

Bohrlochgeophysikalische Meßverfahren zur Untersuchung horizontaler Wasserbewegungen in Brunnen und Bohrungen

Borehole geophysical measurements of horizontal flow in water wells

J. H. SCHÖN¹⁾

Inhalt

	Seite
1. Einleitung.....	73
2. Die Ermittlung der horizontalen Verdünnungsgeschwindigkeit	74
2.1. Grundlagen und Definition.....	74
2.2. Fotometrische Farbtracermessung	75
2.3. Thermische Bestimmung der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit	76
3. Eine Meßsonde zur Abschätzung der Strömungsrichtung	79
Zusammenfassung.....	80
Literatur.....	81
Summary.....	81

1. Einleitung

Bohrlochgeophysikalische Meßverfahren stellen für die Lösung hydrogeologischer und umweltrelevanter Probleme ein wichtiges Instrumentarium dar.

Der Erfolg derartiger Messungen wird im wesentlichen von drei Faktoren bestimmt:

1. Aufgabenbezogene Integration der Verfahren in das gesamte Untersuchungsprogramm (beginnend bei der Projektierung bis zur Interpretation), um einen sinnvollen Einsatz der Verfahren zu gewährleisten und ihre spezifischen Möglichkeiten auszuschöpfen.
2. Verfügbarkeit eines breiten Methodenspektrums, um aus diesem ein optimales, der Aufgabenstellung und den Meßbedingungen angepaßtes Meßprogramm abzuleiten.
3. Sichere Kenntnis und Handhabung von Verfahren und der Auswerte- bzw. Interpretationsmethoden.

Das derzeit im Bereich der Hydrogeologie eingesetzte Methodenspektrum gestattet vor allem Aussagen

¹⁾ Prof. Dr. J. H. SCHÖN, Institut für Angewandte Geophysik, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Roseggerstraße 17, A-8700 Leoben.

- zur lithologischen Profilgliederung einschließlich einer Charakterisierung der Aquifere,
- zum technischen Zustand ausgebaute Bohrungen bzw. Brunnen,
- zu Eigenschaften und Bewegungen des Wassers bzw. Fluids in der Bohrung bzw. im Brunnen.

Letztgenanntes Einsatzgebiet – zuweilen auch als „Fluidlogging“ bezeichnet – umfaßt vor allem fortlaufende Temperatur- und Leitfähigkeitsmessungen, Messungen der vertikalen Fluidbewegung (Flowmetermessungen) und Untersuchungen horizontaler Strömungen nach der Ein-Bohrloch-Tracermethode.

Die Untersuchung horizontaler Strömungen stellt innerhalb der Bohrlochmessungen ein Arbeitsgebiet mit besonders enger Verbindung zu hydrogeologischen Untersuchungsmethoden dar, da sie sich letztlich alle auf Tracerprinzipien zurückführen lassen.

Im folgenden werden zwei Meßmethoden zur Ermittlung der sogenannten Verdünnungsgeschwindigkeit v_g und eine im Erprobungsstadium befindliche Methode zur Abschätzung der Strömungsrichtung vorgestellt.

2. Die Ermittlung der horizontalen Verdünnungsgeschwindigkeit

2.1. Grundlagen und Definition

Ein Aquifer sei von Wasser mit einer Filtergeschwindigkeit v_f durchströmt. In einem Bohrloch wird die Verdünnungsgeschwindigkeit v_g z. B. mit Tracermessungen ermittelt.

Die Beziehungen zwischen der im Außenraum (Aquifer) wirksamen Geschwindigkeit v_f und der im Innenraum (Bohrung, Brunnen) gemessenen Geschwindigkeit v_g lassen sich nach der Potentialtheorie herleiten. Die Verdünnungsgeschwindigkeit v_g stellt die bei der Ein-Bohrloch-Tracermethode ermittelte primäre Größe dar. Die Filtergeschwindigkeit v_f ist der für die hydrogeologische Aussage geforderte Parameter. Allgemein sind die beiden Größen durch einen Koeffizienten α verbunden (z. B. H. SCHNEIDER, 1973):

$$v_g = \alpha \cdot v_f. \quad (1)$$

Detaillierte Untersuchungen zum Koeffizienten α für verschiedene Filter- und Ausbautypen liegen insbesondere vom Institut für Radiohydrometrie der GSF München vor (H. BERGMANN, 1970, 1971, GSF-Berichte 1978, 1979, D. KLOTZ & R. CHAND, 1979). Häufig wird für Überschlagsrechnungen $\alpha \approx 2$ angenommen.

v_g kann mit verschiedenen Tracersubstanzen (Salz, Farbstoffe, radioaktive Tracer) ermittelt werden. Dabei wird meßtechnisch generell die zeitliche Veränderung der Konzentration C der Tracersubstanz erfaßt. Diese steht mit v_g , der Zeit t und dem Bohrl Lochdurchmesser d in direkter Beziehung:

$$v_g = \frac{\pi}{4} \cdot d \cdot \frac{\ln(C_0 - C)}{t - t_0}. \quad (2)$$

Bei der praktischen Auswertung kann v_g demzufolge direkt aus dem Abfall der Geraden im $\log C = f(t)$ -Diagramm ermittelt werden.

2.2. Fotometrische Farbtracermessung

Als Tracersubstanz wird ein Lebensmittelfarbstoff (E 133, „food blue“) verwendet, der in sehr geringer Konzentration (einige mg/l) eine starke Verringerung der optischen Transparenz des Wassers verursacht.

Die von JOANNEUM RESEARCH, Institut für Angewandte Geophysik und dem Geophysikalischen Institut der Karls-Universität Prag gemeinsam entwickelte Bohrlochmeßsonde besteht im wesentlichen aus einer Lichtquelle (LED) und einem gegenüberliegenden Fototransistor zur Messung der optischen Transparenz. Die Wellenlänge des ausgesandten Lichtes liegt bei 626 nm. Die Sonde ist schlank gehalten, um durch die Sondenbewegung keine Vermischung hervorzurufen. Die Messung selbst erfolgt in drei Phasen:

1. Messung der optischen Transparenz vor Eingabe des Tracers („Nullmessung“) über den gesamten wassergefüllten Bohrlochbereich,

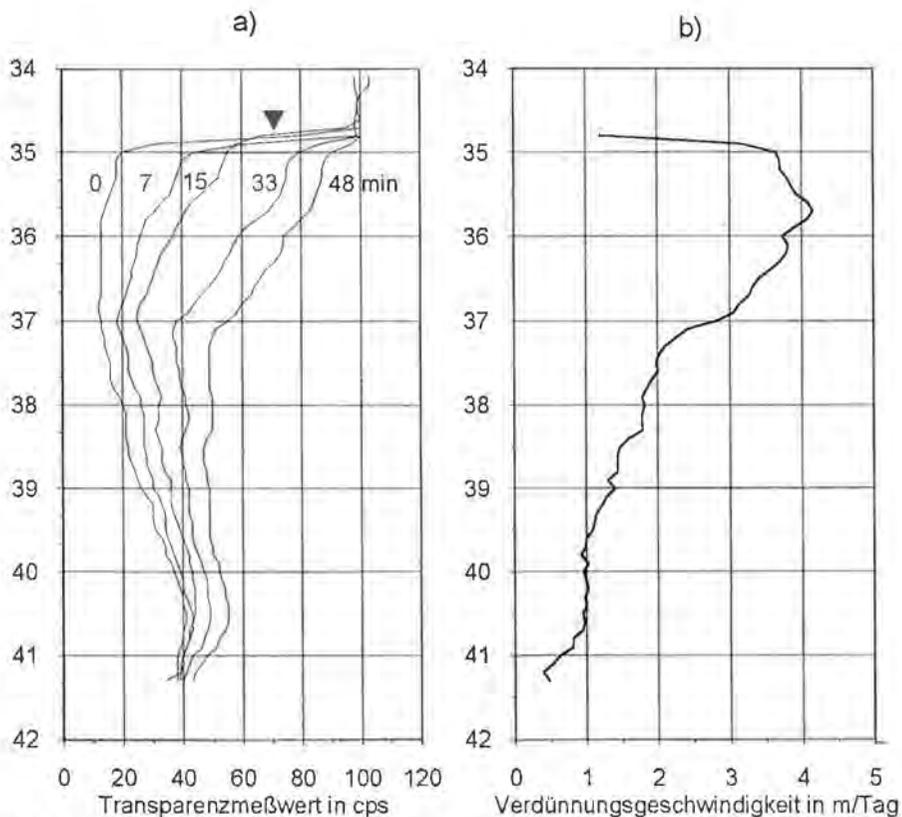


Fig. 1: Fotometrische Ermittlung der Verdünnungsgeschwindigkeit v_d . a) Bohrlochmeßkurven der optischen Transparenz zu verschiedenen Zeiten (in min); b) aus der zeitlichen Änderung der Konzentration ermittelte Kurve der Verdünnungsgeschwindigkeit v_d .
Photometric determination of the dilution velocity v_d . a) Logs of optical transparency, measured at different time (in min); b) from concentration vs. Time dependence derived dilution velocity v_d .

2. Tracerzugabe (Säulenmarkierung) im interessierenden Bohrlochabschnitt,
3. Messung der optischen Transparenz als Funktion der Tiefe zu verschiedenen Zeiten nach der Tracerzugabe. Die Fahrgeschwindigkeit der Meßsonde muß dabei $< 2 \text{ m/min}$ sein, um Verwirbelungen zu vermeiden.

Figur 1 zeigt ein Beispiel mit dem Ergebnis der Auswertung in Form einer v_g -Tiefen-Kurve. Deutlich hebt sich dabei der Bereich unmittelbar unter dem Grundwasserspiegel 34,7–36,7 m mit erhöhten v_g -Werten ab. Er markiert den Tiefenbereich besonders hoher Strömungsgeschwindigkeit bzw. hoher k_f -Werte.

Die auf diese Weise fotometrisch ermittelten v_g -Profile geben ein differenziertes Bild der hydraulischen Verhältnisse.

Mit dieser Methode wurden bereits in breitem Umfang Messungen im Bereich von Deponien vorgenommen (z. B. Deponie Ahrental).

2.3. Thermische Bestimmung der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit

Thermische Meßverfahren werden bei hydrologischen Untersuchungen häufig eingesetzt (S. PRENSKY, 1992, V. FRITSCH & A. TAUBER, 1972).

Als ein alternativer Weg zu (substantiellen) Tracern wurde am Institut für Angewandte Geophysik der JOANNEUM RESEARCH eine thermische Meßsonde entwickelt. Sie besteht aus einem System von Heizstäben und acht bzw. zehn Temperatursensoren. Die Sonde (Länge 2 m) wird in den zu untersuchenden Abschnitt eingebracht und die Temperaturveränderung sowohl beim Aufheiz- als auch beim Abkühlvorgang on-line registriert. Der Temperaturverlauf ist im wesentlichen bestimmt von

- der Heizleistung der Sonde H ,
- dem Bohrlochdurchmesser d ,
- der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit (v_g) sowie
- konstruktiven thermischen Merkmalen der Sonde und des Bohrloches.

In stagnierendem Wasser erfolgt eine rasche Temperaturzunahme während der Aufheizphase und eine sehr langsame Temperaturabnahme in der Abkühlphase. Bei durchströmtem Bohrloch hingegen ist bei der Aufheizung die Temperaturzunahme deutlich geringer. In der Abkühlphase erfolgt eine rasche Temperaturabnahme.

Die Auswertung der Temperaturdaten wird mit zwei rechnergestützten Bearbeitungsalgorithmen vorgenommen:

- a) iterative Anpassung der gemessenen $T(t)$ -Verläufe an berechnete Modellkurven für die Aufheiz- und Abkühlphase,
- b) Regressionsanalyse der $T(t)$ -Kurve der Abkühlphase.

Figur 2a zeigt für zwei ausgewählte Temperatursensoren die gemessenen $T(t)$ -Kurven im Vergleich mit berechneten Modellkurven. Die gemessenen $T(t)$ -Verläufe liegen im Bereich der für $v_g = 25$ bzw. 30 m/Tag berechneten Modellkurven.

In Fig. 2b sind die entsprechenden Regressionsanalysen dargestellt. Sie führen auf v_g -Werte von 21 bzw. 27 m/Tag und zeigen damit eine hinreichend gute Übereinstimmung.

Figur 3a zeigt ein Beispiel für einen sehr gering durchströmten Aquifer. Der Kurvenvergleich führt auf v_g -Werte von $1\text{--}3 \text{ m/Tag}$. Mit dem fotometrischen Verfahren wurde im gleichen Horizont $v_g = 2,5 \text{ m/Tag}$ ermittelt (Fig. 3b).

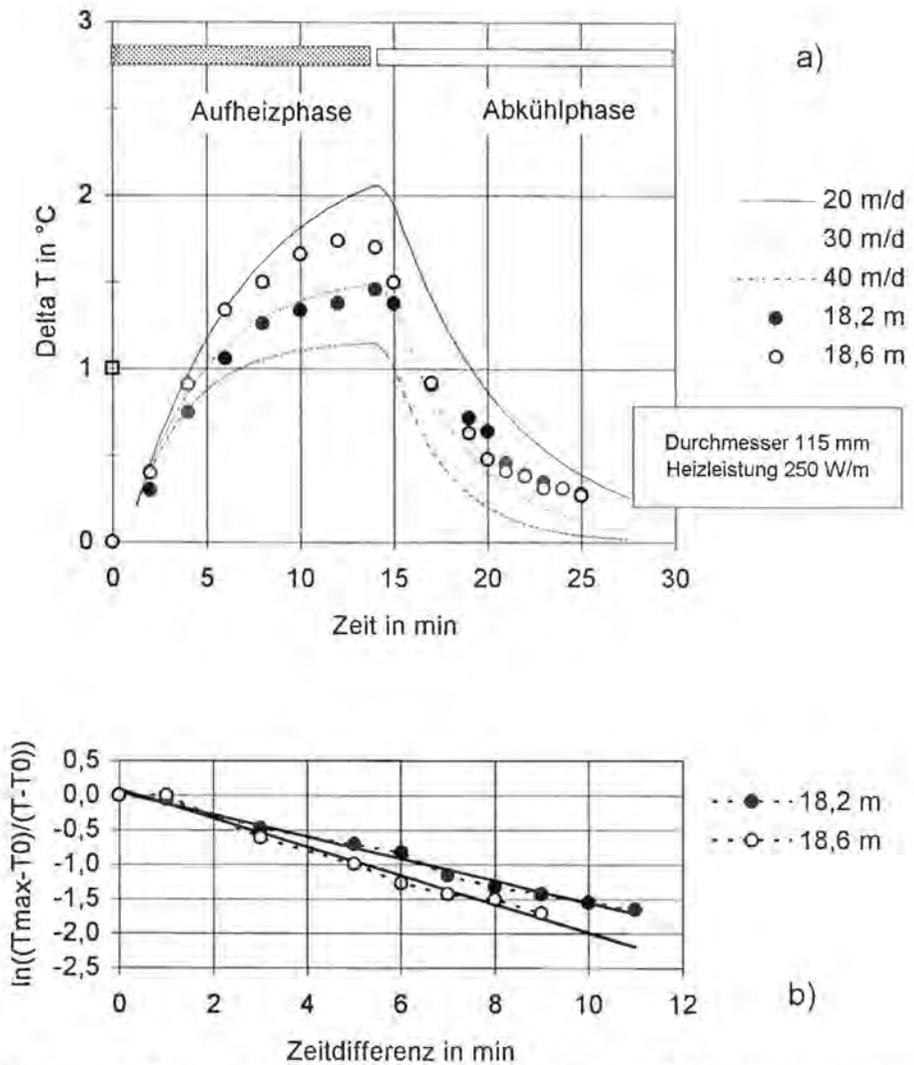


Fig. 2: Thermische Ermittlung der Verdünnungsgeschwindigkeit v_g . a) Aufheiz- und Abkühlvorgang; die Punkte stellen Meßwerte dar, die Kurven wurden berechnet; b) Regressionsanalyse des Abkühlvorganges; die Verdünnungsgeschwindigkeit wird aus der Neigung der Regressionsgeraden bestimmt.

Thermal determination of dilution velocity v_g . a) Heating and cooling process; dots are measured values, curves are calculated; b) regression analysis of the cooling process, v_g is determined by the slope.

Die dargestellten Beispiele zeigen jeweils nur Meßergebnisse von zwei Sensoren. Insgesamt werden acht bzw. zehn Sensoren verwendet. Die damit im Abstand von 20 cm ermittelten v_g -Werte liefern im Endergebnis wiederum eine Kurvendarstellung analog Fig. 1 oder eine profilartige Darstellung (Fig. 4).

Da die thermische Meßsonde ohne stoffliche Tracerzugabe arbeitet, ergeben sich ihre besonderen Einsatzmöglichkeiten für Untersuchungen

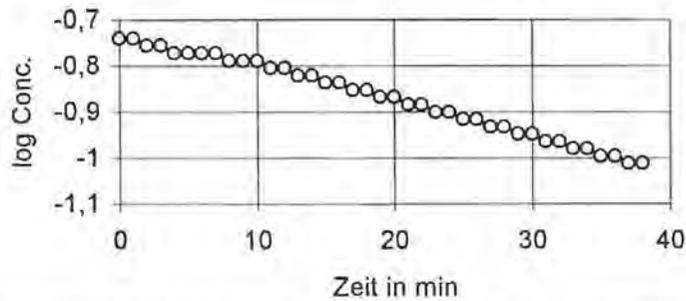
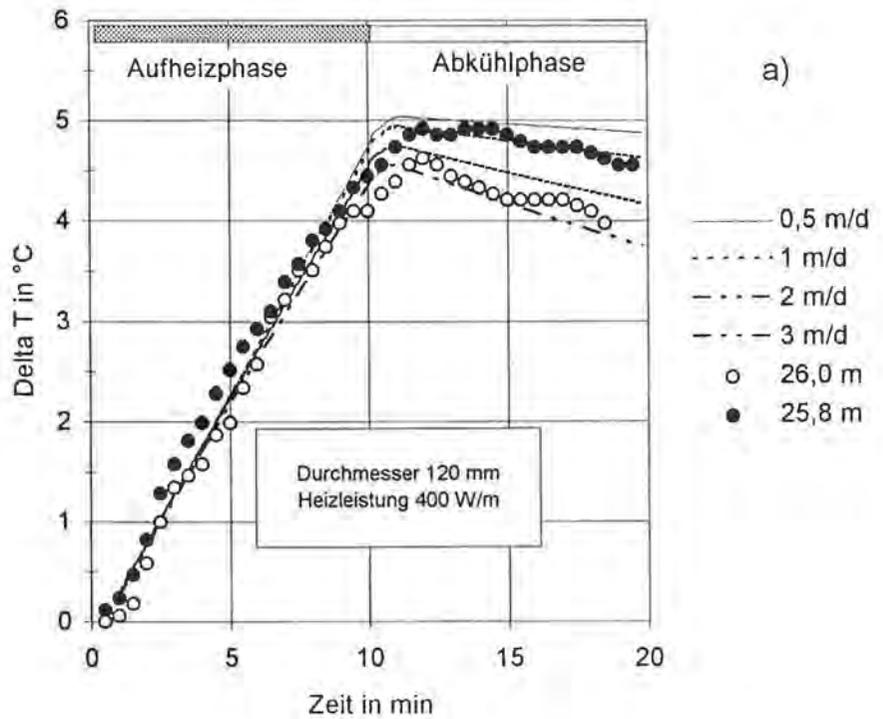


Fig. 3: Untersuchung eines sehr gering durchströmten Grundwasserbereiches. a) Aufheiz- und Abkühlvorgang; die Punkte stellen Messwerte dar, die Kurven wurden berechnet; b) Ergebnis einer punktuellen fotometrischen Messung im gleichen Horizont.
 Investigation of an aquifer with very low water motion. a) Heating and cooling process; dots are measured values, curves are calculated; b) result of a single point determination with the photometric method.

- des Grundwassers ohne irgendeine Beeinflussung seiner Zusammensetzung,
- im Umweltbereich ohne Beeinflussung des Fluidchemismus bei nachfolgenden Analysen,
- im trüben Fluid.

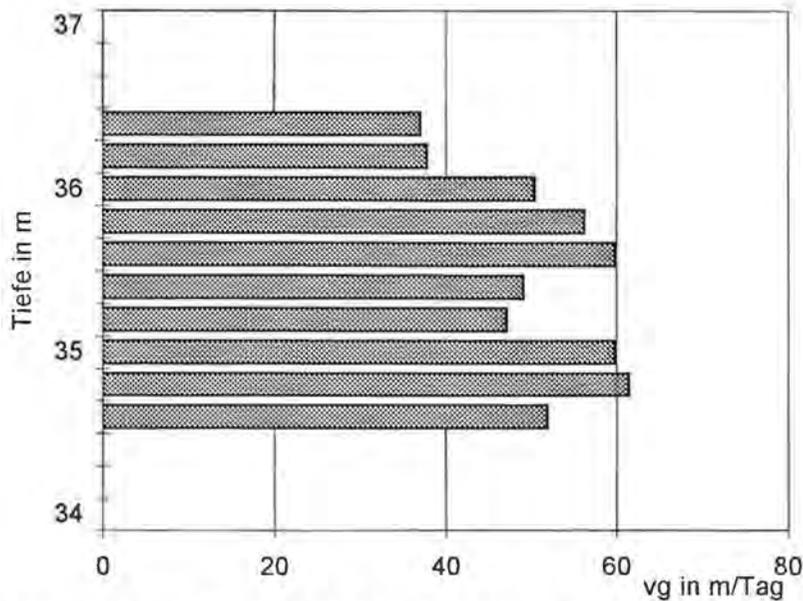


Fig. 4: Zusammenfassende Darstellung der thermischen Untersuchung eines durchströmten Aquiferbereiches (vertikale Verteilung der v_g -Werte).
 Summary of results from thermal measurements in an aquifer (vertical distribution of the v_g values).

3. Eine Meßsonde zur Abschätzung der Strömungsrichtung

Die Ermittlung der Strömungsrichtung in einem ausgebauten Bohrloch beinhaltet eine Reihe grundsätzlicher Probleme. Diese sind insbesondere durch den Einfluß der Bohrung und ihres Ausbaues auf das „innere“ Strömungsfeld im Bohrloch gegenüber dem „äußeren“ Strömungsfeld bedingt. Aus diesem Grunde sollten stets mehrere Messungen in unterschiedlichen Positionen innerhalb eines Aquifers erfolgen.

Die Meßsonde besteht aus einem azimutalen Leitfähigkeitssensor und einer Meßeinrichtung zur Ermittlung der Sondenorientierung (die Idee zu einer derartigen Sonde geht auf gemeinsame Diskussionen mit Herrn Dr. G. SUETTE vom Amt der Stmk. Landesregierung und Dipl. Ing. Dr. Chr. SCHMID von JOANNEUM RESEARCH zurück).

Der Meßsensor ist aus zwei, dem Rohrrinnendurchmesser angepaßten Plexiglasscheiben aufgebaut. Zwischen den beiden Scheiben, die einen Abstand von 5 cm haben, befinden sich im Azimutabstand von 30° Elektrodenpaare zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit.

Nach Einbringung der Sonde in die Untersuchungstiefe erfolgt zunächst in allen 12 Azimuten eine Leitfähigkeitsmessung (Nullmessung) und das Feststellen der N-Orientierung des Systems. Die Übertragung der Orientierung des Sensorsystems erfolgt mit einer mit dem System starr verbundenen wasserdicht gekapselten Kompaß-Miniaturfernsehkamera-Anordnung nach übertage.

Danach wird in das Zentrum der Sonde ein perforierter, mit NaCl gefüllter Zylinder eingebracht und zu verschiedenen Zeiten die azimutale Leitfähigkeitsänderung ge-

messen. Das vom Wasser teilweise gelöste NaCl wird vorzugsweise in Strömungsrichtung transportiert und führt an den entsprechenden Elektrodenpaaren zu einer Leitfähigkeitserhöhung im Abströmbereich.

In einer zweiten Version wird der zu untersuchende Bohrlochbereich vor der Messung mit NaCl-Lösung versetzt und eine Verdünnungsmessung vorgenommen. Hierbei erfolgt die Leitfähigkeitsabnahme vorrangig im Zuströmbereich.

Figur 5 zeigt das Ergebnis derartiger Messungen. Als azimutales Diagramm ist die Leitfähigkeitsänderung zu verschiedenen Zeiten nach der Tracerzugabe (a) bzw. dem Meßbeginn (b) dargestellt.

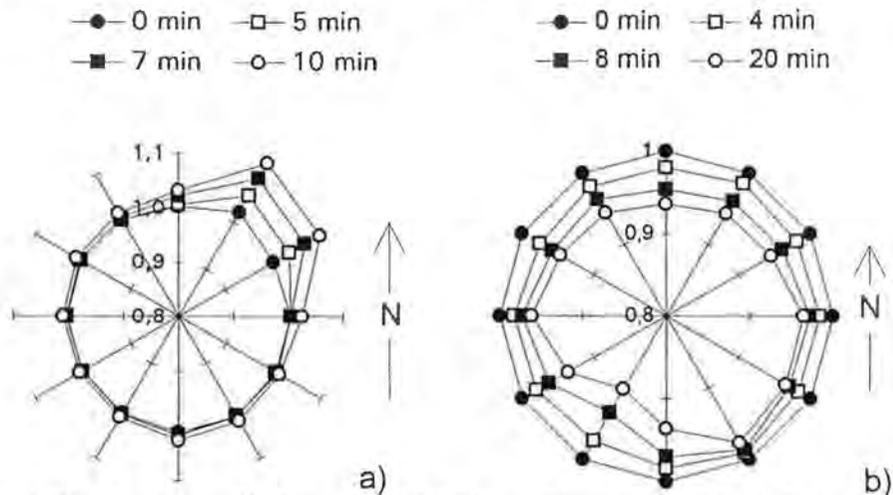


Fig. 5: Zwei Beispiele zur Abschätzung der Fließrichtung. Die zu unterschiedlichen Zeiten gemessenen Leitfähigkeiten wurden auf den Anfangswert (0 min) normiert. a) Salzzugabe im Zentrum des Sensors; die abgeleitete Strömungsrichtung verläuft von SW nach NE; b) Salzzugabe im gesamten Bereich vor der Messung, die abgeleitete Strömungsrichtung verläuft von SW nach NE.

Two examples for direction estimation. The individual conductivity values are normalized by the initial values (0 min). a) NaCl injection in the center of the sensor; derived direction is from SW to NE; b) NaCl injection in complete intersection before measurement starts; derived direction is from SW to NE.

Eine modifizierte und ebenfalls in Erprobung befindliche Version der Meßanordnung zur Ermittlung der Fließrichtung arbeitet mit einer Farbstoffinjektion im Zentrum des Sensors und der über die TV-Kamera verfolgbaren bzw. registrierbaren Bewegung der „Farbstoffwolke“ vor dem dahinterliegenden Kompaß.

Zusammenfassung

Die vorgestellten Meßsonden dienen zur Ermittlung

- von Strömungsgeschwindigkeiten (Verdünnungsgeschwindigkeit) in Bohrungen bzw. Brunnen mit einem fotometrischen Farbtracerverfahren bzw. einer thermischen Meßsonde ohne stofflichen Tracerzusatz; das Ergebnis ist eine profilartige, differenzierte

- Darstellung der Verdünnungsgeschwindigkeit und damit der hydraulischen Eigenschaften als Funktion der Tiefe;
- der Strömungsrichtung mit einer azimutalen Leitfähigkeitssonde bzw. einer Farbstoffinjektionssonde bei gleichzeitiger Bestimmung der Sensororientierung über eine Kompak-Miniaturfernsehkamera-Anordnung.

Da bei beiden Meßverfahren eine Reihe von Einfluß- und Störfaktoren (insbesondere Ausbaueigenschaften) wirksam sind, besteht ein wesentliches Anliegen künftiger Untersuchungen in Vergleichsmessungen mit hydrogeologischen Untersuchungstechniken.

Literatur

- BERGMANN, H. (1970): Über die Grundwasserbewegung am Filterrohr.– GSF-Bericht R 24, Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlenforschung m.b.H München.
- BERGMANN, H. (1971): Hydromechanische Fragen zur Interpretation von Tracermessungen.– GSF-Bericht R 36, Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlenforschung m.b.H München.
- DROST, W. (1984): Einbohrlochmethoden zur Bestimmung der Filtergeschwindigkeit und der Fließrichtung des Grundwassers.– Wasser und Boden, Heft 4, 149–153, Hamburg.
- FRITSCH, V. & A. TAUBER (1972): Neuere Ergebnisse der elektrothermischen Markierungsmethode bei Grundwasseruntersuchungen.– Geol. Jb., C 2, 89–101, Hannover.
- GSF (1978): Jahresbericht 1978.– GSF-Bericht R 207, Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlenforschung m.b.H München.
- GSF (1979): Jahresbericht 1979.– GSF-Bericht R 240, Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlenforschung m.b.H München.
- KLOTZ, D. & R. CHAND (1979): Laboruntersuchungen mit dem Tracerverfahren.– GSF-Bericht R 188, Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlenforschung m.b.H München.
- MARES, St. & R. SCHÖLLER (1992): Bohrlochdurchflußmeßgerät für kleine Durchflußmengen.– Abschlußbericht 1992, Institut für Angewandte Geophysik der JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH Graz und Geophysikalisches Institut der Karls-Universität Prag.
- PRENSKY, S. (1992): Temperature Measurements in Boreholes – An Overview of Engineering and Scientific Applications.– The Log Analyst, May–June 1992, 313–333, Houston.
- SCHNEIDER H. (1973): Die Wassererschließung.– Essen (Vulkan-Verlag).
- SCHÖN, J. H. (1994): Geophysikalische Bohrlochmeßeinrichtung auf thermischer Basis zur Untersuchung von Strömungsvorgängen für Hydrologie und Umweltschutz.– Abschlußbericht 1994, Institut für Angewandte Geophysik der JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH Graz.

Summary

The investigation of horizontal water motion in wells is an important part of geophysical measurements for water and environmental applications. For the horizontal dilution velocity a photometric tracer technique and a thermal method is described. The thermal method allows the dilution velocity determination without any substantial tracer. – For the determination of the flow direction a 12-electrode sensor is applied. Water flow changes the electrical conductivity depending on the flow direction of the NaCl tracer. The sensor orientation is determined by a TV-camera connected with the sensor.