

Anhydritzemente im Rhätsandstein Hamburgs – Röntgen- und kernspintomographische Untersuchungen und Lösungsversuche

AXEL BAERMANN¹, JENS KRÖGER² & MARTIN ZARTH²

Rhätsandstein, Anhydritzementation, Durchströmungsversuche, Lösungsverhalten,
Röntgentomographie, Kernspintomographie, Allermöhe

Kurzfassung

Der in der Geothermie-Erkundungsbohrung Hamburg-Allermöhe 1 angetroffene Rhätsandstein ist weitgehend mit Anhydrit zementiert und dadurch primär nicht geeignet für die geothermische Energie-Erzeugung. Dennoch ist die Untersuchung der Zemente wichtig, weil sie Aufschluss über Art und Verbreitung der Zementation und über Möglichkeiten der technischen Stimulation von zementierten Sandsteinhorizonten geben kann. Zur Untersuchung der Zementation und ihrer Genese wurden radiographische, röntgen- und kernspintomographische Untersuchungsmethoden weiterentwickelt und angepasst. Mit ihnen können in den Bohrkernen charakteristische schicht-, insel- und wechsellagerungsartige Zementationsformen zerstörungsfrei untersucht und dreidimensional dargestellt sowie ihre teufenabhängigen Veränderungen sichtbar gemacht werden. Bei Durchströmungsversuchen unter nicht erhöhten p/T-Bedingungen und mit unterschiedlichen Fluiden zeigten sich Veränderungen der Zementationsformen bis hin zur Bildung bevorzugter Strömungsbahnen. Die Permeabilität erhöhte sich dabei um mehr als das Tausendfache. Die ersten Ergebnisse dieser Untersuchungen werden hier vorgestellt.

[Anhydrite Cement in Rhaetian Sandstones in Hamburg: X-ray and NMR Tomographic Studies and Leaching Tests] Abstract

The Rhaetic sandstone was penetrated by the borehole in Hamburg-Allermöhe drilled to investigate the potential for geothermal energy at that location. This sandstone is cemented with anhydrite and therefore the potential for extraction of geothermal energy is limited. Study of the cementation is important, however, in order to obtain information about the regional distribution of the cementation and about possibilities to stimulate the cemented sandstone horizons. Radiographic as well as x-ray and NMR tomographic methods were developed to study this anhydrite cementation. These methods can be used to nondestructively distinguish individual layers, "islands" of cementation, and interbedding cementation patterns. They permit three-dimensional representation so that changes can be observed as a function of depth. Leaching tests in the laboratory with various fluids sometimes increased the permeability by three orders of magnitude and new flow paths were formed.

Einleitung

Im Sommer 1997 wurde im südöstlichen Stadtgebiet Hamburgs die ehemalige Erdölbohrung Allermöhe 1 (Titelbild) von 2178 auf 3305 m vertieft, um das geothermische Nutzungspotential des Mittelrhät-Hauptsandsteins zu erkunden (BEECK et al. 1998, BAERMANN et al., in diesem Heft). In ca. 3200 m Tiefe wurden vier Sandsteinhorizonte mit Mächtigkeiten von insgesamt 73 m angetroffen. Der Porenraum der Fein- und Mittelsandsteine ist jedoch weitgehend mit Anhydrit zementiert. Die noch verbleibende Porosität liegt im Mittel bei ca. 6 %, die mittlere Permeabilität unter 10 mD. Damit stellt die Anhydritzementation das entscheidende Hindernis einer wirtschaftlichen Erdwärmennutzung an diesem Standort dar. Für die weitere Erschließung der geothermischen Ressourcen im Norddeutschen Raum ist eine Abschätzung der regionalen Verbreitung derartiger Anhydritzementationen von entscheidender Bedeutung. Um weitergehende Erkenntnisse hierzu sowie zu den Möglichkeiten einer technischen

Stimulation derartiger Speichergesteine zu gewinnen, wurde mit sedimentpetrographischen, mineralogischen und geochemischen Untersuchungen an den Kernen aus Bohrung Allermöhe 1 begonnen.

Der Anhydritzement ist nicht homogen im Porenraum verteilt, sondern es wechseln vollständig zementierte Bereiche mit unzementierten kleinräumig ab. Sie bilden charakteristische Zementationsformen, die wichtige Informationen über die Genese der Anhydritzementation enthalten und deren Kenntnis für die Entwicklung technischer Stimulationsmaßnahmen von Bedeutung ist. Zur Untersuchung dieser Formen wurden röntgenographische sowie röntgen- und kernspintomographische Untersuchungsmethoden weiterentwickelt und eingesetzt. Außerdem wurde das Lösungsverhalten des Anhydritzements in Durchströmungsversuchen unter Laborbedingungen untersucht. Im folgenden werden die ersten Ergebnisse vorgestellt.

Anwendung der Röntgentomographie bei verschiedenen Anhydritzementationsformen

Lichtmikroskopische Untersuchungen an den Kernen aus der Bohrung Allermöhe 1 lassen erkennen, dass der Anhydrit im Porenraum des Korngerüsts ungleichmäßig verteilt ist. Mit Hilfe der röntgenographischen Durchstrahlung dünner Kernscheiben sind charakteristische Zementationsformen nachzuweisen, die insel-, wolken-

¹ Dr. Baermann & Partner - Mikronanalytik
Hochallee 40, 20149 Hamburg

² Geologisches Landesamt Hamburg,
Billstr. 84, 20539 Hamburg

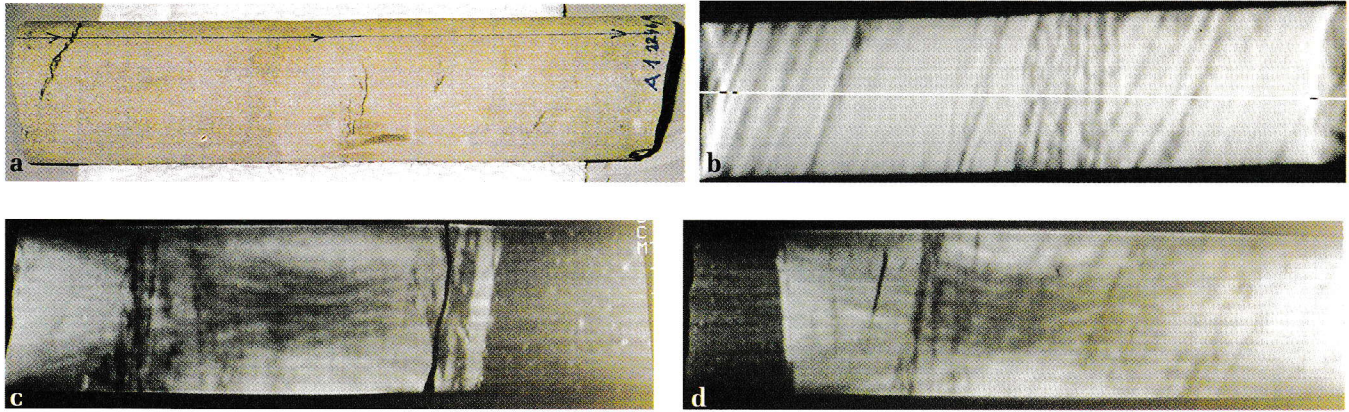


Abb. 1: Bohrung Hamburg-Allermöhe 1.

- oben: Kernabschnitt von 3245,83 bis 3246,12 m: Im Gegensatz zum Foto des Kerns (a) zeigt das Radiogramm (b) den abrupten Übergang von fast sölhiger Wechsellagerung dünner, unzementierter Schichten zu entsprechenden, ca. 30° einfallenden Lagen.
- unten: Kernabschnitt von 3248,05 bis 3248,58 m: Röntgentomogramme (c: von 3248,05 bis 3248,31 m; d: von 3248,31 bis 3248,58 m) zeigen eine scharf abgegrenzte, schwach zementierte Zone in der Mitte (dunkler Abschnitt von 3248,24 bis 3248,35 m).

Fig. 1: Core sections from the Allermöhe 1 borehole in Hamburg.

- above: section from 3245.83 to 3246.12 m: in contrast to the photograph (a) the radiogram shows an abrupt change in dip of the thin uncemented layers from 0° to 30°;
- below: x-ray tomogram of the core section from 3248.05 to 3248.58 m (c: from 3248.05 to 3248.31 m; d: from 3248.31 to 3248.58 m) in which the uncemented zone can be seen in the middle (dark zone between 3248.24 and 3248.35 m).

oder schichtförmigen Verteilungsmuster zeigen (BAERMANN 1998; ZARTH 1999; BAERMANN et al. 2000, in diesem Heft). Diese Methode liefert Radiogramme mit hoher Auflösung und Abbildungsschärfe und erlaubt auch großflächige Abbildungen von bis zu 40 x 60 cm. Die Abbildungsqualität hängt von der Größe und Verteilung der einzelnen Anhydritblasten sowie von der durchstrahlten Schichtdicke ab. Dünne Scheiben von 2 bis 3 mm Dicke ergeben im Rhätsandstein der Bohrung Allermöhe 1 die beste Auflösung zwischen der schwach absorbierenden Silikatmatrix aus Quarz, Feldspat und Ton sowie den stark absorbierenden Anhydrit-, Eisensulfid- und Eisenhydroxid-Mineralen. Da diese Untersuchungsmethode aber insbesondere bei großflächigeren Aufnahmen mit einem hohen Verbrauch an wertvollem Kernmaterial verbunden ist, wurde nach einer zerstörungsfreien Methode zur Abbildung der Zementationsformen gesucht.

Durch eine Weiterentwicklung und Anpassung der Computer-Tomographie aus der Medizintechnik gelang es, bis zu 70 cm lange Bohrkernabschnitte zerstörungsfrei aufzunehmen und die Anhydrit-Zementationsformen räumlich darzustellen (BAERMANN 1999). Hierbei werden zunächst sogenannte Radiogramme (Übersichts-Röntgentomogramme) angefertigt, die einer Durchstrahlung des gesamten Probenkörpers entsprechen. In diesen Übersichtstomogrammen können die jeweiligen Quer- und Längsschnittlagen für die Tomographien vorgegeben werden, die dann durch einzelne Scan-Aufnahmen schichtweise abgerastert werden. Die Schichtdicke ist variabel einstellbar und erbringt bei 2 mm die beste Auflösung zwischen dem stark absorbierenden Anhydrit und den schwächer absorbierenden Silikaten.

Die im Röntgentomogramm erkennbaren unterschiedlichen Graustufen sind Material-Dichtewerten zuzuordnen, die der durchschnittlichen Schwächung der eingebrachten Röntgenstrahlung entsprechen. Dieser Dichtewert steht in linearer Beziehung zum Schwächungskoeffizienten und wird bei medizinischen Röntgentomographien in sogenannten Hounsfield-Einheiten (HE) gemessen. Als Fixpunkte auf der Dichteskala sind die Werte -1000 HE für Luft und 0 HE für Wasser definiert. An reinen Mineral-Standards wurden die HE-Dichteeinheiten für Anhydrit, Gips, Calcit, Quarz, Feldspat, verschiedene Tone sowie Eisenoxide und -sulfide kalibriert, um eine Interpretation der Dichteunterschiede in den Tomogrammen zu ermöglichen. Durch Schrittweiten von 1 bis 10 mm zwischen den einzelnen Querschnitt-Aufnahmen und durch entsprechende Aufnahmen längs der Kernachse lassen sich die Zementationsformen bis hin zu einzelnen Anhydritblasten dreidimensional erfassen.

Die beiden aufeinander folgenden Röntgentomogramme eines 53 cm langen Kernabschnitts in Abbildungen 1c (3248,05 - 3248,31 m) und 1d (3248,31 - 3248,58 m) zeigen im mittleren Bereich (3248,24 bis 3248,35 m) eine scharf abgegrenzte, 11 cm mächtige, gering zementierte Schicht mit inselförmig eingelagerten, mm-großen Anhydritblasten. Der übrige Bereich ist stark zementiert und wird immer wieder von mm-dicken, unzementierten Schichten durchzogen, die teilweise mit den zwischengelagerten, zementierten Schichten eine Art Wechsellagerung bilden. Die in den Tomogrammen gut erkennbaren, diagonal verlaufenden Schattierungen sind messtechnisch bedingte sogenannte Röntgenstrahl-Aufhärtungen. Bei 3246,02 m (Abb. 1b) geht eine mit ca. 30° einfallende

Tabelle 1: Ergebnisse der Durchströmungsversuche an den Bohrkernproben P1 bis P7.

Table 1: Results of the leaching tests with core sections P1 to P7.

Proben-Nr. / Teufe (m)	Fluid	Zeit (T) [a]	Gewichtsverlust		Anhydrit im Perkolat (g)	Anhydrit im Perkolat			Porenanteil (%)			Permeabilität (mD)	
			(g)	% Ausg. Gew. [b]		% Ausg. Gew. [b]	% Gew. Verl. [c]	Geschw. (%/T) [d]	vorher	nachher	Zuwachs	vorher[e]	nachher
P1 / 3251,97	Dest. H ₂ O	77,1	8,0	1,1	6	0,8	74	0,01	3,1	4,1	1,0	0,06	0,06
	10 g/l NaCl	6,9	19,5	2,7	13	1,9	68	0,27	4,1	5,2	1,1	0,06	30
	Gesamt	84,0	27,6	3,9	19	2,7	70	0,03	3,1	5,2	2,1	0,06	30
P2 / 3252,09	Dest. H ₂ O	54,2	39,3	5,7	32	4,7	82	0,09	4,2	9,1	4,9	0,05	42
P3 / 3254,19	Dest. H ₂ O	59,5	16,5	2,3	14	1,9	82	0,03	1,7	3,7	2,0	0,04	11
	10 g/l NaCl	3,1	26,3	3,6	17	2,4	66	0,78	3,7	6,4	2,7	11	190
	Gesamt	62,6	42,8	5,9	31	4,3	72	0,07	1,7	6,4	4,7	0,04	190
P4 / 3254,48	Dest. H ₂ O	47,7	9,0	1,2	7	1,0	79	0,02	1,9	3,0	1,1	0,07	0,10
P5 / 3243,61	Dest. H ₂ O	57,9	30,2	4,5	23	3,4	76	0,06	5,4	9,1	3,7	0,3	0,3
P6 / 3247,21	Dest. H ₂ O	40,4	16,1	2,2	12	1,7	77	0,04	1,9	3,9	2,0	0,01	54
	10 g/l NaCl	3,1	23,0	3,2	22	3,1	97	1,00	3,9	6,2	2,3	54	143
	Gesamt	43,5	39,1	5,4	35	4,8	88	0,11			4,3	0,01	143
P7 / 3250,99	Dest. H ₂ O	1,8			0,4	0,1		0,03	1,2			0,14	0,12
	Dest. H ₂ O	4,5			3	0,4		0,08				2	78
	Dest. H ₂ O	2,5			18	2,4		0,96		3,9	2,7	77	312
	Gesamt	8,8	23,4	3,08	21	2,8	92	0,32			2,7	0,14	312

[a] Effektive Durchströmungszeit (Tage) [b] % vom Proben-Ausgangsgewicht [c] % des Gewichtsverlusts der Probe insgesamt
[d] Lösungsgeschwindigkeit (% des Proben-Ausgangsgewichts / Tag) [e] Mittelwerte

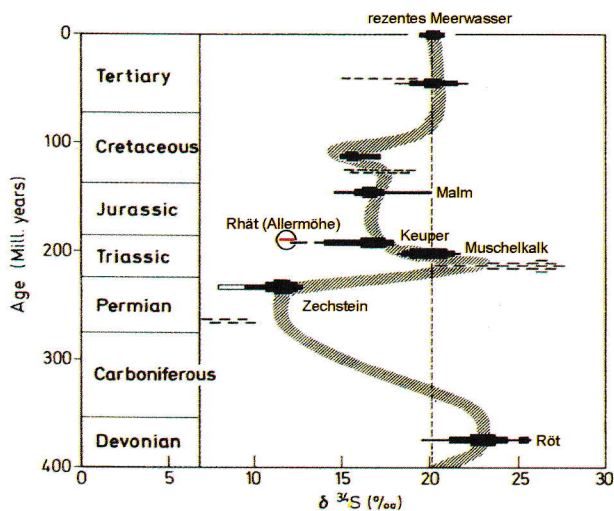


Abb. 2: $\delta^{34}\text{S}$ -Alterskurve von marinen Sulfaten. Die schwarzen Flächen repräsentieren Werte von Salzgesteinsulfaten hauptsächlich aus Mitteleuropa. Gestrichelte Flächen zeigen Werte von Salzgesteinen, die vermutlich nicht vollständig marinen Ursprungs sind (nach NIELSEN 1968). Rot im Kreis: Werte von anhydritzementierten Kernproben der Bohrung Allermöhe 1.

Fig. 2: $\delta^{34}\text{S}$ values of oceanic sulfate. Black areas represent values of evaporite sulfates mainly from Central Europe. Dashed areas represent values obtained from evaporite basins of presumably not completely marine origin (after NIELSEN 1968). Circle: values in core samples from Allermöhe 1.

Wechsellagerung diskordant in eine fast sölilig verlaufende Wechsellagerung mit deutlich dünneren Zementations-schichten über. Mit Hilfe der Röntgentomographie wurde bislang ein 3,8 m langer, meist stark zementierter Abschnitt des insgesamt 25 m mächtigen, vollständig gekernten, zweiten Sandsteinhorizonts untersucht.

Die röntgentomographische Aufnahme der Zementationsformen ermöglicht, wie erste Vergleiche zeigen, auch eine weitergehende Interpretation der FMS-Bohrlochvermessungsdaten (Formation Micro Scanner, LINGNAU 1998), in denen - wenn auch deutlich unschärfer - unzementierte Schichten und unterschiedliche Zementationsgrade ebenfalls zu erkennen sind. Von dieser Reinterpretation der in situ gewonnenen FMS-Daten werden differenzierte Erkenntnisse über die Zementationsformen auch in den nicht gekernten, nur FMS-vermessenen Speicherabschnitten erwartet.

Eine optische und mikroskopische Kernansprache lieferte bislang keine plausiblen Erklärungen für die in den Tomogrammen ausgewiesenen Zementationsformen (Abb. 1a und 1b). Hier sind detaillierte sedimentologische und mineralogische Untersuchungen geplant, um den Ursachen für die charakteristischen Zementationsformen, wie z. B. möglichen Strukturen im Primärgefüge nachzugehen und um die darin enthaltenen Informationen über die Zementationsgenese zu entschlüsseln.

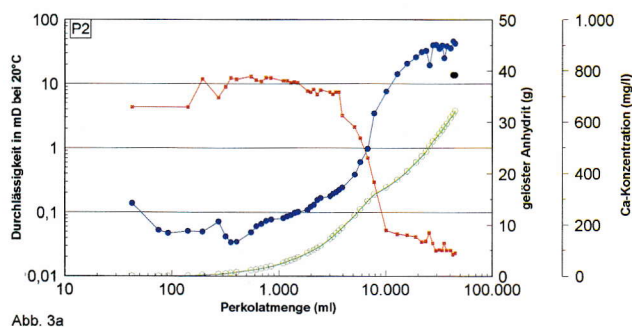


Abb. 3a

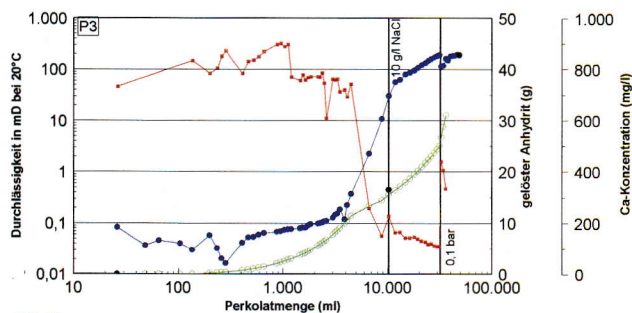


Abb. 3b

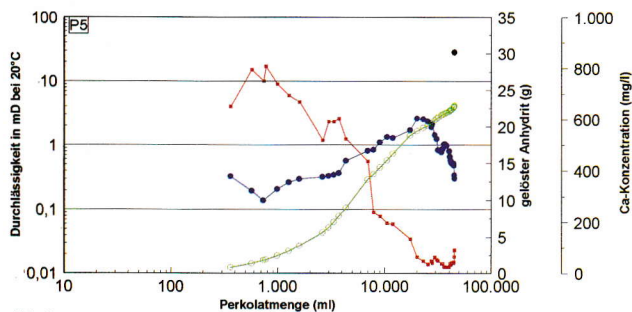


Abb. 3c

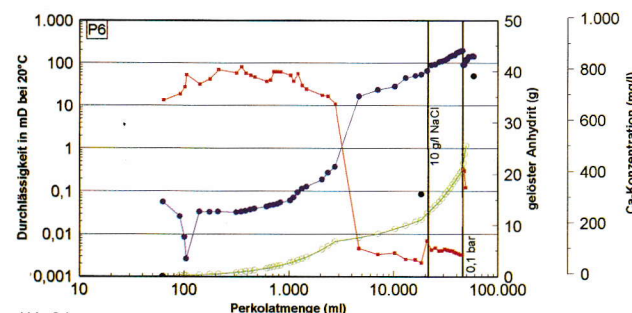


Abb. 3d

Abb. 3: Entwicklung der Permeabilität und der Anhydritauflösung während der Durchströmung der Proben P2, P3, P5 und P6.

Blau: Durchlässigkeit (mD)
Grün: Gelöster Anhydrit (g)
Schwarze Punkte: Gewichtsverlust der Probe (g)
Rot: Calcium-Konzentration (mg/l)

Fig. 3: Permeability and dissolving of the anhydrite during throughflow tests (core sections P2, P3, P5, and P6).

blue: permeability (in mD)
green: dissolved anhydrite (in g)
red: Ca concentration (in mg/L)
black dots: weight loss (in g)

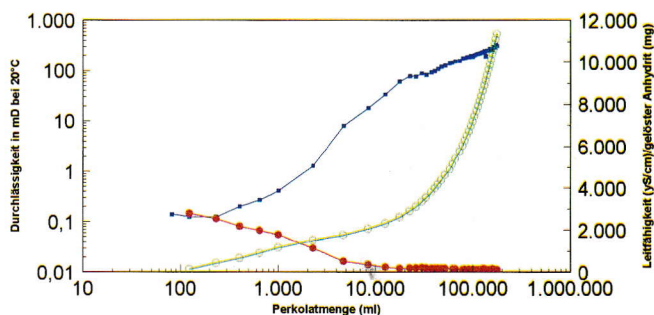


Abb. 4: Entwicklung der Permeabilität und der Anhydritauflösung während der Durchströmung der Probe P7.

Blau: Durchlässigkeit (mD)
Rot: Leitfähigkeit (μS/cm)
Grün: gelöster Anhydrit (mg)

Fig. 4: Permeability and dissolving of the anhydrite during leaching tests (core section P7).

blue: permeability (in mD)
red: electrical conductivity (in μS/cm)
green: dissolved anhydrite (in g)

Die wiederholt auftretenden, dünnen, unzementierten Schichten könnten so interpretiert werden, dass die zementbildenden Lösungen horizontal zugeströmt sind und dass es sich bei den noch vorhandenen unzementierten Schichten um die Reste der Zustrombahnen handelt, die durch die fortschreitende Zementation immer mehr verengt wurden. Hierzu sind Versuche mit wechselnden p/T-Bedingungen an zementierten und unzementierten Proben begonnen worden. Einen ersten Hinweis darauf, dass die zementbildenden Lösungen von dem etwa 2 km entfernt liegenden Salzstock Reitbrook her seitlich zugeströmt und nicht aus den unterlagernden Keuper-schichten vertikal aufgestiegen sind, liefern die $\delta^{34}\text{S}$ -Werte von 9 Sandsteinproben. Sie liegen in dem eng begrenzten Bereich von 11,6 bis 12,2‰ und entsprechen damit den Werten für marin abgelagerte Zechsteinsulfate (Abb. 2).

Lösungsverhalten der Anhydritzemente

Durchströmungs-Versuche

Das Lösungsverhalten des Anhydrits und die dabei auftretenden Veränderungen der Zementationsformen und der Permeabilität wurden an anhydritzementiertem Kernmaterial aus der Bohrung Allermöhe 1 untersucht. In Triaxialzellen wurden 7 Proben (P1 bis P7, 8,0 × 6,5 cm) bei Raumtemperatur und bis zu 2,8 bar Durchströmungs- und 3,8 bar Zelldruck maximal 84 Tage lang durchströmt, teils mit destilliertem und teils mit natriumchloridhaltigem Wasser. Auf die Realisierung von in situ p/T-Bedingungen (MEYN & LAJCSAK 1999, VOGT 2000) wurde verzichtet, um zunächst mit möglichst geringem Aufwand erste Erkenntnisse über das Lösungsverhalten der verschiedenen Zementationsformen zu erzielen.

Zu Beginn der Durchströmungsversuche lagen die Permeabilitäten zwischen 0,01 und 0,3 mD bei Porositäten von 1 bis zu 5 % (Tab. 1). Mit fortschreitender Versuchsdauer stiegen die Permeabilitäten zunächst langsam, dann durch-

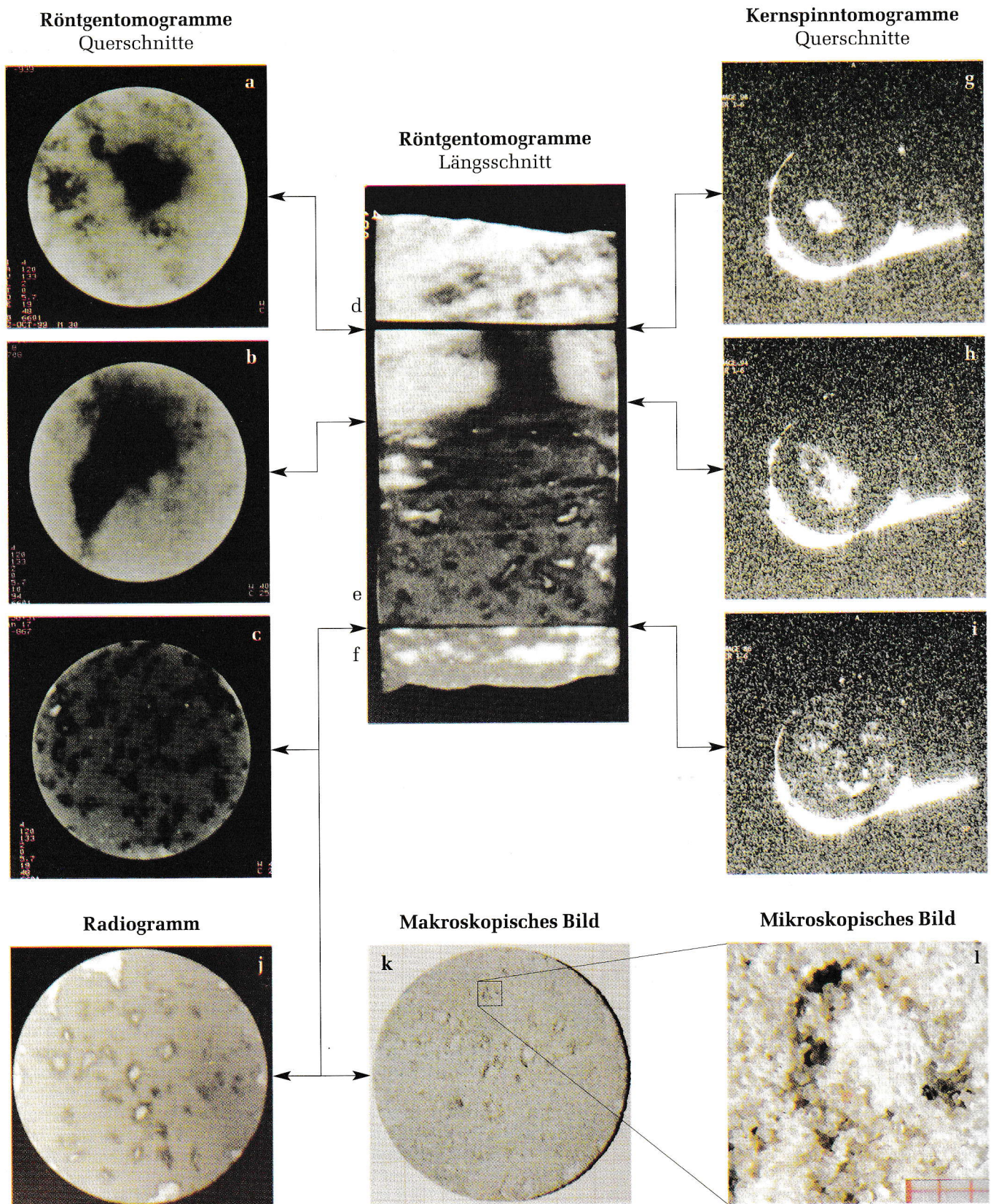


Abb. 5: Zementationsformen in Probe P2 nach 54-tägiger Durchströmung mit destilliertem Wasser: Röntgentomogramme im Längsschnitt von Probe P2 (e) und den nicht durchströmten Anschlussbereichen (d, f); Röntgen- (a bis c) und Kernspintomogramme (g bis i) im Querschnitt; Radiogramm (j), makro- (k) und mikroskopische (l) Aufnahme der unteren Stirnflächenscheibe von Probe P2.

Fig. 5: Cementation patterns after 54 days of leaching core section P2 with distilled water: x-ray tomograms of (e) core section P2 and (d, f) unleached neighbouring sections ; (a-c) x-ray and (g-i) NMR tomograms; (j) radiographic, (k) macroscopic and (l) microscopic images of a disc 2-mm-thick from the end of core section P2.

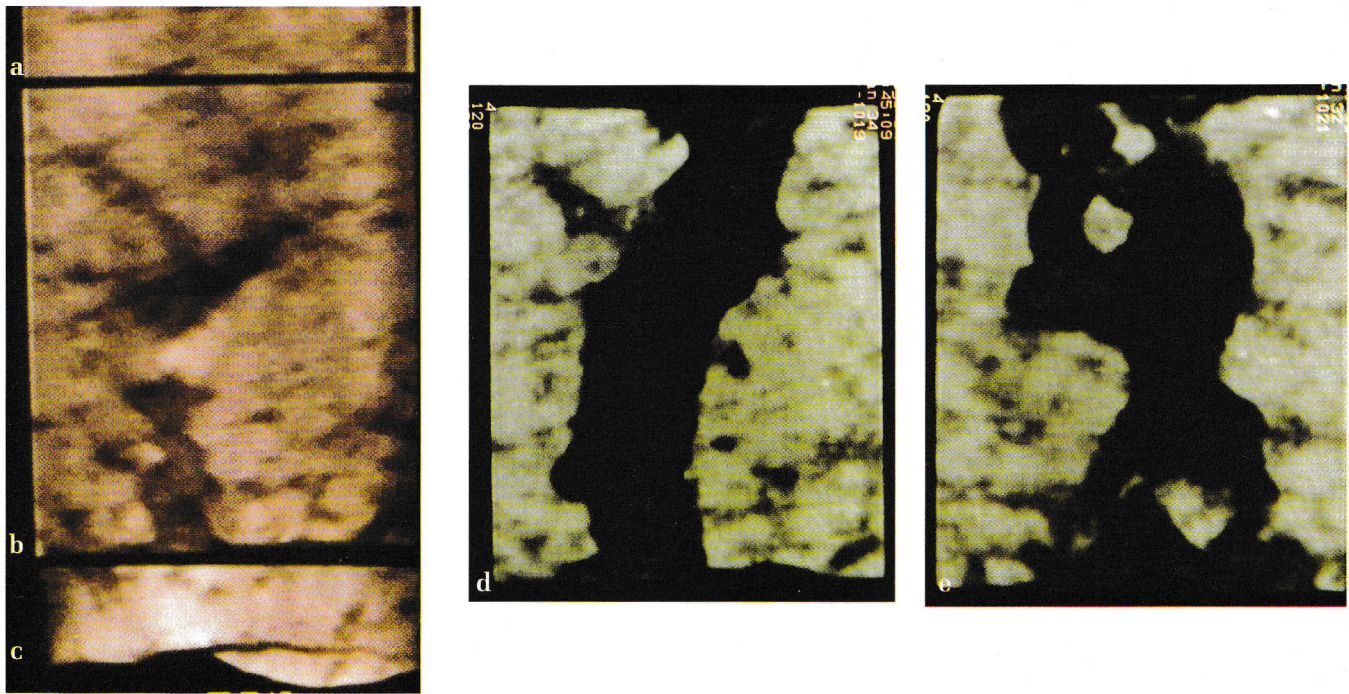


Abb. 6: Veränderung der Zementationsformen bei der Durchströmung von Probe P3: Röntgentomogramme von den nicht durchströmten Anschlussbereichen a und c sowie von P3 nach 60-tägiger Durchströmung mit destilliertem Wasser (b) bzw. nach weiterer 3,1-tägiger Durchströmung mit 10 g/l NaCl-Lösung (d und e). Schnittlage (e) steht senkrecht auf (d) zur räumlichen Darstellung der Lösungserscheinungen.

Fig. 6: Changes in cementation patterns during the leaching of core section P3: x-ray tomograms (b) after leaching for 60 days with distilled water and (d and e) after additional 3.2 days with 10 g/L NaCl, (a and c) x-ray tomograms of unleached neighbouring core sections. Scan e was made after rotating the core 90° from the position of scan d.

bruchartig bis auf das Tausendfache und anschliessend wieder langsam an (Abb. 3a, 3b, 3d und 4). Nach dem Durchbruch fielen so hohe Perkolatmengen an, dass nur noch eine intermittierende Durchströmung während einiger Stunden tagsüber realisiert werden konnte. Vor dem Durchbruch lagen im Perkolat die Anhydritkonzentrationen im Sättigungsbereich (ca. 800 mg/l Ca), während sie danach bei den hohen Durchflussraten um mehr als das Zehnfache absanken. Entsprechend flacht die Konzentrationskurve für den herausgelösten Anhydrit nach dem Durchbruch deutlich ab (Abb. 3 und 4).

Das Herauslösen des Anhydrits konnte in den Proben P1, P3 und P6 beschleunigt werden, indem als Fluid 10 g/l Natriumchloridlösung eingesetzt wurde (Tab. 1 und Abb. 3b, 3d). In Folgeversuchen soll die Konzentration bis zum Löslichkeitsoptimum gesteigert werden, das laut VOGT (2000) bei 100 g/l Natriumchlorid zu erwarten ist. Bei der Reduzierung des Durchströmungsdrucks von 2,8 auf 0,1 bar am Ende der Versuche P3 und P6 stieg die Anhydritkonzentration im Perkolat aufgrund der verringerten Strömungsgeschwindigkeit wieder bis auf ca. 50 % der Sättigungskonzentration an.

Insgesamt wurden aus jeder Probe Anhydritmengen herausgelöst, die etwa 1 bis 5 % des Kernprobengewichts entsprachen (Tab. 1). Als Lösungsgeschwindigkeit, die über die gesamte Versuchsdauer gemittelt wurde, ergibt

sich, dass pro Tag eine Anhydritmenge gelöst wurde, die je nach Probe 0,01 bis 0,32 % des ursprünglichen Probenengewichts entspricht. Die im Perkolat nachgewiesenen Mengen von Anhydrit machen insgesamt 70 bis 92 % des Gewichtsverlustes der Proben aus. Die Mindererfassungen sind teils durch Bohrspülungsreste in den Proben und Analysefehler zu erklären oder teils auch versuchstechnisch bedingt.

Röntgen- und Kernspintomographie

Durch wiederholte röntgentomographische Aufnahmen vor, während und nach der Durchströmung konnte sichtbar gemacht werden, wie sich kanalartige Strömungsbahnen im Kerninnern (Abb. 5 und 6) oder in den Randzonen (Abb. 7) im Verlauf der Durchströmung ausgebildet haben. Unter dem Stereomikroskop wie auch in den Röntgentomogrammen und Radiogrammen zeigen sich mehrfach ringförmige Strömungsbahnen (Abb. 5 c, j bis l), die sich um mm-große, zementierte Bereiche gebildet haben. Die Anhydritauflösung ging punktuell so weit, dass sich der Kornverband auflöste und sich dabei bis 2 mm große Kavernen bildeten. Bei Probe P7 konnten nach der Durchströmung makro- und stereomikroskopisch zentimetergroße, absandende Bereiche an den Stirn- und Seitenflächen beobachtet werden.

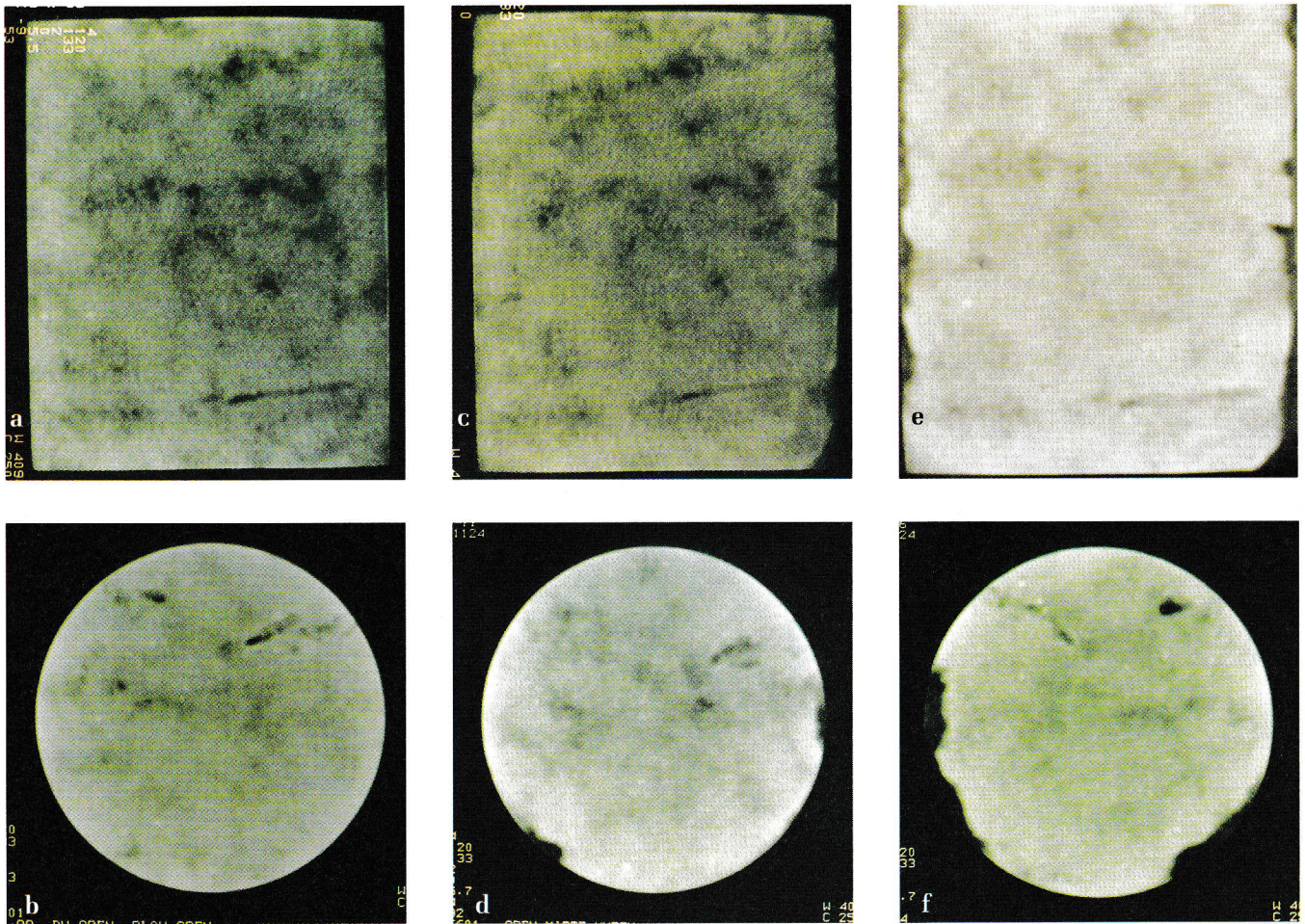


Abb. 7: Veränderung der Zementationsformen insbesondere in den Randzonen während der Durchströmung von Probe P7 mit destilliertem Wasser: Röntgentomogramme im Längsschnitt (oben) und im Querschnitt an der unteren Stirnfläche (unten), jeweils zu Beginn der Durchströmung (a, b), sowie nach 6,3 (c, d) und insgesamt 8,8 Tagen (e, f) effektiver Durchströmungszeit.

Fig. 7: Changes in cementation patterns during the leaching of core section P7 with distilled water: x-ray tomograms (a, b) before leaching, (c, d) after leaching for 6.3 days and (e, f) after additional 2.5 days of leaching.

Die Permeabilitäten lagen zu Beginn der Durchströmungsversuche bei 0,01 – 0,3 mD und damit deutlich unter den zuvor in Labor- und Pumpversuchen (LENZ et al. 1997) sowie aus Bohrlochmessungen (PAPE et al. 1999a) ermittelten Werten von im Mittel 6 mD. Allerdings wurden die Kernproben in den Durchströmungsversuchen vertikal durchströmt, während alle anderen Werte die Permeabilität in horizontaler Richtung angeben. Angesichts der starken Anisotropie in den Tomogrammen, die insbesondere durch die mm-dicken unzementierten Lagen hervorgerufen wird, sind diese Permeabilitätsunterschiede plausibel.

Zur Untersuchung der Wasserführung in den neu gebildeten Poren diente ein Kernspintomograph. Damit konnten Größe und Verteilung von wasserhaltigen größeren Poren und Kavernen nachgewiesen werden. Diese auch als Magnetresonanztomographie (MRT) bezeichnete Methode basiert auf der Anregung des Spins der Protonen im Wasser durch Hochfrequenz-Einstrahlungen. Sämtliche

Untersuchungen erfolgten mit einem Magnetom Harmony Gerät der Firma Siemens. Die Latex-umhüllten Bohrkernproben wurden unmittelbar nach dem Durchströmungsversuch in einen PE-Beutel eingeschweißt, um eine vollständige Wassersättigung während der MRT-Aufnahme sicherzustellen und um die kreisförmigen Umrisse der Proben in den Aufnahmen anhand des umhüllenden Wassers zu erkennen.

Wie bei der Röntgentomographie wird zunächst ein Übersichts-Kernspintomogramm erstellt, in dem die gewünschten Schnittlagen (Scan-Lagen) für die Kernspintomogramme festgelegt und nacheinander abgerastert werden. Durch hintereinanderliegende Quer- und gegeneinander gedrehte Längs-Aufnahmen mit 1 mm Schichtstärke lassen sich die Porenraumstrukturen dreidimensional erfassen. Die anhydritzementierte, wasserfreie Gesteinsmatrix wird einheitlich grau abgebildet. Eine zunehmende Aufhellung des Hintergrundgraus wird durch einen zunehmenden Anteil

an wassergesättigten Poren innerhalb der Gesteinsmatrix hervorgerufen. Die Auflösungsschärfe fällt deutlich geringer aus als bei der Röntgentomographie aus. Die räumliche Auflösung wassergefüllter Poren und Kavernen liegt bei dem eingesetzten Gerät bei ca. 2 bis 3 mm³.

Nach 54-tägiger Durchströmung wurden von der wassergesättigten Probe P2 20 Längs- und 20 Querschnitt-Kernspintomogramme aufgenommen. Die Querschnittsbilder zeigen im unteren Bereich der Probe mehrere weiße, mm-große Flecken, die sich mit den in den Röntgentomogrammen, Radiogrammen und mikroskopischen Aufnahmen erkennbaren unzementierten Bereichen decken (Abb. 5). Diese Flecken lassen sich als Strömungsbahnen im Kern interpretieren, die im letzten Drittel der Probe zu einer kanalartigen Strömungsbahn von über 1 cm Durchmesser zusammenlaufen. Demnach decken sich die Kernspintomogramme vollständig mit den röntgentomographischen Ergebnissen.

Diskussion

Zusammenfassend lassen sich der durchbruchartige Anstieg der Permeabilität und die unter konstanten p/T-Bedingungen erfolgten Anhydritlösungsvorgänge wie folgt erklären. Der in der unbehandelten Kernprobe vorliegende, noch offene, nicht zementierte Porenraum besteht aus Porenbäuchen in den Zwickeln des Korngerüsts, die über Porenhäule netzartig miteinander verbunden sind. Die Permeabilität der alternierenden, quasi in Reihe geschalteten Porenhäule und -bäuche wird im wesentlichen durch die Porenhäule bestimmt.

Zu Beginn des Durchströmungsversuchs reicherte sich das in die vordere Stirnfläche eingedrungene destillierte Wasser mit gelöstem Anhydritzement an und erreichte aufgrund der niedrigen Strömungsgeschwindigkeit bereits nach geringer Eindringtiefe Sättigungskonzentration. Das Fluid konnte auf der weiteren Passage durch den Kern keinen weiteren Anhydrit mehr herauslösen, da ein Gleichgewicht zwischen Lösungs- und Fällungsreaktion bestand. Durch den fortschreitenden Lösungsprozess erhöhte sich das Porenvolumen im vorderen Bereich der Probe zunehmend. Die Permeabilität der Gesamtprobe änderte sich aber kaum, solange auf der Abstromseite noch eine Zone mit unverändertem Porenvolumen existierte. In dieser ersten Phase des Durchströmungsversuchs führten die Lösungsprozesse aufgrund folgender Zusammenhänge zur Bildung bevorzugter, kanalartiger Fließwege.

Da sich der Volumenfluss bei gleichem Druckgradienten proportional zur 4. Potenz der Radien verhält, fließt durch die größeren Porenhäule überproportional mehr Fluid als durch die engeren. Der sich lösende Anhydrit wird in den größeren Poren schneller abtransportiert, so dass die Anhydritkonzentration hier entsprechend niedriger ausfällt. Die niedrigere Anhydritkonzentration im Fluid bewirkt eine höhere Lösungsgeschwindigkeit, da die treibende Kraft für den Lösungsvorgang an den Oberflächen der Anhydritkristalle durch die Differenz zwischen Fluid- und Sättigungskonzentrationen bestimmt wird. In den größeren Poren löst sich damit der Anhydrit viel schneller als in den engeren. Durch diesen sich selbst verstärkenden Prozess verbreitern sich die größeren Porenhäule überproportional schnell und bilden bevorzugte Fließwege. Auf diesen Fließwegen nimmt der Volumenfluss stark zu, während er

in den übrigen Bereichen sogar zurückgeht, da der Volumenfluss über die gesamte Querschnittsfläche in der ersten Phase kaum ansteigt.

Auf den bevorzugten Fließwegen kann Fluid, das noch nicht gesättigt ist, am weitesten in den Kern vordringen. Dadurch wachsen die bevorzugten Fließwege in Abströmrichtung weiter. Wenn die Lösungsfront des vordersten Fließweges die abströmseitige Stirnfläche der Kernprobe erreicht hat, steigt die Permeabilität der Gesamtprobe schlagartig an, und die Anhydritkonzentration im Perkolat reduziert sich aufgrund des viel höheren Volumenflusses. In der sich anschließenden zweiten Phase des Durchströmungsversuchs fließt die Hauptmenge des Fluids durch die bevorzugten Strömungsbahnen, die sich immer mehr verbreitern und dabei immer ausgedehntere anhydritfreie Bereiche bilden.

Wenn bereits vor der Durchströmung durchlässigere Bereiche von der Stirnfläche her in den Kern hineinragen, verkürzt sich die Strecke, die die Sättigungsfront durch den Kern wandern muss, und entsprechend früher findet der durchbruchartige, abrupte Anstieg der Permeabilität statt. Hierdurch oder eventuell auch durch vorausgegangene, oberflächennahe Materialstörungen kann der bei Probe P7 beobachtete frühzeitige Durchbruch (Abb. 4) verursacht worden sein.

Der ungewöhnlich starke Anstieg der Permeabilität in den Durchströmungsversuchen findet im Porositätsintervall zwischen 1 und 9 % statt (Tab. 1). Wird dieser Zusammenhang zwischen Porosität und Permeabilität durch eine Potenzfunktion dargestellt, erhält man einen Exponenten, der größer als 10 ist. Nach der von PAPE et al. (1999b) entwickelten Theorie lässt sich die Beziehung zwischen Porosität und Permeabilität mit der fraktalen Struktur des Porenraums erklären. Bei glatten Körnern und einer engen Porenradienverteilung ist die fraktale Dimension D, die als Strukturparameter für den Porenraum verwendet wird, wenig größer als 2. Der dazu passende Exponent in der Potenzfunktion liegt in der Nähe von 3. Ein Beispiel dafür ist der Fontainebleau-Sandstein mit Porositäten über 8 % (BOURBIE & ZINSZNER 1985). Für den anhydritzementierten Rhätsandstein aus der Bohrung Allermöhe 1 wurde ein Exponent von ca. 5 gefunden (PAPE et al. 1999a), was ebenfalls auf eine niedrige fraktale Dimension von ca. 2,25 schließen lässt.

PAPE (2000) beobachtete an Proben aus der Bohrung Allermöhe 1, in denen versuchsbedingt Lösungsprozesse stattgefunden hatten, ähnlich starke Permeabilitätserhöhungen wie in den hier beschriebenen Durchströmungsversuchen. Aus den Anfangs- und den Endwerten von Porosität und Permeabilität ergab sich ein Exponent der Porositäts-Permeabilitäts-Funktion von ca. 12. Das lässt sich mit einer Vergrößerung der fraktalen Dimension auf etwa 2,5 erklären, die auf der Bildung bevorzugter Fließwege und der damit einhergehenden Verbreiterung der Porenradienverteilung beruht.

Bei der Durchströmungsprobe P5 stieg die Permeabilität zunächst bis auf das Zehnfache an und sank dann wieder unter den Ursprungswert (Abb. 3c). Diese Probe weist an der Zustromseite als einzige eine Toneinlagerung auf. Es wird daher angenommen, dass Tonanteile zunächst mobilisiert und danach wieder in Porenhäulen abgelagert wurden, wie schon von MARTIN et al. (1997), SOKOLOV & TCHISTIAKOV (1999) und TCHISTIAKOV (1999) beobachtet.

Ausblick

Den Ergebnissen der Durchströmungsversuche und ersten numerischen Abschätzungen zufolge sollte eine Stimulation zementierter Speicherhorizonte durch Anhydritauflösung auch in situ möglich sein. Ein entsprechender Stimulationstest an der Bohrung Allermöhe 1 wird derzeit von der BRG, Hannover, durchgeführt. KÜHN et al. (1999) konnten mittels numerischer Simulation zeigen, dass beim regulären Betrieb einer geothermischen Heizanlage mit Förder- und Versenkbohrung an letzterer erhebliche Mengen Anhydrit temperaturinduziert aus dem bohrlochnahen Bereich in den Speicher hinein verlagert werden und sich dadurch die Permeabilität erhöht.

Mit den bisherigen Untersuchungen konnte erst eine begrenzte Auswahl an Sandsteinkernen aus der Bohrung Allermöhe 1 erfasst werden. Die Untersuchungen werden fortgesetzt und systematisch auf das gesamte Kernmaterial der Bohrung ausgedehnt. Zu Vergleichszwecken soll auch Kernmaterial aus anderen Bohrungen einbezogen werden. Die Auswahl der zu untersuchenden Kernproben erfolgt mit Hilfe von reinterpretierten FMS-Bohrlochvermessungsdaten (Formation Micro Scanner), denen zufolge das noch nicht untersuchte Kernmaterial zum Teil wesentlich andere Zementationsformen aufweist. Von der Re-Interpretation der FMS-Daten werden zudem wichtige Erkenntnisse zu den Zementationsformen auch der nicht gekerneten, nur FMS-vermessenen Speicherabschnitte erwartet.

Mit den neuen radiographischen, röntgen- und kernspintomographischen Untersuchungsmethoden stehen leistungsfähige Methoden zur Verfügung, um die natürlich vorkommenden Zementationsformen in Bohrkernproben sowie ihre lösungsbedingten Veränderungen während der Durchströmungsversuche detailliert zu erfassen. Damit sollen entscheidende Voraussetzungen geschaffen werden, um die in den Zementationsformen enthaltenen Informationen zur Genese der Anhydritzementation zu entschlüsseln.

Danksagung

Friedrich Kausch (GLA Hamburg) wird gedankt für die labortechnische Durchführung der Durchströmungsversuche und Hansgeorg Pape (RWTH Aachen) für die Beiträge zu ihrer Auswertung.

Literatur

- BAERMANN, A. (1998): Mineralogische, geochemische und röntgenographische Charakterisierung von Bohrkernen aus dem Rhät-Sandstein. – Unveröff. Gutachten Dr. Baermann & Partner, Bericht Nr. G 64-1/99. – GLA-Archiv-Nr. **CHE 010 BAER**; Hamburg.
- BAERMANN, A. (1999): Darstellung von Anhydritzementationen und Porenräumen in Rhätsandsteinen anhand von Röntgen-durchstrahlung, computertomographischen Untersuchungen und Kernspin-Resonanz-Messungen. – Unveröff. Gutachten Dr. Baermann & Partner, Bericht-Nr.: G 70-1/99. – GLA-Archiv-Nr. **CHE 011 BAER**; Hamburg.
- Baermann, A., Kröger, J., Taug, R., Wüstenhagen, K. & Zarth M. (2000a): Anhydritzemente im Rhätsandstein Hamburgs – Morphologie und Strukturen – Z. angew. Geol. 46/3 [in diesem Heft]: 138–143.
- BEECK, H., HORN, H., MENZEL H., LINKE, G., RÖHLING, H.G. & ZARTH, M. (1998): Ergebnisse der Geothermie-Erkundungsbohrung Hamburg-Allermöhe. – In: Geothermische Vereinigung e. V. und Stadtwerke Straubing [Hrsg.]: "Geothermie, Forschung Entwicklung Markt", ca. 500 Seiten. – 5. Geothermische Fachtagung Straubing. – ISBN **3-932 570-14-6**; Geeste.
- BOURBIE, T. & ZINSZNER, B. (1985): Hydraulic and acoustic properties as a function of porosity in Fontainebleau sandstone. – J. Geophys. Res., Vol **90**: 11 524–11 532.
- KÜHN, M., SCHNEIDER, W., BARTELS, J., PAPE H. & CLAUSER, C. (1999): Numerical simulation of chemically induced permeability changes during heat mining in hot aquifers. – S. SIMMONS [ed.] (1999): Proceedings of the 21st New Zealand Geothermal Workshop 1999: 223–228; Univ. of Auckland (Geoth. Inst.).
- LENZ, G., HORN, H. & KELLNER, T. (1997): Geologisch-bohrtechnischer Abschlußbericht über die Verteufung der Bohrung Hamburg-Allermöhe 1. – Unveröff. Bericht GTN Ingenieure & Geologen, Archiv-Nr. GLA Hamburg: **PHY 051 HOR**: 40 S., 5 Abb., 16 Tab., 9 Anl.; Neubrandenburg.
- LINGNAU, R. (1998): Formation Micro Scanner (FMS) Processing Report. – Unveröff. Bericht Schlumberger GeoQuest Hannover, Reference H30823RL, im Auftrag des GLA Hamburg. – Archiv-Nr. **PHY 051 LIN**; Hamburg (GLA).
- MARTIN, M., HOTH, P. & SEIBT, A. (1997): Kerndurchströmungsversuche zur Ermittlung von Fluid-Matrix-Wechselwirkungen. – In: Geothermische Vereinigung e. V. [Hrsg.]: Geothermie – Energie der Zukunft (Tagungsband); Geeste.
- MEYN, V. & LAJCSAK, I. (1999): Abschlußbericht zum Unterauftrag "Experimentelle Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Gesteinsmatrix und Porenfluid und deren Auswirkung auf die petrophysikalischen Gesteinseigenschaften" des Forschungsvorhabens "Hydraulisches, thermisches und mechanisches Verhalten geothermisch genutzter Aquifere", unveröff., Förderkennzeichen: **0326955D**; Clausthal-Zellerfeld (TU Clausthal, Inst. für Erdöl- und Erdgasforschung).
- NIELSEN, H. (1968): Sulphur isotopes and the formation of evaporite deposit. – In: Proceed. Geol. of saline deposits; Hannover.
- PAPE, H., CLAUSER, C. & IFFLAND, J. (1999a): Zusammenhang zwischen Permeabilität und Porosität bei Aquifer-Sandsteinen auf der Grundlage einer fraktalen Porenraumgeometrie. – In: Geothermische Vereinigung e. V. und Stadtwerke Straubing [Hrsg.]: "Geothermie, Forschung Entwicklung Markt", ca. 500 Seiten. – 5. Geothermische Fachtagung Straubing. – ISBN **3-932 570-14-6**: 305–317; Geeste.
- PAPE, H., CLAUSER, C. & IFFLAND, J. (1999b): Permeability prediction based on fractal pore space geometry. – Geophysics, Vol. **64/5**: 1447–1460, 8 figs., 1 table.
- SCHMITZ, D. (1998): Aufnahme der Kernstrecke der Bohrung Hamburg-Allermöhe 1 mit dem DMT-CoreScanColour. – Unveröff. Bericht der DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH, Essen im Auftrag des GLA Hamburg. – GLA-Archiv-Nr. **PHY 051 GLA**.
- SOKOLOV, V.N. & TCHISTIAKOV, A.A. (1999): Physiko-chemical factors of clay partricle stability and transport in sandstone porous media. – Proceedings of the European Geothermal Conference Basel 1999, Vol. **2**; Neuchatel (University, Centre of Hydrogeology, F.D. VUATAZ).
- TCHISTIAKOV, A. A. (1999): Effect of flow rate and salinity on sandstone permeability. – In: F.D. VUATAZ [Hrsg.]: Proceedings of the European Geothermal Conference Basel 1999, Vol. **2**; Neuchatel (University, Centre of Hydrogeology).
- VOGT, C. (2000): Beeinflussung der Permeabilität von Thermalwasser-Speichergesteinen durch Lösungs-Fällungs-Reaktionen von Anhydrit. – Diplomarbeit; Karlsruhe (Universität, Fakultät für Bio- und Geowissenschaften).
- ZARTH, M. (1999): Results of the Geothermal Energy Project Hamburg-Allermöhe. – In: F.D. VUATAZ [Hrsg.]: Proceedings of the European Geothermal Conference Basel 1999, Vol. **2**; Neuchatel (University, Centre of Hydrogeology).

Eingang des Manuskripts: 25. 7. 2000
Angenommen: 1. 8. 2000