

# Ausgliederung von Sulfatgesteinen und deren Qualifizierung in Erdwärmebohrungen – mit der Geophysik auf einer sicheren Spur

Jens Blumtritt, Tobias Heyn, Eduard Scheck  
BLM Gesellschaft für Bohrlochmessungen mbH, Niederlassung München  
muenchen@blm-online.de

## ZUSAMMENFASSUNG

Geophysikalische Bohrlochmessungen zur lithologischen Gliederung von Sedimentgesteinen haben sich in vielfältigen Projekten der letzten Jahrzehnte zur Rohstoff- und Grundwassererkundung bewährt. In der sensiblen Vorgehensweise zur Errichtung von Erdwärmesonden in veränderlichen Sulfatgesteinen bekommen sie seit jüngster Vergangenheit eine neue Bedeutung. Insbesondere die gezielte Ansprache von Gips- und Anhydritschichten, deren Quantifizierung und ihre Abgrenzung von wenig veränderlichen bis, im geotechnischen Sinn, unveränderlichen Gesteinen, stellt eine nicht zu vernachlässigende Qualität in der Planung und Beherrschung von geothermischen Projekten dar.

## 1 EINLEITUNG

Die erfolgreiche Gliederung des Untergrundes hinsichtlich petrographischer, lithologischer sowie lithostratigraphischer Eigenschaften stellt die Basis für weiterführende Betrachtungen und Berechnungen zum Nutzen für verschiedenste Anwendungen dar. Ob direkter Eingriff über Rohstoffgewinnung, Wasserversorgung und Tunnelbau oder indirekter Gewinn von Wärme bleibt dabei nachrangig. Nur die Kenntniss möglicher Wechselwirkungen zwischen erschlossenen Grundwasserstockwerken bzw. veränderlich festen Gesteinen sowie die Lage und Verteilung innerhalb des Untergrundes gibt uns die Sicherheit zur Beherrschung desselben. Im Folgenden wird ein Ansatz zur quantitativen Bestimmung der Gesteinszusammensetzung in destruktiv abgeteufte Bohrungen für Erdwärmesonden mittels geophysikalischer Bohrlochmessungen aufgezeigt.

## 2 MINERALOGISCHER/GEOLOGISCHER HINTERGRUND

Das im Focus dieser Untersuchung stehende Sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) kann in Sedimentgesteinen fein verteilt, in Lagen oder gesteinsbildend vorliegen. Die Unterscheidung von Anhydrit und Gips im Zuge der Kern- oder gar Bohrkleinansprache ist prinzipiell nicht trivial. Das wasserfreie, orthorhombische Calciumsulfat (Anhydrit) ist transparent und farblos, bei feinkristalliner Ausbildung im gewachsenen Gebirge in der Regel weiß. Durch Verunreinigungen (z. B. durch Tonminerale) kann er aber auch bräunliche, rötliche, bläuliche oder

violette Färbungen annehmen. Die Strichfarbe ist dabei immer weiß, die Mohs'sche Härte liegt zwischen 3 - 3,5, die Dichte bei  $2,95 \text{ g/cm}^3$ . Während die Kristallflächen einen glasartigen Glanz besitzen, so haben körnige bzw. spätierte Aggregate vielmehr einen stumpfen Perlmutt- bis Fettglanz. Der Bruch (z. B. im Bohrklein) ist bei guter Spaltbarkeit splittrig, uneben und spröde. Das wasserhaltige, monokline Sulfat (Gips) ähnelt in vielen Eigenschaften, wie Farbe, Strichfarbe und Glanz jenen des Anhydrits. So fallen im Feld allenfalls die prismatischen bis nadeligen Aggregate insbesondere in dünnen Gipslagen und gegebenenfalls die reduzierte Mohs'sche Härte von 2 auf, die gegenüber dem Anhydrit reduzierte Dichte von  $2,32 \text{ g/cm}^3$  schon nicht mehr. Diese im petrophysikalischen Sinne relevanten Parameter wie Dichte, Porosität und Tongehalt sind über die Feldbeobachtungen allein nicht zu bestimmen. Gerade hier stellt sich aber die Weiche für die Charakterisierung als unbedenkliches oder potentiell problematisches Gestein. Auch wenn bei kurzfristiger Feuchtigkeitseinwirkung ein reiner Anhydrit kein Wasser aufnimmt, so ändert sich sein Verhalten bei anhaltender Wasserlagerung dahingehend, dass Wasser in das Kristallgerüst des  $\text{CaSO}_4$  eindringen kann und sich dieses in  $\text{Ca}[\text{SO}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , also in Gips, umwandelt. Bei diesem Vorgang kommt es zu einer Volumenzunahme bis zu 50 %, einhergehend mit einem enormen Quelldruck. Der ursprüngliche Gesteinsverband kann, in Analogie zur Halokinese, durch diesen auflockernden und verformenden Prozess nachhaltig verändert werden. An der Erdoberfläche, aber auch im Bereich der oberflächennahen Geothermie ist dieser Umwandlungsprozess irreversibel und hängt in seiner Intensität nicht nur von der Anwesenheit von Anhydrit

und einer Wasserquelle ab, sondern auch von verschiedensten Eigenschaften des anhydrithaltigen Gesteins ab. Denn nicht nur die Sulfatanteile des Gebirges können eine Wasseraufnahme erfahren, sondern auch Tonminerale, deren Kristallgerüst durch Hydratation aufgebrochen und verändert wird.



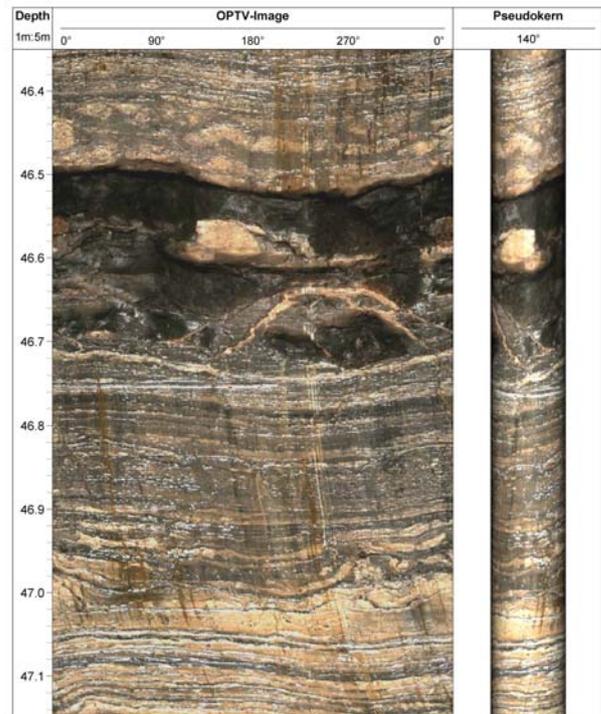
**Abb. 1:** Bohrkernfotos einer Bohrung aus dem Unteren Gipskeuper in Württemberg. Weiße, massige bis dünnbankige, sulfatische Lagen in grauem bis rotbraunem Tonstein

Zu den besonderen Eigenschaften von Anhydrit gehört seine potenzielle Quellfähigkeit bei Wasserkontakt, insbesondere dann, wenn eine Wechsellagerung bzw. eine Mischung von Tonstein und Anhydrit vorliegt. Im gewachsenen Gebirge sind die Quellbeträge, aber auch die damit verbundenen Quelldrücke, sehr variabel. Mancherorts ist die beobachtete Quellung marginal, andernorts erreicht sie, wie drastische Beispiele aus der jüngeren Vergangenheit zeigen, erhebliche Ausmaße. Reiner Anhydrit zeigt ein nur untergeordnetes Quellvermögen. Liegt jedoch ein Anhydrit / Tonstein-Gemisch vor, so kann die Quellfähigkeit dieses Gebirges in hohem Maße steigen, insbesondere bei Anwesenheit bestimmter, quellfähiger Tonminerale wie Corrensit oder Smektit.

Anhydrit bzw. anhydritführende Gesteine haben eine für geothermische Belange positive (z. B. eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit von 5.4 W/mK) aber auch die beschriebenen

unerwünschten felsmechanischen Eigenschaften. Daneben finden sich derartige Gesteinszusammensetzungen in vielen, dicht besiedelten und struktur-

starken Regionen Süd-West Deutschlands und der benachbarten Schweiz, wo geothermische Nutzung oberflächennaher Formationen im Focus öffentlicher und privater Energieinteressen steht.



**Abb. 2:** Hochauflösende Scanneraufnahme einer Bohrung im Gipskeuper in Württemberg. Dünnbankiger Wechsel heller, sulfatischer und dunkler toniger Lagen

Beim Erschließen der Geothermie über die dafür notwendigen Bohrungen sind besonders jene Sulfatgesteine von Interesse, die mit einem Gehalt von 5 bis 25 Gew.% an quellfähigen Tonmineralen vergesellschaftet sind, da sich diese Kombination als besonders problematisch erwiesen haben. Bei Sulfatgesteinen verursacht letztlich die Hydratation die starken Drücke, wodurch die sulfatbedingten Quellerscheinungen auf den Gebirgsbereich unterhalb des Anhydritspiegels beschränkt sind. Dort, wo der Anhydrit bereits vollständig in Gips umgewandelt wurde, treten demnach keine gebirgshebenden Umwandlungsdrücke mehr auf. Gleiches gilt auch für wassergesättigte und damit nicht mehr quellfähige Tonsteine.

### 3 GEOPHYSIKALISCHER MODELLANSATZ

Mit Hilfe geophysikalischer Methoden ist es prinzipiell möglich, auch ohne durchgängige Beprobung und aufwändiger petrochemischer Analyse die Gehalte von gesteinsbildenden Komponenten in Sedimentgesteinen in Situ zu bestimmen. Die Voraussetzung für eine solche deterministische Interpretation bildet ein abgestimmtes Messprogramm, dessen Einzelergebnisse in mehreren Berechnungsschritten miteinander in Beziehung gesetzt werden und im Ergebnis eine Mehrkomponentenaussage erlaubt. Die Berechnungen

basieren auf petrophysikalischen Modellansätzen für porenwasserführende Sedimentite und deren Porositätswerte, die zuvor mit mehreren unabhängigen Messverfahren bestimmt wird.



Abb. 3: Standard-Porositätsmodell, nach Prammer et al., 1996

Das allgemeine, auch dieser Berechnung zugrunde liegende Gesteinsmodell beinhaltet, im petrophysikalischen Sinn, drei Bestandteile, die ein Sedimentgestein aufbauen. Diese sind effektive Porosität, Tongehalt und Matrixkomponenten (vgl. Abb.1). Die effektive Porosität (in den Poren frei bewegliches Wasser + kapillar gebundenes Wasser) berechnet sich aus der Gesamtporosität minus der Tonporosität (tongebundenes Wasser). Erstere wurde mit den Messverfahren Gamma-Gamma Dichte (GG.D), Neutron-Neutron (NN) und Full-Wave-Sonic (FWS) unabhängig voneinander bestimmt. Der Tongehalt lässt sich sowohl aus der Gamma Ray Messung (GR) als auch aus den NN- und FWS-Logs ermitteln. Von den nun übrig bleibenden Matrixkomponenten ist vorerst nur deren Gesamtanteil als Differenz von Tongehalt / Porosität zu 100 % Gesamtbestandteil eines Gesteins bekannt. Das für diese Messkampagne angestrebte Ziel einer qualitativen und auch quantitativen Matrixkomponentenbestimmung bedarf einer sehr komplexen Berechnung. Es wird dabei ein Verfahren angewandt, das bei Eliminierung des Porositätseinflusses eine Ansprache von Gesteinsbestandteilen erlaubt. Die qualitative Ansprache, also die lithologische Einteilung der Gesteine erfolgt über berechnete Hilfsgrößen (M, N) auf Basis ausgewählter widerstandsunabhängiger Porositätsverfahren (GG.D, NN, FWS), die gegeneinander in einem sog. M - N Crossplot (Litho-Porosity Crossplot) (vgl. Abb.2) aufgetragen charakteristische Positionen von Punktwolken ergeben, die wiederum bestimmten Komponenten (Ton, Anhydrit, Gips, Dolomit, Kalkstein und Quarz) zugeordnet werden können.

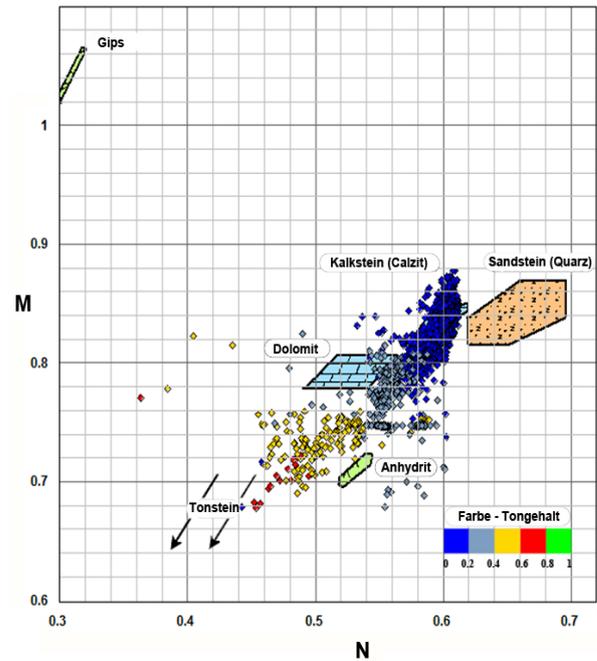


Abb. 4: M - N Crossplot einer ausgewählten EWS-Bohrung

Die Hilfsgrößen (M, N) können einfach nach folgenden Formeln berechnet werden

$$M = \frac{DT_w - DT}{\rho - \rho_w} \cdot 0,01$$

$$N = \frac{(\Phi_{NN})_w - \Phi_{NN}}{\rho - \rho_w}$$

- DT = Differenzlaufzeit in Wasser
- DT<sub>w</sub> = Differenzlaufzeit aus FWS
- ρ = gemessene Gesteinsdichte aus GG.D
- ρ<sub>w</sub> = GG-Dichte des Schichtwassers
- Φ<sub>NN</sub> = gemessene Neutron-Neutron Porosität
- (Φ<sub>NN</sub>)<sub>w</sub> = Neutron-Neutron Porosität in Wasser = 1

Die quantitative Ermittlung der einzelnen Gesteinsbestandteile wird über die Lösung eines Gleichungssystems angestrebt. Abhängig von der Anzahl der zu ermittelnden Komponenten ergibt sich ein Gleichungssystem mit bis zu vier Unbekannten. Nach Auflösung des Gleichungssystems lassen sich aus den Messwerten und den bekannten petrophysikalischen Gesteinsparametern (Matrixwerte im porenfreien Gestein) die gesuchten Volumenanteile der in der Gleichung beteiligten Komponenten berechnen. In den vorliegenden Fällen werden neben dem Tongehalt die Matrixkomponenten Karbonat (Kalk-/Dolomitstein), Anhydrit, Gips und der wassergefüllte Porenraum bestimmt. Treten in einer Bohrung umfassende lithologische Wechsel auf, so muss das zugrunde liegende Matrixmodell mit allen Gesteinsparametern, auch abschnittsweise, gewechselt werden. Die Wahl der im zu untersuchenden Abschnitt

zutreffenden Matrixparameter ist entscheidend für das Ergebnis des Gleichungssystems. Bei Unsicherheiten in der Wahl dieser Parameter wird das Modell inkonsistent und hat Fehler in den Gehaltsbestimmungen zur Folge. Somit sind grobe lithologische und/oder stratigraphische Vorinformationen über die Messabschnitte besonders wichtig. Zur Überprüfung der Plausibilität und Fehleranfälligkeit können in einem zusätzlichen Bearbeitungsschritt Rückrechnungen der Ergebnisse auf synthetische Messkurven erfolgen.

#### 4 PRAKTISCHE UMSETZUNG IN AUSGEWÄHLTEN EWS-BOHRUNGEN

Zur praktischen Verifizierung des geophysikalischen Modellansatzes wurden 3, in die geologische Formation des Gipskeupers abgeteufte EWS-Bohrungen beispielhaft ausgewählt. An den Bohrungen erfolgte mittels detaillierter Bohrkleinaufnahme die Dokumentation des geologischen Profils. Zur Evaluierung der geophysikalischen Daten erfolgten ergänzend, an ausgewählten Profilabschnitten, Gesteinsprobenahmen, deren mineralogische Zusammensetzung mittels Röntgendiffraktometrie bestimmt wurde. Durch diese Untersuchungsmethode konnte quantitativ der Gehalt von Gips und/oder Anhydrit, aber auch der quellfähigen Tonminerale und weiteren mineralogische Komponenten bestimmt werden. Anschließend wurden die Ergebnisse den geophysikalischen Resultaten gegenübergestellt (vgl. Abb.3).

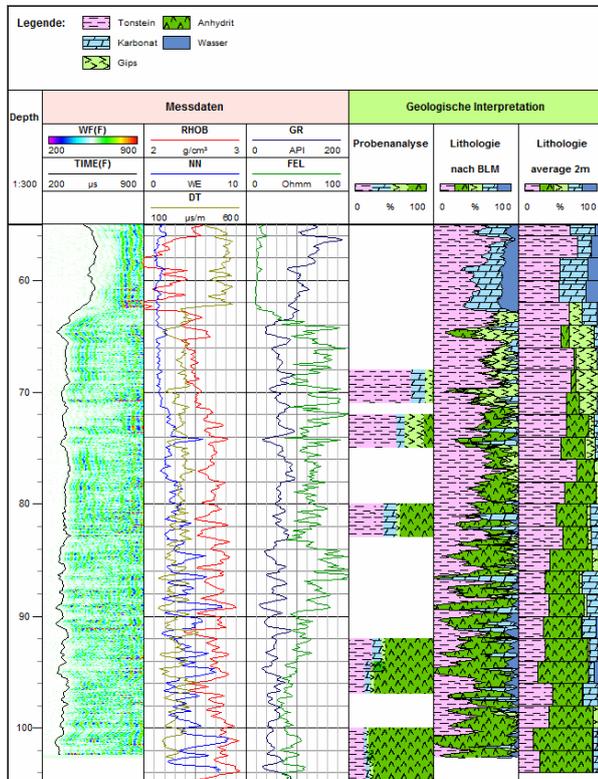


Abb. 5: Gegenüberstellung der Ergebnisse der XRD-Analyse und der geophysikalischen Auswertung einer EWS-Bohrung

#### 5 GEOPHYSIKALISCHE INTERPRETATION

In Abb. 6 sind für die im Fokus stehenden Sulfathorizonte Rückrechnungen auf Basis der berechneten Komponentenanalyse über das zugrunde liegende Matrixmodell hin zum Messwert dargestellt.

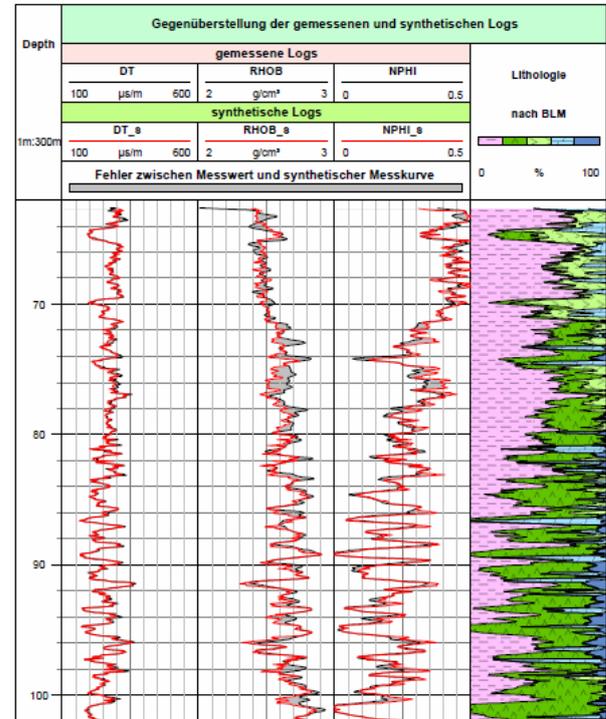


Abb. 1: Gegenüberstellung der gemessenen und synthetischen Logs am Beispiel einer ausgewählten EWS-Bohrung

Dass ein solches System der komplexen Mehrkomponentenberechnung hier sehr gut anwendbar ist, zeigt sowohl der Vergleich der originalen und rückgerechneten Messwerte, als auch die überwiegende Übereinstimmung dieser petrophysikalischen Komponentenanalyse mit den Ergebnissen der vorliegenden Probenanalysen.

#### 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Mehrkomponenten-Analysen zu den geophysikalischen Messungen in ausgewählten EWS- Bohrungen erlauben es neben qualitativen Gesteins-ansprachen auch quantitative Aussagen über die Gehalte von gesteinsbildenden Komponenten zu treffen. Dadurch wurde die Untersuchung der gesamten geologischen Abfolge in situ, also kontinuierlich und direkt entlang der gesamten Bohrlochstrecke möglich. Wie sich gezeigt hat, sind die zugrunde liegenden Berechnungen, basierend auf petrophysikalischen Modellen, durchaus in der Lage, die im Zuge dieser Ausarbeitung besonders betrachtete Sulfatzone lithologisch aufzubereiten. So ist es gelungen, die Trennung von Gips und Anhydrit zu vollziehen und anhand der berechneten Gehalte den Gips/Anhydritspiegel bzw. deren Kernzonen zu bestimmen. Die Geophysik bietet mit ca. 30 cm ein höheres vertikales Auflösungsvermögen als eine Pro-

benanalyse oder Cuttingansprache, muss aber bei geringmächtigen und engständigen Schichtwechseln davon ausgehen, dass ebenfalls integrierte Schichtwerte entstehen.

#### **LITERATUR**

- [I] S. FRICKE & J. SCHÖN (1999): Praktische Bohrlochgeophysik, ENKE
- [II] P. SCHLEGEL (2013): Compositional Analysis of Gipskeuper Deposits from Geophysical Borehole Logs in Geothermal Projects, MSc Thesis, Zürich
- [III] T. HEYN & E. SCHECK (2012): Kurzbericht zu den geophysikalischen Bohrlochmessungen Erdwärmesondenbohrungen Frick-1, Frick-2 (Rampart) und Gansingen-1. Unpublished report.
- [IV] M. EBERHARD, O. SACHS, ET AL. (2012): Grundlagenstudie zur Erstellung einer geotechnischen Wegleitung für EWS- Bohrungen mit potenziell gips- und anhydrithaltigen Gesteinen – geophysikalische und mineralogische Untersuchungen an drei oberflächennahen Bohrungen in sulfathaltigen Keupergesteinen. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- [V] K.-N. LUX, K. BAUMANN, J. BLUMTRITT, W. BECK (2012): Geothermie und Schutz des Grundwassers – ein Widerspruch? bbr 10/2012, Bonn.