

Räumliche Charakterisierung der hydraulischen Leitfähigkeit in alluvialen Schotter-Grundwasserleitern: Ein Methodenvergleich

Samuel Diem · Tobias Vogt · Eduard Hoehn

Eingang des Beitrages: 11. 12.2009 / Eingang des überarbeiteten Beitrages: 3. 8.2010 / Online veröffentlicht: 28. 10.2010
© Springer-Verlag 2010

Zusammenfassung Für die Modellierung des Stofftransportes im Grundwasser im Maßstabsbereich von 10–100 m sind detaillierte Kenntnisse der räumlichen Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit unabdingbar. Bei einem Testfeld (10 × 20 m) im alluvialen Schotter-Grundwasserleiter des voralpinen Thurtals (Schweiz) wurden vier unterschiedliche Methoden, wirksam auf verschiedenen Messskalen, angewandt, um diesen Parameter zu bestimmen. Der Vergleich der Ergebnisse zeigte, dass *tiefenaufgelöste Slugtests* verlässliche Resultate für den gefragten Maßstab liefern. Für deren Auswertung ist ein plausibler Wert für das Anisotropieverhältnis der hydraulischen Leitfähigkeit (K_v/K_h) nötig, welches aus einem entsprechend ausgewerteten *Pumpversuch* erfasst werden konnte. Die integralen Resultate von Pumpversuchen entsprechen tendenziell der oberen Grenze des natürlichen Spektrums der hydraulischen Leitfähigkeit auf dem Maßstab des Testfeldes. *Flowmetermessungen* sind zu empfehlen, wenn primär die relative Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit interessiert, und *Siebanalysen*, wenn eine grobe Abschätzung der hydraulischen Leitfähigkeit ausreicht.

Spatial characterization of hydraulic conductivity in alluvial gravel-and-sand aquifers: a comparison of methods

Abstract For groundwater transport modeling on a scale of 10–100 m, detailed information about the spatial distribution of hydraulic conductivity is of great importance. At a test site (10 × 20 m) in the alluvial gravel-and-sand aquifer of the perialpine Thur valley (Switzerland), four different methods were applied on different scales to assess this parameter. A comparison of the results showed that multilevel slug tests give reliable results at the required scale. For its analysis, a plausible value of the anisotropy ratio of hydraulic conductivity (K_v/K_h) is needed, which was calculated using a pumping test. The integral results of pumping tests provide an upper boundary of the natural spectrum of hydraulic conductivity at the scale of the test site. Flowmeter logs are recommended if the relative distribution of hydraulic conductivity is of primary importance, while sieve analyses can be used if only a rough estimate of hydraulic conductivity is acceptable.

Keywords Hydraulic conductivity · Sieve analyses · Pumping test · Flowmeter logs · Slug tests · Gravel-and-sand aquifer

Msc. ETH Erdw. S. Diem (✉) · Dipl.-Geow. T. Vogt ·
Dr. E. Hoehn
Eawag, das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs,
Abteilung Wasserressourcen und Trinkwasser, Überlandstr. 133,
8600 Dübendorf, Schweiz
E-Mail: samuel.diem@eawag.ch

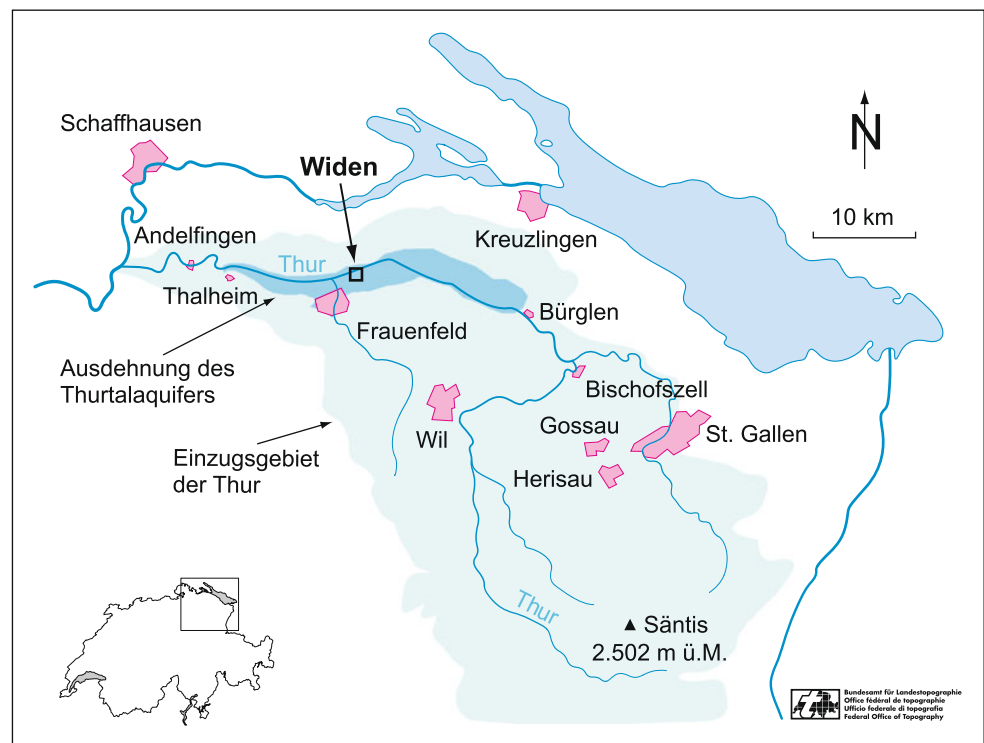
Dipl.-Geow. T. Vogt
E-Mail: tobias.vogt@eawag.ch

Dr. E. Hoehn
E-Mail: eduard.hoehn@eawag.ch

Einleitung

Aufgrund der Heterogenität voralpiner und alpiner Schotter-Grundwasserleiter (z. B. Regli et al. 2003, Jussel et al. 1994), ist die dreidimensional räumliche Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit einer der wichtigsten Parameter für Grundwasserströmungs- und Transportmodellierungen,

Abb. 1 Einzugsgebiet der Thur mit Ausdehnung des Thurtal-aquifers und dem Standort des Testfeldes Widen



speziell in der Größenordnung von 10–100 m. Dieser Maßstabbereich ist z. B. relevant für Schutzzonenausweisungen.

Es existiert eine Vielzahl von Verfahren, um die hydraulische Leitfähigkeit auf unterschiedlichen Messskalen zu bestimmen. Bradbury & Muldoon (1990), Millham & Howes (1995) und Niemann & Rovey (2000) haben für sandige Grundwasserleiter unter anderem Siebanalysen, Permeameterversuche und Slugtests sowie Pumpversuche und Tracer-tests miteinander verglichen. Dabei zeigten gröberskalige Methoden tendenziell höhere Werte der hydraulischen Leitfähigkeit als kleinere Methoden. Diese Skalenabhängigkeit der hydraulischen Leitfähigkeit haben Schulze-Makuch et al. (1999) für verschiedene Arten von vorwiegend Festgesteins-Grundwasserleitern quantifiziert. Für voralpine und alpine Schotter-Grundwasserleiter sind aus der Literatur keine derartigen Untersuchungen bekannt.

Das Ziel dieser Arbeit ist, die kleinmaßstäbliche (10–100 m) räumliche Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit eines voralpinen Schotter-Grundwasserleiters anhand unterschiedlicher Methoden auf verschiedenen Skalen zu bestimmen. Dafür wurden Siebanalysen, tiefenaufgelöste Slugtests, Flowmetermessungen und ein Pumpversuch durchgeführt. Der Vergleich der Resultate soll aufzeigen, welche Vor- und Nachteile jede Methode mit sich bringt und für welche Zwecke sie geeignet sind. Für die Untersuchungen wurde der voralpine Schotter-Grundwasserleiter des Thurtals im Nordosten der Schweiz ausgewählt (Abb. 1).

Hydrogeologie des Thurtals

Das Thurtal ist ein glazial übertieftes Tal und erstreckt sich geographisch von Bürglen im Osten bis Thalheim im Westen (Abb. 1). Auf der gesamten Länge von ca. 30 km wird es vom voralpinen Fluss Thur durchflossen. Nach dem Rückzug der Vorlandgletscher der letzten Eiszeit wurde an der Endmoräne von Andelfingen der Thurtalsee aufgestaut, in welchem mächtige Seesedimente entstanden. Als der See verlandete, begann aus Osten die Schüttung des postglazialen Thurtalschotters in Form von periodischen hochenergetischen Überschwemmungsereignissen (Keusen 1976), bei welchen vorwiegend subhorizontale Kiesschichten abgelagert wurden. Als die Aufschotterung endete, bildete sich eine flächenhafte Deckschicht von Schwemmsanden aus.

Der voralpine alluviale Thurtalschotter kann großräumig und im Vergleich mit anderen voralpinen Schotterkörpern (z. B. Regli et al. 2003) als sedimentologisch nicht besonders heterogen betrachtet werden (Naef & Frank 2009). Es handelt sich um einen mäßig bis gut abgestuften, leicht schluffigen Kies mit Sand. Die Schottermächtigkeit beträgt 25 m im Raum Bürglen (Osten) und ca. 5 m unterhalb von Frauenfeld (Westen) (Naef & Frank 2009).

Der Thurtalschotter ist aufgrund seiner hohen hydraulischen Leitfähigkeit (0,005–0,02 m/s) ein ergiebiger Grundwasserleiter und wird von vielen Trinkwasserfassungen genutzt (Dr. Heinrich Jäckli AG 2003). In ihm fließt ein Grundwasserstrom von Ost nach West ca. talparallel entlang des topographischen Gradienten, mit einer durchschnittli-

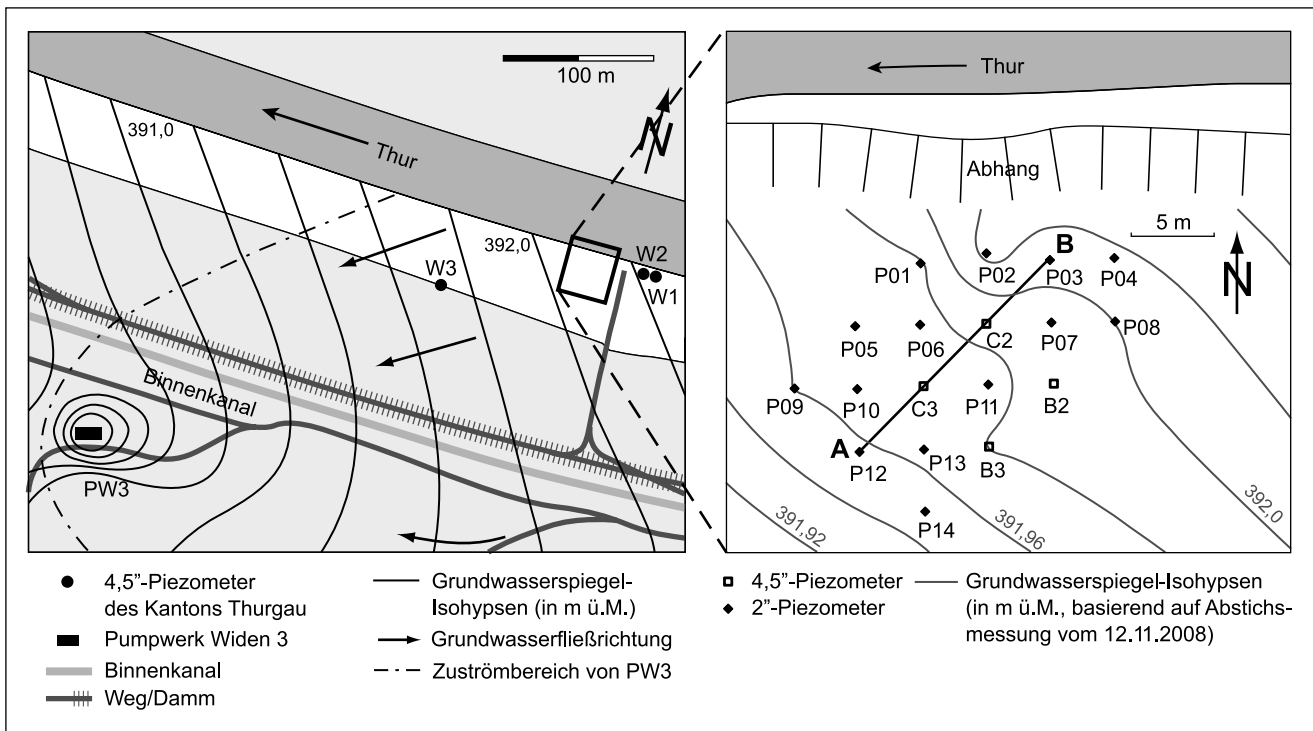


Abb. 2 Links: Hydraulische Verhältnisse in der Umgebung des Testfeldes Widen (basierend auf Dr. Heinrich Jäckli AG 2003). Rechts: Lage, Anordnung und Bezeichnung aller Piezometer. Transekte A–B, siehe Abb. 3

chen Geschwindigkeit von ca. 10 m/d. Die liegenden tonig-schluffigen Seeablagerungen bilden vielerorts die grundwasserstauende Schicht aus. Die Thur weist mit Ausnahme des östlichen Thurtals einen direkten hydraulischen Anschluss ans Grundwasser auf. Meistens wirkt sie als Infiltrant, Vorfluterstrecken kommen nur an wenigen, kurzen Thurabschnitten vor (Gmünder & Spring 2009).

Standort Widen

Östlich von Frauenfeld (Abb. 1) wurde das Testfeld Widen im Rahmen des RECORD-Projektes (REstored CORridor Dynamics – Assessment and Modeling of Coupled Ecological and Hydrological Dynamics in the Restored Corridor of a River) eingerichtet. Es wurden vier Rotationskernbohrungen (Durchmesser 178 mm) abgeteuft und zu 4,5"-Piezometern (PVC-Filterrohre, 1 mm Schlitzweite) ausgebaut (Abb. 2 rechts). Weitere 14 Rammkernsondierungen (Durchmesser 83 mm) wurden mit einem „Direct-Push“-Gerät (Geoprobe® 6620DT) abgeteuft. Darin wurden 2"-Piezometerrohre (HDPE-Filterrohre, 1 mm Schlitzweite) installiert. Alle Piezometer sind über die gesamte Schottermächtigkeit verfiltriert. Der Abstand zwischen den Piezometern beträgt in Ost-West- und Nord-Süd-Richtung 3,5 m und in Nordost-Südwest-Richtung 5 m. Insgesamt dehnt sich das

Testfeld auf ca. 10 × 20 m aus. Es befindet sich im Zuströmbereich eines Pumpwerks (PW3), dessen gefördertes Grundwasser durch drei weitere 4,5"-Piezometer (W1–W3) des Kantons Thurgau überwacht wird (Abb. 2 links).

Die Schottermächtigkeit beträgt in Widen ca. 7 m (Abb. 3). Innerhalb des Thurtalschotters konnten nur wenige leichte Unterschiede als Subeinheiten ausgeschieden werden. Eine Ausnahme wurde bei P03 angetroffen: Im unteren Teil des Schotters befindet sich in dieser Bohrung ein stark sandiger Abschnitt (Abb. 3). Die Grundwasserspiegel-Isohypsen in Abbildung 2 links zeigen, dass die Infiltrationsströmung ca. 45° zur Fließrichtung der Thur verläuft. Deren zum Teil stark geschwungener Verlauf im Bereich des Testfeldes ist Ausdruck einer kleinräumigen Heterogenität des Grundwasserleiters. Außer bei Hochwasser ist das Grundwasser ungespannt (Abb. 3).

Verwendete Methoden

Grundsätzlich handelt es sich bei der hydraulischen Leitfähigkeit um einen dreidimensionalen Tensor. Für vorwiegend horizontal geschichtete Grundwasserleiter (wie z. B. der Thurtalschotter) kann angenommen werden, dass die hydraulische Leitfähigkeit in den horizontalen Richtungen (K_h) gleich und nur in vertikaler Richtung wesentlich geringer ist (K_v) (Jussel et al. 1994). Die unten beschriebenen

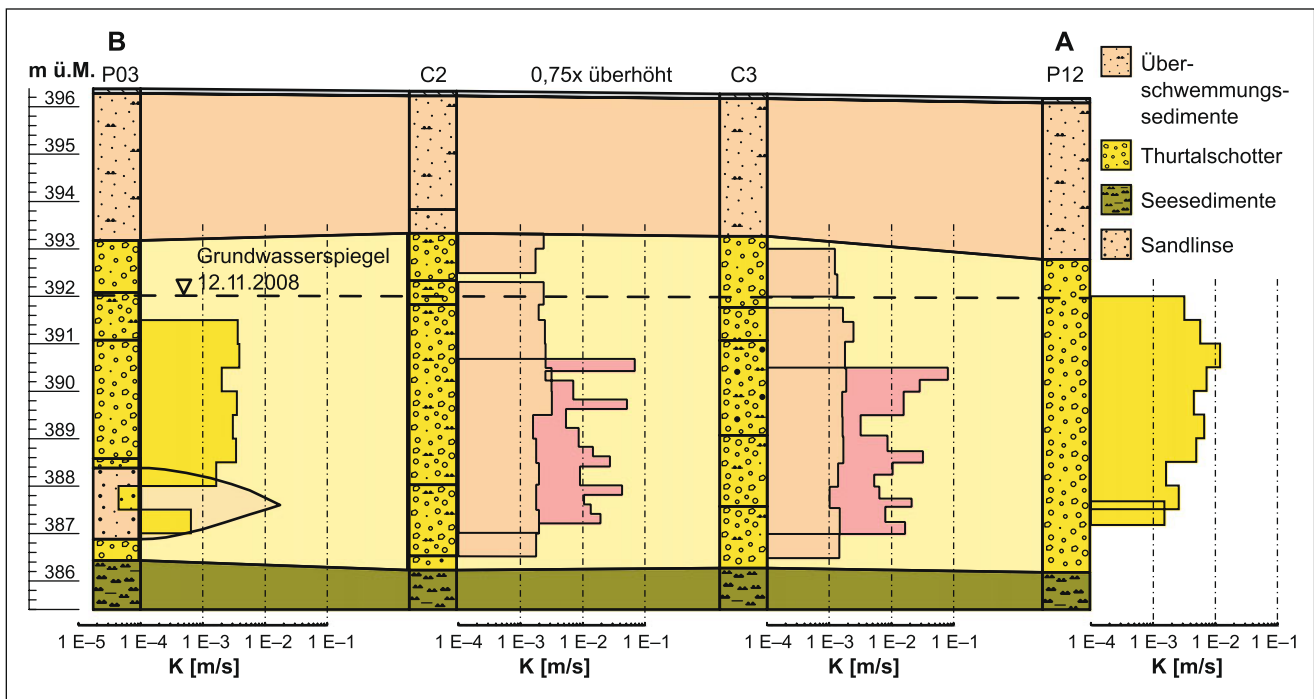


Abb. 3 Hydrogeologisches Querprofil in Nordost-Südwest-Richtung (Transecte A–B in Abb. 2 rechts): Für jedes der Piezometer ist die vertikale Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit entsprechend der

angewandten Methode(n) dargestellt. Slugtests: *gelb*, Siebanalysen: *orange*, Flowmeter: *rot*

Methoden ergeben Werte für die horizontale hydraulische Leitfähigkeit (K_h), die auf einer bestimmten Messskala gültig sind. Letztere ist zu unterscheiden vom Maßstab der Untersuchung, auf welchem die Methoden angewandt wurden (ca. 20 m, in der Größenordnung von 10–100 m).

Siebanalysen (Dezimeter-Messskala)

Die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit aus der Korngrößenverteilung wurde schon früh durchgeführt (z. B. Hazen 1893, Beyer 1964). Die Anwendung dieser beiden Formeln auf die in dieser Untersuchung erstellten Siebkurven zeigte, dass die hydraulische Leitfähigkeit um ca. eine Größenordnung unterschätzt wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die beiden Formeln für Sande und Kiese mit Ungleichförmigkeitsgraden (d_{60}/d_{10}) von 1 bis 5 bzw. bis 20 entwickelt wurden. Die durchgeführten Siebanalysen des kiesigen Thurtalschotters hingegen ergaben Ungleichförmigkeitsgrade zwischen 36 und 85. Deshalb wurde zusätzlich die Formel von Casati (1959) verwendet, die speziell für voralpine Schotter-Grundwasserleiter entwickelt wurde.

Ausgehend von einem ersten Korngemisch, entsprechend der Fullerkurve mit einem Größtkorn von 30 mm, erstellte Casati (1959) fünf weitere Gemische, in denen jeweils die kleinste von anfänglich neun Korngrößenfraktionen eliminiert und ihr gewichtsmäßiger Anteil auf die übrigen, größeren Korngrößenfraktionen verteilt wurde. Von diesen Proben

wurde die hydraulische Leitfähigkeit mit Permeameterversuchen experimentell bestimmt. Diese zeigte ab dem Korngemisch mit einem Kleinstkorn von 2 mm einen rapiden Anstieg, woraus Casati (1959) schloss, dass Korngrößen größer als 2 mm für die hydraulische Leitfähigkeit praktisch ohne Bedeutung sind. Casati (1959) fand folgende Beziehung, die die Gewichtsanteile der fünf kleinsten Korngrößenfraktionen zwischen 0 und 2 mm mit der hydraulischen Leitfähigkeit verbindet.

$$[1] \quad K = \frac{C}{16g_1 + 4g_2 + 2g_3 + g_4 + g_5}$$

wobei g_{1-5} [%] den Gewichtsanteilen der Fraktionen 0–0,125, 0,125–0,25, 0,25–0,5, 0,5–1 und 1–2 mm, C der Kalibrationskonstante und K [m/s] der hydraulischen Leitfähigkeit entspricht.

Die Konstante C wurde aus Siebanalysen von 112 Proben aus acht Bohrungen im voralpinen Schotter-Grundwasserleiter bei Muttenz (Kanton Basel-Landschaft) und dem bekannten Mittelwert der hydraulischen Leitfähigkeit (0,004 m/s) zu 0,245 bestimmt. Die kalibrierte Formel ist gültig für natürlich gelagerte Kies-Sandgemische, die alle Korngrößen enthalten und der Fullerkurve mit einem Größtkorn von 30 mm oder mehr ähnlich sind (Casati 1959).

Das Schottermaterial des Thurtalgrundwasserleiters der vier Rotationskernbohrungen (B2, B3, C2, C3, Abb. 2 rechts) wurde trocken gesiebt. Für das vorgefundene Größtkorn von 30 bis 50 mm wurde nach den Anforderungen der

DIN 18123 (Deutsches Institut für Normung e. V. 1983) eine Probenmenge von 4.000–8.000 g benötigt. Entsprechend wurde das vertikale Probenintervall auf 0,5 m gesetzt. Die Intervallsgrenzen wurden so gewählt, dass sie erstens auf ganze und halbe absolute Höhen in m ü. M. fielen (z. B. 391,5–392,0 m ü. M.) und zweitens die ausgeschiedenen geologischen Subeinheiten innerhalb des Thurtalschotters berücksichtigt wurden. Jede der insgesamt 53 Proben wurde in zwei Siebdurchgängen durch zehn Siebe mit abnehmender Loch- bzw. Siebweite (63 mm bis 0,125 mm) fraktioniert. Von insgesamt sechs Proben wurde auch der Feinanteil (<0,125 mm) laseroptisch auf die Kornverteilung analysiert (Malvern Instruments Hydro 2000s, Malvern Instruments GmbH, Deutschland).

Pumpversuch (Dekameter-Messskala)

Im Piezometer C2 wurde während 2,75 h ein Kleinpumpversuch mit einer Pumprate von 5,1 l/s (Pumpentyp: Grundfos SP 14A-7) durchgeführt. Die Grundwasserspiegelabsenkung wurde in den umgebenden Piezometern mit Drucksensoren (DL/N 70, Sensor Technik Sirmach AG, Schweiz) erfasst: P01, P02, P03, P06, P07, C3, P11, B2 und P14 (Abb. 2 rechts).

Der Pumpversuch im ungespannten Grundwasser des Testfeldes Widen zeigte einen zeitlichen Verlauf der Absenkung, der charakteristisch für den Prozess des verzögerten Zuflusses ist. Hierfür wurde die Auswertungsmethode von Neuman (1972) angewandt, deren Typkurven von zwei Theis-Typkurven und einem Übergangsbereich aufgebaut sind. Dabei resultierten die Parameter Transmissivität, Speicherkoeffizient, spezifische Ergiebigkeit (effektive Porosität), sowie das Anisotropieverhältnis der hydraulischen Leitfähigkeit (K_v/K_h). Es wurden Einzelauswertungen und eine Gesamtauswertung durchgeführt. Bei der Einzelauswertung wird der Bereich zwischen dem Pumpbrunnen und je einem Piezometer betrachtet und es wird versucht, den Absenkungsverlauf im Piezometer durch ein Aquifermodell mit allen zugehörigen Parametern zu erklären. Bei der Gesamtauswertung wird der Bereich des Aquifers zwischen dem Pumpbrunnen und allen verwendeten Piezometern betrachtet und es wird versucht, alle Absenkungsverläufe möglichst gut mit einem Parameterset zu erklären.

Slugtests (Meter-Messskala)

Die Slugtests wurden in allen 14 Piezometern mit einem Durchmesser von 2'' durchgeführt. Damit eine vertikale Auflösung der hydraulischen Leitfähigkeit möglich ist, wurde ein Doppelpackersystem mit einem Testintervall von 0,5 m verwendet (Brauchler et al. 2010). Die Intervallsgrenzen der insgesamt 117 Intervalle wurden wiederum auf ganze und halbe Meter absoluter Höhen in m ü. M. gesetzt. Für

die Initiierung des Slugtests wurde der pneumatische Ansatz gewählt. Beim pneumatischen Ansatz wird die Luftsäule im luftdichten Packergestänge unter Druck gesetzt. Das rasche Ablassen des Luftüberdrucks startet den Test, die abgesenkte Wassersäule beginnt wieder anzusteigen. Mit anderen Methoden (z. B. Verdrängung des Wassers mit einem Festkörper) ist eine quasi-instantane Initiierung des Slugtests in hochdurchlässigen Schotter-Grundwasserleitern nur sehr schwer möglich, ohne das Drucksignal zu verfälschen (Butler 1998). In jedem Piezometer wurde vorgängig eine Brunnenentwicklung durchgeführt, um eine optimale Durchlässigkeit im Schlitzbereich zu gewährleisten und positive Skin-Effekte zu vermeiden. Durch den kleinen Ringraum (ca. 1 cm) sollten nicht nur Umläufigkeiten während des Slugtests, sondern auch negative Skin-Effekte minimiert werden.

Der Wiederanstieg kann sich auf zwei Arten verhalten: Bei hohen hydraulischen Leitfähigkeiten pendelt sich der Grundwasserspiegel oszillierend und unterdämpft ein. In Bereichen geringerer hydraulischer Leitfähigkeiten verhält er sich klassisch überdämpft. Für den mehrheitlich beobachteten unterdämpften Wiederanstieg wurde die Methode von Springer & Gelhar (1991), und für den überdämpften Wiederanstieg diejenige von Bouwer & Rice (1976) angewandt. Für beide Methoden wurde das aus der Pumpversuchsgesamtauswertung resultierende Anisotropieverhältnis der hydraulischen Leitfähigkeit mit einbezogen.

Die Slugtests und der Pumpversuch wurden mit dem Programm AQTESOLV[®] Pro 4.50 (HydroSOLVE, Inc.) ausgewertet. Typkurven der genannten Methoden wurden mit einer automatischen Routine an die Daten angepasst, damit die Resultate miteinander vergleichbar sind (HydroSOLVE, Inc. 2007). Es resultiert eine Parameterschätzung mit einer dazugehörigen analysebedingten Standardabweichung. Letztere gibt den Wertebereich um den Schätzwert an, in welchem der wahre Parameterwert mit einer Wahrscheinlichkeit von 68,3 % eingeschlossen ist. Diese Standardabweichung wird als Maß für die Datenqualität bzw. die Eindeutigkeit der Daten betrachtet.

Flowmetermessungen (Meter-Messskala)

Bei einer Flowmetermessung wird im Brunnen mit konstanter Pumprate eine Absenkung erzeugt, die im Aquifer eine Grundwasseranströmung induziert. Gleichzeitig wird im Brunnen mit einem Propellerflowmeter in bestimmten Tiefenintervallen eine Messung der Umdrehungsfrequenz des Propellers durchgeführt, die mittels einer vorangehenden Kalibration zu Punktwerten des Durchflusses umgerechnet werden können. Da im Brunnen auch natürliche Wasserflüsse auftreten, müssen diese in denselben Tiefenintervallen gemessen und dann von den Durchflussmessungen unter Pumpbedingungen abgezogen werden (Nettodurchfluss).

Die Änderung des Nettodurchflusses zwischen zwei Messpunkten entspricht der Wassermenge, die pro Zeiteinheit aufgrund des hydraulischen Gradienten von der Formation in das Piezometer geflossen ist (differenzieller Nettofluss).

Die Auswertung der Flowmetermessungen nach Molz (1989) basiert auf der Annahme eines horizontal geschichteten Grundwasserleiters und einer horizontalen Anströmung des Grundwassers. Je höher der differenzielle Nettofluss im Intervall i (ΔQ_i), desto höher ist dann die hydraulische Leitfähigkeit im entsprechenden Intervall (K_i) mit Mächtigkeit Δz_i . Mit den erwähnten Annahmen gilt folgende Formel:

$$[2] \quad \frac{K_i}{K_m} = \frac{\Delta Q_i / \Delta z_i}{QP/Z},$$

wobei QP [m^3/s] der Pumprate und Z [m] der gesättigten Aquifermächtigkeit entspricht.

Nach Formel 2 resultiert ein vertikales Profil der hydraulischen Leitfähigkeit, relativ zum gewichteten arithmetischen Mittel der hydraulischen Leitfähigkeit (K_m). Bei Kenntnis von K_m können die relativen Werte zu absoluten Werten (K_i) skaliert werden. Molz (1989) empfiehlt hierfür die Verwendung der hydraulischen Leitfähigkeit eines Pumpversuchs. Butler (2005) hält dem entgegen, dass das Pumpversuchsergebn in lateral heterogenen Grundwasserleitern nicht mit der hydraulischen Leitfähigkeit in unmittelbarer Umgebung des Brunnens übereinstimmen muss und schlägt für K_m den Wert eines Slugtests über die gesamte gesättigte Aquifermächtigkeit vor.

Die Flowmetermessungen wurden in den vier 4,5"-Piezometern (B2–C3) mit einem kalibrierten Propellerflowmeter des Typs Haferland (Integro Haferland AG, Schweiz) durchgeführt. In Messintervallen von 0,25 m wurden zuerst jeweils der natürliche Durchfluss und dann jener unter Pumpbedingungen gemessen (Pumpentyp Grundfos SP

14A-7). Die Grenzen der Messintervalle wurden analog zu den Siebanalysen gesetzt (z. B. 370,0–370,25 m ü. M.), wobei auch die ausgeschiedenen Subeinheiten des Thurtalschotter berücksichtigt wurden.

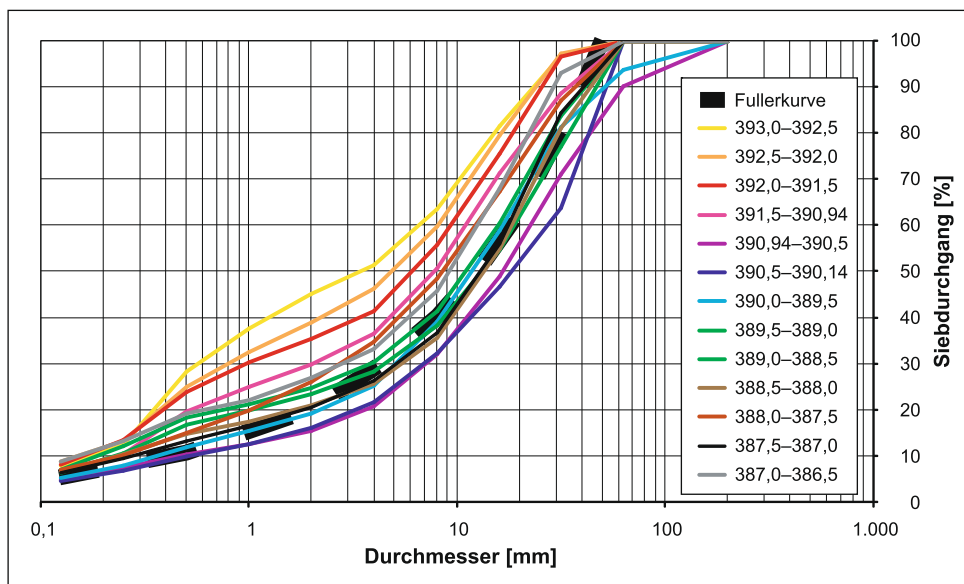
Die Annahmen zur Verwendung der Formel 2 dürften zutreffend sein, weil der Thurtalschotter mehrheitlich subhorizontal geschüttet wurde. Aus dem gemessenen differenziellen Nettofluss in jedem Intervall wurde mit Formel 2 das Profil der relativen hydraulischen Leitfähigkeit für alle Brunnen berechnet. Für den Wert von K_m wurde die hydraulische Leitfähigkeit der Pumpversuchsgesamtauswertung verwendet, um so absolute hydraulische Leitfähigkeiten (K_i) zu berechnen. Da der Thurtalschotter zumindest auf dem Maßstabsbereich des Testfeldes als lateral nicht sehr heterogen betrachtet werden kann (Abb. 3 und Kapitel „Hydrogeologie des Thurtals“), dürfte dies nach Butler (2005) zulässig sein.

Resultate und Vergleich der Methoden

Siebanalysen

Anhand der Kornverteilung kann der Thurtalschotter insgesamt als gut abgestufter Kies mit Schluff und Sand (GW-GM) klassifiziert werden (Abb. 4). Alle Siebkurven weisen die gleiche Charakteristik auf, welche mit derjenigen der Fullerkurve mit einem Größtkorn von 50 mm gut übereinstimmt. Die Ungleichförmigkeitsgrade der Siebkurven liegen zwischen 36 und 85. Der Feinanteil (Schluff und Ton) beträgt ca. 7 bis 12 %. Der Thurtalschotter erfüllt somit die Bedingungen zur Anwendung der Formel nach Casati (1959) (Formel 1).

Abb. 4 Siebkurven des Bohrgutes aus der Bohrung B3. Farbcodierte Legende: Probenabschnitt jeder Siebkurve in m ü. M., Fullerkurve mit Größtkorn von 50 mm



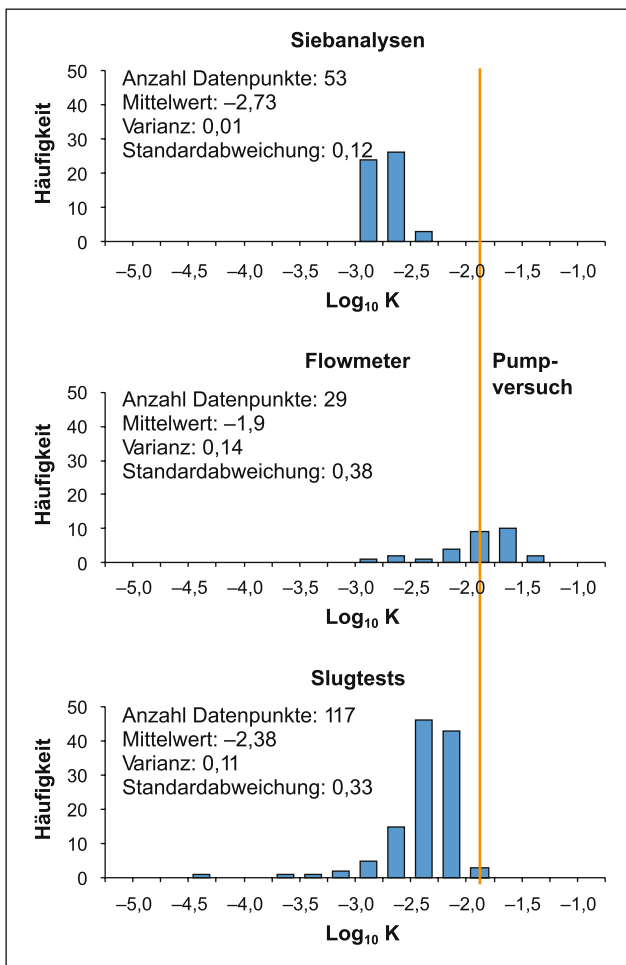


Abb. 5 Logarithmische Histogramme der hydraulischen Leitfähigkeiten der Siebanalysen, der Flowmetermessungen und der Slugtests mit angegebener Anzahl Datenpunkte, dem Logarithmus (zur Basis 10) des geometrischen Mittelwertes, der logarithmischen Varianz (zur Basis 10) und der logarithmischen Standardabweichung (zur Basis 10). Klassenbreite: 0,25 logarithmische Einheiten. Orange Linie: hydraulische Leitfähigkeit aus der Pumpversuchsgesamtauswertung

Abbildung 3 zeigt die errechneten hydraulischen Leitfähigkeiten aus den Siebanalysen des Bohrgutes aus C2 und C3 nach Casati (1959). Die Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit ist schmal, was sich an der kleinen logarithmischen Varianz (zur Basis 10) von 0,01 zeigt (Abb. 5). Die Absolutwerte liegen im Bereich $\log_{10} K$ -3,0 bis -2,46, was realistisch ist und auch im Streubereich der anderen beiden Verteilungen in Abbildung 5 liegt. Der logarithmische geometrische Mittelwert von -2,73 bildet, verglichen mit den zwei anderen geometrischen Mittelwerten, die untere Grenze.

Die Ansätze von Hazen (1893) und Beyer (1964) ergaben für dieselben Siebkurven eine höhere Variabilität der hydraulischen Leitfähigkeit. Offensichtlich führt die Verwendung fünf verschiedener Fraktionen, um die hydraulische Leitfähigkeit zu berechnen (Formel 1), zu einer kleineren

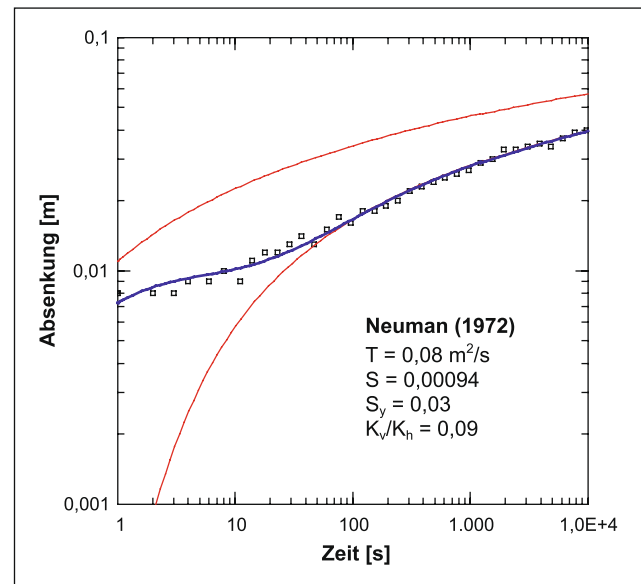


Abb. 6 Auswertung der Absenkungsdaten von P01 nach Neuman (1972) mit resultierenden Parametern. Schwarze Quadrate: Datenpunkte, blaue Kurve: angepasste Neuman-Typkurve mit entsprechenden Theis-Typkurven (rot) der Frühzeit- bzw. der Spätzeitdaten. T: Transmissivität, S: Speicherkoeffizient, S_y : spezifische Ergiebigkeit

Variabilität im Gegensatz zur Verwendung eines Parameters (d_{10}) bei Hazen (1893) und Beyer (1964).

Pumpversuch

Abbildung 6 zeigt den zeitlichen Verlauf der Grundwasserspiegelabsenkung in P01 (Abb. 2 rechts) mit der angepassten Neuman-Typkurve sowie den resultierenden Parametern. Die Einzelauswertungen der Absenkungsdaten des Pumpbrunnens (C2) und der Piezometer nach Neuman (1972) ergaben Transmissivitäten zwischen 0,07 und 0,09 m^2/s . Bei einer Grundwassermächtigkeit von 5,76 m entspricht dies hydraulischen Leitfähigkeiten zwischen 0,013 und 0,016 m/s . Die analysebedingten Standardabweichungen der Transmissivitäten betragen ca. 3 % der Schätzwerte. Die Gesamtauswertung nach Neuman (1972) ergab eine Transmissivität von 0,086 m^2/s bzw. eine hydraulische Leitfähigkeit von 0,015 m/s oder $\log_{10} K$ -1,83 (Abb. 5) mit einer analysebedingten Standardabweichung von 3 % und entspricht dem arithmetischen Mittelwert der Einzelauswertungen. Neben dem Speicherkoeffizienten (0,004) und der spezifischen Ergiebigkeit (0,06) resultierte ein Anisotropieverhältnis von 0,16. Die deutliche Anisotropie der hydraulischen Leitfähigkeit ist vermutlich auf die vorwiegend subhorizontale Schüttung des Schotterkörpers während Überschwemmungsereignissen zurückzuführen. Die analysebedingten Standardabweichungen dieser drei Parameter betragen 30 %, 15 % bzw. 20 % und liegen in jedem Fall im untersten Bereich der Standardabweichungen der Einzelauswertungen. Die Theis-Typkurve der Frühzeitdaten wird

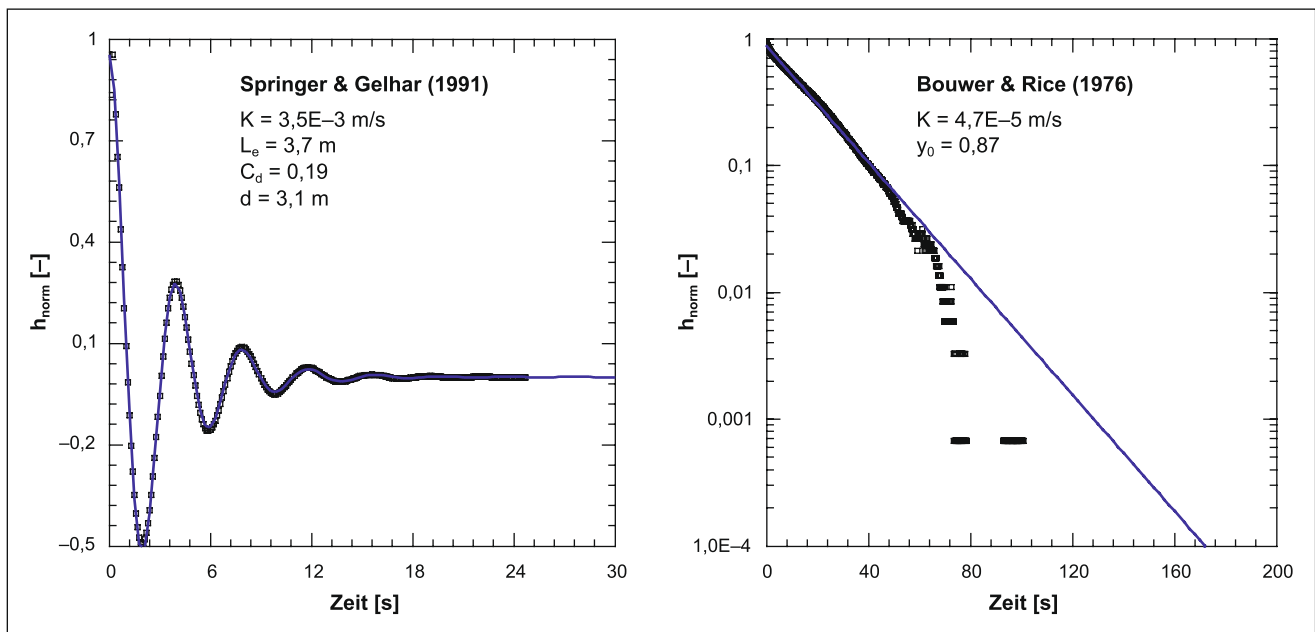


Abb. 7 Auswertung der Daten von zwei Slugtests (*links*: unterdämpft, *rechts*: überdämpft) aus Piezometer P03 mit resultierenden Parametern. *Schwarze Quadrate*: Datenpunkte, *blaue Kurve*: angepasste Ty-

pkurve. L_e : effektive Länge der Wassersäule, C_d : dimensionsloser Dämpfungparameter, d : Länge der Wassersäule, y_0 : Achsenabschnitt

unter anderem durch den Speicherkoeffizienten charakterisiert, jene der Spätzeitdaten durch die spezifische Ergiebigkeit. Da im Bereich der Theis-Typkurve der Frühzeitdaten teilweise keine Messpunkte aufgelöst werden konnten (z. B. Abb. 6), weist der Speicherkoeffizient die größte analysebedingte Standardabweichung auf.

Vor und nach dem Pumpversuch war der Grundwasserspiegel auf demselben Niveau. Natürliche Änderungen des Grundwasserspiegels innerhalb der kurzen Zeit des Pumpversuchs von knapp 3 h können deshalb ausgeschlossen werden. Dies gilt auch für den möglichen Einfluss des Pumpwerks (PW3, Abb. 2 links). Mittels einer Ableitungsanalyse (1. Ableitung) der Absenkungsdaten konnte kein eindeutiger Einfluss des nahegelegenen Flusses als Randbedingung festgestellt werden.

Slugtests

Abbildung 7 zeigt den zeitlichen Verlauf der auf die theoretische Maximalauslenkung normierten Wasserspiegelbewegung von zwei Slugtests aus dem Piezometer P03 (Abb. 3). Die theoretische Maximalauslenkung errechnet sich aus dem Luftüberdruck im Packergestänge, der zur Absenkung des hydraulischen Potentials appliziert wird (Butler 1998). Die linke Abbildung entspricht dem Slugtest im Tiefenintervall 388,5–389,0 m ü. M. und die rechte Abbildung jenem im Tiefenintervall 387,5–388,0 m ü. M. Die analysebedingte Standardabweichung variiert insgesamt zwischen 0,4 und 2 %. Um die experimentelle Genauigkeit zu erfassen, wurden vier Slugtests aus demselben Piezometer und demselben

Intervall ausgewertet. Es konnte auf diese Art eine experimentelle Standardabweichung von 10 % ermittelt werden, die einem Betrag von ca. 0,04 logarithmischen Einheiten entspricht und größer als die analysebedingte Standardabweichung ist.

Die Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit aus den Slugtests umfasst mehr als zwei Größenordnungen und ist asymmetrisch in Richtung kleinerer Werte (Abb. 5). Die logarithmische Varianz beträgt 0,11 und der Logarithmus des geometrischen Mittelwertes der Slugtestresultate beträgt $-2,38$. Der Grund für die Asymmetrie und die große Bandbreite in Richtung kleinerer Werte ist die oben erwähnte Sandlinse innerhalb des Thurtalschotters beim 2"-Piezometer P03 (Abb. 3). Die Slugtests vermochten diese ca. 1,5 m mächtige Zone in Form einer um ca. zwei Größenordnungen kleineren hydraulischen Leitfähigkeit abzubilden. Auch in den umgebenden Piezometern wurden in der entsprechenden Lage tiefere Werte gemessen.

Für die Auswertung der Slugtests wurde das resultierende Anisotropieverhältnis der Pumpversuchsgesamtauswertung verwendet ($K_v/K_h = 0,16$). Eine Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass bei einer Verkleinerung des Anisotropieverhältnisses um einen Faktor 10 die horizontale hydraulische Leitfähigkeit um 40 % zunimmt. Dazu wurden die Daten von fünf Slugtests bei Annahme von $K_v/K_h = 1$ bzw. $K_v/K_h = 0,1$ ausgewertet. Dies zeigt, dass die Kenntnis oder die plausible Annahme des Anisotropieverhältnisses wichtig für genaue Absolutwerte der hydraulischen Leitfähigkeit ist.

Flowmetermessungen

Abbildung 3 zeigt für die Piezometer C2 und C3 die aus den Flowmetermessungen errechneten und am Resultat der Pumpversuchsgesamtauswertung skalierten hydraulischen Leitfähigkeiten. Um die Resultate mit den oben beschriebenen Methoden statistisch zu vergleichen, wurden die hydraulischen Leitfähigkeiten der Flowmetermessungen im Sinne eines gewichteten arithmetischen Mittels auf 0,5 m-Intervalle umgerechnet. Die Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit weist so einen Logarithmus des geometrischen Mittelwertes von $-1,9$ und eine logarithmische Varianz von $0,14$ auf (Abb. 5). Letztere stimmt mit derjenigen der Slugtests gut überein. Das gewichtete arithmetische Mittel aller Flowmeterresultate ($\log_{10} K: -1,83$) entspricht erwartungsgemäß dem Resultat der Pumpversuchsgesamtauswertung, da die resultierenden hydraulischen Leitfähigkeiten der Flowmetermessungen an diesem Wert skaliert sind.

Bei den Übergängen von jeweils zwei geschlitzten $4,5''$ -Piezometerrohren wurde bei B2, B3 und C3 ein Minimum der hydraulischen Leitfähigkeiten festgestellt. Da dieser Übergang von 27 cm Länge nicht geschlitzt ist, kann in diesem Bereich kein Wasser zuströmen und entsprechend klein ist der differenzielle Nettofluss. Bei den kleinen Werten der hydraulischen Leitfähigkeit handelt es sich deshalb wahrscheinlich um Artefakte. Diese dürften auch für die leichte Asymmetrie in der Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit verantwortlich sein (Abb. 5). Bei den Slugtests konnten derartige Artefakte nicht eindeutig beobachtet werden. Dies hängt vermutlich stark damit zusammen, dass einerseits bei den $2''$ -HDPE-Piezometerrohren, in denen die Slugtests durchgeführt wurden, der ungeschlitzte Abschnitt nur 11 cm lang und andererseits das Testintervall verglichen mit den Flowmetermessungen doppelt so groß ist.

Diskussion

Im Vergleich zu den Flowmetermessungen müssen die Resultate der tiefenaufgelösten Slugtests nicht anhand einer anderen Methode kalibriert werden. Es resultieren Absolutwerte der hydraulischen Leitfähigkeit mit einer experimentellen Genauigkeit von ca. 10 %. Die Slugtestresultate decken ein breites Spektrum der hydraulischen Leitfähigkeit ab: von der Sandlinse bis zu hochdurchlässigen Zonen. Die Variabilität der hydraulischen Leitfähigkeit (logarithmische Standardabweichung: $0,33$) übersteigt dabei die Genauigkeit der Einzelmessung (experimentelle logarithmische Standardabweichung: $0,04$) um ca. einen Faktor 10. Deshalb dürften die Slugtests die Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit auf dem Maßstab des Testfeldes in der Größenordnung von 10–100 m verlässlich wiedergeben.

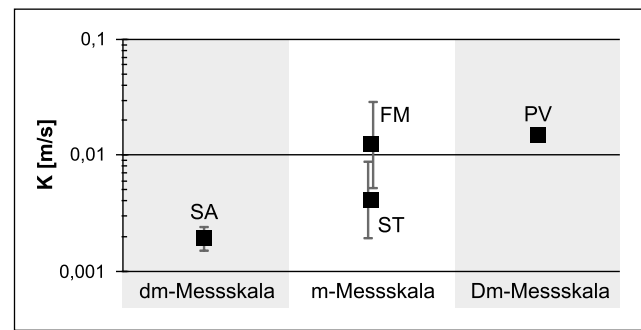


Abb. 8 Auftragung der Messskala (*dm*: Dezimeter, *Dm*: Dekameter) gegen die logarithmisch dargestellte hydraulische Leitfähigkeit: geometrische Mittelwerte der hydraulischen Leitfähigkeit resultierend aus den Siebanalysen, den Slugtests und den Flowmetermessungen mit dargestellten logarithmischen Standardabweichungen sowie hydraulische Leitfähigkeit der Pumpversuchsgesamtauswertung. SA: Siebanalysen, ST: Slugtests, FM: Flowmeter, PV: Pumpversuch

Wie jedoch oben erläutert, ist die Kenntnis des Anisotropieverhältnisses wichtig für eine genaue Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit.

Die Resultate der angewandten vier Methoden sind in Abbildung 8 zusammengefasst. Die Verteilungen der hydraulischen Leitfähigkeit der Slugtests und der Flowmetermessungen weisen einen systematischen Versatz auf, obwohl beide Methoden auf derselben Messskala wirksam sind. Die Variabilität der hydraulischen Leitfähigkeit der Flowmeterresultate stimmt jedoch gut mit derjenigen der Slugtests überein. Der Grund für diesen Versatz ist die Skalierung der Absolutwerte der Flowmeterresultate am Resultat der Pumpversuchsgesamtauswertung. Die höhere hydraulische Leitfähigkeit resultierend vom Pumpversuch, der auf einer größeren Messskala wirksam ist (Abb. 8), macht deutlich, dass die positive Skalenabhängigkeit, wie sie in der Literatur für die hydraulische Leitfähigkeit in vorwiegend sandigen Grundwasserleitern beschrieben wird (z. B. Niemann & Rovey 2000), auch in dem untersuchten voralpinen Schotter-Grundwasserleiter vorhanden ist.

Abbildung 5 zeigt den Ursprung der Skalenabhängigkeit: Die höchsten durch Slugtests ermittelten Werte der hydraulischen Leitfähigkeit entsprechen dem Pumpversuchsresultat. Das bedeutet, dass das Resultat des Pumpversuchs durch hochdurchlässige Zonen dominiert wird. Es handelt sich also nicht um einen gewichteten arithmetischen Mittelwert, wie für die Flowmeterauswertung angenommen wird, sondern das Pumpversuchsresultat entspricht tendenziell der oberen Grenze der natürlichen Bandbreite der hydraulischen Leitfähigkeit. Die Problematik bei der Verwendung des Pumpversuchsresultats zur Skalierung der Flowmeterresultate liegt weniger in der lateralen Heterogenität des Aquifers (Butler 2005), sondern in der Skalenabhängigkeit der hydraulischen Leitfähigkeit. Auch in diesem Hinblick wäre ein Slugtest über die gesamte gesättigte Aquifermächtigkeit die bessere Alternative zum Pumpversuchsresultat. Da aber

in hochdurchlässigen Schotter-Grundwasserleitern Slugtests pneumatisch initiiert werden sollten (Butler 1998), kann dies praktisch nicht realisiert werden, da der obere Teil der Filterstrecke vollkommener Brunnen oft in der ungesättigten Zone liegt und so kein luftdichtes System erreicht wird. Die Verwendung des arithmetischen Mittels von tiefenaufgelösten Slugtests wäre denkbar, ist jedoch in der praktischen Anwendung nicht sinnvoll, da sich dann Flowmetermessungen erübrigen würden.

In Abbildung 8 fällt auch die kleine Variabilität der hydraulischen Leitfähigkeit resultierend aus den Siebanalysen auf, die vorwiegend dem Ansatz von Casati (1959) zuzuschreiben ist. Verglichen mit den Slugtests wird der geometrische Mittelwert ($-2,38$) von den Siebanalysen (geometrischer Mittelwert: $-2,73$) um einen Faktor von 2,2 unterschätzt. Dies dürfte auf die Kalibrierung der Formel 1 auf lediglich einen spezifischen voralpinen Schotter-Grundwasserleiter zurückzuführen sein. Als Vorteil gegenüber den anderen Methoden ist zu erwähnen, dass nur die Siebanalyse auch Resultate für die ungesättigte Zone liefert (Abb. 3).

Schlussfolgerungen

Die vier angewandten Methoden zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit weisen unterschiedliche Resultate, basierend auf deren Stärken und Schwächen auf. Die Wahl der Untersuchungsmethode muss deshalb auf die Fragestellung, den gefragten Detailliertheitsgrad und den Untersuchungsmaßstab abgestimmt werden.

Für zukünftige hydraulische Untersuchungen in voralpinen und alpinen alluvialen Schotter-Grundwasserleitern, deren Korngrößenverteilungen der Fullerkurve ähnlich sind, muss bei einer Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit nach Casati (1959) mit einer Unsicherheit in der Größenordnung des hier gefundenen Faktors von 2,2 gerechnet werden. Diese Methode eignet sich nur, wenn eine grobe Abschätzung der hydraulischen Leitfähigkeit ausreicht. Sind für geotechnische Untersuchungen Kernbohrungen oder bereits Siebanalysen vorhanden, ist die Ermittlung der hydraulischen Leitfähigkeit mit dieser Methode zu empfehlen. Aufgrund der kleinen resultierenden Variabilität der hydraulischen Leitfähigkeit nach Casati (1959), sollten Siebungen nur für eine bis zwei repräsentative Proben pro Formation bzw. pro makroskopisch unterscheidbare Subeinheit des Schotter-Grundwasserleiters durchgeführt werden.

Auf dem Maßstab von 10–100 m ist das Pumpversuchsergebn geeignet für Untersuchungen, bei denen ein konservatives Resultat benötigt wird (z. B. für eine Schutzzonenausweisung). Der Pumpversuch stellt des Weiteren eine Möglichkeit zur Ermittlung des Anisotropieverhältnisses dar.

Flowmetermessungen eignen sich für die Untersuchung der hydraulischen Leitfähigkeit in alpinen und voralpinen Schotter-Grundwasserleitern, wenn primär ihre vertikale relative Verteilung interessiert; die Variabilität der hydraulischen Leitfähigkeit wird mit dieser Methode gut wiedergegeben.

Sind detaillierte Kenntnisse der absoluten und relativen Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit gefragt, eignen sich tiefenaufgelöste Slugtests sehr gut, was in einem vollkommenen Brunnen den Einsatz eines Doppelpackersystems voraussetzt. Auch ein Ausbau der Bohrung durch Piezometer, die in unterschiedlichen Tiefen verfiltert sind, wäre denkbar. Die hohe hydraulische Leitfähigkeit alpiner und voralpiner Schotter-Grundwasserleiter fordert eine pneumatische Slugtest-Initiierung und eine hohe zeitliche Auflösung der Messung des Wiederanstiegs (5–10 Hz). Für eine genaue Auswertung der Slugtests ist die Kenntnis der Anisotropie der hydraulischen Leitfähigkeit nötig. Ist es nicht möglich, das Anisotropieverhältnis (K_v/K_h) zu messen, dürfte für alpine und voralpine Schotter-Grundwasserleiter ein Wert im Bereich des hier bestimmten Anisotropieverhältnisses (0,16) eine gute Näherung sein.

Für Fragestellungen des Stofftransportes im Grundwasser sind detaillierte Kenntnisse der Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit auf dem horizontalen Maßstabbereich von Dekametern und einem vertikalen Maßstabbereich von Metern gefragt. Um den Aufwand z. B. für tiefenaufgelöste Slugtests zu verkleinern, könnte der Einsatz von „Direct-Push“-Methoden oder die Kombination von hydraulischen und hochauflösenden geophysikalischen Methoden eine Alternative darstellen.

Danksagung Wir bedanken uns bei Dr. Andreas Müller (Geologisches Institut, ETH Zürich), Prof. Dr. Fritz Stauffer, Dr. Matthias Willmann und Thomy Keller (Institut für Umweltingenieurwissenschaften, ETH Zürich), Köbi Burkhard (EMPA) und Thilo Thum (Eawag) für die Unterstützung im Feld, bei Laboruntersuchungen und bei der Datenauswertung. Herzlichen Dank an Prof. Dr. Mario Schirmer (Eawag) für die Durchsicht des Manuskripts.

Literatur

- Beyer, W.: Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilung. *Wasserwirtschaft-Wassertechnik (WWT)* **14**, 165–168 (1964)
- Bouwer, H., Rice, R.C.: Slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resour. Res.* **12**(3), 423–428 (1976)
- Bradbury, K.R., Muldoon, M.A.: Hydraulic conductivity determinations in unlithified glacial and fluvial materials. *Ground Water Vadose Zone Monit.*, 138–151 (1990)
- Brauchler, R., Hu, R., Vogt, T., Al-Halbouni, D., Heinrichs, T., Ptak, T., Sauter, M.: Cross-well slug interference tests: an effective characterization method for resolving aquifer heterogeneity. *J. Hydrol.* **384**(12), 33–45 (2010)
- Butler, J.J. Jr.: *The Design, Performance, and Analysis of Slug Tests*. 252 S. Lewis Publishers, Boca Raton (1998)

- Butler, J.J. Jr.: Hydrogeological methods for estimation of spatial variations in hydraulic conductivity. In: Hydrogeophysics, S. 523. Springer, Dordrecht (2005). Chap. 2
- Casati, A.: Die Durchlässigkeit kiesiger Böden. Monatsbulletin SVGW **6**, 120–126 (1959)
- Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 18123: Baugrund; Untersuchung von Bodenproben. Bestimmung der Korngrößenverteilung (1983)
- Dr. Heinrich Jäckli AG: Die Grundwasservorkommen im Kanton Thurgau. 88 S.; Amt für Umwelt des Kantons Thurgau, Frauenfeld (2003)
- Gmünder, C., Spring, U.: Grundwasserströme und Grundwasserbilanzen – Grundwassermodell Thurtal. Mitt. Thurg. Naturf. Ges. **63**, 155–174 (2009)
- Hazen, A.: Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration. Am. Rep. Mass. State Bd. Health **24**, 541–556 (1893)
- HydroSOLVE, Inc.: AQTESOLV® Pro 4.50.002, Manual (2007)
- Jussel, P., Stauffer, F., Dracos, T.: Transport modeling in heterogeneous aquifers. I. Statistical description and numerical generation of gravel deposits. Water Resour. Res. **30**(6), 1803–1817 (1994)
- Keusen, H.R.: Neue quartärgeologische Erkenntnisse von Baugrunduntersuchungen für die N7 im Kanton Thurgau. Mitt. Thurg. Naturf. Ges. **41**, 91–104 (1976)
- Millham, N.P., Howes, B.L.: A comparison of methods to determine K in a shallow coastal aquifer. Ground Water **33**(1), 49–57 (1995)
- Molz, F.J.: The impeller meter for measuring aquifer permeability variations: evaluation and comparison with other tests. Water Resour. Res. **25**(7), 1677–1683 (1989)
- Naef, H., Frank, S.: Neue Erkenntnisse zur Entstehung und zum Aufbau des Thurtaler Grundwasserträgers zwischen Bürglen und Niederneunforn. Mitt. Thurg. Naturf. Ges. **63**, 63–106 (2009)
- Neuman, S.P.: Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the watertable. Water Resour. Res. **8**(4), 1031–1045 (1972)
- Niemann, W.L., Rovey, C.W. II: Comparison of hydraulic conductivity values obtained from aquifer pumping tests and conservative tracer tests. Ground Water Monit. Remediat. **20**(3), 122–128 (2000)
- Regli, C., Rauber, M., Huggenberger, P.: Analysis of aquifer heterogeneity within a well capture zone, comparison of model data with field experiments: a case study from the river Wiese, Switzerland. Aquat. Sci. **65**, 111–128 (2003)
- Schulze-Makuch, D., Carlson, D.A., Cherkauer, D.S., Malik, P.: Scale dependency of hydraulic conductivity in heterogeneous media. Ground Water **37**(6), 904–919 (1999)
- Springer, R.K., Gelhar, L.W.: Characterization of large-scale aquifer heterogeneity in glacial outwash by analysis of slug tests with oscillatory response, Cape Cod, Massachusetts. U.S. Geol. Surv. Water Res. Invest. Rep. **91**, 36–40 (1991)