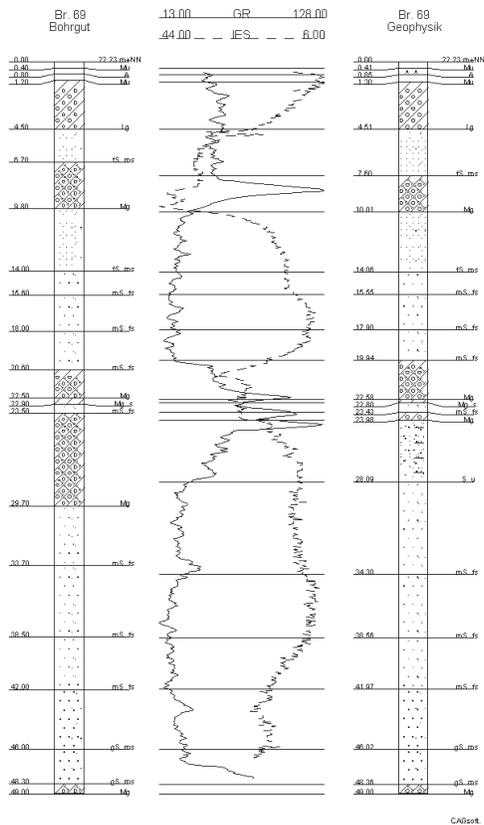

Christian A. Gillbricht

Geophysikalische Bohrlochvermessungen

in der ingenieurtechnischen Praxis



Verlegt bei Kay W. Sörensen · Hamburg · 1998

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ohne Zustimmung des Verfassers und des Verlegers ist unzulässig. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in und Verarbeitung durch elektronische Systeme.

© Kay W. Sörensen, Hamburg, November 1998

Grafik: Christian A. Gillbricht, Hamburg

Satz: Kay W. Sörensen

Druck und Bindung: Buch- & Offsetdruckerei Stubbemann GmbH, Hamburg

Kay W. Sörensen · Buchverlag · Mediale Dienstleistungen

Sillemstraße 102 · D-20257 Hamburg · Email: soerenzen-verlag@gmx.net

ISBN 3-932318-03-X

Inhalt

1.	Einleitung	5
2.	Meßverfahren	7
2.1.	Allgemeines.....	7
2.2.	Elektrische Meßverfahren	9
2.3.	Exkurs: Das Hamburger Dry-Hole-Experiment	14
2.4.	Passive kernphysikalische Verfahren	23
2.5.	Aktive kernphysikalische Verfahren.....	24
2.6.	Sonstige Verfahren	27
2.7.	Beispiele.....	31
3.	Planung von Bohrlochmessungen	43
4.	Ausschreibung und Vergabe	47
5.	Vergleichbarkeit und Standardisierung.....	51
6.	Qualitätssicherung.....	55
7.	Auswertung der Meßergebnisse.....	61
8.	Zusammenfassung und Ausblick	67
9.	Literatur.....	69

1

Einleitung

Bohrlochgeophysikalische Messungen haben seit Jahrzehnten einen festen Platz in der Hydrogeologie (z. B. SCHNEIDER, 1988; DVGW, 1990) und in jüngerer Zeit auch in der Umweltgeologie (KEYS, 1997). Die meisten Meßverfahren sind vor ihrer Anwendung in diesen Bereichen für die Zwecke der Erdöl- und Erdgaserschließung entwickelt worden. Die Meßeinrichtungen sind daher im Regelfall auch unter ungünstigen Bedingungen (hohe Drücke und Temperaturen, aggressive Medien) einsetzbar und eignen sich auch unter den Bedingungen von Altdeponien und anderen Altlasten.

Während die „klassische“ Bohrlochvermessung im „offenen Loch“, d. h. im allgemeinen in einer unverrohrten Spülbohrung, die im Lockergestein durch die geeignete Zusammensetzung der Spülflüssigkeit am Einsturz gehindert wird, stattfindet, sind im Feld der Umweltgeologie im stärkeren Maße auch Vermessungen in ausgebauten Bohrlöchern, meist Grundwassermessstellen, von erheblicher Bedeutung. Die hier verwendeten Verfahren sind im allgemeinen auch im offenen Loch einsetzbar und dort entwickelt worden. Der Einsatz im ausgebauten Loch erfordert jedoch zum Teil besondere Vorkehrungen sowohl bei der Durchführung der Messungen als auch bei ihrer Auswertung.

In jüngster Zeit sind ausgezeichnete Lehrbücher zu diesem Thema veröffentlicht worden (KEYS, 1997; ZSCHERPE & STEINBRECHER, 1997). Die vorliegende Schrift soll daher nur einen kurzen Überblick über die technischen Möglichkeiten der Meßverfahren geben. Der Schwerpunkt liegt bei der Erörterung der heute im Bereich der Hydro- und Umweltgeologie häufig verwendeten Verfahren und ihrer Eignung in der Bearbeitung ingenieurtech-

nischer Fragestellungen. Hierbei ist insbesondere zu berücksichtigen, daß Planung, ingenieurtechnische Betreuung und Auswertung dieser Messungen im Regelfall nicht in der Hand von speziell geophysikalisch geschulten Fachleuten liegen, sondern von Geologen und Bauingenieuren ohne besondere Vorkenntnisse. Diesen sollen hiermit Anhaltspunkte für den praktischen Einsatz der gängigen Verfahren gegeben werden, aber auch die Grenzen dessen, was der Laie ohne Hinzuziehung eines Geophysikers veranlassen und aussagen kann, aufgezeigt werden.

Der Autor hat als Berater mit Standort Hamburg persönlich ausschließlich Erfahrungen im Bereich der Lockergesteine. Spezielle Verfahren für den Einsatz in Festgesteinsgebieten werden daher hier nicht berücksichtigt.

Für fachliche Hinweise, die kritische Durchsicht des Manuskripts und fruchtbare Diskussionen habe ich Frau Dr. Taughs und Frau Luskow, den Herren Dr. Wirth, Dr. Schulze, Dr. Muckelmann sowie den Herren Cron und Klapötke zu danken.

2

Meßverfahren

2.1 Allgemeines

Bohrlochgeophysikalische Messungen haben nach ihrer Einführung in die Praxis der Erdöl- und Erdgasindustrie in den 20er Jahren einen schnellen Aufschwung genommen (KEYS, 1990). Mit der Entwicklung der gesamten physikalischen Meßtechnik, insbesondere der elektronischen und der nuklearphysikalischen Techniken, in den folgenden Jahrzehnten ist eine fast unüberschaubare Vielfalt von Meßverfahren für die bohrlochgeophysikalische Vermessung entstanden (z. B. ZSCHERPE & STEINBRECHER, 1997). Durch die Wahl geeigneter Kombinationen von Meßverfahren können, in Abhängigkeit von den geologischen Verhältnissen und den technischen Randbedingungen, sehr weitgehende qualitative und quantitative Aussagen über die Beschaffenheit des Gebirges, seine hydraulischen Eigenschaften und ggf. die hydrochemischen Eigenschaften der Porenflüssigkeit (im Regelfall Grundwasser) getroffen werden.

In der hydrogeologischen und umwelttechnischen Praxis kommen jedoch nur wenige Verfahren regelmäßig zum Einsatz. Hierfür sind verschiedene Ursachen zu benennen:

- Die verantwortlichen Planer sind selten mit dem aktuellen Stand der technischen Möglichkeiten vertraut, da für sie Bohrlochvermessungen nur eine Nebenrolle im Kontext des Gesamtprojektes spielen. Sie greifen daher oft auf veraltete Fachliteratur oder Unterlagen aus älteren Projekten des eigenen Hauses zurück. Daraus ergibt sich ein insgesamt konservatives Verhalten der Anwender.

- In vielen Fällen besteht der Wunsch nach der Vergleichbarkeit der Meßergebnisse mit älteren Untersuchungen. Daher werden alte Meßprogramme beibehalten, selbst wenn modernere Verfahren zu wirtschaftlich vertretbaren Konditionen zur Verfügung stehen.
- Viele, gerade modernere, Meßverfahren werden nur von einzelnen Anbietern und/oder zu hohen Preisen angeboten. Dadurch wird bei Geldgebern und Planern die Neigung zu konservativen technischen Lösungen verstärkt.
- Im Bereich der Hydro- und Umweltgeologie handelt es sich bei den Vermessungsobjekten meist um „flache“ Löcher mit einer Tiefe von maximal einigen 100 m. Da unter diesen Bedingungen ein erheblicher Anteil der Kosten der Vermessungen aus Fixkosten (Gestellung und Antransport des Geräts) besteht und von Geldgebern üblicherweise der Anteil der Kosten für die Vermessung an den Kosten der Bohrung bewertet wird, bleibt für die eigentlichen Messungen nicht viel Spielraum.
- Im Bereich der Hydro- und Umweltgeologie erfolgt die Auswertung der Messungen meist rein qualitativ. Die Möglichkeiten einer quantitativen Auswertung unter Verwendung ggf. aufwendigerer Methodenkombinationen oder Methodenoptimierung werden nur in Ausnahmefällen genutzt.

Der Entscheidungsprozeß über die für die jeweilige Fragestellung unter sachlichen und subjektiven Gesichtspunkten optimale Methodenkombination wird in Abschnitt 3 diskutiert.

Im folgenden werden vor diesem Hintergrund nicht alle auf dem Markt angebotenen Verfahren behandelt, sondern nur die häufig in älteren Unterlagen und im Fachschrifttum aufgeführten, die häufig tatsächlich eingesetzten und solche, für die der Autor einen häufigeren Einsatz in der ingenieurtechnischen Praxis befürwortet. Bezüglich der physikalischen Grundlagen der Ver-

fahren wird auf das im Literaturverzeichnis aufgeführte Fachschrifttum verwiesen.

2.2 Elektrische Meßverfahren

Der elektrische Widerstand des Gebirges wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst (z. B. BENDER, 1985), insbesondere:

- mineralogische Zusammensetzung,
- Korngröße,
- Porosität,
- Leitfähigkeit der Porenflüssigkeit (Grundwasser).

Innerhalb einer petrographisch relativ homogenen Schichtenfolge können Bereiche erhöhter Leitfähigkeit als Zonen erhöhter Lösungsgehalte (z. B. durch Deponiesickerwässer) identifiziert werden. Bei relativ homogenem (geringem) Lösungsinhalt des Porenwassers dagegen können Bereiche niedriger Widerstände als feinkörnige, tonmineralreiche Sedimente oder sehr poröse Schichten (z. B. Torfe), Bereiche hoher Widerstände als grobkörnige Sedimente interpretiert werden. Der Vergleich der elektrischen Verfahren mindestens mit dem γ -Log und dem Bohrgut ist jedoch in jedem Fall erforderlich.

Salinität (SAL)

Das einfachste elektrische Meßverfahren ist die Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Bohrlochflüssigkeit mit einer 4-Elektroden-Anordnung, entsprechend marktgängigen Leitfähigkeitsmeßgeräten für die Wasseruntersuchung. Die Leitfähigkeit wird dabei auf eine Temperatur von 25° C bezogen. Neben entsprechenden Sonden für geophysikalische Logginganlagen gibt es auch portable Geräte in der Bauart von Kabellichtloten. Diese Messung erlaubt keine Aussage über das Gebirge, sondern

nur über die Bohrlochflüssigkeit und damit bei entsprechenden Bedingungen die Porenflüssigkeit des Gebirges. Sowohl im offenen als auch im ausgebauten Loch (Brunnen) lassen sich Zutritte von chemisch auffälligem, z. B. versalztem, Wasser feststellen, insbesondere auch an undichten Verbindungen im Aufsatzbereich von Grundwassermeßstellen.

Elektrische Leitfähigkeitsmessungen können im Zusammenhang mit Pumpversuchen für die Abschätzung des Profils der hydraulischen Durchlässigkeit und der Variation der elektrischen Leitfähigkeit des Grundwassers über die Tiefe eingesetzt werden (TELLAM, 1992; vgl. GILLBRICHT, 1996: 21–22).

In neuerer Zeit wird das SAL im Verfahren des Fluid-Logging eingesetzt. Dabei wird die Bohrspülung gegen eine wässrige Lösung ausgetauscht, deren Leitfähigkeit sich erheblich vom umgebenden Grundwasser unterscheidet, z. B. deionisiertes Wasser oder konzentrierte Kochsalzlösung. Danach wird unter statischen Bedingungen oder unter Abpumpen der Bohrung mehrfach das Leitfähigkeitsprofil aufgenommen. Mit diesem Verfahren lassen sich Wasserzutritte aus dem Gebirge abgrenzen und daraus Durchlässigkeiten abschätzen (PAILLET & PEDLER, 1996; TSANG et al., 1990; JUNGBAUER, o.J.).

Eigenpotential (SP)

Die Eigenpotentialmethode (*spontaneous potential*, SP) wird hier nur aus historischen Gründen angeführt. Bis in die 80er Jahre wurde sie bei hydrogeologischen Untersuchungen standardmäßig zusammen mit den elektrischen Widerstandsverfahren (16"-und 64"-Normalen) gemessen. Mit dem weitgehenden Ersatz der klassischen Widerstandssonden durch das FEL ist die SP-Messung aus dem Feld der Hydro- und Umweltgeologie praktisch verschwunden. Im Bereich süßer Grundwässer erbringt dieses Verfahren meist keine oder zweifelhafte Informationen (KEYS, 1997).

Elektrische Widerstandsverfahren, Elektro-Log (EL)

Die klassischen elektrischen Widerstandsverfahren messen den scheinbaren Widerstand des Gebirges über eine 4-Elektroden-Anordnung, wie sie auch in der geoelektrischen Sondierung üblich ist. Dabei wird über 2 Stromelektroden ein Strom in das Gebirge eingeleitet und über 2 Meßelektroden der Spannungsabfall gemessen. Aus dem (konstanten) Strom, dem gemessenen Spannungsabfall und einem Geometriefaktor in Abhängigkeit von der Elektrodenanordnung wird ein scheinbarer Gebirgswiderstand [Ωm] berechnet und aufgezeichnet.

Bei allen derartigen Verfahren muß die Bohrlochflüssigkeit (Spülung) im Verhältnis zum Gebirge eine hinreichende elektrische Leitfähigkeit aufweisen, damit der angelegte Strom in das Gebirge eindringt.

Im Laufe der Zeit sind Sonden mit unterschiedlichen Elektrodenanordnungen entwickelt worden. Die größte Verbreitung haben im Bereich der Hydrogeologie die sogenannten 16"- und 64"-Normalen gefunden, die zusammen mit einer SP-Elektrode in einer einzigen Sonde vereinigt sind. Die vertikale Auflösung der Messungen, d. h. die minimale auflösbare Schichtdicke bei hinreichendem Leitfähigkeitskontrast, liegt in der Größenordnung der Elektrodenabstände, d. h. mehrere Dezimeter. Sind im Boden geringmächtigere Schichten gegeben, so kommt es durch die Integrationswirkung der Meßanordnung zu einer zum Teil erheblichen Verfälschung der Ergebnisse (KEYS, 1997).

Die wahren Gebirgswiderstände lassen sich aus den gemessenen scheinbaren Gebirgswiderständen nur über Modellrechnungen erschließen (Abschn. 7).

Heute ist diese Sonde weitgehend durch das FEL verdrängt worden.

Fokussiertes Elektro-Log (FEL)

Das fokussierte Elektro-Log dient der Messung des elektrischen Widerstandes des Gebirges (im offenen Loch) oder des Ausbaumaterials (im Kunststoffausbau) mit hoher vertikaler Auflösung (bis in den cm-Bereich). Im Grundsatz arbeitet es wie das Elektro-Log, durch das Anlegen elektrischer Felder breitet sich der eingespeiste Strom aber nicht allseitig von den Speiseelektroden aus, sondern wird in das Gebirge fokussiert. Dadurch wird das Integrationsvolumen der Messung gegenüber dem EL erheblich verringert. Der gemessene scheinbare Gebirgswiderstand kommt für homogene Schichten von mehreren Dezimetern Dicke dem wahren Gebirgswiderstand nahe.

FEL-Sonden werden in sehr unterschiedlicher Bauart hergestellt. Marktgängig sind Systeme mit einer Baulänge von über 3 m (einschließlich Abschirmelektroden).

Im ausgebauten Loch können insbesondere Undichtigkeiten im Aufsatzrohr (undichte Muffenverbindungen, Beschädigungen) und die genaue Lage der Filterstrecken ermittelt werden. Wegen der meist großen Baulänge der Sonde (über 3 m) ist die Filterunterkante jedoch selbst bei Vorhandensein eines Sumpfrohrs im Regelfall nicht festzustellen. Im oberen Teil des Filters treten regelmäßig gestörte Messungen auf, da sich bei Messungen in diesem Bereich die obere Abschirmelektrode im (isolierenden) Aufsatzrohr befindet.

Eine Vermessung in metallischem Ausbaumaterial, insbesondere Stahl-Aufsatzrohren, ist nicht möglich.

Sollen bei der Untersuchung des Ausbaus auch Gewindeverbindungen oberhalb des aktuellen freien Wasserspiegels im Brunnen vermessen werden, muß das Aufsatzrohr mit Wasser aufgefüllt werden. Hierzu muß oberhalb des Filters ein Packer gesetzt werden. Zur Auffüllung sollte ausschließlich Wasser verwendet werden, daß dem untersuchten Brunnen entstammt. Bei

Entnahme und Handhabung dieses Wassers sind auf kontaminierten Standorten Aspekte des Arbeits-, Explosions- und Umgebungsschutzes zu beachten.

Induktions-Log (IES)

Das elektromagnetische Induktionslog (kurz EMI-Log oder IL oder IEL, andere Bezeichnungen: elektromagnetisches Log = EM-Log, Inductive Electric Survey = IES) ermöglicht die Messung des elektrischen Widerstandes des Gebirges aus einem mit Kunststoffrohren (PVC) ausgebauten Bohrloch. Dieses Meßverfahren ist ursprünglich als Ersatz für die elektrischen Logs in offenen Bohrlöchern gering leitender Spülung oder mit starker Spülungsinvasion in das Gebirge entwickelt worden. Diese Anwendungen sind für die „flachen“ Löcher in der Hydro- und Umweltgeologie von geringer Bedeutung. Das IES wird in der Lagerstättenerkundung seit einiger Zeit erfolgreich eingesetzt (KILLEEN, 1986), ist in der Grundwassererschließung (KEYS, 1990) und Altlastenerkundung dagegen erst in jüngerer Zeit im ausgebauten Loch zum Standardverfahren geworden (BAUMAN et al., 1994).

IES-Sonden werden in sehr unterschiedlicher Bauart hergestellt. Marktgängig sind Systeme mit einer Baulänge von 1–2 m. Die Bauform des Induktions-Logs und seine Betriebsbedingungen, insbesondere die Sendefrequenz, sind so gewählt, daß die Messung im typischen Fall das Gebirge ca. 0,3–1,0 m außerhalb des Bohrlochs repräsentiert. Das Bohrloch bzw. das Ausbau- und Ringraumfüllmaterial beeinflussen daher die Messungen wenig. Metallische Gegenstände, z. B. Abstandshalter aus Stahl, oder stark magnetische Materialien (z. B. mit Magnetit dotierte Tondichtungen) im Ringraum führen jedoch zu erheblichen Störungen der Messung. Es wird daher von einigen Anbietern auch für den Nachweis derartiger Dichtungsmaterialien verwendet. Die vertikale Auflösung (erfaßbare Schichtdicke) liegt in Abhängigkeit von der Bauart der Sonde und vom Bodenmaterial (Leitfä-

higkeitskontraste) bei einigen Dezimetern. Die gemessene scheinbare Gebirgsleitfähigkeit nähert sich erst bei Schichtdicken von einigen Metern der wahren Leitfähigkeit an (TAYLOR et al., 1989). Sie entspricht somit den klassischen elektrischen Verfahren im offenen Bohrloch (Normalen) und erreicht bei weitem nicht die vertikale Auflösung einer FEL-Messung im offenen Bohrloch. Die Messungen sind primär im wassergesättigten Bereich sinnvoll. Die Interpretierbarkeit in trockenen oder teilgesättigten Bereichen ist von anderen Untersuchungsergebnissen abhängig.

Das IES-Log ermittelt die scheinbare elektrische Leitfähigkeit (Einheit: mmho bzw. S/m) des Gebirges. Zur leichteren Vergleichbarkeit mit konventionellen EL, die den scheinbaren elektrischen Widerstand (Einheit: Ωm) bestimmen, werden die Meßwerte mit invertierter Achse (Zunahme der Werte nach links) aufgetragen.

In den USA sind portable IES-Log-Einrichtungen für den Altlastenbereich, insbesondere Erkundung im Umfeld von Altablagerungen, Stand der Technik (z. B. TAYLOR et al., 1989). In Deutschland wird das Verfahren bislang nur in Verbindung mit konventionellen Logginganlagen angeboten.

Das IES ist als Meßeinrichtung für 1-Loch-Tracerversuche mit konzentrierten Salzlösungen verwendet worden, um das Durchlässigkeitsprofil eines Grundwasserleiters zu bestimmen (TAYLOR & MOLZ, 1990).

2.3 Exkurs: Das Hamburger Dry Hole-Experiment

2.3.1 Allgemeines

Im Grundwasserunterstrom von Altlasten, insbesondere Altablagerungen, treten vielfach Wässer mit gegenüber den natürlichen Verhältnissen deutlich erhöhten elektrischen Leitfähigkeiten

auf. Dieser Umstand wird zur Kartierung von Kontaminations-„Fahnen“ mit Hilfe von Verfahren der Geoelektrik (geoelektrische Kartierung, geoelektrische Sondierung, diverse Verfahren der Elektromagnetik) genutzt. Bislang wenig verbreitet ist dagegen in Deutschland das Verfahren der Erkundung und Überwachung der vertikalen Schadstoffverteilung bzw. -ausbreitung mittels elektromagnetischer Vermessungen (Induktions-Log) in filterlosen Grundwassermeßstellen, sogenannten „Dry holes“ (MACK, 1993; WILLIAMS et al., 1993; CHURCH & GRANATO, 1996).

Im Rahmen eines gemeinsamen Demonstrationsvorhabens haben daher die Unternehmen

Ivers Brunnenbau GmbH, Osterrönfeld

CONSULAQUA Hamburg Beratungsgesellschaft mbH, Hamburg

Hydrogeologisches Büro Christian A. Gillbricht, Hamburg

an einem geeigneten Standort im Abstrom einer Hausmüllablagerung im Herbst 1997 eine Dry hole-Meßstelle eingerichtet und vergleichende Messungen an dieser Meßstelle und einer benachbarten Grundwassermeßstelle der Umweltbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg durchgeführt (GRUHN & GILLBRICHT, 1998).

Ziel der Messungen war es

1. das Verfahren unter ortsüblichen Randbedingungen zu erproben und einer größeren Fachöffentlichkeit bekannt zu machen,
2. aus den Erfahrungen der Erprobung allgemeine Regeln für die Einsetzbarkeit des Verfahrens und Empfehlungen für seine praktische Durchführung abzuleiten.

2.3.2 Methoden

Bohrarbeiten

Die Versuchsbohrung wurde nach dem Verfahren der konventionellen Trockenbohrung im Bohrdurchmesser 273 mm niedergebracht.

Der Ausbau erfolgte mit PVC-Rohren des Ausbaudurchmessers DN 65 mit Doppelmuffenverbindungen (Fabrikat SBF Norip). Der Ringraum wurde mit feinem Filtersand (Körnung 0,3 bis 0,8 mm) verfüllt. Auf Höhe geringer durchlässiger Schichten (Torfe) wurden Tondichtungen eingebracht. Zur Minimierung der Beeinflussung der Umgebung durch vertikale Strömungen in der Ringraumverfüllung wurden zusätzlich auch im Bereich gut durchlässiger Schichten (Sande und Kiese) mehrere Tonsperren eingebaut. Als Tonmaterial wurde ein einfaches handelsübliches Fabrikat (Compactonit) verwendet, das weder bezüglich seiner γ -Aktivität, noch seiner elektromagnetischen Eigenschaften durch spezielle Zusätze verändert ist.

Geophysikalische Meßverfahren

Es wurden Vermessungen mit dem γ -Log (GR) und dem Induktions-Log (IES) durchgeführt. In der Vergleichsmeßstelle waren zu einem früheren Zeitpunkt außerdem zur Überprüfung des baulichen Zustands γ - γ -Log, FEL, Temperatur- und Salinitäts-Log gemessen worden.

Versuchsstandort

Als Versuchsstandort wurde eine geschlossene Hausmülldeponie im Stadtgebiet der Freien und Hansestadt Hamburg gewählt. Für die Wahl des Standorts waren folgende Gründe ausschlaggebend:

1. Es liegen aus früheren Untersuchungen der Umweltbehörde geophysikalische Vermessungen einschließlich Induktions-Logs von mehreren Grundwassermeßstellen aus der Umgebung vor.
2. Aus chemischen Untersuchungen der Umweltbehörde ist bekannt, daß das Grundwasser im Abstrom der Altablagerung eine deutlich erhöhte elektrische Leitfähigkeit aufweist.
3. Aus den chemischen Untersuchungen ist ferner bekannt, daß das Grundwasser keine stark gesundheitsgefährdenden Schad-

stoffe enthält. Bei den Feldarbeiten für dieses Demonstrationsvorhaben brauchten daher keine erhöhten Anforderungen an den Arbeitsschutz gestellt zu werden.

4. Der durch das Deponiesickerwasser beeinflusste oberste Grundwasserleiter reicht von der Geländeoberkante bis ca. 20 m Tiefe, so daß die Errichtung einer Dry hole-Meßstelle kostengünstig machbar war.
5. Im Abstrom der Hausmülldeponie befinden sich Flächen der öffentlichen Hand mit geringer Nutzungsintensität, auf denen problemlos Meßeinrichtungen hergestellt und für einige Zeit erhalten werden können.
6. Es liegen ausreichende Kenntnisse der hydrogeologische Randbedingungen vor.

Der Standort der Versuchsbohrung B1 wurde neben der bestehenden Meßstelle A1 im Grundwasserunterstrom gewählt. Aus dieser Meßstelle liegt ein Induktions-Log von 1995 vor, das eine deutliche hydrochemische Differenzierung über die Tiefe anzeigt. Da die vorhandene Meßstelle eine fast vollkommene Verfilterung des Grundwasserleiters aufweist und daher eine Beeinflussung der hydrochemischen Verhältnisse in ihrem nächsten Umfeld durch Vertikalströmungen im Brunnenbauwerk nicht ausgeschlossen werden kann, wurde der Bohransatzpunkt ca. 6 m quer zur Grundwasserströmungsrichtung entfernt festgelegt.

Ergebnisse

Verfahrensspezifische Ergebnisse

Das Dry hole-Verfahren hat sich unter den Einsatzbedingungen bewährt. Weder der relativ große Bohrdurchmesser noch die wechselhafte Ringraumverfüllung haben einen wesentlichen Einfluß auf die Meßergebnisse. Der Schichtenaufbau kann zuverlässig überprüft und die Angaben des Bohrprofils damit berichtigt werden (Abb. 1). Torfe und torfhaltige Sande sind durch ihre

erhöhte Porosität gut von den unter- und überlagernden reinen Sanden zu unterscheiden.

Innerhalb der Sande sind Leitfähigkeitsunterschiede von ca. 50 % festzustellen. Die leicht erhöhten Leitfähigkeiten im unteren Profilabschnitt sind möglicherweise zum Teil substratspezifisch (mineralogische Zusammensetzung und Porosität), können aber zum Teil auf erhöhte Lösungsgehalte zurückgeführt werden.

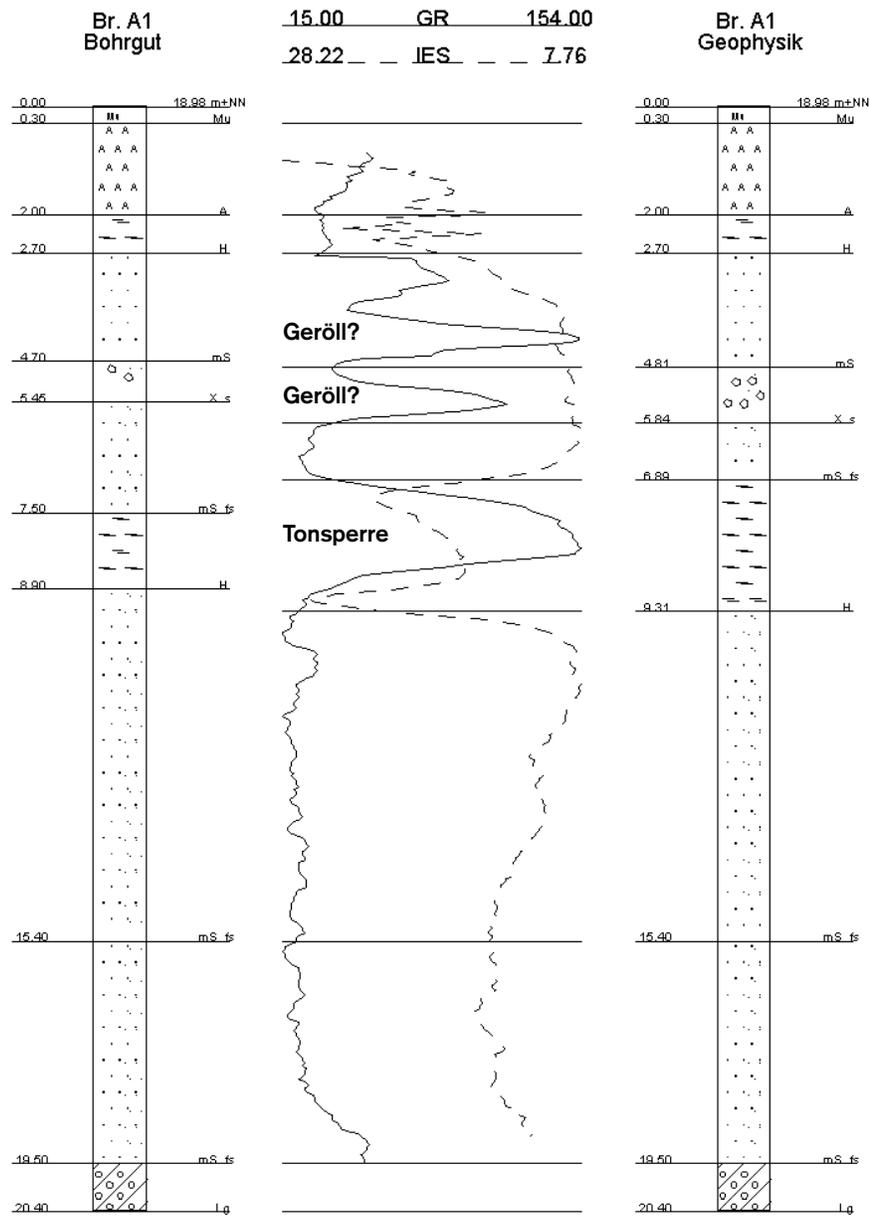
In den obersten 4 m der Bohrung ist die Messung gestört. Hierfür sind wahrscheinlich metallische Gegenstände in der Auffüllung (Bauschutt) und nicht näher bestimmbare Effekte im Ringraum verantwortlich zu machen.

Auffällig sind die unterschiedlichen Amplituden der Messungen von 1995 und 1997 in Meßstelle A1. Diese dürften auf die unterschiedliche Bauform der eingesetzten Sonden zurückzuführen sein. Für eine quantitative Auswertung der Messungen sind daher weitergehende Eichungen der Meßsysteme erforderlich.

Standortspezifische Ergebnisse

Gegenüber der Vermessung 1995 zeigt die neue Vermessung der Meßstelle A1 ein abweichendes Bild der elektrischen Leitfähigkeiten. Diese Unterschiede sind zumindest zum Teil auf die unterschiedliche Bauform der verwendeten Sonden zurückzuführen.

Während die Leitfähigkeit in den Torfen (7–9 m u. GOK) bedingt durch ihre große Porosität und möglicherweise zusätzlich elektrisch wirksame mineralische Komponenten (Tonminerale) deutlich erhöht ist, weisen die Sande eine einheitlichere elektrische Leitfähigkeit auf. Die Leitfähigkeitsunterschiede innerhalb des Wasserleiters (ca. 50 %) können durch die Variabilität der Porosität und geringe Leitfähigkeitsunterschiede der Porenflüssigkeit erklärt werden. Dafür spricht auch das Ergebnis aus der neuen



CAOsoft, 1998

Abb. 1a: Geophysikalische Meßergebnisse und Interpretation Grundwassermeßstelle A1

Dry hole-Meßstelle B1. In dieser ist eine Leitfähigkeitsänderung an einen Materialwechsel bei ca. 15 m u. GOK gekoppelt. Insgesamt

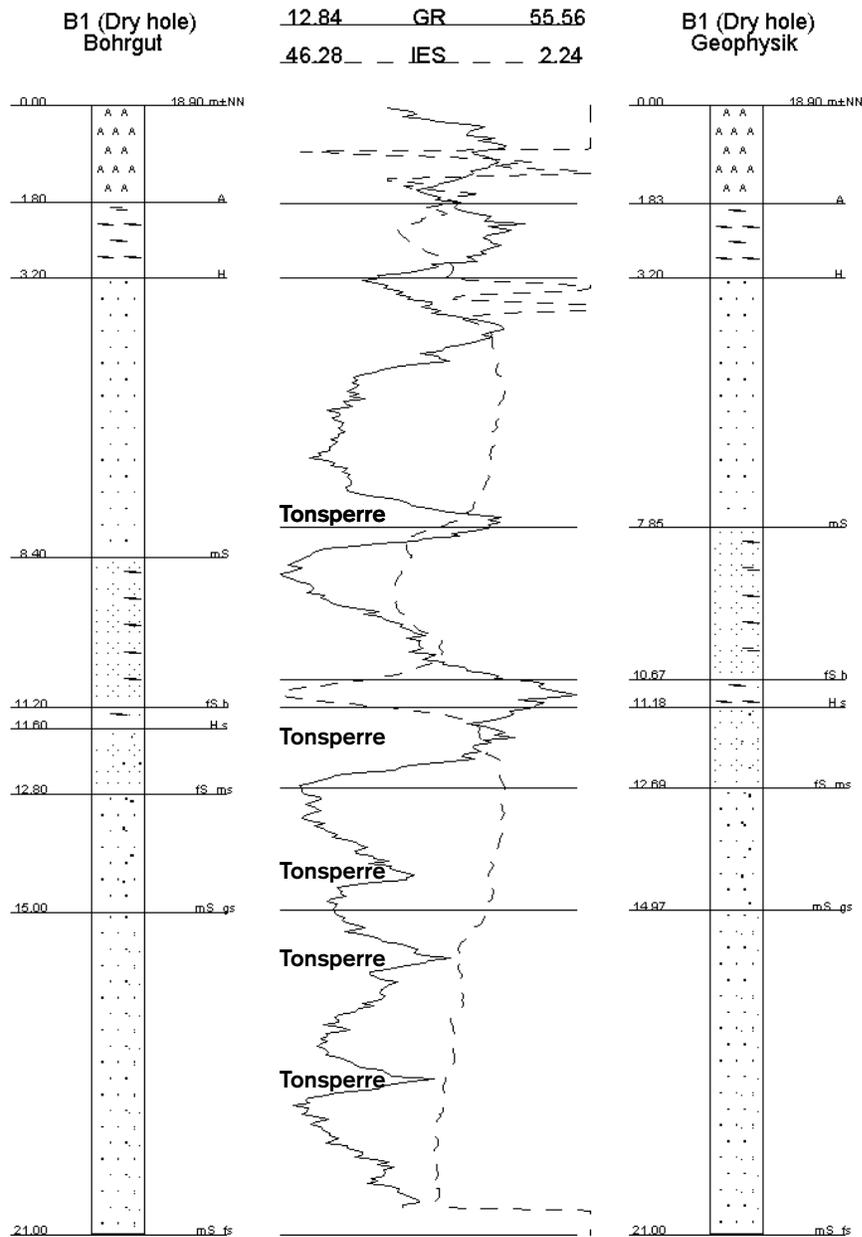


Abb. 1b: Geophysikalische Meßergebnisse und Interpretation Bohrung B1 (Dry hole)

samt sind die Ergebnisse aus der bestehenden voll verfilterten Meßstelle und dem neu errichteten Dry hole so ähnlich, daß

eine relevante vertikale Strömung mit Schadstofftransport in der Meßstelle A1 als unwahrscheinlich anzusehen ist.

1997 ist also entsprechend den Verhältnissen 1995 eine schwache hydrochemische Schichtung innerhalb des Wasserleiters wahrscheinlich. Auf Grund der Ergebnisse aus dem Dry hole B1 entspricht diese Schichtung ungefähr der geologisch vorgegebenen Schichtung. Die hydrochemischen Verhältnisse in der Meßstelle A1 haben sich insgesamt bei den bisherigen chemischen Untersuchungen (1990, 1993 und 1997) nicht grundlegend geändert.

Einsatzbereiche des Dry hole-Verfahrens

Die Verwendung ausgebauter Bohrlöcher ohne Filterstrecke in Verbindung mit Induktions-Log-Messungen ist überall dort eine mögliche Maßnahme zur Erkundung oder Überwachung des Grundwassers, wo eine erhebliche vertikale Differenzierung des Gesamtlösungsgehaltes erwartet wird. Dies gilt insbesondere im nahen Abstrom von Altablagerungen.

Die wesentlichen Vorteile des Verfahrens sind:

1. Überprüfung der Schichtenverzeichnisse (in Verbindung mit γ -Logs und weiteren Verfahren),
2. kontinuierliche Erhebung der Grundwasserqualität (Gesamtlösungsgehalt) über den gesamten Grundwasserleiter,
3. geringe Bohrdurchmesser ausreichend,
4. keine Verunreinigung des Meßgerätes,
5. kein Anfall von ggf. kontaminiertem Probenwasser.

Dadurch kann das Verfahren sowohl in der Erkundung als auch Überwachung eingesetzt werden.

Grenzen des Verfahrens ergeben sich in folgenden Fällen:

1. starke Heterogenität des geologischen Substrats, z. B. ausgeprägte Wechsellagerungen,
2. geringe Leitfähigkeitsunterschiede des Porenwassers.

In der **Erkundung** können Induktions-Logs in Dry holes zur Festlegung von Filterstrecken zur tiefengenauen Probenahme eingesetzt werden. Als Modifikation ist es hierbei möglich, statt eines Dry holes die Aufschlußbohrung zu einer regulären Grundwasserbeschaffenheitsmeßstelle mit einer Filterstellung im Bereich der Aquifersohle auszubauen und die weiteren Filterstellungen nach den Ergebnissen des Induktions-Logs festzulegen. Dadurch wird es möglich, mit einer geringen Zahl kurzer Filter die entscheidenden Bereiche eines Aquifers in der Probenahme zu erfassen.

In Bereichen, in denen mit besonders gefährlichen Stoffen im Grundwasser zu rechnen ist, kann die Zahl der Bohrungen und Probenahmen mit den damit verbundenen Maßnahmen zum Arbeitsschutz und zur Entsorgung anfallender Stoffe minimiert werden.

In der **Überwachung** können Induktions-Logs in Dry holes als kostengünstige Wiederholungsmessungen, ggf. in Verbindung mit entsprechenden Verfahren der Oberflächengeophysik, eingesetzt werden. Der Einsatz portabler Sondensysteme würde gegenüber aufwendigen Meßfahrzeugen weitere Ersparnisse bringen.

Abwandlungen des Verfahrens

Das in diesem Demonstrationsvorhaben eingesetzte Bohrverfahren (konventionelle Trockenbohrung) ist relativ kostenintensiv und für die Herstellung eines Dry holes nicht in allen Fällen erforderlich. Je nach örtlichen Gegebenheiten können die Bohrlöcher auch als Spülbohrungen oder Hohlbohrschneckenbohrungen hergestellt werden. Marktgängige Induktions-Log-Sonden können im Regelfall in Verrohrungen ab DN 50 eingesetzt werden.

2.4 Passive kernphysikalische Verfahren

γ -Log (GR)

Die natürliche γ -Aktivität des Gebirges beruht überwiegend auf ^{40}K , das in Glimmer, Tonmineralen und Feldspäten enthalten ist, sowie den Isotopen der Uran- und Thorium-Zerfallsreihen (OELSNER, 1997). In vielen Fällen ist die γ -Aktivität ein Maß für den Tongehalt des Gebirges (KEYS, 1997). Es ist jedoch immer ein Abgleich mit dem Probenmaterial erforderlich, da in tertiären Sanden und daraus abgeleiteten Sedimenten des Quartärs zum Teil erhebliche Glimmergehalte vorliegen und in manchen „unreifen“ Sedimenten des Quartärs nicht verwitterte Feldspäte (Kies- oder Geröllagen mit Gneisen und Graniten, Sande mit Feldspäten aus physikalisch verwitterten Graniten und Gneisen) enthalten sind. Kaolinitische Tone weisen eine geringe Eigenstrahlung auf.

Die Messung der natürlichen γ -Aktivität des Gebirges wurde schon 1939 neben den elektrischen Widerstandsverfahren in die Bohrlochvermessung eingeführt (MEINHOLD, 1989) und ist damit eines der ältesten Verfahren.

Grundsätzlich sollten alle Messungen mit radioaktiven Verfahren zur Erkundung des Gebirges vor dem Ausbau des Bohrlochs, d. h. im offenen Loch, ausgeführt werden. Auch innerhalb einer Schutzverrohrung aus Stahl, z. B. bei Aufschlußbohrungen im Trockenbohr- oder Hohlbohrschneckenverfahren, lassen sich aussagekräftige γ -Logs aufzeichnen. Zur Verbesserung der Messungen kann in diesen Fällen die Verwendung eines Dezentralizers (einseitiger Kaliberarm bzw. Abstandshalter, der die Sonde an die Verrohrung anlegt) dienen. Für quantitative Auswertungen bzw. den Vergleich mit Messungen aus unverrohrten Bohrlochern ist die Strahlungsdämpfung empirisch zu bestimmen.

Die Messung der natürlichen γ -Strahlung im ausgebauten Loch dient zur Überprüfung des Schichtenverzeichnisses und der

Lage von Tonsperren. Das γ -Log reagiert stark auf das Ringraumfüllmaterial, so daß bei Einbau strahlungsaktiver Tonsperren über das dahinter liegende Gebirge keine Aussagen möglich sind. Es kann daher auch zum Nachweis von Tondichtungen in Brunnen und Grundwassermeßstellen verwandt werden. In diesen Fällen ist es günstig, wenn eine Vermessung des offenen Lochs zum Vergleich vorliegt. In den meisten Fällen ist eine Kombination mit anderen Verfahren (γ - γ -Log, N-N-Log) sinnvoll.

Spektral-Gamma

Während das GR die Gesamtaktivität bestimmt, wird mit Hilfe des Spektral-Gamma-Logs eine Aufteilung der Aktivität auf die drei Hauptquellen ^{40}K , Uran-Reihe und Thorium-Reihe vorgenommen. Mit diesem Verfahren lassen sich weitergehende geologische, insbesondere stratigrafische, Aussagen gewinnen. Das Verfahren wird aus Kostengründen bislang nicht standardmäßig eingesetzt.

Im ausgebauten Loch kann das Spektral-Gamma beim Nachweis von Dichtungsmaterialien ergänzend eingesetzt werden, insbesondere wenn diese mit Monazit-Sand (Thorium-haltig) dotiert sind. Während das GR bei starker Hintergrundstrahlung des Gebirges, z. B. Tone oder granitische Gerölle, auch stark strahlende Tonsperren nicht zuverlässig nachweist, sind diese ggf. durch ihr spezifisches γ -Spektrum zu identifizieren. Spektral-Gamma-Sonden sind ab einem befahrbaren Bohrungsdurchmesser von 100 mm einsetzbar.

2.5 Aktive kernphysikalische Verfahren

γ - γ -Log (Dichte-Log), Ringraumkontroll-Log (RRK)

Das γ - γ - oder Dichte-Log bestimmt die Gesteinsdichte des anstehenden Gebirges. Gemessen wird die Dämpfung einer künstli-

chen γ -Strahlenquelle (Cäsium-Präparat). Hierbei handelt es sich um einen radioaktiven Strahler, der strahlenschutzrechtlichen Bestimmungen unterliegt und in einer Abschirmung aus Blei transportiert werden muß.

Die Geometrie der Sonde (relative Lage von Strahlenquelle und Detektor) ist meist so gewählt, daß durch zwei Detektoren im unterschiedlichen Abstand (*spacing*) vornehmlich das nähere und weitere Umfeld des Bohrlochs erfaßt werden. Dadurch kann qualitativ und ggf. durch Modellrechnungen auch quantitativ der Einfluß des Bohrlochs bei der Interpretation des Gebirges oder der Einfluß des Gebirges auf die Interpretation der Ringraumfüllung eines ausgebauten Lochs abgeschätzt werden. Die Sonde wird in vielen Fällen durch einen einseitigen Kaliberarm bzw. Abstandshalter an die Bohrlochwand angedrückt.

Im offenen Loch dient das γ - γ -Log insbesondere zum Nachweis von Torfen und Braunkohlen, die bei den klassischen Methodenkombinationen von elektrischen Verfahren und γ -Log oft nicht eindeutig erkennbar sind, sowie zur Unterscheidung von Schluffen und Geschiebemergeln. Unter Verwendung einer plausiblen Annahme für die Korndichte kann im wassergesättigten Bereich die Gesamtporosität geschätzt werden.

Im ausgebauten Loch dient das γ - γ -Log (auch unter den Bezeichnungen Ringraumkontroll-Log oder Ringraumdichte-Log) der Ermittlung der Schüttdichte des Ringraumfüllmaterials und damit insbesondere der Bestimmung der Lage von Tondichtungen oder Zementationen. Brücken- und Hohlräumbildungen treten als auffällige Anomalien hervor (YEARSLEY et al., 1991).

Neutron-Neutron-Log (N-N-Log, Porositätslog)

Das Neutron-Neutron-Log (N-N-Log) dient der Ermittlung des Wassergehaltes bzw. der Porosität in wassergesättigten Böden. Gemessen werden die gebremsten (thermischen) Neutronen

nach Anregung mit einer künstlichen Neutronen-Strahlenquelle (Americium-Beryllium-Präparat oder Californium-Präparat). Hierbei handelt es sich um einen „harten“ Strahler, der strahlenschutzrechtlichen Bestimmungen unterliegt und in einer Abschirmung aus Paraffin transportiert werden muß. In neuerer Zeit sind elektronische Neutronenquellen verfügbar, die keine ständige Gefährdung darstellen (sogenanntes Impuls-N-N-Log, CLAUSS & SCHÄFER, 1995). Diese sind zur Zeit noch nicht allgemein verfügbar, werden sich aber schon auf Grund der Sicherheitsaspekte voraussichtlich in den nächsten Jahren durchsetzen.

Die Geometrie der Sonde (relative Lage von Strahlenquelle und Detektor) ist meist so gewählt, daß durch zwei Detektoren im unterschiedlichen Abstand (*spacing*) vornehmlich das nähere und weitere Umfeld des Bohrlochs erfaßt werden. Dadurch kann qualitativ und ggf. durch Modellrechnungen auch quantitativ der Einfluß des Bohrlochs bei der Interpretation des Gebirges oder der Einfluß des Gebirges auf die Interpretation der Ringraumfüllung eines ausgebauten Lochs abgeschätzt werden. Die Sonde wird in vielen Fällen durch einen einseitigen Kaliberarm bzw. Abstandshalter an die Bohrlochwand angedrückt.

Im offenen Loch dient das N-N-Log zur Abschätzung der Porosität und Wassersättigung des Gebirges. Da das N-N-Log allgemein auf Wasserstoff-Atome reagiert, zeigen Feststoffe mit hohem Wasserstoffanteil (Tonminerale, Kohlen) eine hohe scheinbare Porosität an, die durch empirische Korrekturen berichtigt werden muß. Die Aussagen des N-N-Logs lassen sich durch Kombination mit dem γ - γ -Log deutlich verbessern (JORGENSEN, 1989).

In ausgebauten Bohrungen dient das N-N-Log insbesondere der Bestimmung der Lage von Tondichtungen oder Zementationen.

2.6 Sonstige Verfahren

Kaliber-Log (CAL)

Das Kaliber-Log dient der Ermittlung des mittleren Durchmessers des Bohrlochs bzw. der Rohrtour. Gemessen wird die mechanische Abspreizung von ein bis vier Kaliberarmen.

Im offenen Loch gibt das CAL in Verbindung mit anderen Verfahren wichtige Informationen über den petrographischen Aufbau des Gebirges sowie Hinweise für den Ausbau. Quantitative Auswertungen der übrigen Meßverfahren sind nur möglich, wenn auf der Grundlage von CAL-Messungen eine Korrektur auf Bohrlocheffekte durchgeführt wird.

Im ausgebauten Loch ist das CAL nur in Ausnahmefällen notwendig, insbesondere wenn massive Beschädigungen bzw. Verformungen der Rohrtour erwartet werden.

Temperatur (TEMP)

Die Messung der Temperatur erfolgt regelmäßig zusammen mit der Salinität (SAL) (MICHALSKI, 1989). Entsprechend stehen außer Sonden für Logginganlagen auch portable Geräte zur Verfügung.

Im offenen Loch gibt das Temperatur-Log Hinweise auf den Zutritt von Wasser aus dem Gebirge. Hierfür ist es Voraussetzung, daß vor der Messung die Spülung einige Zeit in Ruhe geblieben ist. Thermische Effekte des umgebenden Gebirges, z. B. Deponien oder Bergehalden, sind ebenfalls nachzuweisen.

Für das ausgebaute Loch gilt derselbe Einsatzbereich wie für das offene Loch. Insbesondere können in Verbindung mit dem SAL Fremdwasserzutritte durch Undichtigkeiten im Aufsatzbereich nachgewiesen werden.

Flowmeter

Die Messung der Strömung im Bohrloch kann unter „Ruhe“bedingungen oder mit Betrieb einer Pumpe erfolgen. Damit lassen sich Bereiche des Wasserzutritts und ggf. -austritts feststellen. Im Lockergestein können Flowmetermessungen naturgemäß nur im ausgebauten Loch (Brunnen bzw. Grundwassermeßstelle) ausgeführt werden.

Die marktgängigen Flowmeter-Sonden arbeiten mechanisch nach dem Prinzip des Flügelrades. Die damit erreichbaren Meßgenauigkeiten liegen üblicherweise im Bereich von einigen cm/s. Besonders empfindliche Geräte können einige mm/s anzeigen und sind damit in der Lage unter bestimmten Bedingungen auch Ruhestromungen nachzuweisen (HUFSCHMIED, 1983). In der Praxis sind die angebotenen Flowmeter nur für Bedingungen mit Betrieb einer Pumpe ausgelegt.

Flowmeter-Logs werden üblicherweise im Rahmen des Abnahmepumpversuchs bei Wasserwerksbrunnen gefahren und erlauben in Verbindung mit der hydraulischen Auswertung des Pumpversuchs (RADMANN & GILLBRICHT, 1997) Aussagen über die bauliche und hydraulische Beschaffenheit des Brunnens. Treten zu einem späteren Zeitpunkt hydraulische Probleme, insbesondere zunehmende Wasserspiegelabsenkungen, am Brunnen auf, werden Wiederholungsmessungen des Flowmeter-Logs für die Feststellung veränderter Filterabschnitte herangezogen. An diesen Filterabschnitten setzen dann gezielt Maßnahmen zur Brunnenregenerierung an (SMITH, 1995). Daneben lassen sich Aussagen über die Durchlässigkeitsverteilung (Schichtung) des Grundwasserleiters gewinnen (MOLZ et al., 1989).

In neuerer Zeit sind hoch empfindliche Flowmeter-Sonden mit nicht mechanischen Meßprinzipien kommerziell verfügbar geworden. Diese können auch im Bereich unterhalb 1 mm/s messen und ermöglichen es damit, auch unter den Bedingungen des norddeutschen Flachlandes auftretende Ruhestromungen in

Brunnen nachzuweisen. Diese können insbesondere wegen des Transports von Schadstoffen über Brunnen mit langen Filterstrecken (über 5 m) in bislang nicht verunreinigte Schichten von Bedeutung sein. Gegenwärtig sind für die Messung von Ruhestromungen in Europa Meßsysteme nach dem Heat-Pulse-Prinzip (Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Wärmeimpulses) in Verbindung mit gängigen Vermessungsgeräten im Einsatz (NILSSON et al., 1995). Modernere Geräte, die nach dem Prinzip des induktiven Durchflußmessers arbeiten (YOUNG & PEARSON, 1995; MOLZ et al., 1994), sind dagegen bisher nur in den USA eingesetzt worden. Sie arbeiten als Einzelgerät unabhängig von normalen Bohrlochvermessungsapparaturen. Für andere Meßprinzipien (Laser-Doppler, Ultraschall-Doppler) liegen bisher nur Prototypen vor.

Magnetik-Log (MAL)

Das Magnetik-Log mißt die magnetische Suszeptibilität bzw. die relative Änderung der Suszeptibilität des Gebirges. Diese wird wesentlich von ferromagnetischen Schwermineralen, insbesondere Magnetit, geprägt. In quartären Sedimenten sind mit dem MAL im Regelfall keine sinnvollen geologischen Aussagen zu treffen (BAUMAN et al., 1994).

Im ausgebauten Loch wird das MAL zum Nachweis von Tonsperrern einiger Fabrikate verwendet (ZSCHERPE & STEINBRECHER, 1997).

Vertikalität

Die Messung der Abweichung der Bohrlochachse bzw. der Achse von Brunnen oder Grundwassermeßstellen von der Vertikalen spielt in der Hydro- und Umweltgeologie eine untergeordnete Rolle, da die Abweichungen der „flachen“ Bohrungen in der Regel gering sind. Sie wird meistens in ausgebauten Bohrungen (Brunnen) angewandt, wenn erhebliche bauliche Mängel vermu-

tet werden oder nachgewiesen sind. Insbesondere erfolgen Vertikalitätsmessungen in der Vorbereitung von Überbohrungen schadhafter Brunnen.

Die marktgängigen Sonden zur Bestimmung der Abweichung der Bohrlochachse von der Vertikalen verwenden zur Messung der Himmelsrichtung der Abweichung einen integrierten Magnetkompaß. Diese Messungen sind daher nicht in Stahlausbauten möglich.

Fernseh-Befahrung (TV-Log)

Das TV-Log gehört nicht zu den geophysikalischen Verfahren. Es wird daher im Regelfall auch von anderen, hierauf spezialisierten, Unternehmen angeboten. Bei manchen Aufgabenstellungen, insbesondere bei der baulichen Überprüfung und/oder Sanierung von Brunnen oder Grundwassermeßstellen, werden geophysikalische Verfahren häufig mit TV-Logs kombiniert. In diesen Fällen werden sie oft im Rahmen eines gemeinsamen Ausschreibungsverfahrens vergeben (vgl. Abschn. 4). Das Verfahren wird aus diesem Grunde mitbehandelt.

Die Befahrung von Bohrlöchern und Brunnen mit einer Fernsehkamera ist seit den 50er Jahren im Brunnenbau eingeführt (BÖHM, 1957), hat sich aber erst in den 70er Jahren durch Verbilligung der entsprechenden Geräte weiter verbreitet. Farbfernsehsysteme, die auch in 2"-Rohren (50 mm Innendurchmesser) eingesetzt werden können, sind erst in den 90er Jahren Stand der Technik geworden.

Fernsehbefahrungen im offenen Bohrloch sind nur im Festgestein üblich, da hier das Loch ohne stützende (trübe) Bohrspülung standfest ist. Sie dienen insbesondere zur Feststellung bevorzugter Wegsamkeiten, z. B. Klüften oder Karsthohlräumen.

In ausgebauten Bohrungen, d. h. Grundwassermeßstellen oder Brunnen, dient das TV-Log zur Überprüfung des baulichen Zustands. Insbesondere zeigt es:

- Beschädigungen an der Rohrtour (Risse, Brüche, Löcher im Aufsatzrohr, eingedrückte Filterstege),
- Korrosionserscheinungen (Stahlausbau),
- Fremdkörper im Brunnen (abgerissene Pumpen und Steigleitungen),
- Undichtigkeiten an Muffenverbindungen (Verfärbungen, Fällungen durch Fremdwasserzutritt),
- Mikrobiologische Rasen und Fällungen im Filterbereich.

Da auch in ausgebauten Bohrungen vielfach Trübstoffe im Wasser schweben, insbesondere im Brunnen gefällte Eisenverbindungen und mikrobiologische Schleime, ist es oft notwendig oder zur Erzielung guter optischer Bedingungen sinnvoll, den Brunnen vor oder während der Kamerabefahrung klarzupumpen. Ein Klarpumpen während der Befahrung hat den Vorzug, daß Beschädigungen an der Rohrtour durch den Eintrag von mitgerissenen Partikeln oft einfacher zu erkennen sind.

Fernsehbefahrungen werden heute grundsätzlich in dreifacher Weise dokumentiert:

- als schriftliches Protokoll der wesentlichen Sachverhalte,
- als Original-Videoband im VHS-Format,
- als Fotoabzüge (vom Bildschirm vor Ort oder sekundär aus der Aufzeichnung) wesentlicher Sachverhalte.

2.7 Beispiele

In den folgenden Beispielen soll gezeigt werden, wie durch unterschiedliche Meßverfahren Eigenschaften der geologischen Schichten und des Meßstellenausbaus qualitativ und halbquan-

titativ bestimmt werden können. Bei allen Beispielen handelt sich um Grundwassermeßstellen im Stadtgebiet von Hamburg. Die Daten wurden freundlicherweise von der Freien und Hansestadt Hamburg, Umweltbehörde, zur Verfügung gestellt.

Im Beispiel 1 (Abb. 2) handelt es sich um eine Meßstelle auf der Hamburger Geest.

Der bauliche Zustand der Meßstelle wurde mit einem Standardmeßprogramm mit

- γ -Log (GR)
- Induktions-Log (IES)
- FEL
- γ - γ -Log (Dichte-Log, RRK)

überprüft.

An diesem Beispiel ist zu erkennen, daß ein Kies aus kristallinem Material eine ähnlich hohe γ -Strahlung aufweist wie das Tondichtungsmaterial Quellon WP. Eine Überarbeitung des Schichtenverzeichnisses und ein Nachweis von Tonsperren allein mit dem γ -Log ist daher nicht möglich. Zusatzinformationen, insbesondere das IES und die Angaben des Bohrunternehmens, sind zur Interpretation erforderlich.

Im Beispiel 2 (Abb. 3) handelt es sich ebenfalls um eine Meßstelle auf der Hamburger Geest. Der bauliche Zustand der Meßstelle wurde mit demselben Standardmeßprogramm wie im Beispiel 1 überprüft. Das IES zeigt, daß der im Bohrprofil angesprochene Geschiebemergel ca. 24–30 m u. GOK überwiegend sandig ausgebildet ist und damit wahrscheinlich eine nennenswerte hydraulische Leitfähigkeit aufweisen dürfte.

Im Beispiel 3 (Abb. 4) handelt es sich um eine Meßstelle im Elbeurstromtal. Der bauliche Zustand der Meßstelle wurde mit

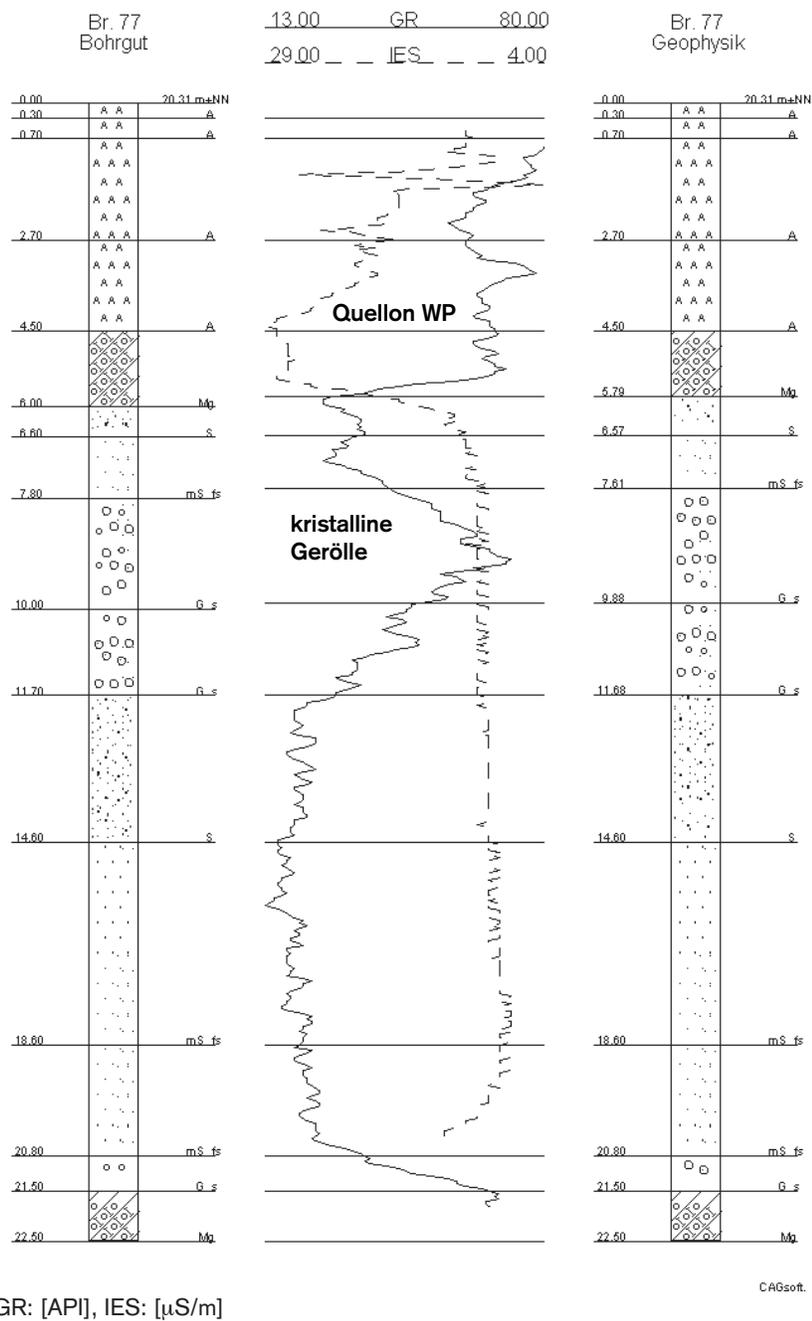


Abb. 2: Geophysikalische Meßergebnisse und Interpretation Meßstelle Br. 77

demselben Standardmeßprogramm wie in Beispiel 1 und 2 überprüft. Interessant ist hier die im IES festgestellte zum Hangen-

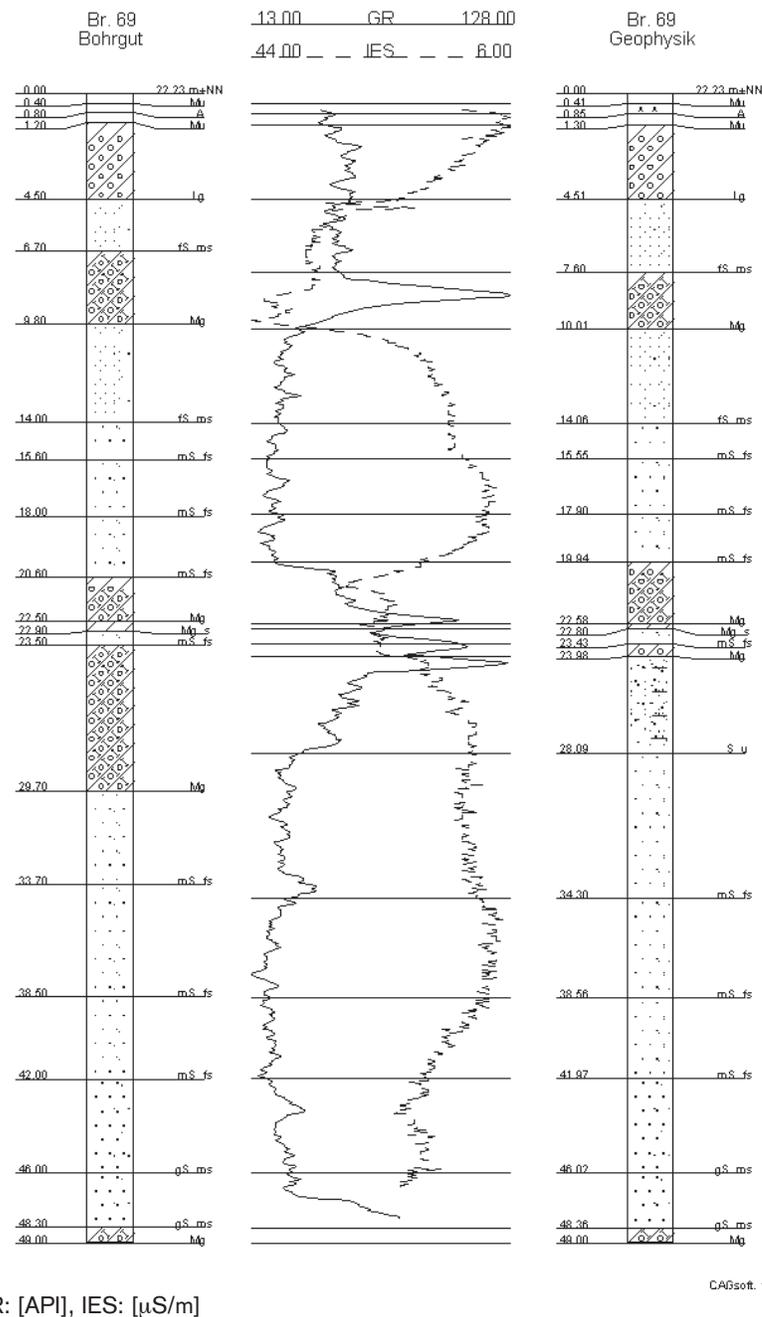
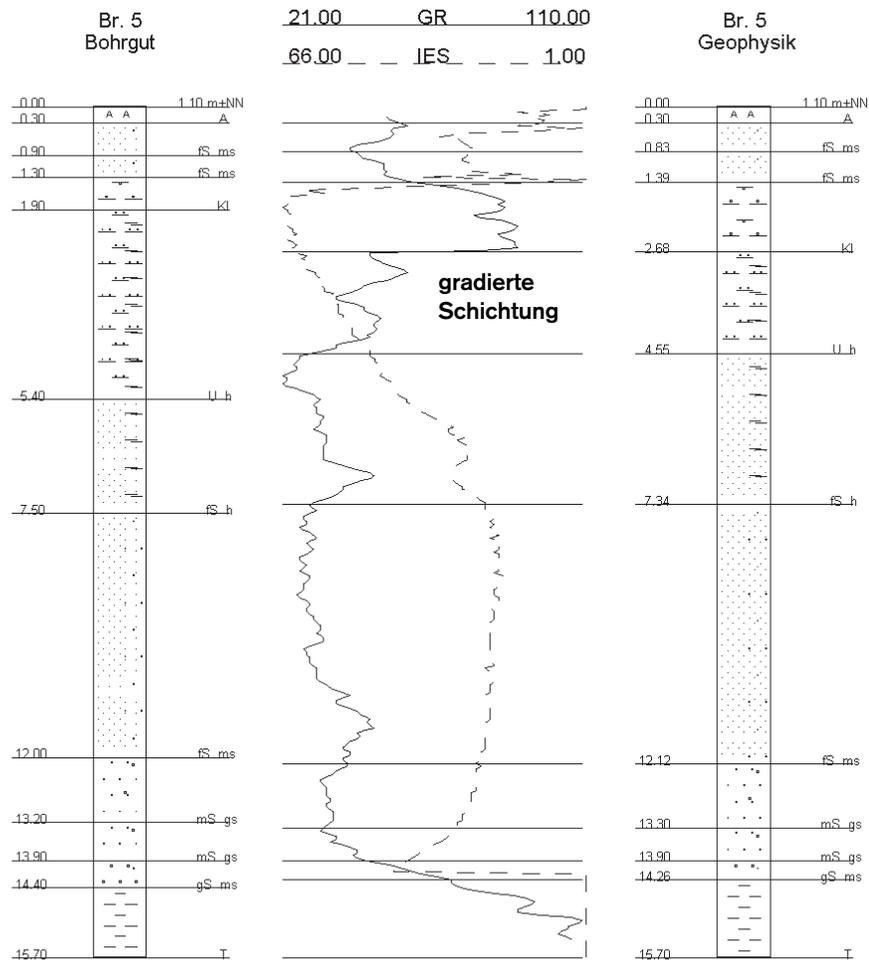


Abb. 3: Geophysikalische Meßergebnisse und Interpretation Meßstelle Br. 69

den zunehmende elektrische Leitfähigkeit der Weichschichten (Schluffe und Torfe), die einen zunehmenden Tongehalt anzeigt.



CAGsoft, 1998

GR: [API], IES: [$\mu\text{S}/\text{m}$]**Abb. 4:** Geophysikalische Meßergebnisse und Interpretation Meßstelle Br. 5

Das γ -Log zeigt dagegen sprunghafte Werteänderungen (Schichtgrenzen) innerhalb dieses Komplexes an. Es ist jedoch stark vom Ringraumfüllmaterial beeinflusst.

Im Beispiel 4 (Abb. 5) handelt es sich ebenfalls um eine Meßstelle im Elbeurstromtal. Der bauliche Zustand der Meßstelle wurde mit demselben Standardmeßprogramm wie in den Beispielen 1 bis 3 überprüft. Für die FEL-Vermessung wurde das

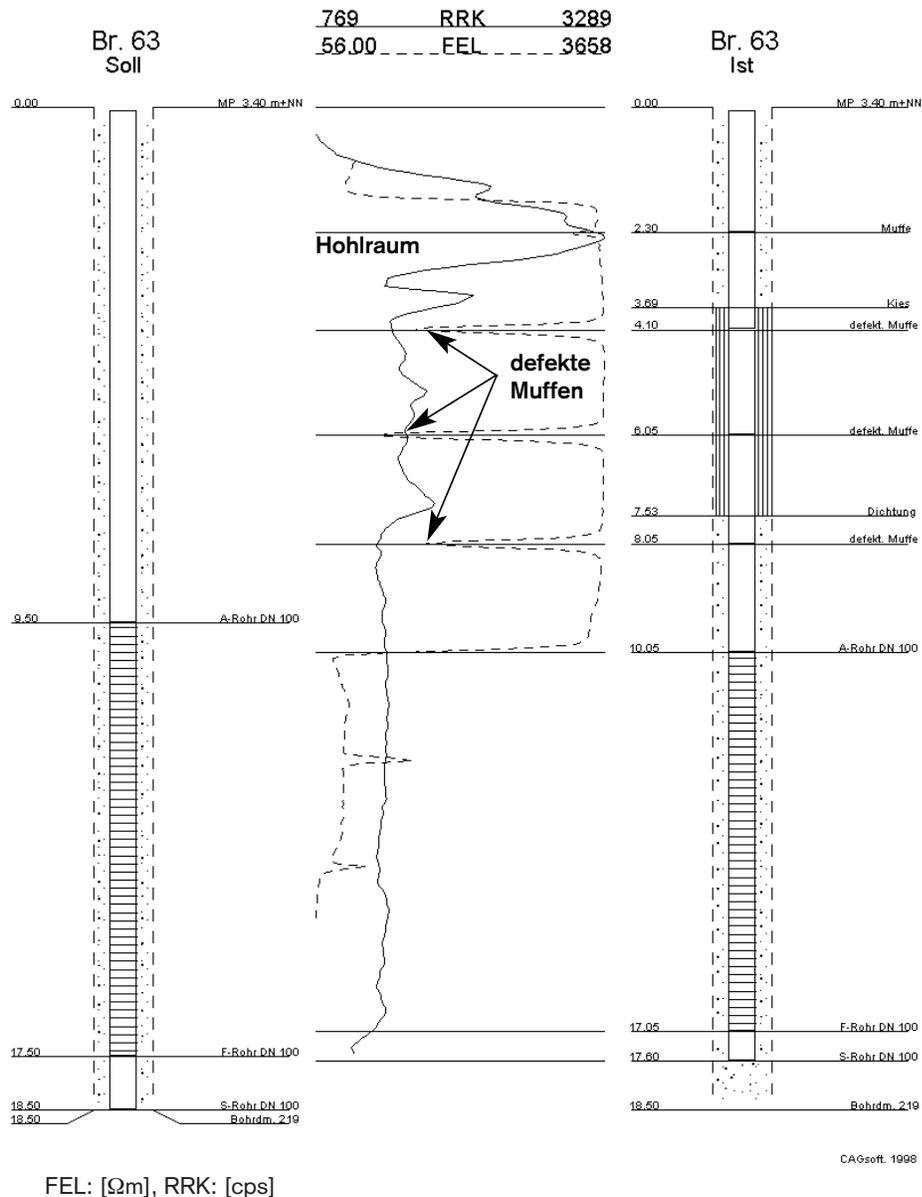


Abb. 5: Geophysikalische Meßergebnisse und Interpretation Meßstelle Br. 63

Aufsatzrohr über einem Packer mit Wasser aus der Meßstelle aufgefüllt, da Wasserzutritte aus der Auffüllung oberhalb des freien Brunnenwasserspiegels möglich sind. Bei dieser älteren Meßstelle im Ausbau mit PVC-Rohren DN 100 zeigen sich massiv undichte Muffenverbindungen. Diese Verhältnisse sind für

Meßstellen dieser Bauart nicht ungewöhnlich. Beim Auffüllen traten erhebliche Wasserverluste auf, obwohl die wassergängigen Muffen innerhalb einer Tonsperre liegen. Das RRK zeigt Hohlraumbildung, vermutlich durch Nachsetzungen einer Ringraumverfüllung mit Bohrgut.

Im Beispiel 5 (Abb. 6) handelt es sich um eine Meßstelle auf der Hamburger Geest. Der bauliche Zustand der Meßstelle wurde mit demselben Standardmeßprogramm wie in den Beispielen 1 bis 4 überprüft. An diesem Beispiel ist der relativ häufig vorkommende Fall zu erkennen, daß sich unter einer Tonsperre durch Setzung des darunter folgenden Kieses ein Hohlraum ausgebildet hat. Der Hohlraum liegt oberhalb des freien Grundwasserspiegels. Die Unterbrechung im FEL beruht darauf, daß oberhalb des Filters der Packer zum Auffüllen gesetzt wurde und bedingt durch die Baulängen von Packer und FEL-Sonde rund 2 m nicht gemessen werden konnten.

Im Beispiel 6 (Abb. 7) handelt es sich um eine Meßstelle im Elbeurstromtal. Der bauliche Zustand der Meßstelle wurde mit demselben Standardmeßprogramm wie in den Beispielen 1 bis 5 überprüft. Zur Ergänzung wurde ein N-N-Log gefahren. Dabei zeigt es sich, daß der zur Zeit übliche Nachweis von Tonsperren mit Hilfe des Dichte-Logs problematisch ist. Unter der Tonsperre (ca. 10,6 m u. GOK) hat sich in der Ringraumschüttung Gas angesammelt, das im γ - γ -Log (Dichte-Log) eine tiefere Lage der Dichtung vortäuscht. Das Gas wird als reduzierte Wassersättigung vom N-N angezeigt. Eine Gasbildung in den den Filterbereich überlagernden Weichschichten (Torfe und humose Schluffe) ist aus der Region bekannt (Sumpfgasbildung).

Daneben zeigt dieses Beispiel Brückenbildungen im Verfüllmaterial (Bohrgut) und undichte Verbindungen im Aufsatzrohr.

Im Beispiel 7 (Abb. 8) handelt es sich um eine Meßstelle auf der Hamburger Geest. Der bauliche Zustand der Meßstelle wurde

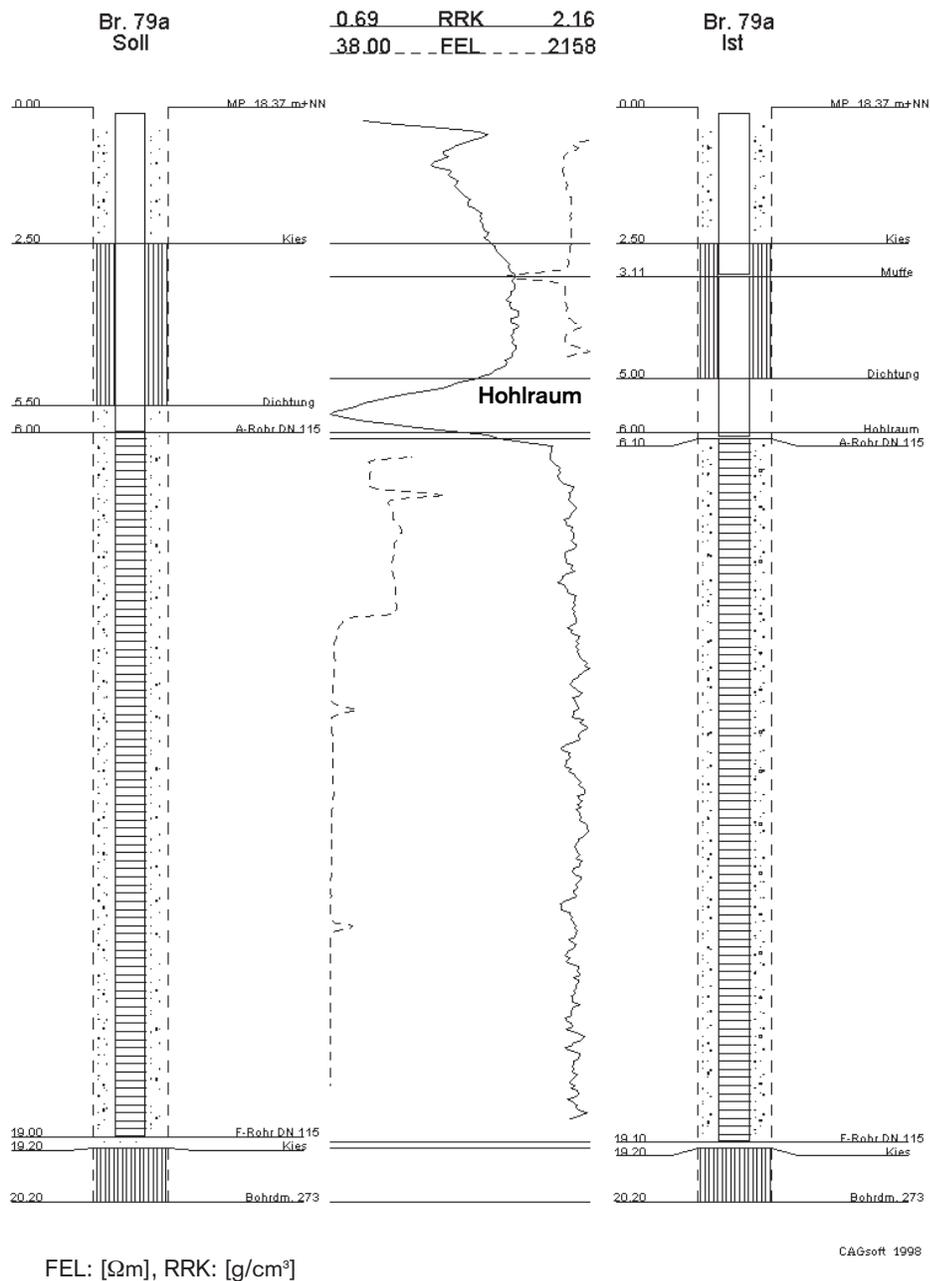
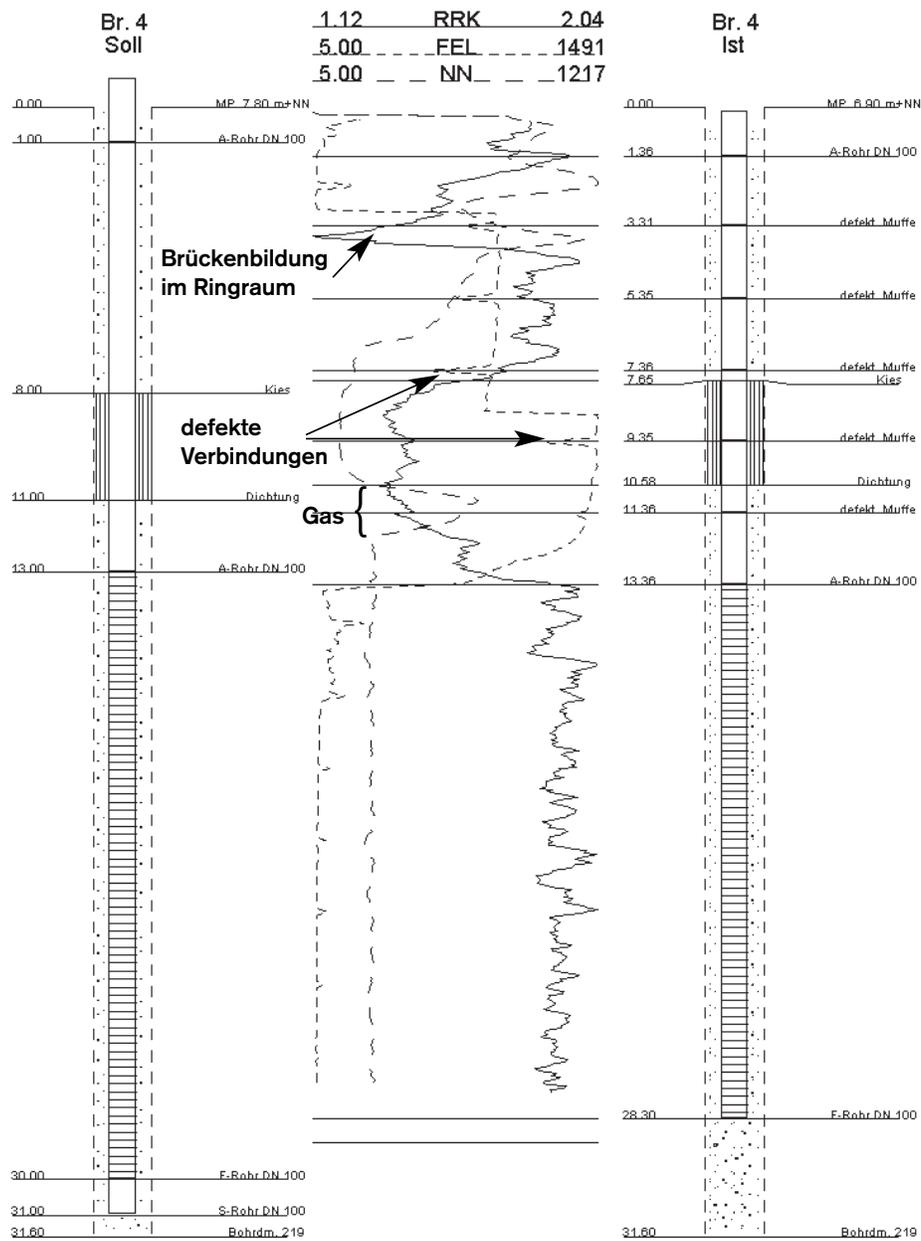


Abb. 6: Geophysikalische Meßergebnisse und Interpretation Meßstelle Br. 79a

mit demselben Standardmeßprogramm wie in den Beispielen 1 bis 6 überprüft. Zusätzlich wurden SAL und TEMP gemessen. Dabei zeigt sich, daß der obere Teil des Filters nicht vom Grund-

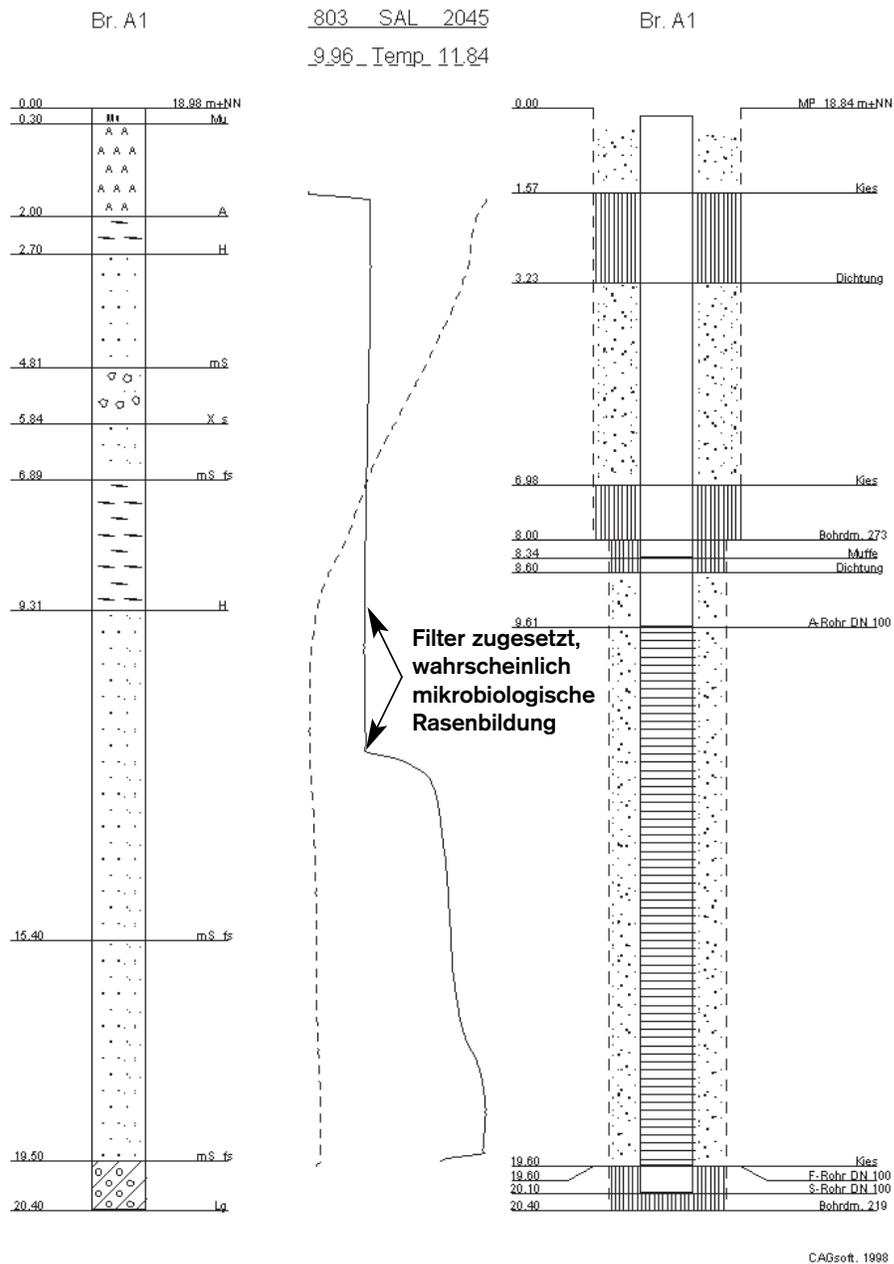


CAGsoft 1998

FEL: [Ωm], RRK: [g/cm^3], NN: [cps]

Abb. 7: Geophysikalische Meßergebnisse und Interpretation Meßstelle Br. 4

wasser durchströmt wird. Während die Temperatur in der Meßstelle durch Wärmeleitung über die gesamte Filterlänge die



SAL: [$\mu\text{S}/\text{cm}$], TEMP: [$^{\circ}\text{C}$]

Abb. 8: Geophysikalische Meßergebnisse und Interpretation Meßstelle Br. A 1

Grundwassertemperatur annimmt, zeigt das SAL einen sprunghaften Anstieg der Leitfähigkeit auf die Leitfähigkeit des Grund-

wassers mehrere Meter unterhalb der Filteroberkante. Das Filter ist in diesem höheren Bereich wahrscheinlich durch mikrobiologische Schleime zugesetzt. Entsprechende Verhältnisse werden bei Kamerabefahrungen häufiger angetroffen. Im vorliegenden Fall dürfte der unmittelbar oberhalb des Filters anstehende Torf die Tendenz zur Bildung mikrobiologischer Rasen verstärken.

3 Planung von Bohrlochmessungen

Im Bereich ingenieurtechnischer Fragestellungen der Hydro- und Umweltgeologie werden geophysikalische Bohrlochvermessungen üblicherweise nach Standardprogrammen abgewickelt. Diese gängige Praxis steht im Widerspruch zu den Anforderungen an alle Erkundungsmaßnahmen, daß diese dem jeweiligen Erkundungsziel sowie den geologischen und technischen Randbedingungen unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte angepaßt werden sollen (KEYS, 1997). Bohrlochvermessungen werden planungsseitig häufig als „Anhängsel“ der Bohrungen gehandhabt. Von ihnen werden keine wesentlichen zusätzlichen, insbesondere auch keine detaillierten Ergebnisse erwartet. In Anbetracht der hohen Fixkosten beim Einsatz geophysikalischer Meßfahrzeuge ist diese Herangehensweise problematisch. Für jede Einzelmaßnahme sollte ein individuell geplantes Meßprogramm erstellt werden. Hierzu ist in mehreren Arbeitsschritten vorzugehen.

1. Definition der Aufgabenstellung der Vermessung

Im ersten Arbeitsschritt ist zu klären, welches die primären Ziele der Vermessung innerhalb des Projektes sind. Danach lassen sich oft bestimmte Verfahrenskombinationen als bewährter Standard bzw. Minimalprogramm festlegen. Beispiele für solche Minimalprogramme für den Bereich der norddeutschen Lockergesteine sind

Aufnahme eines Schichtenprofils in Kombination mit dem Bohrgut aus Spülbohrungen:

Kaliber-Log
 γ -Log
 FEL

Überprüfung des baulichen Zustands einer Grundwassermeßstelle einschließlich ihres Ringraums:

γ -Log
 γ - γ -Log
 FEL

weitere Sonden in Abhängigkeit
 von Besonderheiten des Ausbaus

2. Feststellung von zusätzlich erwünschten Informationen

In vielen Fällen ist es möglich, neben den Hauptuntersuchungsgegenständen im Rahmen der geophysikalischen Vermessung durch weitere Messungen wirtschaftlich zusätzliche Informationen zu gewinnen oder die anderweitig angefallenen Ergebnisse abzusichern oder zu konkretisieren. Typische Beispiele hierfür sind

bei der Aufnahme eines Schichtenprofils aus Spülbohrungen:

γ - γ -Log und/oder N-N-Log zur Abschätzung der Porosität
 Spektral- γ -Log als Ergänzung zum γ -Log

bei Messungen im ausgebauten Loch (Grundwassermeßstelle):

Induktions-Log zur Überprüfung des Schichtenverzeichnisses und zur Schätzung der elektrischen Leitfähigkeit der Porenflüssigkeit (Grundwasser)
 N-N-Log als Ergänzung zum γ - γ -Log
 SAL und TEMP als Ergänzung zum FEL

3. Abgleich mit Vermessungen an benachbarten Bohrungen

In den meisten Fällen werden geophysikalische Bohrlochvermessungen als isolierte Objekte betrachtet. Es ist jedoch nicht

selten, daß im Nachhinein Vermessungsergebnisse mehr oder weniger eng benachbarter Bohrungen zusammen ausgewertet werden. Dies erfolgt möglicherweise nicht durch den Bauherrn der aktuellen Maßnahme, sondern durch das zuständige geologische Landesamt oder andere wissenschaftliche Einrichtungen. Es ist daher grundsätzlich sinnvoll, im Rahmen des eigenen Untersuchungskonzeptes einen Abgleich mit schon vorhandenen geophysikalischen Informationen vorzunehmen. Dies kann einerseits bei der Konkretisierung der eigenen Maßnahme helfen, andererseits kann durch Einsatz gleicher oder gut vergleichbarer Meßverfahren die spätere synoptische Auswertung unterstützt werden. Dieser Grundsatz sollte jedoch nicht als Vorwand für eine allzu konservative Methodenwahl dienen.

4. Auswertende Stelle

Grundsätzlich sollte bei allen Erkundungsmaßnahmen die Auswertung von Untersuchungsergebnissen in derselben Hand liegen wie die Planung ihrer Gewinnung. Dies läßt sich jedoch nicht in jedem Einzelfall realisieren. Bei komplexeren Meßprogrammen wird für die Auswertung, insbesondere bei der Durchführung von Modellrechnungen, die Hinzuziehung eines in der Bearbeitung von Bohrlochvermessungen spezialisierten Geophysikers unerläßlich sein. In diesen Fällen sollte schon in der Planungsphase eine Entscheidung über später (eventuell) einzuschaltende Spezialisten getroffen werden, damit diese in die Planung einbezogen werden können. In diesem Zusammenhang sind auch Datenformate sowie Art und Umfang der Daten für die Übergabe der Meßwerte an den Auswerter festzulegen.

4

Ausschreibung und Vergabe

Wie bei jeder Maßnahme muß auch bei geophysikalischen Bohrlochvermessungen ein Verfahren gefunden werden, mit dem man geeignete Anbieter für die gewünschten Leistungen ermittelt, von diesen Angebote einholt und die Arbeiten an den günstigsten Anbieter vergibt. Private Auftraggeber sind in der Wahl des Verfahrens zur Auswahl von Unternehmen frei und nur an allgemeines Recht gebunden. Öffentliche und öffentlich-rechtliche Auftraggeber sind dagegen an die Verdingungsordnungen (VOB, VOL, VOF) gebunden. Viele private Auftraggeber lehnen sich in ihrer Praxis an diese Verdingungsordnungen an.

Gegenwärtig werden folgende Wege in der Vergabe geophysikalischer Bohrlochvermessungen beschränkt:

1. Vergabe unter VOB oder frei: Ein nicht unerheblicher Teil der geophysikalischen Bohrlochvermessungen wird im Rahmen von Bauaufträgen nach VOB (oder außerhalb der VOB) an Bohr- bzw. Brunnenbauunternehmen vergeben. Diese vergeben die entsprechenden Dienstleistungen nach eigenem Gutdünken an Fachunternehmen weiter. Die Auswahl des Hauptunternehmens erfolgt auf der Grundlage einer öffentlichen oder beschränkten Ausschreibung oder Preisanfrage. Die Vergabe erfolgt üblicherweise an den billigsten Anbieter für das Gesamtobjekt. Diese Praxis ist rechtlich zulässig, wenn die Vermessungsleistung innerhalb des Gesamtobjekts preislich als geringfügig einzustufen ist und unmittelbar mit der Bauleistung verbunden ist. Diese Bedingungen sind beim Brunnen- und Meßstellenbau im Regelfall gegeben. Allerdings sollte sich der Auftraggeber grundsätzlich ein Einwirkungs- bzw. Widerspruchsrecht bei der Wahl des geophysikalischen Fachunternehmens vorbehalten,

um eine seinen Ansprüchen entsprechende Leistung zu erhalten.

2. Vergabe unter VOL oder frei: Die unmittelbare Vergabe von Vermessungsleistungen erfolgt im Regelfall auf der Grundlage einer (meist beschränkten) Ausschreibung oder Preis Anfrage an den billigsten Anbieter.

3. Vergabe unter VOF oder frei: Die unmittelbare Vergabe von Vermessungsleistungen erfolgt nur in Ausnahmefällen als Beratungsleistung nach den Grundsätzen der VOF auf der Grundlage einer Preis Anfrage an den geeignetsten Anbieter.

Eine Vergabe nach VOB bzw. VOL auf dem Wege einer Ausschreibung oder Preis Anfrage setzt voraus, daß im Rahmen dieses Verfahrens a) die gewünschten Leistungen erschöpfend beschrieben werden können, b) die daraufhin angebotenen Leistungen der Fachunternehmen im Grundsatz gleichwertig sind und c) keine ihrem Wesen nach freiberufliche Tätigkeiten an der Gesamtleistung überwiegen.

Die Praxis zeigt, daß in allen drei genannten Punkten regelmäßig erhebliche Abweichungen gegeben sind:

zu a) und b) Die gängige Praxis der Ausschreibung von geophysikalischen Bohrlochvermessungen sieht keine detaillierte Beschreibung der Meßverfahren vor. Dies setzt voraus, daß die reine Benennung eines Meßverfahrens eine umfassende Beschreibung von Meßgerät und Meßvorgang erübrigt. Tatsächlich ist zwar bei den Fachunternehmen durchaus ein Stand der Technik auszumachen, bei vielen Meßverfahren sind die auf dem Markt eingesetzten Sonden jedoch stark unterschiedlich (vgl. Abschn. 2 und 5). Ergebnisse werden von manchen Anbietern als reine Relativmessungen geliefert, von anderen als interpretierte physikalische Parameter. Als Beispiel seien die Dichtemessungen mit dem γ - γ -Log genannt, die teils als *[counts per*

second] = [*c.p.s.*] (Zählrate des Detektors), teils als Dichte in [g/cm^3] mitgeteilt werden. Für den Auftraggeber ist es oft problematisch, allzu strikte Vorgaben im Hinblick auf Sondenbauform oder Berichtsform in seine Ausschreibung einzubauen, da dies zu einer unerwünschten Beschränkung der Zahl der potentiellen Anbieter führen kann. Andererseits kann die Forderung einer unmittelbaren Vergleichbarkeit mit älteren Messungen für manche Meßverfahren eine Ausschreibung völlig erübrigen, da regional nur ein Anbieter zur Verfügung steht.

zu c) Gerade der wenig versierte Auftraggeber neigt dazu, kein Leistungsverzeichnis aufzustellen, sondern eine Leistungsbeschreibung mit Definition des Erkundungsziels als Ausschreibungsgrundlage zu verwenden. Der Auftragnehmer soll dann eine geeignete Methodenkombination zur Erreichung des Erkundungsziels vorschlagen und oft auch die Auswertung der Daten vornehmen. Die Vergabe erfolgt in einem Preiswettbewerb entweder auf der Grundlage des Gesamtpreises oder bestimmter spezifischer Kosten (z. B. Einheitspreise für Gerätegestellung und lfd. m γ -Log). Es muß nachdrücklich darauf hingewiesen werden, daß bei einem Überwiegen typisch freiberuflicher Leistungen, d. h. insbesondere Leistungen der Planung und der Auswertung der Messungen, an der Gesamtleistung eine Ausschreibung und Vergabe über den Preis rechtswidrig ist. Vor der Durchführung eines Ausschreibungsverfahrens im weitesten Sinne ist daher zu klären, ob eine geophysikalische Beratungsleistung gefordert wird, die Meßleistungen einschließt, oder eine reine Durchführung der Messungen mit geringfügigem Beratungsanteil.

Da Sonden und Meßverfahren der unterschiedlichen Anbieter nur begrenzt vergleichbar sind und in vielen Fällen die Meßergebnisse mit Messungen in anderen Bohrungen verglichen werden sollen oder möglicherweise in der Zukunft verglichen werden, ist es zu empfehlen, nur solche Unternehmen um die Erbringung von Vermessungsleistungen anzufragen, die die

Funktion ihrer Meßeinrichtungen im Rahmen von „Ringversuchen“ an geeigneten Vergleichsobjekten belegen können (Abschn. 5 und 6).

Grundsätzlich problematisch ist die gemeinsame Ausschreibung von Leistungen, die im Regelfall nicht von einem einzelnen Unternehmen ausgeführt werden können, und bei denen keine eindeutige Nachrangigkeit der einen Teilleistung gegeben ist. Dieser Fall ist regelmäßig bei der baulichen Überprüfung von Brunnen oder Grundwassermeßstellen in einer Methodenkombination aus geophysikalischen Messungen und TV-Log gegeben. Da diese im Regelfall von unterschiedlichen Firmen ausgeführt werden, sollten sie zur Erzielung eines technisch und wirtschaftlich optimalen Ergebnisses im Rahmen getrennter Auswahlverfahren vergeben werden. Von dieser Regel kann abgewichen werden, wenn die beiden Teilleistungen in einem engen organisatorischen Zusammenhang stehen, z. B. bei Brunnensanierungen.

5

Vergleichbarkeit und Standardisierung

Für die meisten Meßverfahren gibt es keine einheitlichen Meßsysteme. Die eingesetzten Sonden werden in kleiner Serie oder als Einzelstücke gefertigt und von den Vermessungsfirmen zum Teil nach ihren Bedürfnissen und betrieblichen Erfahrungen modifiziert. Wegen des relativ seltenen Einsatzes „exotischer“ Sonden sind diese zum Teil über längere Zeiträume im Einsatz, so daß nicht von einem einheitlichen technischen Standard ausgegangen werden kann.

Wesentliche Ursachen für unterschiedliche Ergebnisse verschiedener Meßeinrichtungen am selben Untersuchungsobjekt ergeben sich aus folgenden Eigenschaften der Meßsonden:

1. Geometrie: die Anordnung von Teilen der Meßeinrichtung, zum Beispiel Abstand von Quelle und Detektor bei aktiven nuklearphysikalischen Meßsonden (γ - γ -Log, N-N-Log). Hierzu zählt auch die Verwendung einer Zentrierung bzw. eines Kaliberarms.
2. Fokussierung: Anzahl, Stärke und Geometrie fokussierender Bauelemente, z. B. bei FEL und Induktions-Log.
3. Stärke und Geometrie von radioaktiven Quellen, ggf. Art der Quelle (isotopische Zusammensetzung).
4. Art, Größe und Geometrie von Detektoren bei nuklearphysikalischen Meßverfahren.
5. Art der Anregung, z. B. beeinflußt die Frequenz bei elektromagnetischen Sonden (Induktions-Log) die Eindringtiefe in das Gebirge.
6. Eichung der Sonden an einem allgemein definierten Standard, z. B. API-Einheiten für γ -Log, oder Aufzeichnung in relativen Einheiten [*counts per second*].

Die Vermessungsunternehmen verwenden Sonden ihrer Wahl. Nähere Angaben zu Bauart, Funktion und spezifischen Eigenschaften werden üblicherweise dem Auftraggeber nicht mitgeteilt.

Der Meßvorgang bzw. der Ablauf der Messung im Gelände beeinflusst das Ergebnis insbesondere durch folgende Elemente:

1. Überprüfung der Sonden an Feldstandards vor Ort, z. B. Induktions-Log gegen Luft und definierte Prüfkörper.
2. Randbedingungen, z. B. die korrekte Einbindung von Erdungselektroden, die geeignete Beschaffenheit der Bohrspülung etc. können wesentlichen Einfluß nehmen.
3. Fahrgeschwindigkeit und Integrationskonstanten (Zeitkonstante der Mittelwertbildung) beeinflussen die allgemeine Genauigkeit bei nuklearphysikalischen Verfahren, verfälschen ggf. die Tiefenangaben um einige Dezimeter (Fahrstrecke über die Integrationszeit). Fahrgeschwindigkeit und Integrationskonstante müssen daher in einem angemessenen Verhältnis stehen.
4. Wiederholungsmessungen erfolgen regelmäßig als Maßnahme der allgemeinen Qualitätssicherung (z. B. als „Statistik“ bei γ -Logs) oder beim Auftreten konkreter Hinweise auf Unregelmäßigkeiten, insbesondere unplausiblen Ergebnissen im Vergleich zu anderen Informationen, insbesondere Schichtenverzeichnis bzw. Ausbauzeichnung.

Das Vorgehen bei den Feldmessungen erfolgt nach den betrieblichen Erfahrungen der Vermessungsunternehmen. Qualitätssichernde Maßnahmen wie Prüfung der Sonden an Feldstandards und Wiederholungsmessungen sind gegenwärtig nicht allgemeiner Standard.

Die Darstellung der Ergebnisse unterliegt bislang keiner Standardisierung. Es kann daher nicht erwartet werden, daß die Meßergebnisse verschiedener Unternehmen vollständig vergleichbar

sind. Grundsätzlich sind folgende Darstellungsarten zu unterscheiden:

1. „Rohdaten“: Meßwerte mit einem Minimum an Datenbearbeitung. Es werden die Meßergebnisse ohne besondere Weiterbearbeitung mitgeteilt, z. B. γ -Logs als *counts per second* oder in API-Einheiten, γ - γ -Logs als *counts per second*. Diese Darstellung genügt für eine qualitative Einschätzung der Situation, schließt aber regelmäßig eine spätere Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungsobjekten oder den Messungen anderer Vermessungsunternehmen aus. Eine Ausnahme bilden das γ -Log mit Angabe in API-Einheiten und die klassischen elektrischen Normalen mit Angabe in Ωm .
2. korrigierte Meßwerte: Die Meßwerte werden auf äußere Randbedingungen der Messung, insbesondere Bohrungsdurchmesser und Spülungsbeschaffenheit, korrigiert.
3. interpretierte Meßwerte: Die Meßwerte werden mit Hilfe von Modellfunktionen in physikalisch bedeutsame Parameter umgerechnet, zum Beispiel Messungen des γ - γ -Logs (roh als *counts per second*) in Gesteinsdichte (in g/cm^3) („scheinbare Gebirgseigenschaften“).
4. Dateninterpretation in Berichtsform: Einige Vermessungsunternehmen liefern standardmäßig neben einer grafischen Darstellung der Vermessungskurven einen Bericht mit einer qualitativen bis halbquantitativen Auswertung der Meßergebnisse.
5. weitergehend interpretierte Meßwerte: Die Meßwerte werden nach der Umrechnung in „scheinbare Gebirgseigenschaften“ mit Hilfe von Modellfunktionen in „wahre Gebirgseigenschaften“ umgerechnet. Dabei wird ein Schichtmodell des Gebirges konstruiert und die Messungen auf die Beeinflussung durch über- und unterlagernde Schichten korrigiert (näheres hierzu in Abschn. 7).

Im Rahmen der im Bereich der Hydro- und Umweltgeologie üblichen bohrlochgeophysikalischen Vermessungen werden von

den Vermessungsunternehmen nach eigenem Gutdünken Darstellungen nach Punkt 1. bis 4. geliefert. Die verwendeten (sondenspezifischen, zum Teil auch bodenartenspezifischen) Korrektur- und Modellfunktionen werden dem Auftraggeber im Regelfall nicht zur Verfügung gestellt.

Für den Auftraggeber bzw. seinen Berater, der im Regelfall ohnehin nur über begrenzte Kenntnisse der Meßverfahren verfügt, ergeben sich damit erhebliche Schwierigkeiten bei der Auswertung der Daten und dem Vergleich mit anderen Bohrungen. Es ist daher von Auftraggeberseite anzustreben, daß Meßergebnisse in einer Art und Weise erhoben und mitgeteilt werden, die eine weitgehende Gleichwertigkeit unabhängig vom ausführenden Unternehmen gewährleistet. Daher sollten folgende Anforderungen grundsätzlich erfüllt sein:

1. Alle Messungen müssen einheitlich als „scheinbare Gebirgseigenschaften“ (dies schließt scheinbare Eigenschaften des Ringraummaterials ein) in physikalisch bedeutsamen oder konventionellen Einheiten (z. B. g/cm^3 , API) aufgezeichnet bzw. mitgeteilt werden.
2. Alle Sonden müssen daher entsprechend geeicht bzw. an Standards überprüft sein. Meßsysteme mit bauarttypischen zeitlichen oder umgebungsbedingten Änderungen ihrer Eigenschaften müssen vor Ort an Feldstandards geprüft bzw. nachgeeicht werden.

6

Qualitätssicherung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Probleme der Qualität von Bohrlochvermessungen aus der Sicht des Anwenders angerissen. Im folgenden sollen darüber hinaus konkrete Vorschläge zur Qualitätssicherung gemacht werden, die auch beim heutigen Stand der Technik und Marktentwicklung unmittelbar umgesetzt werden können. Von der zur Zeit bei einigen Vermessungsunternehmen betriebenen Zertifizierung auf der Grundlage der DIN/ISO-Normenreihe 9000 wird keine faktische Qualitätsverbesserung erwartet, da sich dieses Verfahren vornehmlich auf die Lenkung grundlegender betrieblicher Prozesse bezieht, nicht aber auf konkrete technische Verfahrensweisen.

In Abschnitt 5 wurden generelle Forderungen an die Durchführung und Dokumentation der Meßergebnisse gestellt. Tatsächlich betreiben die Vermessungsunternehmen im wechselnden Umfang Maßnahmen zur Qualitätssicherung. Da es zur Zeit außer für das γ -Log in Form des API-Standards (in der Ur-Form eine Messung in einer hierfür hergerichteten Testbohrung in den USA, abgeleitet in Form von kommerziell verfügbaren Testkörpern zur Sondeneichung) keine allgemein verbindlichen Testvorschriften gibt, ist zu empfehlen, geeignete Versuchsbohrungen für die Eichung bzw. Prüfung von Meßgeräten auszuwählen und bei der Auswahl von Fachunternehmen für die Ausführung geophysikalischer Bohrlochvermessungen von Seiten des Auftraggebers die Vorlage der Vermessungsergebnisse für die interessierenden Meßverfahren einzufordern.

Es kann hierbei im Einzelfall ohne Belang sein, wie gut das jeweilige Gerät im Zusammenhang mit den verwendeten Auswertungsalgorithmen die tatsächlichen Gebirgseigenschaften

wiedergibt. Es muß aber sichergestellt sein, daß es unter Bedingungen, die dem vorgesehenen Einsatzort nahekommen, je nach Fragestellung bevorzugt Eigenschaften des Bohrlochs bzw. Ausbaus mit Ringraumfüllung oder des anstehenden Gebirges abbildet, und dabei die notwendige meßwert- und tiefenmäßige Auflösung gewährleistet. Absolute Richtigkeit der Meßwerte ist zu fordern, wenn eine quantitative Auswertung vorgesehen ist oder zu einem späteren Zeitpunkt notwendig werden kann.

Als Vergleichsobjekte eignen sich für Meßverfahren im ausgebauten Loch insbesondere Grundwassermeßstellen oder entsprechend ausgebaute Versuchsbohrungen, die entsprechend ihrer Bauart und nach den anstehenden Schichten der geplanten Meßaufgabe nahekommen. Beispiele in der Vergangenheit speziell für derartige Zwecke angelegter Versuchsbohrungen, die heute noch zur Verfügung stehen, sind für den norddeutschen Raum in Tab. 1 zusammengestellt.

Für Verfahren, die nur im offenen Loch eingesetzt werden, stehen in den Lockergesteinen der norddeutschen Tiefebene naturgemäß keine dauerhaften Versuchsbohrungen zur Verfügung.

Bislang sind noch von keiner Seite entsprechende Vergleichsmessungen veranlaßt worden, so daß gegenwärtig die Eignung einzelner Vermessungsunternehmen für konkrete Meßaufgaben nicht zuverlässig vorhergesagt werden kann. Es ist zu wünschen, daß von den einschlägigen Fachunternehmen im Zusammenwirken mit Auftraggebern, Fachgutachtern und den zuständigen Fachbehörden der Länder für häufig beauftragte Meßprogramme geeignete Versuchsbohrungen als Standards vereinbart werden.

Von Seiten des Auftraggebers bzw. seines Beraters können als qualitätssichernde Maßnahmen für eine erfolgreiche Durchführung der geophysikalischen Bohrlochvermessungen folgende Maßnahmen ergriffen werden:

Bohrung	Eigentümer	Baujahr	befahrbare Endteufe (m u. GOK)	Aufgabenstellung	Ausbau	Geologie	Ringraum	Literatur
Schöneiche	BGR	1994	95	Nachweis von Ringraummaterialien	PVC-Vollrohr	Quartär, Tertiär	verschiedene Quelltone, Verpreßmaterialien und Füllkiese	ZSCHERE & STEINRECHER (1997)
Hannover	BGR	1978	90	Erprobung von Meßsystemen	PVC-Vollrohr	Quartär, Unterkreide	überwiegend Füllkies	—
CB 1, Celle	Celler Brunnenbau	1990	95	Nachweis von Ringraummaterialien und Dichtigkeit von Rohren	PVC, Vollrohre, z. T. beschädigt, und Filter	Quartär Tertiär	verschiedene Quelltone Verpreßmaterialien und Füllkiese	HOMRIGHAUSEN & LÜDEKE (1990)
Peine	Preussag	k. A.	1160	Erprobung von Meßgeräten	Stahl, DN 245	k. A.	zementiert	—

Tab. 1: Versuchsbrunnen im norddeutschen Raum, die für die vergleichende Bewertung von bohrlochgeophysikalischen Meßeinrichtungen geeignet sind. Bezüglich der näheren Einzelheiten und der ggf. gewünschten Erlaubnis zur Nutzung der Bohrungen ist eine Abstimmung mit dem jeweiligen Eigentümer erforderlich.

1. Bei der Herstellung einer Bohrung bzw. beim Bau eines Brun-
nens oder einer Grundwassermeßstelle sind die Belange der ge-
planten geophysikalischen Untersuchungen zu berücksichtigen.
Es sind nur solche Verfahren und Materialien zu verwenden, die
die Vermessung nicht oder möglichst wenig beeinträchtigen.
Dichtungen aus magnetitdotierten Quelltonen (z. B. Fabrikat
Quellon HD) sollten nur in Ausnahmefällen zum Einsatz kom-
men, da sie das IES stören. Dagegen sind Dichtungen mit erhöh-
ter γ -Aktivität (z. B. Fabrikat Quellon WP) in vielen Fällen
günstig, da eine Vermessung der γ -Aktivität des Gebirges nach
dem Ausbau durch den Einfluß des Ringraums ohnehin wenig
aussagekräftig ist und die Sperren mit Dotierung gut nachweis-
bar sind. Ein Verfüllen von Bohrungen oder Ringräumen mit
Bohrgut ist grundsätzlich abzulehnen, da dies zu unkontrollier-
ten Bedingungen und Setzungen mit Hohlraumbildungen führt.
Nach Möglichkeit sollten auch trocken (mit Stahlverrohrung) ge-
bohrte Aufschlußbohrungen für Grundwassermeßstellen vor
dem Ausbau vermessen werden, auch wenn dies das Meßpro-
gramm auf nuklearphysikalische Verfahren einschränkt. Als
elektrisches Verfahren kann nach dem Ausbau im Zusammen-
hang mit der Prüfung des baulichen Zustands der Meßstelle das
IES eingesetzt werden.

2. Vor der Durchführung der geophysikalischen Messungen
sollten wesentliche Eigenschaften der Sonden und ihre Eichung
zwischen Auftraggeber und Vermessungsunternehmen abge-
stimmt werden. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die unter
den örtlichen Gegebenheiten erwartete bzw. gewünschte Ein-
dringtiefe der Messungen in das Gebirge zu legen. Eichungen
sollten dokumentiert sein und mit den Meßergebnissen an den
Auftraggeber übergeben werden. Vor Ort notwendige Sonderei-
chungen oder -einstellungen müssen vorher vereinbart sein und
sollten vom Auftraggeber ggf. überwacht werden.

3. Bei der Durchführung der Messungen sollte sofort eine Über-
prüfung der Plausibilität der Messungen durch das Vermessungs-

unternehmen in Abstimmung mit dem Auftraggeber erfolgen.

Bestehen Zweifel an den Meßergebnissen, sind diese durch Wiederholungsmessungen und ggf. Wiederholung der Sondeneichungen abzusichern (KEYS, 1997).

4. Bei der Umsetzung der Rohdaten in aussagekräftige Darstellungen werden vielfach Korrekturen und Modellrechnungen vorgenommen (Abschn. 5). Hierzu zählen Korrekturen auf Bohrl Lochdurchmesser, physikalische Eigenschaften der Bohrlochflüssigkeit, Glättung durch gleitende Mittelwertbildung und Umrechnungen von Meßgrößen in Gesteinsparameter. Über die Art der an den Meßdaten vorgenommenen Korrekturen sollte mindestens qualitativ an den Auftraggeber berichtet werden. Soweit Modellrechnungen beteiligt sind, z. B. bei der Umrechnung von N-N-Logs in Porositäten, sind die Modellannahmen zu benennen.

7

Auswertung der Meßergebnisse

Die überwiegende Zahl der geophysikalischen Bohrlochvermessungen in der Hydro- und Umweltgeologie wird ausschließlich qualitativ ausgewertet.

Messungen im offenen Loch werden vor Ort gesichtet und auf der Grundlage dieser Sichtung wird im Zusammenhang mit weiteren Informationen, insbesondere dem Bohrgut, über den Ausbau der Bohrung zu einem Brunnen bzw. einer Grundwassermeßstelle entschieden. Die Qualität dieser Auswertung hängt wesentlich von der Erfahrung des jeweiligen Bearbeiters ab. Aussagekräftige Darstellungen der Vermessungsergebnisse mit geeignet gewählten Maßstäben müssen unmittelbar nach der Vermessung zur Verfügung stehen. Verschiebungen von Schichtgrenzen durch das Zusammenwirken von Fahrgeschwindigkeit und Integrationskonstante, insbesondere beim γ -Log, dürfen den Dezimeterbereich nicht überschreiten und sollten an Hand anderer Logs (meist FEL) erkennbar sein. Meßverfahren, die üblicherweise eine modellmäßige Umrechnung erfordern, z. B. N-N-Log mit der Umrechnung von *counts per second* in g/cm^3 , können vor Ort in Form von Rohdaten (Meßgrößen) ausgewertet werden.

Diese einfachste Auswertung vor Ort besteht im Regelfall in der Überarbeitung des Schichtenverzeichnisses, das auf der Grundlage des Bohrguts (Spülguts) erstellt wurde, mit Hilfe der Vermessungsergebnisse. Die grundsätzlichen geologischen Verhältnisse sind aus dem Bohrgut und dem Bohrfortschrittsdiagramm meist gut erkennbar. Es bestehen aber oft Unklarheiten bezüglich der genauen Tiefenlage von Schichtgrenzen. Daneben sind im Spülgut Wechsellagerungen unterschiedlicher Materiali-

en oft schlecht interpretierbar. Hier helfen hoch auflösende Vermessungsverfahren (z. B. γ -Log, FEL) weiter.

Messungen in ausgebauten Löchern (Brunnen bzw. Grundwassermeßstellen) erfordern in der Regel keine sofortige Auswertung, da die Verrohrung standfest ist und sich keine baulichen Maßnahmen unmittelbar an die Vermessung anschließen. Eine Ausnahme von dieser Regel stellen TV-Logs und Flowmetermessungen dar, die als Zwischenmessungen bei laufenden Regenerierungen bzw. Sanierungen von Brunnen ausgeführt werden.

Weitergehende Interpretationen der geophysikalischen Vermessungen erfolgen nach einer Bearbeitung der Daten durch das Vermessungsunternehmen. In dieser Bearbeitung werden typischerweise Meßgrößen in Gebirgsparameter umgerechnet, Bohrlocheffekte eliminiert. Die meisten Sonden sind bauartlich für den Einsatz in schlanken Aufschlußbohrungen mit einem Durchmesser unter 200 mm optimiert. Beim Einsatz in großkalibrigen Bohrungen, z. B. Brunnenbohrungen, sind neben bauartlichen Abwandlungen, insbesondere Einsatz von einseitigen Kaliberarmen (*Decentralizer*), erhebliche rechnerische Korrekturen zur Herstellung der Vergleichbarkeit der Messungen erforderlich. In vielen Fällen erfolgt nach Bedarf eine Glättung der Meßwerte durch gleitende Mittelwertbildung, insbesondere beim γ -Log. Die so bearbeiteten Daten werden in geeigneten oder vertraglich vereinbarten Maßstäben grafisch dargestellt und an den Auftraggeber übergeben. Die Abgabe der Daten erfolgt bei einfachen Meßprogrammen ca. 2 Wochen nach den Geländearbeiten. Neben der grafischen Darstellung der Daten bieten alle Fachunternehmen auch die Übergabe der Daten auf Datenträger an.

Auf der Grundlage der grafischen Darstellungen erfolgt eine weitergehende qualitative oder halbquantitative Interpretation. Hierbei werden außer Hauptschichtgrenzen auch schwächere Materialwechsel berücksichtigt, z. B. wechselnde Feinanteile in Sanden oder wechselnde mittlere Korngrößen von Sanden. Zum

Vergleich stehen in diesem Untersuchungsschritt oft zusätzliche Informationen, beispielsweise Siebanalysen, chemische Untersuchungsergebnisse oder Sonderproben (Kerne) zur Verfügung. Zum Vergleich werden Ergebnisse benachbarter Bohrungen herangezogen, insbesondere wenn diese ebenfalls geophysikalisch vermessen und/oder weitergehend geologisch bearbeitet wurden. Für hinreichend mächtige Einzelschichten lassen sich die scheinbaren Gebirgsparameter als wahre Gebirgsparameter interpretieren. Aus den elektrischen Verfahren lassen sich damit Abschätzungen über den Gesamtlösungsgehalt des Grundwassers treffen.

Untersuchungen im Bereich der Hydro- und Umweltgeologie enden üblicherweise auf diesem Bearbeitungsstand. Die Kosten für die ingenieurtechnische Betreuung und Auswertung der Messungen können jetzt schon das Niveau der Vermessungskosten erreicht haben. Weitergehende Auswertungen werden daher nur in Sonderfällen veranlaßt. Der ingenieurtechnische Bearbeiter könnte sie auf Grund seiner Vorkenntnisse in der Regel ohnehin nicht ausführen.

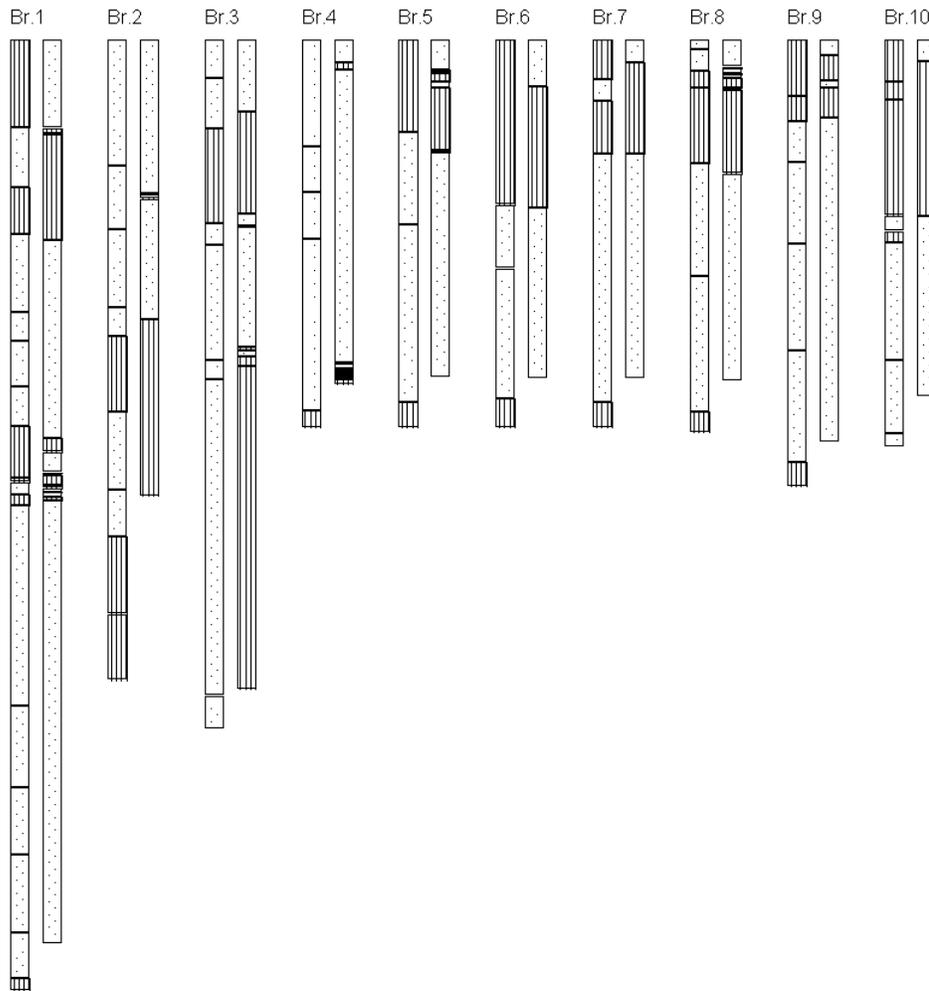
Für quantitative Auswertungen müssen aus den scheinbaren Gebirgsparametern die wahren Gebirgsparameter berechnet werden. Hierzu sind Modellrechnungen erforderlich, in die allgemeine physikalische Gesetzmäßigkeiten ebenso eingehen wie die speziellen Eigenschaften der eingesetzten Meßsysteme und Sonden. Derartige Berechnungen sollte daher nur der mit Bohrlochvermessungen gut vertraute Spezialist durchführen. In Einzelfällen können sie jedoch sehr nützlich sein. Aus den Ergebnissen umfassender geophysikalischer Vermessungen lassen sich neben den direkt bestimmten Gesteinseigenschaften wie der Porosität auch mittelbar Abschätzungen über hydraulische Eigenschaften, insbesondere den Durchlässigkeitsbeiwert, treffen (JORGENSEN, 1989). Derartige Verfahren, die im Bereich der Erdöl- und Erdgaserkundung große Bedeutung haben, werden für hydrogeologische Fragestellungen bislang kaum eingesetzt.

Im Vergleich mit umfassenderen geologischen Bearbeitungen lassen sich physikalisch charakteristische Profilabschnitte nicht nur bestimmten Gesteinstypen, sondern spezifischen stratigrafischen Einheiten zuordnen. Derartige Verfahren des „Mustervergleichs“ sind im Bereich der Lagerstättenerkundung schon seit Jahrzehnten gebräuchlich, haben aber in der Hydrogeologie noch keine häufige Anwendung gefunden. Mit Hilfe moderner Suchalgorithmen ist es möglich, auch umfängliches Datenmaterial in diesem Sinne aufzubereiten (z. B. WESTPHAL & BORNHOLDT, 1996).

Für den automatisierten Vergleich von Vermessungsdaten gibt es verschiedene Strategien:

1. Absolutwertverfahren: Es werden modellierte wahre Gebirgsparameter nach ihren Werten bestimmten Gesteinstypen zugeordnet, z. B. γ -Log-Werte oberhalb 100 API Tonen.
2. Relativwertverfahren: Innerhalb jeder Bohrung werden mittlere und Extremwerte der Parameter sowie ggf. Perzentile bestimmt und die einzelnen Meßwertbereiche dann Gesteinsarten zugeordnet. Bei diesem Verfahren kann von den scheinbaren Gebirgsparametern ausgegangen werden.
3. Kombinationsverfahren: In vielen Fällen ist eine Kombination von Absolut- und Relativwertverfahren sinnvoll. Die Wertegrenzen werden dabei durch einen sachkundigen Bearbeiter für beide Verfahren manuell eingestellt und optimiert.
4. Wendepunktverfahren: Schichtgrenzen werden jeweils an den Wendepunkten der (geeignet geglätteten) Meßwertkurven festgelegt. Die Gesteinsarten ober- und unterhalb der Grenze werden dann nach dem Absolut- oder Relativwertverfahren zugeordnet.

Diese vier Verfahren lassen sich für einzelne Meßgrößen abarbeiten. Eine einigermaßen befriedigende automatisierte Datenbearbeitung ergibt sich, insbesondere bei Vermessungen in ausgebauten Bohrungen, nur durch die Kombination mehrerer Sonden.



punktiert: Grundwasserleiter

vertikal schraffiert: Grundwassergeringleiter

Abb. 9: Vergleich einer umfassenden manuellen Auswertung der Bohrungsdaten und geophysikalischen Vermessungen (linke Säulen) mit einer einfachen automatisierten Auswertung der IES (rechte Säulen); Vermessungen im ausgebauten Loch (Grundwassermeßstellen)

Das Beispiel einer Bearbeitung von IES-Daten aus einem größeren Untersuchungsgebiet nach einem Kombinationsverfahren zeigt Abb. 9. Die automatisierte Ansprache der Bodenarten nach nur einem Meßverfahren ist nur zum Teil befriedigend. Da die vorliegenden Messungen in ausgebauten Bohrungen (Grundwassermeßstellen) ausgeführt wurden, ist aber nur das IES für diesen Zweck auswertbar. Das γ -Log wird zu stark durch das Ringraumfüllmaterial beeinflusst.

Bei dem oberflächennahen Grundwassergeringleiter handelt es sich um einen stark tonigen Geschiebemergel von einigen Metern Mächtigkeit. Dieser wird auf Grund seiner sehr hohen elektrischen Leitfähigkeit mit dem IES sehr zuverlässig erkannt und gegen über- und unterlagernde Sande abgegrenzt. Dagegen bereitet die Unterscheidung von tiefer gelegenen stark sandig ausgebildeten Geschiebelehmen von Grundwasserleitern mit zum Teil erhöht leitfähigem Grundwasser (unterer Teil der Meßstellen Br. 1–3) Schwierigkeiten. In diesem Fall wäre es also möglich, auf der Grundlage der Ergebnisse des einfachen automatisierten Auswertungsverfahrens eine brauchbare Karte der Verbreitung und Mächtigkeit der bindigen Deckschicht des Grundwasserleiters zu erzeugen. Dagegen bleibt die Interpretation der tieferen Schichten der manuellen Bearbeitung vorbehalten.

8

Zusammenfassung und Ausblick

Für die geophysikalische Vermessung von Bohrungen und Brunnen bzw. Grundwassermeßstellen steht eine breite Palette von Meßverfahren zur Verfügung. Bei geeigneter Auswahl der eingesetzten Verfahren und angemessener Auswertung der Meßergebnisse lassen sich aus diesen Messungen wesentliche Informationen über die Eigenschaften des Gebirges und/oder des Brunnenbauwerks gewinnen, die mit anderen Verfahren nicht, nur in geringerer Qualität oder mit erheblich höherem Aufwand (z. B. mit durchgehender Gewinnung von Bohrkernen) zu erhalten sind.

Der gegenwärtige Stand beim Einsatz geophysikalischer Bohrlochmeßverfahren in ingenieurtechnischen Anwendungen der Hydro- und Umweltgeologie ist unbefriedigend. Planung, ingenieurtechnische Betreuung und Auswertung solcher Messungen liegen überwiegend in der Hand von wenig sachverständigen Bearbeitern. Dies beruht zum erheblichen Teil auf der Struktur der universitären Ausbildung in Deutschland, in der geophysikalische Lerninhalte in den praxisorientierten Fächern der angewandten Geologie und Ingenieurwissenschaften oft nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Durch die weitgehend qualitative Auswertung der Vermessungen im Bezug auf einzelne Bohrungen hat sich bislang kein allgemeiner technischer Standard bezüglich Meßverfahren, Datenaufbereitung und Ergebnisdarstellung herausgebildet. Dadurch werden weitergehende Analysen der Daten, insbesondere im Vergleich zu anderen Bohrungen oder benachbarten Untersuchungsgebieten, stark erschwert.

Es sind daher folgende Thesen aufzustellen:

These 1: Geophysikalische Vermessungen sollten möglichst an allen Bohrungen, auch trocken niedergebrachten, durchgeführt werden. Die qualitativen Bohrergebnisse, insbesondere die Beschreibung des Bohrgutes, ist in vielen Fällen ungenau oder fehlerhaft. Auch die Aufbewahrung von Bodenproben zur weitergehenden Untersuchung schafft hier keine Abhilfe, da oftmals die Gewinnung repräsentativer Proben nicht möglich ist. Geophysikalische Meßkurven stellen dagegen eine objektive Informationsquelle dar, die zudem im Vergleich zu Probenmaterial kein wesentliches Lagerproblem bildet.

These 2: „Minimalprogramme“ als Standard der Bohrlochvermessung sind abzulehnen.

These 3: Geophysikalische Messungen sollten weitergehend standardisiert werden, um die langfristige Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

These 4: Die Interpretation der Vermessungsergebnisse sollte zunehmend durch automatisierte Verfahren der Datenverarbeitung unterstützt werden.

9

Literatur

- BAUMAN, P. D.; SALLOMY, J. T. & BROWN, A. (1994): Borehole logging as an aid to hydrogeologic characterization of leaking underground storage tank sites. – Ground Water Management Proceedings, **18**: 463–477; Minneapolis, Minn.
- BÖHM, H. (1957): Die erste Fernseh-Bohrlochsonde. – BBR, **8**: 366–369; Berlin
- BENDER, F. (Hrsg.) (1985): Angewandte Geowissenschaften, Band II; Stuttgart (Enke)
- CHURCH, P. E. & GRANATO, G. E. (1996): Bias in ground-water data caused by well-bore flow in long-screen wells. – Ground Water, **34**: 262–273; Dublin, OH
- CLAUSS, J. & SCHÄFER, M. (1995): Beiträge der Bohrlochgeophysik zur Erkundung von Braunkohlefeldern in Mitteldeutschland. – Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, **23**: 95–102; Berlin
- DVGW (Hrsg.) (1990): Geophysikalische Untersuchungen in Bohrlöchern und Brunnen zur Erschließung von Grundwasser. – DVGW-Merkblatt, **W 110**: 50 S.; Bonn
- GILLBRICHT, C. A. (1996): Horizontierte Grundwasserprobenahme. – Handbuch der Altlastensanierung, lfd. Nr. 15232: 34 S., Heidelberg
- GRUHN, A. & GILLBRICHT, C. A. (1998): Induktions-Log in „Dry Holes“. – Terra-Tech, **4/98**: 33–35; Mainz
- HOMRIGHAUSEN, R. & LÜDEKE, U. (1990): Dichtigkeit von Ausbau-materialien und Wirksamkeit von hydraulischen Barrieren im Ringraum. – BBR: **41**: 376–383; Köln

- HUFSCHMIED, P. (1983): Die Ermittlung der Durchlässigkeit von Lockergesteinsgrundwasserleitern, eine vergleichende Untersuchung verschiedener Feldmethoden. – Diss. ETH Zürich, **7397**: 300 S., Zürich
- JORGENSEN, D. G. (1989): Using geophysical logs to estimate porosity, water resistivity, and intrinsic permeability. – U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, **2321**: V + 24 S.; Denver, CO
- JUNGBAUER, Dr. & Partner (o.J.): Leitfähigkeits-Fluid-Logging. – Firmenschrift: 2 S.; Rottenburg
- KEYS, W. S. (1990): Borehole geophysics applied to ground-water investigations. – U.S. Geol. Surv. Techniques of Water Resour. Investigations, **2-E2**: XVI + 150 S.; Denver, CO
- KEYS, W. S. (1997): A practical guide to borehole geophysics in environmental investigations. – CRC-Lewis: 192 S.; Boca Raton, FL
- KILLEEN, P.G. (Ed.) (1986): Borehole geophysics for mining and geotechnical applications. – Geol. Surv. Canada Paper, **85-27**; Ottawa, Ontario
- KNÖDEL, K.; KRUMMEL, H. & LANGE, G. (1997): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Band 3: Geophysik. – Springer: XXVIII + 1063 S.; Berlin
- MACK, T. J. (1993): Detection of contaminant plumes by borehole geophysical logging. – Ground Water Monitoring and Remediation, **13 (1)**: 107–114; Dublin, OH
- MEINHOLD, R. (1989): Geschichte der Bohrlochmessungen bis zum zweiten Weltkrieg. – Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, **17**: 1109–1121; Berlin
- MICHALSKI, A. (1989): Application of temperature and electrical-conductivity logging in ground water monitoring. – Ground Water Monitoring Review, **9 (3)**: 112–118; Dublin, OH

- MOLZ, F. J.; BOMAN, G. K.; YOUNG, S. C. & WALDROP, W. R. (1994): Borehole flowmeters: Field applications and data analysis. – *Journal of Hydrology*, **163**: 347–371; Amsterdam
- MOLZ, F. J.; MORIN, R. H.; HESS, A. E.; MELVILLE, J. G. & GÜVEN, O. (1989): The impeller meter for measuring aquifer permeability variations: Evaluation and comparison with other tests. – *Water Resources Research*, **25**: 1677–1683; Washington, D.C.
- NILSSON, B.; JAKOBSEN, R. & ANDERSEN, L. J. (1995): Development and testing of active groundwater samplers. – *Journal of Hydrology*, **171**: 223–238; Amsterdam
- OELSNER, C. (Ed.) (1997): Radiometrie. – in: KNÖDEL et al.: 725–747; Berlin
- PAILLET, F. L. & PEDLER, W. H. (1996): Integrated borehole logging methods for wellhead protection applications. – *Engineering Geology*, **42**: 155–165; Amsterdam
- RADMANN, K.-J. & GILLBRICHT, C. A. (1997): Berechnung von Brunnenverlusten mit instationären Verfahren. – *Fachliche Berichte der Hamburger Wasserwerke GmbH*, **16 (2)**: 22–29; Hamburg
- REPSOLD, H. & SCHNEIDER, E. (1988): Bohrlochmessungen bei der Wassererschließung. – in SCHNEIDER, H.: 305–324; Essen
- SCHNEIDER, H. (Hrsg.) (1988): Die Wassererschließung. – *Vulkan*: XXIV + 867 S.; Essen
- SMITH, S. A. (1995): Monitoring and remediation wells. Problem prevention, maintenance, and remediation. – *CRC Lewis*: 183 S.; Boca Raton, FL
- TAYLOR, K. C.; HESS, J. W. & MAZZELA, A. (1989): Field evaluation of a slim-hole borehole induction tool. – *Ground Water Monitoring Review*, **9 (1)**: 100–104; Dublin, OH
- TAYLOR, K. & MOLZ, F. (1990): Determination of hydraulic conductivity and porosity logs in wells with a disturbed an-

- nulus. – *Journal of Contaminant Hydrology*, **5**: 317–332; Amsterdam
- TELLAM, J.H. (1992): Reversed flow test: A borehole logging method for estimating pore water quality and inflow rates along an uncased borehole profile. – *Ground Water Monitoring Review*, **12** (2): 146–154; Dublin, OH
- TSANG, C.-F.; HUFSCHMIED, P. & HALE, F. V. (1990): Determination of fracture inflow parameters with a borehole fluid conductivity method. – *Water Resources Research*, **26**: 561–578; Washington, D.C.
- WESTPHAL, H. & BORNHOLDT, S. (1996): Lithofacies prediction from wireline logs with genetic algorithms and neural networks. – *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, **147**: 465–474; Hannover
- WILLIAMS, J.; LAPHAM, W. & BARRINGER, T. (1993): Application of electromagnetic logging to contamination investigations in sand-and-gravel aquifers. – *Ground Water Monitoring and Remediation*, **13** (3): 129–138; Dublin, OH
- YEARSLEY, E. N.; CROWDER, R. E. & IRONS, L. A. (1991): Monitoring well completion evaluation with borehole geophysical density logging. – *Ground Water Monitoring Review*, **11** (1): 103–111; Dublin, OH
- YOUNG, S. C. & PEARSON, H. S. (1995): The electromagnetic borehole flowmeter: Description and application. – *Ground Water Monitoring and Remediation*, **15** (4): 138–147; Dublin, OH
- ZSCHERPE, G. & STEINBRECHER, D. (1997): Bohrlochgeophysik. – in KNÖDEL et al.: 789–895; Berlin