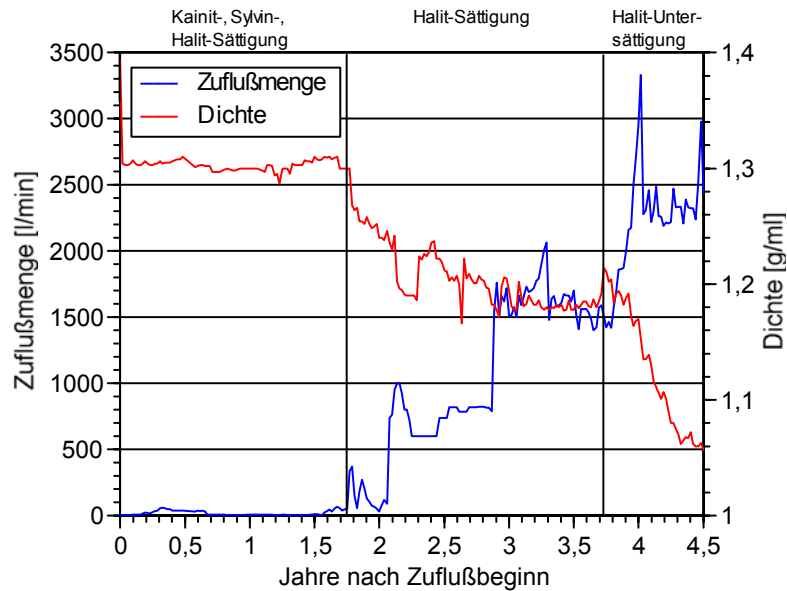


Abb. 6-19 Entwicklung der Zuflussmengen und der Lösungsdichten im Zufluss GB 02 — Rolloch 6 im Südwestfeld des Kalibergwerkes Solvayhall I/II (nach Schwandt 1993)

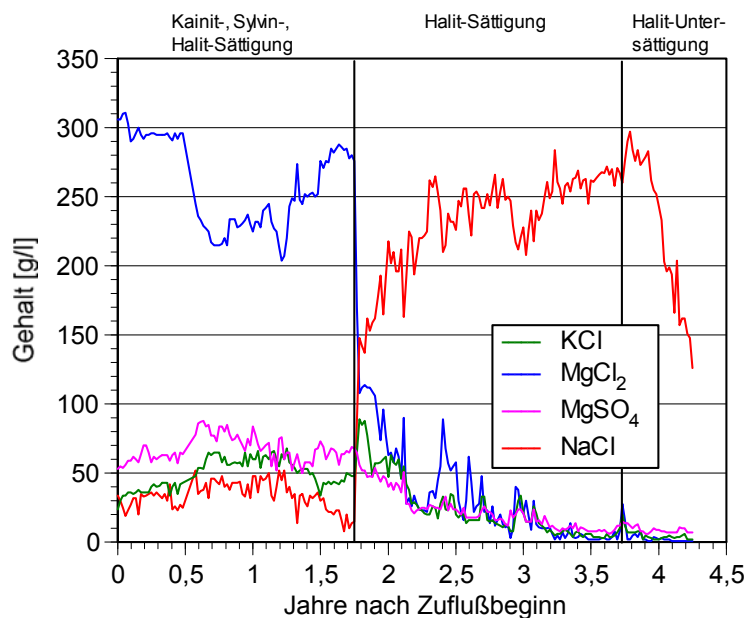


Abb. 6-20 Entwicklung der Salzgehalte der Lösungen im Zufluss GB 02 — Rolloch 6 im Südwestfeld des Kalibergwerkes Solvayhall I/II (Herbert 2000)

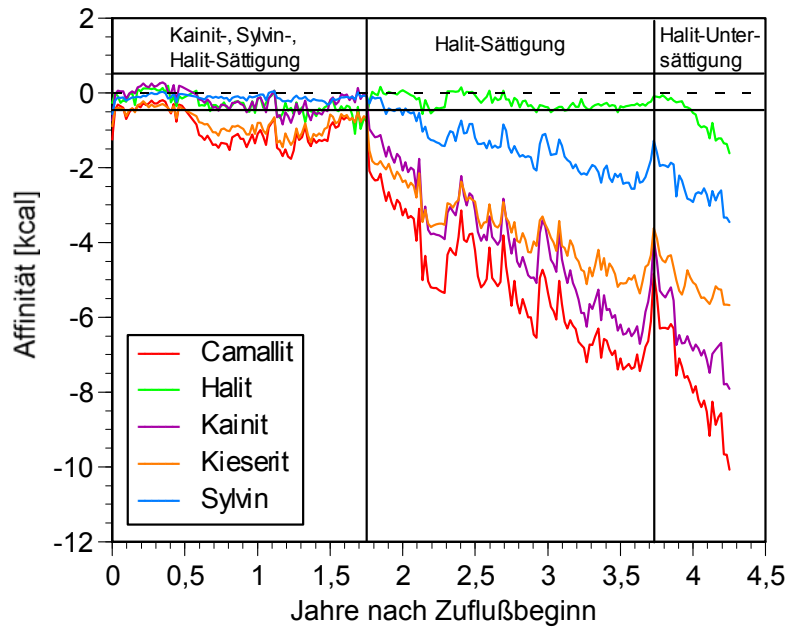


Abb. 6-21 Entwicklung der Sättigungsverhältnisse der Lösungen im Zufluss GB 02 — Rollloch 6 im Südwestfeld des Kalibergwerkes Solvayhall I/II (Herbert (2000))

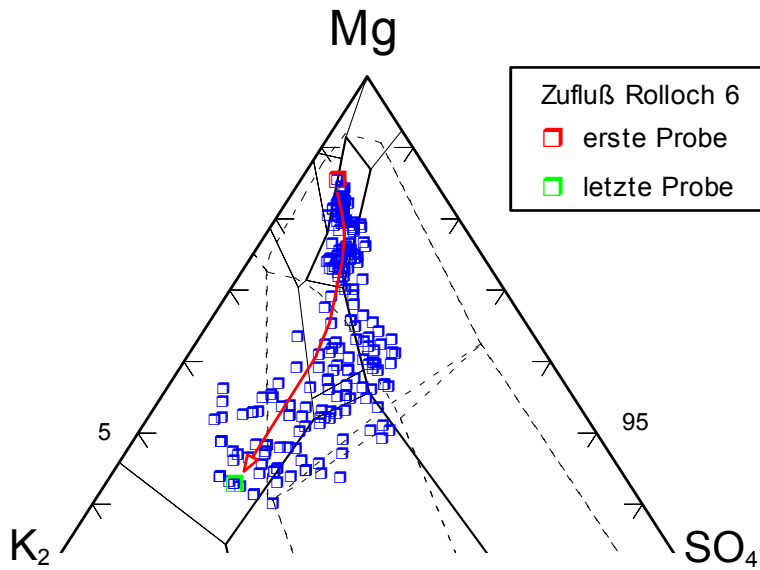


Abb. 6-22 Entwicklung der Lösungszusammensetzung im Zufluss GB02 — Rollloch 6 im Südwestfeld des Kalibergwerkes Solvayhall I/II in einem Ausschnitt des Mg-SO₄-K₂-Dreiecks

7 Geochemische Prozesse bei der Bildung von Salzlösungen

In Herrmann (1981) wird die Genese mariner Kalisalzlagerstätten des Sulfat- und des Chlorid-Typs diskutiert, Prozesse wie die primäre Kristallisation aus eindunstendem Meerwasser, Diagenese und Metamorphose der Lagerstätten werden qualitativ beschrieben. Durch Meerwassereindunstung, Lösungsmetamorphose und komplexere Reaktionen der dabei gebildeten Lösungen mit Karbonaten lassen sich im Prinzip alle gemessenen Zusammensetzungen der Lösungen Mitteldeutschlands erklären. Um quantitative Informationen über die Lösungsentwicklung bei solchen Prozessen zu gewinnen, wurden die o. g. Prozesse modelliert. Welches der genetischen Modelle zutreffend ist, um eine Lösungszusammensetzung zu erklären, muss durch eine Betrachtung der geologischen Randbedingungen unter denen die Lösungen auftreten, geklärt werden. Vorab sei hier schon gesagt, dass praktisch alle untersuchten Lösungen Mitteldeutschlands durch unterschiedliche Prozesse der Lösungsmetamorphose zu erklären sind. Die Meerwassereindunstung wird nur der Vollständigkeit halber diskutiert. Sie zeigt, wie Kalisalze entstanden sind, und erlaubt damit auch Rückschlüsse darauf, welche Lösungen durch die Auflösung mariner Salzparagenesen zu erwarten sind.

Die in Kapitel 7.1 und 7.2 beschriebenen Modellrechnungen zeigen qualitativ und quantitativ alle Prozesse auf, die zutreffend angewendet, jede einzelne der gemessenen Lösungszusammensetzungen erklären könnten. Dies wird durch einen Vergleich der Roßlebenlösungen DB 01-DB 03 mit den Modellierungsergebnissen exemplarisch belegt. Aus solchen Betrachtungen wird auch ersichtlich, dass zwischen der analytischen Gruppierung nach dem $MgCl_2$ -Gehalt und der komplexeren genetischen Betrachtung auf thermodynamischer Basis eine gute Übereinstimmung besteht.

In Kapitel 6.1 wurde gezeigt, dass es neben dem $MgCl_2$ -Gehalt noch ein anderes Kriterium gibt, Salzlösungen einzuteilen. Unabhängig von der Höhe der $MgCl_2$ -Gehalte gibt es Lösungen, die $MgSO_4$, aber kein $CaCl_2$ und andere, die $CaCl_2$ aber kein $MgSO_4$ enthalten. Die Bildung sulfathaltiger Lösungen wird in Kapitel 7.1 und die der $CaCl_2$ -haltigen Lösungen in Kapitel 7.2 vorgestellt.

7.1 Bildung sulfathaltiger Lösungen

Sulfathaltige Lösungen können sich durch Meerwassereindunstung ebenso bilden wie durch die Auflösung von Kalisalzen des Sulfattyps.

7.1.1 Eindunstung des Meerwassers

Da normales Meerwasser $MgSO_4$ enthält, werden durch Eindunstung $MgSO_4$ -haltige Lösungen und schließlich Kalisalzlagerstätten des Sulfattyps mit Halit, Sylvin, Carnallit, Kainit, Kieserit, Polyhalit und Langbeinit gebildet. Wie dieser Prozess im Einzelnen abläuft, wird in Braitsch (1971) ausführlich beschrieben. Die dort gezeigten Zusammenhänge konnten durch EQ6-Eindunstungsrechnungen (Abb. 7-1) sehr genau nachvollzogen werden. $CaCl_2$ -haltige Lösungen und $CaCl_2$ -haltige Minerale wie Antarcticit und Tachhydrit werden bei der Eindunstung von normalem Meerwasser nicht gebildet. Jedoch können Lösungen, die sich auf dem Eindunstungspfad bilden, wie in Kapitel 7.2 gezeigt wird, mit Karbonaten reagieren und zum Verbrauch von $MgSO_4$ und zum Auftreten von $CaCl_2$ in den Lösungen führen.

Abb. 7-1 zeigt die Lösungsentwicklung und Abfolge der Ausscheidung von Salzen bei zunehmender Eindunstung von einem Liter normalem Meerwasser (genauer, der Menge Meerwasser mit einem Liter Wasser in Lösung). Auf der Ordinate sind die Salzgehalte in g/l in Lösung und auf der Abszisse die in jedem Schritt der Eindunstung verbleibende Menge Wasser dargestellt. Jeder Knick in den Kurven der Entwicklung der Salzgehalte in Lösung entspricht dem Erreichen der Sättigung und der beginnenden Ausscheidung eines bestimmten Minerals. Die gestrichelten senkrechten Linien zeigen, welche Zusammensetzung die Lösung beim Einsetzen der Halit-, der Kieserit-, der Carnallit- und schließlich der Bischofit-Sättigung erreicht.

7.1.2 Lösungsmetamorphose

Der Prozess der Auflösung und Umbildung von Kalisalzen ist unter dem Begriff der Lösungsmetamorphose bekannt. Die marinen Evaporite reagieren empfindlich auf die Einwirkung ungesättigter Lösungen. Minerale wie Tachhydrit, Carnallit, Sylvin und Halit gehören zu den wasserlöslichsten Verbindungen der oberen Erdkruste. Bei der Einwirkung ungesättigter Lösungen auf Salzgesteine werden anstehende Minerale (Chloride und Sulfate) gelöst oder inkongruent zersetzt. Dabei entstehen neue Minerale. Die Lösungsmetamorphose war in allen deutschen Zechstein-Salzlagerstätten wirksam. Ein gutes Beispiel dafür ist die sekundäre Bildung eines Teils des kieseritischen Hartsalzes in den Kaliflözen der Werra-Serie. Das primäre Ausgangsgestein war ein Kieserit-haltiger Carnallit, welcher durch ungesättigte Salzlösungen zersetzt wurde. Dabei bildete sich aus der Paragenese Carnallit + Kieserit + Halit durch die Einwirkung von NaCl-Lösung kieseritisches Hartsalz und eine $MgCl_2$ -reiche (Q)-Lösung.

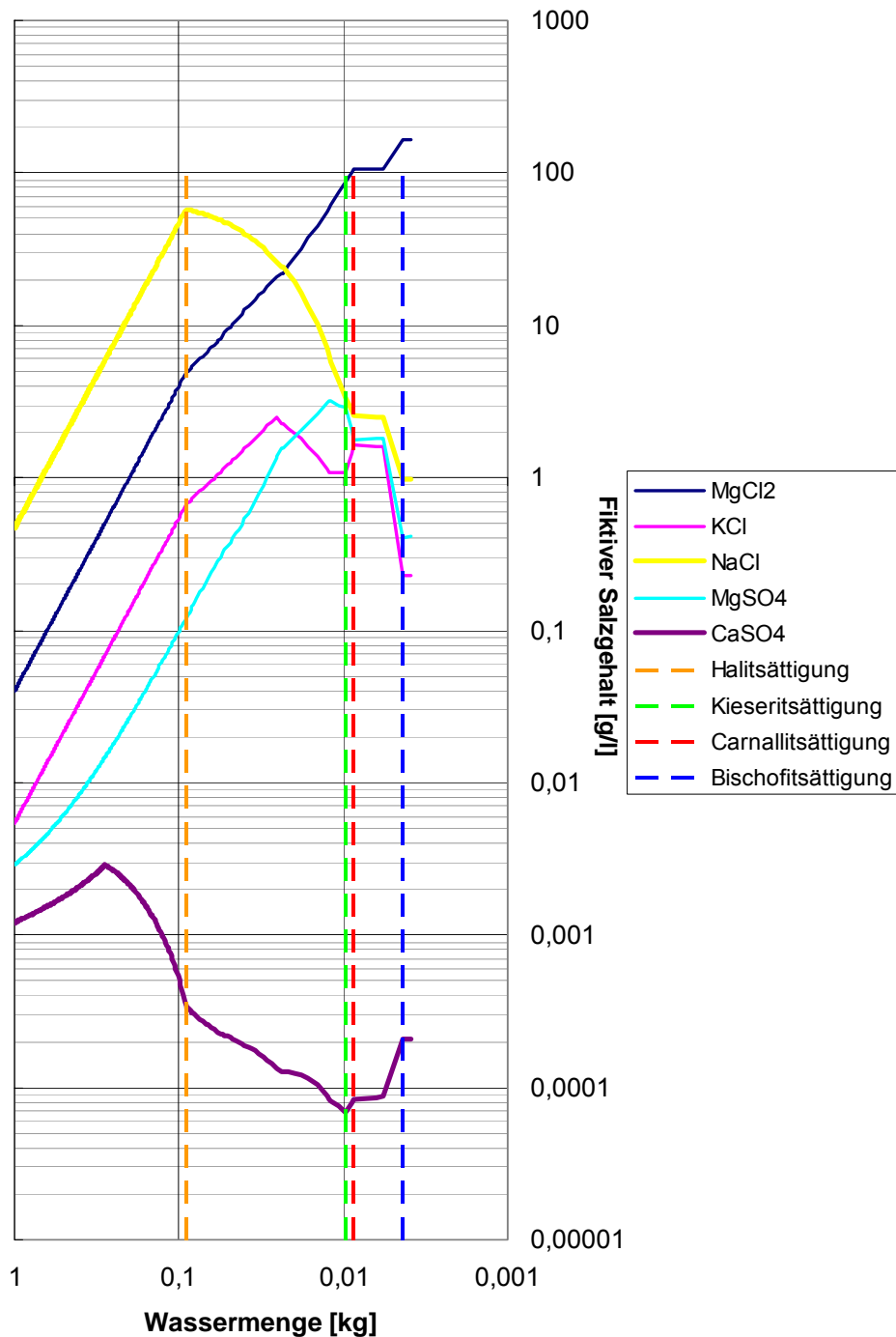


Abb. 7-1 Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei zunehmender Eindunstung des Meerwassers

7.1.2.1 Mineralogische Zusammensetzung von Salzgesteinen

Bevor in den folgenden Kapiteln die Lösungsmetamorphose unterschiedlicher Kaligesteine besprochen wird, soll hier noch ein kurzer Überblick über die Mineralogie der Salzgesteine gegeben werden. Die mineralogische Zusammensetzung bedingt maß-

geblich die Zusammensetzung der Lösungen, die mit diesen Salzen in Kontakt kommen.

In den Salzlagerstätten sind ca. 50 Haupt- und Nebenminerale nachgewiesen worden. Übersichten finden sich z.B. bei Kühn (1959), Braitsch (1962), Sonnenfeld (1984) und Müller (1988). Die wichtigsten Salzminerale sind in Tab. 7-1 zusammengefasst. Die gesteinsbildenden Minerale potentieller Endlagerhorizonte und von Kaliflözen sind durch Fettdruck hervorgehoben.

Tab. 7-1 Die Minerale der Zechsteinevaporite

Mineralname	Chemische Formel	Mineralname	Chemische Formel
Anhydrit (a)	CaSO₄	Langbeinit (lg)	K ₂ Mg ₂ (SO ₄) ₃
Bischofit (bi)	MgCl ₂ • 6 H ₂ O	Leonit (le)	K ₂ Mg(SO ₄) ₂ • 4H ₂ O
Blödit (bl)	Na ₂ Mg(SO ₄) ₂	Leonhardtit (1h)	MgSO ₄ • 4 H ₂ O
Calcit (ca)	CaCO ₃	Löweit (loe)	Na ₁₂ Mg ₇ (SO ₄) ₁₃ • 15 H ₂ O
Carnallit (c)	KMgCl₃ • 6H₂O	Magnesit (m)	MgCO ₃
D'Ansit (da)	Na ₂₁ MgCl ₃ (SO ₄) ₁₀	Polyhalit (p)	K₂MgCa₂(SO₄)₄ • 2 H₂O
Dolomit (d)	CaMg(CO ₃) ₂	Pentahydrit (5h)	MgSO ₄ • 5 H ₂ O
Epsomit (e)	MgSO ₄ • 7 H ₂ O	Pentasalz (ps)	K ₂ Ca ₅ (SO ₄) ₆ • H ₂ O
Gips (g)	CaSO ₄ • 2 H ₂ O	Schönit (sh)	K ₂ Mg(SO ₄) ₂ • 6 H ₂ O
Glaserit (gs)	K ₃ Na(SO ₄) ₂	Sylvin (sy)	KCl
Glauberit (gb)	Na ₂ Ca(SO ₄) ₂	Syngenit (sg)	K ₂ Ca(SO ₄) ₂ • H ₂ O
Halit (hl)	NaCl	Thenardit (th)	NaSO ₄
Hexahydrit (hx)	MgSO ₄ • 6 H ₂ O	Tachhydrit (ta)	CaMg ₂ Cl ₆ • 12 H ₂ O
Kainit (k)	KMgClSO ₄ • 3 H ₂ O	Vanthoffit (vh)	Na ₆ Mg(SO ₄) ₄
Kieserit (ks)	MgSO₄ • H₂O		

Einige Gesteine der marinen Evaporite sind annähernd monomineralisch zusammengesetzt, z.B. Steinsalz und Anhydrit, andere wie die Kalisalze bestehen aus charakteristischen Mineralparagenesen wie Carnallitit, Sylvinit oder Hartsalz.

Die Nomenklatur der Salzgesteine ist seit Rinne (1908) auf dem Mineralbestand begründet. Komponenten kleiner 5 % werden im Namen nicht erfasst, es sei denn, dass sie aus speziellen Gründen für das Gestein wichtig sind. Nebenkomponenten zwischen 5 – 20 % werden in adjektivischer Form dem Namen vorgesetzt, Hauptkomponenten größer 20% bilden den Gesteinsnamen; das häufigste Mineral steht am Ende. Ein Salzgestein aus 4 % Kieserit, 16 % Anhydrit, 35 % Sylvin und 45 % Steinsalz wird demnach als (Kieserit führender) anhydritischer Sylvin-Halit bezeichnet. Das Suffix "it" zur Kennzeichnung eines Gesteins hat sich nicht allgemein durchgesetzt, ist aber bei Sylvinit und Carnallitit gebräuchlich. Eine Abweichung von der No-

menklaturregel wird häufig beim "Hartsalz" gemacht. Es handelt sich hierbei um Sylvin-Halite, die noch ein sulfatisches Mineral enthalten, das dem Hauer in der Grube beim Bohren als besonders hart auffällt (Richter-Bernburg 1968) und daher als Hartsalz bezeichnet wird. Man unterscheidet:

Kieserit-Sylvin-Halit	Kieseritisches Hartsalz
Anhydrit-Sylvin-Halit	Anhydritisches Hartsalz
Langbeinit-Sylvin-Halit	Langbeinitisches Hartsalz
Polyhalit-Sylvin-Halit	Polyhalitisches Hartsalz
Glaserit-Sylvin-Halit	Glaseritisches Hartsalz
Kainit-Sylvin-Halit	Kainitisches Hartsalz

Endlager sollten in möglichst reinen Steinsalzhorizonten eingerichtet werden. Infolge ihrer großen Mächtigkeiten kommen dafür hauptsächlich die Steinsalzhorizonte der Staßfurt-Serie (Na₂) und untergeordnet der Leine-Serie (Na₃) in Frage. Die große primäre Mächtigkeit dieser Steinsalzhorizonte ist durch die Verfaltung während des Salzaufstieges und der Salzstockbildung in Norddeutschland noch vervielfacht worden. In der flachen Lagerung in Mitteldeutschland können ebenfalls Bereiche mit großen primären Mächtigkeiten ausgewiesen werden. Dies bietet die Chance, ein Endlager ins Zentrum mächtiger Steinsalzsichten zu legen und große Sicherheitsabstände zu potentiell gefährlichen oder unerwünschten Salzformationen wie Anhydrit, Salzton oder Kalisalzen einzuhalten.

In Tab. 7-2 sind Literaturdaten zur mineralogischen Zusammensetzung des Staßfurt-(Na₂) und Leine-Steinsalzes (Na₃) aus den Salzstöcken Asse und Gorleben zusammengestellt. Ähnliche Zusammensetzungen weisen auch die entsprechenden stratigraphischen Horizonte in Mitteldeutschland auf. Halit, Anhydrit und Polyhalit bilden die mineralogischen Hauptgemengeteile. Davon stellt Halit mit über 90 % den Hauptanteil dar. Anhydrit ist mit bis zu 5 % fast immer vorhanden, während Polyhalit sehr häufig mit bis zu 3,5 % auftritt. Kieserit und Carnallit sind in der Regel im Steinsalz nicht vorhanden. Sie treten nur gelegentlich als Nebengemengeteile auf. Wasserunlösliche Spurengemengeteile sind Tone und untergeordnet autigene Quarze und einige detritische Schwerminerale.

In den Salinarfolgen des Zechsteins treten fast immer auch Kalium- und Magnesiumsalze auf, die überwiegend in den Kalisalzlager konzentriert sind. Für die Kaligewinnung sind Sylvinit, Hartsalze und Carnallitite die wichtigsten Salzgesteine. Diese Kalilager sind wegen ihrer besondern Eigenschaften auch in den Sicherheitsbetrachtungen von Untertagedeponien für chemisch-toxische Abfälle und von Endlagern für

radioaktive Abfälle zu berücksichtigen. Die Untertagedeponien Herfa-Neurode und Zielitz sind in ehemaligen Kalibergwerken eingerichtet. Für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen sind zwar mächtige Steinsalzhorizonte und keine Kalisalze in der Diskussion. Wegen der großen Häufigkeit von Kalisalzen muss davon ausgegangen werden, dass diese bei den Erkundungs- und Aufführungsarbeiten auch im Endlager aufgeschlossen werden. Deshalb sind Arbeiten zum Mineralbestand und zu den Lösungssystemen sowohl für die Langzeitsicherheitsbetrachtungen von Untertagedeponien als auch von Endlagern erforderlich. Im Falle eines Lösungszutritts beeinflussen die Kalilager die resultierende Lösungszusammensetzung in besonderem Maße. Es handelt sich bei diesen Gesteinen teils um primäre und teils um sekundäre Bildungen mit unterschiedlicher Mächtigkeit und unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung.

Tab. 7-2 Mineralogische Zusammensetzung des Staßfurt- (Na₂) und des Leine-Steinsalzes (Na₃) (Herbert 2000)

Stratigr. Horizont	Staßfurt-Steinsalz (Na ₂)			Leine-Steinsalz (Na ₃)			
	Hauptsalz Na ₂ B	Speisesalz Na ₂ SP	Polyhalitisches Übergangssalz	k. A.	Na ₃ B	Banksalz Bändersalz	Basissalz Liniensalz Orangesalz
Untergliederung	Asse	Asse	Asse	Gorleben	Asse	Gorleben	Gorleben
Salzstruktur	Jockwer (1981)	Jockwer (1981)	Jockwer (1981)	Bornemann et al. (1988)	Jockwer (1981)	Bornemann et al. (1988)	Bornemann et al. (1988)
Literatur	Mineralgehalt [Gew.-%]						
	92,60	98,90	95,06	95	97,95	97,1	94,4
Halit	3,96	0,13	1,29	4,9	1,27	0,4	
Anhydrit	3,42	0,79	3,05	0,1	0,54	2,0	5,0
Polyhalit	0,09		0,55		0,06		0,5
Kieserit						0,5	<0,1
Carnallit				<0,1	k.A.	<1	<1
H ₂ O-unlös.	0,26	0,15	0,57	k.A.	0,07	k.A.	k.A.
H ₂ O							

Zu den primären Kalilagern gehören die Carnallitite (D'Ans und Kühn 1940, Borchert 1959, Braitsch 1962, Kühn 1972, Herrmann 1981 u.a.). Rund 80 % der deutschen Kalisalzlagerstätten bestehen aus Carnallitit. Carnallitite sind Salzgesteine, die hauptsächlich aus Carnallit, Halit und Kieserit bestehen. Untergeordnet können noch Anhydrit und Sylvinit, seltener Bischofit und Tachydrilit vorkommen. Carnallitite bauen vorwiegend die Kaliflöze K₂, K₁ und seltener auch K₃ auf. Beispiele für die mineralogische Zusammensetzung typischer Carnallitite und Hartsalze aus Mitteldeutschland sind in Tab. 6-7 zusammengefasst.

Die Sylviniten und Hartsalze in den Zechsteinfohlen Norddeutschlands sind meist keine primären Bildungen, sondern durch Umlösung aus Carnalliten entstanden (Borchert 1959, Braitsch 1962, Kühn 1972, Herrmann 1981 u.a.). In Mitteldeutschland ist ein Teil der Hartsalze auch primären Ursprungs. Sylviniten unterscheiden sich von den Hartsalzen durch höhere Sylvinit- und niedrigere Sulfatgehalte. Von den verschiedenen Typen ist das kieseritische Hartsalz am weitesten verbreitet (Singewald, 1988) und daher auch wirtschaftlich und für die Endlagerung von größter Bedeutung. Wahrscheinlich zur Zeit der postkretazischen tektonischen Bewegungen sind warme Tiefenwässer in begrenzter Menge von unten in die primären carnallitischen Kalilager eingedrungen und haben diese in Abhängigkeit von der mineralogischen Zusammensetzung des Ausgangsgesteins unterschiedlich verändert (Borchert 1959). Dieser Vorgang wird als Lösungsmetamorphose bezeichnet. War der Carnallit reich an Kieserit, sind daraus sekundäre kieseritische Hartsalze entstanden. Solche typischen Hartsalze werden gebildet, wenn die Temperatur bei der Umbildung der Hartsalze höher als 72 °C war. Durch das Einwirken größerer Mengen heißer Tiefenwässer auf bereits gebildete kieseritische Hartsalze entstanden langbeinitische Hartsalze. Wurde eine Temperatur von 55 °C unterschritten, kam es zur Bildung von kainitischem Hartsalz. Die infolge der Lösungsmetamorphose gebildeten MgCl₂-reichen Lösungen wurden aus der Salzformation ausgepresst. Die anhydritischen Hartsalze, in denen der Kieseritanteil teilweise oder ganz durch Anhydrit ersetzt ist, verdanken ihre Entstehung nach D'Ans und Kühn (1960) der Einwirkung von CaCl₂-haltigen Tiefenwässern. Das CaCl₂ setzt sich mit Kieserit zu Anhydrit und MgCl₂ um, wobei letzteres mit den Lösungen abgeführt wird. Untersuchungen von Kühn (1972) deuten darauf hin, dass zumindest ein Teil der Sylviniten aus der Werra-Serie und ein Teil der Sylvinitflöze Ronnenberg und Riedel aus der Leine-Serie auch primärer Entstehung sein können.

Monomineralische Salzgesteine wie Anhydrite können, wenn sie in größeren Mächtigkeiten auftreten, Lösungsspeicher darstellen. Beispiele für solche Gesteine sind der Leine- oder Hauptanhydrit (A3), der mit Mächtigkeiten von 20 - 50 m einen eigenständigen stratigraphischen Horizont darstellt, und die Anhydritmittel (Na3am), die als geringer mächtige Einschaltungen im Jüngeren Steinsalz (Na3), aus cm- bis m-dicken Anhydritlagen bestehen. Der Hauptanhydrit aus Bernburg z.B. besteht aus ca. 93 Vol.% Anhydrit, 5 % Magnesit und 2 % Ton, Carnallit und anderen Nebengemengteilen. Eine ähnliche Zusammensetzung haben auch die Anhydritlagen der Anhydritmittel. Die Anhydritgesteine sind spröde und zeigen ein anderes geomechanisches Verhalten als das plastische Steinsalz. Die tektonischen Bewegungen während des Salzaufstiegs haben im Hauptanhydrit und in den Anhydritmitteln zu Kluftsystemen geführt, die als Lösungsspeicher dienen können und beim Anfahren häufig zu Lö-

sungszutritten führen. Viele der aufgegebenen Kalibergwerke sind durch Lösungszuflüsse, besonders aus dem Hauptanhydrit abgesoffen (Baumert 1928, Spackeler 1950, Gimm 1968, Schwandt 1991 u.a.). Andere haben Zuflüsse aus dem Liegenden.

7.1.2.2 Zersetzung von Carnallititen

Eine detaillierte Beschreibung der Vorgänge bei der Carnallititzerersetzung findet sich in Herbert (2000). Diese Vorgänge wurden mittels eines großmaßstäblichen In-situ-Versuchs im Carnallit der Asse und mittels geochemischer Modellierung untersucht. Die aus Herbert (2000) stammenden Abb. 7-3 bis Abb. 7-6 zeigen die Entwicklung der Lösungszusammensetzung, der Sättigungen an wichtigen Bodenkörpern, der beteiligten Wassermenge sowie die Massenbilanz bei der Reaktion des Carnallitits des Typs K2C in der Asse. Carnallitite aus Mitteldeutschland unterscheiden sich nicht prinzipiell von dem Asse-Carnallitit, lediglich die Gehalte an Carnallit und Kieserit variieren etwas. Damit ist auch der prinzipielle Reaktionsverlauf gleich, die Knicke in den Kurven der Lösungsentwicklung während der Reaktion haben die gleichen Ursachen. Lediglich die Menge des an der Reaktion beteiligten Carnallitits bis zum Erreichen einer bestimmten Lösungszusammensetzung variiert in den in Abb. 7-7 bis Abb. 7-9 gezeigten Grenzen. Die in den Modellierungen verwendeten Carnallitit- und Hartsalzzusammensetzungen und die verwendete Ausgangslösung sind in Tab. 6-6 und Tab. 6-7 zusammengestellt.

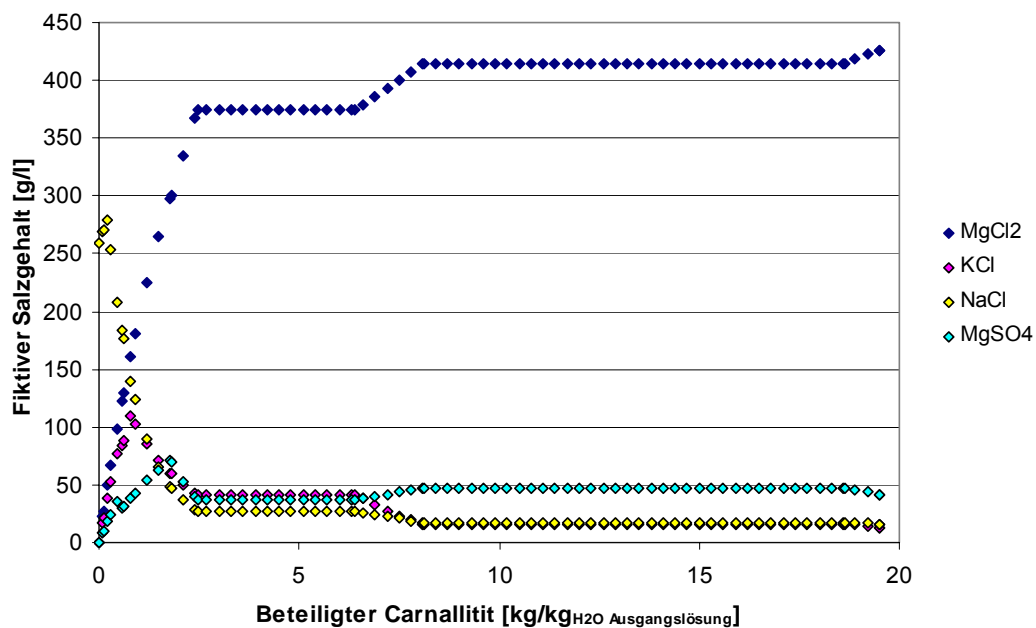


Abb. 7-2 Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei der Auflösung von Carnallitit des Typs K2C

Die in Abb. 7-3 gezeigte Entwicklung der Lösungszusammensetzung wird in Abb. 7-2 auch in Form von Salzgehalten in g/l dargestellt. Damit ist bei Bedarf ein leichter Vergleich der bei dieser Reaktion erhaltenen Lösungszusammensetzungen mit den Lösungen Mitteldeutschlands möglich.

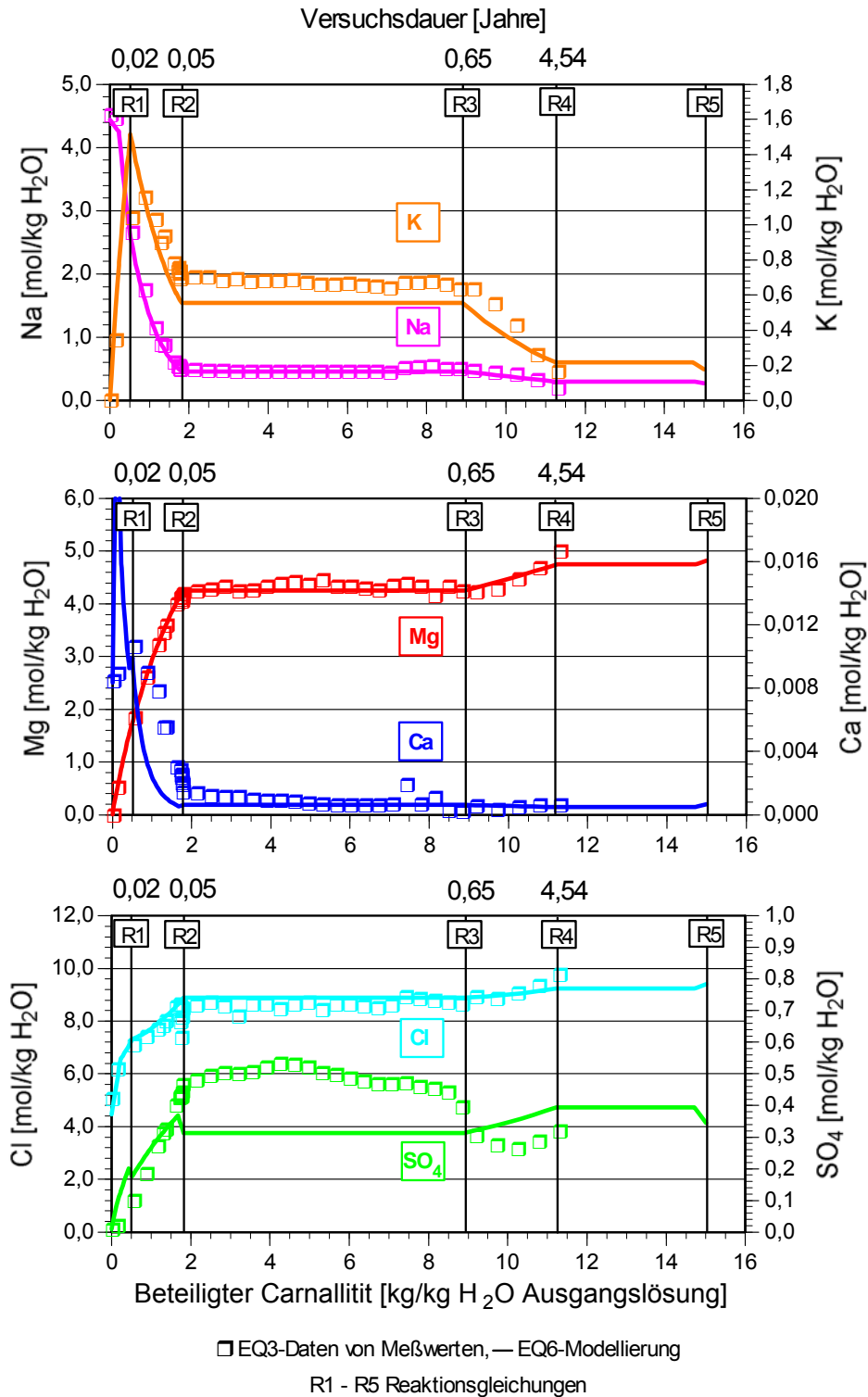


Abb. 7-3 Lösungsentwicklung bei der Carnallitauflösung – Vergleich von Messdaten aus dem In-situ-Versuch in der Schachtanlage Asse mit Ergebnissen der geochemischen Modellierung (Herbert 2000)

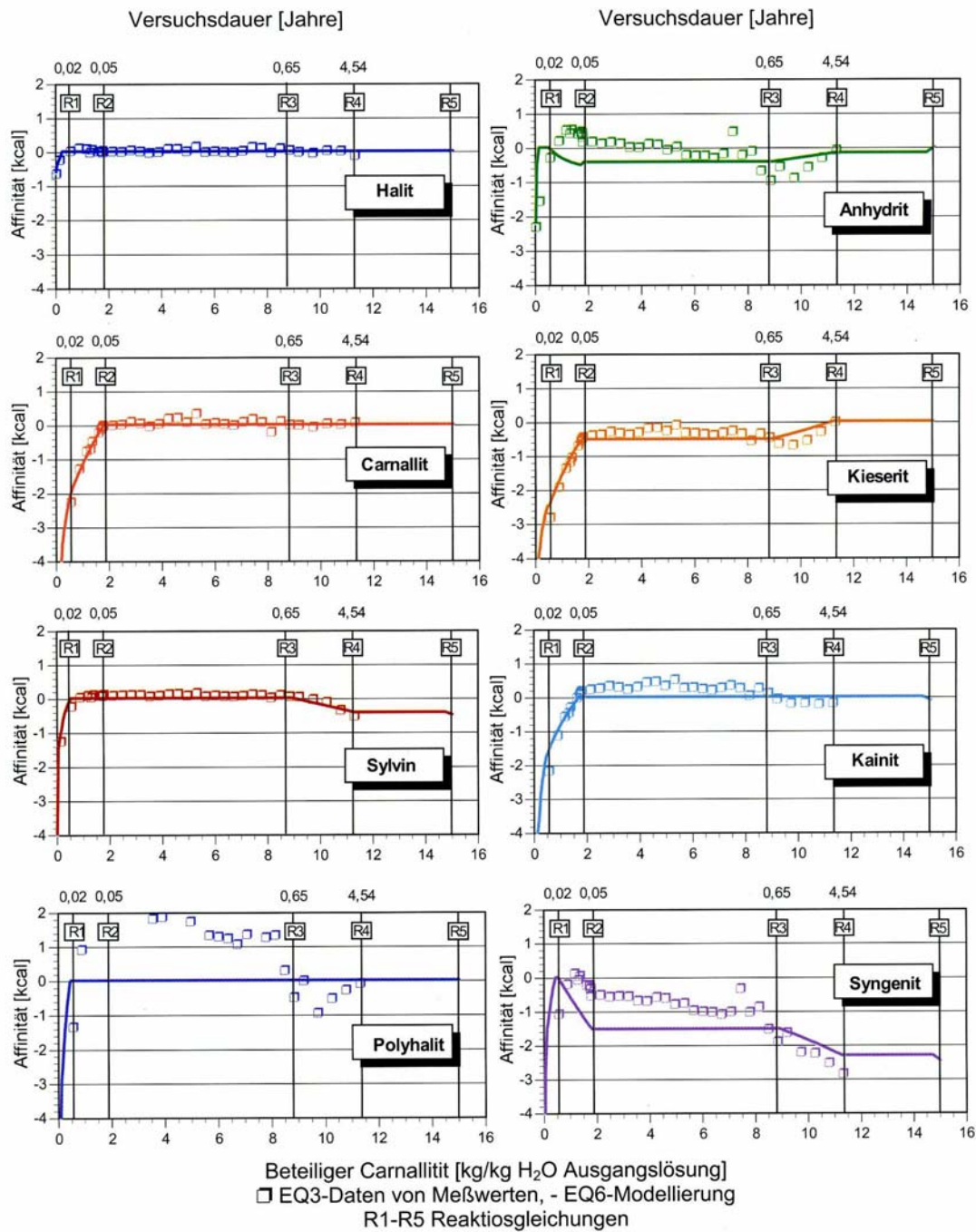


Abb. 7-4 Entwicklung der Mineral-Sättigungen in den Lösungen bei der Carnallitauflösung – Vergleich der Mineralsättigungen der natürlichen Lösungen mit Ergebnissen der geochemischen Modellierung (Herbert 2000)

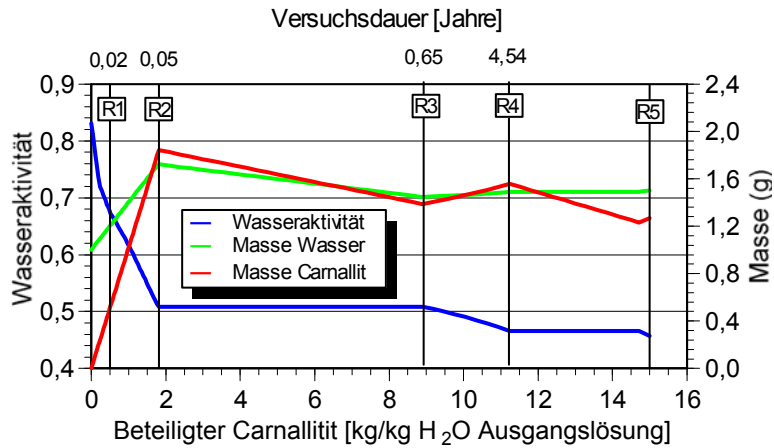


Abb. 7-5 Lösungsentwicklung bei der Carnallitauflösung — Vergleich der Wasseraktivität, des Wassergehaltes und der Menge gelösten Carnallitits (Herbert 2000)

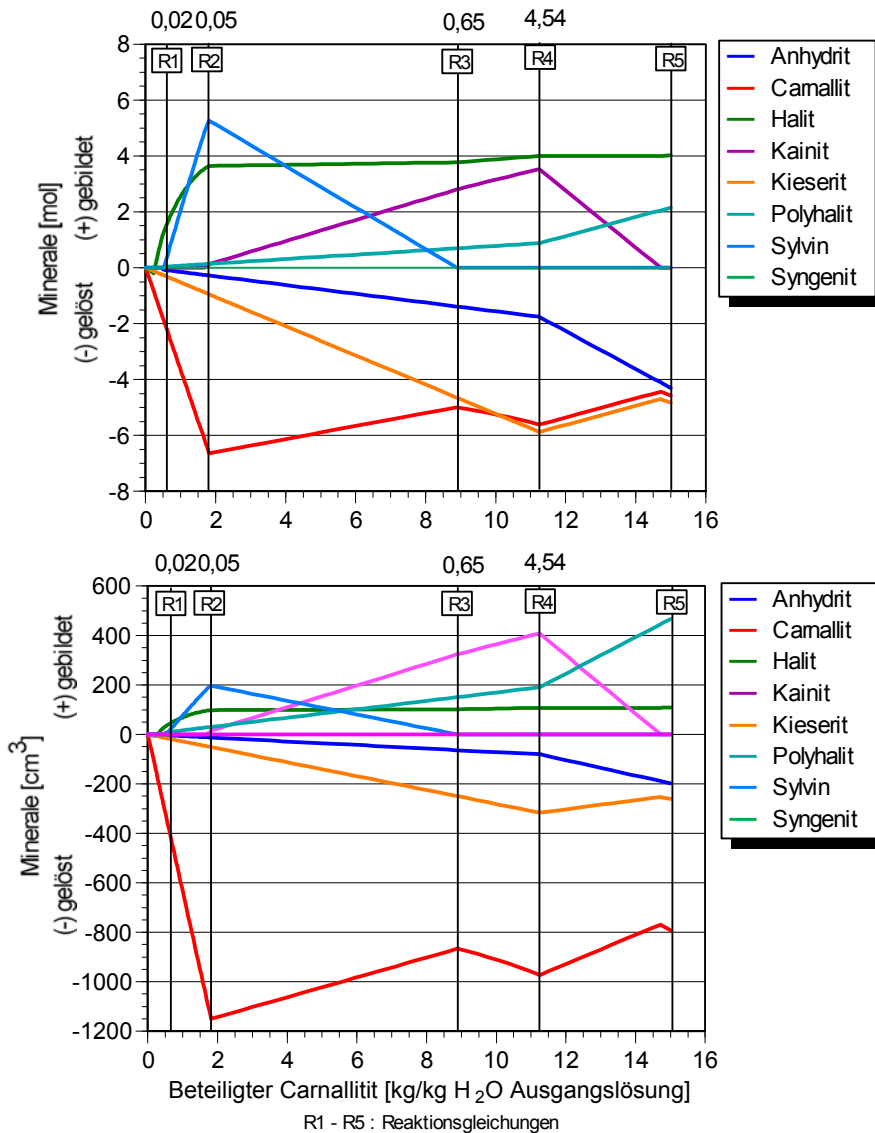


Abb. 7-6 Bilanz der gelösten und gebildeten Minerale bei der Carnallitauflösung – Ergebnisse der geochemischen Modellierung (Herbert 2000)

An den mit senkrechten Strichen markierten und mit R1 bis R5 bezeichneten Reaktionspunkten wurden von Herbert (2000) auch quantitative Reaktionsgleichungen berechnet. Die wichtigsten Änderungen im Reaktionsverlauf an diesen Punkten sind in Tab. 7-3 zusammengefasst.

Tab. 7-3 Änderungen im Reaktionsverlauf an den Reaktionspunkten R1 bis R5

Reaktionsfortschritt	Kommentar
R1	Sylvinsättigung wird erreicht, Ende der Syngenitsättigung
R2	Carnallitsättigung wird erreicht, Lösung erreicht Punkt Q bzw. IP21
zwischen R2 und R3	konstante Lösung am Punkt Q bzw. IP21
R3	Ende der Sylvinsättigung, Lösung verlässt Q und bewegt sich in Richtung R
R4	Kieseritsättigung wird erreicht, Lösung erreicht Punkt R bzw. IP19
R5	Anhydritsättigung wird erreicht. Ende der Reaktion. Lösung ist an allen Mineralen im Carnallit (Halit, Carnallit, Kieserit und Anhydrit) gesättigt

Abb. 7-3 und Abb. 7-4 zeigen einen Vergleich der Ergebnisse des In-situ-Carnallitazeretzungsversuches auf der Asse mit dem berechneten Reaktionsverlauf. Die gute Übereinstimmung der Ergebnisse vermittelt einen Eindruck über die hohe Präzision, die bei Prognosen mit dem Werkzeug der geochemischen Modellierung heute erreichbar ist.

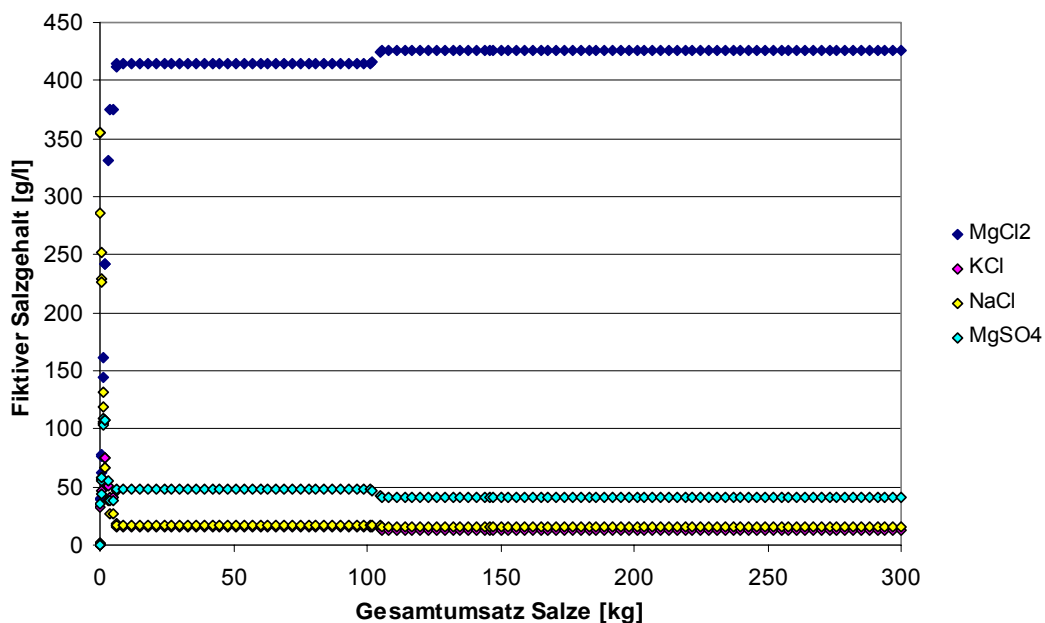


Abb. 7-7 Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei der Auflösung von Carnallit mit Sylvin des Typs K2CK

Abb. 7-7 bis Abb. 7-9 zeigen berechnete Reaktionsverläufe mit Carnallititen unterschiedlicher Zusammensetzung aus den Kalirevieren Mitteldeutschlands.

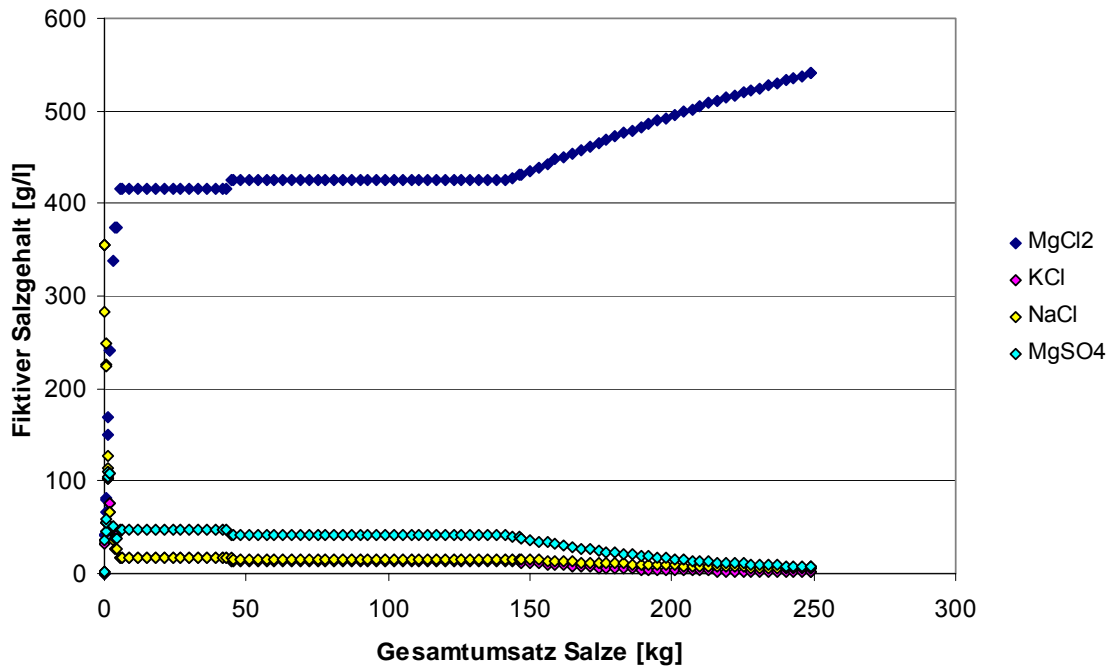


Abb. 7-8 Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei der Auflösung von Carnallitit mit Bischofit des Typs K2CK

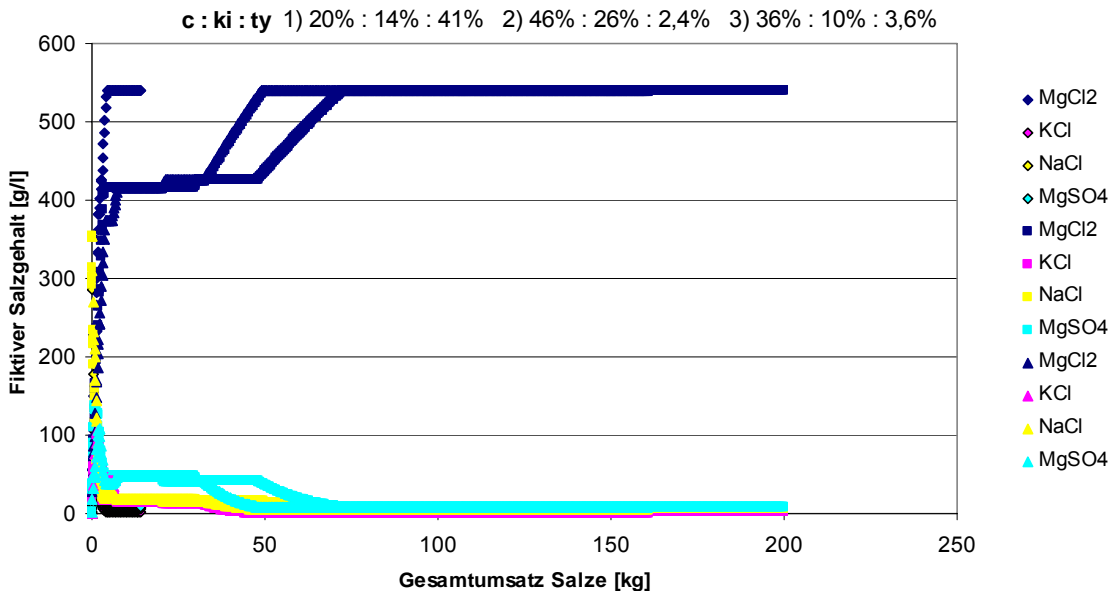


Abb. 7-9 Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei der Auflösung von Carnallitit mit Kieserit und Tachhydrit

7.1.2.3 Auflösung von Hartsalzen

In Abb. 7-10 bis Abb. 7-13 aus Herbert (2000) ist ein exemplarisches Beispiel für den Verlauf der Hartsalzauflösung dargestellt. Auch hier gilt, dass durch die Übereinstimmung zwischen einem großmaßstäblichen In-situ Experiment und geochemischer Modellierung die Belastbarkeit der Modellierungen lösungsmetamorpher Reaktionen in Salzformationen insgesamt belegt ist. Weiterhin gilt auch hier, dass der prinzipielle Reaktionsverlauf bei der Auflösung von unterschiedlichen Hartsalzen gleich ist. Die Knicke in den Kurven der Lösungsentwicklung während der Reaktion haben die gleichen Ursachen. Lediglich die Menge des an der Reaktion beteiligten Hartsalzes bis zum Erreichen einer bestimmten Lösungszusammensetzung variiert. In Abb. 7-14 bis Abb. 7-17 sind die Reaktionsverläufe und die Entwicklungen der Salzgehalte der Lösungen in g/l für unterschiedliche Hartsalze aus Mitteldeutschland (einschließlich der Variationsbreite ihrer mineralogischen Zusammensetzung) dargestellt.

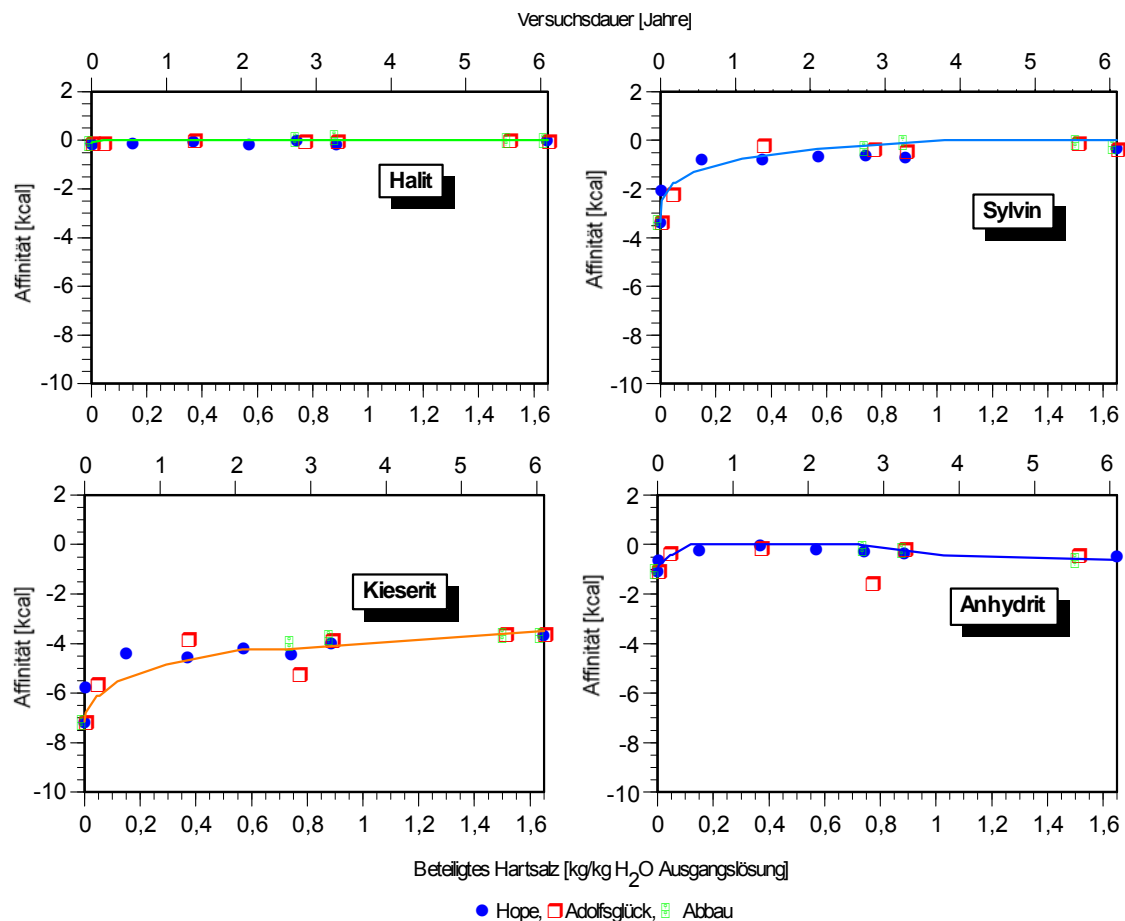


Abb. 7-10 Entwicklung der Mineral-Sättigungen in den Lösungen bei der Hartsalzauflösung während der Flutung des Bergwerks Hope nördlich von Hannover – Vergleich der Affinitäten aus den natürlichen Lösungen mit Ergebnissen der geochemischen Modellierung (Herbert 2000)

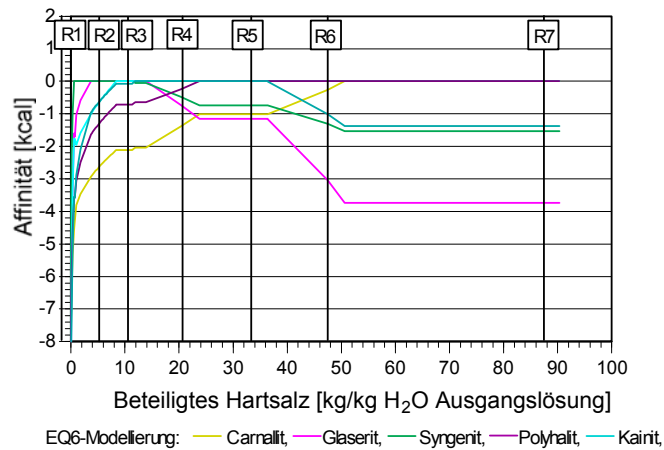
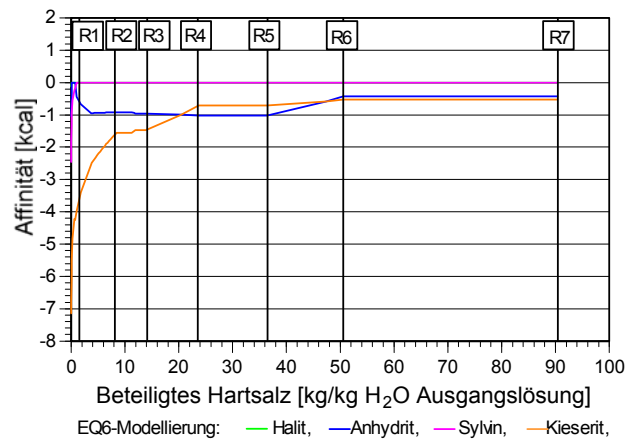
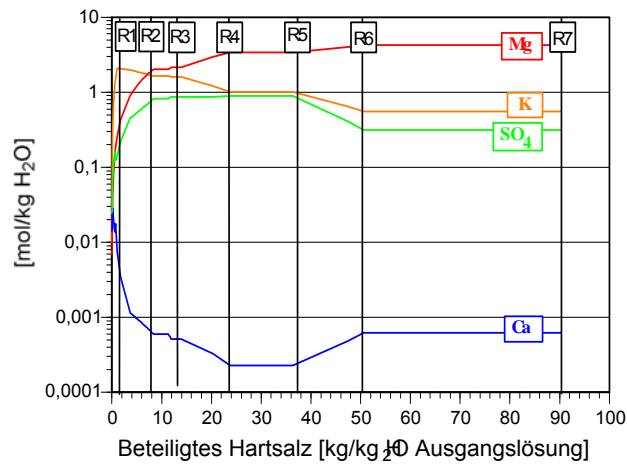


Abb. 7-11 Verlauf der Lösungsentwicklung bei der Hartsalzauflösung in Hope–
 Ergebnisse der geochemischen Modellierung: Lösungszusammensetzung (oben), Affinitäten der Reaktanden (Mitte) und Affinitäten der Produkte (unten) (Herbert 2000)

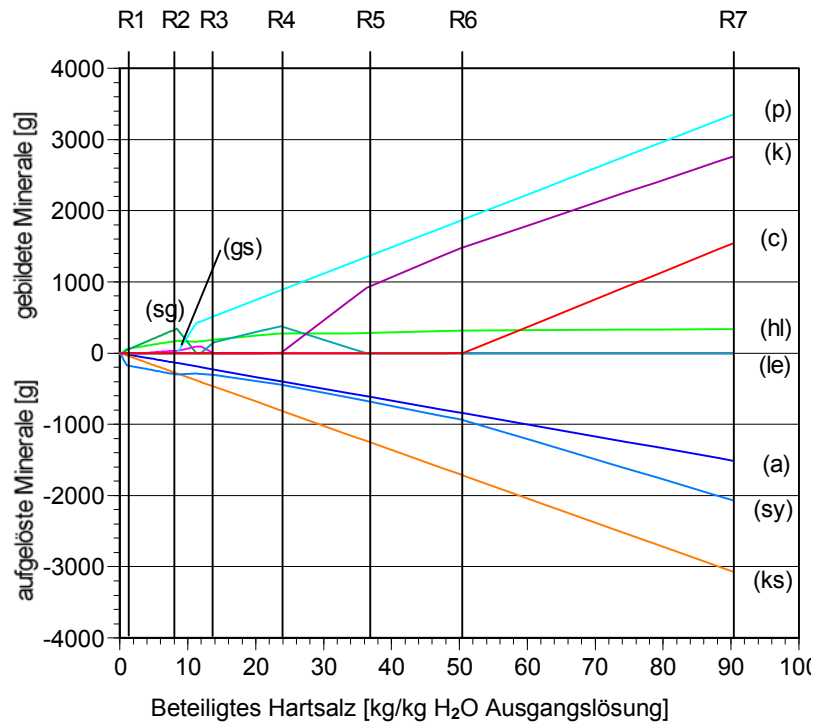


Abb. 7-12 Massenbilanz der gelösten und gebildeten Minerale bei der Hartsalzauf-
lösung in Hope – Ergebnisse der geochemischen Modellierung.

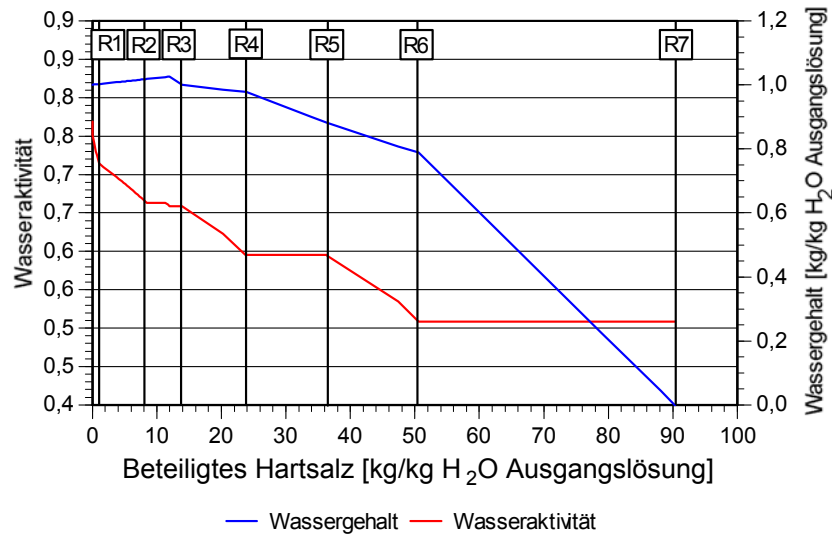


Abb. 7-13 Entwicklung des Wassergehaltes und der Wasseraktivität der Lösungen
bei der Hartsalzauf-
lösung in Hope – Ergebnisse der geochemischen
Modellierung

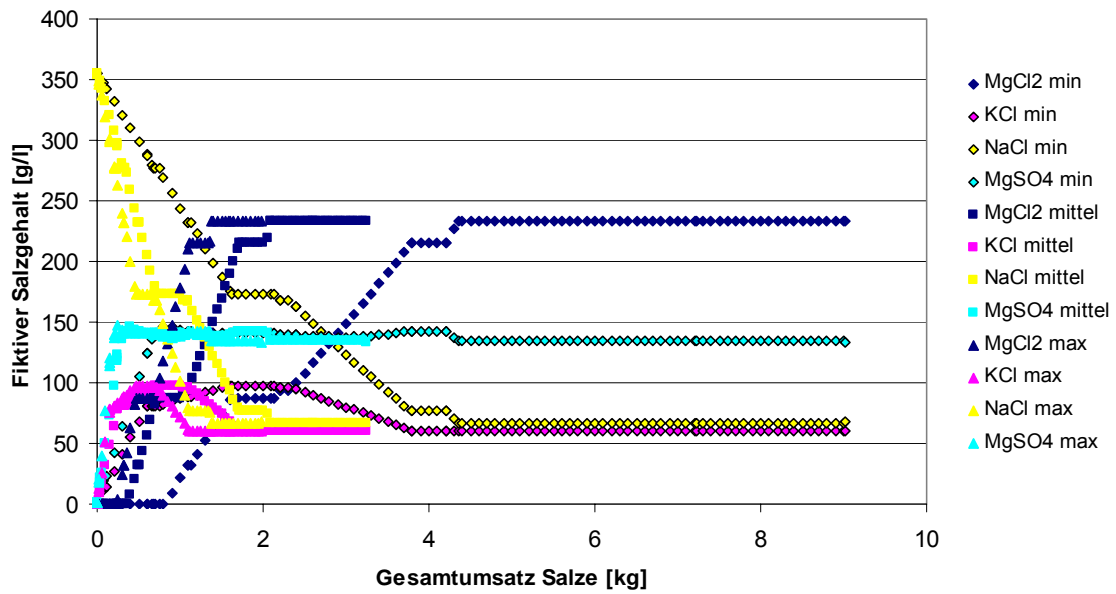


Abb. 7-14 Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei der Auflösung von langbeinigem Hartsalz

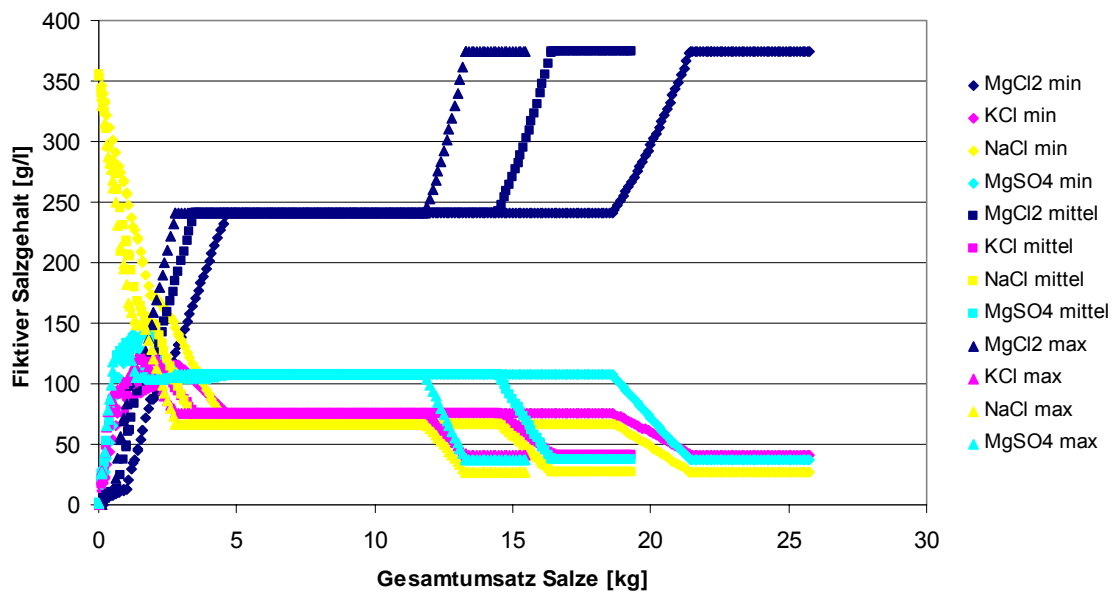


Abb. 7-15 Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei der Auflösung von kieseritischem Hartsalz

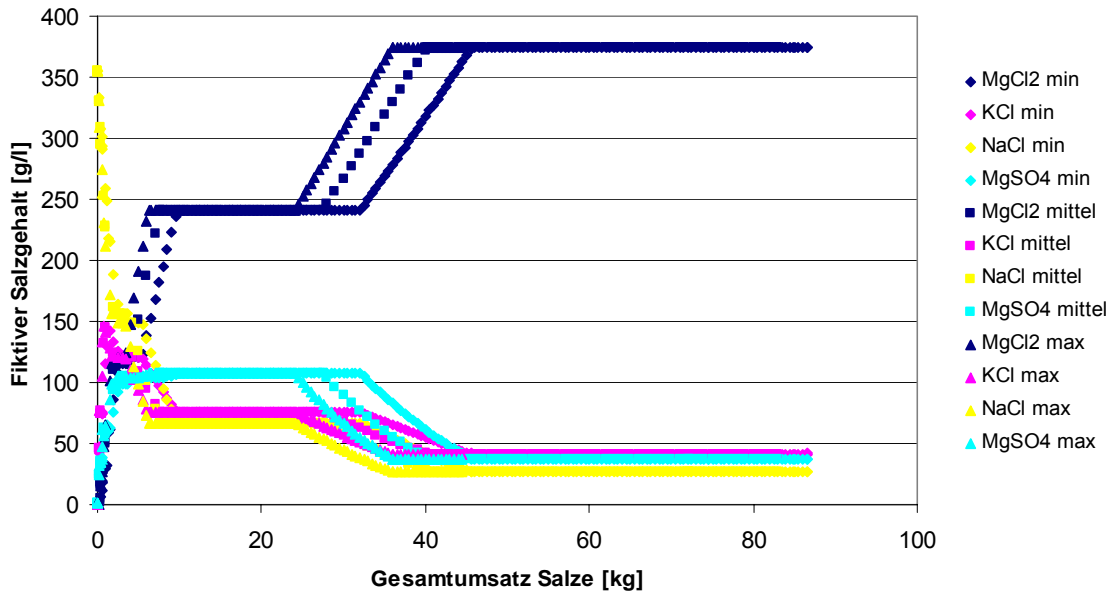


Abb. 7-16 Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei der Auflösung von polyhalitischem Hartsalz

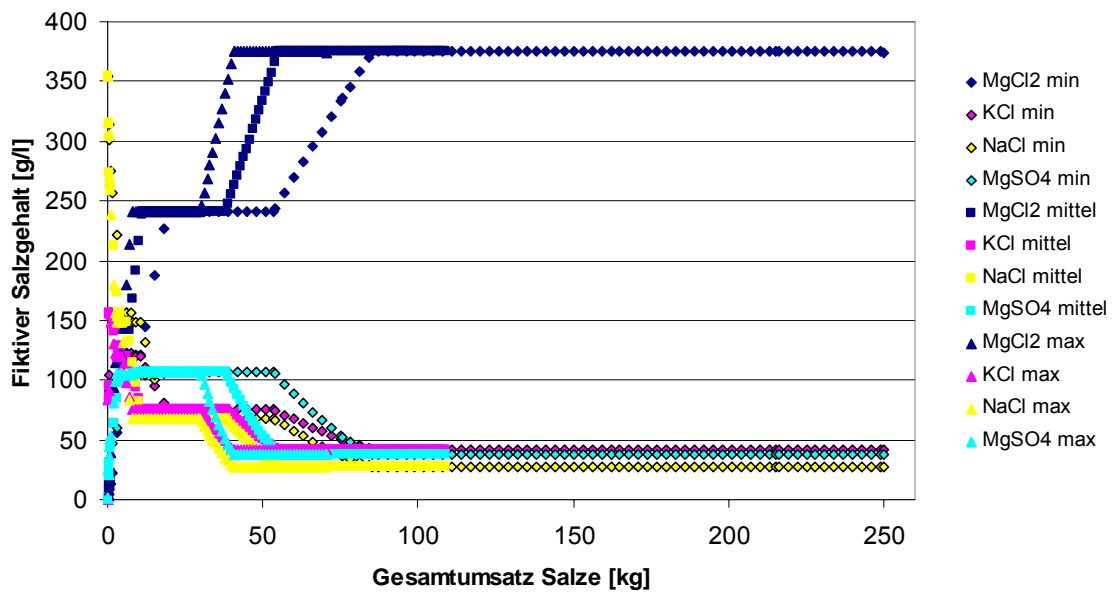


Abb. 7-17 Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei der Auflösung von sylvinitischem Hartsalz

7.2 Bildung CaCl_2 -haltiger Salzlösungen

CaCl_2 -haltige Salzlösungen können sich innerhalb und außerhalb von Meeresbecken bilden. Bilden sich solche Lösungen innerhalb der Eindunstungsbecken, entstehen Kalisalze des Chloridtyps. Diese enthalten zum Unterschied zu den Kalisalzen des

Sulfattyps keine Sulfate. In der Literatur werden drei Prozesse angeführt, die in Meeresbecken zur Sulfatverarmung und schließlich zur Bildung von CaCl_2 führen können: Bakterielle Sulfatreduktion, Zufuhr karbonathaltiger Festlandwässer in die Küstenzonen des Meeresbeckens und Einwirkung CaCl_2 -haltiger Lösungen auf Meerwasser (Herrmann 1981).

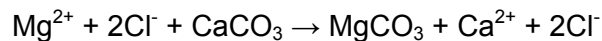
Häufig werden CaCl_2 -haltige Lösungen auch außerhalb von Salzformationen angetroffen. Dort können sie durch zwei Prozesse gebildet werden, die zwar eng an die Salzformation geknüpft sind, aber im angrenzenden Deckgebirge ablaufen:

1. Reaktion von eindunstenden MgSO_4 -haltigen Meerwässern, die zur Salzbildung geführt haben und frühdiagenetisch ins angrenzende Deckgebirge abgepresst wurden, wo sie mit Karbonaten reagieren,
2. Reaktion von Salzlösungen, die als Produkt der Lösungsmetamorphose von Kalisalzen des Sulfattyps in Salzformationen entstanden sind und ins Deckgebirge abgepresst wurden, wo sie mit Karbonaten reagieren.

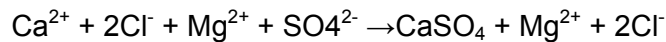
Wie schon gezeigt, können bei der Lösungsmetamorphose durch die Einwirkung von Deckgebirgswässern primär sedimentäre Carnallitite in sekundäre Kalisalze umgewandelt werden. Durch Lösungsmetamorphose haben sich z. B. die Kainithüte am Top der Salzformationen gebildet. Die unterschiedlichen Hartsalztypen im deutschen Zechstein dürften mehrheitlich ebenfalls durch die Einwirkung von Deckgebirgswässern auf Carnallitite entstanden sein. Je nach Menge des an der Reaktion beteiligten Wassers, geht die Umwandlung des Carnallitits unterschiedlich weit. Für die Bildung kieseritischer Hartsalze wird weniger Wasser benötigt als für sylvinitische Hartsalze, weil für das vollständige Weglösen von Kieserit (sylvinitisches Hartsalz enthält wenig oder keinen Kieserit) mehr Wasser gebraucht wird als für die alleinige Auflösung des Carnallits. An der Bildung des monomineralischen Kainithuts ist mehr Wasser beteiligt als an der Bildung von sylvinitischem Hartsalz, weil erst durch die Auflösung und Rekombination von Sylvinit und Kieserit der Kainit entsteht. Für die Bildung anhydritischer und vertaubter Hartsalze ist der Wasserbedarf am höchsten. Entsprechend der Art der gebildeten sekundären Kalisalze sind also unterschiedlich große Mengen Metamorphoselösungen mit unterschiedlicher Zusammensetzung entstanden, die sich heute noch im umgebenden Deckgebirge befinden müssen.

Nach der Lösungsmetamorphose bleiben die Hartsalze in der Salzformation zurück, während die mehr oder weniger MgCl_2 - und MgSO_4 -reichen Metamorphoselösungen in

die Randbereiche der Salzformation abgepresst werden. Dort können sie mit anstehenden Karbonaten reagieren. Dies führt entsprechend der Reaktion:



zum Auftreten von CaCl_2 -Gehalten in der Lösung und zur Ausscheidung von Magnesit. Gleichzeitig kommt es entsprechend der Reaktion:



zur Reduzierung des MgSO_4 -Gehalts in der Lösung und zur Ausscheidung von CaSO_4 als Gips. In der Summe bleibt beim Ablaufen dieser beiden Reaktionen der ursprüngliche MgCl_2 -Gehalt der Metamorphoselösung erhalten. Wenn sich dieser reduziert, dann wohl hauptsächlich durch Verdünnung mit den NaCl -haltigen Deckgebirgslösungen an der Flanke der Salzformation. Je nach Zusammensetzung der Metamorphoselösung, dem Grad ihrer Verdünnung und dem Fortschritt der Reaktion mit den Karbonaten kann sich eine breite Palette von Lösungszusammensetzungen mit sehr unterschiedlichen CaCl_2 -Gehalten bilden. Entsprechend groß ist auch die Bandbreite der NaCl -, KCl -, MgCl_2 - und MgSO_4 -Gehalte dieser Lösungen in unmittelbarer Umgebung der Salzformationen.

Beim Auftreten von geeigneten Wegsamkeiten können diese Lösungen teilweise auch wieder zurück in die Salzformation migrieren. Dort können sie in Lösungsspeichern wie dem Hauptanhydrit (Beispiele: Roßleben, Staßfurt), den Anhydritmitteln oder Salztonen gespeichert werden, oder direkt in angelegte Grubenbaue fließen.

In der Grube Roßleben sind im Hauptanhydrit CaCl_2 -haltige Lösungen gespeichert, die theoretisch durch beide der o. g. Prozesse (frühdiagenetisch abgepresste eingedunstete Meereswässer bzw. später gebildete Metamorphoselösungen im Kontakt mit Karbonaten) entstanden sein können. Das zeigen geochemische Modellrechnungen, deren Ergebnisse in Tab. 7-4 und Abb. 7-18 bis Abb. 7-21 dargestellt sind. Die geochemischen Modellrechnungen demonstrieren, dass die oben genannten Prozesse aus thermodynamischer Sicht plausibel sind und zu den beobachteten natürlichen Lösungszusammensetzungen führen können.

In Tab. 7-4 sind die Zusammensetzungen von fünf Salzlösungen aufgeführt. Die Lösungen 1 – 4 wurden als Ergebnis von EQ3/6-Rechnungen mit der HMW-Datenbasis erhalten. Lösung 5 gibt die mittlere Zusammensetzung von 223 natürlichen CaCl_2 -

haltigen Lösungen aus dem Kalibergwerk Roßleben in Thüringen wider. Diese Lösungen waren im Hauptanhydrit gespeichert und sind an der Austrittsstelle DB03 ausgetreten.

Die Lösung 1 aus Tab. 7-4 ist rechnerisch durch die Eindunstung von Meerwasser (s. Abb. 7-18) bis zu einer Mg-Konzentration von 0,725 mol/kg (beim Reaktionsschritt $z_i=54,3$) entstanden. Trifft eine Lösung dieser Zusammensetzung auf Karbonat, entsteht bei der Reaktion mit Calcit (s. Abb. 7-20, Reaktionsschritt $z_i=2,4$) eine CaCl_2 -haltige Lösung mit einer Zusammensetzung, die den natürlichen Roßlebenlösungen nahe kommt.

Lösung 2 ist eine Lösung, die bei der Reaktion von Wasser bzw. NaCl-Lösung mit Carnallit (wie er in Roßleben abgebaut wurde) entsteht (Abb. 7-19, Reaktionsschritt $z_i=3,3$). Trifft eine solche Lösung auf Calcit, entsteht wiederum eine CaCl_2 -haltige Lösung (Abb. 7-21, Reaktionsschritt 2,5), die mit dem Mittelwert der Roßlebenlösungen gut übereinstimmt (vergl. Tab. 7-4).

Tab. 7-4 Zusammensetzungen von Salzlösungen unterschiedlicher Herkunft:

1 = eingedunstetes Meerwasser, 2 = Carnallitzersetzungslösung, 3 = Lösung entstanden durch die Reaktion von eingedunstetem Meerwasser (Lösung 1) mit Calcit, 4 = Lösung entstanden durch die Reaktion einer Carnallitzersetzungslösung (Lösung 2) mit Calcit, 5 = Mittelwert aus 223 CaCl_2 -haltigen Lösungen der Tropfstelle DB03 aus der Grube Roßleben

Nr.	Lösungstyp	Cl^- [mol/kg]	Na^+ [mol/kg]	Mg^{++} [mol/kg]	SO_4^- [mol/kg]	Ca^{++} [mol/kg]	K^+ [mol/kg]	CaCl_2 [g/l]
1	Meerwassereindunstung $z_i = 54,3$	7,308	0,72564	4,0874	0,77115	0,00091	0,1433	
2	Auflösung von Roßleben-Carnallit mit NaCl-ges.Lsg $z_i = 3,3$	7,4184	0,84539	3,8392	0,84912	0,00025	0,5923	
3	Meerw.eind. ($z_i=54,3$) auf Calcit bis $z_i=2,4$	7,30800	0,72560	2,88660	0,00247	0,43219	0,1433	45,18
4	Carnallitlsg. ($z_i=3,3$) auf Calcit bis $z_i = 2,5$	7,4180	0,8454	2,5886	0,00304	0,40419	0,5923	41,69
5	Mittelwerte von 223 natürlichen CaCl_2 -haltigen Lösungen aus Roßleben	7,4980	1,4397	2,2852	0,00000	0,41814	0,6516	41,60

Durch Reaktionen dieser Art können also die Zusammensetzungen von CaCl_2 -haltigen Lösungen erklärt werden, die in oder um Salzlagerstätten anzutreffen sind, z.B. in den Kalibergwerken Roßleben, Staßfurt, Asse und in den Tiefbohrungen Gorleben. Ob

frühdigenetisch abgepresstes Meerwasser oder später entstandene Metamorphose-lösungen zu den CaCl_2 -haltigen Lösungen geführt haben, muss in jedem Einzelfall gesondert betrachtet werden. Isotopenuntersuchungen (D , ^{18}O) könnten dabei wertvolle Hinweise geben.

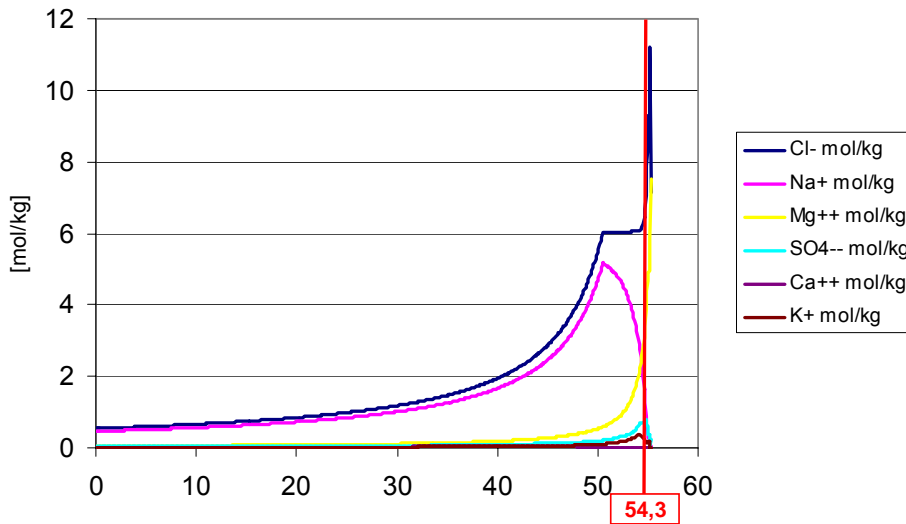


Abb. 7-18 Lösungsentwicklung bei fortschreitender Eindunstung von Meerwasser (EQ3/6 – Modellierung)

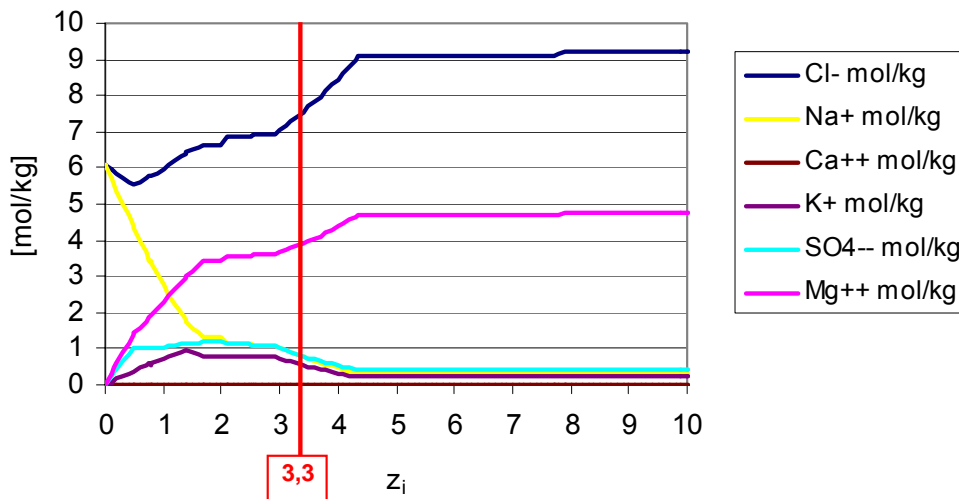


Abb. 7-19 Lösungsentwicklung bei der Auflösung von Carnallit mit NaCl -gesättigter Lösung. Bei einem Reaktionsfortschritt von $z_i=3,3$ bildet sich eine Carnallitlösung mit $3,839 \text{ mol/kg Mg}$ (EQ3/6 – Modellierung)

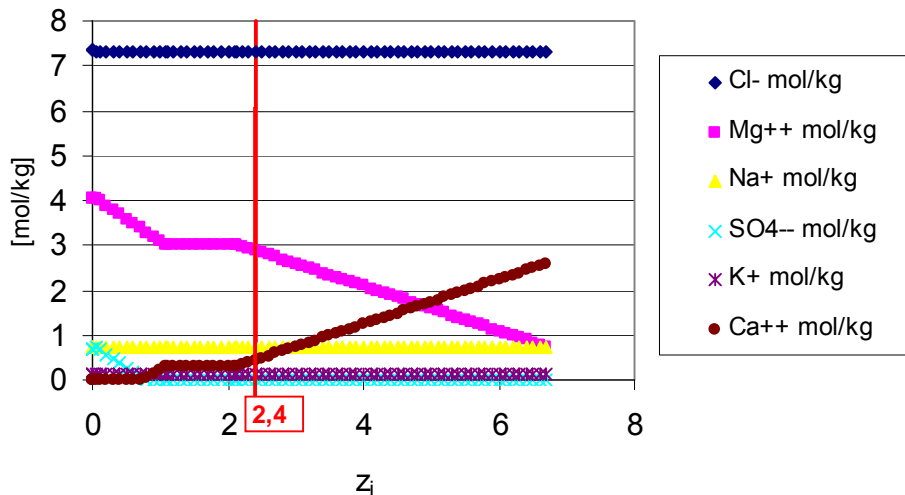


Abb. 7-20 Lösungsentwicklung bei der Reaktion von eingedunstetem Meerwasser mit einer Mg-Konzentration von 4,0874 mol/kg auf Calcit. Beim Reaktionsfortschritt $z_i=2,4$ bildet sich eine CaCl_2 -haltige Lösung der Zusammensetzung wie sie aus der Grube Roßleben bekannt ist (s. Tab. 7-4). (EQ3/6 – Modellierung)

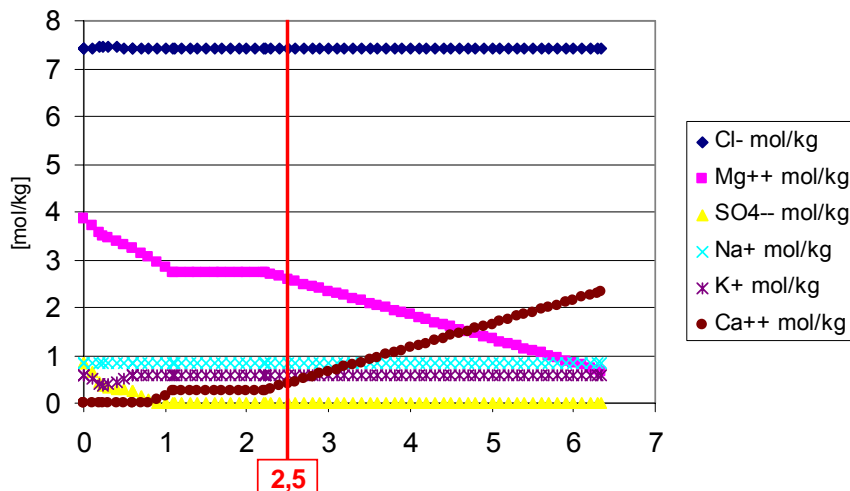


Abb. 7-21 Lösungsentwicklung einer Carnallitersetzungslösung mit 3,839 mol/kg Mg bei der Reaktion mit Calcit. Beim Reaktionsfortschritt $z_i=2,5$ bildet sich eine CaCl_2 -haltige Lösung der Zusammensetzung wie sie aus der Grube Roßleben bekannt ist (s. Tab. 7-4). (EQ3/6 – Modellierung)

Mit der Kombination der Prozesse Lösungsmetamorphose und Karbonatauflösung kann in jedem Einzelfall die vollständige gemessene Salzzusammensetzung aller Lösungen Mitteldeutschlands zwanglos und realistisch erklärt werden. Dies trifft sowohl

für die CaCl_2 -haltigen als auch für die MgSO_4 -haltigen Lösungen mit der ganzen beobachteten Bandbreite der Gehalte zu.

7.3 Lösungszusammensetzungen in Abhängigkeit vom Kontakt mit unterschiedlichen Kaligesteinen

In diesem Kapitel wird ein Vergleich zwischen den nach MgCl_2 -Gehalten definierten Lösungstypen A, B, C und D mit den Lösungszusammensetzungen vorgenommen, die bei der Meerwassereindunstung und bei der Lösungsmetamorphose von Kaligesteinen entstehen. Aus dieser Analyse wird abgeleitet durch welche Prozesse die einzelnen Lösungen Mitteldeutschlands entstanden sind.

7.3.1 Allgemeine Zusammenhänge zwischen Hauptelementen, Spurenelementen und stabilen Isotopen in eingedunstetem Meerwasser und Metamorphoselösungen

Wie schon gezeigt, bilden sich primär sedimentäre Kaligesteine wie z. B. Carnallitite (mit Halit, Anhydrit, Carnallit und Kieserit) durch Eindunstung des Meerwassers. Sobald in dem eindunstenden Meerwasser die Sättigung an Kieserit und Carnallit erreicht ist, hat die Lösung die Zusammensetzung am invarianten Punkt IP21 erreicht. Eine solche Lösung ist an Halit, Kainit, Carnallit, Kieserit und Polyhalit gesättigt. Ihre Zusammensetzung ist aus Tab. 7-5 zu ersehen.

Eine praktisch identische Lösung entsteht, wenn Carnallit bis zum Erreichen der Kieserit-Sättigung aufgelöst wird (Tab. 7-5). Wird nun eine natürliche Lösung mit einer solchen Zusammensetzung in einem Bergwerk angetroffen ist es wichtig, entscheiden zu können, ob es sich um eingedunstetes Meerwasser oder um eine Metamorphoselösung handelt. Eindunstetes Meerwasser ist in seinem Volumen begrenzt und kann nicht zum Absaufen der Grube führen. Bei einer Metamorphoselösung dagegen besteht die potentielle Gefahr, dass die Wegsamkeiten, die zum Eindringen von Deckgebirgslösungen in die Salzformation und zur Auflösung von Kaligestein geführt haben, noch offen sind. In einem solchen Fall wäre die Grube bedroht, wenn der Zufluss nicht gestoppt wird. Die Antwort auf die Frage, ob es sich um eine harmlose oder eine gefährliche Lösung handelt, bringt die Zeit. Die zeitliche Entwicklung beim Auslaufen einer IP21-Lösung hängt nämlich auch von ihrer Genese ab. Während sich eine eingedunstete Meerwasserlösung über die Zeit kaum verändert, kann eine Metamorphoselösung der gleichen Zusammensetzung, wie das Beispiel GB 02 (s. Abb. 6-19 in

Kapitel 6.4) zeigt, über die Zeit eine kontinuierliche Veränderung in Richtung niedrigerer Dichten, niedrigerer $MgCl_2$ -Gehalte mit zunächst steigenden, dann aber plötzlich in die Halit-Untersättigung abfallenden $NaCl$ -Gehalten durchlaufen, bis die Grube schließlich absäuft.

Tab. 7-5 Vergleich von Zusammensetzungen natürlicher Lösungen mit Lösungen aus der Eindunstung von Meerwasser und der Auflösung von Carnallit

Lösungszusammensetzung [mol/kgH ₂ O]	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Eindunstung Meerwasser	0,3	0,2	0,0006	4,7	9,3	0,3
Auflösung Carnallit	0,3	0,2	0,0005	4,9	9,3	0,3
Lösung Nr.2406 EE 06.012	0,2	0,1	nicht bestimmt	4,8	9,0	0,4
Lösung Nr. 5346 EK 03.001	0,3	0,1		4,9	9,4	0,3
Lösung Nr. 2207 EB 01.002	0,2	0,1	0,002	4,8	9,3	0,3
Ähnlich zusammengesetzte Lösungen, die zum Absaufen von Gruben geführt haben						
GB 02.018 entspricht Lösung Nr.230 aus Herbert (2000) aus Solvayhall I/II Rolloch 1 im Südwestfeld Zeitliche Entwicklung dieser Lösung s. Kapitel 6.4	0,6	0,5	n. b.	4,2	8,5	0,6
GB 02.015 entspricht Lösung Nr.237 aus Herbert (2000) aus Solvayhall I/II Rolloch 1 im Südwestfeld	0,6	0,6	n. b.	4,1	8,5	0,6

Um vor dem Eintritt von dramatischen Veränderungen Gewissheit über die zukünftige Entwicklung eines Zuflusses zu erhalten, sind auch bei zunächst harmlos aussehenden IP21-Lösungen (weitere Beispiele in Tab. 7-5) genauere Untersuchungen notwendig. A priori ist einer solchen Lösung ihre Genese und damit ihr Gefährdungspotential anhand der Hauptkomponenten allein nicht anzusehen. Spurenelemente, wie Br, und stabile Isotope, wie Deuterium und Wasserstoff, können jedoch weiterhelfen. Ohne hier detaillierte Diskussionen der Br- und Isotopengehalte führen zu wollen (solche finden sich für Br in Braitsch (1971) und für stabile Isotope in Schmiedl et al. 1982, Knauth (1988) und Herbert (2000)), sei nur erwähnt, dass sich die Gehalte dieser Spurenbestandteile in Lösung je nachdem, ob sie durch Eindunstung oder Auflösung entstanden sind, sehr deutlich unterscheiden. In einer eingedunsteten IP21-Lösung ist der Br-Gehalt höher als in einer entsprechenden Lösung, die durch Carnallitersetzung entstanden ist. Bei der Eindunstung reichern sich die schweren Isotope an. Da die Eindunstung am Punkt

IP21 ein sehr weit fortgeschrittenes Stadium der Eindunstung markiert, sind die stabilen schwereren Isotope Deuterium und ^{18}O deutlich häufiger als in einem Deckgebirgswasser, das durch Grundwasserneubildung ständig Nachschub an isotopisch leichtem Regenwasser erhält. Eine entsprechende Analyse der wenigen vorhandenen vollständigen Analysen einschließlich Br- und Isotopengehalten hat ergeben, dass keine der untersuchten Lösungen Mitteldeutschlands Signaturen von eingedunstetem Meerwasser aufweist.

7.3.2 Vergleich der Lösungen Mitteldeutschlands mit Metamorphoselösungen

Setzt man ausreichende Reaktionszeiten voraus, die zu Gleichgewichten zwischen den in die Salzformation eintretenden Wässern und den Kalisalzen führen (eine in vielen Fällen zutreffende Annahme, die mittels geochemischer Modellrechnungen einfach zu überprüfen ist), ist es möglich, aufgrund der maximal erreichbaren MgCl_2 -Gehalte zwischen Lösungen zu unterscheiden, die durch Auflösung von Hartsalzen und durch Auflösung von Carnallititen entstanden sind. Während bei der Auflösung von Hartsalzen der MgCl_2 -Gehalt maximal auf 375 g/l ansteigen kann, liegt er bei Carnallitizersetzungslösungen mit über 400 g/l deutlich höher.

Innerhalb der Gruppe der Hartsalze wiederum lässt sich sogar eine Lösung erkennen, die langbeinitisches Hartsalz aufgelöst hat. Diese hat mit maximal 233 g/l MgCl_2 deutlich weniger MgCl_2 als Lösungen, die kieseritisches, polyhalitisches oder sylvinitisches Hartsalz aufgelöst haben. Die letztgenannten Gleichgewichtslösungen weisen allesamt gleiche MgCl_2 -Maximalgehalte von 374 g/l auf.

Anhand der Lösungszusammensetzung lässt sich nicht nur erkennen, ob Carnallit aufgelöst wurde. Auch hier ist der Typ des Kaligesteins erkennbar. Wird Carnallit des Typs K2C mit Carnallit und Kieserit aufgelöst, weist die Lösung beim Erreichen des Punktes IP21 einen MgCl_2 -Gehalt von 417 g/l und bei Erreichen des Punktes R oder IP19 (Sättigung an Carnallit, Kainit und Kieserit) von 435 g/l auf. Vergleichbar hoch sind die MgCl_2 -Gehalte in Lösung bei der Auflösung von Carnallit des Typs K2CK, der neben Carnallit und Kieserit auch noch Sylvinit enthält. Sehr viel höher (540 g/l) werden die erreichbaren MgCl_2 -Gehalte, wenn neben Carnallit und Kieserit auch Bischofit und/oder Tachydit im Carnallit vorhanden sind.

Mit diesen Informationen lässt sich nun ableiten, welche Kaligesteine zur Bildung der Lösungstypen A, B, C, D und E geführt haben können.

Tab. 7-6 Erreichbare $MgCl_2$ -Gehalte (EQ3/6-Modellierung) und daraus ableitbare Lösungstypen

Kaligestein	$MgCl_2$ -Gehalt	Lösungstyp
Carnallit, kieserit- und tachhydrithaltig Carnallit, kieserit- und bischofithaltig	540 g/l	Typ A
Carnallit, kieserit- und kainithaltig	435 g/l	Typ A
Carnallit, sylvinhaltig	417 g/l	Typ A
Sylvinitisches Hartsalz Kieseritisches Hartsalz Polyhalitisches Hartsalz	374 g/l	Typ B
Langbeinitisches Hartsalz	233 g/l	Typ C
Vertaubtes Hartsalz Anhydritisches Hartsalz Sylvinit	~ 130 g/l	Typ D

Dass die o. g. Ausführungen nicht nur theoretisch stimmen, sondern die Realität widerspiegeln, zeigt Abb. 7-22. Darin sind die untersuchten Lösungen etwas anders gruppiert als bisher. Dargestellt wurde wieder der $MgCl_2$ -Gehalt der Lösungen. Für jeden Zufluss wird in Abb. 7-22 kenntlich gemacht, welchem Zuflusstyp er angehört und zudem, aus welchem Salzgestein die Lösungen ins Grubengebäude zugetreten sind. Es zeigt sich, dass die theoretischen Rechnungen die Realität gut widerspiegeln.

Diese Ausführungen zeigen somit, dass die empirische Einteilung der Salzlösungen nach dem $MgCl_2$ -Gehalt einen realen Hintergrund hat und zu einer ersten groben Beurteilung der Lösungsgenese eingesetzt werden kann. Für weitergehende qualitative und quantitative Betrachtungen eignet sich das moderne Verfahren der thermodynamischen Modellierung.

7.4 Mögliche Aussagen zu Salzlösungen allein aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung

Für eine erste Einschätzung eines Lösungszuflusses reicht die Betrachtung des $MgCl_2$ -Gehaltes aus. Es ist es nicht notwendig, neben $MgCl_2$ alle andern Salze in Lösung zu betrachten. Ohne geochemische Modellierung ist die Durchdringung der komplexen Zusammenhänge schwierig. Zusätzliche Informationen erhält man aus der zeitlichen

Entwicklung des $MgCl_2$ -Gehaltes, der Dichte und der andern Salzgehalte. Die Betrachtung von Spurenelementen, wie Br, und von stabilen Isotopen wird in der Regel die Bestätigung bringen, dass es sich nicht um harmloses eingedunstetes Meerwasser, sondern um Mischwässer und damit um Metamorphoselösungen handelt. Diese Information sollte zu einer noch genaueren Beobachtung und zu weiteren Untersuchungen Anlass geben.

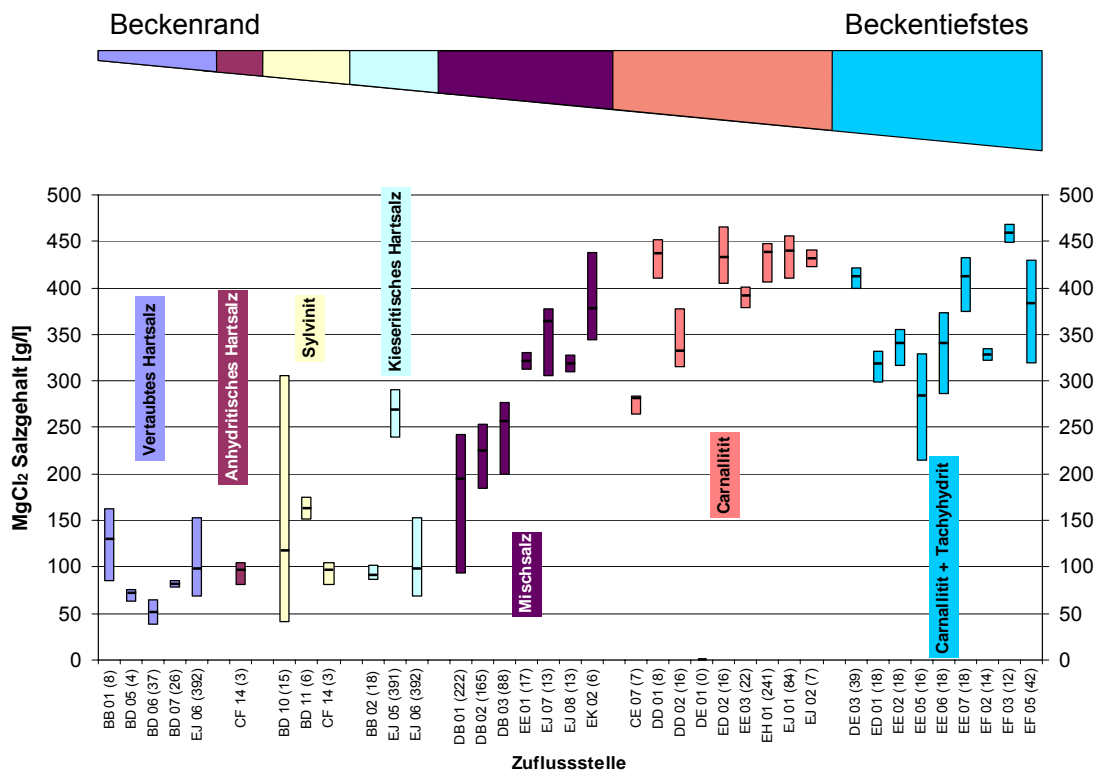


Abb. 7-22 Korrelierung von gemessenen $MgCl_2$ -Gehalten und Kaligesteinen, mit denen die Lösungen nachweislich Kontakt hatten

Um die gemessenen Gehalte aller Salze in Lösung zu verstehen und zur Ableitung eines Entstehungsmodells der Lösungen sollte auf die Möglichkeiten der thermodynamischen Modellierung zurückgegriffen werden. Damit kann geklärt werden, wie eine Lösung entstanden ist, und ob sie potentiell eine Gefahr darstellt. Wie reell diese Gefahr ist, wird sich im Laufe der Zeit ergeben. Schneller kommt man jedoch zu einer Antwort, wenn man neben den oben dargestellten chemischen Untersuchungen die Untersuchungspalette um die Betrachtung der geologischen und tektonischen Randbedingungen des Zuflusses erweitert.

7.5 Anthropogen veränderte Lösungen – Technische Lösungen

Eingebrachte technische Lösungen können erhebliche Schwierigkeiten bei der Identifizierung der natürlichen Lösungszuflüsse verursachen. Bereits geringe Mengen an Fremdwässern lassen die Nutzung von Tritium für eine Altersbestimmung nicht mehr zu. Die zur Abdichtung von Salzlösungszuflüssen genutzten Zemente verfälschen die chemische Zusammensetzung der Salzlösungen durch die Bildung von CaCl_2 jahrzehntelang, wenn kein größerer Abzug der Salzlösungen aus den angefahrenen Speichern erfolgt (s. Tab. 7-7).

Tab. 7-7 CaCl_2 -Gehalte einiger verpresster Bohrungen

Lfd. Nr.	Bezeichnung des Lösungszuflusses	Datum	CaCl_2 -Gehalt [g/l]	Bemerkungen
1	CE 09.001	1954	101,00	1. Zementverpressung
2	CE 09.002	12.01.1955	56,00	
3	CE 09.003	12.02.1955	129,00	2. Zementverpressung
4	CE 09.004	26.04.1955	12,00	
5	CE 09.005	28.07.1955	10,00	
6	CE 09.006	14.09.1955	5,92	
7	DB 02.001	02.1921	142,00	1. Zementverpressung
8	DB 02.002	03.1921	92,00	
9	DB 02.003	04.1921	52,0	
10	DB 02.004	05.1921	134,00	2. Zementverpressung
11	DB 02.005	06.1921	97,00	
12	DB 02.010	11.1921	54,00	
13	DD 01.003	04.03.1920	239,00	1. Zementverpressung
14	DD 01.004	11.05.1920	191,00	
15	DD 01.005	04.02.1921	196,00	
16	DD 01.006	11.07.1921	145,00	
17	DD 01.007	11.02.1922	184,00	2. Zementverpressung
18	EF 05.018	25.07.1972	22,00	1. Zementverpressung
19	EF 05.020	26.07.1972	19,00	
20	EF 05.021	26.07.1972	23,00	
21	EF 05.036	18.08.1972	10,00	
22	EF 05.042	26.08.1972	8,00	
23	EJ 04.006	14.11.1932	127,00	
24	EJ 04.007	19.11.1932	162,00	Zementverpressung
25	EJ 04.012	02.05.1933	187,00	Zementverpressung
26	EJ 04.042	04.11.1935	130,00	
27	EJ 04.044	30.12.1935	187,00	Zementverpressung
28	EJ 04.054	02.09.1936	137,00	

8 Bewertung der Salzlösungsvorkommen nach der tektonischen Beanspruchung

Die Kenntnisse über die duktilen und rupturellen Verformungen innerhalb der Kalisalzabbaugebiete Mitteldeutschlands haben sich in den letzten vier Jahrzehnten wesentlich erweitert (Schwandt 2000, 2006). Wichtig war dabei der Nachweis eines direkten räumlichen und auch genetischen Zusammenhangs der tektonischen Verformungen der Schichtenfolge mit den zuzitenden Salzlösungsvorkommen in den Gruben. Dieser Zusammenhang wird hier für den Salzbergbau Mitteldeutschlands in einer Übersicht dargestellt.

Die Aussagen stützen sich dabei vor allem auf Dokumentationen von A. Schwandt, zusammengestellt aus langjährigen Befahrungsergebnissen der Salzlösungsvorkommen.

8.1 Grundlagen

Die Auswertung der ab 1960 in den Kaliproduktionsgruben des Bearbeitungsgebietes verstärkt aufgenommene geologische Kartierung der Abbaugbiete durch die Werksgeologen erfolgte zweckorientiert vor allem für die Erkundung und Abbauvorbereitung (Aus- und Vorrichtung) sowie, gemäß der Ausrichtung dieses Berichtes, für die Beurteilung der hydrogeologischen Verhältnisse. Dazu gehörten u. a. die Arbeiten von Dittrich (1970), Döhner (1969), Duchrow et al. (1980), Haase (1976), Hessmann, Schwandt (1981), Jahne (1966), Jahne et al. (1983), Vogel, Schäbitzer (1967).

Eine zusammenfassende Auswertung der durch diese Kartierungsarbeiten gewonnenen tektonischen Erkenntnisse steht noch aus. Trotz dieser Einschränkung werden nachfolgend die Salzlösungsvorkommen nach ihrer tektonischen Position bewertet. Da mehr als 90 % der in der Dokumentation erfassten Salzlösungsvorkommen definierten strukturellen Situationen zugeordnet werden konnten, scheint dies gerechtfertigt.

Aufgrund der unterschiedlichen Datenqualität bleiben jedoch die strukturellen Beziehungen eines geringen Teiles der Tropf- und Nassstellen ungeklärt oder können nur vage beschrieben werden. Problematisch zu beurteilen sind die an Hartsalz-Carnallitübergänge gebundenen, nur vereinzelt nachgewiesenen Salzlösungsvorkommen (Abb. 8-1), da sie in Kristallsalze eingebettet und durch die Rekristallisation des Gefüges der Salzgesteine maskiert sind. Eine strukturelle Zuordnung ist nicht mög-

lich, da kein bruchtektonisches Inventar mehr nachzuweisen ist. Eine Überprüfung, ob es sich hierbei um ehemalige, nun maskierte Klüfte handelt, ist bisher nicht erfolgt. Wie bereits durch Schwandt (1993) festgestellt, treten derartige Nass- und Tropfstellen an Kristallsalzen auf. Abb. 8-2 bestätigt die in den Kali- und Steinsalzgruben am Bernburger Hauptsattel gleichfalls vorhandene Bindung der Nass- und Tropfstellen an Kristallsalz. Die Salzlösungen sind weiträumig im Leine- und Staßfurtsteinsalz, aber auch im Trümmercarnallit des Kaliflözes Staßfurt nachgewiesen. Hier konnten auch in porösen Lagen des Hauptanhydrits begrenzte Salzlösungsvorkommen beobachtet werden.

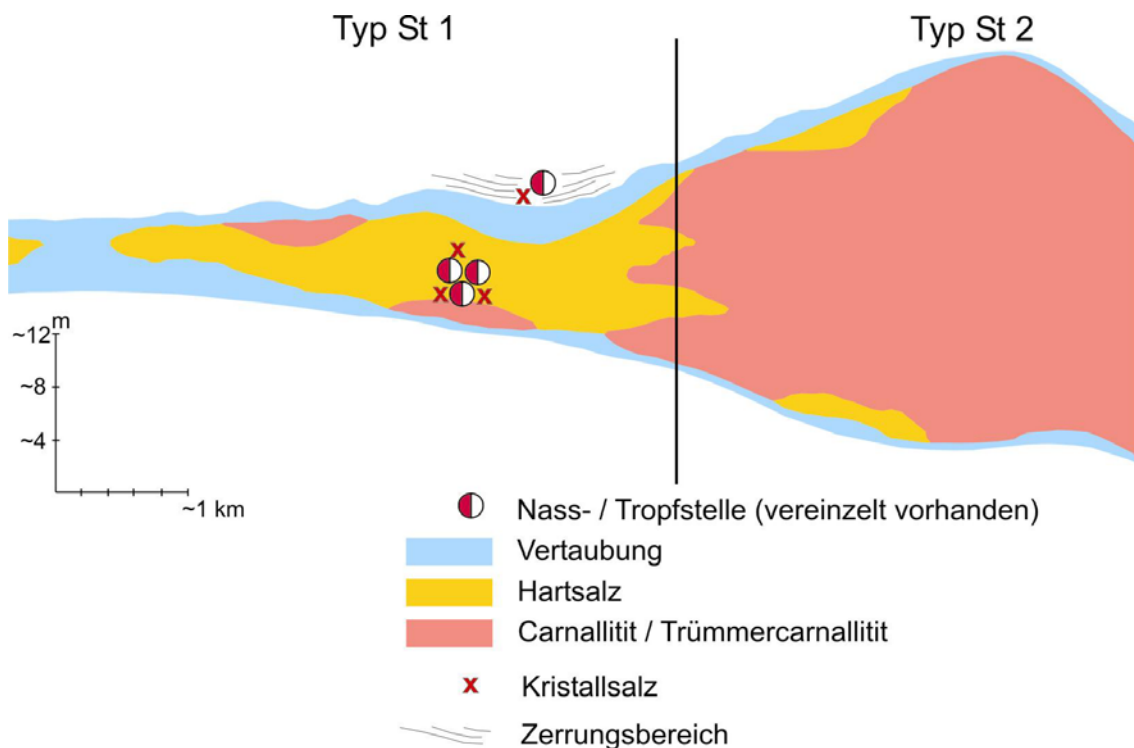


Abb. 8-1 Lage der vereinzelt vorhandenen Tropf- und Nassstellen in den Abbau-bereichen Typ St 1 und Typ St 2 (nach Duchrow et al. 1980) des Südharz-Kalireviere

An den weiträumigen, flach gelagerten Ablaugungsflächen des Staßfurtsteinsalzes sind Bruchstrukturen nicht erkennbar. Wie in Abb. 8-3 dokumentiert, ist die an zahlreichen Stellen durch die Grubenbaue aufgeschlossene, ca 2 km² umfassende Ablaugungsfläche, horizontal gelagert und frei von Salzlösungszuflüssen.

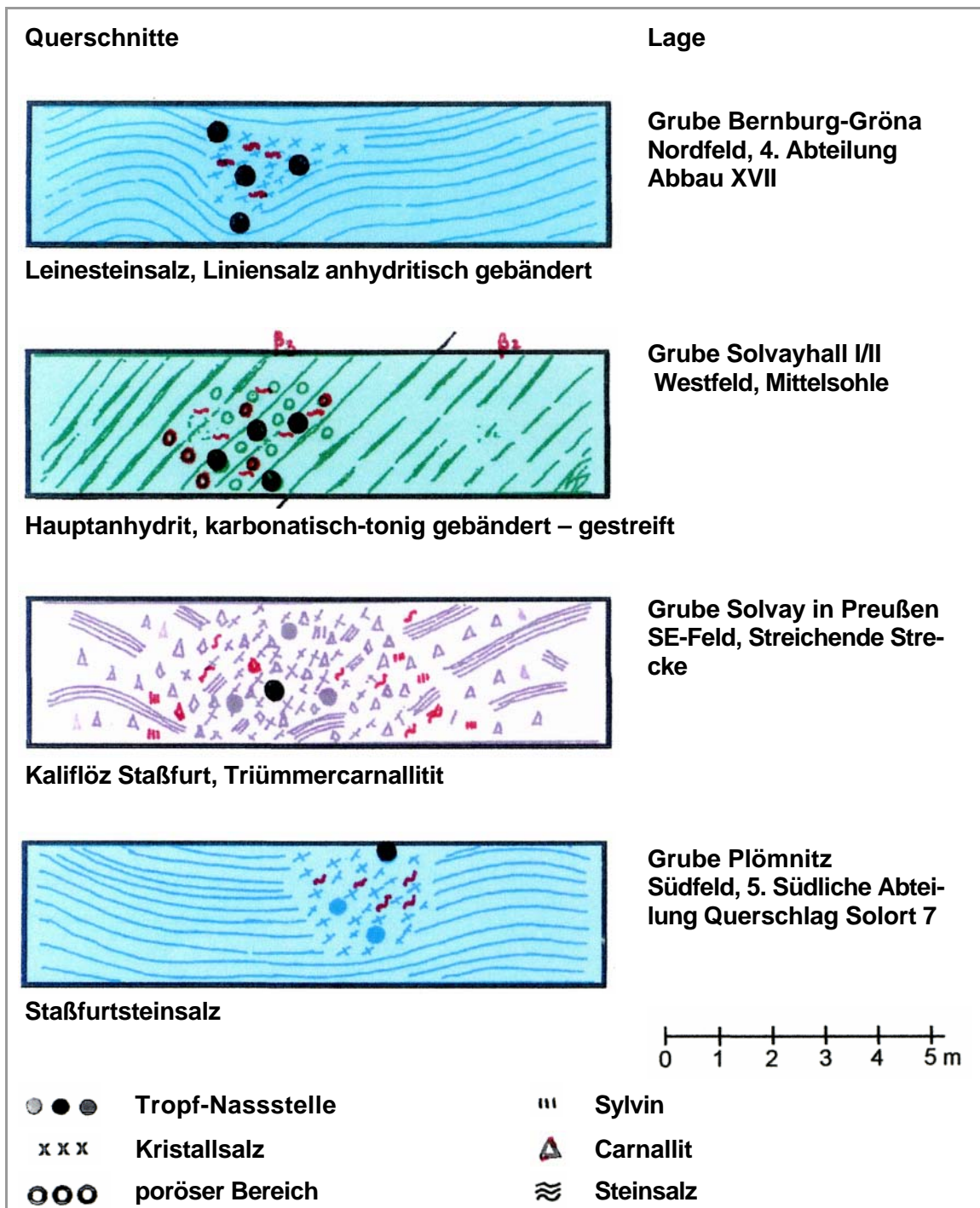


Abb. 8-2 Geologische Stoßskizzen von Tropf- und Nassstellen in den Kali- und Steinsalzgruben am Bernburger Hauptsattel (nach Schwandt 1993)

Insgesamt ist festzustellen, dass die in Bereichen ohne makroskopisch erkennbare tektonische Beanspruchung des Salinars und Deckgebirges liegenden Salzlösungsvorkommen als Tropf- oder Nassstellen charakterisiert sind. Sie lassen sich in allen stratigraphischen Horizonten der Zechsteinsalze nachweisen. In den Grubenfeldern sind sie weiträumig verteilt und werden oft erst nach längerer Standzeit der aufgefahrenen

Hohlräume erkennbar. Die Verteilung der Tropf- und Nassstellen ist nicht an bestimmte Kalisalzreviere, oder Teilgebiete davon, gebunden.

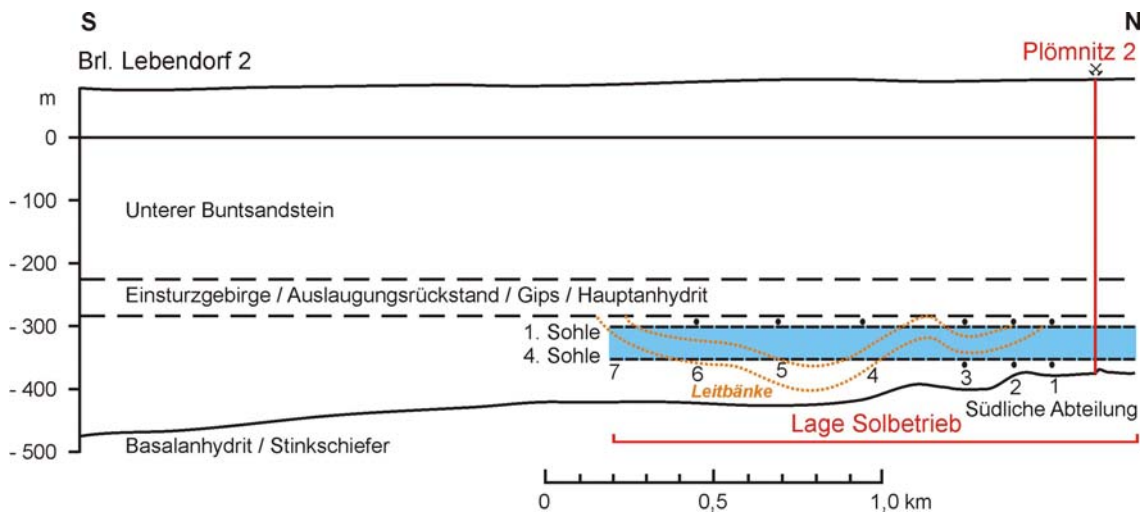


Abb. 8-3 Geologischer Schnitt durch ein weiträumiges Ablaugungsgebiet des Staßfurtsteinsalzes (nach Schwandt 1999)

Demgegenüber lassen die an tektonische Strukturen gebundenen Salzlösungsvorkommen deutliche regionale Unterschiede erkennen. Die umfangreichsten Zuflussmengen von Salzlösungen und Wässern wurden an den ausgedehnten Sattelflanken

Zuflussmengen

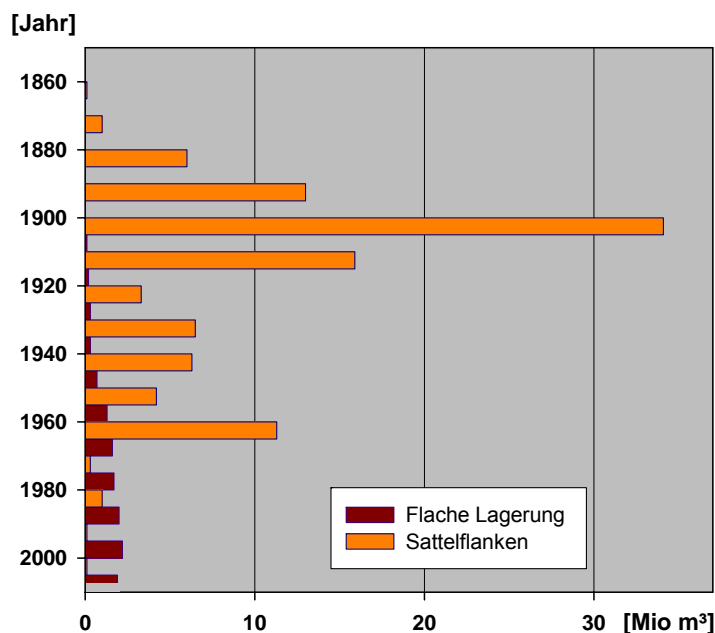


Abb. 8-4 Verteilung der Gesamtzuflussmengen von Salzlösungen und Wässern auf die Haupttypen I und II im Bearbeitungsgebiet

im Nordharz- und teilweise auch im Saale-Unstrut-Kalirevier beobachtet. Vom Beginn des Kalibergbaus 1860 bis 1920 umfassten die Zuflüsse aus diesem Bereich nahezu 100 %. In den darauffolgenden Jahren reduzierten sie sich auf etwa 70 % und standen in keinem Verhältnis zu der in den Werken gewonnenen Rohsalzmenge. Insgesamt ist festzustellen, dass wesentlich geringere Schüttungsmengen an die horizontal bis flachwellig, nur lokal auch stärker gefalteten Abbaueviere im Südharz und thüringischen Werra-Kalirevier gebunden sind (Abb. 8-4) Nachfolgend werden die zwischen der Tektonik und den Salzlösungsvorkommen bestehenden Zusammenhänge unter Beachtung der ausgebildeten Brüche im Salinar (Abb. 8-5) detailliert beschrieben.

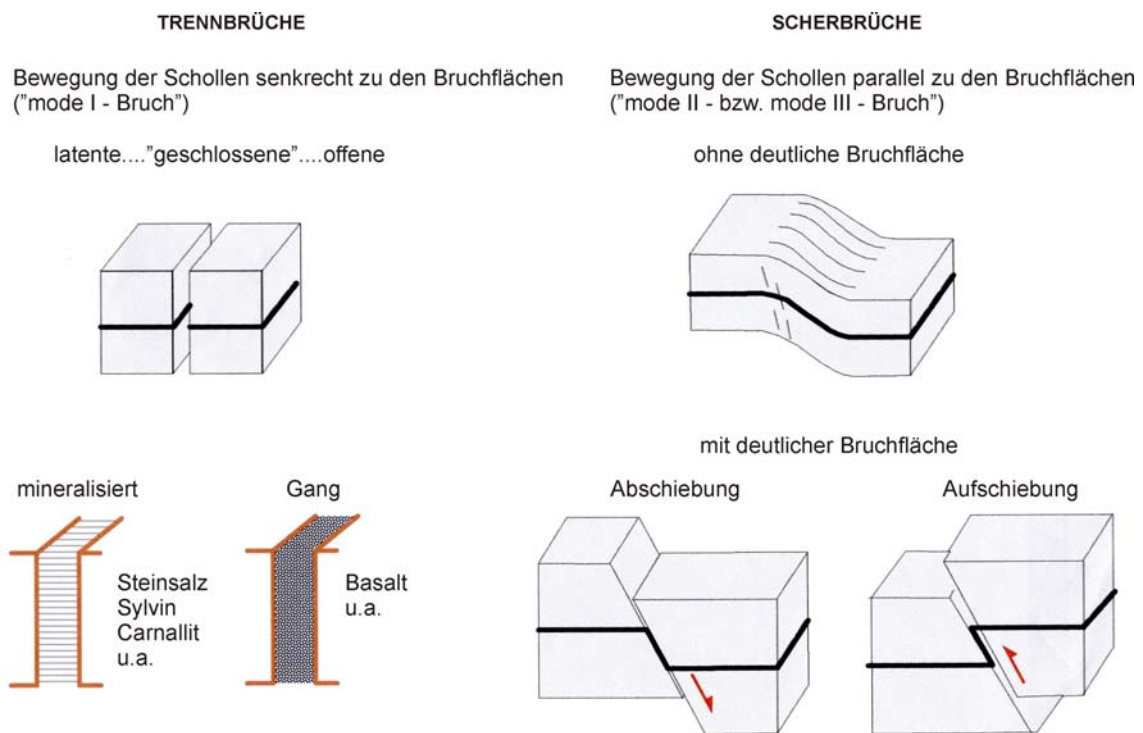
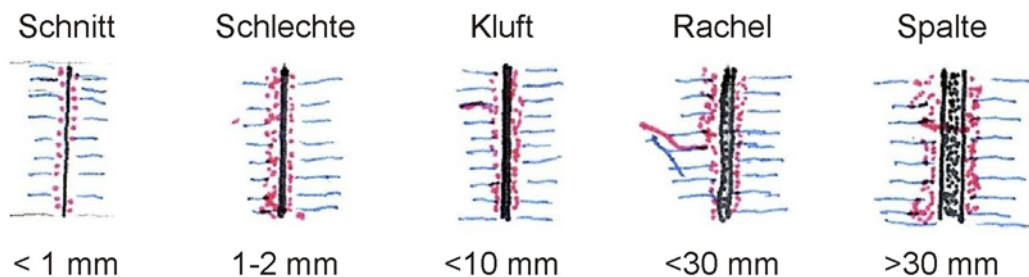


Abb. 8-5 Brüche im Salinar (Schwandt 2000)

8.2 Haupttyp I

Innerhalb des Bearbeitungsgebietes nehmen die horizontal gelagerten bis unregelmäßig gefalteten Abbaueviere die größte flächenhafte Verbreitung ein. Sie umfassen das thüringische Werra-Kalirevier, das Südharz-Kalirevier sowie Teile des Saale-Unstrut- und Nordharz-Kalireviers. Die Salzlösungsvorkommen sind an Einzelstörungen, an Störungszonen und an Kreuzungsbereiche mehrerer Bruchstörungen des Deckgebirges gebunden.

Die geringsten Zuflussmengen innerhalb der nahezu horizontal gelagerten bis unregelmäßig gefalteten Kali- und Steinsalz-Abbaugelände sind bei Einzelstörungen nachweisbar, vorausgesetzt, dass sie außerhalb von regional bedeutenden Störungszonen des Deckgebirges liegen. Die im Salzgebirge beobachteten Schnitte, Schlechten, Klüfte, Racheln und vereinzelt auch Spalten (Abb. 8-6) sind in der Regel geschlossen oder verheilt (Anhang 1, Bild 5, Bild 8 u. Bild 9). Innerhalb und am Rand von Bruchstrukturen im Salinar sind Kristallsalze nachweisbar. Dabei nimmt generell die Anzahl der Kristallsalze im Umfeld von Schnitten über Klüfte zu den Spalten hin zu.



Ausbildung mit:

- überwiegend ohne sichtbaren Versatz parallel zur Kluftoberfläche
- einheitliche Orientierung über große Distanzen
- in Einzelfällen mit Salzlösungsführung
- Reaktionsrand am Gestein

Abb. 8-6 Skizzen zur Ausbildung von salzlösungsführenden Trennbrüchen in den Kaligruben Mitteldeutschlands

Diese Regeln sind jedoch nicht überall entwickelt. Einzelne Bruchstrukturen führen entweder keine Salzlösungen oder Austritte von Lösungen sind keinen konkret fassbaren Brüchen zuzuordnen. Das liegt teilweise daran, dass die Störungsflächen erhebliche Verkrümmungen aufweisen können und Zuordnungsprobleme bestehen.

Um Subrosionsvorgängen im Inneren eines Salzkörpers in Gang zu setzen, ist eine intensivere bruchtektonische Beanspruchung der Schichtenfolge erforderlich, die Einzelstörungen nicht erbringen können. Nach den Beobachtungen in flachen bis gefalteten Abbaugeländen sind zur Herausbildung einer Subrosionsfläche mindestens zwei in einer Richtung streichende und sich teufenwärts möglichst verschneidende Bruchstörungen notwendig. Am intensivsten tritt dies in Erscheinung, wenn eine Gruppe von Bruchstörungen ausgebildet ist, die dann zumeist einer regional wichtigen Störungszone zugeordnet werden kann. Subrosionsvorgänge auch ohne die Beteiligung von

Bruchstörungen treten in Gebieten auf, in denen die saline Schichtenfolge bis in die Grundwasser führenden Schichten herausgehoben ist.

Abb. 8-7 zeigt die Herausbildung eines Subrosionsgebietes im Werra-Kaligebiet, wo im nördlichsten Teil die saline Schichtenfolge oberhalb des Flözes Thüringen um ca. 130 m abgelaugt ist. Die Intensität der Subrosion nimmt in südlicher Richtung ab.

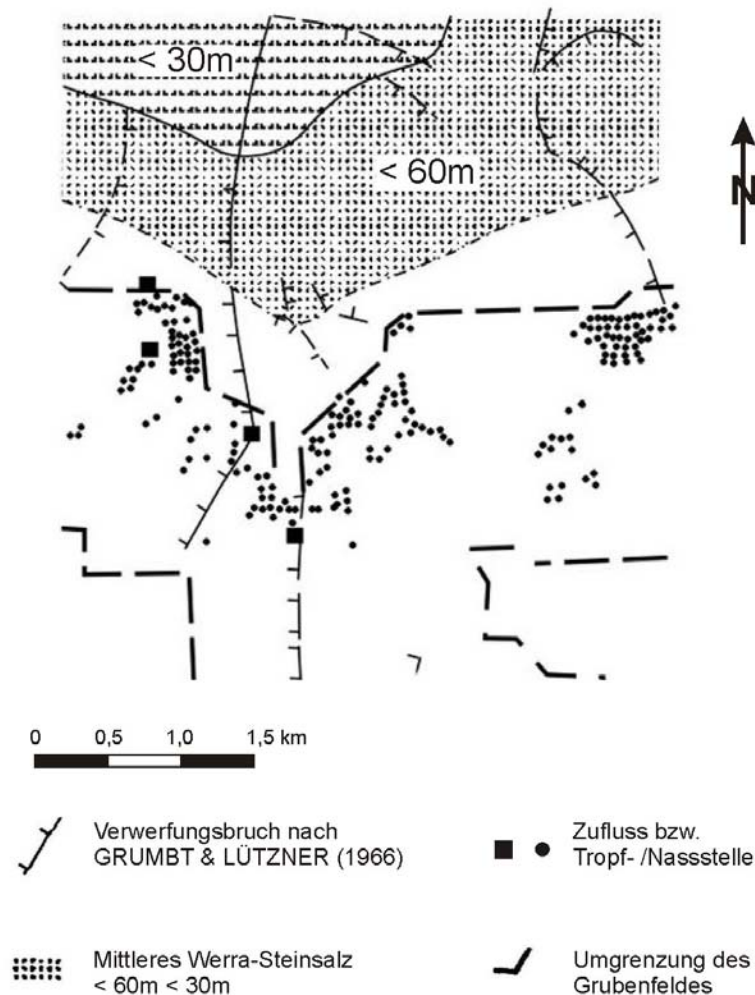


Abb. 8-7 Beziehungen zwischen Verwerfungsbrüchen im Deckgebirge, Ablaugung des Mittleren Werrasteinsalzes sowie Salzlösungsaustritten im Kaliflöz Thüringen (nach Schilder et al. 1983)

In den mit großen Mächtigkeiten (> 60 m) im hangenden Teil des Flözes Thüringen des Werra-Kaligebietes aufgeschlossenen Abbaufeldern wurden mehrere bedeutende Salzlösungszuflüsse und eine Vielzahl von Tropfstellen angefahren. Dabei ist erkennbar, dass mit der Reduzierung der Ablaugungsintensität nach Süden innerhalb der aufgeschlossenen Abbaufelder auch die Anzahl der Zuflüsse sowie der Nassstellen abnimmt.

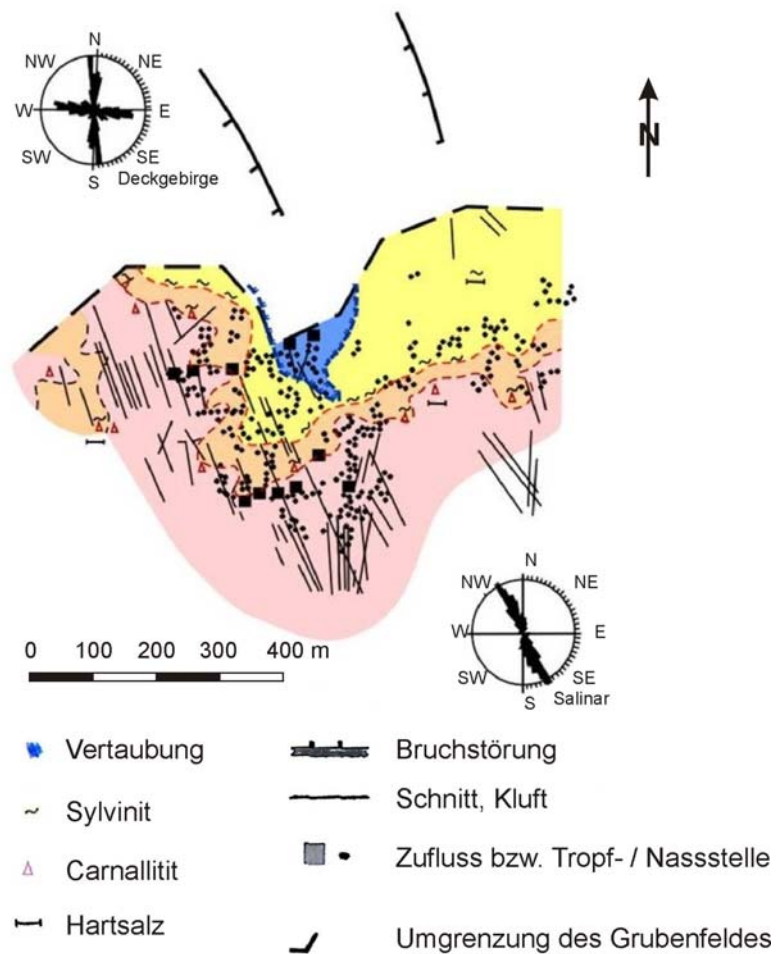


Abb. 8-8: Beziehungen zwischen Verwerfungsbrüchen im Deckgebirge und Schnitten, Salzlösungsaustritten sowie Umbildung des Kaliflözes Thüringen (nach Schwandt 2006)

In Abb. 8-8 ist der Zusammenhang zwischen den Deckgebirgsstörungen und dem Verlauf von Schnitten im Flöz Thüringen dargestellt. Man erkennt den nahezu gleichen Verlauf der Bruchstörungen im Deckgebirge und im Salinar. Außerdem ist eine Umwandlung des hier entwickelten Kalisalzflözes von Carnallit in Carnallit mit Sylvinit eingetreten, darauf folgt Sylvinit, bis schließlich Vertaubung des Flözes folgt. Zu erkennen ist weiterhin, dass ein räumlicher Zusammenhang zwischen den Bruchstörungen im Deckgebirge und denen im Salinar sowie zu den Umwandlungserscheinungen und der Verbreitung der Zufluss- bzw. Nassstellen besteht.

Der Zusammenhang zwischen den Salzlösungsvorkommen in Umbildungsbereichen der Kalisalzflöze Thüringen und Hessen ist im thüringischen Werra-Kalirevier auch aus Abb. 8-9 zu ersehen. Dabei ist festzustellen, dass der Verlauf der Ausbildungsgrenzen der einzelnen Salzgesteine relativ geradlinig ist. Der größte Teil der im thüringischen

Werra-Kalirevier und im Südharz-Kalirevier nachgewiesenen Salzlösungsvorkommen ist diesem Typ zuzuordnen.

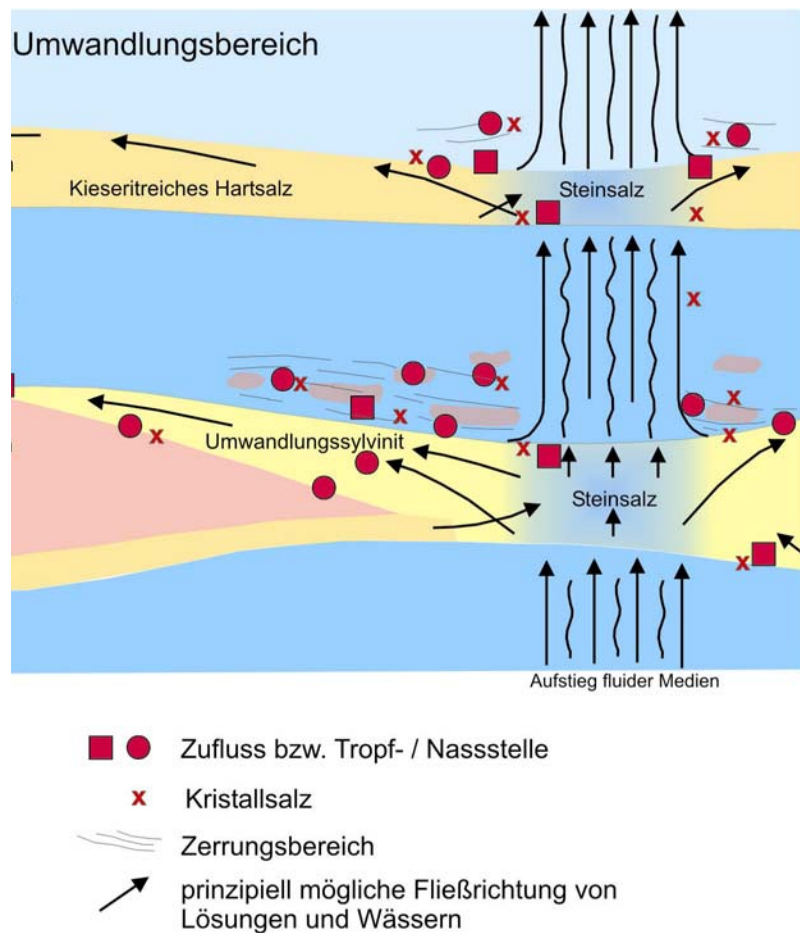


Abb. 8-9 Salzlösungsvorkommen in Umbildungsbereichen der Kaliflöze Thüringen und Hessen im thüringischen Werra-Kalirevier (nach Schwandt 1990)

In den flach bis lokal auch steiler gelagerten oder wellig verformten Kali- und Steinsalzlagerstätten im thüringischen Werra- und im Südharz-Kalirevier sowie in Teilen des Saale-Unstrut- und des Nordharz-Kalibereiches wird eine starke bruchtektonische Verformung des hangenden Deckgebirges durch Zuflüsse aus offenen Systemen angezeigt. Es sind Gebiete, die von sich kreuzenden Bruchstörungen geprägt sind (Abb. 8-10) und durch die Verfallung das Kalilagers gestreckt und dabei ausgedünnt worden ist.

Die Richtung der Hauptdurchtrennung der Schichtenfolge verläuft herzynisch (um NW-SE). Nahezu senkrecht dazu sind in Kreuzungsbereichen mit anderen Bruchstrukturen im Salinar neben Verwerfungen und Schnitten auch Spalten, Klüfte und Rachen nachzuweisen. Die Spalten können noch offen sein oder sind bereits mit eingebrochenen Gesteinen aus dem Hangenden, mit Basalt oder auch mit Kristallsalz gefüllt. Eine detaillierte Erkundung dieser Gebiete ist zeit- und kostenaufwendig. In stark bruchtekto-

nisch beanspruchten Gebieten kann die Entwicklung bis zu einer vollständigen Aus- und Ablaugung der salinaren Schichten fortgeschritten sein. In Bereichen mit Einzelstörungen fehlt in der Regel die Ab- bzw. Auslaugung, desgleichen in Bereichen mit verheilten (mineralisierten oder verfüllten) Klüften.

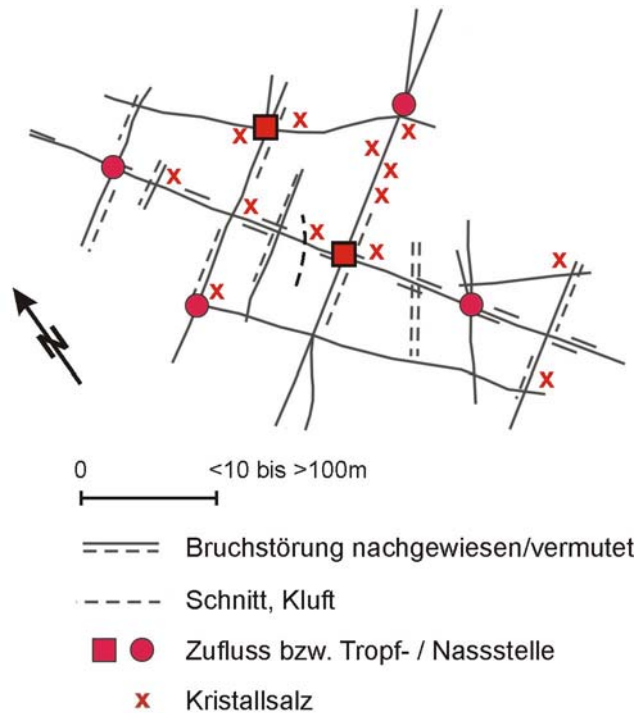


Abb. 8-10 Geologische Position der Salzlösungsvorkommen in Kreuzungsbereichen von Bruchstörungen im Kali- und Steinsalzbergbau Mitteldeutschlands – Schema

Eine Aktivierung der Subrosion kann dann erfolgen, wenn lösliche Gesteine, ein Lösungsmittel und eine Fliessbewegung an löslichen Gesteinen entlang zustande kommt (Schilder et al. 1983). In diesen tektonisch am stärksten beanspruchten Gebieten mit flacher bis halbsteiler Lagerung sind folgende Salzlösungsvorkommen einzuordnen: BC34 bis BC39, BD06 bis BD08, CE05, CE06 und CE 12 u. a.

Die wesentlichen Zusammenhänge zwischen der Tektonik und dem Auftreten von Salzlösungsvorkommen sind in dem Schema (Abb. 8-11) zur geologischen Positionierung der Salzlösungs- und Wasservorkommen in den Grubenfeldern des thüringischen Werra- Kalireviere dargestellt.

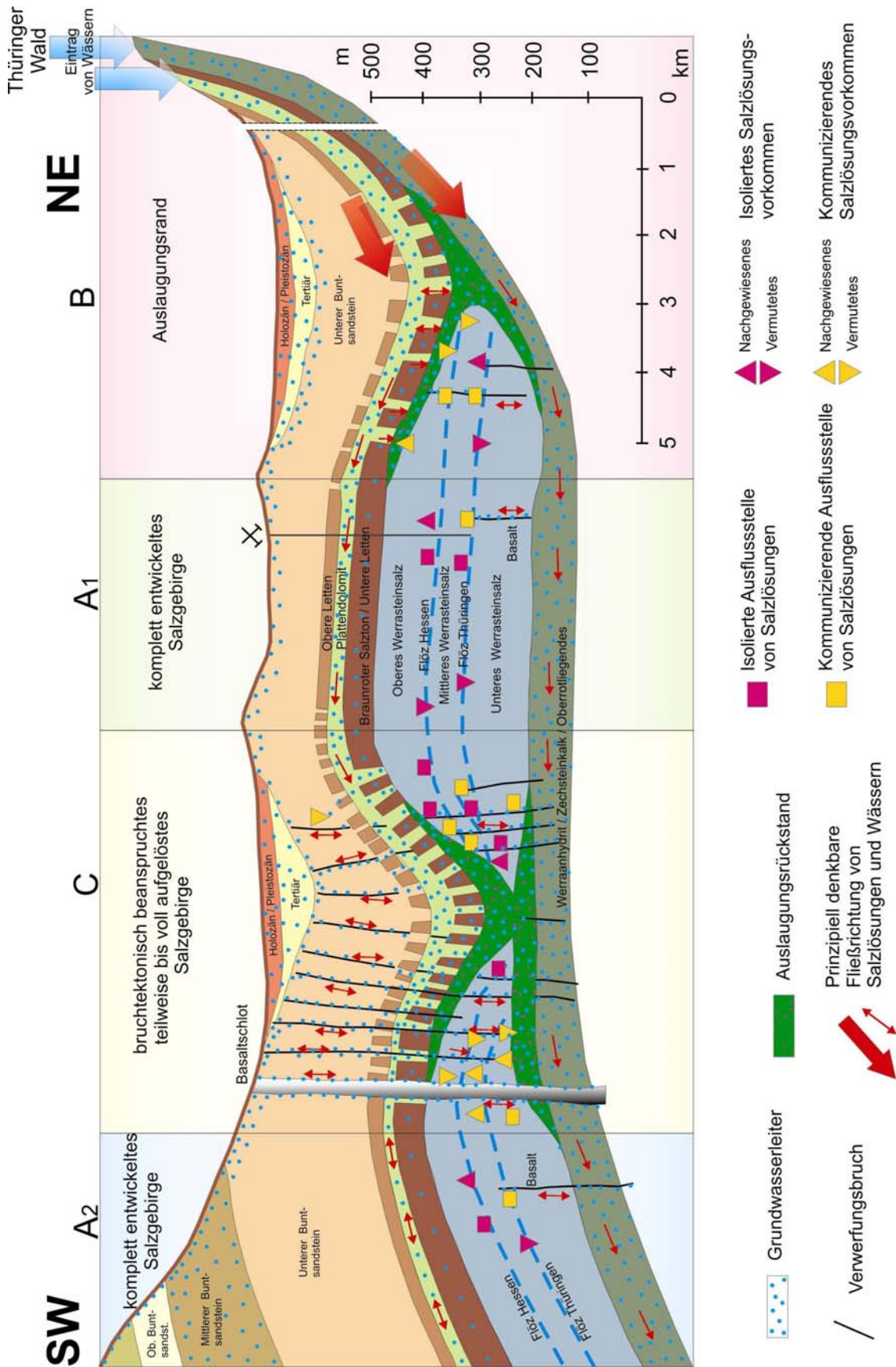


Abb. 8-11 Schema der geologischen Position der Salzlösungs- und Wasservorkommen in den Grubenfeldern des thüringischen Werra-Kalireviers (Schwandt 2005)

8.3 Haupttyp II

Der großräumige tektonische Bau des Saale-Unstrut- und Nordharz-Kalireviers wird von NW – SE, untergeordnet auch von NE – SW und E – W streichenden Sätteln und Mulden bestimmt (Schwandt 1978).

Bereits bei geringfügiger Aufsattelung der Schichten werden an den Sattelflanken Zerküftungskräfte wirksam, die es geklüfteten Horizonten innerhalb der Salinarserie, wie dem geklüfteten Hauptanhydrit ermöglichen, durch die Aufdehnung des Kluffinventars eine Vergrößerung der Stapelmöglichkeiten für Salzlösungen zu erreichen. Durch den Kontakt mit benachbarten Salinarhorizonten war auch eine Beeinflussung des Chemismus der Salzlösungen gegeben (Abb. 8-12).

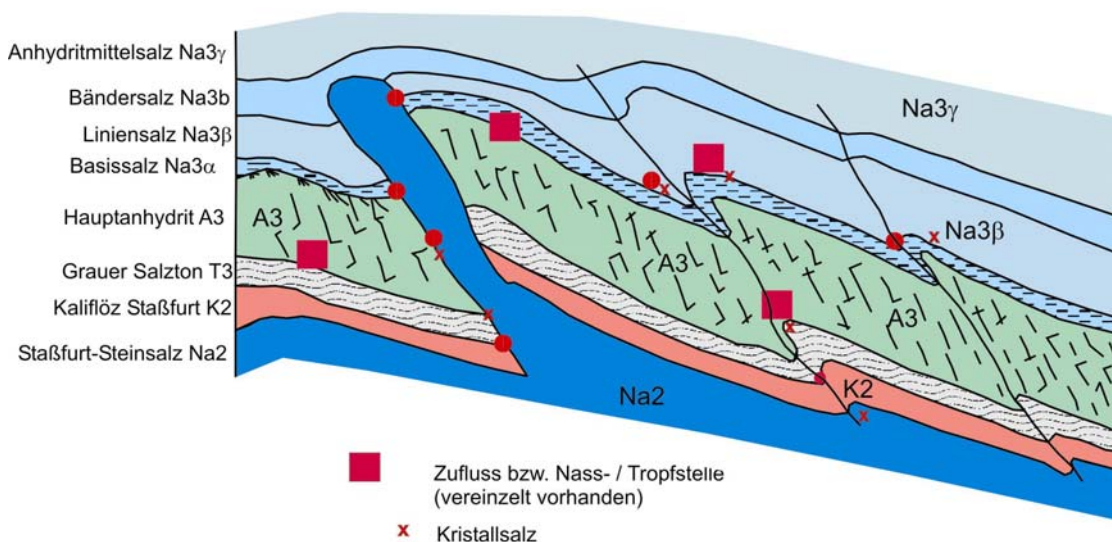


Abb. 8-12 Lage möglicher Salzlösungsvorkommen unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung in schuppenartig übereinander geschobenen Hauptanhydritschollen – schematischer Querschnitt bei ca. 30° einfallenden Schichten

Zum tektonisch gebildeten Flächeninventar gehört am Staßfurter Sattel nach Fleischer (1960) und Behr (1960) neben Trennbrüchen auch das untergeordnete Auftreten von Scherbrüchen. Diese sind im Regelfall parallel zum Streichen des Sättels ausgerichtet und ihre Bewegungsvektoren sind quer zu den Brüchen orientiert. Es handelt sich vor allem um Abschiebungsstrukturen (Schwandt 1991).

Das im Rahmen der Diagenese entstandene Trennbruchinventar zerteilt den Hauptanhydrit gleichmäßig, unabhängig von der später entstandenen tektonischen Verstellung

zu Sätteln oder in den in flacher Lagerung verbliebenen Gebieten. Das ist auch aus der Verteilung der Salzlösungsvorkommen in Abb. 8-13 ablesbar. Allerdings zieht das tiefenwärtige Schließen der Klüfte infolge zunehmender krustaler Einspannung eine generelle Abnahme der Zuflussmengen, nicht aber der Anzahl der Zuflussstellen, nach sich.

Der größte Teil der nachgewiesenen Salzlösungsaustritte an den Sattelflanken ist diesem Typ zuzuordnen. Es handelt sich dabei um Austritte mit begrenzter Schüttungsmenge und mit oft unterschiedlicher Konzentration. Als Beispiele werden folgende Salzlösungsaustritte genannt: DB01, DB02, DC03, DE03, ED01, ED02, EE01 – EE03, EF01, EF03, EF04, EF06, EM03.

Die Bedeutung von Querstörungen im Grubenfeld von Solvayhall I/II ist nach dem Auftreten von Tagesbrüchen und dem Absaufen der Grubenfelder erkannt worden. Hier wurden in einem ab 1935 vorgerichteten Feld an der NNE-Flanke des Bernburger Hauptsattels nach Abschluss der Gewinnungsarbeiten erste Salzlösungszuflüsse aus dem Deckgebirge beobachtet. Sie lagen in einem von Keilhack & Dammer (1913) vermuteten Querstörungsbereich. Das durch die Tagesbrüche später aufgeschlossene Deckgebirge zeigte sich als stark von Großklüften durchzogen (Anhang 1, Bild 10). Im Salinar darunter ist, wie der Schnitt (Abb. 8-13) zeigt, im Bereich der Tagesbrüche eine Sattelflanke ausgebildet.

Mit den danach am Staßfurter Sattel durchgeführten geologischen Kartierungsarbeiten konnten auch dort den Sattel schneidende Querstörungen erkundet werden (Abb. 8-14). Diese Querstörungen sind im Salinar durch eine verstärkte Klüftweitung im Hauptanhydrit, im Deckgebirge durch eine erhöhte Wasserführung charakterisiert (Schwandt 1978). In der Regel besteht eine direkte Verbindung zwischen den in den Querstörungen zirkulierenden Wässern und den Salzlösungs- bzw. Wasserzuflüssen im Grubenfeld (Schwandt 2005). Dabei konnten sich die Wässer des Deckgebirges, verursacht durch subrosionsbedingt entstandene und erweiterte Migrationsbahnen, an NaCl aufsättigen und in die Grubenhohlräume einfließen (Abb. 8-15).

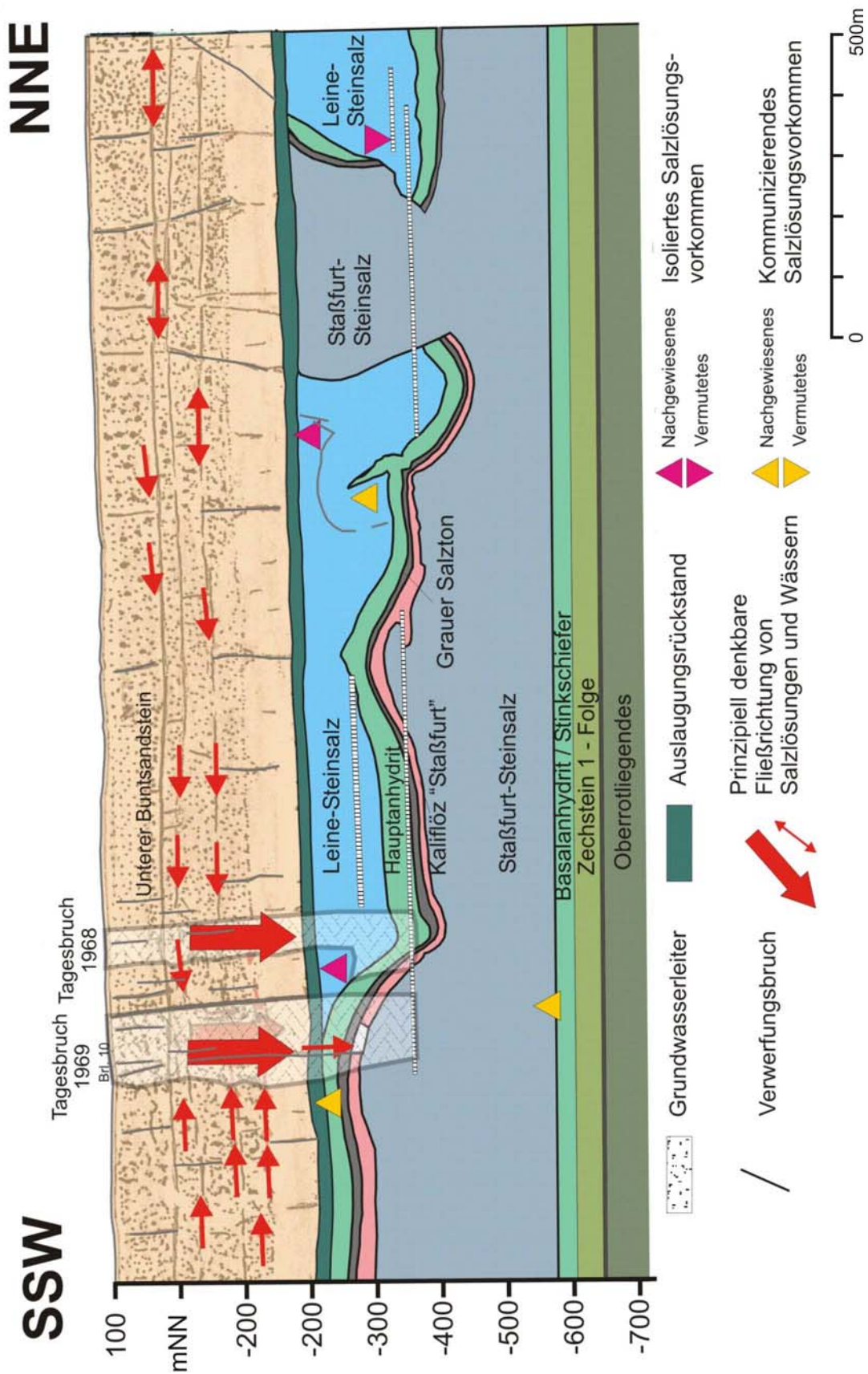


Abb. 8-13 Position der Salzlösungs- und Wasservorkommen an der NNE-Flanke des Bernburger Hauptsattels (Schwandt 2005)

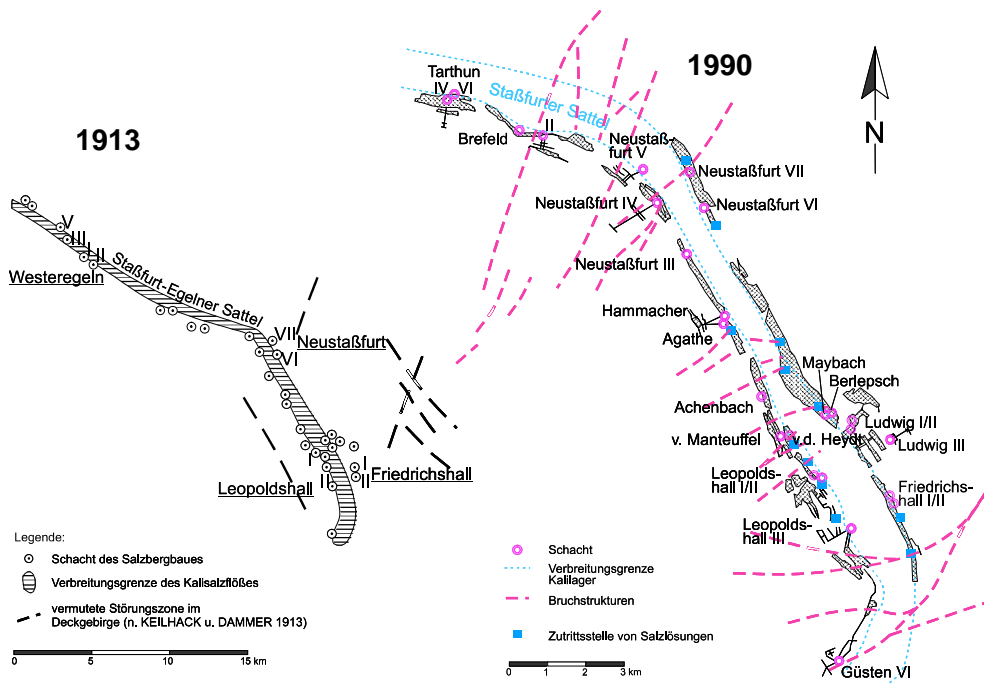


Abb. 8-14 Entwicklung der Kenntnisse zur Bruchtektonik am Staßfurt-Egerner Sattel (nach Schwandt 2006)

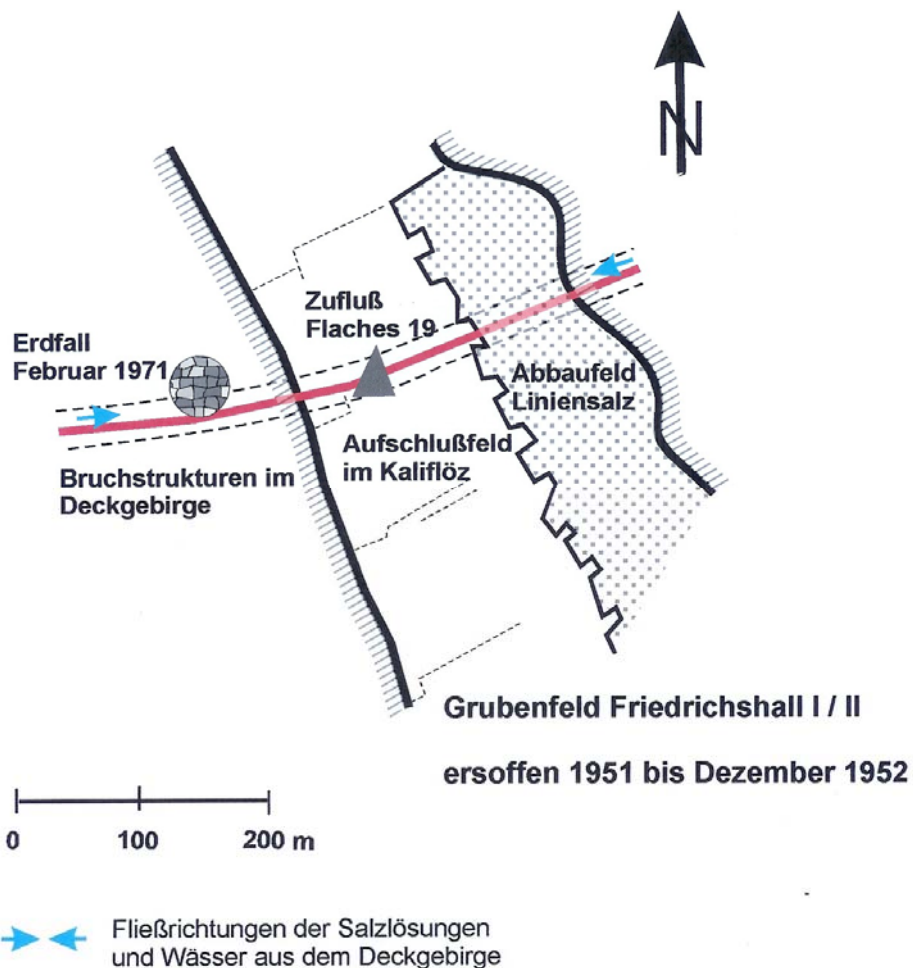


Abb. 8-15 Beziehung der Querstörung im Deckgebirge mit dem Zufluss Flaches 19 in der Grube Friedrichshall (Schwandt 2005)

Zu diesem Typ, der durch aus dem Deckgebirge zutretende Wässer charakterisiert ist, gehören neben den Salzlösungsvorkommen von Solvayhall I/II, südwestlich von Schacht I (Schwandt 1978), EC01 – EC04 und von Westeregeln I/II (Schwandt et al. 1990), EG01, EG02.

Der ca. 670.000 m³ umfassende Grubenhohlraum vom Abbaufeld Aschersleben III ist innerhalb von 24 Stunden durch Zuflüsse von Wässern aus einer Hochbohrung erschaffen. Es handelte sich dabei um eine Erkundungsbohrung in der Hangenden Kainitstrecke im südwestlichen Teil des Grubenfeldes in unmittelbarer Nähe der Verbreitungsgrenze des als Kainit ausgebildeten Kalisalzflözes. Die Bohrstelle mit dem Wasserzutritt befindet sich in einem Kreuzungsbereich des EW-streichenden Schierstädter Sattels mit dem NNE– SW-streichenden Nordsattel. Der Knotenpunkt von drei Sätteln, des Nordsattels mit dem Schierstedter Sattel und dem Ascherslebener Sattel (Abb. 8-16) liegt etwas westlich von der Laugenaustritsstelle. Es handelt sich um ein stark geklüftetes Gebiet, das im mitteldeutschen Kalibergbau erstmals in derart geringer Teufe aufgeschlossen wurde. Durch die Lage des Abbaufeldes unter einem Gebiet totaler Ablaugung des Leine- und Allersteinsalzes ist es denkbar, dass die beobachteten Wässer sowohl aus dem klüftigen Gips und Anhydrit, als auch aus dem Unteren Buntsandstein in das Grubenfeld eintraten (Schwandt 1978).

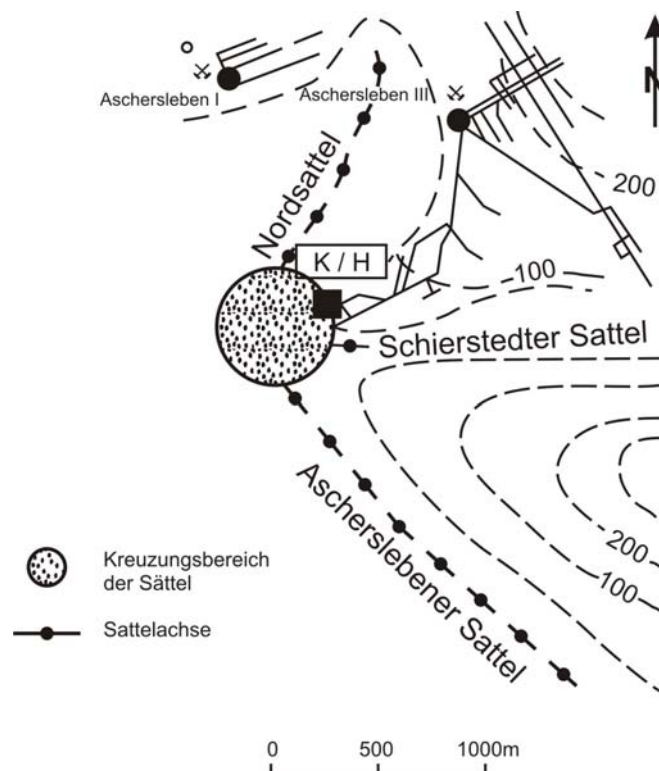


Abb. 8-16 Lage der Zuflussstelle Hangende Kainitstrecke (K/H) im Grubenfeld Aschersleben III

8.4 Nachsatz

Der Versuch, die im mitteldeutschen Kali- und Steinsalzbergbau nachgewiesenen Salzlösungsvorkommen nach tektonischen Kriterien zu gliedern, trägt noch Übersichtscharakter. Es konnte aber herausgearbeitet werden, dass die tektonischen Verhältnisse in diesen Gebieten eine Gliederung in zwei Struktur-Haupttypen zulassen:

- a) bruchtektonisch beanspruchte Gebiete mit dominierend horizontal bis lokal steil gelagerten oder unregelmäßig einfallenden oder gefalteten Abbaugebieten (Haupttyp I) und
- b) bruchtektonisch beanspruchte Gebiete an Sattelflanken und im Topbereich intern verfalteter Sattelzonen

Inwieweit eine weitere Untergliederung der beiden Haupttypen in Einzelstörungen, Störungszonen und Kreuzungsbereiche mehrerer Bruchstörungen vorgenommen werden kann, wäre durch eine Erweiterung der Datenbasis zu prüfen. Dabei wären fließende Übergänge zu berücksichtigen. Diese Arbeiten könnten, da sie nicht in direktem Zusammenhang mit der Aufgabenstellung dieses FuE-Vorhabens stehen, zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden.

Obwohl in dieser Ausarbeitung alle Hauptzuflüsse im mitteldeutschen Kalibergbau erfasst sind, kann die Einordnung der Salzlösungsvorkommen nach ihrer tektonischen und stratigraphischen Position keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Das liegt an der Vielfalt von strukturell möglichen und auch tatsächlich realisierten Verknüpfungen und an Verschneidungen von Störungen mit Klüftzonen. Hinzu kommt, dass die tatsächlichen Kenntnisse über die strukturelle Situation schon unmittelbar außerhalb der bergbaulich aufgefahrenen Bereiche des Salinarstockwerkes erheblich nachlässt. Dies gilt in noch viel größerem Maße bezüglich der konkreten Kenntnislage bezüglich des auflagernden Deckgebirges, das durch den Salzbergbau nicht angeritzt wird.

Es ist zu empfehlen, diese Aussagen insbesondere nach der Vervollständigung der Angaben zu den Schüttungsmengen zu überarbeiten.

9 Verwertbarkeit der Ergebnisse für die Standortcharakteristik und Standortauswahl von Bergwerken in Salzformationen

Mit der Erfassung und Bewertung der Ergebnisse von 5901 chemischen und physikalischen Analysen der Salzlösungszuflüsse im Salzbergbau Mitteldeutschlands bei gleichzeitiger Einbeziehung der an den Zuflussstellen vorliegenden geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse wurden Erkenntnisse für die Standortcharakteristik und Standortauswahl von Bergwerken im Zechstein erarbeitet. Sie gestatten es, nach Abschluss der Vorerkundung, für jeden beliebigen Standort eine begründete Aussage zur Bewertung der dort vorliegenden hydrologischen Gefährdung der Bergwerke vorzunehmen. Diese Aussage gilt sowohl für neu aufzufahrende Endlagerbergwerke in mächtigen Steinsalzhorizonten, als auch für UTD und UTV, die in ehemaligen oder noch fördernden Gewinnungsbergwerken eingerichtet werden sollen.

Als besonders günstig für die spätere Nutzung von Salzbergwerken als Endlagerbergwerke werden folgende Faktoren angesehen:

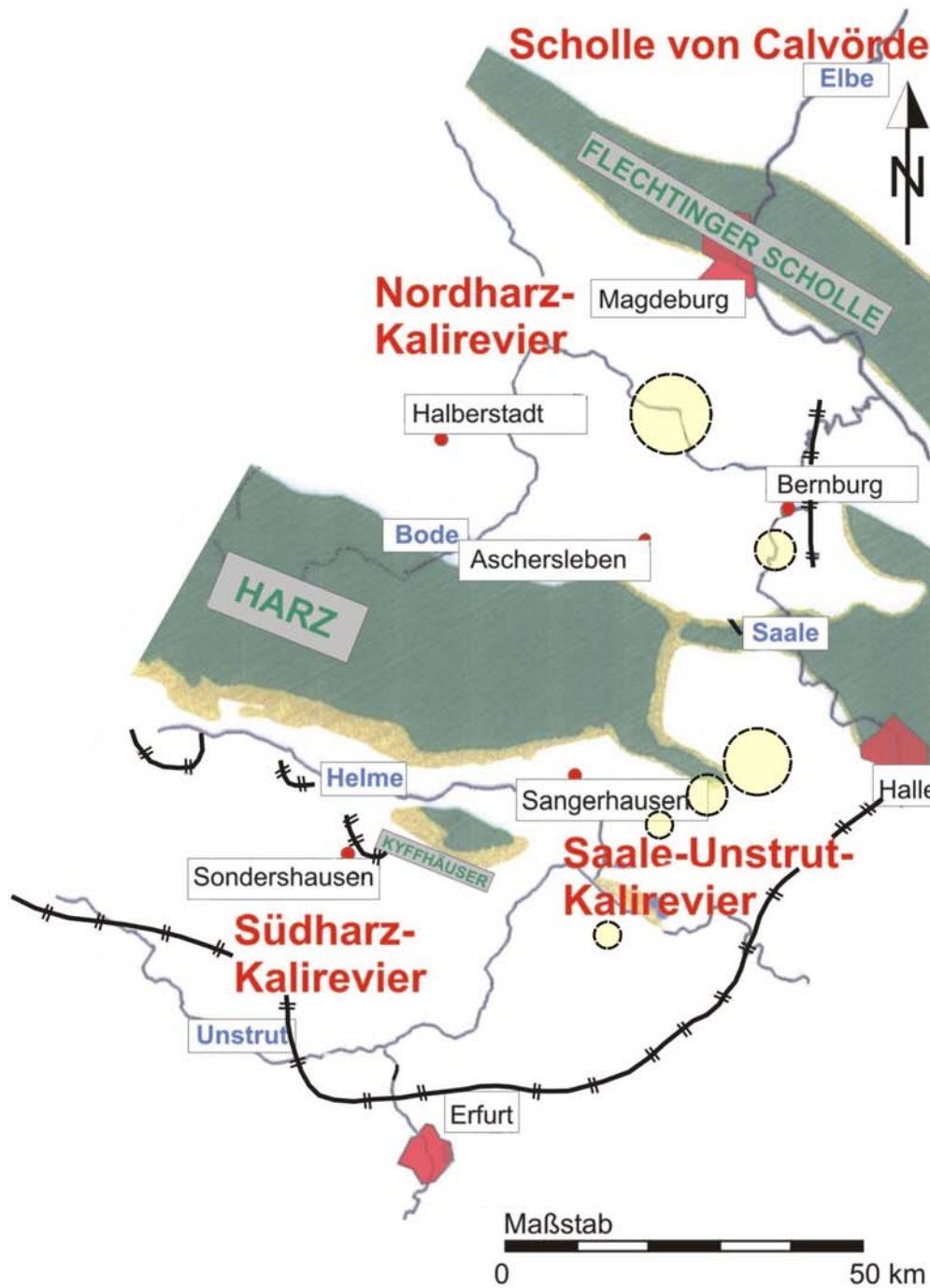
- Bereiche von flacher bis flachwelliger Lagerung des Lagerstättenhorizontes, jedoch außerhalb von Sattelzonen, um Zerrungsbereiche zu meiden und außerhalb von Subrosionsbereichen (Gipshut).
- Keine Bruchstörungen und intensiv ausgebildete Großklüftzonen im Deckgebirge und im Salinar.
- Die Existenz von ausreichend mächtigen Barrieren gegen wasserführende Schichten im Hangenden und im Liegenden.

Zur Bewertung von kritischen Spezialfällen sind folgende Erkenntnisse bedeutsam:

- Das Gefährdungspotential von Salzlösungszutritten in Kali- und Steinsalzgruben muss durch komplexe Gefährdungsanalysen mit ausreichender Sicherheit abschätzbar sein.
- Geochemische Untersuchungen sind wichtig, aber allein nicht ausreichend. Eine Verknüpfung mit geologisch-strukturellen Untersuchungen (komplexe Analyse) wird dringend empfohlen.
- Der Chemismus der Salzlösungszuflüsse korreliert mit den in den Grubenbauen anstehenden Salzgesteinen (lokale Beeinflussung) und wird zusätzlich, aber in geringerem Maße, von der regionalen geologischen Position der Salzgruben im Zechsteinbecken bestimmt (regionaler Einfluss).

- Die Schüttungsmengen der Salzlösungszuflüsse nehmen mit wachsender Entfernung der Bergwerke vom Ausgehenden am Randbereich der Sedimentbecken ab (Thüringer Becken, Werra-Fulda Becken, Subherzynes Becken).
- Grundsätzlich sind Salzlösungszutritte auf Gebiete konzentriert, in denen die im post- und präsalinaren Gebirge allgegenwärtige, bereits bei der Diagenese der Sedimente erworbene primäre Zerklüftung durch weitere Bruchprozesse, vor allem durch Großklüfte, Klüftzonen, Störungen und deren Kombination, überprägt wurde.

Für die Einrichtung neuer Bergwerke mit geringem hydrologischem Gefährdungspotential sind an einigen Standorten des Untersuchungsgebietes die geologischen und hydrologischen Verhältnisse als günstig einzustufen. Besonders vorteilhaft sind Gebiete mit großen Mächtigkeiten des Staßfurtsteinsalzes von über 500 m. Sie liegen in den Räumen Staßfurt, Bernburg, Teutschenthal und Roßleben in jeweils bergmännisch beherrschbaren Teufen (Abb. 9-1). In derartig ausgebildetem Steinsalz sind für die Speicherung von Erdöl und Erdgas bereits 149 Kavernen errichtet worden, 51 weitere sind im Bau (Tab. 9-1). Diese Kavernen werden teilweise seit mehreren Jahrzehnten mit einem Druck oberhalb des hydrostatischen Druckes betrieben, ohne dass Verluste im Speicher eingetreten wären. Das belegt, dass gefährdende Wasser- und Gaswegsamkeiten bei geeigneter Standortauswahl zuverlässig vermieden werden können.



—#—#—# Verbreitungsgebiet des Kaliflözes Staßfurt

○ Staßfurtsteinsalz in flacher Lagerung mit über 500 m Gesamtmächtigkeit

Abb. 9-1 Schematische Lage der Steinsalzmächtigkeiten größer 500 m im Bearbeitungsgebiet

Tab. 9-1 Stand der Entwicklung der Erdgas-Kavernenspeicher in Deutschland
(aus Sedlacek 2005)

Ort	Gesellschaft	Anzahl der Einzel-speicher	Teufe [m]	Speicher-formation	Gesamt-volumen*	max. nutzbares Arbeitsgas	Arbeits-gas n. Endausbau
					Mio.m ³ (Vo)	Mio.m ³ (VJ)	Mio.m ³ (V.)
In Betrieb							
Bad Lauchstädt	Verbundnetz Gas AG	18	780-950	Zechstein 3	857	546	546
Bernburg	Verbundnetz Gas AG	30	500-700	Zechstein 2	1.107	848	848
Bremen-Lesum	swb Netze GmbH & Co KG	2	1.050-1.350	Zechstein	90	73	73
Bremen-Lesum	EMPG	2	1.315-1.780	Zechstein	269	204	204
Burggraf-Bemsdorf	Verbundnetz Gas AG	stillgel. Bergwerk	580	Zechstein 2	5	3	3
Empelde	GHG-Gasspeicher Hannover GmbH	3	1.300-1.800	Zechstein 2	183	146	171
Epe	E.ON Ruhrgas AG	32	1.090-1.420	Zechstein: 1	2.109	1.661	1.976
Epe	RWE WVE Netzservice GmbH. Thyssengas GmbH	7	1.100-1.420	Zechstein 1	373	291	291
Etzel	IVG Logistik GmbH	9	900-1.100	Zechstein 2	841	560	560
Harsefeld	EMPG für BEB Erdgas und Erdöl GmbH	2	1.150-1.450	Zechstein	186	140	140
Huntorf	EWE Aktiengesellschaft	5	650-1.400	Zechstein	201	139	139
Kiel-Rönne	Stadtwerke Kiel AG. E.ON Hanse AG	2	1.250-1.600	Rotliegend	100	60	60
Kraak	E.ON Hanse AG	2	900-1100	Zechstein	130	117	250
Krummhörn	E.ON Ruhrgas AG	3	1.500-1.800	Zechstein 2	73	51	320
Neuenhünorf	EWE Aktiengesellschaft	1	750-1.000	Zechstein	33	17	17
Nüllermoor	EWE Aktiengesellschaft	16	950-1.300	Zechstein	1.243	930	930
Peckensen	EEG – Erdgas Erdöl GmbH	1	1.300-1.450	Zechstein	105	60	60
Reckrod	Gas-Union GmbH	2	800-1.100	Zechstein 1	130	82	82
Stäbfurt	RWE WVE Netzservice GmbH	4	400-1.130	Zechstein	254	210	210
Xanten	RWE WVE Netzservice GmbH	8	1.000	Zechstein	220	190	190
Summe (in Betrieb)		149			8.509	6.328	7.070
In Planung und Bau							
Bernburg	Verbundnetz Gas AG	7	500-700	Zechstein 2	406	308	308
Empelde	GHG-Gasspeicher Hannover GmbH	1	1.300-1.800	Zechstein 2	145	113	113
Epe	RWE WVE Netzservice GmbH. Thyssengas GmbH	3	1.300	Zechstein 1	333	264	264
Huntorf	EWE Aktiengesellschaft	1	1.000-1.400	Zechstein	194	151	151
Jemgum/ Hiligaste	Wintershall AG	10	1.000-1.300	Zechstein	1.000	700	700
Kiel-Rönne	Stadtwerke Kiel AG. E.ON Hanse AG	1	1.250-1.600	Rotliegend	90	54	54
Nüllermoor	EWE Aktiengesellschaft	2	950-1.300	Zechstein	226	177	177
Peckensen	EEG – Erdgas Erdöl GmbH	10	1.100-1.400	Zechstein	1.050	600	600
Reckrod	Gas-Union GmbH	1	720-940	Zechstein 1	50	30	30
Reckrod-Wöll	Wintershall AG	2	700-900	Zechstein 1	150	120	120
Rüdersdorf	EWE Aktiengesellschaft	4	900-1.200	Zechstein	360	300	300
Stäbfurt	Kavernenspeicher Stäbfurt GmbH	4	850-1.150	Zechstein	380	290	290
Xanten	RWE WVE Netzservice GmbH	5	1.000	Zechstein	150	125	125
Summe (Planung/Bau)		51			4.463	3.174	3.174

* Gesamtvolumen = Summe aus maximalem (zugelassenem) Arbeitsgas- und Küssengasvolumen

Quelle: Betreiberfirmen

Stand 31.12.2004

10 Literaturübersicht

- Anonymus (1982): Arbeitsschutzinstruktionen zum Schutz vor Gefahren durch Salzlösungszuflüsse im VEB Kalibetrieb Werra – Laugenschutz- Nr. I 89/82, 48 S.
- Autenrieth, H. (1953): Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der graphischen und rechnerischen Behandlung der Vorgänge bei der Gewinnung der Kalidüngemittel aus Rohsalzen. – Kali und Steinsalz 1, 2, 3-17.
- Autenrieth, H. (1954): Die stabilen und metastabilen Gleichgewichte des reziproken Salzpaares $K_2Cl_2 + MgSO_4 \leftrightarrow K_2SO_4 + MgCl_2$ ohne und mit NaCl als Bodenkörper, sowie ihre Anwendung in der Praxis. – Kali und Steinsalz 1, 7, 3-22.
- Autenrieth, H. (1955): Neue, für die Kalirohsalzverarbeitung wichtige Untersuchungen am quinären, NaCl-gesättigten System der Salze ozeanischer Salzablagerungen. – Kali und Steinsalz 1, 11, 18-32.
- Autenrieth, H. (1958): Untersuchungen am Sechs-Komponenten-System K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , (Cl^-) , H_2O mit Schlußfolgerungen für die Verarbeitung der Kalisalze. – Kali und Steinsalz 2, 181-200.
- Autenrieth, H., Braune, G. (1959a): Das Sechs-Komponenten-System K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , (Cl^-) , H_2O bei $90^\circ C$ und seine Anwendungen auf Schlammprobleme der Kalisalzverarbeitung. – Kali und Steinsalz 2, 395-405.
- Autenrieth, H., Braune, G. (1959b): Die graphische und rechnerische Behandlung der Vorgänge bei der Verarbeitung von Kalisalzen unter besonderer Berücksichtigung neuerer Entwicklungen. – Kaliforschungsinstitut Hannover (Hrsg.), Selbstverlag, 177 S.
- Autenrieth, H., Braune, G. (1960 a): Die Lösungsgleichgewichte des reziproken Salzpaares $Na_2Cl_2 + MgCl_2 + H_2O$ bei Sättigung an NaCl unter besonderer Berücksichtigung des metastabilen Bereichs. – Kali und Steinsalz 3, 15-30.
- Autenrieth, H., Braune, G. (1960 b): Weitere Untersuchungen im stabilen und metastabilen Gebiet des reziproken Salzpaares $Na_2Cl_2 + MgCl_2 + H_2O$ bei Sättigung an NaCl. – Kali und Steinsalz 3, 85-97.

- Baar, C. A. (1958): Über gleichartige Gebirgsverformungen durch bergmännischen Abbau von Kaliflözen bzw. durch chemische Umbildung von Kaliflözen in der geologischen Vergangenheit. – Freiberger Forsch.-H. A 123, 137-159, Leipzig
- Baumert, B. (1928): Über Laugen- und Wasserzuflüsse im deutschen Kalibergbau. – Diss. Technische Hochschule, Aachen
- Baumert, B. (1953): Die Laugenspeicher in den Schichten des Zechsteins und ihre Gefahren für den Salzbergbau. – Z.Dtsch.Geol.Ges.105, 729-733, Stuttgart
- Beck, R., Emons, H.-H., Holdorf, H. (1981a): Untersuchungen ausgewählter Isothermen des quinären Systems Na^+ , K^+ , $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{SO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{O}$ im Bereich der Natriumchlorid-Carnallit-Sättigung. – Freiberger Forsch.-H. A 628, 7-18.
- Beck, R., Emons, H.-H., Holdorf, H. (1981b): Die Polytherme des quinären Systems Na^+ , K^+ , $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{SO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{O}$ im Bereich der Natriumchlorid-Carnallit-Sättigung. – Freiberger Forsch.-H. A 628, 19-30.
- Beer, W. W. (1996): Kalilagerstätten in Deutschland. – Kali und Steinsalz, 12, 1, 18-30, Kassel
- Behr, E.-M.(1960): Geologische Beobachtungen am Hauptanhydrit des Staßfurt-Egelter Sattels im Bereich des Kaliwerkes Staßfurt VI/VII. – Freiberger Forsch.-H., C 90, 88-105; Berlin
- Borchert, H. (1941): Die Vertaubungen der Salzlagerstätten und ihre Ursachen. – Kali, verwandte Salze und Erdöl, 3-5, S. 1-15.
- Borchert, H. (1959): Ozeane Salzlagerstätten. Grundzüge der Entstehung und Metamorphose ozeaner Salzlagerstätten sowie des Gebirgsverhaltens von Salzgesteinsmassen. – Verl. Gebrüder Bornträger, Berlin
- Borchert, H. (1963): Der Wasserhaushalt bei der Metamorphose der Kalisalze. – Berichte Geol. Ges., Sonderheft 1, 145-194, Berlin
- Borchert, H., Baier, E. (1954): Zur Methamorphose ozeaner Gipsablagerungen. – N.Jb.Mineral., 86, 103-154.

- Böhm, G. (1972): Zur petrographischen Ausbildung und Genese des Kalisalzlagers „Flöz Ronnenberg“ auf der Scholle von Calvörde. – Chemie der Erde, 31, 1, 113 – 155.
- Börger (1942): Laugenströmungen in ersoffenen Kalibergwerken als Ursache später Oberflächenschäden. – Kali, 2, 27-31, Halle
- Börger (1943): Laugenströmungen in ersoffenen Kalibergwerken als Ursache später Oberflächenschäden. – Kali, 9, 160-162, Halle
- Borstel, L. E. von (1991a): The behavior of gas bubbles within fluid inclusions in evaporites. – ECROFI XI – European Current Research on Fluid Inclusions, Pinius No 5, 243-244.
- Borstel, L. E. von (1991b): Die Charakterisierung des Stoffbestandes von fluid inclusions in Zechsteinevaporiten mittels der Lösungsgleichgewichte mariner Salzsysteme. – Kali Steinsalz 10, 409-416, Essen
- Borstel, L. E. von (1992): Lösungen in marinen Zechsteinevaporiten Deutschlands. – Diss. Uni Clausthal, Institut für Mineralogie und Mineralische Rohstoffe der Technischen Universität, Fachgebiet für Salzlagerstätten und Untergrund-Deponien, 321 S., 72 Abb., 75 Tab., Clausthal
- Borstel, L. E. von (1993): Lösungen in marinen Evaporiten. – BfS-Schriften 10/93 Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 35S. ISSN 0937-4468.
- Borstel, L. E. von, Herrmann, A. G. (1990): Der quantitative Stoffbestand von fluid inclusions in Salzmineralen. Neue Wege in der Evaporitforschung. – Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft, Beiträge zum European Journal of Mineralogy Vol 2. No 1, 30, Stuttgart
- Braitsch, O. (1962): Entstehung und Stoffbestand der Salzlagerstätten. – Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg
- Braitsch, O. (1971): Salt Deposits. Their Origin and Composition. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 297 S.

- Braitsch, O., Herrmann, A. G. (1963): Zur Geochemie des Broms in salinaren Sedimenten. Teil I: Experimentelle Bestimmung der Br-Verteilung in verschiedenen natürlichen Salzsystemen. – *Geochim.Cosmochim.Acta* 27, 361-391, Oxford
- Brendel, K., Brückner, G., Knitzschke, G., Schwandt, A., Spilker, M. (1982): Montanhydrologische Aspekte zur Gewährleistung der Bergbausicherheit beim Abbau zechsteinzeitlicher Lagerstätten. – *Z. Geol.Wiss.* 10, 1, 7-31, Berlin
- Brückner, G., Knitzschke, G., Spilker, M., Pelzel, J., Schwandt, A. (1983): Probleme und Erfahrungen bei der Beherrschung von Karsterscheinungen in der Umgebung stillgelegter Bergwerke des Zechsteins in der DDR. – *N. Bergbautechnik*, 13, 8, 417-422, Leipzig
- Burrhee, H., Schwandt, A. (1990): Stratigraphie, Ausbildung und Lagerung des Staßfurtalsinars an der NE-Flanke des Roßlebener Sattels – Befahrung der Schachtanlage Roßleben des Kaliwerkes „Heinrich Rau“. – *Gesellsch. für Geologische Wissenschaften der DDR, (GGW), Exkursionsführer zur 37. Jahrestagung vom 20. – 24.8.1990 in Jena, Berlin*
- Chodkov, A. E. (1976): Die Wirksamkeit verschiedener genetischer Faktoren bei der Bildung halogener Ablagerungen. – *Beitrag zur GGW-Tagung „100 Jahre Barrentheorie“, Erfurt*
- Craig, H. (1961a): Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen 18 in natural water. – *Science* 133, 1833-1834.
- Craig, H. (1961b): Isotope variation in meteoric waters. – *Science* 133, 1702-1703.
- D'Ans, J. (1933): Die Lösungsgleichgewichte der Systeme der Salze ozeanischer Salzablagerungen. – *Verlagsgesell. f. Ackerbau mbH, Berlin*
- D'Ans, J. (1947): Über die Bildung und Umbildung der Kalilagerstätten. – *Die Naturwissenschaften*, 10, 295-301.
- D'Ans, J., Kühn, R. (1940): Über den Bromgehalt von Salzgesteinen der Kalisalzlagerstätten. – *Kali, verwandte Salze, Erdoel*, 34, 42-46, 59-64, 77-89, Essen

- D'Ans, J., Kühn, R. (1960): Bemerkungen zur Bildung und zu Umbildungen ozeaner Salzlagerstätten. – Kali und Steinsalz, 3, 69-84, Essen
- Dansgaard, W. (1964): Stable isotopes in precipitation. – Tellus 16, 436-468.
- Deppe, S., Pippig, M. (2002): Erkundung und Maßnahmen zur Beherrschung der Salzlösungszuflüsse im Grubenfeld Merkers. – Kali und Steinsalz 02/2002, 40-49, Kassel
- Deubel, F. (1954): Betrachtungen über das Auftreten von Erdöl und Erdgas im Zechstein des Thüringer Beckens. – Pietzsch Festschrift – Geologie 3, 6/7, Berlin
- Dietz, C. (1928b): Die Salzlagerstätte des Werra-Kaligebietes. – Arch. Lagerstättenf. 40, Berlin
- Dittrich, E. (1970): Beobachtungen über den Kluftkörper. – Bergakademie 22, 151-160, Leipzig
- Döhner, Ch. (1969): Beitrag zur Klassifizierung der Vertaubung im Staßfurtflöz des Südhazes. – Bergakademie 21. Jg., 1, 8-10.
- Döhner, Ch. (1970): Die Feinstratigraphie des Staßfurtflözes im Südharz und ihre Parallelisierung mit dem Unstrutgebiet. – Z. angew. Geol. 16, 1, 16-24, Berlin
- Döhner, Ch., Schwandt, A., Elert, K-H. (1986): Stand und Entwicklungstendenzen geowissenschaftlicher Untersuchungen in den Salzlagerstätten der DDR. – Z. Geol. Wiss. 4, 383-404, Berlin
- Döhner, Ch., Elert, K-H., Koch, K., Mötzinger, R. (1968): Gegenüberstellung unterschiedlicher Umbildungsprozesse im Kaliflöz Staßfurt der DDR. – Report XXIII. Sess. Internat. Geol. Congr. 8, 269-281, Praha
- Döhner, Ch., Heynke, A., Rauche, H. (2003): Die Geologie der Südharz-Unstrut-Kalilagerstätte in: Kali im Südharz-Unstrut-Revier. – Herausgegeben zum 2. Thüringer Bergmannstag, 4.-7. Sept. 2003, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum, 83-129.

- Duchrow, G., Fulda, D., Schwandt, A. (1980): Zur Klassifikation spezifischer Abbaubedingungen und Abbaulösungen im Kalibergbau der DDR. – N. Bergbau-technik, 10, 2. 85-92, Leipzig
- Elert, K.-H. (1968): Erscheinungsformen sekundärer Sulfatminerale im Kaliflöz Staßfurt. – Bergakademie, 20, 447-454, Leipzig
- Elert, K.-H. (1979): Zum Kalziumhaushalt bei der Umbildung des Kaliflöz K2. – Z. angew. Geol. 25, 12, 576-581, Berlin
- Elert, K.-H. (1981): Lagerstättengenetische Modellvorstellungen und die Beurteilung von Lösungsvorkommen. – Kali Steinsalz Spat, Reihe B, 3, 1-16.
- Elert, K.-H. (1984): Geochemische Beurteilung untertägiger Salzlösungsvorkommen für Belange der Bergbaupraxis. – Z. angew. Geol. 30, 247-252, Berlin
- Elert, K.-H. (1989): Journal Lösungsanalysen. – DB Forschung, Kombinat Kali
- Elert, K.-H., Freund, W. (1969): Untersuchungen zum Auftreten von feindispers verteilten Kohlenwasserstoffgasen im Kaliflöz Staßfurt. – Bergakademie, 21, 584-589, Leipzig
- Elert, K.-H., Henning, I. (1988): Bitumen A in Gesteinen des Zechsteins. – Z. angew. Geol. 34, 71-76, Berlin
- Elert, K.-H., Henning, I., Knabe, H.-J. (1988). – Untertägige Erdöl-Vorkommen und ihre bergbausicherheitliche Beurteilung. – Z. angew. Geol. 34, 139-144, Berlin
- Ellenberg, J. (1978): Die zeitliche Fixierung der Subrosionsprozesse im thüringischen Werra-Kaligebiet – Wiss. Z. d. Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Jg. 27, Mathematisch-naturwissenschaftl. Reihe, 13, 25-28.
- Ellenberg, J. (1982): Die Subrosion im Werra-Kaligebiet der DDR, quartärgeologische, geomorphologische und tektonische Aspekte. – Z. Geol. Wiss., 10, 61-71, Berlin
- Epstein, S. (1959): The variation of $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -ratio in nature and some geologic implications. – Researches in Geochemistry, Abelson, P.H. (Hrsg.), Wiley Verlag, New York, 217-240.

- Eugster, H. P., Harvie, C. E., Weare, J. H. (1980): Mineral equilibria in a six-component seawater system, Na-K-Mg-Ca-SO₄-Cl-H₂O at 25°C. – *Geochim. et Cosmochim. Acta* 44, 1335-1347.
- Fanghänel, Th. (1992): Neue Ergebnisse über die fest-flüssig Gleichgewichte der Systeme der ozeanischen Salze (T>100°C). – Akademie Verlag Leipzig, 98 S.
- Faure, G. (1977): Principles of isotope Geology. – Wiley Verlag, New York, 298 S.
- Fleischer, S. (1960): Die stratigraphische, fazielle und tektonische Ausbildung des Hauptanhydrits auf dem Berlepsch-Maybach-Schacht in Staßfurt. – *Freiberger Forsch.-H.*, C 90, 52-87; Berlin
- Franzke, H.-J., Heise, G., Rauche, H. (1986): Analyse der strukturellen Entwicklung der Finne-Störung und der Naumburger Mulde. – *Hall.Jb.Geowiss.* 11, 77-94, Gotha
- Fulda, E. (1935): Handbuch der vergleichenden Stratigraphie Deutschlands, Zechstein. – Verl. Gebrüder Borntraeger, 409 S, Berlin
- Fulda, E. (1938a): Die Salzlagerstätten Deutschlands. – Verl. Gebrüder Borntraeger, 140S., Berlin
- Fulda, E. (1938b): Die Lagerstätten der Nutzbaren Mineralien und Gesteine III. Band 2. Teil: Steinsalz und Kalisalze. – Ferdinand Enke Verl., 240 S, Stuttgart
- Fulda, E. (1939): Urlaugen und Tageswässer im deutschen Kalibergbau. – *Z. prakt.Geol.* 47, 11-14, Berlin
- Fulda, E. (1943): Zersetzung des Carnallitgesteins in ersoffenen Grubenräumen. – *Z.f.Kali-Steinsalz und Erdoelind. sowie Salinenw.*, 37, 11, 201-204, Halle
- Fulda, D., Schwandt, A., Richter, D. (1968): Möglichkeiten zur Beseitigung radioaktiver Abfälle in Salzformationen auf dem Territorium der DDR. – Staatl. Zentrale für Strahlenschutz, Report SZS 5/68, Berlin
- Fulda, D., Hauske, K.-H., Heinz, A., Schwandt, A., Gerber, R., Hindemith, W., (1990): Kali. Das bunte, bittere Salz. – Verl. für Grundstoffind. 253 S, Leipzig

- Garlick, G. D. (1974): The stable isotopes of oxygen, carbon and hydrogen in the marine environment. – The Sea 5, Goldberg, E.D. (Hrsg.), Wiley Verlag, New York, 393-425.
- Garrett, D. E. (1970): The geochemistry and origin of potash deposits. – Symp. On Salt, 1, 211-222, Cleveland, Ohio (zitiert nach Kühn 1979)
- Geinitz, E. (1912): Geologische Beobachtungen bei dem Wassereinbruch in Jessenitz – Mitt. d. Mecklenburgischen Geol. Landesanstalt, 3-9.
- Gerhardt, H., Sitz, P., Wilke, F. L. (1997): Zum Problem der Langzeitsicherheit von Untertagedeponien – Glückauf, 133, Nr. 6, 337-342.
- Gies, H., Herbert, H.-J., Jockwer, N. (1990): Zur Bedeutung der Wassergehalte für die Lithostratigraphie in Steinsalzhorizonten des Zechsteins. – Kali und Steinsalz 10. 265-271.
- Gimm, W. (1959): Abbauverfahren und Laugengefahr im Kalibergbau. – Freiburger Forsch.-H. A 114, Leipzig
- Gimm, W. (Herausgeber) (1968): Kali- und Steinsalzbergbau Bd. 1: Aufschluß und Abbau von Kali- und Steinsalz-Lagerstätten. – Verl.Grundstoffind., 600 S, Leipzig
- Gimm, W., Meyer, H. (1962): Die Besonderheiten der Laugengefahr im Südharz-Kalirevier. – Bergakademie 14, 6 u. 7, 403-407, 486-497, Leipzig
- Gimm, W., Meyer, H. (1968): Kali- und Steinsalzbergbau, Bd.I, Kap.8. Hydrogeologische Gefahren. – Deutsch. Verl. Grundstoffind., 429-496, Leipzig
- Gonfiantini, R. (1965): Effetti isotopici nell'evaporazione di aque salate. – Atti Soc. Tosc. Sci. Nat. A, 72 S.
- Grumbt, E., Lützner, H. (1983): Saxonische Tektonik und Basaltvulkanismus zwischen Thüringer Wald und Vorderrhön. – Z.Geol.Wiss. 11, 8, 943-954, Berlin
- GRS u.a. (1998): LAUGE Programm saline Lösungen, Version 1, Benutzerhandbuch; erstellt am 29.05.1998.

- Grumbt, E., Lützner, H. (1966): Störungszonen im Deckgebirge des thüringischen Werra-Kaligebietes und ihre Beziehungen zum Basaltvulkanismus und zur Auslaugung. – *Geologie*, 15 (4/5), 531-544.
- Grumbt, E., Lützner, H. (1983): Saxonische Tektonik und Basaltvulkanismus zwischen Thüringer Wald und Vorderröhn. – *Z. Geol. Wiss.* 11, 8: 943-954; Berlin
- Haase, G. (1976): Beitrag zur Kenntnis der Salzlagerstätte im thüringischen Werra-Kaligebiet. – *Jb. Geol.* 7/8 (1971/72) 211-261, Berlin
- Hänsch, K.-H. (1953): Die neuen Aufschlüsse im Berlepsch-Schacht. – Meldearbeit, Bergakademie Freiberg
- Harting, P., May, F., Schütz E, H. (1981): Tabellen und Diagramme zur Löslichkeit von Methan-Stickstoff-Gemischen in wässrigen Natriumchloridlösungen. – *Akad. d. Wiss. d. DDR, Zentralinst. f. Isotopen- u. Strahlenforsch., zfi-Mitt.* Nr. 42, Leipzig
- Hartwig, G. (1954): Zur Kohlensäureführung der Werra- und Fulda-Kalialzlagern. – *Kali Steinsalz* 1, 3-26.
- Harvie, C. E., Møller, N. und Weare, J. H. (1984): The prediction of mineral solubilities in natural waters: the Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO₄-OH-HCO₃-CO₃-CO₂-H₂O system to high ionic strengths at 25°C. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 48, 723-751.
- Hebert, D. (1997): Isotopenmethoden in der Hydrogeologie – Physikalische Grundlagen und Anwendungsmethodik. – Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie 96 Abb. 22 Tab. 139 Literatur, 1105, Freiberg
- Hecht, G. (2000): Zur Entwicklung der Salzwasserversenkung im Werra-Kaligebiet. – *Geowiss.Mitt. Von Thüringen, Beiheft* 9, 125-138, 3 Abb., 1 Beil., Weimar
- Herbert, H.-J. (1994): Kainite forming reactions in the system Na-K-Ca-Mg-Cl-SO₄-H₂O and safety aspects of repositories for hazardous wastes in salt formations. – Abstractband der Jahrestagung der Internationalen Mineralogischen Gesellschaft vom 4.–9. September 1994 in Pisa

- Herbert, H.-J. (2000): Zur Geochemie und geochemischen Modellierung hochsalinärer Lösungen mineralischer Rohstoffe. – Geol. Jb., Sonderhefte, SD 1, 392 S, 99 Abb., 91 Tab., 5 Anl., BGR Hannover
- Herbert, H.-J., Brewitz, W. (1995): Long-term mineralogical changes in salt formations due to water and brine interactions. – Proceedings of the OECD/NEA Sede Workshop “Characterisation of long-term geological changes being considered for disposal sites” vom 19.–21. Sept. 1984 in Paris, 18S.
- Herbert, H.-J., Reichelt, Chr. (1992): Sieben Jahre Laugenentwicklung im gefluteten Kalibergwerk Hope – Geochemische Messungen und rechnerische Modellierung. – Kali und Steinsalz 11, 44-48.
- Herbert, H.-J., Sander, W. (1993): Geochemische Entwicklung der Salzlösungszuflüsse beim Absaufen der Grubenfelder Solvayhall I/II. – in Schwandt 1993; GSF-Bericht 21/93, 40-44.
- Herbert, H.-J., Brush, L. H., Rutherford, B. M. (1993): Origin and composition of possible fluids in german and american high level radioactive waste repositories in domal and bedded salt formations. – OECD Documents, Proceedings of the OECD/NEA workshop on long-term observation of repositories for radioactive wastes, 109-128.
- Herrmann, A. G. (1961): Über das Vorkommen einiger Spurenelemente in Salzlösungen aus dem deutschen Zechstein. – Kali und Steinsalz, 3, 7, 209-220, Essen
- Herrmann, A. G. (1977): Modelle zur Bestimmung der Bildungstemperaturen primärer Sylvinit und Carnallit im $MgSO_4$ -freien Meerwasser-System mittels der Bromid-Thermometrie. – Kali Steinsalz 7, 134-146, Essen
- Herrmann, A. G. (1980): Geochemische und mineralogische Grundlagen für die Endlagerung radioaktiver Substanzen in Salzdiapiren Norddeutschlands. – Fortschr. Miner. 58, 2, 169-211, Stuttgart
- Herrmann, A. G. (1981): Grundkenntnisse über die Entstehung mariner Salzlagerstätten. – Der Aufschluß 32, 45-72.

- Herrmann, A. G. (1983): Radioaktive Abfälle. Probleme und Verantwortung. – Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 256 S.
- Herrmann, A. G., Siebrasse, G., Könnecke, K. (1978): Computerprogramme zur Berechnung von Mineral- und Gesteinsumbildungen bei der Einwirkung von Lösungen aus Kali- und Steinsalzlagerstätten (Lösungsmetamorphose). – Kali Steinsalz 7, 288-299.
- Herrmann, A. G., Siewers, U., Harazim, B., Usdowski, E. (2003): Kriterien zur Beurteilung von Salzlösungen in den Zechsteinevaporiten Mittel- und Norddeutschlands. – Kali und Steinsalz, 3, Kassel
- Hessmann, W. (1982): Tektonische Beanspruchung und Verformung, strukturelle Position und Dislokationsintensität. – Kriterien zur Einschätzung hydrogeologischer Verhältnisse des Gebirges. – Z.Geol.Wiss. 10, 1, 31-52, Berlin
- Hessmann, W., Schwandt, A. (1981): Zur Bruchtektonik in Salinar- und Deckgebirge. – Z.Geol.Wiss., 9, 3, 283-292, Berlin
- Heynke, A., Zänker, G. (1970): Zur Ausbildung und Leitbankgliederung des Staßfurtsteinsalzes im Südharz-Kalirevier. – Z.angew.Geol. 16, 7/8, 344-356, Berlin
- Holser, W. (1979): Mineralogy of evaporites. – Marine Minerals, Burns, R.G. (Hrsg.), Mineralogical Society of America, 211-286.
- Holser, W. (1979): Trace elements and isotopes in evaporites. – In Marine Minerals (Hrsg. Burns, R. G.) Reviews in Mineralogy, Mineral. Soc. Amer., 295-346.
- Hoppe, W. (1944): Die Auslaugungserscheinungen im Werra-Kaligebiet, ihre Bedeutung für die Lagerstätte und ihre Landschaftsformen – Jb. Reichsanst. f. Bodenf. für das Jahr 1941, 62, 248-271.
- Hoppe, W. (1960): Die Kali- und Steinsalzlagerstätten des Zechsteins in der DDR – Teil 1 Das Werragebiet. – Freiburger Forsch.-H. C 97/I, 1-166, Berlin
- Hoppe, W., Seidel, G. (1974): Geologie von Thüringen. – Verl. Hermann Haack, Gotha/Leipzig

- Jänecke, E. (1912): Eine graphische Darstellung der Gewichtsverhältnisse bei den ozeanen Salzablagerungen. – Kali 6,255-258.
- Jänecke, E. (1923): Die Entstehung der deutschen Kalisalzlager. – 2. Ausg., Vieweg Verlag Braunschweig, 111 S.
- Jahne, H. (1966): Der Aufschluß des Zechsteins im Schacht „Marx-Engels“ II (Werrakaligebiet). – Ber.deutsch.Ges.Geol.Wiss.A. Geol.Paläont., 11, 4, 439-460, Berlin
- Jahne, H., Pielert, P.(1964): Beitrag zur Ausbildung des hangenden Begleitflözes zum Kaliflöz „Hessen“ im Werrakaligebiet unter besonderer Berücksichtigung der Schachtanlage „Marx-Engels“ Unterbreizbach. – Ber. Geol. Ges. 9, 6, 625 – 720.
- Jahne, H., Pielert, P.(1966): Zur stratigraphischen Gliederung des Kaliflözes „Hessen“ im Bereich der Grube „Marx-Engels“ Unterbreizbach (Werrakaligebiet). – Ber.deutsch.Ges.Geol.Wiss.A, Geol. Paläont., 11, 4, 461-473.
- Jahne, H., Voitel, R., Haase, G. (1983): Tektonische Erscheinungsformen im Salinar des Werra-Kaligebiets auf dem Territorium der DDR. – Z. Geol. Wiss. 11, 9, 1085-1100.
- Jahne, H., Zeibig, S. (2002): Zur Entwicklung, Ausbildung und Verbreitung der Kaliflöze im Werra-Becken. – Z. Geol. Wiss. 30, 4/5, 327-336.
- Jockwer, N. (1981): Untersuchungen zu Art und Menge des im Steinsalz des Zechsteins enthaltenen Wassers sowie dessen Freisetzung und Migration im Temperaturfeld endgelagerter radioaktiver Abfälle. – Diss. Technische Universität Clausthal.
- Jung, W. (1960): Die Sedimentationsverhältnisse während des Oberrotliegenden und Zechsteins im SE-Harzvorland. – Z. angew. Geol. 6, 12, 599-604.
- Jung, W. (1965): Zum subsalinaren Schollenbau im südöstlichen Harzvorland. Mit einigen Gedanken zur Äquidistanz von Schwächezonen. – Geologie, 14, 3, 254-271, Berlin

- Käbel, H. (1982): Zur Hydrodynamik der Grundwasserstockwerke in salinaren Becken der DDR. – Z.Geol.Wiss. 10, 1, 53-60, Berlin
- Karsten, O. (1954): Lösegeschwindigkeit von Natriumchlorid, Kaliumchlorid und Kieserit im Wasser und in wässrigen Lösungen. – Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie 276, 247-266.
- Kästner, H. (1969): Zur Geologie der Kalisalz- und Kohlensäurelagerstätten im südlichen Werra-Kaligebiet. – Abh. D. Zentralen Geologischen Instituts, 11, Berlin
- Keilhack, K., Dammer, B. R. (1913): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundestaaten. Blatt Bernburg; Lieferung 177. – Königl.Geol. Landesanstalt Berlin
- Kern, H., Franke, J.-H. (1980): Thermische Stabilität von Carnallit unter Lagerstättenbedingungen. – Glückauf Forschungsh. 41, 252-255, Essen
- Knak, J. (1960): Feinstratigraphische Aufnahme des Kalilagers Staßfurt auf den Schachtanlagen Neustaßfurt VI/VII, Berlepsch-Maybach und Ludwig II. – Freiburger Forsch.-H., C 90, 1-51, 6 Bilder, 3 Tab., Berlin
- Knauth, L.P. (1988): Origin and mixing history of brines, Palo Duro Basin, Texas, U.S.A. – Applied Geochemistry, 3, 455-474.
- Knauth, L.P., Beeunas, M.A. (1985): Origin of fluid inclusion water in bedded salt deposits, Palo Duro Basin, Texas. – ONWI Technical Report, BMI/ONWI-596, 59 S:
- Knoll, P., Schwandt, A., Thoma, K. (1980): Die Bedeutung geologisch-tektonischer Elemente im Gebirge für den Bergbau, dargestellt am Beispiel des Werra-Kalireviers der DDR. – Fifth Internat. Symp. Salt, Northern Ohio Geological Society, 105-113, Ohio
- Koch, G. (1985): Hydrogeologische Modellvorstellungen zu Salzlösungsvorkommen im Salinar des Werra-Kaligebietes der DDR. – Diss. Bergakademie Freiberg, 121S.

- Koch, G., Gaitzsch, H. (1989): Speicherraumbildung in Salzlösungsvorkommen im Salinar des Werra-Kaligebietes und ihre Bedeutung für Abdichtungsinjektionen. – Z. angew. Geol. 35, 175-179, Berlin
- Koch, K., Schwandt, A. (1985): Ernst Fulda – sein Beitrag zur Entwicklung eines Modells der Bildung und Umbildung von Kalisalzagerstätten. – Ges. f. Geol. Wiss. der DDR, Kurzreferate Ernst-Fulda-Kolloquium, 5-7.
- Koch, K., Kockert, W., Grunewald, V. (1968): Geochemische Untersuchungen an Salzen und Salzlösungen (Laugen) von Salzagerstätte in der Deutschen Demokratischen Republik. – Geologie, Berlin 17, 6/7, 792-803, 2 Abb., 1 Tab., 25 Lit., Berlin
- Kockert, W. (1968): Mögliche Typen der im Steinsalzbergbau der DDR zuziehenden Wässer und Salzlösungen. – Bergakademie 20, 284-288.
- Kockert, W. (1969): Zum Problem des CaCl_2 in natürlichen Wässern und Salzlösungen des Zechsteins. – Bergakademie 21, 401-403, Freiberg
- Kockert, W. (1972): Salzlösungszuflüsse aus dem Hangenden des K 2 im Südharzkalirevier. – N. Bergbautechnik 6, 416-419, 3 Diagr., 2 Tab., 8 Lit., Leipzig
- Krauskopf, K. (1979): Introduction to Geochemistry. – Second edition, McGraw-Hill, New York.
- Kropp, E., Holldorf H. (1988): Entwurf einer Polytherme für das hexäre System Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{SO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{O}$ im Temperaturbereich zwischen 35°C und 110°C und bei Sättigung an NaCl , $\text{KCl}(\text{KCl}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O})$ und einem Ca-haltigen Bodenkörper. – Freiburger Forsch.H. A 764, 67-81.
- Kropp, E., Beate, R., Grosch, Chr., Kramz, M., Holldorf H. (1988): Untersuchungen zu den Isothermen des hexären Systems Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{SO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{O}$ bei 35°C , 55°C , 75°C , 95°C und 110°C im Bereich der Sättigung von NaCl , $\text{KCl}(\text{KCl}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O})$ und einem Ca-haltigen Bodenkörper. – Freiburger Forsch.H. A 764, 42-67.

- Krull, F. (1933): Über die Bildung von Chlorcalcium in den Laugen der Salzlagerstätten
Teil I: Einwirkung chloridischer Salzlösung auf Gips bei Normaldruck. – Kali,
verw. Salze Erdöl 27, 67-69, 84-88, Halle
- Krull, F. (1934): Über die Bildung von Chlorcalcium in den Laugen der Salzlagerstätten.
Mitteilungen Nr. II: Die Einwirkung chloridischer Salzlösungen auf Anhydrit.
– Kali, verw. Salze Erdöl 28, 161-165, Halle
- Kudrjašov, A. I. (1975): Rol' podzemnych vod v formirovanii kalijnoi zalezi Verchne-
kamskogo mestorodzenija. – in: Hidrogeologija i karstvedenie. Perm'.
66-76.
- Kühn, R. (1955): Über den Bromgehalt von Salzgesteinen, insbesondere die quantitati-
ve Ableitung des Bromgehalts nichtprimärer Hartsalze oder Sylvinite aus
Carnallitit. – Kali und Steinsalz 1, 9. 3-16.
- Kühn, R. (1959): Zur Kenntnis der Rubidiumgehalte von Kalisalzen ozeanischer Salz-
lagerstätten nebst einigen lagerstättenkundlichen Ausdeutungen. – Geol.
Jb. 90, 127-220.
- Kühn, R. (1969): Zum Tachhydritvorkommen im Flöz Staßfurt. – Kali und Steinsalz, 5,
166-170, Essen
- Kühn, R. (1972): Zur Kenntnis der Rubidiumgehalte von Kalisalzen ozeanischer Salz-
lagerstätten nebst einigen lagerstättenkundlichen Ausdeutungen. – Geol
Jahrb. 90, 127-220.
- Kühn, R. (1979): Diagenese in Evaporiten. – Geol. Rundsch. 68, 1066-1075
- Landsmann, B. (2004): Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Deutschland – Ein
neues Verfahren zur Standortsuche. – Z.Geol.Wiss. 32, 5/6; 397-408, Ber-
lin
- Liebisch, K. (1965/1966): Die untertägigen Wasserzuflüsse in der Mansfelder Mulde.
KdT-Mitteilg. – Mansfeld Komb. 5, 12-26, Eisleben
- Liebisch, K. (1966): Die untertägigen Wasserzuflüsse in der Mansfelder Mulde. – KdT-
Mitteilg. Mansfeld Komb. 1, 17-27, Eisleben

- Liebmann, G. (1984): Untersuchungen zum Löseverhalten von Carnallit unter Langzeitbedingungen. – Freiburger Forsch.-H., A 690, 105-115, Leipzig
- Löffler, J. (1960): Primäre Sedimentationsunterschiede im Zechstein 2 und 3. – Geologie, 9, 7, 768-777.
- Löffler, J. (1961a): Zur Hartsalzverbreitung in Südbrandenburg und im Werra-Kaligebiet. – Sonderdruck aus der Z. angew. Geol, H.4, 175 – 177.
- Löffler, J. (1961b): Zur Problematik der Hartsalzentstehung. – Sonderdruck aus der Z. angew. Geol, Bd. 6, H.2/3, 228-245.
- Löffler, J. (1962): Die Kali- und Steinsalzlagerstätten des Zechsteins in der Deutschen Demokratischen Republik. Teil III: Sachsen Anhalt. – Freiburger Forsch.-H., C 97/III, 346 S. Leipzig
- Löffler, J. (1964): Paläontologisch-fazielle Übersichten geologischer Systeme im Gebiet der Deutschen Demokratischen Republik. – Ber. Geol. Ges. DDR, 9, 6, 625-720.
- Lotze, F. (1957): Steinsalz und Kalisalze, 1. Teil (Allgemein-geologischer Teil). – Verl. Gebrüder Borntraeger, 485 S, Berlin
- Lützner, H. (1981): Sedimentation der variszischen Molasse im Thüringer Wald. – Berlin: Akad.-Verl. 1981. 217S. Schriftenr. Geol. Wiss., 17.
- Maenicke (1918): Wassereinbrüche im Kalibergbau – Kali, 6, 81-98.
- Menzel, N., Holdorf, H. (1988): Erweiterung der Polytherme des quinären Systems Na^+ , K^+ , $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{SO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{O}$ im Bereich der $\text{NaCl}(\text{NaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ -KCl ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)-Sättigung bis zum Punkt der Eisbildung bei $-34,4^\circ\text{C}$. – Freiburger Forsch.-H. A 764, 28-41.
- Menzel, N., Hess, A., Holdorf, H. (1988): Untersuchungen zu den Isothermen $\text{NaCl}(\text{NaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ -KCl ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)-Sättigungsflächen des quinären Systems Na^+ , K^+ , $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{SO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{O}$ bei -15°C und -25°C . – Freiburger Forsch.-H. A 764, 7-27.

- Meyer, H. (1968): Beitrag zur Erfassung der hydrologischen Gefährdung (Laugengefahr) aus den Basisschichten der Staßfurt-Serie im Südharz-Kalirevier. – Freib. Forsch.-H., A 433, 85, 16 Bilder, 8 Bildtafeln, 13 Tab., Leipzig
- Meyer, H., Jahn, G. (1991): Erstentwicklung eines wissenschaftlichen Diagnose- und Beratungssystems als Entscheidungshilfe bei hydrologischen Problemen im Salzbergbau. – Kali Steinsalz 10, 328-333, Essen
- Mieth, G., Fulda, D., Zeidler, W. (1989): Beitrag zum Wirkmechanismus von Gastonbrüchen in den Gruben des Südharz- Kalireviere. – Z.Geol.Wiss. 17, 4, 407-417, Berlin
- Müller, G. (1988): Salzgesteine (Evaporite). – In: Füchtbauer, H. (Hrsg.): Sedimente und Sedimentgesteine. – Verlag Schweizerbarth Stuttgart, 435-500.
- Müller, E. P. (1967): Zur Geochemie der Tiefenwässer im Thüringer Becken und Nordostdeutschem Flachland. – Ber. deutsch.Ges.Geol.Wiss. B. Miner. Lagerstättenf. 12, 3, 327, Berlin
- Müller, E. P. (1969): Zur Geochemie der Tiefenwässer und der organischen Substanz im Nordteil der DDR. – Z.angew.Geol., 3, 113-124, 14 Abb., 4 Tab., 31 Lit., Berlin
- Müller, E .P. (1973): Genese, Dynamik und Verteilung der Tiefenwässer unter besonderer Berücksichtigung des Zechsteins. – In: Genetische Prozesse in den Zechsteinlagerstätten; Thesen und Kurzreferate (Vortragstagung der GGW d. DDR, Erfurt, 29.-30.11.1973), Berlin
- Nishri, A., Herbert, H.-J., Jockwer, N., Stichler, W. (1988): The Geochemistry of Brines and Minerals from the Asse Mine Germany. – Applied Geochemistry 3, 317-322.
- Pelzel, J., Hemmann, M., Seifert, G. (1972): Ursachen und Entwicklung der Senkungserscheinungen und Erdfälle bei der Flutung der Grube Friedenshall bei Bernburg. – Ber.deutsch. Ges.Geol.Wiss., A, 17, 2, 191-219, Berlin

- Peters, H. (1985): Vorkommen und Verteilung der Elemente Blei, Kupfer und Zink in einem Kontaktbereich Basalt-Carnallit im Kaliflöz Thüringen. – Kali und Steinsalz 9, 199-209.
- Pierre, C., Ortlieb, L., Person, A. (1984): Supracritical evaporitic dolomite at Ojo de Liebre lagoon: mineralogical and isotopic arguments for primary crystallisation. – J. Sediment. Petrol. 54, 1049-1061.
- Pinzke, G. (1981): Ergebnisbericht hydrochemischer Untersuchungen in ausgewählten Bohrungen und Schächten im Bereich der Mansfelder Mulde. – Rat des Bezirkes Schwerin, Abteilung Geologie, Schwerin
- Pinzke, G. (1987): Zur Berechnung salinärer Auflösungserscheinungen in Carnallit. – N. Bergbautechnik, 17, 1, 25-27, Leipzig
- Pitzer, K. S. (1979): Theory: Ion interaction approach. – Activity Coefficients in Aqueous Solutions, 1, CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida
- Pitzer, K. S. (1991): Chemical Potentials and Activity Coefficients; Standard States and Composition Scales for Nonelectrolytes and Electrolytes. – In Activity Coefficients in Electrolyte Solutions 2. Auflage, Hrsg. K.S. Pitzer, CRC Press, Boca Raton, 75-155, Florida
- Rauche, H., Franzke, H.J. (1990): Stress field evolution at the northern part of the South German Block of the territory of the GRD. – Gerlands Beitr. Geophysik, 99, 5, 441-461, Leipzig
- Remus, W., Spilker, M. (1961): Die hydrogeologischen Verhältnisse im Nordteil der Sangerhäuser Mulde. – Betriebsakademie, Mansfeldkombinat, Eisleben
- Richter-Bernburg, G. (1953): Über salinare Sedimentation. – Z. d. Geol. Ges. 105, 593-645, Hannover 1955.
- Richter-Bernburg, G. (1968): Salzlagerstätten. – In Bentz, A. & Martini, H. (Hrsg): Lehrbuch der Angewandten Geologie, 2, 918-1061.
- Richter-Bernburg, G. (1987a): Zechstein – Anhydrite – Fazies und Genese. – Geol. Jb.A, 85, 3-82, Hannover

- Richter-Bernburg, G. (1987b): Exkursion in den Deutschen Zechstein – Einführung. – Int. Symp. Zechstein 87, Exkursionsführer I Zechsteinsalinare und Bohrkernausststellungen. – Niedersächs. LA für Bodenforsch., Hannover
- Rinne, F. (1908): Praktische Gesteinskunde. – 3. Aufl., Jänecke Verlag Hannover, 319 S.
- Roedder (1984): The fluids in salt. – Am. Mineral. 69, 413-439, Washington
- Sander, W. (1988): Quantitative Beschreibung der Lösungsmetamorphose beim Eindringen von Wasser in ein Bergwerk des Zechsteinsalinars. – Kali und Steinsalz 10, 2, 54-61, Essen
- Sander, W., Gies, H. (1988): Zur Problematik von In-situ- und Labormessungen in hochkonzentrierten salinaren Lösungen. – Gewässerschutz – Wasser – Abfall 105, 235-265.
- Sander, W., Herbert, H.-J. (1985): NaCl-Crystallization at the $MgCl_2$ -NaCl-Solution Boundary-a possible Natural Barrier against the Transport of Radionuclides. – Mineralogical Magazin 49, 265-270.
- Schilder, Ch. (1984): Beitrag zur Beurteilung des Verhaltens von Schutzschichten im Hangenden von Kalilagerstätten unter abbaubedingten Beanspruchungen. – N. Bergbautechnik, 14, 5, 180-184, Leipzig
- Schilder, Ch., Schwandt, A. (1983): Zur Tektonik und Auslaugung in Kali- und Steinsalzabbaugebieten. – Z.Geol.Wiss., 11, 8, 1023-1033, Berlin
- Schmiedl, H. D., Elert, K. H., Jordan, H. P., Koch, K. (1987): Verfahren zur Bewertung von untertägigen Salzlösungsvorkommen im Kali- und Steinsalzbergbau der DDR mittels Bromanalyse. – Z.angew.Geol. 33, 5, 124-128, Berlin
- Schmiedl, H. D., Hebert, D., Fröhlich, K., Jordan, H. P. (1985): Tritiummessungen an Zuflüssen im Salzbergbau. – Isotopenpraxis 21, 3, 83-86.
- Schmiedl, H. D., Runge, A., Jordan, H. P., Koch, K., Pilot, H. P., Elert, K. H. (1982): Die Deuterium- und Sauerstoff-18-Isotopenanalyse – ein modernes Verfahren zur Bewertung von Salzlösungen in Kali- und Steinsalzgruben. – Z.Geol.Wiss. 10, 1, 73-85, Berlin

- Schmiedl, H. D., Schwandt, A., Spilker, M., G., Böttger, T., Pilot, J. Stiehl, G., Jordan, H. P. (1986): Möglichkeiten und Grenzen der D- und O-18 Analyse zur Erkennung offener und geschlossener Systeme beim Abbau von Zechsteinlagerstätten. – Freiburger Forsch.-H., C 417, 127-136, Leipzig
- Schmiedl, H. D., Schwandt, A., Spilker, M., Hebert, D., Fröhlich, K., Jordan, H. P. (1985): Beitrag zur isotopehydrogeologischen Modellierung des Zuflußgeschehens beim Abbau von Zechsteinlagerstätten. – Posterbeitrag Isotopenkolloquium, 4.-9.9.1985, Freiberg
- Schulze, S., Schwandt, A. (2003): Solender UT-Salzbergbau im Nordharzrevier. – Exkursionsführer GGW, 222, 65-70, Berlin
- Schwandt, A. (1961): Zur Faziesdifferenzierung im Werra Kaligebiet. – Ber.Geol.Ges. 6, H.2/3, Berlin
- Schwandt, A. (1969): Zusammenhänge zwischen Geologie und Zuflüssen von Salzlösungen und Wässern in Kali- und Steinsalzgrubenfeldern des Saale-Unstrut und Nordharz-Kaligebietes. – Diss., Hochschule für Architektur und Bauwesen, Weimar
- Schwandt, A. (1972): Beziehungen zwischen untertägigen Salzlösungszuflüssen und Tektonik im Kalibergbau der DDR. – Ber.deutsch.Ges.Geol.Wiss., A. Geologie und Paläontologie 17,2,177-197, Berlin
- Schwandt, A. (1978): Zusammenhänge zwischen Geologie und Zuflüssen von Salzlösungen und Wässern in Kali- und Steinsalzgrubenfeldern des Saale-Unstrut- und Nordharz Kaligebietes. – Jahrb. Geol. 9/10, 175-260, Berlin
- Schwandt, A. (1980): Kurzreferate – Mineralisierte Wässer und hydrogeologische Probleme der Nutzung zechsteinzeitlicher Lagerstätten – Vortragstagung 27.-28.11.1980 in Halle. – Gesellschaft für Geologische Wissenschaften der DDR (GGW) Berlin
- Schwandt, A. (1982): Schlußbetrachtungen zur Vortragstagung: Mineralisierte Wässer und hydrogeologische Probleme der Nutzung zechsteinzeitlicher Lagerstätten. – Z.geol.Wiss. 10, 1, 160, Berlin

- Schwandt, A. (1983): Vorwort Tagung Arbeitskreis Kali Tektonik und Salinar. – Z.geol.Wiss. 11, 8, 941, Berlin
- Schwandt, A. (1988): Internationales Symposium 1987 – Ablesbare Trends bei der Erforschung von salinaren Bildungs- und Umbildungsprozessen. – Kali – Steinsalz – Spat, A, 12, 11, 319-326, Sondershausen
- Schwandt, A. (1991a): Zur Hydrogeologie der Zechstein-Sedimente in den Kali- und Steinsalzabbaugebieten Mitteldeutschlands. – Zbl. Geol. Paläont. Teil I, 4, 1263-1273, Stuttgart
- Schwandt, A. (1991b): Notwendige Voraussetzungen zur Bildung von Tagesbrüchen in den Gruben des Endlagers für radioaktive Abfälle in Morsleben (ERAM) und Maßnahmen zu deren Vermeidung. – GRS Bericht A-1914/II, Auftrags-Nr. 83514, Gesellschaft für Reaktorsicherheit, 1-96, 44 Abb., mit Bildband, Köln
- Schwandt, A. (1991c): Zum Hauptanhydritszenario am Beispiel der NE-Flanke des Staßfurter Sattels. – GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg
- Schwandt, A. (1993): Salzlösungs- und Wasservorkommen im Salz- und Kupferschieferbergbau am Bernburger Hauptsattel und im Sangerhäuser Revier. - GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GSF – Bericht 21/93, TL 35/93, S. 1-144, Neuherberg
- Schwandt, A. (2000): Stand und Entwicklungstendenzen geowissenschaftlicher Untersuchungen zur Beurteilung des Salzbergbaus. – Geowiss, Mitt. von Thüringen, Beiheft 9, 189-204, 8 Abb., Weimar
- Schwandt, A. (2005): Zum Einfluss der Bruchtektonik in Kalibergbau – 5. Altbergbau Kolloquium Technische Universität Clausthal. – Glückauf, Essen 345-354, Essen
- Schwandt, A. (2006): Deckgebirgsuntersuchungen im Bereich von Kali- und Steinsalzlagerstätten in Mitteldeutschland. – Festkolloquium, Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen Anhalt, Halle

- Schwandt, A., Fulda, D. (1983): Zur Berücksichtigung tektonischer Aspekte im Bergbau. – Z.Geol.Wiss. 11, 9, 1075-1084, Berlin
- Schwandt, A., Hemmann, H., Miemietz, E. (1971): Hydrogeologie des Kali- und Steinsalzbergbaus im südöstlichen Subherzynen Becken. – Kurzreferate der Vorträge und Exkursionsführer zur Tagung AK Kali am 27. und 28.5.1971, 27-64, Herausgeber: Deut.Ges.Geo.Wiss., Berlin
- Schwandt, A., Schilder, Ch., Fulda, D. (1992): Notwendige Voraussetzungen zur Bildung von Tagesbrüchen in den Gruben des Endlagers für radioaktive Abfälle in Morsleben und Maßnahmen zu deren Vermeidung. – Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz BMB – 1992 – 346 – Ergebnisberichte, Untersuchungen, Studien, Gutachten Herausgeber: Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn
- Schwandt, A., Schilder, Ch., Rauche, H., Franzke, H. J. (1991): Zum Hauptanhydritszenario am Beispiel der NE-Flanke des Staßfurter Sattels. – GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Tieflagerung, Forschungsbericht 22/91, 104 S, Braunschweig
- Schwandt, A., Schilder, Ch., Seifert, G. (1990): Möglichkeiten und Grenzen der Bekämpfung von Wasser- und Salzlösungszuflüssen aus dem Hangenden von Kali- und Steinsalzlagerstätten. – N. Bergbautechnik, 20, 9, 327-330, Leipzig
- Schwandt, A., Schmiedl, H. D., Spilker, M., Hebert, D., Fröhlich, K., Jordan, H. P. (1986): Neue Aspekte zur Auslaugung der Kali- und Kupferschieferabbaugebiete der DDR. – Z.Geol.Wiss. 14, 2, 183-192, Berlin
- Schwandt, A., Schmiedl, H. D., Koch, G. (1985): Prognose und Bekämpfung von Zuflüssen im Kali- und Steinsalzbergbau. – Kali-, Steinsalz-, Spat, A, 9, 3, Sondershausen
- Schwandt, A., Seifert, G. (1999): Natürliche und gelenkte Flutung von Salzbergwerken in Mitteldeutschland. – Vorträge zum 7. Treffen des Arbeitskreises Bergbaufolgelandschaften. Exkursion f. Veröffentl. GGW, 205, 61-72, Berlin

- Sdanowsky A. B., Lyakovskaya, E. I. und Shleymovitch, R. E. (1953, 1954): Handbuch über die Löslichkeiten der Salzsysteme. – Verlag Goskhimizdat Leningrad, Teil I und II, 954 S.
- Sedlacek, R. (2005): Untertage-Erdgasspicherung in Deutschland. – Erdöl Erdgas Kohle 121 H11, S397-407.
- Seidel, G. (1961): Zur Kalierkundung im Thüringer Becken. – Z. angew. Geol., 7, 178-181, Berlin
- Seidel, G. (1966): Die paläogeographischen Ursachen des faziellen Übergangs von der kieseritischen Hartsalzfazies des Unstrut-Saale-Bezirktes in die anhydritische des Südharz-Bezirktes. – Geologie 15, S434-442.
- Seidel, G. (1995): Geologie von Thüringen. – E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), Stuttgart
- Seifert, G., Schwandt, A. (1997): Interdisziplinäre Untersuchungen zur Langzeitsicherheit einer UTD unter dem Gesichtspunkt eines Lösungszutritts – Zusammenstellung und Bewertung von Beobachtungen in der Natur. – Kali-Umwelttechnik GmbH – F/E Bericht, Förderkennzeichen 02 C 03248, 158 S., 01.07.1997, Sondershausen
- Seifert, G., Schwandt, A., Wagner, H., Grau, H. J., Phillips, R. (1992): Expertise zum Bergschadensgebiet Südwestflanke des Staßfurter Sattels im Bereich der Kali- und Steinsalzgruben Leopoldshall 1/2, von der Heydt, von Manteuffel, Achenbach. – KUTEC, 122 S, Sondershausen
- Siebler, P. (1972): Untersuchungen über die Auflösung natürlicher Salze. – Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. – Freiburger Forsch.-H., A 497, Leipzig
- Singewald, A. (1988): Produkte aus Rohsalzen. – Kali und Salz 10, 2-10.
- Sitz, P., Bartl, H., Geissler, D, Hebestreit, G., Herzel, W., Schott, E., Vorwerk, W. (1981): Erfahrungen bei der Wiederinbetriebnahme der abgesoffenen Schächte Bernterode I und Bernterode II . – N. Bergbautechnik 11 (1981) 6, 352-356 (Teil I) 8, 437-442, Leipzig

- Sofer, Z., Gatt, J. R. (1975): The isotopic composition of evaporating brines: effect of the isotopic activity ratio in saline solutions. – Earth and Planet. Sci. Lett. 26, 179-186.
- Sonnenfeld, P. (1984): Brines and Evaporites. – Verlag Academic Press, Inc. Orlando, San Diego, New York, 613 S.
- Spackeler, G. (1950): Lehrbuch des Kali- und Steinsalzbergbaus. – Verl. Wilhelm Knapp, Halle
- Spackeler, G. (1957): Lehrbuch des Kali- und Salzbergbaus. – Wilhelm Kamp Verlag Halle, 598 S.
- Stier-Friedland, G., Ranft, M (1995): Vorkommen salinärer Lösungen in den Grubenfeldern Marie und Bartensleben des ERA Morsleben. – Lösungskataster – Eine Dokumentation 1994/1995, Bundesamt für Strahlenschutz, Braunschweig
- Stolle, E. (1958): Die Laugengefahr im Südharz-Kalibergbau. – Freiburger Forsch.-H., A 88, 22-32, Leipzig
- Stolle, E. (1963): Zur Hartsalzerkundung im Kalisalzlager Staßfurt unter besonderer Berücksichtigung des Südharzgebietes. – Sonderdruck Z. angew. Geol. H1, 3 – 14.
- Stolle, E., Döhner, Ch. (1976): Die Erforschung der Kalilagerstätten der DDR in den vergangenen 20 Jahren – Z. Geol. Wiss. 4, 557-590.
- Thomas, G. (1959): Die Auslaugung der Salzlagerstätten – eine Gefahr für den Bergbau. – Freiburger Forsch.-H. A 114, 49-66, Leipzig
- Valjaško, M, G. (1960): Die wichtigsten geochemischen Parameter für die Bildung der Kalisalzlagerstätten. – Freiburger Forsch. H. A 123, 197-233.
- Valjaško, M, G (1962): Geochimicoskie zakonomernosti formoro-vanija mostorozdenij kalijnych solej. – Izdat. Moskovsk. Univ.
- Van't Hoff, J.H. (1905): Zur Bildung der ozeanen Salzablagerungen – Vieweg Verlag Braunschweig, 85 S.

- Van't Hoff, J.H. (1909): Zur Bildung der ozeanen Salzablagerungen. – Vieweg Verlag Braunschweig, 90 S.
- Van't Hoff, J.H. (1912): Untersuchungen über die Bildungsverhältnisse der ozeanen Salzablagerungen. – Akad. Verl. Ges. Leipzig, 374 S.
- Vogel, J., Schäbitzer, R. (1967): Zur Tektonik der Kaliflöze „Thüringen“ und „Hessen“ auf der Schachtanlage „Ernst Thälmann“, Merkers (Rhön) der VEB Kali-kombinat „Werra“. – Sonderdruck Z. angew. Geol. Bd 13, H. 1, 1-9.
- Weiss, M. H. (1980): Möglichkeiten der Entstehung sowie Art, Umfang und tektonische Stellung von Rissen und Klüften im Salzgebirge. – Literaturstudie GSF-Bericht T-200, ISSN 0721-1694, Neuherberg
- Wu, B., Tang, J., Duan, Z. (1984): The variation of ^{18}O content of water in the Qaidam Basin. – 27th Int'l Geol Kongress, Moskau, Abstracts vol V, S. 440.
- Ziegenbalg, G., Emons, H.-H., Fanghänel, Th. (1991): Ein Beitrag zu den Fest-Flüssig-Phasengleichgewichten des quinären Systems der ozeanischen Salze. – Kali und Steinsalz 10, 11, 366-367.

11 **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 2-1	Übersicht des Bearbeitungsgebiets (nach Schwandt 2005).....	12
Abb. 2-2	Erste Dokumentation des Chemismus der Salzlösungsaustritte im Kalibergbau, Gruben von der Heydt, von Manteuffel (ergänzt nach Seifert, Schwandt 1997).....	13
Abb. 3-1	Verbreitung und Ausbildung des Kaliflözes Staßfurt in Mitteldeutschland nach Schwandt (2006)	22
Abb. 3-2	Primäre bis frühdiagenetische Faziesdifferenzierung des Kaliflözes Staßfurt im Raum Mitteldeutschland – Schema	23
Abb. 3-3	Zechstein im Zentraleuropäischen Becken, schematische Darstellung der Verbreitung ausgewählter Salzsichten (nach lithologischen Karten von Zharkov 1984).....	28
Abb. 3-4	Entwicklung der Kenntnisse zur Bruchtektonik im thüringischen Werra-Kali-Revier (nach Schwandt 2000).....	32
Abb. 3-5	Entwicklung der Erkenntnisse zur Bruchtektonik im Südharz-Kali-Revier (nach Schwandt 2006)	33
Abb. 3-6	Lageabhängigkeiten von Bruchstörungen im Deckgebirge und Salinar-Flöz Thüringen (nach Schwandt 2006).....	34
Abb. 3-7	Beziehungen zwischen petrographischer Ausbildung der Salzgesteine und Verformungsintensität (Schwandt 2005).....	35
Abb. 3-8	Zeitliche Entwicklung der Erkennbarkeit von Klüften (nach Schwandt 2005)	36
Abb. 3-9	Materialabhängige Verteilung der Kluftdichten vom Abstand eines Verwerfungsbruchs (Schwandt 1993)	37
Abb. 4-1	Herkunft der Salzlösungen und Wässer in den Salzgruben Mitteldeutschlands (ergänzt nach Schwandt, Seifert 1999).....	43

Abb. 4-2	Gesamtzuflussmengen von Salzlösungen und Wässern bezogen auf das jeweilige Grubenfeld im Bearbeitungsgebiet (ergänzt nach Schwandt 1991)	44
Abb. 4-3	Entwicklung der Zufluss- und Einleitungsmengen von Salzlösungen und Wässern in den Salzgruben Mitteldeutschlands ohne Abzug der abgepumpten Mengen (ergänzt nach Schwandt 1985)	45
Abb. 4-4	Maximale und minimale MgCl ₂ - und NaCl-Gehalte der Salzlösungszuflüsse im Saale-Unstrut- und Nordharz-Kaligebiet (nach Schwandt 1978)	48
Abb. 4-5	Darstellung des NaCl-gesättigten quinären Systems Na-K-Mg-Cl-SO ₄ -H ₂ O. 25°C-Isotherme bei 1 atm (nach Braitsch 1962)	55
Abb. 4-6	Darstellung des NaCl-gesättigten hexären Systems Na-K-Ca-Mg-Cl-SO ₄ . 25°C-Isotherme bei 1 atm. Aufgeklappte Tetraederform (nach Eugster et al. 1980).....	57
Abb. 4-7	Projektion des hexären Systems Na-K-Ca-Mg-Cl-SO ₄ auf das Ca-freie quinäre System. 25°C-Isotherme bei 1 atm (nach Eugster et al. 1980).....	58
Abb. 4-8	δ ¹⁸ O/δD-Diagramm mit Meteorischer Wasserlinie (M.W.), dem SMOW-Standard, einem meteorischen Wasser der Zusammensetzung A sowie unterschiedlichen Eindunstungsverläufen des Meerwassers (1,2,3,4) und eines meteorischen Wassers (5,6) (nach Herbert 2000).	61
Abb. 4-9	Der Eindunstungspfad des Meerwassers – Zusammenhänge zwischen chemischer Zusammensetzung und Isotopenzusammensetzung der Lösungen (aus Knauth 1988).	63
Abb. 4-10	Diagramm zur qualitativen Bewertung von Salzlösungsvorkommen anhand von δD und δ ¹⁸ O-Analysen (nach Schmiedl et al. 1982 mit Ergänzungen).....	63

Abb. 4-11	Untersuchungsergebnisse von Salzlösungen unterschiedlicher Herkunft und Entstehung im δD und $\delta^{18}O$ -Diagramm (nach Herbert 2000)....	64
Abb. 4-12	Diagramme zur Ermittlung des Bromgehaltes (nach Schmiedl et al. 1982).....	65
Abb. 4-13	Entwicklung der Zuflussmenge, Dichte und chemischen Zusammensetzung der Salzlösungsaustritte 1., 2. und 4. Sohle (DB 01, DB 02 und DB 03) im Grubenfeld Roßleben (nach Schwandt 1978).....	66
Abb. 4-14	Geologischer Schnitt mit Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Zuflussmenge und Dichte sowie der chemischen Zusammensetzung der Salzlösungen; Austrittsstelle 400 – 444 / 12, Grube Neustaßfurt VI/VII (nach Schwandt 1991a)	67
Abb. 4-15	Zusammenhänge zwischen Teufe und Schwankungsbreite der Dichte sowie des $MgCl_2$ -Gehalts der Salzlösungszutritte aus dem Hauptanhydrit in den Gruben an der NE-Flanke des Staßfurter Sattels (nach Schwandt et al. 1991)	68
Abb. 4-16	Zusammenhänge zwischen Teufe und Gesamtzuflussmenge der Salzlösungen in den Gruben an der NE-Flanke des Staßfurter Sattels mit vergleichsweiser Darstellung für das Saale-Unstrut- und Nordharz-Kalirevier	70
Abb. 4-17	Geologische Position der Salzlösungsvorkommen an der NE-Flanke des Staßfurter Sattels	71
Abb. 5-1	Probennahmestelle DB 01: Vergleich der angegebenen Ionengehalte mit den aus den Salzgehalten berechneten Werten	77
Abb. 5-2	Probennahmestelle DB 01: Vergleich der gemessenen Dichten mit den berechneten Werten, Ausschnitt für die Jahre 1926 bis 1939.....	79
Abb. 5-3	Probennahmestelle DB 01: Salzgehalte	80
Abb. 6-1	$MgCl_2$ -Gehalte der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen.....	86

Abb. 6-2	NaCl-Gehalte der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen.....	87
Abb. 6-3	KCl-Gehalte der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen.....	88
Abb. 6-4	MgSO ₄ -Gehalte der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen.....	89
Abb. 6-5	CaCl ₂ -Gehalte der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen.....	89
Abb. 6-6	Verteilung der maximalen CaCl ₂ -Gehalte der Salzlösungen in den Salzgruben Mitteldeutschlands	93
Abb. 6-7	Lösungen des Lösungstyps A (pink) und B (orange) im Mg-SO ₄ -K ₂ -Dreieck (vergrößerter Ausschnitt mit mehr als 70% Mg).....	94
Abb. 6-8	Lösungen des Lösungstyps C (hellblau) und D (blau) im Mg-SO ₄ -K ₂ -Dreieck	95
Abb. 6-9	Halit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen.....	96
Abb. 6-10	Sylvin-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen.....	97
Abb. 6-11	Carnallit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen.....	97
Abb. 6-12	Bischofit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen	98
Abb. 6-13	Anhydrit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen.....	99
Abb. 6-14	Polyhalit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen	99

Abb. 6-15	Kainit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen.....	100
Abb. 6-16	Kieserit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen.....	101
Abb. 6-17	Antarcticit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen	101
Abb. 6-18	Tachhydrit-Sättigung der untersuchten Salzlösungen Mitteldeutschlands und Zuordnung zu den Lösungstypen	102
Abb. 6-19	Entwicklung der Zuflussmengen und der Lösungsdichten im Zufluss GB 02 – Rollloch 6 im Südwestfeld des Kalibergwerkes Solvayhall I/II (nach Schwandt 1993)	106
Abb. 6-20	Entwicklung der Salzgehalte der Lösungen im Zufluss GB 02 – Rollloch 6 im Südwestfeld des Kalibergwerkes Solvayhall I/II (Herbert 2000)	106
Abb. 6-21	Entwicklung der Sättigungsverhältnisse der Lösungen im Zufluss GB 02 – Rollloch 6 im Südwestfeld des Kalibergwerkes Solvayhall I/II (Herbert (2000)).....	107
Abb. 6-22	Entwicklung der Lösungszusammensetzung im Zufluss GB02 – Rollloch 6 im Südwestfeld des Kalibergwerkes Solvayhall I/II in einem Ausschnitt des Mg-SO ₄ -K ₂ -Dreiecks	107
Abb. 7-1	Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei zunehmender Eindunstung des Meerwassers	111
Abb. 7-2	Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei der Auflösung von Carnallit des Typs K ₂ C.....	116
Abb. 7-3	Lösungsentwicklung bei der Carnallitauflösung – Vergleich von Messdaten aus dem In-situ-Versuch in der Schachanlage Asse mit Ergebnissen der geochemischen Modellierung (Herbert 2000).....	117

Abb. 7-4	Entwicklung der Mineral-Sättigungen in den Lösungen bei der Carnallitauflösung – Vergleich der Mineralsättigungen der natürlichen Lösungen mit Ergebnissen der geochemischen Modellierung (Herbert 2000).....	118
Abb. 7-5	Lösungsentwicklung bei der Carnallitauflösung – Vergleich der Wasseraktivität, des Wassergehaltes und der Menge gelösten Carnallitits (Herbert 2000).....	119
Abb. 7-6	Bilanz der gelösten und gebildeten Minerale bei der Carnallitauflösung – Ergebnisse der geochemischen Modellierung (Herbert 2000).....	119
Abb. 7-7	Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei der Auflösung von Carnallitit mit Sylvin des Typs K ₂ CK.....	120
Abb. 7-8	Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei der Auflösung von Carnallitit mit Bischofit des Typs K ₂ CK.....	121
Abb. 7-9	Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei der Auflösung von Carnallitit mit Kieserit und Tachhydrit.....	121
Abb. 7-10	Entwicklung der Mineral-Sättigungen in den Lösungen bei der Hartsalzauflösung während der Flutung des Bergwerks Hope nördlich von Hannover – Vergleich der Affinitäten aus den natürlichen Lösungen mit Ergebnissen der geochemischen Modellierung (Herbert 2000).....	122
Abb. 7-11	Verlauf der Lösungsentwicklung bei der Hartsalzauflösung in Hope– Ergebnisse der geochemischen Modellierung: Lösungszusammensetzung (oben), Affinitäten der Reaktanden (Mitte) und Affinitäten der Produkte (unten) (Herbert 2000).....	123
Abb. 7-12	Massenbilanz der gelösten und gebildeten Minerale bei der Hartsalzauflösung in Hope–Ergebnisse der geochemischen Modellierung.	124
Abb. 7-13	Entwicklung des Wassergehaltes und der Wasseraktivität der Lösungen bei der Hartsalzauflösung in Hope – Ergebnisse der geochemischen Modellierung	124

Abb. 7-14	Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei der Auflösung von langbeinitischem Hartsalz	125
Abb. 7-15	Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei der Auflösung von kieseritischem Hartsalz	125
Abb. 7-16	Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei der Auflösung von polyhalitischem Hartsalz	126
Abb. 7-17	Entwicklung der Salzgehalte in Lösung bei der Auflösung von sylvinitischem Hartsalz.....	126
Abb. 7-18	Lösungsentwicklung bei fortschreitender Eindunstung von Meerwasser (EQ3/6 – Modellierung).....	130
Abb. 7-19	Lösungsentwicklung bei der Auflösung von Carnallitit mit NaCl-gesättigter Lösung.....	130
Abb. 7-20	Lösungsentwicklung bei der Reaktion von eingedunstetem Meerwasser mit einer Mg-Konzentration von 4,0874 mol/kg auf Calcit.	131
Abb. 7-21	Lösungsentwicklung einer Carnallititzersetzungslösung mit 3,839 mol/kg Mg bei der Reaktion mit Calcit.....	131
Abb. 7-22	Korrelierung von gemessenen MgCl ₂ -Gehalten und Kaligesteinen, mit denen die Lösungen nachweislich Kontakt hatten	136
Abb. 8-1	Lage der vereinzelt vorhandenen Tropf- und Nassstellen in den Abbaubereichen Typ St 1 und Typ St 2 (nach Duchrow et al. 1980) des Südharz-Kalireviers	140
Abb. 8-2	Geologische Stoßskizzen von Tropf- und Nassstellen in den Kali- und Steinsalzgruben am Bernburger Hauptsattel (nach Schwandt 1993)	141
Abb. 8-3	Geologischer Schnitt durch ein weiträumiges Ablaugungsgebiet des Staßfurtsteinsalzes (nach Schwandt 1999).....	142
Abb. 8-4	Verteilung der Gesamtzuflussmengen von Salzlösungen und Wässern auf die Haupttypen I und II im Bearbeitungsgebiet	142

Abb. 8-5	Brüche im Salinar (Schwandt 2000).....	143
Abb. 8-6	Skizzen zur Ausbildung von salzlösungsführenden Trennbrüchen in den Kaligruben Mitteldeutschlands	144
Abb. 8-7	Beziehungen zwischen Verwerfungsbrüchen im Deckgebirge, Ablau- gung des Mittleren Werrasteinsalzes sowie Salzlösungsaustritten im Kaliflöz Thüringen (nach Schilder et al. 1983).....	145
Abb. 8-8:	Beziehungen zwischen Verwerfungsbrüchen im Deckgebirge und Schnitten, Salzlösungsaustritten sowie Umbildung des Kaliflözes Thüringen (nach Schwandt 2006).....	146
Abb. 8-9	Salzlösungsvorkommen in Umbildungsbereichen der Kaliflöze Thüringen und Hessen im thüringischen Werra-Kalirevier (nach Schwandt 1990).....	147
Abb. 8-10	Geologische Position der Salzlösungsvorkommen in Kreuzungs- bereichen von Bruchstörungen im Kali- und Steinsalzbergbau Mitteldeutschlands - Schema	148
Abb. 8-11	Schema der geologischen Position der Salzlösungs- und Wasservor- kommen in den Grubenfeldern des thüringischen Werra-Kalireviers (Schwandt 2005).....	149
Abb. 8-12	Lage möglicher Salzlösungsvorkommen unterschiedlicher chemi- scher Zusammensetzung in schuppenartig übereinandergeschobe- nen Hauptanhydritschollen - schematischer Querschnitt bei ca. 30° einfallenden Schichten	150
Abb. 8-13	Position der Salzlösungs- und Wasservorkommen an der NNE- Flanke des Bernburger Hauptsattels (Schwandt 2005).....	152
Abb. 8-14	Entwicklung der Kenntnisse zur Bruchtektonik am Staßfurt-Egelner Sattel (nach Schwandt 2006).....	153
Abb. 8-15	Beziehung der Querstörung im Deckgebirge mit dem Zufluss Flaches 19 in der Grube Friedrichshall (Schwandt 2005).....	153

Abb. 8-16	Lage der Zuflussstelle Hangende Kainitstrecke (K/H) im Grubenfeld Aschersleben III	154
Abb. 9-1	Schematische Lage der Steinsalzmächtigkeiten größer 500 m im Bearbeitungsgebiet	159

12 Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1	Erforderliche Daten und Informationen für die Klärung der Genese von Lösungen im Salzgebirge (nach Herbert 2000).....	10
Tab. 3-1	Zustand der Salzbergwerke im Zechstein Deutschlands (teilweise nach Schwandt, Seifert 1999)	20
Tab. 3-2	Zeitliche Stellung des Zechstein in der Erdgeschichte.....	26
Tab. 3-3	Idealisierte stratigraphische Gliederung des Zechsteins im Bearbeitungsgebiet (teilweise nach Käding 2000, Hiete et al. 2006, Hug et al. 2006)	27
Tab. 3-4	Grundwasserleiter/Grundwassergeringleiter im Werra-Revier (nach Dittrich 2005).....	39
Tab. 3-5	Grundwasserleiter/Grundwassergeringleiter im Südharz-Revier	39
Tab. 3-6	Grundwasserleiter/Grundwassergeringleiter im Nordharz-Revier.....	40
Tab. 4-1	Klassifikation der Salzlösungen nach dem Chemismus aus den Kali- und Salzgruben (Herrmann et al. 1978).....	46
Tab. 4-2	Jänecke-Koordinaten der invarianten Lösungen (IP) der vier quinären NaCl-gesättigten Randsysteme des hexären Systems der Salze ozeanischer Salzablagerungen bei 25 °C und 1 atm (nach Eugster et al. 1980)	53
Tab. 6-1	Verteilung der MgCl ₂ -Einzelanalysen der Kaliwerke Mitteldeutschlands auf die Lösungstypen (5124 Einzelanalysen).....	90
Tab. 6-2	Verteilung der NaCl-Einzelanalysen der Kaliwerke Mitteldeutschlands auf die Lösungstypen (4388 Einzelanalysen)	90
Tab. 6-3	Verteilung der KCl-Einzelanalysen der Kaliwerke Mitteldeutschlands auf die Lösungstypen (4399 Einzelanalysen)	91

Tab. 6-4	Verteilung der $MgSO_4$ -Einzelanalysen der Kaliwerke Mitteldeutschlands auf die Lösungstypen (3826 Einzelanalysen).....	91
Tab. 6-5	Verteilung der $CaCl_2$ -Einzelanalysen der Kaliwerke Mitteldeutschlands auf die Lösungstypen (646 Einzelanalysen).....	92
Tab. 6-6	Zusammensetzung der Ausgangslösung.....	103
Tab. 6-7	Beispiele für mineralogische Zusammensetzungen typischer Carnallite (Staßfurter Sattel) und Hartsalze (Nordostflanke des Rosslebener Sattel).....	103
Tab. 7-1	Die Minerale der Zechsteinevaporite	112
Tab. 7-2	Mineralogische Zusammensetzung des Staßfurt- (Na2) und des Leine-Steinsalzes (Na3) (Herbert 2000).....	114
Tab. 7-3	Änderungen im Reaktionsverlauf an den Reaktionspunkten R1 bis R5..	120
Tab. 7-4	Zusammensetzungen von Salzlösungen unterschiedlicher Herkunft:.....	129
Tab. 7-5	Vergleich von Zusammensetzungen natürlicher Lösungen mit Lösungen aus der Eindunstung von Meerwasser und der Auflösung von Carnallit	133
Tab. 7-6	Erreichbare $MgCl_2$ -Gehalte (EQ3/6-Modellierung) und daraus ableitbare Lösungstypen.....	135
Tab. 7-7	$CaCl_2$ -Gehalte einiger verpresster Bohrungen.....	137
Tab. 9-1	Stand der Entwicklung der Erdgas-Kavernenspeicher in Deutschland (aus Sedlacek 2005)	160

**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