

Bohrlochgeophysikalische Aufschlussmessungen – ein Schaufenster in die Tiefe

Bohrlochgeophysikalische Aufschlussmessungen gehören seit jeher zu den grundlegenden Aufgabenbereichen der Bohrlochgeophysik. Eine Vielzahl der zur Verfügung stehenden Messverfahren liefern hierbei Aussagen zu Lithologie, Stratigrafie, Porosität, Porenwassermineralisation oder hydrodynamischen und hydrochemischen Verhältnissen im Untergrund. Somit unterstützt die bohrlochgeophysikalische Aufschlussmessung die Erkundung des Untergrundes beispielsweise im Vorfeld einer baulichen Maßnahme – wie dem Errichten einer Grundwassermessstelle oder eines Brunnens. Beschrieben werden Aufschlussmessungen mit variierenden Zielstellungen und unterschiedlichen Randbedingungen.



Abb.: Bohrlochmessung - Storkow GmbH, A. Tursch

Im Jahr 1869 führte Lord Kelvin erstmals Temperaturmessungen in einem Bohrloch durch. Dies kann man schlechthin als Geburtsstunde der Bohrlochgeophysik begreifen. Eine erste elektrische Messung mit einem Einelektrodengerät folgte 1926 durch H. Hunkel, der hiermit Laugenzuflüsse in Kalibohrungen erfolgreich nachweisen konnte.

Ein neues Kapitel begann zweifellos, als Conrad Schlumberger 1927 geoelektrische Oberflächenmessprinzipien (WENNER-Anordnung) ins Bohrloch verlagerte [1]. Sein erster Versuch in der Erdölbohrung Pechelbronn war sofort von Erfolg gekrönt und eröffnete erstmals einen Weg, den lithologischen Aufbau des Gebirges mittels Bohrlochgeophysik zu untersuchen. Seit diesem Tag war eine fortschreitende Entwicklung der Bohrlochgeophysik nicht mehr aufzuhalten. Es wurden neue Messprinzipien und -verfahren entwickelt, deren Ziel es ist, immer mehr Licht ins Dunkel hinter dem Bohrmeißel zu bringen. Die Untersuchung von Aufschlussbohrungen gehört dabei von Anfang an zu den grundlegenden Aufgaben der Bohrlochgeophysik.

Sinn und Zweck von Aufschlussbohrungen

Mit dem Wort „Aufschluss“ bezeichnet der Geologe eine Stelle der Erdoberfläche, an welcher ursprünglich verdecktes Gestein zutage tritt. Dies kann natürliche Ursachen haben oder vom Menschen erzeugt werden. Im Bergbau werden mit dem Begriff „Aufschluss“ ganz allgemein alle Schritte zur Erschließung einer Lagerstätte zusammengefasst. Entsprechend unterstützt die Aufschlussbohrung die Erkundung des Untergrundes beispielsweise im Vorfeld einer baulichen Maßnahme wie dem Errichten eines Brunnens. Sie dient dem Zweck, die verschiedensten Gegebenheiten des anstehenden Gebirges (lithologische Schichtenfolge, Alter der geologischen Formation etc.) zu erfassen und zu bewerten.

Bohrlochgeophysik – kurz und knapp

Prinzip der Bohrlochgeophysik ist es, physikalische Messsignale als Funktion der Tiefe aufzunehmen, zu speichern und anschließend als sogenanntes Log grafisch darzustellen. Dabei werden verschiedenste petrophysikalische Eigenschaften in situ im Bohrloch registriert, ohne dass beispielsweise aufwendig eine Kernbohrung abgeteuft werden muss. Entsprechend der registrierten Logs ist es im Anschluss möglich, zum einen Aussagen zur

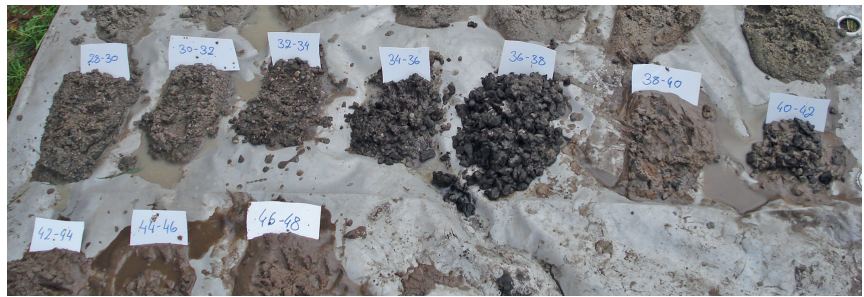


Abb. 1 – Auslage von Bohrproben

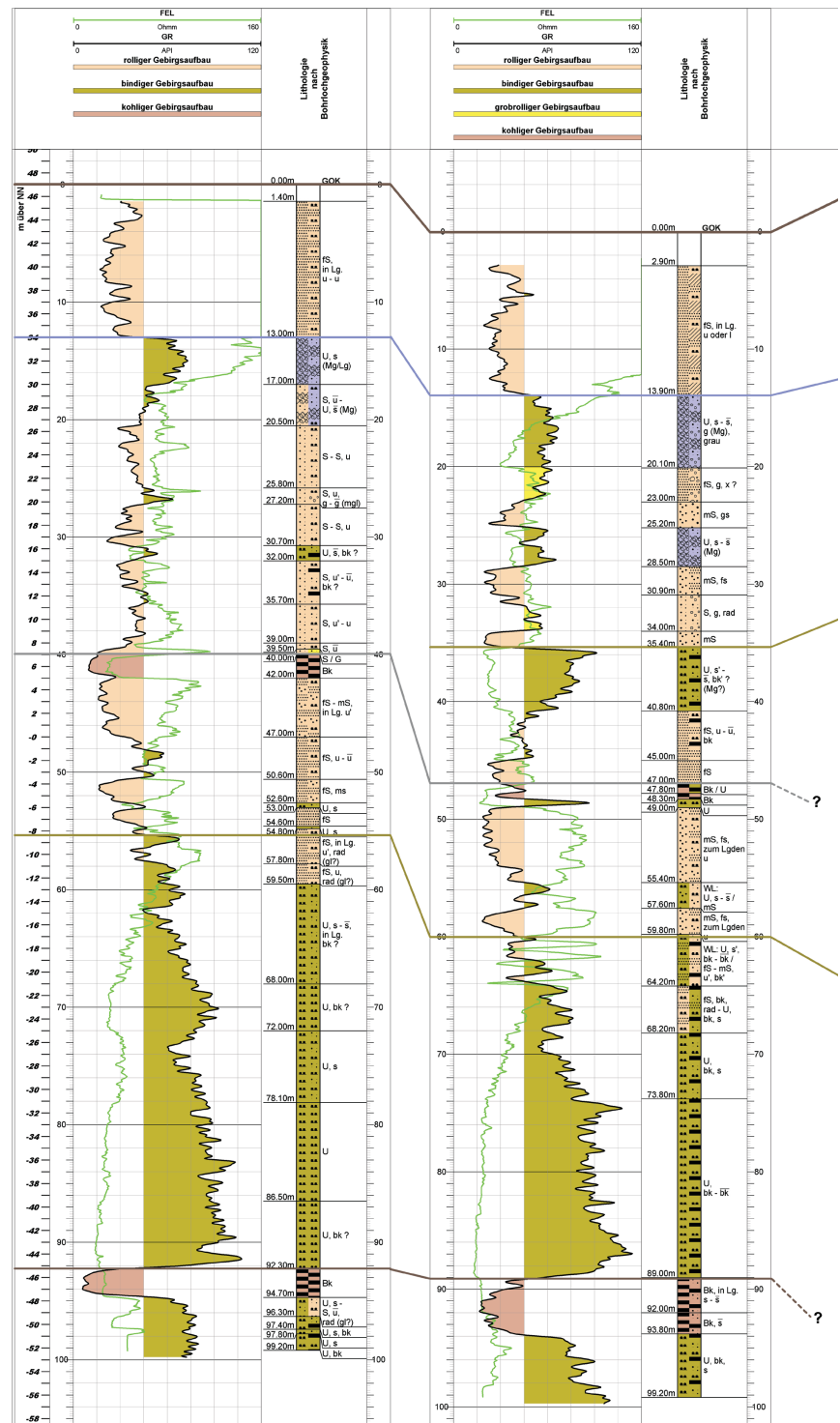


Abb. 2 – Ausschnitt eines Korrelationsplots von insgesamt vier Erdwärmehohrungen, hier zu sehen Bohrung 1 und 2

Bohrung zu treffen (die zum Teil auch als Korrekturgrößen für andere Messungen dienen):

- Zustand Bohrlochwand,
- Bohrdurchmesser,
- Bohrlochverlauf (Neigung, Neigungsrichtung),
- elektrische Leitfähigkeit und Temperatur der Spülung,

und zum andern Informationen zum anstehenden Gebirge zu erhalten:

- Lithologie,
- Stratigraphie,
- Erfassung von Trennflächen (Schichtung, Klüftung),
- Porenwassermineralisation,
- Porosität,
- Wassersättigung,
- Hydrodynamik.

Als übliche Messverfahren dienen sowohl in offenen Lockergesteins- als auch in unverrohrten Festgesteinsbohrungen das Kaliber-Log (CAL), elektrische Messungen wie Elektro-Log (Große/Kleine Normale) (EL-GN/-KN), Fokussiertes Elektro-Log (FEL) und Induktions-Log (IL) sowie die radiometrischen Messungen Gamma-Ray-Log (GR), Neutron-Neutron-Log (NN) und Gamma-Gamma-Dichte-Log (GG.D) [2]. Zusätzlich wird zumeist als hilfreiche Korrekturgröße die elektrische Leitfähigkeit (SAL) und Temperatur (TEMP) der Spülung registriert. Für die Erfassung des Bohrlochverlaufs steht das Bohrlochverlaufs-Log (BA) zur Verfügung, welches Neigung und Richtung der Bohrung kontinuierlich aufzeichnet.

In offenen Festgesteinsbohrungen ist mittels Optischem und/oder Akustischem Bohrlochscanner (OBI/ABI) eine detailgenaue Abbildung der Bohrlochwand als Grundlage für die Trennflächenanalyse möglich. Des Weiteren kann ebenfalls im Festgestein die Hydrodynamik im Bohrloch (z. B. eigenständige Wasserbewegungen ohne Anregung) mittels Impellerflowmeter-Log (FLOW) oder Tracer-Fluid-Logging (TFL) erkundet werden. Auch hydrochemische Parameter können erfasst werden (MIL).

In Tabelle 1 sind entsprechend verschiedener Aufgabenstellungen die notwendigen Messverfahren für offene Lockergesteins- und Festgesteinsbohrungen zusammengefasst.

Der Bohrdurchmesser der Aufschlussbohrung sollte für optimale bohrlochgeophysikalische Messbedingungen nicht größer als ~ 300 mm gewählt werden. Für eine Erkundungsbohrung ist ein Durchmesser

Tabelle 1 – Messverfahren zur Erkundung offener Lockergesteins- und Festgesteinsbohrungen unter Berücksichtigung verschiedener Erkundungsziele

Aufgabenstellung	Messverfahren	
	Lockergesteinsbohrungen	Festgesteinsbohrungen
Bohrlochgeometrie	CAL, BA	CAL, BA
einfache lithologische Schichtenfolge (nur eingeschränkt zuverlässig, z. B. bei gammaaktiven Sanden, Versalzung des Grundwassers oder organischen Bestandteilen (z. B. Kohle und Torf) nur bedingt einsetzbar)	CAL, GR, FEL EL oder IL	CAL, GR, SP, FEL EL
detaillierte lithologische Schichtenfolge, Berechnung der Schichtwassermineralisation, Composit-Plot	CAL, GR, FEL, EL oder IL, SAL/TEMP GG.D, NN	CAL, GR, SGR, SP, FEL, EL oder IL, SAL/TEMP, GG.D, NN, FWS
Klüftung, Schichtung, Schichteinfallen und -streichen	–	CAL, BA, OBI, AB
Zuflussermittlung	–	CAL, FLOW, TFL, SAL/TEMP
Wasserzuflüsse mit variierendem Chemismus	–	MIL, SAL/TEMP

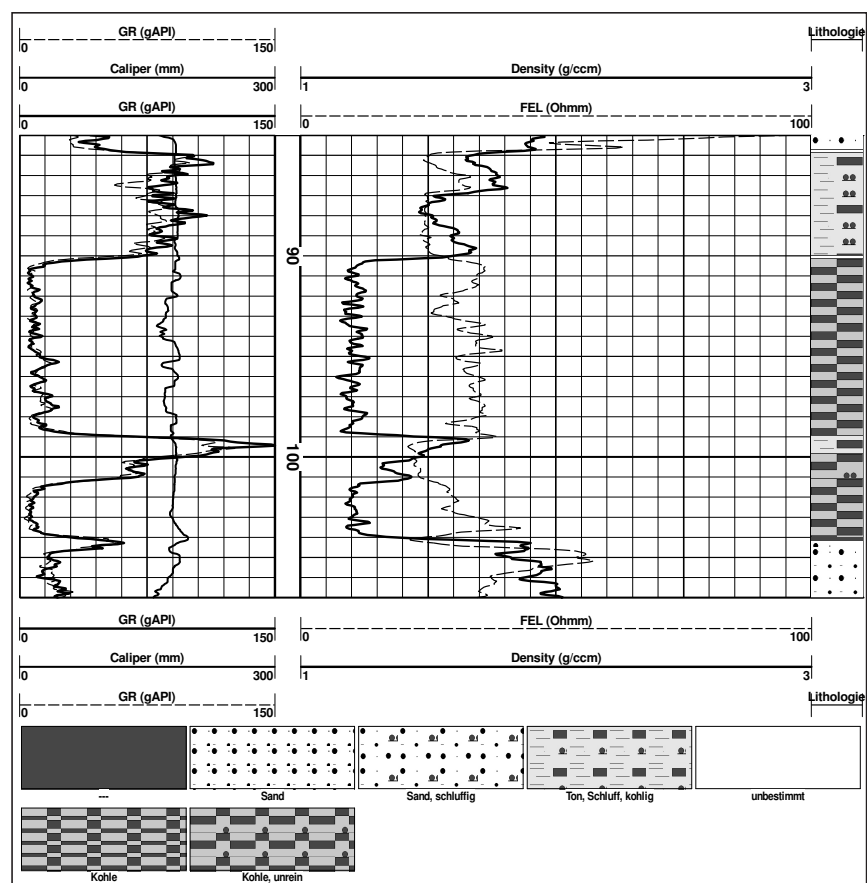


Abb. 3 – Feldplot einer Aufschlussmessung in der Lausitz mit maschineller Vor-Ort-Interpretation (Litho-Log)

von 160 bis 180 mm optimal, da mit zunehmendem Kaliber die Sensitivität der Bohrlochmesssonden abnimmt. Für den Bau von Grundwassermessstellen und Brunnen ist es demnach zu empfehlen, zur Festlegung der Filterposition und der Ringraum-

abdichtungen zunächst eine kleinkalibrige Erkundungsbohrung abzuteufen und diese im Anschluss an die Untersuchungen für den endgültigen Ausbau aufzuweiten.

Durch die Verwendung entsprechender Bohrspülungen muss gewährleistet wer-

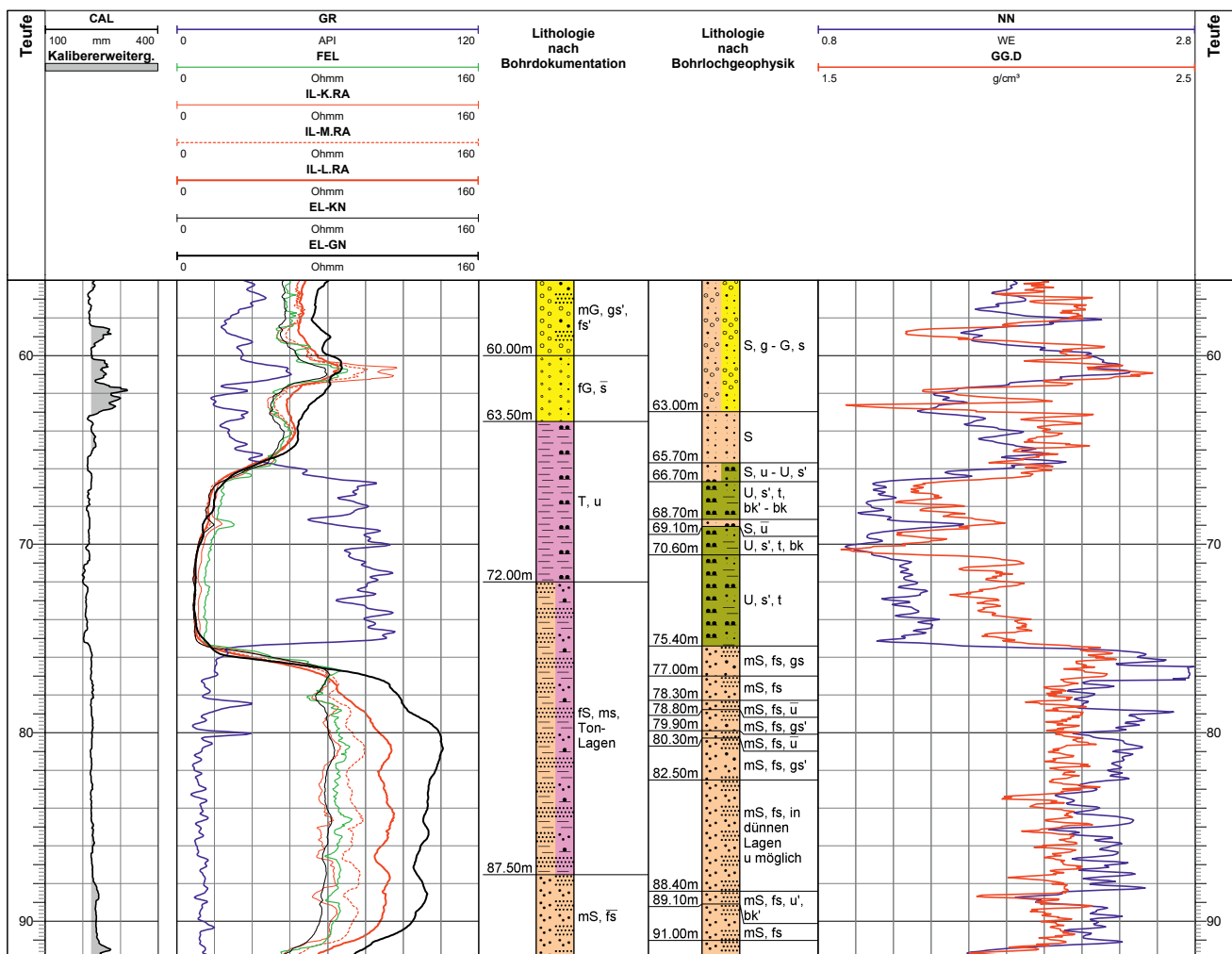


Abb. 4 – Aufschlussbohrung im Lockergestein im norddeutschen Raum

den, dass die Bohrung standfest ist. Zu beachten ist jedoch auch, dass Spülmittelzusätze bohrlochgeophysikalische Messungen verfälschen können, wie z. B. die Widerstandsmessung des Gebirges bei hoch leitfähigen Spülungen oder auch die Dichtemessung durch den Zusatz von Schwerepat zur Bohrspülung. Bei Festgesteinsbohrungen mit hydrodynamischem Erkundungsziel muss das Bohrloch vor Durchführung der bohrlochgeophysikalischen Messungen klargespült werden, um eine optimale hydraulische Anbindung an das Gebirge zu gewährleisten.

Letztlich sollten für eine exakte Interpretation der bohrlochgeophysikalischen Messdaten ein durch den Bohrmeister gewissenhaft erstelltes Bohrschichtenverzeichnis sowie eine Dokumentation des

Bohrvorganges zur Verfügung gestellt werden. Abbildung 1 zeigt eine Bohrproben-Auslage, welche die Grundlage für die Erstellung des Bohrschichtenverzeichnisses darstellt.

Messbeispiele

Im Folgenden werden bohrlochgeophysikalische Aufschlussmessungen mit unterschiedlichen Zielstellungen und unter verschiedenen Randbedingungen beschrieben.

Erdwärmeforschung: Aufschlussmessung mit Minimalprogramm

Erdwärmeforschungen müssen in mehreren Bundesländern Deutschlands vor Einbringen der Erdwärmesonden bohrlochgeophysikalisch untersucht werden. Ziel

ist die Verifizierung des Bohrschichtenverzeichnisses. Um Zeit- und Kostenaufwand möglichst gering zu halten, kommt hier in der Regel nur ein sehr einfaches Messprogramm, bestehend aus einer Widerstandsmessung (in der Regel Fokussiertes Elektro-Log oder Induktions-Log) und einer Gamma-Ray-Messung, zum Einsatz. Beide Messverfahren können zusammen mit einer Kombisonde registriert werden, sodass nur eine Messfahrt notwendig ist und die Wartezeit für die Bohrmannschaft gering gehalten wird.

Die Aussagekraft ist aufgrund des reduzierten Messprogrammes jedoch deutlich eingeschränkt. Unter ungünstigen Bedingungen (z. B. bei deutlich erhöhter Porenwassermineralisation) fällt es dem Interpretator mitunter sogar schwer, rol-

» Prinzip der Bohrlochgeophysik ist es, physikalische Messsignale als Funktion der Tiefe aufzunehmen, zu speichern und anschließend als sogenanntes Log grafisch darzustellen. «

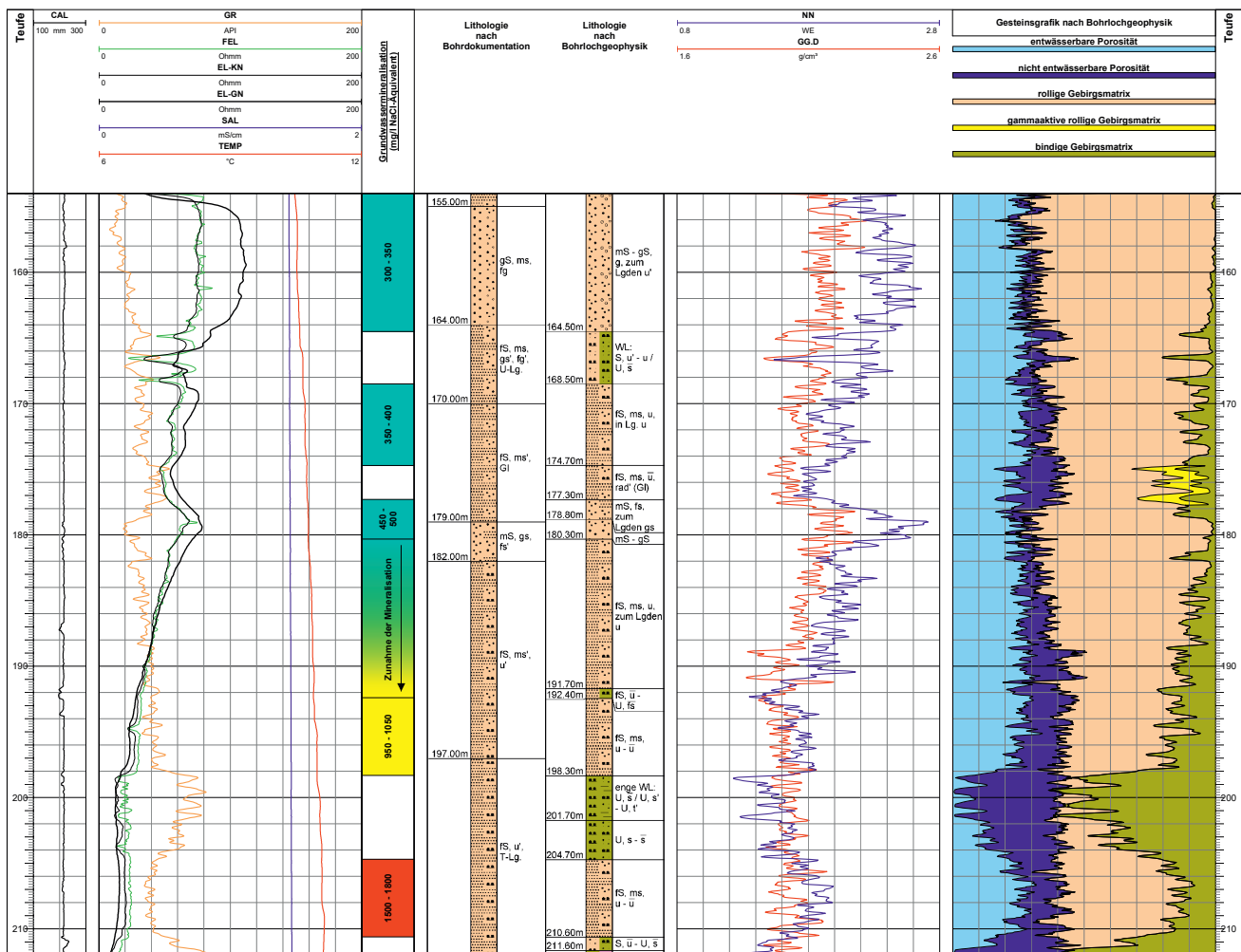


Abb. 5 – Messdiagramm einer Aufschlussbohrung inklusive Darstellung der Porenwassermineralisation und eines Compositplots

lige und bindige Einheiten sicher voneinander zu trennen. Kalibererweiterungen, die nicht mit der Messung erfasst werden, könnten fälschlicherweise als organische Bestandteile des Gebirges interpretiert werden. Die Ansprache verschiedener Korngrößen der rolligen Einheiten ist zudem ohne weitere Messungen kaum möglich.

Dennoch liefert auch die Vermessung der Erdwärmebohrungen mit diesem Minimalprogramm Aussagen zu den lithologischen Verhältnissen, die man nicht missen möchte. Zum einen erhöht die Kenntnis der Lithologie im Aufschlusspunkt die Sicherheit der Bemessung der Erdwärmanlage entscheidend. Zum anderen liefert gerade die Vielzahl der untersuchten Bohrungen, durch Korrelation der Bohrungen untereinander, Sicherheit bezüglich der lithologischen Aussagen und liefert damit kostengünstig (und in manchen Gebieten flächendeckend) Informationen über die Lithologie und Stratigraphie des anstehenden Gebirges, die man so nur mit aufwendigen und kostenintensiven Erkundungsprogrammen erzielen könnte.

Abbildung 2 zeigt den Ausschnitt eines Korrelationsplots mit insgesamt vier Erdwärmebohrungen aus dem südwestlichen Berliner Raum.

Offene Lockergesteinsbohrung: Hydro-Standard-Programm

Für die Untersuchung von Lockergesteinsaufschlussbohrungen (z. B. vor Errichtung einer Grundwassermeßstelle oder eines Brunnens) haben sich folgende Messverfahren über die Jahre als zweckmäßig erwiesen und etabliert:

- Kaliber-Log
- Elektro-Log (Große/Kleine Normale) und/oder Induktions-Log
- Fokussiertes Elektro-Log
- Gamma-Ray-Log
- Neutron-Neutron-Log
- Gamma-Gamma-Dichte-Log
- Elektrisches Leitfähigkeits-/Temperatur-Log

Dieses Messprogramm wird allgemein als „Hydro-Standard“ bezeichnet und dient in erster Linie einer exakten und vertikal gut auflösenden Schichtansprache

des anstehenden Gebirges. Hiermit wird durch die geophysikalischen Messungen ein lithologisches Schichtenverzeichnis erstellt, welches allein anhand von Spülproben, auch bei großer Exaktheit der Bohrarbeiten, nicht gewonnen werden könnte und welches wiederum deutlich kostengünstiger ist als das Abteufen einer Kernbohrung.

Bereits direkt im Anschluss an die bohrlochgeophysikalische Untersuchung der Aufschlussbohrung kann vor Ort anhand des Gamma-Ray-Logs und des Gamma-Gamma-Dichte-Logs eine maschinelle Grobinterpretation erfolgen. Das sogenannte „Litho-Log“ (Abb. 3) liefert dabei eine grobe „rollig-bindig“-Interpretation und damit eine erste Einschätzung über die lithologischen Verhältnisse vor Ort, ersetzt jedoch nicht die detaillierte Interpretation aller erfolgten Messungen.

Abbildung 4 zeigt den Ausschnitt eines Messdiagramms zur geophysikalischen Untersuchung einer Aufschlussbohrung mit „Hydro-Standard-Programm“ aus dem norddeutschen Raum. Das Bohrschichtenverzeichnis konnte im vorliegenden Fall

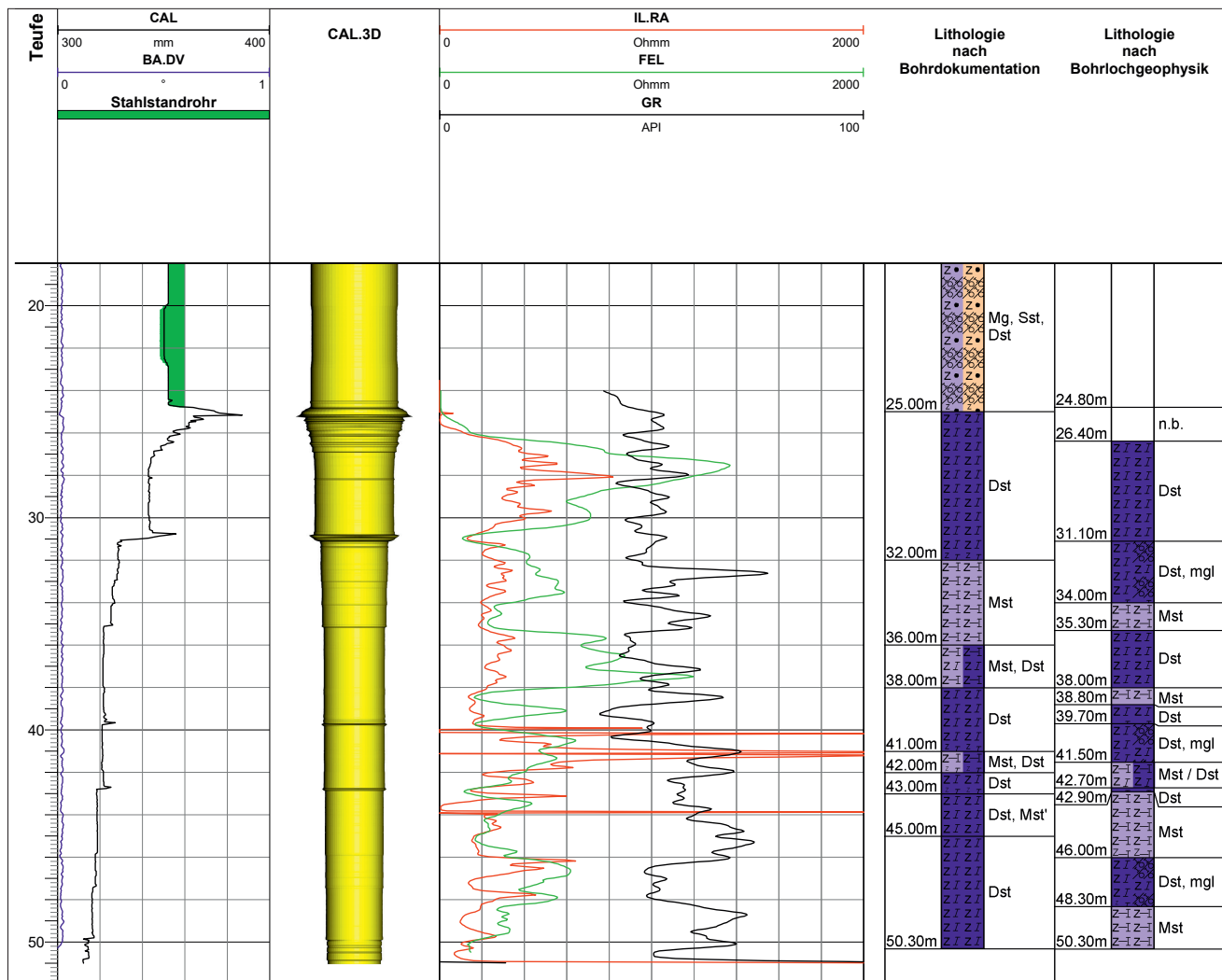


Abb. 6 – Aufschlussbohrung im Festgestein, Ermittlung der hydrodynamischen Verhältnisse

weitgehend bestätigt, jedoch deutlich verfeinert und bezüglich der Teufenlage von Grundwasserstauer und Grundwasserleiter korrigiert werden. Im Anschluss erfolgte der Ausbau zu einer Grundwassermessstelle, wobei die Filterlage anhand der bohrlochgeophysikalischen Ergebnisse festgelegt wurde.

Berechnung der Porenwassermineralisation und Erstellung eines Composit-Plots

Anhand des bereits in Abbildung 4 gezeigten und zuvor beschriebenen Messprogramms lassen sich neben der klassischen lithologischen Interpretation noch weitere Aussagen gewinnen. Zum einen kann anhand der registrierten Widerstandswerte und unter Berücksichtigung des Bohrlochkalibers, der Gamma-Gamma-Dichte-Messung und der elektrischen Leitfähigkeit der Spülung die Porenwassermineralisation in den aufgeschlossenen Grundwasserleitern berechnet werden [3–5]. Zum anderen ist die Berechnung

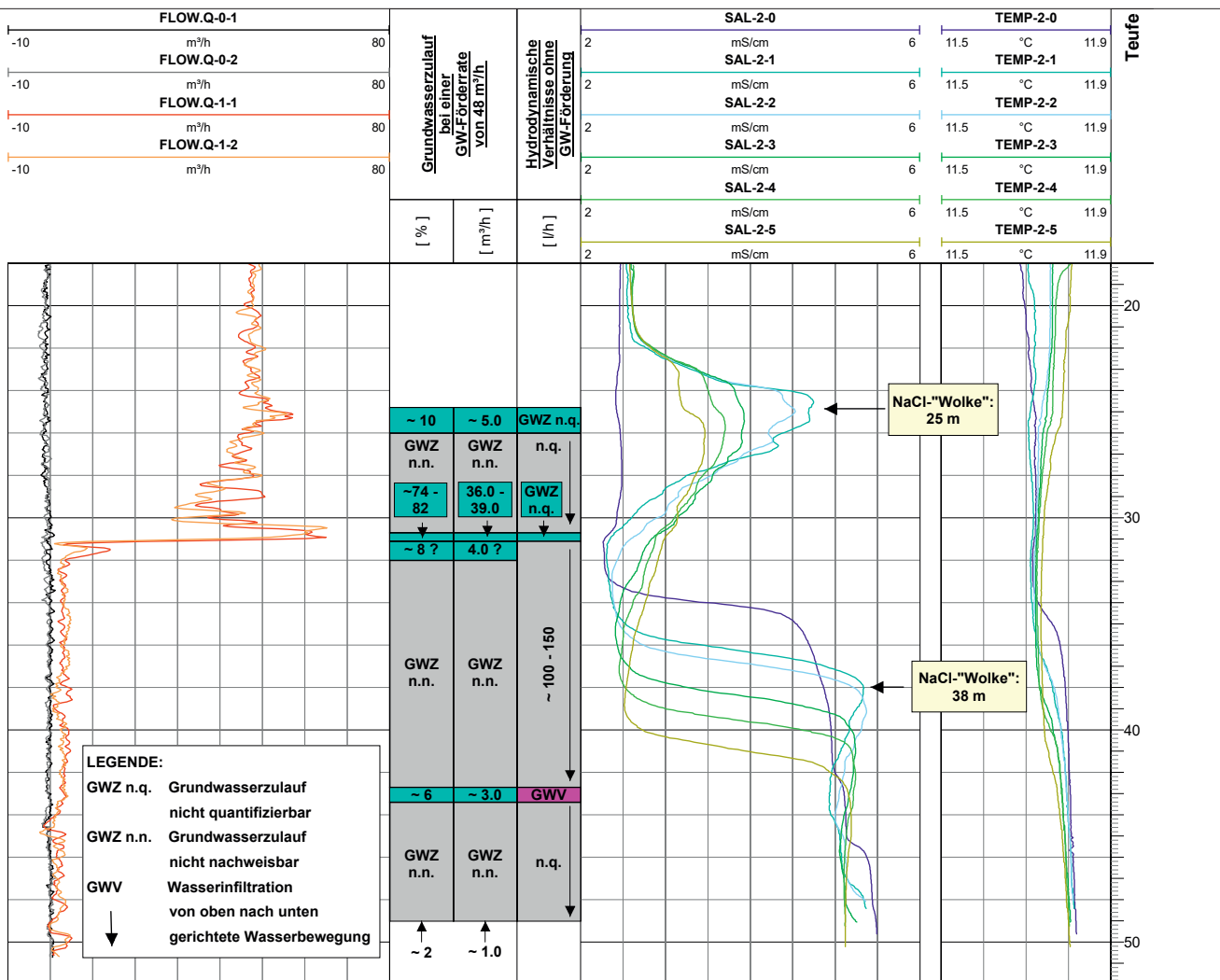
der prozentualen Anteile der bindigen, rolligen und organischen Gebirgsbestandteile sowie der nutzbaren Porosität möglich. Letzteres wird anschließend grafisch durch einen sogenannten Compositplot veranschaulicht.

Abbildung 5 zeigt den Ausschnitt eines Bohrlochmessdiagramms aus dem norddeutschen Raum, welches neben der lithologischen Ansprache auch die berechneten Porenwassermineralisationswerte in mg/l NaCl-Äquivalent (gängiges Maß zur Charakterisierung der Mineralisation von Porenwässern) sowie einen Compositplot enthält.

Die Methodik der Bestimmung der Porenwassermineralisation beruht auf der Tatsache, dass der elektrische Widerstand eines vollgesättigten, tonfreien Sandes oder Sandsteins nur von dessen Porosität und dem Gesamtgehalt an gelösten Salzen im Porenwasser abhängt. Aufgrund des Einflusses des Bohrlochs und der bohrlochnahen Zone wird bei elektrischen Bohrlochmessungen nie der tatsächliche

Gebirgs Widerstand bestimmt, sondern immer ein Mischwiderstand gemessen, der zusätzlich vom Widerstand der Bohrspülung, des Filterkuchens, der infiltrierten Zone, des Übergangsbereichs sowie der Ausdehnung dieser Zonen beeinflusst wird. Eine der Herausforderungen bei der Bestimmung der Grundwassermineralisation besteht daher darin, aus den durchgeführten elektrischen Bohrlochmessungen auf den tatsächlichen Widerstand des Gebirges zu schließen. Hilfreich ist es hierfür, elektrische Messungen mit verschiedenen Eindringtiefen (Messreichweiten) durchzuführen, um den Einfluss der einzelnen genannten Zonen zu bestimmen.

Hat man den wahren Gebirgs widerstand ermittelt, so gilt es, aus diesem mittels Archie-Gleichung (G. E. Archie, 1942) den Widerstand des Porenwassers zu berechnen. Hierfür benötigt man den sogenannten Formationsfaktor F, welcher wiederum von der Porosität des aufgeschlossenen Aquifers sowie der Korngestalt der Matrix



(Zementationsfaktor, siehe auch [1]) abhängt.

Zu beachten ist des Weiteren, dass die Bestimmung der Porenwassermineralisation vom Schluffgehalt der Grundwasserleiter verfälscht wird, da schluffige Bestandteile im Gebirge die Widerstände verringern. So sind im dargestellten Beispiel in Abbildung 5 die ermittelten NaCl-Äquivalente unterhalb von ~ 168,5 m aufgrund der schluffigen Beimengungen im Gebirge als Maximalwerte anzusehen.

Der ebenfalls in Abbildung 5 dargestellte Compositplot ist, wie oben bereits erwähnt, eine grafische Veranschauli-

chung der Porosität sowie der rolligen und bindigen Gebirgsmatrix. Als Grundlage für die Erstellung der Gesteinsgrafik sollte die Bohrung mit dem beschriebenen Hydro-Standard-Programm untersucht werden.

Anhand der Gamma-Gamma-Dichtemessung lässt sich mittels Dichtemittelgleichung die Porosität berechnen. Mittels Gamma-Ray-Messung kann der Tongehalt im anstehenden Gebirge abgeschätzt werden [6]. Anhand dessen lässt sich wiederum der Anteil der entwässerbaren und der nicht entwässerbaren Porosität ermitteln. Sowohl organische Be-

standteile, gammaaktive rollige Bestandteile als auch Kaliberausbrüche der Bohrung finden ebenfalls Berücksichtigung. Alle genannten Komponenten werden letztlich grafisch als sogenannter Compositplot zusammengefasst.

Offene Festgesteinsbohrung: Ermittlung der hydrodynamischen Verhältnisse

Das interpretierte Messdiagramm einer bohrlochgeophysikalisch untersuchten Bohrung im Festgestein ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Bohrung sollte vor dem Ausbau zu einem Trinkwasserbrunnen geo-

» Sowohl in der Sondentechnik, der Datenerfassung und -speicherung als auch im Bereich der Interpretation und der Auswertemethoden gab es enorme Fortschritte, die die Bohrlochgeophysik für die Erkundung des Untergrunds unverzichtbar machen.



physikalisch untersucht werden. Neben der lithologischen Ansprache stand hierbei auch die Untersuchung der hydrodynamischen Verhältnisse, ohne und mit Grundwasserförderung, im Fokus.

Anhand der durchgeführten Widerstandsmessungen und der Gamma-Ray-Messung konnte in Anlehnung an die qualitativ gute Bohrdokumentation das lithologische Schichtenverzeichnis leicht angepasst und bezüglich der Lage der Dolomit- und Mergelsteine verfeinert werden. Um den Zustand der Bohrung vor dem Ausbau zum Brunnen genauer einschätzen zu können, wurde neben der üblichen Kalibermessung auch eine Bohrlochverlaufsmessung durchgeführt, anhand derer der lotrechte Verlauf der Bohrung gezeigt wurde.

Die Untersuchung der hydrodynamischen Verhältnisse im Bohrloch erfolgte zunächst mittels Impellerflowmeter-Log. Anhand der Ruhemessung waren hierbei keine Fließbewegungen nachweisbar. Unter Förderbedingungen mit einer Förderrate von 48 m³/h ergab sich der Hauptzufluss bei etwa 31 m Teufe.

Da geringe, eigenständige Wasserbewegungen in der Bohrung, die mittels Impellerflowmeter nicht nachweisbar sind, vermutet wurden, erfolgte im Anschluss an die Zuflussprofilierung mittels Flowmeter-Log, ein Tracer-Fluid-Logging [7].

Hierbei wurde ohne Anregung eine von oben nach unten gerichtete Wasserbewegung festgestellt. Die Fließrate wurde mit ca. 100 bis 150 l/h bestimmt.

All die gewonnenen Informationen dienen als Grundlage für den erfolgreichen Ausbau der Bohrung zum Brunnen.

Zusammenfassung

Mitte der 1980er-Jahre des vergangenen Jahrhunderts schrieb Oberto Serra (Geological Interpretation Development Manager der Schlumberger Technical Service Inc., Singapore) sehr treffend: „Logs have become in some ways the geologist's eye – an eye that is imperfect and sometimes distorted but nevertheless not blind“ [8]. Seit damals gab es sowohl in der Sonden-technik, der Datenerfassung und -speicherung als auch im Bereich der Interpretation und der Auswertemethoden enorme Fortschritte, die die Bohrlochgeophysik für die Erkundung des Untergrunds unverzichtbar machen. Dennoch schadet auch heutzutage, ganz im Sinne von O. Serra, eine gewisse Demut bei der Bewertung von bohrlochgeophysikalischen Messungen nicht. Das Bild, dass sie liefern, ist nicht immer perfekt und manchmal verzerrt, aber, und auch das kann man im Sinne von O. Serra sagen, sie erlauben einen Blick nach unten, der nützlich, informativ und alternativlos ist.

Literatur

- [1] Meinhold, R. (1965): Geophysikalische Messverfahren in Bohrungen, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., Leipzig.
- [2] DVGW-Arbeitsblatt W 110: Geophysikalische Untersuchungen in Bohrungen, Brunnen und Grundwassermessstellen, Ausgabe 06/2005, wvgw, Bonn.
- [3] Baumann, K., Burde, B., Liebau, Ch. (2004): Monitoringmethoden für Wasserwerksstandorte mit Salzwassergefährdung; bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Nr. 11 und 12/2004, wvgw, Bonn.
- [4] Lehmer, M., Kaboth, U. (2017): Bohrlochgeophysikalische Untersuchungen zum Salzwassermonitoring in Brandenburg – raumzeitliche Charakterisierung der Süß-/ Salzwassergrenze.
- [5] Baumann, G. (2017): Salzwassermonitoring mit Hilfe von Wächtermessstellen; gwf Wasser + Abwasser, Nr. 10/2017, DIV Deutscher Industrieverlag GmbH.
- [6] Fricke S., Schön J. (1999): Praktische Bohrlochgeophysik, ENKE im Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- [7] Triller, F., Baumann, K. (2011): Detektion langsamer Fließbewegungen in Brunnen und Bohrungen, Ausgabe 12/2011, wvgw, Bonn.
- [8] Serra, O. (1984): Fundamentals of Well-Log Interpretation, Elsevier Science Ltd.

Autorin

Isabel Willwacher
Bohrlochmessung-Storkow GmbH
Schützenstr. 33
15859 Storkow
Tel.: 033678 436-41
willwacher@blm-storkow.de
www.blm-storkow.de

Impressum

wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft
Gas und Wasser mbH
Anja Menke
Josef-Wirmer-Str. 3
53123 Bonn
Tel.: 0228 9191-435
Fax: 0228 9191-492
E-Mail: menke@wvgw.de
Internet: www.wvgw.de

