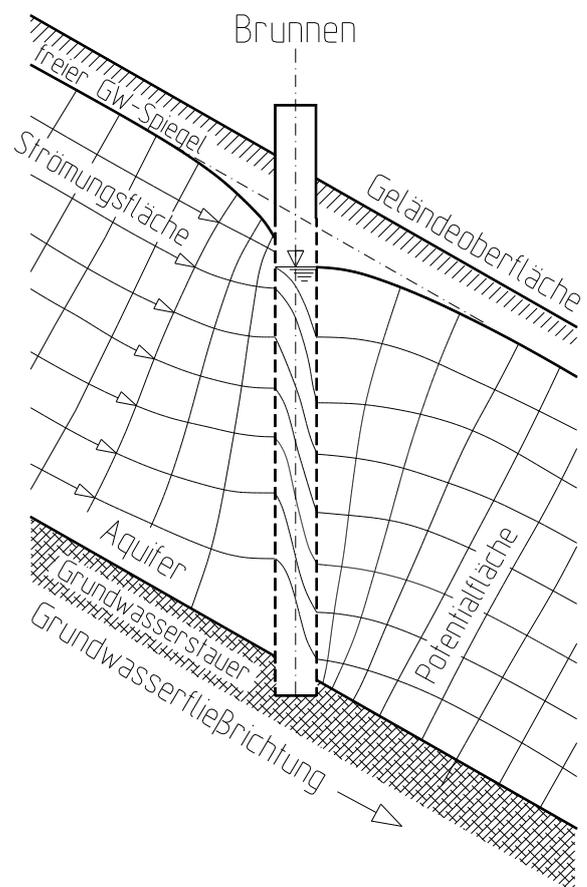


Ursachen vertikaler Fließbewegungen in Brunnen

Vertikale Fließbewegungen in Brunnen können vielfältige Ursachen haben. Üblicherweise liegen hydraulische Kurzschlüsse innerhalb eines einzelnen Aquifers vor oder mehrere Grundwasserstockwerke mit unterschiedlichem hydraulischem Druckpotential sind über Filterstrecken erschlossen und verbunden. Dabei wird jeweils der Wegsamkeitsvorteil der frei durchströmbaren Messstelle genutzt, um hydraulische Druckunterschiede auszugleichen. Der reibungsfreie Durchfluss im Filterrohr als bevorzugte Wegsamkeit in Richtung des hydraulischen Gefälles bewirkt in der Regel einen erhöhten Grundwasserzustrom in obere Brunnenbereiche und einen erhöhten Abfluß an der Brunnensohle. (Abb.1). Somit kommt es zu Ausbildung einer zuflußdominierten Zone im oberen Brunnenabschnitt und einer abflußdominierten Zone im unteren Brunnenabschnitt (BERGMANN 1970).

Abb. 1: Durch einen vollkommenen Brunnen gestörtes Parallelfeld (Schöttler 1997 nach Bergmann 1970). Aufgrund des widerstandsfreien Durchflusses in Richtung des Grundwassergefälles tritt im Filterrohr eine stationäre, vertikale Strömung auf.



Weitere Ursachen können induzierte vertikale Fließbewegungen infolge von Grundwasserförderung, unvollkommen ausgebaute Brunnen, unterteilte und unterbrochene Filterrohrstrecken, artesische Grundwasserhältnisse, Dichte- und Temperaturkonvektionen im Filterrohr und osmotische Zirkulation infolge chemischer Ungleichgewichte sein.

In der Praxis sind die Potentialflächen in Porengrundwasserleitern korrespondierend zum Grundwassergefälle geneigt aber aufgrund heterogener Strömungsbedingungen häufig verzerrt. Potentialflächen und Filterrohrachse verlaufen daher oft nicht parallel zueinander, sondern weichen auf der vertikalen Strömungsfläche um einen variierenden Winkelbetrag ε voneinander ab (Abb.2). Verzerrte Parallelfelder stellen die häufigste Ursache für natürlich induzierte Vertikalströmungen in Bohrbrunnen dar. Solche Verzerrungen können beispielsweise durch Infiltrations- und Vorflutereinflüsse, schwankende Aquifermächtigkeiten, veränderliche Durchlässigkeiten oder ausgeprägte Unebenheiten der Aquifersohle bedingt sein. Abbildung 2 zeigt die Ausbildung eines verzerrten Parallelfeldes in einem Porengrundwasserleiter aufgrund eines unförmigen Grundwasserstauer. Die Verzerrung bewirkt unterschiedliche Winkelabweichungen zwischen Filterrohrachse und Potentialfläche. Ist die Potentialfläche gegenüber der Filterrohrachse in Abflussrichtung geneigt ($+\varepsilon$), so tritt aufgrund des widerstandsfreien Durchflusses im Filterrohr in Richtung des Potentialgefälles eine abwärts gerichtete Vertikalströmung auf. Ist die Potentialfläche gegenüber der Filterrohrachse in Anstromrichtung geneigt ($-\varepsilon$), so tritt im Filterrohr eine aufwärts gerichtete Vertikalströmung auf. Es kommt somit zur Ausbildung von zufluß- und abflußdominierten Zonen (BERGMANN 1970). Je größer der Winkel ε ist, desto größer wird auch die Induktion einer Vertikalströmung im Brunnen. Dieses Induktionsbestreben wird auch von der Art des Bohrlochausbaus und dem Verhältnis der Brunnentiefe zum Brunnendurchmesser beeinflusst.

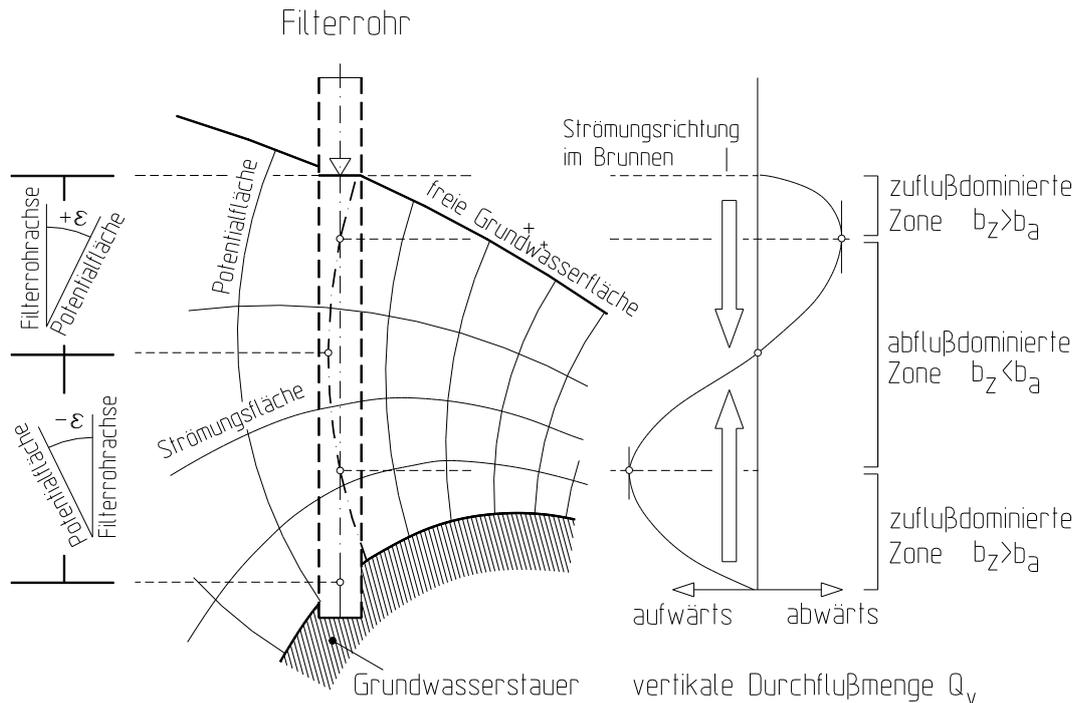


Abb.2: Vertikale Schnittebene des Grundwasserströmungsfeldes mit Filterrohr im verzerrten Parallelfeld (Schöttler 1997 verändert nach Bergmann 1970). Darstellung des Winkels ε .

Auch können Ablagerungen im Filterkies die Durchströmung durch fortschreitenden Ablagerungen und Zusetzen der Filterrohrschlitze beeinflussen. Ablagerungen setzen sich nicht nur auf dem Filterrohr und in den Filterschlitten, sondern auch in der Kieshinterfüllung und im unmittelbar umgebenden Grundwasserleiter ab. Als Folge erhöht sich der Strömungswiderstand im Porenraum was zu hydraulische Kurzschlüssen an der Messstelle führen kann. Diese Ablagerungen werden häufig durch die Durchmischung von Grundwässern unterschiedlicher physikochemischer Zusammensetzung infolge vertikaler Brunnenströmung verursacht. Sie erfolgt durch natürlich induzierte Vertikalströmungen oder als Folge von Grundwasserförderung.

Messverfahren

Die PHREALOG-Messtechnik ist eine innovatives Verfahren zur direkten und kontinuierlichen Messung der horizontalen oder wahlweise der vertikalen Fließrichtung und –geschwindigkeit des Grundwassers in Brunnen und Grundwassermessstellen. Das Verfahren zeichnet sich durch eine kontinuierliche Messwertaufnahme von bereits sehr geringen Fließbewegungen aus, ohne dass eine Markierung des strömenden Grundwassers erforderlich ist.

Mit dem Messsystem für vertikale Fließmessungen können Fließbewegungen von 10mm/s bis 0,1m/d kontinuierlich erfasst werden. Die untere Messgrenze von herkömmlichen, stationär einsetzbaren Fließmessverfahren in Brunnen, die beispielsweise auf Impeller, dem Drift von Hitzeimpulsen oder Aufsatzung o.ä. beruhen, liegt bekanntermaßen zwischen 10mm/s und 1mm/s. Fließbewegungen unterhalb diesem Geschwindigkeitsbereichs unterliegen zunehmend dem Einfluss geringer hydrodynamischer Druckschwankungen, die als permanenter „Hintergrund“ geringe Fließbewegung überlagern können. Diese sehr geringen hydraulischen Druckschwankungen sind beispielsweise durch Grundwasserentnahmen, Verkehr, Arbeiten im Grundwasserbereich als auch auf natürliche Ursachen wie der Einfluss von Vorflutern verursacht. Die kontinuierliche Erfassung von Messwerten bietet den Vorteil, Fließbewegungen über einen gewissen Zeitraum zu erfassen, bilanzieren und statistisch stichhaltig auswerten zu können. Dies ist bei konventionellen

Das PHREALOG-Messsystem – Vertikale Fließmessung

Einzelmessungen anderer Verfahren -insbesondere zur Erfassung geringer Fließbewegungen- nicht möglichen.

Die PHREALOG Messtechnik beruht auf der optischen Erfassung und Vermessung des Driftweges natürlicher Feinschwebstoffe mit der Grundwasserströmung. Die Fließbewegungen werden in einer Messzelle bzw. einem Durchflussrohr optisch per Kamera und Ausleuchtung per Laser über die Drift der natürlichen Feinschwebstofffracht mit dem strömenden Grundwasser erfasst und rechnergestützt vermessen. Dabei werden pro Einzelmessung eine Bildfolge aufgenommen und Schwebstoffmuster definiert, die über die zeitliche Bildabfolge verfolgt werden. Der Versatz eines Schwebstoffmusters beschreibt die Grundwasserfließbewegung in Richtung und Geschwindigkeit. Einzelmessungen erfolgen im Abstand von wenigen Sekunden, so dass der Strömungsverlauf zeitaufgelöst dargestellt wird. Da für die Messung keine künstliche Fließwegmarkierung erforderlich ist, erfolgt kein physiko-chemischer Eingriff in das strömende Grundwasser. **Es entfallen somit markierungsbedingte Messfehlerquellen als auch Einsatzgenehmigungen nach dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG).** Wegen der berührungsfreien Sensorik ist die Messtechnik wartungsfrei und in chemisch aggressivem Milieu hochrobust. Sie bietet einen einfachen Einsatz bei kurzen Rüstzeiten und erfordert keine Kalibrierung im Feld. Das Messsystem besteht aus einer Messsonde, die in diskreten Tiefenabschnitten einer Grundwassermessstelle temporär positioniert wird, kontinuierlich Messbilder erfasst und diese zur Auswertung an einen mobilen Rechner sendet.

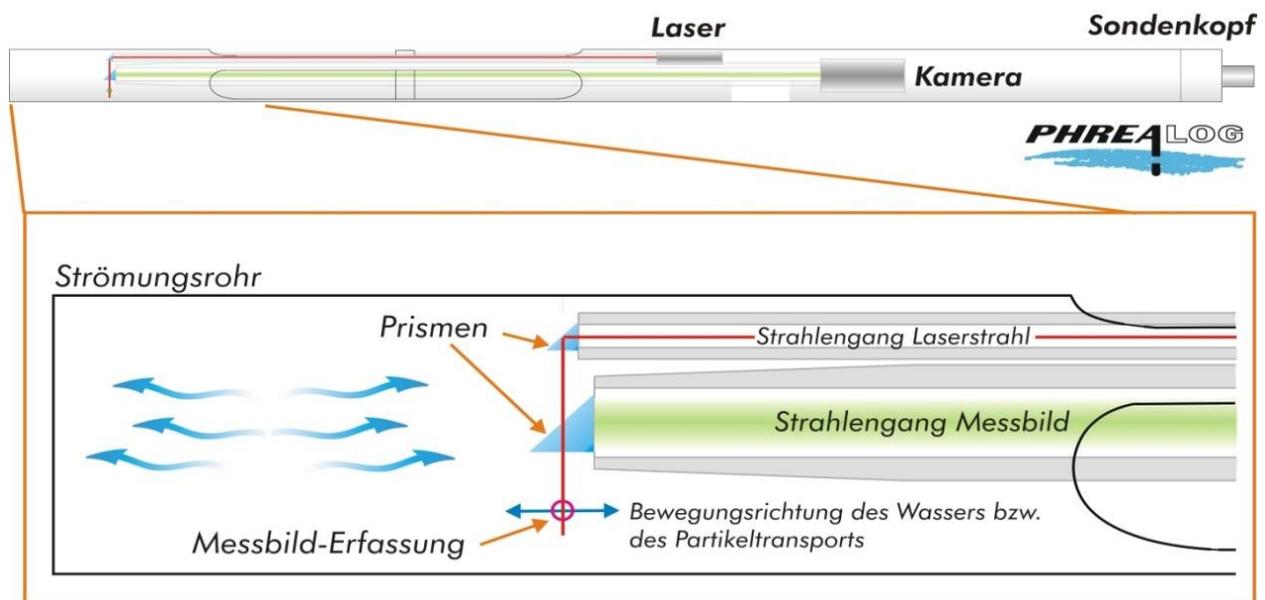


Abb.3: Schematisch: PHREALOG-Messsonde für vertikale Fließmessungen

Horizontale und wahlweise vertikale Fließgeschwindigkeiten können im Geschwindigkeitsbereich von ca. 10mm/s bis kleiner 0,1m/d zuverlässig ermittelt werden. Geschwindigkeiten $< 8 \times 10^{-7} \text{m/s}$ ($< 1 \text{cm/h}$) werden je nach Randbedingungen als nicht vorhandene Strömung gewertet bzw. gleich Null gesetzt, da hier thermische Effekte die Strömungsprozesse überlagern.

Eingesetzte Messsonden

Das PHREALOG-Messsystem besteht aus Messsonden, Datenübertragungskabel, Steuerungseinheit und Auswertungsrechner.

Abb.4: Darstellung der Messausrüstung und Einbau. Unten: Messsonde mit Blendenaufsatz



Messsonden und Blick in die Messzelle



Einbau mit Zentrierhilfen



Durchführung

Die Festlegung der Tiefenposition der Messungen erfolgt nach Vorgabe der Aufgabenstellung, der Filterrohrstrecke, des lithologischen Profils und ggfls. der geophysikalischen Vorinformationen. Die Messsonde wird über ein Tragekabel und mit Distanzhaltern zentrisch in die Messstelle eingefahren. Die vertikalen Fließmessungen erfolgen in diskreten Tiefen der Filterrohre. Die Messsonde wird im Messbetrieb entsprechend einer Vorgabe von Messpunktabständen (z.B. alle 0,2-1,0m) auf die jeweilige Tiefe gefahren und dort positioniert. Die Messsonde verbleibt in dieser Tiefenposition solange, bis sich ein stationäres Fließbild einstellt (steady-state-flow). Die hydraulische Stabilisierungsphase wird dokumentiert. Ab dem Zeitpunkt einer näherungsweise gleichbleibenden stationären Durchströmung erfolgt die Aufnahme von gültigen Messdaten.

Das PHREALOG-Messsystem – Vertikale Fließmessung

Nachdem eine hinreichende Anzahl von Daten für eine statistische Sicherung erfasst wurde, wird die Messsonde auf die nächste Messtiefenposition gefahren (Abb.5). Die Messungen werden in einem ersten Messlauf zunächst von oben (Oberkante Filterrohrstrecke) nach unten (Unterkante Filterrohrstrecke) durchgeführt, anschließend in einem zweiten Messlauf von unten nach oben. Im zweiten Messlauf werden Kontrollmessungen in einigen der Messtiefen des ersten Messlaufs wiederholt.

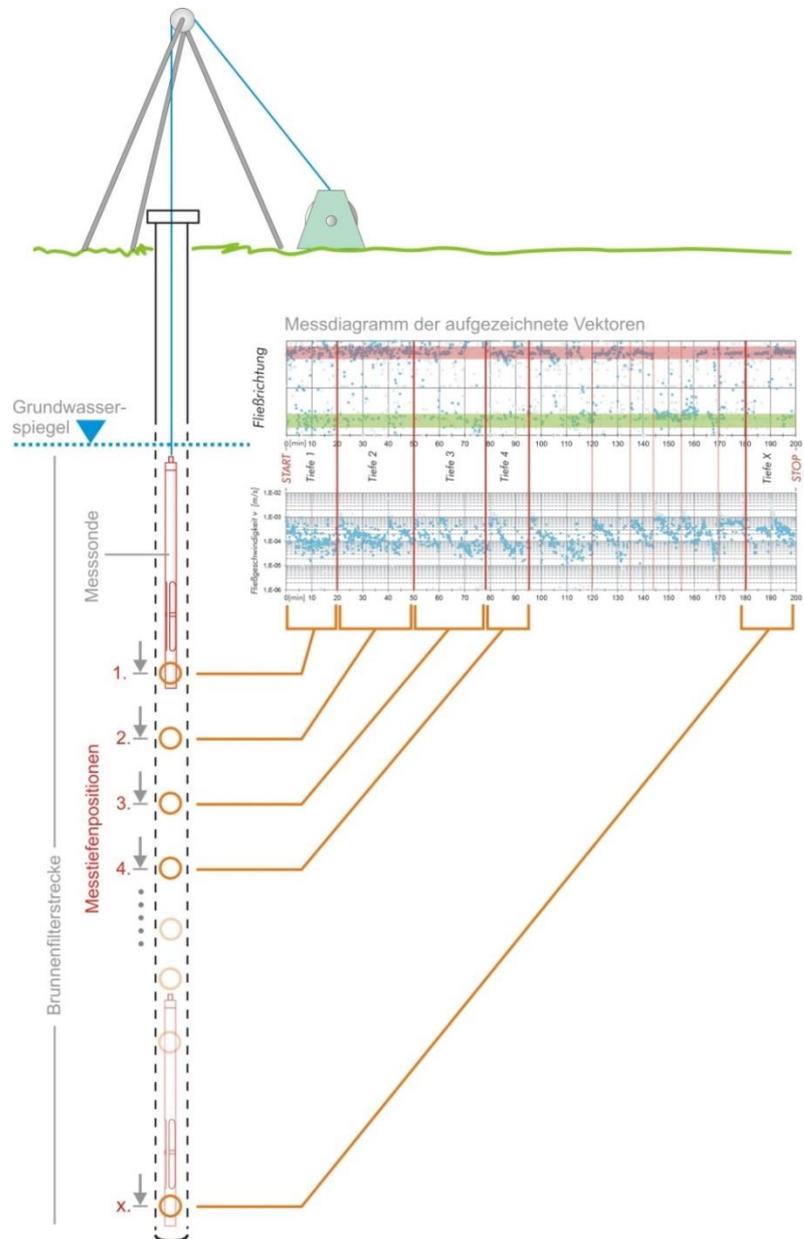


Abb.5:
Schematische Darstellung
einer Messwertaufnahme

Zur Sicherung der Ergebnisse müssen die Messzeiten pro Messtiefe so angesetzt werden, das den folgenden Umständen Rechnung getragen wird: (1) Das natürliche Fließverhalten variiert in Abhängigkeit hydrodynamischer Randparameter im Zeitverlauf und muss über einen vorgegebenen Zeitraum bilanziert werden. (2) Bei geringen Fließgeschwindigkeiten ist die Dauer zur Wiederherstellung der hydrodynamischen Verhältnisse nach Störung durch den Einbau/Umsetzen der Messsonde erfahrungsgemäß länger, weswegen hier längere Messzeiten zur statistischen Sicherung anzusetzen sind.

Die Dauer der Messungen wird vor Ort durch die kontinuierliche Auswertung der Messdaten optimiert und festgelegt. Die Ergebnisse können vor Ort präsentiert werden.

Das PHREALOG-Messsystem – Vertikale Fließmessung

Um eine verlässliche Beurteilung der Fließverhältnisse zu gewährleisten kann es z.B. bei instationären Strömungsbedingungen, sehr langsamen Strömungsgeschwindigkeiten oder bei einer erforderlichen Erhöhung der Anzahl tiefenorientierter Messungen pro Messstelle (z.B. in Kluffgrundwasserleitern) erforderlich werden, die Messdauer zu verlängern. Eine Verlängerung der Messdauer erfolgt stets in Absprache mit dem Auftraggeber.

Bei sehr geringen Fließbewegungen oder zu erwartenden Störungen der vertikalen Strömung kann die Messsonde mit einer Blende ausgestattet werden, so dass die vertikale Fließbewegung im untersuchten Rohrabschnitt fast ausschließlich durch die Messzelle erfolgt.

Abb.6a: Einbau der PHREALOG-Messsonde für vertikale Fließmessungen ohne und mit Blende

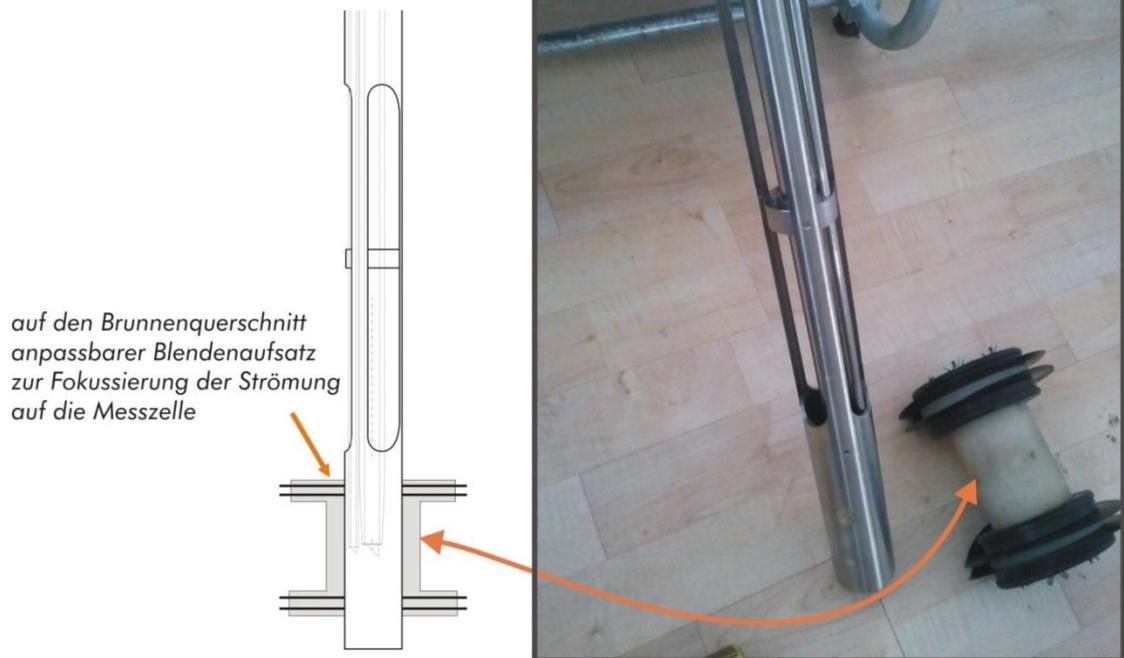
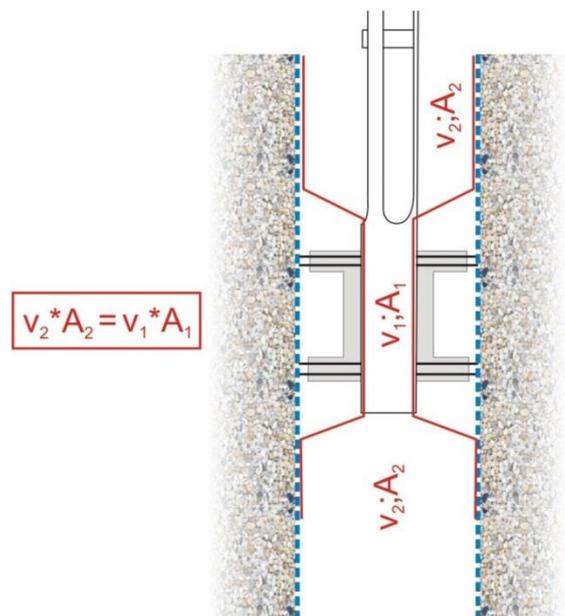


Abb.6b: Einsatz mit Strömungsblende:
Berechnung der Durchflussgeschwindigkeit im Brunnen über die Kontinuitätsgleichung.
Darin bedeutet:
 v = Durchflussgeschwindigkeit
 A = Querschnittsfläche



Für das Einsatzmodell mit Strömungsblende (Abb.6b) gilt die Kontinuitätsgleichung. Damit wird die Durchflussbewegung in der Messzelle auf die Durchflussbewegung im Brunnen umgerechnet: Für den Fall der Strömung durch zwei Rohre mit unterschiedlichem Querschnitt gilt unter der Voraussetzung einer stationären, laminaren und reibungsfreien Strömung eines inkompressiblen Mediums die Relation $v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$.

Die Dauer der Messung wird vor Ort durch die kontinuierliche Auswertung der Messdaten optimiert und festgelegt. Die Ergebnisse können vor Ort präsentiert werden. Bei stark krummlinigem Verlauf der Ausbaurohrung oder defektem Ausbau kann die Bohrung/Messstelle nicht oder nur zum Teil befahren werden.

Unmittelbar nach fixieren der Messsonde in der ersten Messtiefe wird die Messung des 1. Messlaufs gestartet und durchgehend bis zum Erreichen der letzten Messtiefe durchgeführt. Zur Auswertung wird die gewonnene Messreihe in die einzelnen Messtiefen zerlegt, die wiederum individuell ausgewertet werden (vgl. Abb.7). Durch den unmittelbaren Messbeginn wird die hydraulische Stabilisierungsphase aufgezeichnet, während der die Wiederherstellung der natürlichen hydraulischen Verhältnisse und der Temperaturgleich der Messsonde an das Grundwasser erfolgen. Die Dokumentation der hydraulischen Stabilisierungsphase ist wichtig, um den Beginn der Messphase in der jeweiligen Messtiefe zu definieren.

Datenerfassung

Die Messdaten werden über die rechnergestützte Auswertung der Messkamerabilder generiert. Der Versatz eines mit der Grundwasserströmung mitgeführten Schwebstoffmusters wird über eine Folge von Bildern ermittelt und in einen Strömungsvektor umgerechnet. Dieser wird in Richtung und Geschwindigkeit zerlegt. Die Messabfolge kann individuell eingestellt werden und beträgt üblicherweise 2-8 Sekunden. Eine Messreihe kann beliebig lange durchgeführt werden, da kontinuierlich mit der Grundwasserströmung transportierte, natürliche Schwebstoffe in den Beobachtungsbereich eintreten und so ständig neue Schwebstoffmuster generiert werden. So kann die Strömungssituation in zeitlicher Folge und über eine beliebige Messdauer hinweg dokumentiert werden. In Abhängigkeit der lithologischen und hydraulischen Randbedingungen tritt von Messtiefe zu Messtiefe eine unterschiedliche Frachtmenge an mitgeführten Schwebstoffen auf. Dies hat keine Auswirkung auf das Messergebnis. In seltenen Fällen geht die Partikelzahl im Verlauf der Messung stark zurück, so dass auf Grund unzureichender Partikelerfassung keine Messung durchgeführt werden kann. Auch bei einer sehr hohen Trübe des Grundwassers kann die Messung je nach Sichtverhältnissen nur sehr eingeschränkt oder überhaupt nicht durchgeführt werden.

Strömungsverhalten und Messgenauigkeit

Die Ausbildung einer stabilen vertikalen Fließbewegung hängt unmittelbar von einer gleichförmigen Durchflussgeschwindigkeit und Größe von hydraulischen Einflüssen (z.B. durch Verkehr, Vorfluter, Grundwasserentnahmen, etc.) ab. Ein andauernder Wechsel von Fließrichtung und -geschwindigkeit bei geringen vertikalen Fließbewegungen ist im Allgemeinen auf solche hydraulischen Einflüsse zurückzuführen. Die im Verlauf einer Messphase gewonnenen Vektordaten zeichnen den Schwankungsverlauf nach. Die Datenmenge, die durch Messen der Fließrichtung und -geschwindigkeit alle Sekunden akkumuliert wird, ermöglicht mit fortschreitendem Zeitverlauf eine statistische Auswertung und Eingrenzung der Fließrichtung und -geschwindigkeit. Mit zunehmender Messdauer pro Tiefenposition erhöht sich somit die Aussageschärfe. Bei instationärem Strömungsverhalten ist gegenüber hydrodynamisch ungestörtem, stationärem Strömungsverhalten eine längere Messdauer erforderlich, um eine gleichwertige Aussageschärfe zu erhalten.

Lithologische Wechsel, Kluffzonen, hydraulische Kurzschlüsse und hohe horizontale Durchflussgeschwindigkeiten im Filterrohr sowie Einflüsse durch den Messstellenausbau und -zustand können

Das PHREALOG-Messsystem – Vertikale Fließmessung

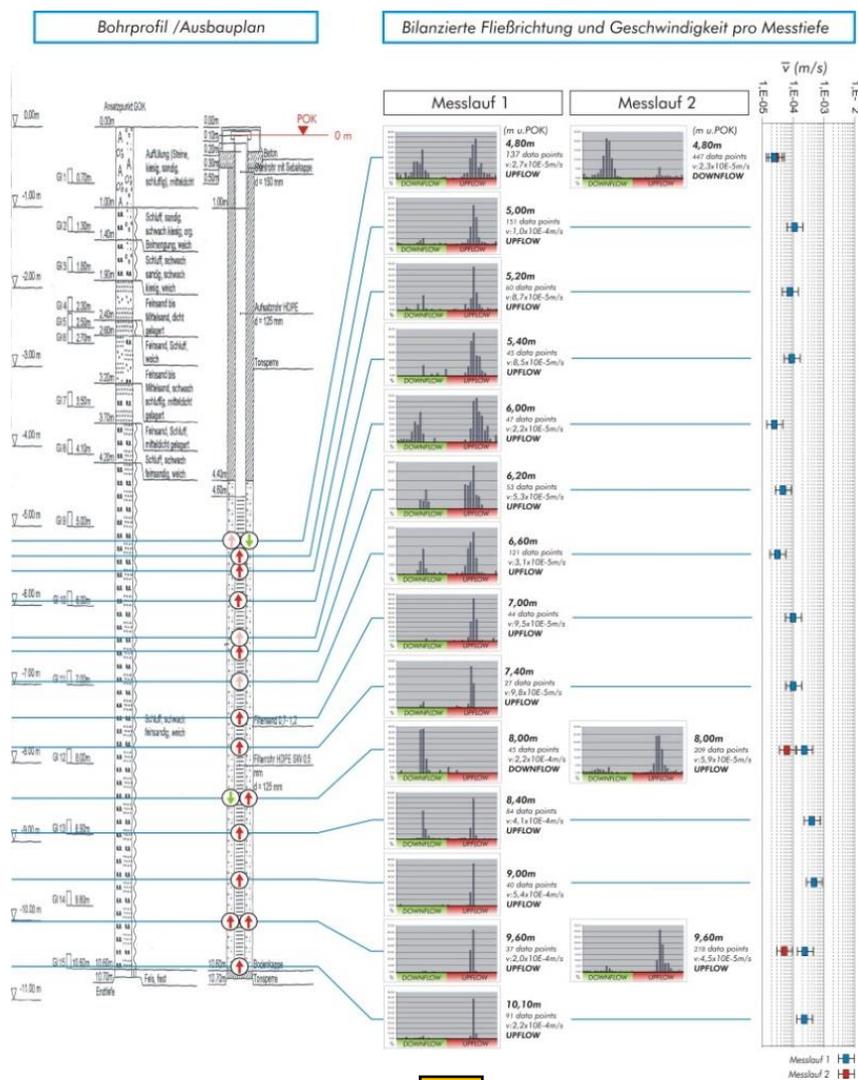
Variationen der Durchflussrichtung und -geschwindigkeit von Messtiefe zu Messtiefe bedingen. Die Messresultate der Messreihen im Vertikalprofil der Messstelle können daher deutlich voneinander abweichende Fließrichtung und -geschwindigkeiten aufzeigen. Um das generelle Fließverhalten im Bereich der Messstelle einschätzen zu können, erfolgen immer Messungen in mehreren Tiefenpositionen.

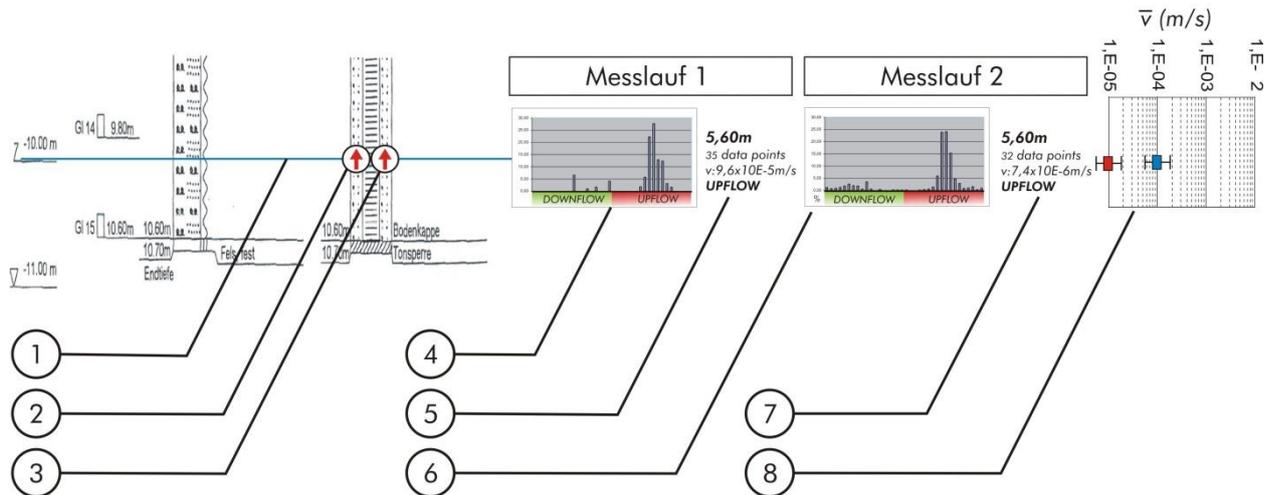
Datenauswertung und Darstellung

Die Messdaten werden als zusammenhängende Punktlinien in Richtungs- und Geschwindigkeitsdiagrammen dokumentiert. Die Richtungs- und Geschwindigkeitsergebnisse der jeweiligen Messreihen werden aus den gültigen Vektordaten nach Richtungshäufigkeit, Vektoraddition und der Summe aller ausgewertet und gewichtet. Die resultierende Fließrichtung für eine Messtiefe ergibt sich aus der gewichteten Addition aller pro Messtiefe ermittelten Fließrichtungen.

Fehlwerte der Messungen zeichnen sich durch einen geringen Bildkorrelationsfaktor aus und können so bei der Auswertung aussortiert werden. Daten der hydraulischen Stabilisierungsphase und Fehlwerte werden von der statistischen Gesamtauswertung ausgenommen. Die Messdaten werden in **Anlage 2**. „Untersuchungsergebnisse im Messstellenprofil“ wie folgt dargestellt.

Abb.7: Darstellung der Messdaten in Anlage 2





Erläuterungen zu der Darstellung Abb. 7:

- ① Lage der Messtiefe im Ausbau-/Bohrprofil
- ② Fließrichtungsergebnis für die Messtiefe im 1. Messlauf. Rot: nach oben gerichtete Fließbewegung, grün: nach unten gerichtete Fließbewegung (transparenter Pfeil: Ergebnis mit geringerer Güte)
- ③ wie ② Fließrichtungsergebnis für die Messtiefe im 2. Messlauf
- ④ Häufigkeitsverteilung der Fließrichtungen in % aller gemessenen, gültigen Vektoren dieser Messtiefe im 1. Messlauf (Abb. 9)
- ⑤ Angaben zu Messtiefe in Meter unter Pegeloberkante, Anzahl der zur Auswertung herangezogenen Vektordaten dieser Messtiefe, Fließgeschwindigkeit als bilanzierter Betrag der zur Auswertung herangezogenen Vektordaten, Richtungsergebnis
- ⑥ Häufigkeitsverteilung der Fließrichtungen in % aller gemessenen gültigen Vektoren dieser Messtiefe im 2. Messlauf (Abb. 8)
- ⑦ wie ⑤
- ⑧ Auf einer logarithmische Skala eingezeichneter vektorieller Bilanzbetrag der Fließgeschwindigkeit (blau: 1. Messlauf, rot: 2. Messlauf), dargestellt im Profil der Messtiefen.

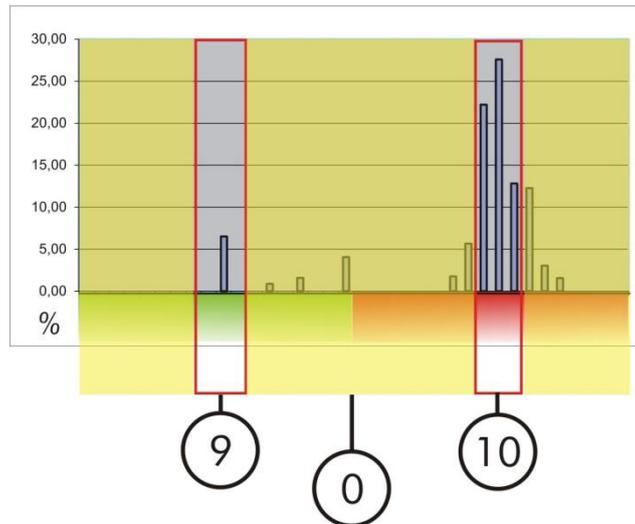


Abb.8: Diagrammdarstellung in Anlage2: Verteilung der Richtungshäufigkeit in einer Messtiefe

Abbildung 8 zeigt ein Diagrammbeispiel aus Anlage 2. Aufgetragen ist die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Fließrichtungen aus einer Messtiefe in % aller verwendeten Messdaten (100%) pro 10° auf einer (verdeckten) 360° Skala.

Das Segment ⑨ und ⑩ im Diagramm zeigt die Häufigkeit von genau vertikal ausgerichteten Fließbewegungen im Messrohr +/- 15°. Bei stabilen stationärem Durchfluss zeigen sich üblicherweise 2-3 Säulen mit hoher %-Angabe. Der gelb hinterlegte Bereich ① zeigt diejenigen Fließrichtungen im Messrohr, die nicht senkrecht zum Messrohrverlauf gerichtet sind und z.B. auf Wirbelbildung oder eine Strömungsablenkung im Messrohr/in der Messzelle hinweisen, z.B. hervorgerufen z.B. durch einen lateralen Durchfluss, der die vertikale Fließbewegung in dieser Messtiefe überlagert. Die Anzahl und Länge der Säulen wird zur Güte Wichtung der Messreihe herangezogen. D.h. je mehr Säulen in den gelben Bereichen auftreten, desto geringe ist die Güte der Messung.

⑨ nach unten gerichtete Fließbewegung +/-15° (grün)

⑩ nach oben gerichtete Fließbewegung +/-15° (rot)

① die im gelb hinterlegten Bereich auftretenden Säulen zeigen die Anzahl in % der nicht senkrecht zum Messrohrverlauf ausgerichteten Fließrichtungen. Deren Häufigkeit wird zur Güte Wichtung der Messung herangezogen.

In **Anlage 3**. „Messdiagramme“ werden die Daten in einem Zeitreihendiagramm wie folgt dargestellt.

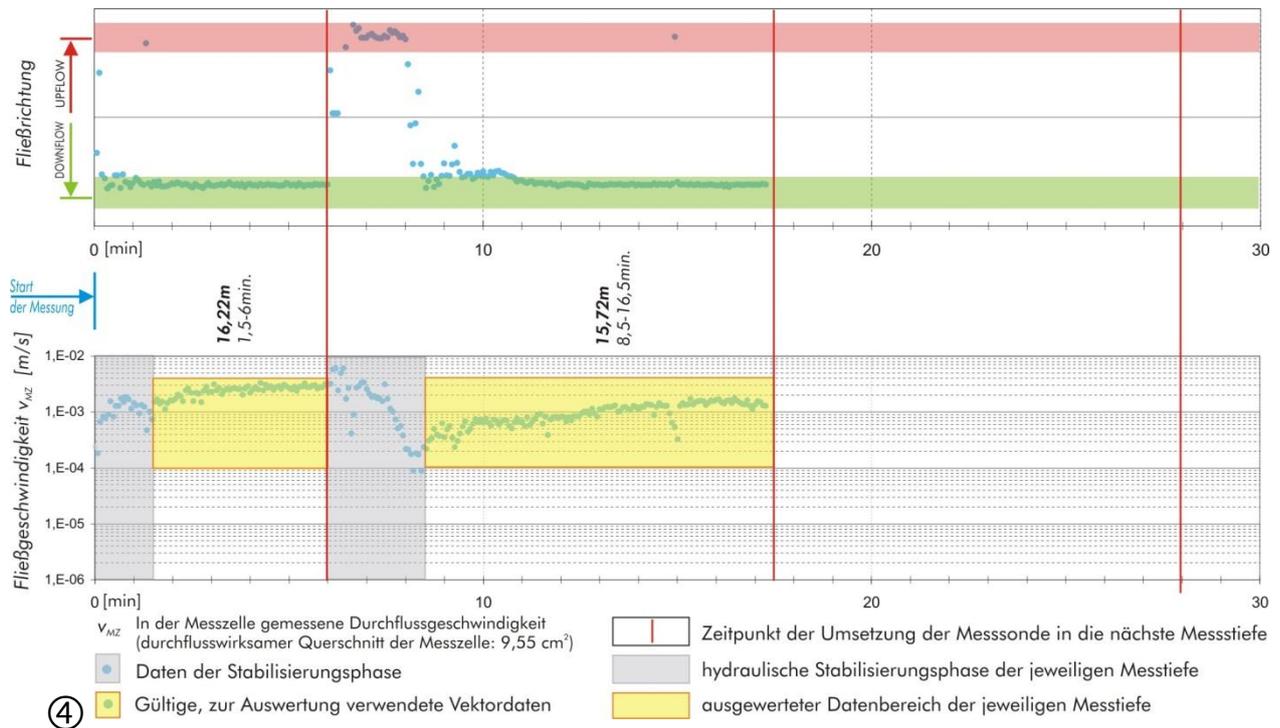


Abb.9: Diagrammdarstellung in Anlage3: Zeitreihendiagramm der Messdaten

Literatur zur Strömung an Bohrbrunnen:

BERGMANN, H. (1970): Über die Grundwasserbewegung im Filterrohr.- Diss. tech. Hochschule Graz 1968 - GSF-Bericht R 24; 211 S.; München.

BIESKE, E. (1992): Bohrbrunnen.- 7.Aufl.; 417 S., 202 Abb., 27 Tab.; Verlag R. Oldenbourg; München.

Literatur zum Messverfahren:

DRIEBEN, J., SCHÖTLER, M., ENZMANN, F., LAKDAWALA, Z., STEINER, K., POPOV, P., ILIEV, O., DREWS, M., WIEBER, G., KERSTEN, M. (2015): PHREASIM – Ein Expertensystem zur Simulation von Fließverhältnissen in Grundwassermessstellen und deren unmittelbarem Nahfeld.- Grundwasser **20**(3) 181-195 (2015)

DRIEBEN, J. (2013): Simulation der Strömungsverhältnisse mit einem Navier Stokes Brinkmann-Ansatz im Umfeld einer Grundwassermesseinrichtung.- Diplom Arbeit Univ. Mainz, Inst.f.Geowiss. [unveröffentlicht]; 117S., 77 Abb., 11 Tab., Mainz.

FGSV Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007): H GeoMess - Hinweise zur Anwendung geotechnischer und geophysikalischer Messverfahren im Straßenbau.- FGSV-Nr. **558**, Ausgabe 2007, 50 S., ISBN 978-3-939715-20-7, FGSV Verlag, Köln.

RECH, M. (2000): Untersuchungen zur horizontalen Strömung in Brunnenfilterrohren nach DIN 4925.- Diplom Arbeit Univ. zu Köln [unveröffentlicht]; 81S., 43 Abb., 41 Tab.; Köln.

MEZHIDROV, E. (2012): Simulation der Strömungsverhältnisse an der PHREALOG-Messanordnung im Bohrloch – eine 2D Teststudie - Diplom Arbeit Univ. Mainz, Inst.f.Geowiss. [unveröffentlicht]; 69S., 41 Abb., Mainz.

Das PHREALOG-Messsystem – Vertikale Fließmessung

- SCHREIBER, W. (2012): Analoges Modell zur Untersuchung horizontaler Strömungen in Brunnenfilterrohren nach DIN 4925 mit eingebauter GFV-Messzelle - Diplom Arbeit Univ. Mainz, Inst.f.Geowiss. [unveröffentlicht]; 84S., 54 Abb., 8Tab., Mainz.
- SCHÖTTLER, M. (2010): In-Situ Grundwasser-Fließmessungen im Deckgebirge und an den Grubenbauwerken des Staßfurter Sattels.- In: Gerardi, J.(Hrsg.): Abgesoffene Bergwerke II, Staßfurt 2010 – Erkennen, analysieren, bewerten und prognostizieren der zukünftigen Entwicklung der Bergbaufolgeschäden.- Exkurs.f. und Veröffentl. DGG, **244**: S.173-178; Hannover.
- (2007): In-Situ-Messungen der horizontalen Grundwasserfließrichtung und –geschwindigkeit für die Dimensionierung von Erdwärmesondenfeldern, geothermischen Brunnenanlagen und Wärmespeichern am Beispiel des GFV-Messsystems – In: Tagungsband „Der Geothermiekongress 2007“ 29.-31.Oktober 2007, Bochum Hrsg.: Geotherm.Vereinigung - Bundesverband Geothermie e.V., Geeste; ISBN 10: 3-932570-58-8.
 - (2007): Ein neues Verfahren – Die Grundwasser-Fluss-Visualisierung (GFV). – energie | wasser-praxis 12/2007 – DVGW Jahresrevue – Hrsg.: DVGW e.V.; S. 32-37; 6 Abb.; wvgw Wirtschafts- und Verlagsges. Gas und Wasser mbH; Bonn.
 - (2004): Erfassung der Grundwasserströmung mittels des GFV-Messsystems.- geotechnik **27** (2004) Nr.1; Deutsche Ges. f. Geotechnik; S.41-45; 8 Abb.; Verlag Glückauf, Essen.
 - (1997): Meßbarkeit der Grundwasserbewegung durch Visualisierung der Strömung in Bohrbrunnen.- Diss. Univ. Köln; 119 S.; Shaker Verlag, Aachen.