

Integrierte bohrlochgeophysikalische Erkundung von Kluftgrundwasserleitern durch Betrachtung von Gefügemerkmalen und hydrodynamischer Aktivität

Jens Blumtritt

BLM Gesellschaft für Bohrlochmessungen mbH, Niederlassung München
muenchen@blm-online.de

Martin Lehmer

BLM Gesellschaft für Bohrlochmessungen mbH, Gommern
lehmer@blm-online.de

ZUSAMMENFASSUNG

Die Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften von Grundwasserleitern in heterogenen Kluftaquiferen mit in der Regel geringen Durchlässigkeiten ist stark abhängig von der Auflösung der einzusetzenden Messverfahren. Neben präzisen hydraulischen Testverfahren erfreuen sich in den letzten Jahren vor allem auch integrierte bohrlochgeophysikalische Lösungsansätze einer zunehmenden Anwendung. In der Kombination aus hoch auflösenden Scannerverfahren zur Ermittlung der Gefügeeigenschaften von wasserwegsamem Klüften und Störungen sowie hydrodynamischen Tracer-Methoden zur Bestimmung kleinster Fließbewegungen können vielfach noch exaktere Charakterisierungen zu den hydraulischen Eigenschaften eines Kluftgrundwasserleiters erzielt werden. Dies sollte in letzter Konsequenz zu einem verbesserten Untergrundmodell für Baugrund- und Altlastenerkundungen führen.

1 EINLEITUNG

Bei der Erkundung von Wasserwegsamkeiten in klüftigen Festgesteinsgrundwasserleitern besteht die Herausforderung in der Verknüpfung von strukturellen Daten über das Kluftnetzwerk mit hydraulischen Daten über den kompletten Aquifer bzw. die Verbindung von vielzähligen und vielfältig differenzierenden Gefügemerkmalen und integriert ermittelten hydrodynamischen Eigenschaften von Festgesteinen. Neue integrierende Lösungsansätze bei der Anwendung und Interpretation von geophysikalischen Bohrlochmessungen erlauben eine qualitativ verbesserte Bewertung von Kluftgrundwasserleitern.

2 HYDROGEOLOGISCHE ERKUNDUNG

Die Erkundung von grundwasserführenden Schichten ist sowohl für wasserrechtliche Belange als auch zur Bewertung von unerwünschten Fremdstoffeinträgen notwendig. Vor allem im Festgestein ergibt sich oft das Problem, das wenig Kenntnis über bestehende Weg-

samkeiten des Kluftsystems und damit verbunden mögliche Kontaminationspfade vorhanden ist. Insbesondere sind es die sehr differenziert auftretenden Gefügemerkmale, die eine Prognose zu hydraulischen Kennwerten und Schadstoffverteilungen erschweren.

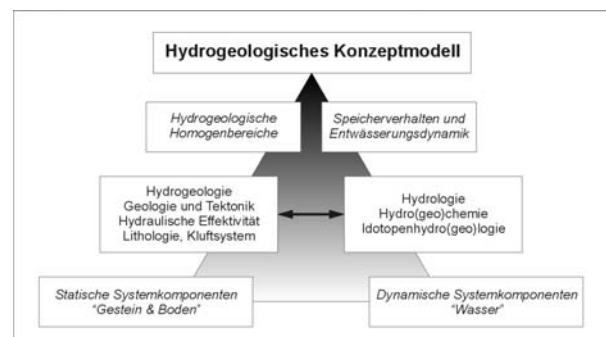


Abb. 2.1 Hydrogeologisches Modellsystem

Im Rahmen von hydrogeologischen Detailerkundungsprogrammen soll durch den gezielten Einsatz von Bohrungen und Test-/Messprogrammen ein möglichst umfassender Überblick zum Untersuchungsareal ge-

wonnen werden. Das zu konzipierende hydrogeologische Modell kann dabei unter besonderer Beachtung der Wechselwirkungen zwischen statischen und dynamischen Systemkomponenten schematisch wie in Abbildung 2.1 ersichtlich, dargestellt werden. Dabei sind sowohl für die Ermittlung hydraulischer Kennwerte als auch für die gezielte Beprobung und spätere Sanierung umfangreiche Daten zum Grundwasserleiter zu ermitteln. Neben den Informationen, die aus Kernmaterial und dem Bohrprozess gewonnen werden, erlauben hochauflösende geophysikalische Bohrlochmessverfahren einen unverzichtbaren Blick in Struktur und Dynamik wasserwegsamere Schichten und Zonen.

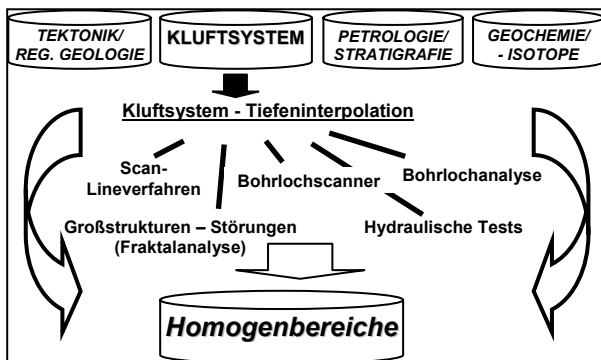


Abb. 2.2 Darstellung des Kluftsystems als Beispiel statischer Systemkomponenten

Mit ihrer Hilfe können Bohrungen gezielt mit hoher Tiefenauflösung ausgebaut und Beprobungsabschnitte festgelegt werden. D.h. dass Einsätze der Bohrlochgeophysik zeitnah nach Erreichen der Endtiefe der Bohrung realisiert und erste Ergebnisse aus den Messungen unmittelbar an der Bohrung bzw. am folgenden Tag bereit gestellt werden müssen. Nur so kann die Geophysik effektiv im Erkundungsablauf eingetaktet werden, damit Bohrungsausbau und spätere Beprobung repräsentativ angesetzt werden können.

3 GEOPHYSIKALISCHE BOHRLOCHMESSVERFAHREN

Der Einsatz bohrlochgeophysikalischer Erkundungsmethoden basiert auf der Ermittlung von Daten zu folgenden Teilzielstellungen:

- Ermittlung von Gefügemerkmalen, insbesondere deren qualitative und quantitative Eigenschaften (Differenzierung von Schicht-/Schiefer- und Kluftflächen, Störungszonen und Erosionsflächen sowie Unterscheidung von geschlossenen und offenen Flächen, Ermittlung von Raumlage, Häufigkeit und Öffnungsweiten) in Bezug auf potenziell wasserführende Strukturen
- Ermittlung lithologischer und lithostratigrafischer Einheiten und Schichtgrenzen in Sedimentgesteinen
- Ermittlung wasserführender Zonen und ihre Quantifizierung (Zuflussprofilierung) und hydrophysika-

lische Differenzierung (Temperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert, Redoxpotenzial, Sauerstoffgehalt und -sättigung, Dichte, Trübung)

- Ermittlung geometrischer Daten zur Bohrung als Korrektiv für alle Messverfahren

Die Umsetzung der oben aufgeführten Detailerkundungsziele wird innerhalb eines gezielt geplanten und kompakt umgesetzten Messprogramms realisiert. Dabei kommen folgende Messverfahren zum Einsatz:

Grundmessprogramm:

- Optischer/Akustischer Bohrlochscanner (OBI/ABF)
- Kaliber (CAL)
- Bohrlochabweichung (BA)
- Gamma Ray (GR)
- Fokussierter Widerstand (FEL)
- Leitfähigkeit/Temperatur (SAL/TEMP)
- Flowmeter (FLOW) oder alternativ Tracer-Fluid-Logging (TFL)

Bedarfsweises Zusatzmessprogramm:

- Gamma-Gamma-Dichte (GGD)
- Neutron-Neutron (NN)
- Full Wave Sonic (FWS)
- Milieu (MIL [pH, Rx, O₂])
- Flüssigkeitsdichte (FD)
- Trübung (TR)

Für die Gewinnung bestmöglicher Ergebnisse ist ein mit betreuendem Fachbüro und Bohrbetrieb inhaltlich und zeitlich abgestimmter Messablauf zu realisieren. Dies richtet sich zum einen nach den Gegebenheiten an der Bohrung (Bohrdurchmesser, Wasserstand, Spülungseigenschaften, Bohrlochstabilität) sowie nach den Projektzielstellungen. Insbesondere hat die Qualität von Bohrverfahren und Bohrmannschaft wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Messergebnisse der Geophysik. So werden die besten Ergebnisse zum Gefüge bei Kernbohrungen erzielt, da hier die geringste Beanspruchung der Bohrlochwand erfolgt. Die Abbildung der Bohrlochwand erfolgt dabei je nach Bohrlochmedium bzw. optischer Transparenz der Spülung mittels Optischem oder Akustischem Bohrlochscanner. In der folgenden Darstellung wird ein Beispiel für orientierte Bohrlochscanneraufnahmen in einem kristallinen Gestein aufgezeigt.

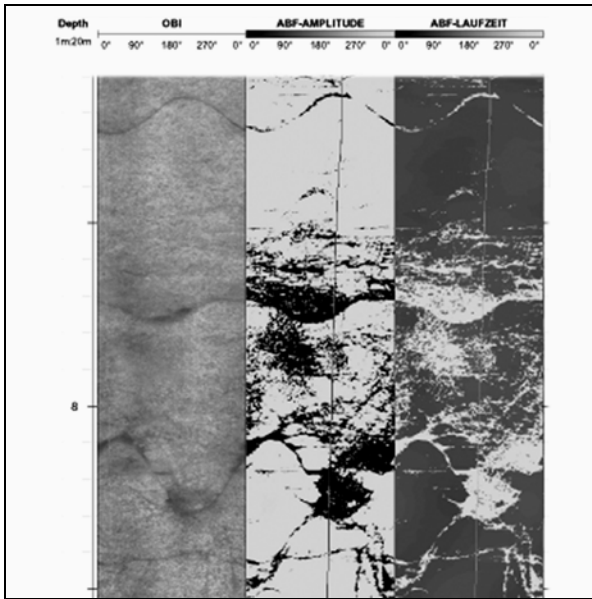


Abb. 3.1 Orientierte Bohrlochscanneraufnahme eines klüftigen, kristallinen Festgesteins (linke Spur optisch, mittlere und rechte Spur akustisch)

In der Abbildung 3.1 wird schnell der Vorteil der bildgebenden Messverfahren, Strukturen sehr detailgetreu abzubilden, deutlich. Insbesondere der Blick auf offene Klüfte und Schichtfugen unterstützt eine quantitative Interpretation potenziell hydrodynamisch aktiver Zonen. Hierbei werden zuerst das Einfallen und die Häufigkeit der Strukturelemente mit einer Ansprache hinsichtlich einer Einordnung der Trennflächenkategorie (Differenzierung von Schicht- und Klüfflächen) ermittelt. Die Zuordnung einer hydrodynamischen Aktivität erfolgt dann in Korrelation mit den Zuflussmessungen im Bohrloch. Letztere werden entweder als klassische Flowmetermessungen ausgeführt, wenn Volumenströme im l/s-Bereich erzielbar sind (siehe Abb. 3.2 und 4.1) oder als Tracerfluidlogging bei sehr geringen Volumenströmen im l/min-Bereich (siehe Abb. 4.1).

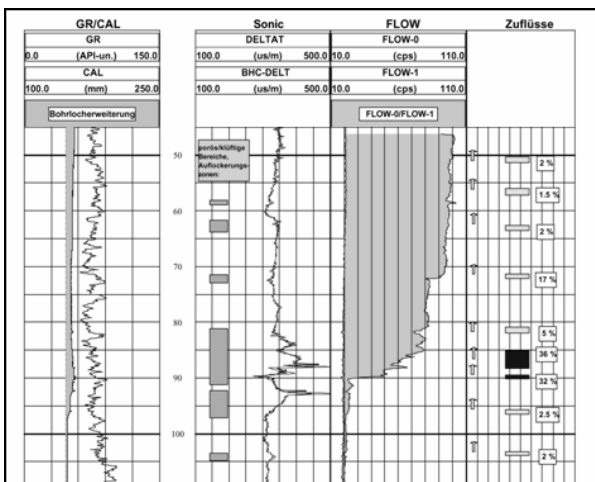


Abb. 3.2 Zuflussprofilierung durch Flowmetermessungen im klüftigen Festgestein

Bedarfsweise können zusätzlich zum Zuflussmessprogramm noch Messungen zu den physikochemischen Eigenschaften des Grundwassers durchgeführt werden. Insbesondere Messungen zu pH-Wert, Redoxpotenzial, Sauerstoffgehalt und -sättigung sowie Trübung und Flüssigkeitsdichte geben wichtige Zusatzinformationen zur Beschaffenheit des Grundwasserleiters, Gütegrenzen und möglicher erwünschter oder unerwünschter Gasführung (z.B. CO₂, CH₄). Die folgende Abbildung zeigt ein solches Messbeispiel.

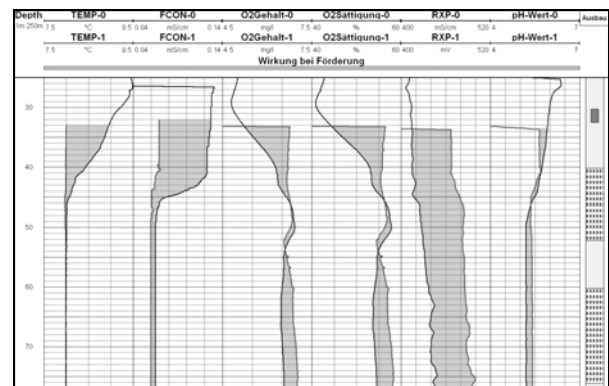


Abb. 3.3 Milieuparameter-Messungen in Ruhe und bei Förderung in einer ausgebauten Bohrung

Für die Erkundung von Gesteinsformationen, die Wasser sowohl in Klüften als auch in Poren führen, können zur Klärung der Porenvolumina noch die klassischen Porositätsverfahren der Bohrlochgeophysik, Dichte-Log, Neutron-Neutron-Log und Sonic-Log eingesetzt werden. Mit deren Hilfe kann das Porenvolumen bestimmt und zu den einzelnen Zuflussanteilen zugeordnet werden.

4 INTEGRIERTER LÖSUNGSANSATZ ZUR BESCHREIBUNG HYDRAULISCH AKTIVER KLUFTSYSTEME

An einem Fallbeispiel im Kristallin (Gneis) wird im Folgenden der neue Lösungsansatz zur Ermittlung hydraulisch aktiver Zonen innerhalb eines bestehenden Kluftsystems beschrieben.

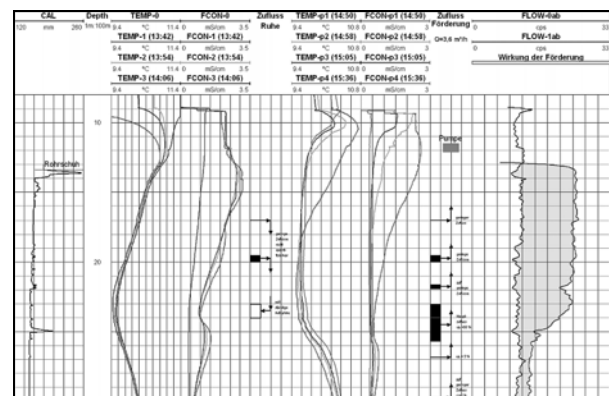


Abb. 4.1 Interpretiertes Zuflussprofil nach Tracerfluidlogging und Flowmetermessungen

Die an der Bohrung ermittelten Daten zum Zuflussverhalten bzw. zum Gefüge sind in den Abbildungen 4.1 und 4.2 visualisiert.

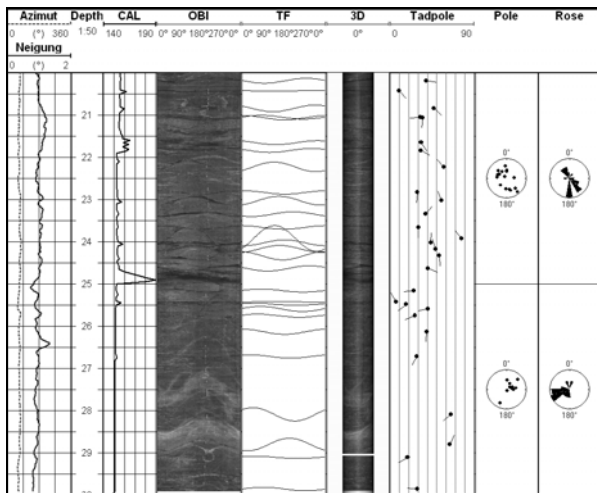


Abb. 4.2 Optische Bohrlochscanneraufnahme mit interpretierter Gefügeanalyse

Die aus den Aufnahmen des Optischen Bohrlochscanners gewonnenen Aussagen zum Trennflächeninventar der Bohrung werden in einem zweiten Schritt mit den Ergebnissen der Zuflussmessungen korreliert. Dabei werden insbesondere die Strukturen einer detaillierten Analyse unterzogen, denen eine hydrodynamische Aktivität zugeordnet werden kann. Im Resultat wird dann eine tabellarische Übersicht über die ermittelten Eigenschaften aller hydrodynamisch aktiven Gefügeflächen erstellt. Sie dient in weiteren Bearbeitungsschritten (u.a. Korrelation mit Kernmaterial und Laborwerten) dem Anwender (Hydrogeologen, Ingenieurgeologen) als eine wichtige Datenquelle zur detaillierten Beschreibung des Untergrundes.

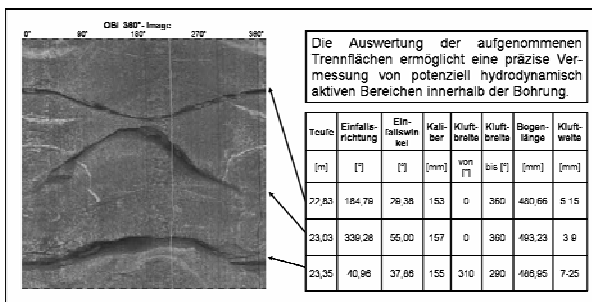


Abb. 4.3 Übersicht hydrodynamisch aktiver Strukturen mit Detailaufnahme der Bohrlochwand

Dabei werden die einzelnen Daten zum Kluftsystem zum einen für den gezielten Messstellenausbau mit Packer- und Probenahmesystemen verwendet und erlauben zum anderen einen verbesserten Ansatz der Parameter für hydrogeologische Modellierungen. Somit sind vor allem für die gezielte Beprobung und Analyse von Schadstoffverteilungen belastbarere Daten ermittelbar, die detailliert, bestimmten Strukturen des Gebirges zugeordnet werden können. Aus der Bestimmung der effektiv hydraulisch aktiven Klüfte

ergeben sich realistische Ansätze bei der Quantifizierung hydraulischer Kennwerte. Die Kenntnis ihrer exakten Raumlage erlaubt zusätzlich eine gute Korrelation von Probenahmepunkten bzw. Bohrungen und die gezielte Festlegung von zusätzlichen Aufschlüssen für eine eingrenzende Erkundung.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Bei der hydrogeologischen Erkundung von Kluftgrundwasserleitern liefert der Einsatz von modernen geophysikalischen Bohrlochmessverfahren wertvolle Informationen zum Gefüge und Zuflussverhalten. Als neuer integrierter Lösungsansatz wird aus der Kombination von hochauflösenden bildgebenden Bohrlochscanner- und Zuflussmessungen ein detailliertes Abbild hydrodynamisch aktiver Strukturen gegeben. Dieses bildet eine Voraussetzung für den gezielten Ansatz für Beprobungen, Analysen und Modellierungen im Bereich der Erkundung, Überwachung oder Sanierung von ingenieurgeologischen Bauwerken und industriellen Altlastverdachtsflächen. Da mit der weiteren technischen Entwicklung stets Verbesserungen des Auflösungsvermögens physikalischer Messverfahren verbunden sind, werden zukünftig noch detailgetreue Ergebnisse, vor allem im Bereich geringster Wasser- und Schadstoffbewegungen zu erwarten sein.

5 LITERATUR

- [I] S. FRICKE & J. SCHÖN (1999): Praktische Bohrlochgeophysik, ENKE, Stuttgart
- [II] G. WINKLER & P. REICHL (2003): Bohrlochuntersuchungen zur Beantwortung hydrogeologischer Fragestellungen, VÖBU-Seminar Bohrlochgeophysik im Festgestein für geotechnische und hydrogeologische Fragestellungen, Wien
- [III] K.-F. BUSCH, L. LUCKNER & K. TIEMER (1993): Geohydraulik, Gebrüder Borntraeger, Berlin-Stuttgart
- [IV] J. BLUMTRITT, T. HEYN & J.-P. CRABEIL (2006): Ermittlung der Lage und Ausbreitung von Karsthohlräumen im Rahmen von Erkundungsarbeiten für unterirdische Verkehrswege mittels optischer Bohrlochbefahrungen, 5. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Ostfildern
- [V] J. BLUMTRITT (2007): Geophysikalische Bohrlochmessungen als integraler Bestandteil einer geotechnischen Baugrunderkundung, Workshop Bohrlochgeophysik und Geothermie, München