

Thermo-Flowmeter Messung vertikaler Grundwasserströme



Berghof-Thermo-Flowmeter Ein hochauflösendes Flowmeter zur Strömungsmessung

Das Berghof-Flowmeter ist ein hochsensibles und hochauflösendes Flowmeter. Es misst sehr kleine Fließgeschwindigkeiten im Wasser durch die Anwendung des Prinzips der konstanten thermischen Anemometrie (CTA).

Das Thermo-Flowmeter von Berghof wurde für hochauflösende Messungen von vertikalen Fließbewegungen in Bohrungen, Grundwassermessstellen und Brunnen entwickelt. Die Datenverarbeitungssoftware ist speziell auf die Anwendung in Grundwassermessstellen abgestimmt. Nach dem Prinzip der Constant-Temperature Anemometry (CTA) wird der Abkühl-

lungseffekt einer Strömung auf einen beheizten Körper (Sensor) genutzt. Während der Messfahrt des Thermo-Flowmeters wird in der Mitte der Messstelle die Fließgeschwindigkeit gemessen und in Abhängigkeit von der Tiefe aufgezeichnet.

Einsatzgebiete für Thermo-Flowmeter

Detektierung von eventuell vorhandenen hydraulischen Kurzschlüssen. Aufgrund der hohen Auflösung können auch kleinste Strömungen quantitativ erfasst werden
Bestimmung von Zuflusshorizonten und
Berechnung von horizontierten Durchlässigkeitsbeiwerten
Horizontierte, stockwerksbezogene Ermittlung von Stoffkonzentrationen (horizontierte Probenahmen)

Die Kombination einer Thermo-Flowmetermessung mit einer horizontierten Low-Flow Probenahme im angeregten Förderstrom macht Analysen von einer abschnittswisen durchflussgemittelten Mischprobe möglich. Diese Methodik ist unabhängig vom Messstellenausbau, sie kann ohne Einschränkungen auch an voll verfilterten Messstellen durchgeführt werden.

Thermo-Flowmeter: das Equipment

Die Grundausrüstung des Berghof-Thermo-Flowmeters besteht aus folgenden Bestandteilen:

Sensor, bestehend aus einer „Heizplatte“ und einem zusätzlichen Temperatursensor (Abb. 2)

Sonde mit eingebautem Sensor und verstellbarer Zentriereinrichtung. Die Zentriereinrichtung kann an die unterschiedlichen Durchmesser der Messstellen angepasst werden.

Winde, digital gesteuert mit bis zu 200 m Drahtseil

Steuergerät

Notebook

Entwickelt wurde das Gerät in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung - IWS Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) und der Berghof Analytik + Umweltengineering GmbH.

Messprinzip der Thermo-Flowmetermessungen

Das Berghof-Thermo-Flowmeter (Abb.1) dient zur Messung von vertikalen Grundwasserströmungen in Grundwassermessstellen, Bohrungen und Brunnen. Im Gegensatz zu herkömmlichen



Abb. 1: Messsonde

Impeller-Flowmetern (Flügelradmessungen) wird die Fließgeschwindigkeit über die Messung von Temperaturen ermittelt. In einem Sensor (Abb.2) wird eine kleine Platte bis zu einer definierten Temperaturdifferenz zur Umgebung aufgeheizt. Wird der Sensor mit Wasser angeströmt, kühlt die Platte ab. Die zur Aufrechterhaltung der konstanten Temperaturdifferenz notwendige Heizenergie ist ein Maß für die vorhandene Strömungsgeschwindigkeit („Constant-Temperature Anemometry“ (CTA)).

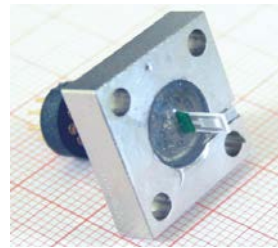


Abb.2: Sensor

Die geringe Masse des Sensors führt zu schnellen Reaktionszeiten und kurzen Aufwärmzeiten. Aufgrund dieser hohen Empfindlichkeit des Sensors können Fließgeschwindigkeiten von wenigen mm/s erfasst werden.

Einsatzgebiet 1: Hydraulischer Kurzschluss

Werden in einer Grundwassermessstelle zwei Grundwasserleiter mit unterschiedlichen Druckpotentialen verbunden, liegt in dieser Messstelle ein hydraulischer Kurzschluss vor (Abb.3). Durch den Kurzschluss entsteht ein permanenter vertikaler Grundwasserfluss und es kommt zur Vermischung der Grundwässer aus den verschiedenen Stockwerken. Diese Vermischungen führen bei Grundwasserbeprobungen zu Fehleinschätzungen der stockwerksbezogenen Grundwasserbeschaffenheiten und der jeweiligen Potentiale. Mit dem Berghof-Thermo-Flowmeter ist es möglich, diese permanenten vertikalen Strömungen mit hoher Empfindlichkeit zu detektieren und zu messen. In den Tiefen der Messstelle, in denen Grundwasser zu- bzw. abfließt verändert sich die Strömungsgeschwindigkeit. Bei einem aufwärts gerichteten Kurzschluss tritt der Messstelle in tiefer gelegenen verfilterten Bereichen Grundwasser zu, welches in den oberen Filterbereichen wieder abfließt. Bei einer abwärts gerichteten Fahrt des Sensors, wird eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit im Bereich des Zuflusshorizontes und eine verringerte Strömungsgeschwindigkeit im Bereich des Abflusshorizontes gemessen (siehe Abb. 4). Bei einer Empfindlichkeit des Thermo-Flowmeter-Sensors von min. ca. 1 mm/s können in einer 5“-Messstelle noch Kurzschlussströmungen von 0,01 L/s detektiert werden. Störungen bei der Abwärtsbewegung des Sensors oder vorhandene Trübstoffe im Grundwasser reduzieren diese hohe Messauflösung.

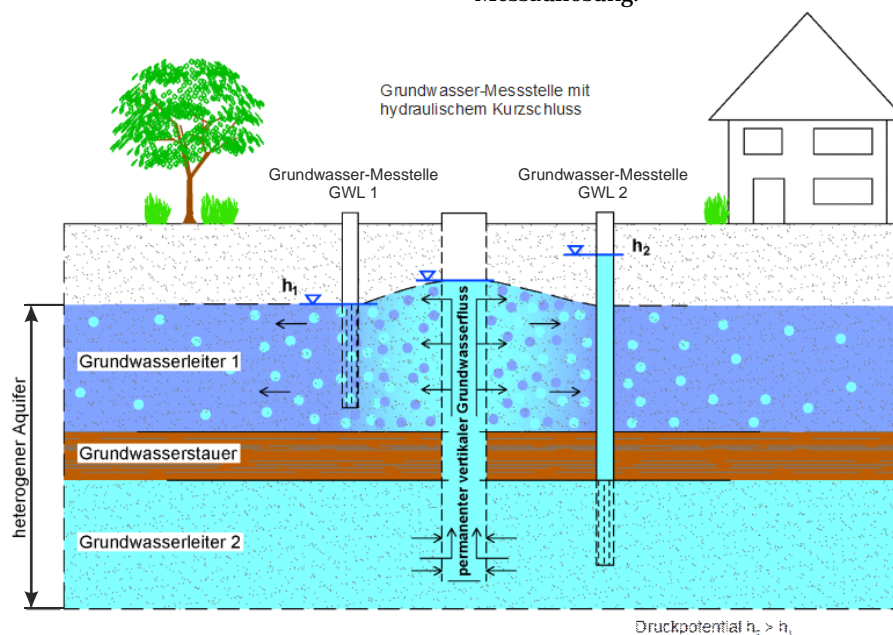


Abb. 3: Prinzip eines hydraulischen Kurzschlusses

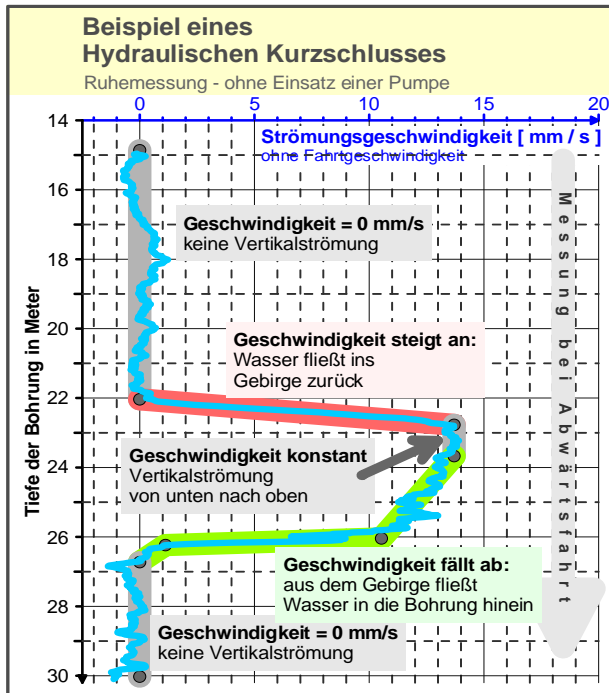


Abb. 4: Messkurve des Berghof-Thermo-Flowmeters bei Vorliegen eines Hydraulischen Kurzschlusses

Abbildung 4 zeigt ein Geschwindigkeits-/Tiefenlog bei Vorliegen eines hydraulischen Kurzschlusses. Die Messung erfolgte bei einer Abwärtsfahrt des Sensors. Die Fahrtgeschwindigkeit des Sensors ist bei dieser Darstellung bereits abgezogen

Zwischen 15 und 22 Metern unter Ansatzpunkt ist die Strömungsgeschwindigkeit Null. In diesem Bereich liegt keine vertikale Strömung vor. Zwischen 22 und ca. 23 Metern steigt die Strömungsgeschwindigkeit an. Von 23 bis ca. 24 Metern bleibt die Strömungsgeschwindigkeit konstant und sinkt dann wieder bis auf Null ab (ab 27 Metern bis zur Sohle).

Eine Strömungsgeschwindigkeit mit positivem Vorzeichen zeigt eine aufwärtsgerichtete Strömung in der Messstelle an. Eine Strömungsgeschwindigkeit mit negativem Vorzeichen zeigt eine abwärtsgerichtete Strömung an. Bei einer Aufwärtsfahrt des Sensors ist dies genau umgekehrt.

Im Beispiel der Abb.5 strömt der Messstelle im Bereich zwischen 27 und 24 Metern Grundwasser zu, fließt in der Messstelle nach oben und strömt im Bereich zwischen 23 und 22 Metern wieder ins Gebirge zurück. Über die gemessene Strömungsgeschwindigkeit in Verbindung mit dem Messstellendurchmesser lässt sich der absolute Fluss in L/s berechnen. Im Beispiel ergibt sich ein Fluss von 0,17 L/s bei einem 5-Zoll-Messstellenausbau.

Aufgrund der hohen Auflösung können jetzt auch kleinste hydraulische Kurzschlüsse detektiert werden, welche bisher nur über aufwendige Fluid-Logging-Messungen festgestellt werden konnten.

Einsatzgebiet 2: Bestimmung von Zuflusshorizonten

Hierzu wird direkt unterhalb des Grundwasserspiegels eine Pumpe betrieben. Mit dem Berghof-Thermo-Flowmeter wird die vertikale Strömungsabnahme von der Pumpe bis zur Sohle gemessen. Durch Abpumpen fließt der Messstelle in den verfilterten Bereichen Grundwasser zu. Dadurch baut sich in der Messstelle eine Vertikalströmung, welche zur Pumpe hin gerichtet ist. Bei einem homogenen Aquifer fließt der Messstelle pro Einheitsstrecke jeweils konstant viel Wasser zu, so dass die Strömungsgeschwindigkeit in der Messstelle von unten nach oben linear zunehmen würde. Auf Höhe des Pumpeneinlaufs wird die maximale Strömungsgeschwindigkeit erreicht. Diese lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$v_s [m/s] = (Q [m^3/s] / A [m^2]) + v_f [m/s]$$

v_s = Strömungsgeschwindigkeit

Q = Abpumprate

A = Messstellenquerschnitt

v_f = Fahrtgeschwindigkeit des Sensors

Liegen Horizonte unterschiedlicher Durchlässigkeiten vor, macht sich dies in einer Änderung des Anstieges der Strömungsgeschwindigkeit bemerkbar. Je höher die Durchlässigkeit des Horizontes ist, desto schneller steigt die Strömungsgeschwindigkeit in diesem Bereich an. Je geringer die Durchlässigkeit ist, desto mehr neigt sich die Messkurve zur Senkrechten hin. In den Bereichen, in denen der Messstelle kein Wasser zuströmt, bleibt die gemessene Strömungsgeschwindigkeit konstant (senkrechte Messkurve). Aus der Höhe der verschiedenen Zuflussraten und deren vertikaler Verteilung können stockwerksbezogene Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) berechnet werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die durchschnittliche Durchlässigkeit über die gesamte Aquifermächtigkeit (zum Beispiel aus Pumpversuchen) bekannt ist.

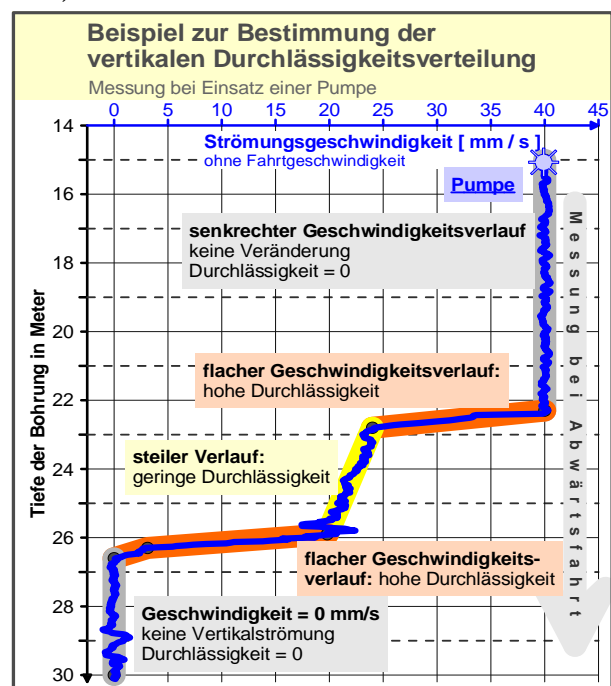


Abb. 5: Bestimmung von Zuflusshorizonten

Abbildung 5 zeigt ein Geschwindigkeits-/Tiefenlog, welches im angeregten (gepumpten) Zustand gefahren wurde. Das Log zeigt die Lage der vertikalen Zuflusshorizonte aus denen die stockwerksbezogenen Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) abgeleitet werden können.

Im dargestellten Beispiel fließt der Messstelle im Bereich zwischen 22 und 26,5 Metern unter Ansatzpunkt Grundwasser zu. In den darüber und darunter liegenden Abschnitten gibt es keine Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit. Die Durchlässigkeiten dieser Bereiche sind vernachlässigbar gering. Die Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit ist direkt proportional zur Durchlässigkeit.

Für derartige Messungen mit dem Berghof-Thermo-Flowmeter sind deutlich geringere Abpumpraten als bei konventionellen Flügelrad-Flowmetern notwendig. Dadurch können die Messungen mit relativ geringem Aufwand nun auch in gering durchlässigen Grundwasserleitern durchgeführt werden.

Einsatzgebiet 3: Horizontierte Grundwasserprobenahme

Durch eine Flowmetermessung unter Anregung lässt sich die Gesamtabpumprate einer Messstelle in stockwerksbezogene Zuflussraten aufteilen. Anschließend können abschnittsweise durchflussgemittelte Mischproben entnommen werden.

Mit Hilfe von mehreren Mini-Pumpen kleiner Förderleistung lassen sich aus dem Förderstrom in den gewünschten, definierten Tiefen Grundwasserproben entnehmen (siehe Abb.6).

Die in diesen Proben gemessenen Stoffkonzentrationen sind durchflussgewichtete Mittel der Konzentrationen aller Schichten, welche sich unterhalb der jeweiligen Probenahmetiefe befinden.

Aus der Verschneidung von mit Low-Flow-Proben ermittelten Stoffkonzentrationen mit stockwerksbezogenen Zuflussraten aus der Thermo-Flowmetermessung lassen sich stockwerksbezogene Konzentrationen berechnen.

Abbildung 6 zeigt ein Beispiel dieser Probenahmetechnik. Dabei wurden sechs Horizonte beprobt (Proben c1 bis c6). Aus der Thermo-Flowmetermessung unter Anregung (Einsatzgebiet 2) wurde für jede Probenahmetiefe die dazugehörige Fließgeschwindigkeit bestimmt. Das ergab für den untersten Horizont c6 = 0,279 L/s, für den zweituntersten c5 = 0,406 L/s und so fort. Als durchflussgewichtetes Mittel der Konzentrationen aller Schichten unterhalb der jeweiligen Probenahmetiefe wurden im Labor folgende Gehalte analysiert: für c6 = 130 µg/L, für c5 = 180 µg/L und so fort.

Die Verschneidung von Fließgeschwindigkeit und Mischkonzentration bei Anwendung der Mischungsregel ergibt die tatsächlichen absoluten stockwerksbezogenen Konzentrationen von 130 µg/L für das unterste Stockwerk, 289 µg/L für das zweitunterste und so fort (Abb.6 und Tab.1).

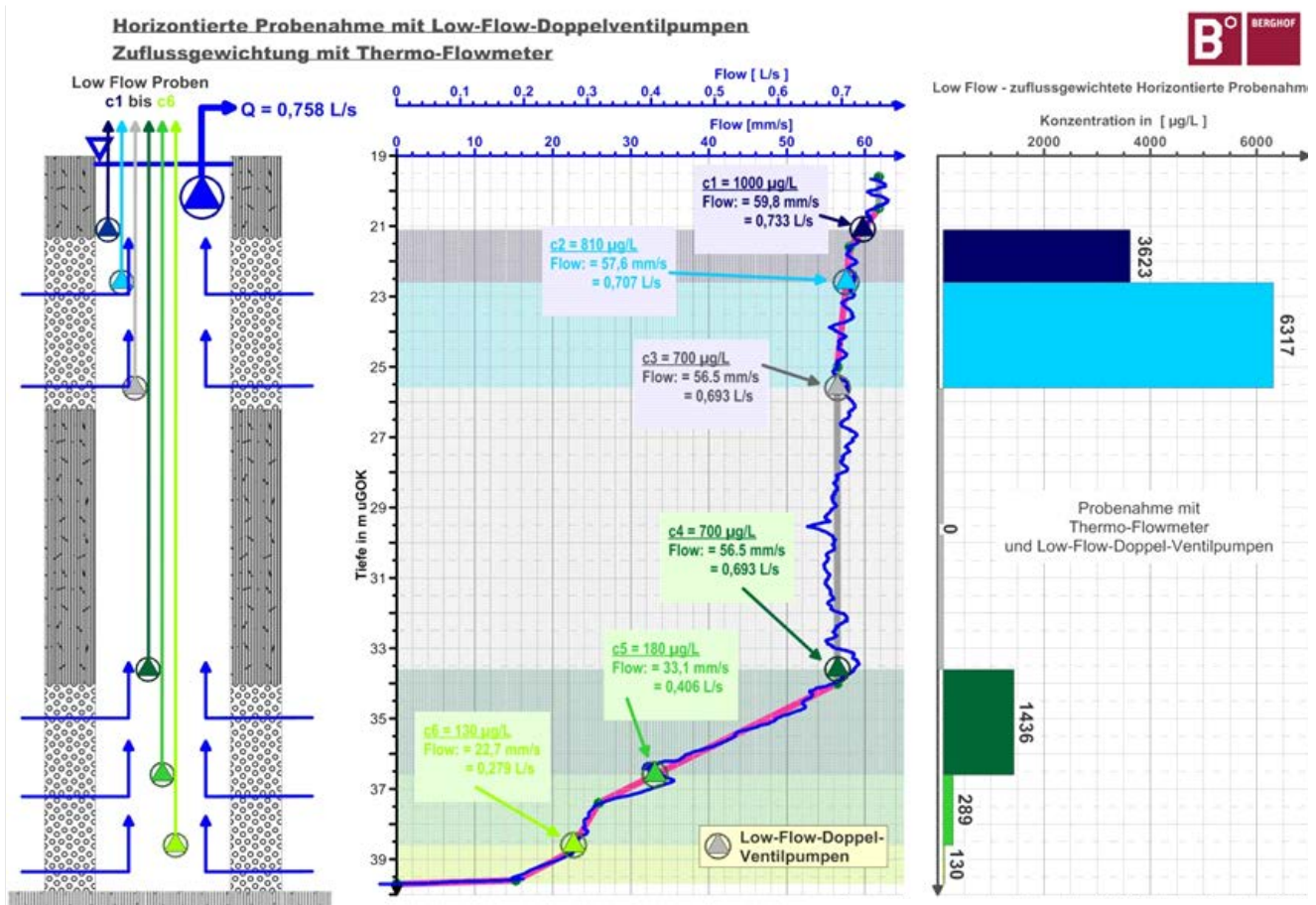


Abb.6: Beispiel einer durchflussgemittelten horizontierten Grundwasserprobenahme

Bezeichnung	Probenahmetiefe m u GOK	Durchfluss [L/s]	Mischkonzentration gemessen [$\mu\text{g/L}$]	Stockwerksbezogene Konzentration berechnet [$\mu\text{g/L}$]
C1	21,1	0,733	1000	3623
C2	22,6	0,707	810	6317
C3	25,6	0,693	700	0
C4	33,6	0,693	700	1436
C5	36,6	0,406	180	289
C6	38,6	0,279	130	130

Tab. 1: Ergebnis einer durchflussgemittelten horizontalen Grundwasserprobenahme

Durch Kombination des Berghof-Thermo-Flowmeter Systems mit Low-Flow-Probenahmepumpen können aus vollverfilterten Messstellen Konzentrationstiefenprofile ermittelt werden. Dies ist sonst nur mit sehr hohem Aufwand unter Verwendung von Mehrfachpackersystemen und Schutzbeprobung möglich und dann auch nur bei Kenntnis der Durchlässigkeitsverteilung (nach Braun, J. ET.AL. – 2009). Die Probenahmetechnik entspricht exakt der einer normalen durchflussgemittelten Mischprobe, so dass die Ergebnisse der „abschnittweisen durchflussgemittelten Mischprobe“ ein direktes vertikal differenziertes Abbild der normalen „durchflussgemittelten Mischprobe“ sind.

Vorteile des Berghof-Thermo-Flowmeters

Das gesamte Equipment ist klein, handlich und tragbar. Trotzdem handelt es sich beim Berghof-Thermo-Flowmeter um einen hochauflösenden Flowmeter, welcher Fließgeschwindigkeiten über Temperatureffekte misst. Die Vorteile des Thermo-Flowmeters gegenüber den konventionellen Flügelrad-Flowmetern liegen in der deutlich besseren Messgenauigkeit bei gleichzeitig deutlich reduziertem Messaufwand. So ist kein spezielles Messfahrzeug notwendig. Die Steuerung und die Datenspeicherung erfolgt über ein herkömmliches Standard-Notebook. Das Berghof-Thermo-Flowmeter Equipment kann in jedem Gelände eingesetzt werden. Aufgrund der hohen Auflösung können auch kleinste hydraulische Kurzschlüsse detektiert werden, welche bisher nur über aufwendige Fluid-Logging-Messungen festgestellt werden konnten.

In Grundwassermessstellen können mit dem Berghof-Thermo-Flowmeter vertikale Zuflusshorizonte quantitativ voneinander abgegrenzt und stockwerksbezogene kf-Werte berechnet werden. Für diese Thermo-Flowmetermessungen sind deutlich geringere Abpumpraten als bei konventionellen Flügelrad-Flowmetern notwendig. Dadurch kann die Methode auch in Grundwassergeringleitern eingesetzt werden. Gleichzeitig führen die geringen Abpumpraten zu geringeren Absenkungen im Brunnen, so dass größere Brunnenbereiche gemessen werden können. Die geringe Größe der Messsonde stellt hier einen weiteren Vorteil gegenüber Impeller-Flowmetern dar.

Mit dem Berghof-Thermo-Flowmeter steht ein einfaches Werkzeug zur qualitativen Überprüfung von Grundwassermessstellen zur Verfügung: Wasserstands- und Analysenwerte aus Messstellen mit einem hydraulischen Kurzschluss verfälschen die gesamten Untersuchungsergebnisse. Sind die hydraulischen Kurzschlüsse jedoch bekannt, können diese Werte entsprechend eingestuft und gewertet werden. Durch die Bestimmung von vertikal variierenden Zuflusshorizonten können genauere Emissions- und Immissionsbetrachtungen durchgeführt werden. Grundwassersanierungen können so auf das Notwendigste begrenzt werden.

In Kombination mit Low-Flow Probenahmen aus dem Förderstrom sind auf einfache Art und Weise kostengünstige horizontalisierte Probenahmen völlig unabhängig vom Messstellenausbau möglich. Die Methode kann unabhängig vom Ausbau in jeder Messstelle angewandt werden. Die hydraulischen Grundbedingungen sind bei dieser Methode die gleichen wie bei einer herkömmlichen Mischprobenahme. Die Ergebnisse von Mischproben und horizontalisierten Proben können daher direkt in Bezug zueinander gesetzt werden.

Anwender

Als Anwender kommen Ingenieurbüros und Messstellen- oder Brunnenbetreiber in Frage, welche mit Hilfe der Berghof-Thermo-Flowmetermessungen ihre gutachterliche Interpretation präzisieren können. Diese Anwender erhalten durch die Ergebnisse der Thermo-Flowmetermessungen einen deutlichen Erkenntnisgewinn. So können sie Probenahmen gezielt auf einzelne Horizonte abstimmen. Für Monitored Natural Attenuation (MNA) Konzepte ergeben sich wichtige Aussagen z.B. über die vertikale Schadstoffverbreitung. Thermo-Flowmetermessungen sollten Bestandteil einer Eignungsprüfung für Grundwassermessstellen werden. Die Ergebnisse sollten in einem „Messstellenpass“ dokumentiert werden. Messstellen mit hydraulischem Kurzschluss können so aus den Grundwasserüberwachungsprogrammen selektiert werden.

Die Auswertung der Messergebnisse ist auch für Nicht-Geophysiker möglich.

Literatur

Barczewski, B.; Marschall, P. (1990): Untersuchungen zur Probenahme aus Grundwassermessstellen. Wasserwirtschaft 80, Heft 10, S. 506 - 513; Stuttgart.

Barczewski, B. et al. (Hrsg) (2004): VEGAS Statuskolloquium 2004; Mitteilungen / Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart: H. 131; Stuttgart.

Braun, J., Heitmann, T. und N. Klaas (2009): Projektverbund Vor-Ort-Messtechnik, TV 1: Entwicklung eines Validierungsverfahrens als Voraussetzung für den Technologietransfer in die Praxis der Altlastenbearbeitung; Wissenschaftlicher Bericht Nr.

VEG 35, 2009/04. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 4/2009.

DECHEMA e.V. (HRSG.) (2008): Handlungsempfehlungen, Natürliche Schadstoffminderung bei der Sanierung von Altlasten, Bewertung und Anwendung, Rechtliche Aspekte, Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz, mit Methodensammlung; Projektübergreifende Begleitung des BMBF-Förderschwerpunktes KORA; Frankfurt a.M. November 2008.

DVWK-MERKBLATT 245/1997 (1997): Tiefenorientierte Probenahme aus Grundwassermessstellen; Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), Bonn; ISBN 389554-041-2.

HALLA, P. (2006): Messung vertikaler Durchlässigkeitsverteilungen mittels Thermoflow, Tagungsband, Symposium Vor-Ort-Analytik - Feldmesstechnik für die Erkundung von kontaminierten Standorten, 28.-29.11.2006, Stuttgart.

MICHELS J., STUHRMANN M., FREY C. UND KOSCHITZKY H.P. (2008): Handlungsempfehlungen, Natürliche Schadstoffminderung bei der Sanierung von Altlasten, mit Methodensammlung; projektübergreifende Begleitung des BMBF-Förderschwerpunktes KORA; Methode M5.1.3 – S.332; Hrsg. und Vertrieb: DECHEMA e.V., Forschungs- und Projektkoordination; Frankfurt.

Ihre Ansprechpartner

Ravensburg: Dipl.-Biologe Christian Eichelmann | T +49.751.50921-68 | christian.eichelmann@berghof.com
Tübingen: Dipl.-Geologe Peter Halla | T +49.7071.9328-23 | peter.halla@berghof.com