

Anhydritzemente im Rhätsandstein Hamburgs – Morphologie und Strukturen

AXEL BAERMANN¹, JENS KRÖGER², RENATE TAUGS², KARL WÜSTENHAGEN² & MARTIN ZARTH²

Geothermie, Rhät-Sandstein, Norddeutschland

Kurzfassung

Durch eine Vertiefung der Bohrung Allermöhe 1 auf etwa 3 300 m im Südosten Hamburgs wurden Rhät-Sandsteine mit Mächtigkeiten von insgesamt etwa 70 m und Aquifertemperaturen von etwa 125 °C erbohrt. Trotz ausreichender Mächtigkeiten und Temperaturen sind die für eine geothermische Nutzung grundsätzlich in Betracht kommenden Sandsteine des Unter- und Mittelrhät an dieser Stelle für eine wirtschaftliche Nutzung nicht geeignet, weil ihre Porenräume weitgehend mit Anhydrit ausgefüllt sind. Die mit Hilfe der Radiographie erzielten Ergebnisse lassen verschiedene Zementationsformen erkennen: abgesehen von Sandsteinlagen mit einer vollständigen anhydritischen Ausfüllung des Porenraums sind insel- oder wolkenförmige sowie lagenweise Zementationen im Millimeter- bis Zentimeterbereich in möglicherweise zyklischen Abfolgen vorhanden.

[Anhydrite Cement in Rhaetian Sandstone in Southeastern Hamburg – Morphology and Structure]

Abstract

Deepening the drill hole Allermöhe 1 located southeast of the centre of Hamburg to 3.300 m yielded a net thickness of Rhaethic sandstones of about 70 m and an aquifer temperature of about 125 °C. In spite of generally fitting the conditions for use of geothermic energy, the pore spaces of the Lower and Middle Rhaetic sandstone, originally open, at the location were filled by anhydrite to a large extent. Radioscopic examinations show different patterns of anhydrite cementation: besides sandstone layers with pore spaces totally filled with anhydrite also insular or cloudy as well as layered anhydrite cementation up to 15 mm thickness were observed in possibly cyclic sequences.

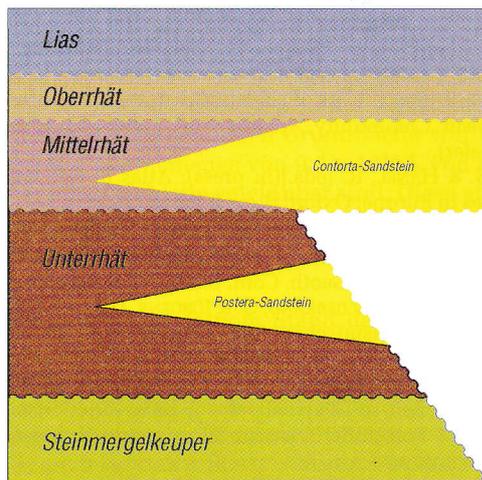


Abb. 1: Diskordanzen im Rhät Norddeutschlands (BEUTLER et al. 1994).

Fig. 1: Discordances in the Rhaetian of northern Germany (BEUTLER et al. 1994).

Geologischer Hintergrund

Im Hamburger Raum steht das Rhät (Oberer Keuper) im Westen des Salzstocks von Reitbrook in einer Teufenlage von ca. 3 220 m an. Das geothermische Potential der Rhät-Sandsteine, insbesondere des Mittelrhät-Hauptsandsteins, wurde hier untersucht, weil aus geologischen Vorerkundungen Temperaturen der Porenwässer von $\pm 100^\circ\text{C}$ und Schichtdicken der Sandsteine von $\pm 40\text{ m}$ prognostiziert worden waren.

Im Unteren Keuper kamen in Norddeutschland marine dolomitische Kalke, dunkle Mergel und teilweise kohleführende Sandsteine zur Ablagerung, die hangend in kontinentale Bildungen mit bunten Feinsand- und Schluffablagerungen übergehen. Auf vergleichsweise weiträumigen flachen Sedimentationsräumen sind Ablagerungen seichter Gewässer infolge kurzzeitiger Transgressionen aus Richtung der Nordsee typisch. Hierbei kam es stellenweise auch zu Gips- und Salzablagerungen (KRÖMMELBEIN 1991). Der zunehmende marine Einfluß im Rhät zeigt sich an der Sedimentation dunkler Tone. In diese sind helle bankige Sandsteine (Fein- bis Mittelsande) und seewärts sich mit den Tonsteinen verzahnende Flasersandsteine (Feinsande) eingeschaltet. Die Sandschüttungen stehen in enger Beziehung zu der später im Zuge der Lias-Ingression langsam nach Osten zurückweichenden Küste und werden als Deltabildungen gedeutet (GAUPP 1991). Dabei haben sich vornehmlich in Rinnen bankige Sandsteine gebildet. Sie zeigen zumeist eine geringe Abnahme der Korngröße zum Hangenden hin.

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

² Geologisches Landesamt Hamburg,
Billstr. 84, 20 539 Hamburg

Zwei Hauptschüttungsrichtungen sind bekannt. Sie sind durch unterschiedliche Schwermineralinhalte charakterisiert (ENGELHARDT 1942, LARSEN & FRIIS 1975): eine Schüttung aus Nordosten und eine aus südöstlicher Richtung vindilizischen Ursprungs (BEUTLER et al. 1994). Es wird vermutet, daß die Rhät-Sandsteine des Hamburger Raums vorwiegend aus nordöstlicher Richtung geschüttet worden sind, obwohl entsprechende Zuordnungen nach den Schwermineralbefunden der bisherigen Untersuchungen noch nicht sicher vorgenommen werden konnten.

Die Mächtigkeiten der Rhät-Sandsteine nehmen nach Osten hin generell zu, z.B. der Unterrhät-Sandstein (Postera-Sandstein) von 20 - 30 m im östlichen Niedersachsen auf etwa 40 m im westlichen Mecklenburg. Der Mittlrhät-Sandstein (Contorta-Sandstein oder Hauptsandstein) weist in Nordwestdeutschland Mächtigkeiten bis zu 60 m auf, stellenweise bis zu 100 m. Die großen Mächtigkeiten sind weitgehend auf die halokinetisch bedingten, lokal sehr unterschiedlich aktiven Senkungsbereiche in der Nachbarschaft von Salzstrukturen beschränkt (BEUTLER et al. 1994). Neben diesen Mächtigkeitsunterschieden erschweren zusätzlich Diskordanzen und Schichtlücken Korrelationen benachbarter Aufschlüsse (Abb. 1).

Durch eine Vertiefung der ehemaligen Erdölbohrung Allermöhe 1 (Titelbild) von 2 178 m auf 3 305 m wurden die Rhät-Sandsteine im Hamburger Raum erneut aufgeschlossen (BEECK et al. 1998). Damit war die Grundlage für eine genauere Beschreibung der lokalen Bedingungen für eine geothermische Nutzung dieses Aquifers geschaffen. Die Bohrung liegt an der Westflanke des Salzstocks von Reitbrook, ihre Lokation ist R 3574093 und H 5926822 (Abb. 2).

Bei der Vertiefung der Bohrung wurden Tonsteine des unteren Dogger β , die liegenden jurassischen Tonsteine und das Rhät bis in die Basis des Postera-Sandsteins erbohrt. Die Lias-/Dogger-Grenze wurde biostratigraphisch bei 2 414 m festgelegt. Die dunklen Lias-Tonsteine gehen zum Liegenden hin allmählich in eine Wechsellagerung hell bis dunkelgrauer Tonsteine und weißlichgrauer Feinsandsteine des obersten Rhät über. Im Teufenbereich des Rhät von 3 111,5 m bis 3 290 m kommen insgesamt vier Sandsteinhorizonte vor: Im Hangenden zwei Feinsandsteinlagen mit Mächtigkeiten von 12 und 8 m und makroskopisch erkennbaren glimmerreichen, bisweilen tonigen Bestegen entlang von Klüften und anderen Trennflächen. Darunter folgen der Contorta- und der Postera-Sandstein (Abb. 1) mit Mächtigkeiten von 24 bzw. 28 m. Der hell- bis weißgraue Contorta-Sandstein ist ein schwach feinsandiger, überwiegend bankig ausgebildeter, aber sonst gut sortierter Mittelsandstein mit geringen Grobsandanteilen. Untergeordnet treten Sandsteinlinsen und Flasersandsteine mit kohlig-tonigen Zwischenlagen, Tonschmitzen und eingeschalteten Tonaggregaten bis zu einer Dicke von 3 cm auf. Im Liegenden des unteren Sandsteinhorizontes wurden dunkel- bis hellgraue und rotbraune Tonsteine des Unterrhät aufgeschlossen. Insgesamt erreichen die Sandsteine eine durch halokinetische Vorgänge beeinflusste Mächtigkeit von 72 m. Halokinetische Prozesse haben wahrscheinlich auch die in der Bohrung festgestellten großen Schichtdicken der Lias-Tonsteine verursacht. Ein Vergleich der Schichtenfolge der Bohrung Allermöhe 1 mit benachbarten Bohrungen (z. B. Bohrung Ramelsloh 2 in der Lüneburger Heide) mit Hilfe von geophysikalischen Vermessungs-Logs steht jedoch zur Zeit noch aus.

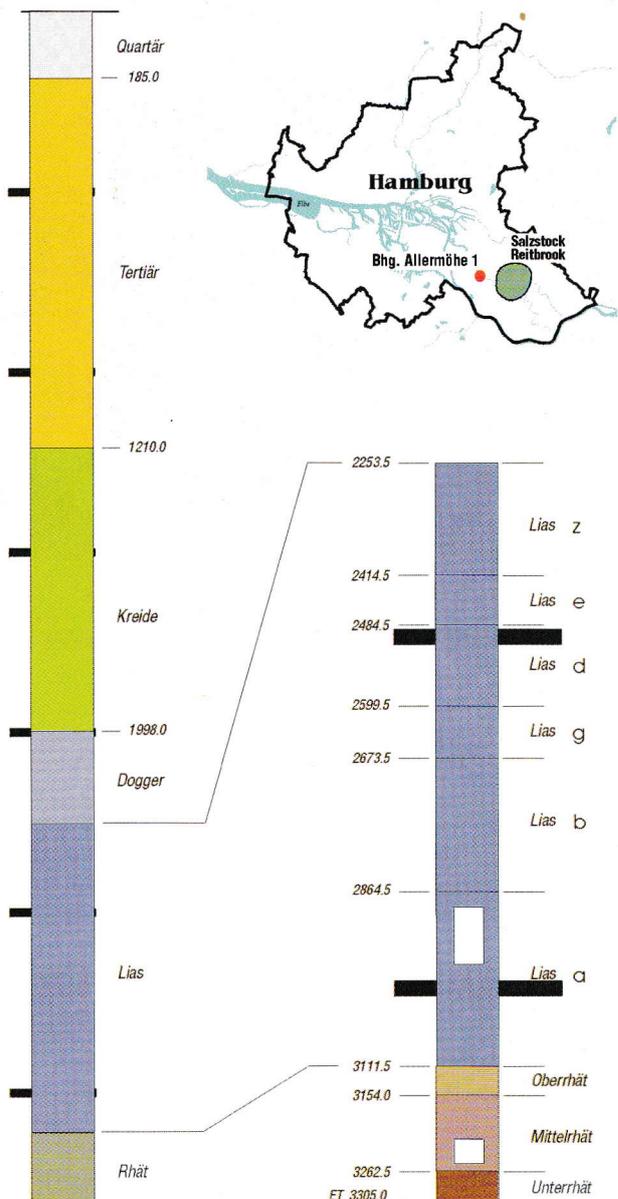


Abb.2: Lage und Schichtenfolge der Bohrung Allermöhe 1 (Kernstrecken: weiß).

Fig. 2: Location and stratigraphic section of the Allermöhe 1 drill hole (cored intervals: white).

Bisherige Untersuchungen

Nach Abschluß der Arbeiten zur Vertiefung der Bohrung Allermöhe 1 wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm begonnen. Es umfaßte Bohrlochvermessungen (wie Eigenpotential-, Widerstands-, Gamma-, Kaliber-, CMR- (Nukleare Magnetische Resonanz) und Temperatur-Log), Pumpversuche, einen Injektionsversuch sowie Untersuchungen an Bohrkernen und Spülproben.

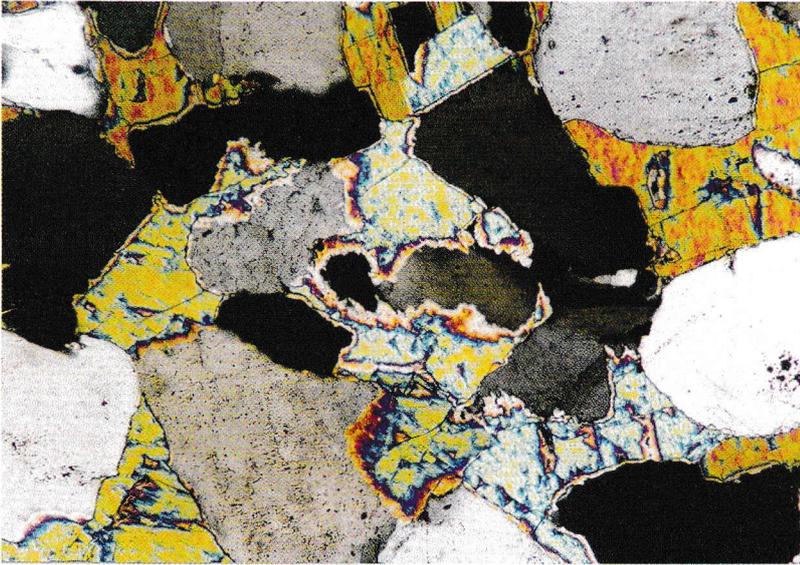


Abb. 3: Dünnschliff-Aufnahme des Contorta-Sandsteins mit sekundärem anhydritischen Bindemittel (Teufe: 3250,84 m, 100 fache Vergrößerung, gekreuzte Nicols). Der Porenraum innerhalb des Quarzkorngerüsts (weiß-grau-schwarz) ist durch sekundäre Anhydritausfällungen (bunte Farben) fast vollständig zementiert.

Fig. 3: Thin section microphotograph showing the Contorta-sandstone with secondary anhydrite cement (depth of core sample: 3250,84 m, magnification x 100, crossed nicols). Pore space between quartz grains (white-grey-black) is nearly totally cemented with secondary anhydrite mineralizations (coloured).

In situ-Untersuchungen

Im Bereich des Contorta-Sandsteins (Teufe: \approx 3 250 m) wurden Temperaturen zwischen 125 und 128 °C gemessen. Daraus ergibt sich ein mittlerer Temperaturgradient von 36 K/km. Aus Dipmetermessungen wurde ein mittleres Einfallen der Schichten von ca. 10° nach Südwesten ermittelt.

Zur Bestimmung der Ergiebigkeit des erbohrten Sandsteins wurden zwei Pumpversuche durchgeführt (Casinglifttests mit einem 3 1/2"-Liftstrang, welcher bis zu einer Teufe von 700 m eingebaut wurde). Bei dem ersten Versuch konnte nur eine Förderleistung von 4 m³/h Sole realisiert werden. Nach diesem Ergebnis wurde eine zweite Bohrlochbefahrung durchgeführt, die zeigte, daß der eingebaute GFK-Liner die Bohrung nicht ordnungsgemäß verrohrt hatte. Der Liner war teilweise abgesichert und hatte weite Bereiche der Sandsteinhorizonte abgedeckt. Vor Beginn des zweiten Pumpversuchs wurde deshalb die Verrohrung im Bereich der unteren beiden Sandsteinbänke auf einer Länge von insgesamt 42 m perforiert. Durch diese Maßnahme konnte die Förderrate bei einer Druckabsenkung von 44 bar zwar auf etwa 8,7 m³/h Sole gesteigert werden, sie blieb aber dennoch weit hinter der für eine wirtschaftliche Nutzung erforderlichen Förderrate von 50 bis 80 m³/h zurück. Der Salzgehalt der geförderterten Sole beträgt etwa 220 g/l.

Die Auswertung des zweiten Pumpversuchs ergab für den Sandstein eine mittlere Permeabilität von etwa 3 mD. Die im Vergleich hierzu mit dem CMR-Log bestimmten Permeabilitäten für den Contorta-Sandstein lagen in derselben Größenordnung. Ähnliche Permeabilitätswerte ergaben sich auch aus den Untersuchungen einiger Bohrkerne. Im Verlauf weiterer Untersuchungen zeigte sich, daß die geringen Permeabilitäten im wesentlichen auf eine partielle oder gesamte vollständige Ausfüllung des ehemaligen Porenraums (Zementation) mit Anhydrit zurückzuführen sind (Abb. 3). Porositätsmessungen an Bohrkerne sowie

aus dem Gamma-Log abgeleitete Porositäten derselben Teufenbereiche liegen im Mittel zwischen 2 und 12 %. Der Porenraum gliedert sich in Fein- (< 0,2 μ m \varnothing), Mittel- (0,2 - 10 μ m \varnothing) und Grobporen (> 10 μ m \varnothing) mit Anteilen von 20, 45 und 35 % am Gesamtporenraum.

Labor-Untersuchungen

Beim Vertiefen der Bohrung Allermöhe 1 wurde neben einer fortlaufenden Bohrgutbeobachtung (je 1 Spülprobe auf 5 m Teufe) in verschiedenen, nach geologischer Bewertung festgelegten Teufenbereichen gekernt (vgl. Abb. 2). Die gewonnenen Bohrkerne haben einen Durchmesser von 65 mm. Um die geologischen Informationen der Bohrung Allermöhe 1 möglichst präzise zu dokumentieren, wurden die Bohrkernoberflächen gescannt (Abb. 4). Durch Zuordnung der digital archivierten Scan-Bilder zu den verschiedenen Bohrloch-Logs konnten die Teufenbereiche der vorhandenen Kernstücke exakt festgelegt werden. Darüber hinaus war eine teilweise Orientierung der Kerne durch eine rechnergestützte Auswertung von Formation-Microscanner-Logs möglich.

Mit Hilfe von Laboruntersuchungen an den Bohrkerne sollen Art, Umfang und Genese der Anhydritzementation erkundet werden. Im folgenden Beitrag von BAERMANN et al. wird über Details der Laboranalytik und über den derzeitigen Stand der Untersuchungen berichtet. Bisher hat sich gezeigt, daß die Zementationsstrukturen allein mit Hilfe von Dünnschliffuntersuchungen nicht hinreichend genau beschrieben werden können. Aus diesem Grund wurden 3 bis 5 mm dicke Sandsteinscheiben geröntgt und die erstellten Radiogramme ausgewertet. Anhand dieser Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, daß der Anhydrit nicht gleichmäßig im Sandstein verteilt ist. Vielmehr wechseln kleinräumig vollständig zementierte Bereiche mit schwach oder gar nicht zementierten Arealen in Form charakteristischer schicht- oder inselförmiger Strukturen ab. Drei verschiedene Grundtypen der Zementation

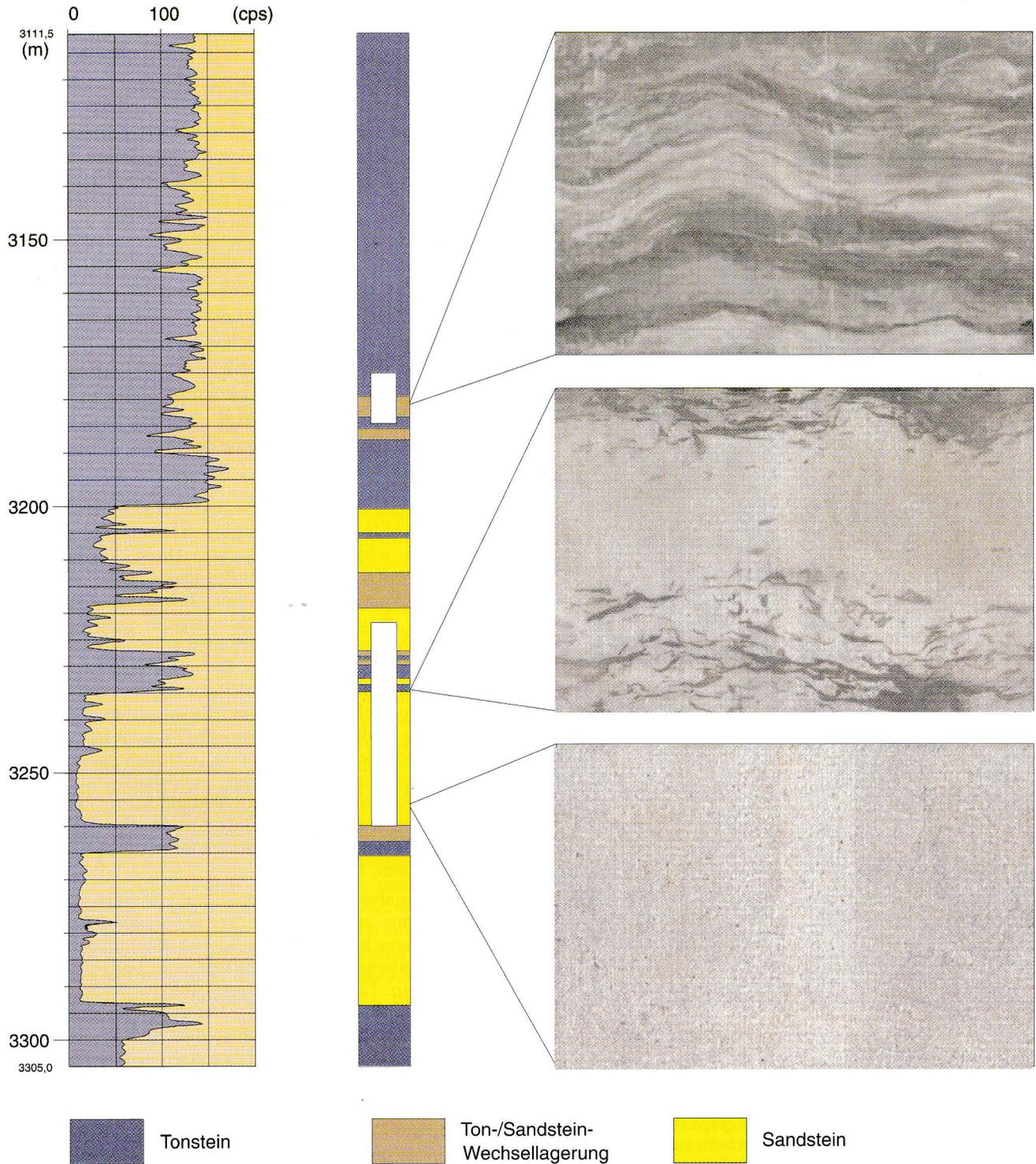


Abb. 4: Gamma-Log und erbohrte Schichtenfolge des Rhät (Kernstrecken: weiß) mit Fotos von gescannten Bohrkernen.

Fotos, von oben nach unten:

- Ton-/Sandstein-Wechsellagerung
(Teufe: 3181,59 - 3281,73 m)
- Sandstein mit Tonbestegen
(Teufe: 3234,31 - 3234,45 m)
- bankiger Sandstein
(Teufe: 3255,05 - 3255,19 m).

Fig. 4: Gamma log and drawing of the drilled Rhaetic stratigraphic column (core intervals: white) with photographs showing examples of scanned drill cores.

Photos from top to bottom:

- alternating layers of shale and sandstone
(depth: 3181,59 - 3281,73 m),
- sandstone with interbedded shale fillings
(depth: 3234,31 - 3234,45 m),
- massively bedded sandstone
(depth: 3255,05 - 3255,19 m).

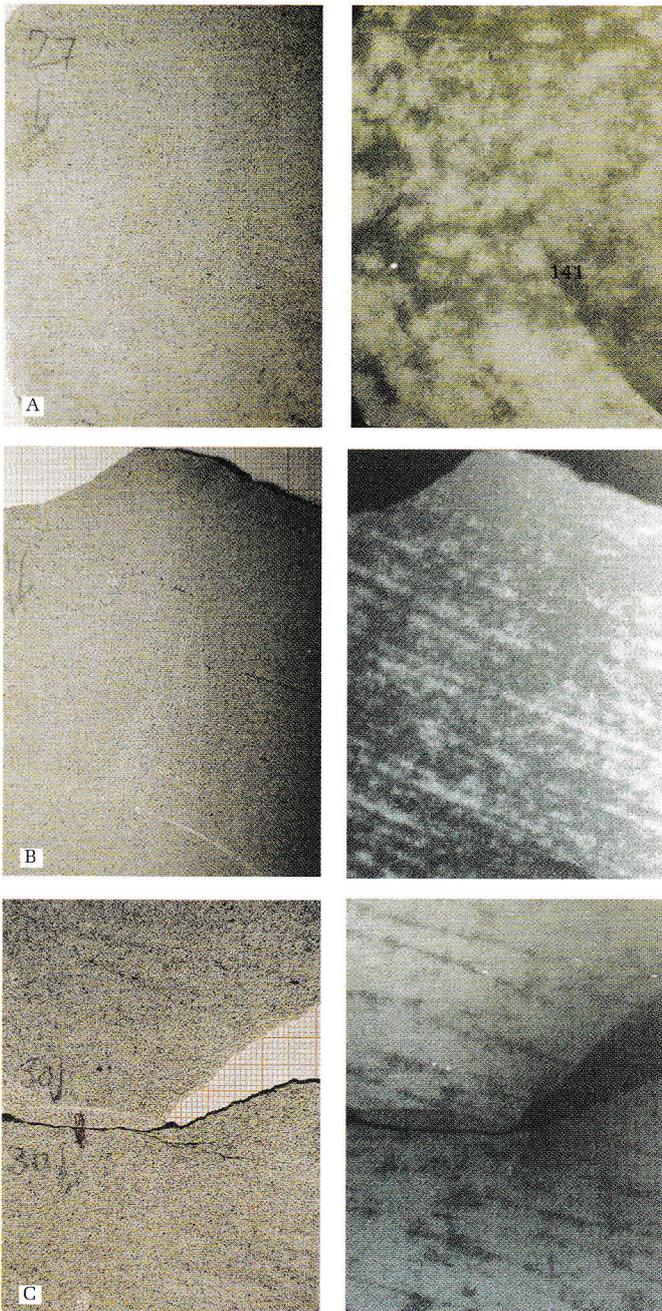


Abb. 5: Anhydritische Zementationsstrukturen (helle Flächen der Radiogramme, rechts im Bild) von Sandsteinscheiben (links im Bild).

Von oben nach unten:

- A inselförmige Anhydritstrukturen (Größe: bis zu 1 mm)
- B lagenweise Anhydritstrukturen (Größe 1 - 15 mm)
- C vollständig ausgefüllter Porenraum.

Fig. 5: Patterns of anhydrite cementation in sandstone core slices (left: core slices, right: photographs of radioscropy, areas with anhydrite cementation are bright).

From top to bottom:

- A insular anhydrite cementation (size: up to 1 millimeter)
- B layered anhydrite cementation (size: 1 - 15 millimeters)
- C pore space totally filled with anhydrite.

konnten bisher beobachtet werden. Fotos und Radiogramme von drei Sandsteinscheiben werden in Abbildung 5 gezeigt. In der Abbildung sind folgende Grundtypen gut zu erkennen:

- A. Insel- oder wolkenförmige Anhydritzementationen:
Inselförmige Zementationen im Sandstein in der Größe bis zu etwa 1 mm; daneben kommen Bereiche mit wolkenförmigen Anhydritzementationen in der Größe 1 - 10 mm vor, die sich teilweise berühren oder sogar durchsetzen.
- B. Lagenweise Anhydritzementationen in Wechsellagerung mit porösem, zementationsfreien Sandstein:
Wechsellagerungen von 1 - 2 mm dicken zementfreien Sandsteinlagen mit bis zu 1 mm dicken dichten, anhydritischen Sandsteinlagen; zum Liegenden wachsen die zementierten Bereiche bis auf eine Dicke von 15 mm an.
- C. Vollständige Ausfüllung des Porenraums mit Anhydrit

Die oben beschriebenen Zementationsformen A - C wurden mit Hilfe der Radiographie in benachbarten Kernbereichen wiederholt gefunden. Diese Regelmäßigkeit könnte mit differenzierten Ausscheidungsabfolgen oder Lösungszuständen zusammenhängen. Zur Zeit ist noch unklar, ob die Zementationsabläufe grundsätzlich in dieser Weise aufeinander folgten oder ob weitere Strukturen wie z.B. vorhandene Trennflächen die beobachtete Ausbildung der anhydritischen Porenraumfüllungen mit verursacht haben. Einen Hinweis hierauf geben vereinzelte steilstehende, kanalartige Zementationsbahnen im Sandstein. Vergleichende polarisationsmikroskopische Untersuchungen haben die beobachteten Zementationsstrukturen bestätigt, wobei allerdings sehr dünne, anhydritisierte Sandsteinlagen nicht oder nicht so eindeutig wie in den Radiogrammen feststellbar sind (BAERMANN, 1999).

Modalanalysen an Dünnschliffen anhydritischer Sandsteine aus verschiedenen Teufen ergaben Anhydritgehalte zwischen 15 bis 50 %. Dabei wurden die hohen Anhydritwerte im wesentlichen in Mittelsandsteinen gefunden. Eine differenzierte Abhängigkeit des Anhydritgehaltes von der Korngröße ist bisher nicht erkennbar, weil andererseits auch stellenweise in den feinkörnigen Flasersandsteinen hohe Anhydritgehalte nachgewiesen werden konnten.

Im Bindemittel der Sandsteine treten neben Quarz und Anhydrit Gesteinsfragmente und Feldspäte bis maximal 5 Vol.-% auf. Tonminerale liegen als Kaolinit und Chlorit vor und erreichen Anteile bis zu 15 Vol.-%. Opake Minerale sind in Form von Sulfiden bis ca. 2 Vol.-% vertreten. Akzessorisch sind Zirkon, Turmalin und Rutil vorhanden. Im Dünnschliff sind Reliktstrukturen von Quarzen erkennbar, die teilweise durch Anhydrit ersetzt wurden. Das ebenfalls ursprünglich vorhandene quarzitisches Bindemittel ist nur noch mit etwa 3 Vol.-% vorhanden. Die erforderlichen SiO_2 -Lösungen kommen möglicherweise aus den hangenden Tonsteinen und sind durch Umwandlung von quell- in nicht quellfähige Tonminerale entstanden.

Karbonatische Bindemittel finden sich nur in den Ton-

stein- bzw. Ton-/Sandsteinlagen des Oberrhät, während die Bindemittel des Contorta- und Postera-Sandsteins karbonatfrei sind. Röntgendiffraktometrische Untersuchungen bestätigen diese Befunde. In den Oberrhätssandsteinen wurden die Karbonatminerale Calcit, Dolomit, Ankerit oder entsprechende Übergangsformen nachgewiesen.

Die Haupt- und Spurenelementzusammensetzung der Sandsteine wurde mit Röntgenfluoreszenz-Analysen untersucht. Hierbei zeigten sich trotz gleicher Anhydrit-Zementationsformen erhebliche Unterschiede im Calcium- und Schwefelgehalt, die durch Schwankungen des Anhydritgehalts innerhalb der entnommenen Proben erklärt werden können. Eisen, Zink sowie Titan sind an die vorhandenen Eisenhydroxide gebunden oder sind in parakristallinen Eisenhäutchen auf den Quarzen miteinander vergesellschaftet. Zusätzlich liefern Titanit und Rutil entsprechende Anteile an Titan und könnten gegebenenfalls als weitere Faziesindikatoren dienen. Der Zirkoniumoxidgehalt aus den Zirkonen beträgt bis zu 0,013 Gew.-%. Die Strontiumwerte erreichen bei hohem CaO-Gehalten (mehr als 12 Gew.-%) etwa 0,1 Gew.-% Sr und nehmen bei einem CaO-Gehalt von 0,9 Gew.-% auf 0,016 Gew.-% ab. Analysen mit der Elektronenstrahlmikrosonde (freundlicherweise von der Universität Hamburg durchgeführte Untersuchungen) zeigen, daß Strontium in den Anhydritkristallen stochastisch verteilt auftritt. Die höchsten Gehalte sind in den inselförmigen Zementationsformen nachgewiesen worden (Typ A, vgl. Abb. 5). Mit größer werdenden Zementationsinseln nehmen sie dagegen anscheinend ab. Teufenabhängige Streuungen liegen in der Größenordnung zwischen 300 und 11 900 mg/kg Sr. Vergleichbare Sr-Verteilungsmuster in den Anhydritkristallen (Sr-Gehalte von 300 bis zu 3 700 mg/kg) zeigen Anhydriteinlagerungen in einer Steinsalzprobe des benachbarten, weiter westlich liegenden Salzstocks Othmarschen/Langfenelde. Offen ist, ob durch diesen Befund das Perm als Lieferant des Anhydrits näher in Betracht gezogen werden muß.

Barium ist mit Hilfe der Röntgenfluoreszenz-Analyse und der LAMMA-Spektroskopie (Massenspektrometrie mit Laser-Ablation) mit 0,01 bzw. 0,06 Gew.-% nachweisbar. Der Bariumgehalt steigt mit abnehmendem Schwefelgehalt an. Da mit höherem Anhydritanteil eigentlich auch der Bariumgehalt ansteigen müßte, ist die genaue Herkunft des Bariums, das ein möglicher Indikator für das Liefergebiet Calciumsulfat-haltiger Lösungen sein kann, noch offen (BAERMANN, 1999).

Ausblick

Mit dem beschriebenen radiographischen Verfahren zur Charakterisierung von Anhydritzementationen in Rhät-Sandsteinen ist eine zerstörungsfreie Untersuchung möglich. Das Verfahren kann bei der Auswahl von Dünnschlifflokationen allein schon deshalb hilfreich sein, weil sich mit ihm größere Gefügestrukturen als mit mikroskopischen Untersuchungen zusammenhängend erfassen lassen. Außerdem werden bei einer Betrachtung des Gesteinsmaterials äußerlich nicht erkennbare Details sichtbar, die dann genauer mit Dünnschliffen untersucht werden können. Um ein dreidimensionales Bild der Anhydritzementationen zu gewinnen, müssen die Strukturen in eng nebeneinander liegenden Ebenen dargestellt werden. Wie zwischenzeitlich durchgeführte Vorversuche ergaben, eignen

sich hierfür besonders röntgentomographische Verfahren.

Die Bestimmung der Herkunft der anhydritischen Porenraumfüllungen (z.B. aus permischen Evaporaten, aus dem im Liegenden vorhandenen Gipsmergelkeuper oder aus Anhydritbildungen im Rhät selbst) ist für die Erkundung der Eignung des Rhätsandsteins als geothermisch nutzbarer Aquifer deshalb erforderlich, weil sonst die Bedingungen der regionalen Verteilung der Zementation nicht erkennbar werden. Bei weiteren Untersuchungen hierzu, z.B. mit Hilfe von Elementverteilungen in den Anhydriten (insbesondere Barium und Strontium) oder durch Bestimmung der radiometrischen Alter (z.B. K/Ar-Datierungen, Isotopenverhältnis $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) kann möglicherweise die Kenntnis der Raumstellung der Zementationsstrukturen zusammen mit dem Gefügebild des Gebirges (Lage der Klufflächen o. ä.) hilfreich sein. Des weiteren könnten sich aus detaillierten Untersuchungen der Zemente Erkenntnisse über Möglichkeiten der technischen Stimulierung der zementierten Sandsteinhorizonte ergeben.

Die Untersuchungsergebnisse sollten mit anderen sedimentpetrographischen, stratigraphischen und faziellen Befunden zur Lösung dieser komplexen Frage zusammenfassend interpretiert werden. Dabei müßte das vorhandene Wissen über die zeitliche Abfolge der beobachteten diagenetischen Veränderungen im Hinblick auf die strukturellen Ausformungen des Untergrundes durch halokinetische Vorgänge in diesem Raum einbezogen werden.

Literatur

- BAERMANN, A. (1999): Mineralogische, geochemische und röntgenographische Charakterisierung von Bohrkernen aus dem Rhät-Sandstein. – Unveröff. Bericht Nr. **G 64-1/99**: 60 S., 10 Anlagen; Hamburg (Umweltbehörde).
- BEECK, H., HORN, H., MENZEL, H., LINKE, G., ZARTH, M. & RÖHLING, H.G. (1998): Ergebnisse der Geothermie Erkundungsbohrung Hamburg-Allermöhe. – 5. Geotherm. Fachtagung, Mai 1998: 256–267; Straubing (Stadtwerke Straubing)
- BEUTLER, G., RÖHLING, H.G., SCHULZ, R. & WERNER, K.H. (1994): Geothermie Nordwestdeutschland – Regionale Untersuchungen von geothermischen Reservaten und Ressourcen in Nordwestdeutschland. – Unveröff. Bericht, Archiv.-Nr. **111758**: 161 S.; Hannover (Inst. für Geowiss. Gemeinschaftsaufg.).
- ENGELHARDT, W. V. (1942): Untersuchungen an den Schwermineralen des norddeutschen Rät. – Öl und Kohle, **38**: 259–265; Berlin.
- GAUPP, R. (1991): Zur Fazies und Diagenese des Mittelrhät-Hauptsandsteines im Gasfeld Thönse. – Nds. Akad. Geowiss., Veröff. **6**: 34–55; Hannover.
- KRÖMMELBEIN, K. (1991): Brinkmanns Abriß der Geologie, Band 2: Historische Geologie: 404 S.; Stuttgart (Enke).
- LARSEN, G. & FRIIS, H. (1975): Triassic heavy mineral associations in Denmark. – Danm.Geol. Unders. Arbob 1974: 33–74; Kopenhagen.

Eingang des Manuskripts: 15. 9. 1999
Angenommen: 2. 12. 1999