

Messverfahren

Das PHREALOG-Messsystem beruht auf der optischen Erfassung und Vermessung des Driftweges natürlicher Feinschwebstoffe mit der Grundwasserströmung in Grundwasseraufschlüssen. Da hierfür keine Markierungsstoffe in das Grundwasser eingebracht werden, ist für den Einsatz keine wasserrechtliche Genehmigung erforderlich. Gemessen wird der horizontale Grundwasserdurchfluss, beispielsweise in Filterrohrabschnitten, die für die Messdauer üblicherweise mit Packern oder abdichtenden Manschetten oberhalb und unterhalb der Messzelle gegen vertikalen Durchfluss isoliert werden. Aufgrund der generell sehr geringen Grundwasserfließbewegung wird das Filterrohr in den Messabschnitten laminar und korrespondierend zur umgebenden Grundwasserbewegung horizontal durchströmt.

Die Messung der Strömungsrichtung und horizontalen Durchflussgeschwindigkeit v_H erfolgt in der axialen und vertikalen Mitte des Messabschnitts. In dem nur horizontal durchströmbaren Messabschnitt erfolgt die optische Aufnahme der Schwebstoffe mit einem Kamerasystem. Hierbei werden die Driftbewegungen der vom Grundwasser mitgeführten, natürlichen Schwebstoffe im Messabschnitt von einer Kamera erfasst. Ein in die Messsonde integrierter Kompass nordet die Kamerabilder ein. Aus den Bilddaten werden pro Einzelmessung Schwebstoffmuster definiert, die über eine 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.

Zur Qualitätssicherung erfolgt vor der Durchführung von Messungen eine Kamerabefahrung zur Überprüfung von Ausbau und Zustand der Filterrohre.

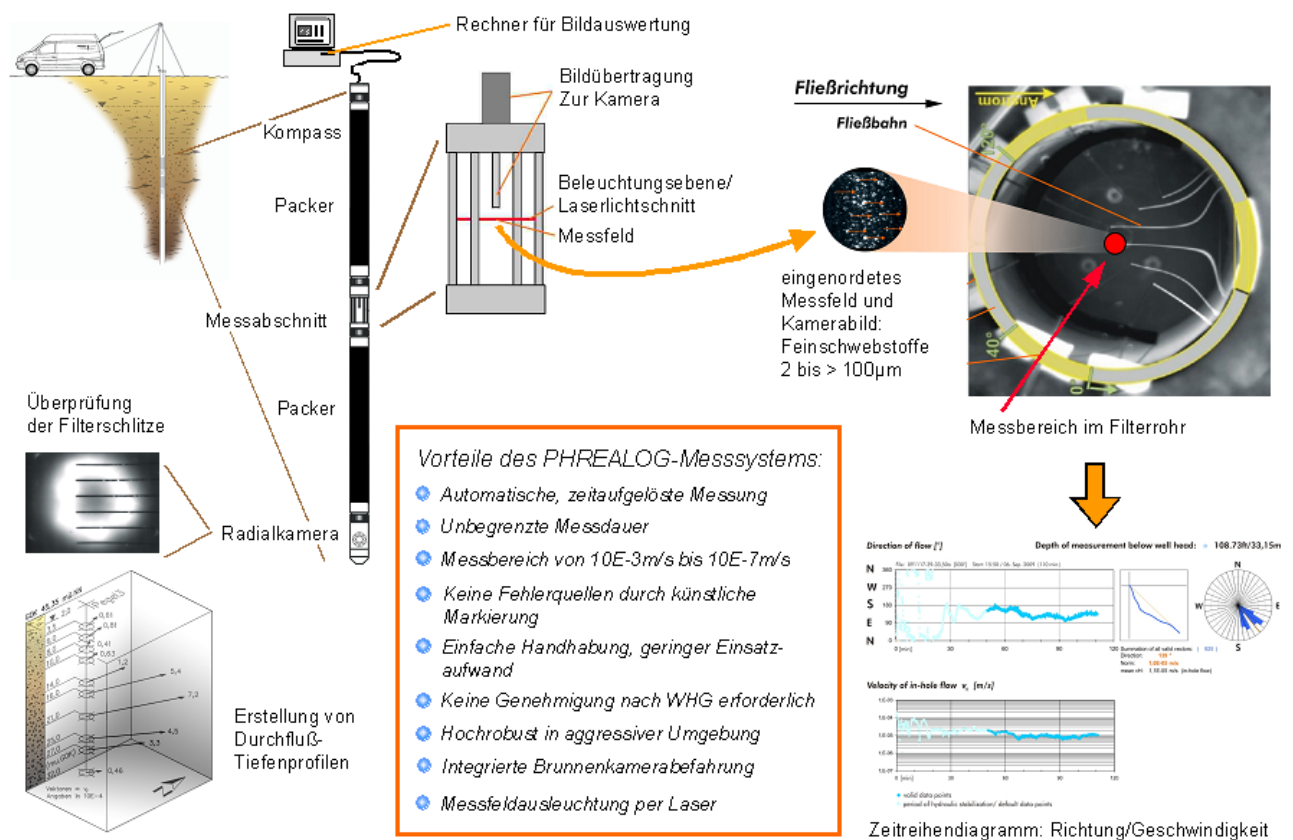


Abb. 1a: PHREALOG-Messsystem, schematische Übersicht

Die wesentlichen Vorteile des PHREALOG-Messverfahrens sind:

1. Es ist nur eine Messstelle erforderlich, um Daten zur Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit zu erhalten.
2. Die direkte Messung stellt eine von Grundwasserstandmessungen unabhängige Datenbasis dar.
3. Fließbewegungen können über einen beliebigen Messzeitraum kontinuierlich und automatisch aufgezeichnet werden. Änderungen der Fließverhältnisse, wie sie beispielsweise durch wechselnden Pumpbetrieb auftreten, können in Zeitverlauf dokumentiert werden.
4. Es ist keine künstliche Markierung erforderlich, diesbezügliche Fehlerquellen entfallen.
5. Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit können im Tiefenprofil des Aquifers dargestellt und Messungen können schichtbezogen durchgeführt werden.

Anforderungen an die Durchführung von in-situ Grundwasser-Fließmessungen in Grundwassermessstellen

Ausbau der Grundwassermessstelle

Für die Durchführung von Fließmessungen in Brunnen wird folgender Ausbau empfohlen.

1. Der Messstellenausbau sollte von einem nach DVGW-AB W 120 zertifizierten Unternehmen durchgeführt werden und entsprechend den einschlägigen Regelwerken und Merkblättern ausgeführt und dokumentiert werden. (DVGW-Merkblatt W 123 DVGW AB W113, AB W124, DIN 4943)
2. Es ist auf eine detaillierte Aufnahme des Bohrprofils zu achten (DIN 18123). Zur Qualitätssicherung und zur Vergleichbarkeit der lithologischen Profile sollte die Bohrgutansprache bei allen Bohrungen von ein und derselben Person vorgenommen werden.
3. Der Messstellenausbau sollte in Filter- und Vollwandrohren nach DIN 4925-2 in PVC ausgeführt werden, der Bohrdurchmesser mindestens Ausbaudurchmesser+160mm betragen und der Filterkies nach DIN 4924 geeignet sein.
4. Um einen gleichförmig ausgebildeten Filterkiesringraum zu gewährleisten sollten alle Rohrstrecken im Abstand von 3m bis 5m mit Distanzhaltern ausgestattet werden, wobei ein Distanzhalter unmittelbar auf Höhe des GWS angebracht werden soll, da in diesem Bereich erfahrungsgemäß durch nachträgliche Setzungen eine Krummlinigkeit in der Rohrstrecke auftreten kann, der so vorgebeugt werden kann.

Einsatzvoraussetzungen

1. Der Messstellendurchmesser beträgt DN50 bis DN150, die maximale Messeinsatztiefe beträgt standardmäßig 110m, für Sonderanwendung 300m.
2. Für die Durchführung der Messungen steht die Messstelle 1-2 Tage zur Verfügung.
3. Das Untersuchungsgebiet ist für die Dauer der Messdurchführung zugänglich und die Messungen können kontinuierlich, wenn erforderlich über 24h durchgeführt werden. Die Messstellen sind anfahrbar.
4. Die zu untersuchende Bohrungen/Messstellen sind klargepumpt und frei von Bohrspülungsresten.
5. Störungen der natürlichen bzw. des zu beurteilenden Grundwasserfließverhaltens sind mindestens zwei Tag vor Messbeginn ausgesetzt bzw. beendet (z.B. Pumpversuche).

6. Es sind keine Einbauten (z.B.: Pegelschreiber, Steigrohre, Pumpen) in den Messstellen installiert. Der für die Durchführung erforderlicher Ausbau und Einbau von installierten Instrumenten und Einbauten erfolgt bauseits.
7. Bei 2-Zoll Messstellen ist eine Befahrung der zu untersuchenden Messstellen mit einer Messsonden-Attrappe obligatorisch, um die Befahrbarkeit der Messstelle sicher zu stellen. Eine Messsonden-Attrappe wird bei 2-Zoll Messstellen vorab zur Verfügung gestellt.
8. Für die Durchführung der Messungen, der Berechnung der Filtergeschwindigkeit sowie für die Ergebnisdarstellung und Beurteilung stehen das lithologische Profil sowie die Brunnenausbaudaten mit Angaben zu Bohrradius, Filterkieskörnung, Typ und Schlitzweite der eingesetzten Brunnenfilterrohre zur Verfügung.
9. Die Neigung der Ausbauverrohrung soll nicht mehr als 20° von der Lotrechten abweichen.

Eingesetzte Messsonden

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



Abb. 1b: Rechneinheit zur Bedienung der Messsonden und Auswertung der Bilddaten



Abb. 1c: Tragekabel und Messsonden für horizontale und vertikale Fließmessungen für einen Einsatz ab 2" Durchmesser

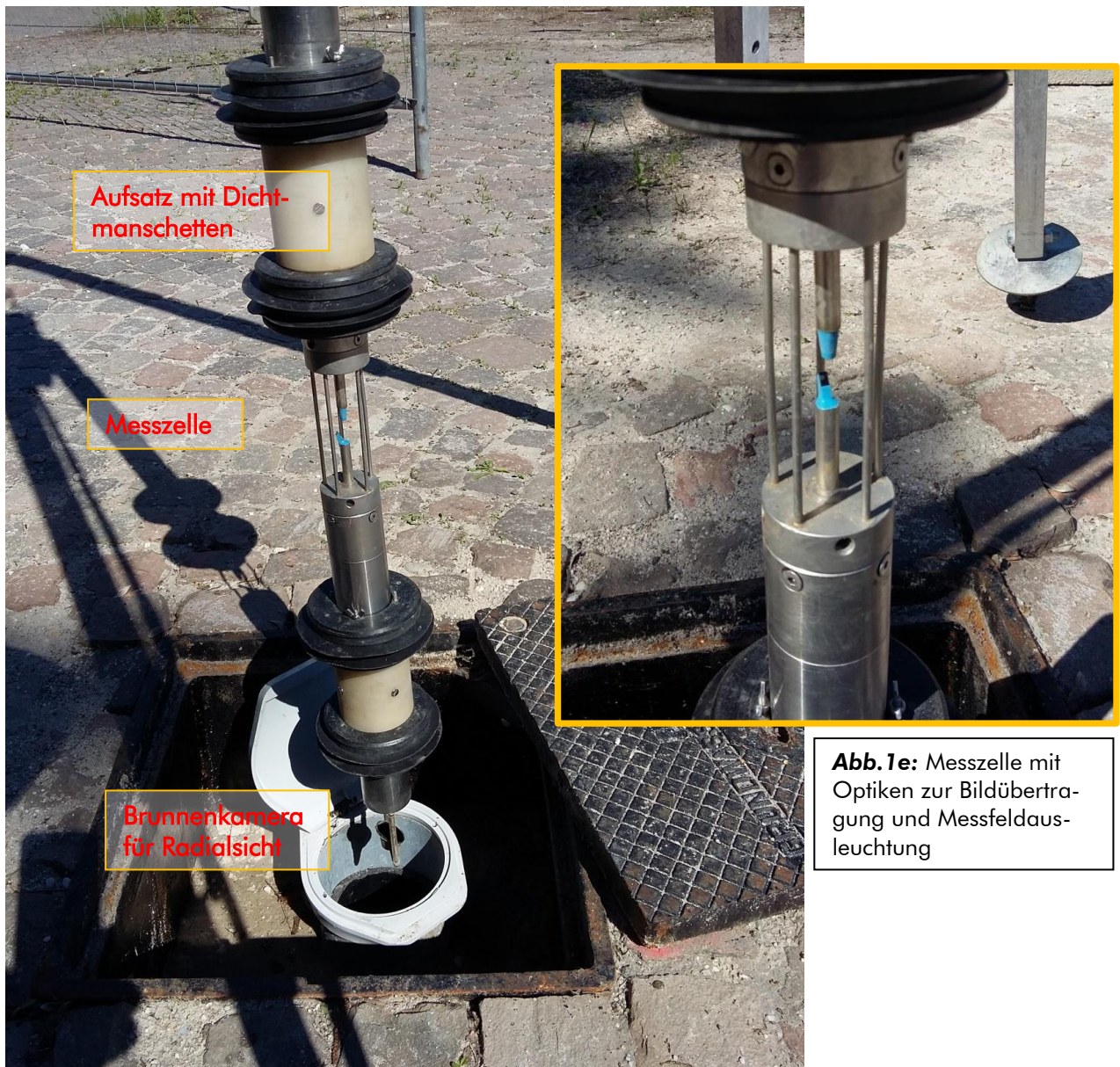


Abb. 1e: Messzelle mit Optiken zur Bildübertragung und Messfeldausleuchtung

Abb. 1d: Für den Einsatz in 5" Messstellen angepasste Messsonde für horizontalen Durchflussmessung

Für Messstellen ab DN50 (2") wird eine kleinkalibrige Messsonde mit einer Messzelle und integrierten Brunnenkamera eingesetzt. Der Messabschnitt liegt ca. 0,4m oberhalb der Position der Radialkamera. Die Radialkamera dieser Messsonde liefert Farbbilder der Rohr-Innenwandung bzw. der Filterschlitzte. Zur Einnordung der Kamerabilder wird hier der Fluxgate Kompass Vector 2X der Fa. Precision Navigation eingesetzt. Der Kompass verfügt über eine Ausgabegenauigkeit von $\pm 1^\circ$. Der Kompass wird nach der Fixierung der Messsonde vor Messbeginn ausgelesen, der Kompasswert über eine Deviationstabelle korrigiert und in das Messprogramm eingegeben. Die Messdatenvektoren werden somit direkt orientiert auf das Erdmagnetfeld ausgewertet.

Die kleinkalibrige Messsonde kann mit Dichtmanschetten und Distanzhaltern für den Einsatz in Messstellen mit größerem Durchmesser ausgestattet und angepasst werden. Damit ist eine exakte Positionierung des Messabschnitts in der axialen Mitte des Filterrohres gewährleistet sowie eine Vertikalströmung im Filterrohr unterbunden.

Das ca. 2x2mm große Messfeld in der axialen und vertikalen Mitte des Messabschnitts wird per Laser ausgeleuchtet. Es handelt sich dabei um einen regelbaren, nach außen optisch abgeschirmten Laserstrahl mit regelbarer optischer Ausgangsleistung bis max. 25mW (Laserklasse 2 nach DIN EN 60825-1/11.01). Im normalen Betrieb wird die Leistung stufenlos um die Hälfte auf eine Ausgangsleistung von ca. 15mW reduziert. Eine höhere Ausgangsleistung wird bei sehr geringer oder bei hoher Partikelfracht eingestellt.

Durchführung

Während des Einfahrens der Messsonde in die Messstelle werden mit der Radialkamera die Filterrohrübergänge geortet und der Zustand der Filterrohre und Filterrohrschlitze überprüft. Die Lage der Filterrohrübergänge und der Zustand der Filterrohre wird dokumentiert. Daran schließt sich die Festlegung der Messtiefen anhand der lithologischen Bohrprofilaufnahme sowie der optischen Ausbauprüfung an. Filterrohrübergänge und Filterrohrbereiche mit stark verschmutzten Filterschlitzen werden für Messungen gemieden. Anschließend wird die Messsonde mit den aufpumpbaren Packern bzw. Gummimanschetten in dem Brunnenrohr fixiert. Mit Hilfe von Packern bzw. Manschetten werden störende Vertikalströmungen im Messbereich unterbunden und die horizontale Durchströmung auf die Messabschnitte eingegrenzt. Somit sind definierte Messbedingungen gegeben und es werden repräsentative Messergebnisse erzielt. Gleichzeitig wird die Messsonde präzise in der axialen Mitte der Messstelle fixiert (Symmetriepunkt der Durchströmungsgeometrie) und die Messung kann nicht durch nachträgliche Bewegungen der Messsonde gestört werden.

Unmittelbar nach dem Fixieren der Messsonde wird die Messung gestartet. Durch den unmittelbaren Messbeginn wird auch die hydraulische Stabilisierungsphase aufgezeichnet, während der die Wiederherstellung der natürlichen hydraulischen Verhältnisse und der Temperaturangleich der Messsonde an das Grundwasser erfolgen. Die Dokumentation der hydraulischen Stabilisierungsphase ist wichtig, um den Beginn der Messphase zu definieren.

Durch das Einfahren der Messsonde und Setzen der Packer werden initial Partikeldepots in der unmittelbaren Umgebung mobilisiert. Nach Abfluss des partikelerfüllten Volumens aus dem Messbereich zeigt sich die natürliche Partikelfracht im Grundwasser. In Abhängigkeit der lithologischen und hydraulischen Randbedingungen tritt von Messtiefe zu Messtiefe eine unterschiedliche Frachtmenge an mitgeführten Schwebstoffen auf.

Ein Messlauf gliedert sich in eine hydraulische Stabilisierungsphase und eine Messphase. Die hydraulische Stabilisierung ist nach Erreichen einer gleichförmigen, mittleren Durchströmungsgeschwindigkeit bzw. nach Erreichen eines einheitlichen Strömungsverlaufs abgeschlossen (steady-state). Sie wird nach Abschluss der Messung bewertet und festgelegt. Üblicherweise werden je Messstelle Messungen in 4-8 Tiefenpositionen angesetzt. Die Dauer einer tiefenbezogenen Messung ist abhängig von:

1. der Dauer zur Wiederherstellung der natürlichen oder künstlichen hydraulischen Verhältnisse nach Einbau der Messsonde
2. der Stabilität der Fließbewegung im Zeitverlauf
3. der angetroffenen Fließgeschwindigkeit

Die Dauer einer Messreihe richtet sich danach, wie schnell sich Fließgeschwindigkeit und -richtung in der Beruhigungsphase stabilisieren und wie gleichförmig die Strömung in der sich anschließenden Messphase verläuft.

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 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.

Um bei sehr geringen Fließgeschwindigkeiten eine thermische Einflussnahme (Bildung von Konvektionszellen) auf die Durchströmung des Messabschnitts durch die elektrischen Baueinheiten der Messsonde sowie der Lasereinstrahlung auszuschließen, erfolgt bei Fließgeschwindigkeiten kleiner 5×10^{-6} m/s die Messwertaufnahme in zeitlichen Intervallen. Hierbei werden die Kamera, Laser und elektrische Baueinheiten der Messsonde im Verlauf der Messung zyklisch ein- und ausgeschaltet. Dabei liegt das Verhältnis Messphase/Ruhephase üblicherweise 1:3 (20sek Messphase 40sek. Ruhephase) Bei instationärem Fließverhalten führt dies zu versetzten Abfolgen der Punktlinien in den Messdiagrammen. Die im Verlauf einer Messreihe gewonnene hohe Datenmenge erlaubt es, zur besseren Darstellung in den Messdiagrammen die Zeitpunkte der einzelnen Messungen nicht exakt, sondern gleichmäßig über die Messdauer verteilt auf der Zeitskala darzustellen. Die Auswertung ist aufgrund der Messdauer und der hohen Datendichte pro Messreihe durch die Messwertaufnahme in Intervallen nicht beeinträchtigt.

Strömungsverhalten und Messgenauigkeit

Die Ausbildung einer stabilen Fließrichtung in der Messstelle hängt unmittelbar von einer gleichförmigen Durchströmungsgeschwindigkeit ab. Eine kontinuierlicher Wechsel der Durchflußgeschwindigkeit beeinflusst die Durchströmungsgeometrie und führt damit auch zu einem Wechsel der Fließrichtung im Filterrohr. Die Größe und Häufigkeit der Richtungsänderung korrespondiert teilweise mit der Amplitude und Frequenz der Geschwindigkeitsänderungen. Die im Verlauf einer Messphase gewonnenen Vektordaten zeichnen den Schwankungsbereich nach. Die große Datenmenge, die durch Messen der Fließrichtung und –geschwindigkeit alle sechs Sekunden im Dauerbetrieb bzw. ca. 15 Messwerte pro Minute im Intervallbetrieb akkumuliert wird, ermöglicht mit fortschreitendem Zeitverlauf eine statistische Auswertung und Eingrenzung der Hauptfließrichtung und –geschwindigkeit. Mit zunehmender Messdauer pro Tiefenposition erhöht sich somit die Aussageschärfe. Bei instationären Strömungsverhalten ist gegenüber stationärem Strömungsverhalten eine längere Messzeit erforderlich um eine gleichwertige Aussageschärfe zu erhalten.

Lithologische Wechsel, Kluftzonen und hydraulische Kurzschlüsse sowie Einflüsse durch den Messstellenausbau und –zustand können Variationen der Durchflussrichtung und -geschwindigkeit von Messtiefe zu Messtiefe bedingen. Die Messresultate der Messreihen im Vertikalprofil der Messstelle zeigen daher häufig deutlich voneinander abweichende Fließrichtung und –geschwindigkeiten. Um das generelle Fließverhalten im Bereich der Messstelle abzuschätzen, erfolgen daher immer mehrere Messungen in unterschiedlichen Tiefenpositionen. Zur Feststellung der generellen Grundwasserfließbewegung wird die mittlere Fließrichtung und –geschwindigkeit, integriert über alle tiefenabhängigen Messpositionen der jeweiligen Messstelle, berechnet. Diese Berechnung berücksichtigt sowohl Länge und Richtung der einzelnen Fließvektoren als auch die Qualität der Ergebnisse sowie lithologische Wechsel. Zusammenfassend bedeutet dies, dass es zu unterschiedlichen Fließverhalten innerhalb einer Messstelle kommen kann, die berechneten gemittelten Fließvektoren entsprechen jedoch dem entscheidenden Grundwasserfluss an der Messstelle.

Durch die Streben im Messabschnitt und durch die Beeinflussung der Schlitz-/Steganordnung der Filterrohre ist von einer Richtungsabweichung zwischen der gemessenen Fließrichtung und der Fließrichtung im umgebenden Aquifer von $\pm 8^\circ$ auszugehen (RECH 2000). Die Auswirkung auf

das Richtungsergebnis ist jedoch auf Grund des allgemein vorhandenen Wechsels der Strömungsrichtung im Verlauf einer Messung sowie der statistischen Auswertung sehr gering.

Störungen der horizontalen Strömung können durch umläufige vertikale Strömungen in der Kieshinterfüllung auftreten. In diesem Fall zeigen sich auch vertikale Strömungskomponenten in den Messbildern. Bei Auftreten von erkennbaren Vertikalströmungen im Messabschnitt wird die Messung nur eingeschränkt gewertet oder verworfen.

Datenauswertung und Darstellung

Die Messdaten werden als zusammenhängende Punktklinien in Richtungs- und Geschwindigkeitsdiagrammen dokumentiert. Die Richtungs- und Geschwindigkeitsergebnisse der jeweiligen Messreihen werden aus den gültigen Vektordaten nach Richtungshäufigkeit, Vektoraddition und der Summe aller Vektorbeträge pro 10°-Segment statistisch ausgewertet und gewichtet. Die resultierende Fließrichtung für eine Messstelle ergibt sich aus der gewichteten Addition aller pro Messstelle ermittelten Fließrichtungen.

Fehlwerte zeichnen sich durch einen geringen Bildkorrelationsfaktor aus und können so bei der Auswertung aussortiert werden. Fehlwerte sind auch dadurch deutlich erkennbar, dass sie von angrenzenden, miteinander korrespondierenden Werten stark abweichen. Die Daten der Beruhigungsphase und Fehlwerte werden von der statistischen Gesamtauswertung ausgenommen. Die Messdaten werden im Anhang der Untersuchungsberichte wie folgt dargestellt.

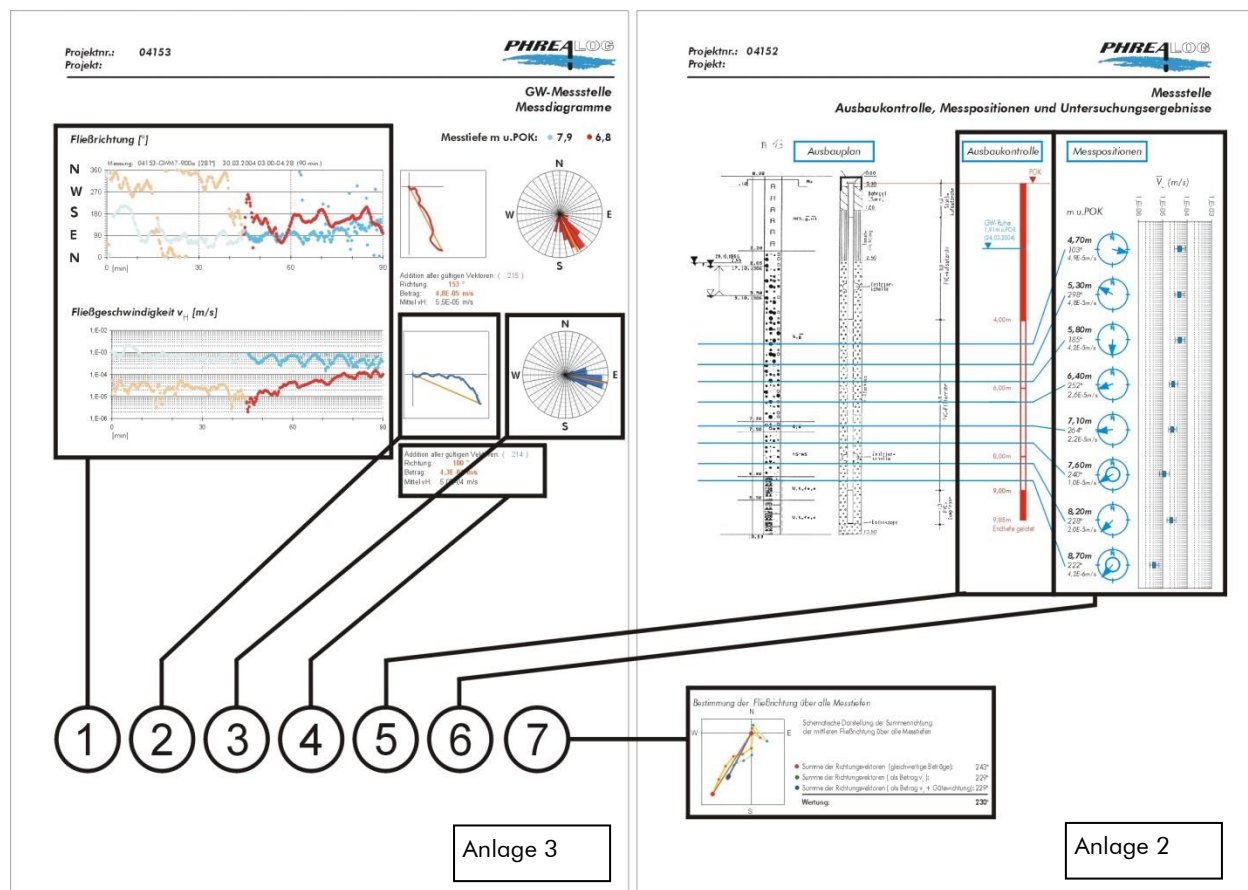


Abb.2: Darstellung der Messdaten

Gütekritik und Stichhaltigkeit der Ergebnisse

Die Gütekritik erfolgt durch die Wertung der pro Messtiefe ermittelten Richtung abgestuft (0,25-0,5-0,75) oder als eindeutiges Ergebnis (1,0) und basiert auf der Streuung der Fließrichtung im Messverlauf sowie Erfahrungswerten zur Gütebeurteilung der Messreihen. Beispielsweise werden Messreihen, die eine zusammenhängende Messwertlinie der Richtung sowie Geschwindigkeit dokumentieren und über den Zeitraum der Messwertaufnahme hinweg (min. 30min. lang) im Richtungsverlauf lediglich eine Abweichung zwischen $\pm 20^\circ$ sowie im Geschwindigkeitsverlauf im Bereich von ± 3 abweichen als eindeutiges Ergebnis gewertet und erhält damit die Gütefaktor (1,0). Streuen die Messwerte beispielsweise im Bereich $\pm 45^\circ$ erhält die Messreihe je nach Messdauer einen Gütefaktor 0,75, bei $\pm 90^\circ$ einen Gütefaktor 0,5 und bei $\pm 135^\circ$ einen Gütefaktor 0,25. Generell gilt: Je länger die Messphase erfolgt desto mehr Daten liegen für eine Auswertung bzw. statistische Analyse vor. Dies kann die Aussageschärfe entsprechend erhöhen, so dass trotz hoher Variabilität von Richtung und Geschwindigkeit im Zeitverlauf einer Messreihe je nach Randbedingungen eine höhere Güte zugewiesen werden kann als oben beschrieben.

Die Angabe der Stichhaltigkeit der Ergebnisse in % beschreibt zum einen die Eindeutigkeit der Ergebnisse in Bezug auf die Messwertaufnahme (technisch und Gütekritik) sowie mit welcher Wahrscheinlichkeit die Ergebnisse die Fließsituation im umliegenden Aquifer beschreiben bzw. auf diese übertragen werden können. Hierbei werden folgende Randbedingungen berücksichtigt, die in die Gesamtbetrachtung und abschließende Bewertung einfließen:

- Zustand der Messstelle bzw. in der Messposition (z.B. offenen oder teilweise zugesetzte Filterschlitz, Verkrustung und/oder Verockerungen als Hinweise auf den Zustand der Kieshinterfüllung, Auflandung)
- Geologische Situation
- Umgebungssituation der Messstelle (bebaut, Verkehrsdichte, Industrie, natürlich)
- Mächtigkeit des Aquifers (m)
- Lithologie des Aquifers (z.B. kiesig und hochdurchlässig oder feinsandig-schluffig und damit geringdurchlässig)
- Sedimentationsstruktur im Aquifer lt. Bohrgutansprache (z.B. einformig und gut sortiert oder Wechsellagen aus gut und schlecht durchlässigen Partien)
- Lithologie des Stauers
- Grundwasserspiegel (frei/gespannt)
- Signifikante lithologische Anomalien/Wechsel im erschlossenen Aquiferprofil bzw. im Profil der Filterstrecke/im Bereich der Messpositionen
- Lage der Messpositionen im Aquiferprofil (z.B. oben, mittig oder an der Basis)
- Messpositionen unter GWS (m)
- Messprofilstrecke (m)
- Anzahl der Messtiefen
- Messposition über/unter Stauer (m)
- Fließverhalten im Messzeitverlauf (bzw. zugewiesener Gütefaktor)
- Varianz der Fließrichtung im Messtiefenprofil
- Varianz der Fließgeschwindigkeit in Messtiefenprofil
- Schwebstoffführung

Berechnung der Filtergeschwindigkeit v_f

Jede Grundwassermessstelle stellt eine Anomalie im Strömungsfeld eines Aquifers da. Durch den vom Sediment abweichenden Strömungswiderstand von Filterkies, Filterrohr und frei durchströmbarer Filterrohr-Innenraum erfolgt eine Ablenkung der Strömungslinien (vgl. Abb.3).

Mit dem Fließmesssystem von PHREALOG wird in verschiedenen Messtiefen die horizontale Durchflussrichtung und -geschwindigkeit in der axialen Mitte der Grundwassermessstelle erfasst.

Die in der axialen Mitte im Filterrohr auftretende Geschwindigkeit wird als v_H angegeben. Zur Berechnung der Filtergeschwindigkeit v_f [m/s] aus der gemessenen horizontalen Durchflussgeschwindigkeit v_H [m/s] werden für Messstellen in Porengrundwasserleitern üblicherweise die Korrekturfaktoren α und γ eingesetzt (vgl. Literaturhinweis KLOTZ 1977). Dabei wird eine gleichförmige Grundwasserströmung an der jeweiligen Messtiefe der Messstelle vorausgesetzt.

Die Ableitung der Filtergeschwindigkeit v_f aus der horizontalen Durchflussgeschwindigkeit v_H ist in Kluft- bzw. Poren-Kluftgrundwasserleitern und insbesondere in verkarstetem Untergrund hingegen nicht möglich, da die Kenntnisse über die hydraulischen Randbedingungen in der jeweiligen Messtiefe nicht ausreichend bekannt und eingrenzbar sind. Denn die horizontale Durchflussgeometrie im Filterrohr kann aufgrund der an Kluftnetze, Trennfugen und Hohlräume gebundene Wasserführung bzw. Trennfugendurchlässigkeit (Kluftzahl, Kluftweite, unbekannte Größe und Tiefenposition von Hohlräumen, etc.) unterschiedlich ausgebildet sein und nicht auf einzelne Messtiefen eingegrenzt werden. Es besteht somit keine Datengrundlage für eine stichhaltige Berechnung.

Erfahrungsgemäß stellt die gemessene, horizontale Durchflussgeschwindigkeit einen Maximalwert gegenüber der Filtergeschwindigkeit dar und kann die Abstandsgeschwindigkeit um bis zu ca. zwei Größenordnungen übertreffen.

Für Porengrundwasserleiter kann eine berechenbare Gesetzmäßigkeit abgeleitet werden, nach der die Ablenkung der Stromlinien auf der horizontalen Ebene von den hydraulischen Widerständen und Radien des Bohrlochausbaus abhängt. Diese Gesetzmäßigkeit wird durch den Faktor α ausgedrückt, der das Verhältnis zwischen Filterrohrinnenradius und Einzugsbreite des den Brunnen anströmenden Grundwassers beschreibt. Die Stromlinienablenkung spiegelt sich im Durchströmungsbild des Brunnenraumes wider. Generell herrscht bei der Grundwasserdurchströmung des Filterrohres laminares Strömen vor, so dass sich Strömungslinien ausbilden. Die gesetzmäßig symmetrische Ausbildung der Durchströmung bedingt eine den Brunnen mittig durchlaufende Strömungslinie (vgl. Abb.4). Ihre Ausrichtung entspricht der Strömungsrichtung des Grundwassers in der Brunnenumgebung.

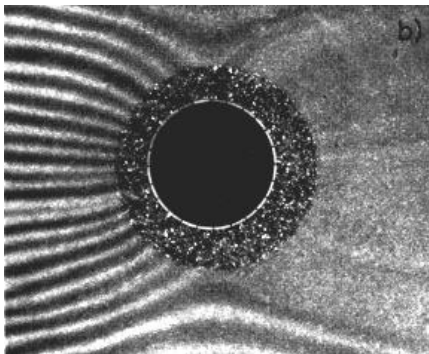
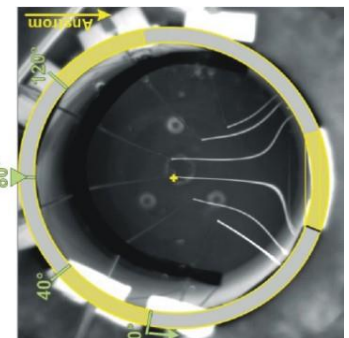


Abb.3: Brunnenquerschnitt Links: Verzeichnung der Grundwasserströmungslinien in der Umgebung einer mit Filterkies und Filterrohr ausgebauten Bohrung. Strömungsrichtung von links nach rechts. (Quelle: KLOTZ 1971)

Rechts: Durchströmungsverhalten in Brunnenfilterrohren DIN 4925, dargestellt über Injektion eines Farbtracers zur Sichtbarmachung der Stromlinien. Untersuchungen in einem Strömungsmodell (RECH 2000). Hier: Durchströmung in einem Filterrohr DN80 bei einer Filtergeschwindigkeit von 3×10^{-4} m/s.



Literatur:

- BERGMANN, H. (1970): Über die Grundwasserbewegung im Filterrohr.- Diss. tech. Hochschule Graz 1968 - GSF Bericht **R 24**: 211S.; GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, München.
- DRIEBEN, J., SCHÖTTLER, 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)
- KLOTZ, D. (1971): Untersuchung von Grundwasserströmungen durch Modellversuche im Maßstab 1:1.- Geologia Bavarica **64**: 75-119, 33 Abb., 7 Tab.; München.

Das PHREALOG-Messsystem: Messverfahren, Durchführung, Auswertung

- (1977): Berechnung der Filtergeschwindigkeit einer Grundwasserströmung aus Tracerverdünnungsversuchen in einem Filterpegel.- GSF-Bericht **R 149**: 45 S., 24 Abb., 8 Tab.; GSF-Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, München.
 - (1978): α -Werte ausgebauter Bohrungen.- GSF- Bericht **R 176**: 119S., 12Abb., 100Tab.; GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, München.
 - (1991): Berechnete Durchlässigkeiten handelsüblicher Brunnenfilterrohre und Kunststoff-Kiesbelagfilter (Stand 1990) - GSF-Bericht **35/90**: 51 S., 21 Abb., 14 Tab.; GSF-Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, München.
- MOSER, H., & RAUERT, W. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie.- in: Matthess, G. (Hrsg.): Lehrbuch der Hydrogeologie, **8**: 397S., 227 Abb., 32Tab.; Berlin.