

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Maier, Ruth; Leven, Carsten; Straßer, Daniel; Odenwald, Bernhard; Cirpka, Olaf A.

Tiefenorientierte Pumpversuche zur Bestimmung der hydraulischen Anisotropie in einem geschichteten Grundwasserleiter

Grundwasser

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/109594>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Maier, Ruth; Leven, Carsten; Straßer, Daniel; Odenwald, Bernhard; Cirpka, Olaf A. (2022): Tiefenorientierte Pumpversuche zur Bestimmung der hydraulischen Anisotropie in einem geschichteten Grundwasserleiter. In: Grundwasser. <https://doi.org/10.1007/s00767-022-00519-0>.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.





Tiefenorientierte Pumpversuche zur Bestimmung der hydraulischen Anisotropie in einem geschichteten Grundwasserleiter

Ruth Maier¹ · Carsten Leven¹  · Daniel Strasser² · Bernhard Odenwald² · Olaf A. Cirpka¹

Eingegangen: 21. Februar 2022 / Überarbeitet: 28. Mai 2022 / Angenommen: 30. Mai 2022
© Der/die Autor(en) 2022

Zusammenfassung

Die horizontale Schichtung von Sedimentkörpern bewirkt, dass die effektive hydraulische Durchlässigkeit eines sedimentären Grundwasserleiters in horizontaler Richtung größer ist als in der vertikalen, was sich unter anderem auf die Ausbreitung des Absenktrichters bei Grundwasserentnahmen auswirkt. Um die großräumige hydraulische Anisotropie zu bestimmen, führten Maier et al. (2022a) an einem Testfeld am Oberrhein tiefenorientierte Pumpversuche mit einem Förderbrunnen mit drei Filterstrecken durch. Die Grundwasserentnahmen erfolgten nacheinander jeweils aus einer Tiefe. Die Absenkungen aller Versuche wurden in verschiedenen Abständen zum Förderbrunnen und verschiedenen Tiefen gemessen und gemeinsam mit einem Computermodell ausgewertet. In der vorliegenden Arbeit zeigen wir, dass die Interpretation von Absenkkurven bei Entnahme aus nur einer Tiefe zu Durchlässigkeitsbeiwerten führt, die vornehmlich die Bedingungen in der Entnahmetiefe widerspiegeln. Für die Bestimmung vertikaler Unterschiede der hydraulischen Durchlässigkeit und der hydraulischen Anisotropie ist es notwendig, Versuche mit mehreren Entnahmetiefen zu kombinieren. Der Arbeitsaufwand im Feld kann jedoch durch eine optimierte Beobachtungsstrategie reduziert werden.

Schlüsselwörter Hydraulische Anisotropie · Heterogenität · Teilverfilterter Brunnen · Pumpversuch · Oberrheingraben · Hydraulische Tomographie

Depth-oriented pumping tests for the determination of hydraulic anisotropy in a stratified aquifer

Abstract

Horizontal layering in sedimentary bodies induces a directional dependence in the effective hydraulic conductivity of sedimentary aquifers in which the horizontal conductivity exceeds the vertical. This influences the spatial expansion of the depression cone when lowering the groundwater table upon pumping. To estimate the hydraulic anisotropy on larger scales, Maier et al. (2022a) performed pumping tests at a test site near the upper Rhine River using a partially penetrating pumping well in which water was extracted successively at three different depths. The drawdown responses of all tests were measured at different distances to the pumping well and at different depths, and were jointly inverted by a numerical model. In this study, we show that tests with a single extraction depth mainly reflect the conditions at this depth. In order to identify vertical differences in hydraulic conductivity and the hydraulic anisotropy, tests with different extraction depths need to be combined. However, the field effort can be reduced by optimizing the monitoring strategy.

Ruth Maier
ruth.maier@uni-tuebingen.de

✉ Carsten Leven
carsten.leven-pfister@uni-tuebingen.de

Daniel Strasser
daniel.strasser@baw.de

Bernhard Odenwald
bernhard.odenwald@baw.de

Olaf A. Cirpka
olaf.cirpka@uni-tuebingen.de

¹ Fachbereich Geowissenschaften, Eberhard Karls Universität Tübingen, Schnarrenbergstraße 94–96, 72076 Tübingen, Deutschland

² Bundesanstalt für Wasserbau, Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe, Deutschland

Keywords Anisotropy · Heterogeneity · Partially penetrating wells · Aquifer Test · Upper Rhine Valley · Hydraulic Tomography

Einleitung

Die hydraulische Durchlässigkeit ist der wichtigste hydrogeologische Parameter in Grundwasserleitern. Sie wird üblicherweise durch Pumpversuche bestimmt, die meist analytisch ausgewertet werden. Die meisten analytischen Lösungen nehmen an, dass die hydraulischen Eigenschaften des untersuchten Grundwasserleiters räumlich konstant (homogen) und richtungsunabhängig (isotrop) sind. In der Realität weisen geschichtete Grundwasserleiter jedoch große Durchlässigkeitsunterschiede zwischen einzelnen horizontalen Lagen auf. Großräumig betrachtet bewirkt die horizontale Schichtung eine Richtungsabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit, da die Grundwasserströmung in der Ebene der Schichtung leichter induziert werden kann als senkrecht dazu. Die Hauptrichtungen des effektiven Durchlässigkeitstensors K^{eff} stimmen typischerweise mit den horizontalen und vertikalen Richtungen überein, wobei die horizontale Durchlässigkeit die vertikale übersteigt. Die Richtungsabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit wird als hydraulische Anisotropie und das Verhältnis der richtungsabhängigen Durchlässigkeiten wird als Anisotropie-Verhältnis bezeichnet.

In vielen hydrogeologischen oder geohydraulischen Anwendungen spielt die hydraulische Anisotropie eine wesentliche Rolle, beispielsweise bei der Planung und Auslegung hydraulischer Sanierungsmaßnahmen (Bair und Lahm 1996; Zlotnik und Ledder 1996) oder bei der Dimensionierung von Wasserhaltungsmaßnahmen. Hierbei müssen die Anzahl und Anordnung von Brunnen sowie die erforderlichen Entnahmeraten so dimensioniert werden, dass der Grundwasserspiegel auf ein notwendiges Niveau abgesenkt werden kann, wobei sich die hydraulische Anisotropie des Untergrunds auf die Ausprägung des Absenktrichters und die räumliche Verteilung der Grundwasserabsenkung auswirkt. Wird das Anisotropie-Verhältnis in der Planung von Wasserhaltungsmaßnahmen vernachlässigt, werden die erforderlichen Entnahmeraten und damit die Durchmesser und ggf. Anzahl der Brunnen sowie die Leistungsfähigkeit der erforderlichen Pumpen falsch dimensioniert. Hierdurch können, je nach Größe des Projekts, erhebliche Mehrkosten entstehen. Um solche Kosten zu vermeiden, werden Methoden benötigt, mit denen bereits in der Planungsphase von Großprojekten die vertikale Heterogenität und Anisotropie der Durchlässigkeit in natürlichen Grundwasserleitern bestimmt werden kann.

Maier et al. (2022a) empfehlen hierzu Pumpversuche unter Verwendung teilverfilterter Brunnen, um dominante hydraulische horizontale Strukturen und die großräumige An-

isotropie von Porengrundwasserleitern zu bestimmen. Dabei wird Grundwasser aus verschiedenen Tiefen des Grundwasserleiters entnommen, und die dadurch resultierende Absenkung wird in unterschiedlichen Abständen zum Brunnen und in unterschiedlichen Tiefen gemessen. Die Ermittlung der Anisotropie kann dann durch eine kombinierte, d.h. tomographische Auswertung der Pumpversuche mittels numerischer Modellanpassung (numerische Inversion) erfolgen, wie in Maier et al. (2022a) im Detail beschrieben wird.

Diese Art der Durchführung von Pumpversuchen ist allerdings mit einem erheblichen Arbeitsaufwand im Feld verbunden, da die Grundwasserentnahme aus verschiedenen Tiefen erfolgen muss, z.B. aus einem Brunnen mit mehreren getrennten Filterstrecken, in dem während der Grundwasserentnahme die jeweils unbeanspruchten Filterstrecken abgesperrt werden müssen. Ziel der vorliegenden Studie ist es daher zu untersuchen, ob für eine zuverlässige Ermittlung der hydraulischen Anisotropie in geschichteten Grundwasserleitern die Grundwasserentnahme aus mehreren Tiefen wirklich erforderlich ist, oder ob bereits die Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen mit einer Grundwasserentnahme aus nur einer Tiefe zu einem repräsentativen Ergebnis führt. Dafür vergleichen wir die numerische Inversion von Pumpversuchen nach dem tomographischen Ansatz (Maier et al. 2022a) mit einem Ansatz, in dem nur die Grundwasserentnahme bei einer einzelnen Entnahmetiefe berücksichtigt wird. Hierbei modifizieren wir die Methodik von Maier et al. (2022a) und verwenden denselben Datensatz. Dieser besteht aus Absenkungsdaten, die während der sequenziellen Grundwasserentnahme aus einem Brunnen aus drei verschiedenen Tiefen in jeweils 58 umliegenden Beobachtungspunkten gemessen wurden. Die vorliegende Studie unterscheidet sich von der Studie von Maier et al. (2022a) darin, dass wir die Pumpversuchsdaten für jede einzelne Entnahmetiefe in einer separaten Modellanpassung auswerten, während Maier et al. (2022a) die Pumpversuchsdaten der drei Entnahmetiefen kombiniert in einer Modellkalibrierung berücksichtigten. In Anlehnung an diese Studie betrachten wir ein homogenes, anisotropes Grundwassermodell und ein Modell mit drei anisotropen Schichten. Da jedoch die Pumpversuchsdaten von drei Entnahmetiefen vorliegen, können wir zusätzlich untersuchen, welchen Einfluss die Tiefe der Entnahmestrecke auf die ermittelte vertikale Verteilung und Anisotropie der Durchlässigkeit hat, wenn nur eine Entnahmetiefe berücksichtigt wird. Außerdem untersuchen wir eine Methodenoptimierung hinsichtlich der Anzahl an Beobachtungsmessstellen, um den Arbeitsaufwand im Feld zu reduzieren.

Methodik

Theoretische Grundlagen

Wir betrachten die radiale Zuströmung zu einem teilverfilterten Brunnen in einem gespannten Grundwasserleiter. Die Grundwasserströmungsgleichung lautet in Zylinderkoordinaten:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(K_r r \frac{\partial s}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial s}{\partial z} \right) = S_0 \frac{\partial s}{\partial t} \quad (1)$$

mit den radialen und vertikalen Koordinaten r [L] und z [L], den horizontalen und vertikalen Durchlässigkeitsbeiwerten K_r [LT⁻¹] und K_z [LT⁻¹], für die wir in dieser Studie annehmen, dass sie nur in der vertikalen Richtung variieren, der Zeit t [T], dem spezifischen Speicherkoefizienten S_0 [L⁻¹] und der Absenkung s [L].

Wir betrachten das Strömungsregime, in dem sich die Unterschiede der Standrohrspiegelhöhen zwischen Beobachtungspunkten nicht mehr verändern, obwohl die Absolutwerte weiter zunehmen (steady-shape regime, Bohling et al. 2002, 2007). Dann können Unterschiede zwischen den Absenkungswerten an zwei Beobachtungspunkten aus der Lösung der stationären Grundwasserströmungsgleichung

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(K_r r \frac{\partial s}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial s}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

berechnet werden. Wir definieren den oberen und unteren Rand des Modellgebiets z_{GWO} [L] und z_{Sohle} [L] als undurchlässige Ränder:

$$\left. \frac{\partial s}{\partial z} \right|_{z=z_{Sohle}} = \left. \frac{\partial s}{\partial z} \right|_{z=z_{GWO}} = 0 \forall r \quad (3)$$

Für den weit entfernten äußeren Rand des Modells nehmen wir einen Festpotentialrand an, mit einer konstanten Absenkung von Null bei der Reichweite R [L]:

$$s(R, z) = 0 \forall z \quad (4)$$

Wir betrachten drei Pumpversuche unter Verwendung eines Entnahmehrbrunnens mit Radius r_{Br} [L]. Bei jedem Pumpversuch wird Grundwasser über eine von drei Filterstrecken der Länge b [L] entnommen. Jede Filterstrecke i_{Filt} befindet sich in einer unterschiedlichen Tiefe, wobei z_m [L] die Mitte der Filterstrecke beschreibt. Bei der Wasserentnahme über eine Filterstrecke nehmen wir an, dass die Standrohrspiegelhöhe entlang der beanspruchten Filterstrecke konstant und der Gesamtzufluss Q [L³T⁻¹] über die Filterstrecke bekannt ist. Zudem gehen wir davon aus, dass entlang des Brunnens für Tiefen, die nicht zur beanspruchten Filterstrecke gehö-

ren, kein Grundwasserzutritt erfolgt. Damit ergeben sich für den Brunnenradius $r = r_{Br}$ folgende Randbedingungen:

$$\left. \begin{aligned} s &= \text{konstant und} \\ -\int_{z_m(i_{Filt})-\frac{b}{2}}^{z_m(i_{Filt})+\frac{b}{2}} 2\pi r K_r \frac{\partial s}{\partial r} dz &= Q \\ \frac{\partial s}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{wenn} \\ &z_m(i_{Filt})-\frac{b}{2} \leq z \\ &\leq z_m(i_{Filt})+\frac{b}{2} \\ &\text{andernfalls} \end{aligned} \quad (5)$$

Feldversuche

Der Versuchsstandort der hier vorgestellten Studie liegt nördlich der Gemeinde Kappel-Grafenhausen, etwa 40 km nördlich von Freiburg im Breisgau, im mittleren Bereich der Oberrheinischen Tiefebene (Abb. 1a). Der ungespannte Porengrundwasserleiter besteht aus quartären Lockersedimenten. Kornanalytisch setzt sich die quartäre Auffüllung des Oberrheingrabens aus Steinen, Mittel- und Grobkies sowie Fein- und Mittelsand, stellenweise auch mit schluffigem Ton, zusammen. Die Mächtigkeit des oberen Grundwasserstockwerks der Neuenburg-Formation (qNE) beträgt ~41 m und wird von etwa ~2 m mächtigen Auelehmen überdeckt. Im Liegenden schließen sich die geringer durchlässigen Lockersedimente der Breisgau-Formation (qBS) an.

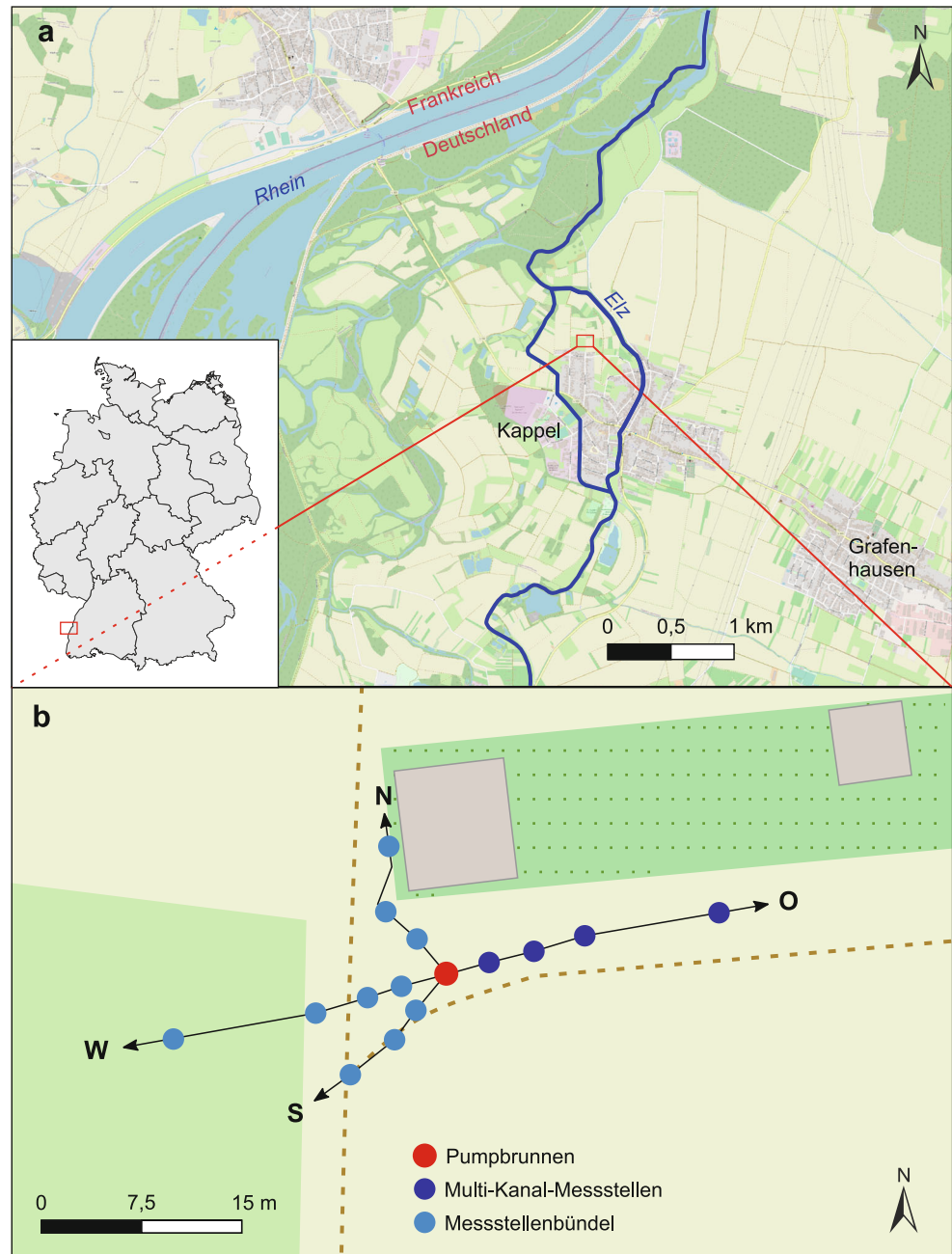
Die Grundwasserfließrichtung verläuft von Südost nach Nordwest und zeigt einen hydraulischen Gradienten von etwa 0,14 %. Der Grundwasserflurabstand am Standort beträgt im Ruhezustand ca. 2 m. Das rote Rechteck in Abb. 1a markiert die Lage des Versuchsstandorts, der vom Fluss Elz im Osten und einem Hochwasserumleitungskanal im Westen begrenzt wird.

Am Standort bildet ein Großbrunnen das Zentrum eines Messstellennetzes (roter Punkt in Abb. 1b), der speziell für unsere Aufgabenstellung mit dem Ziel konzipiert wurde, eine starke vertikale Strömungskomponente erzeugen zu können. Der Förderbrunnen wurde als verrohrte Greiferbohrung mit einem Bohrdurchmesser von 1600 mm bis in eine Tiefe von ~22 m abgeteuft und mit einem Durchmesser von $d = 800$ mm sowie drei jeweils 2 m langen Filterstrecken ausgebaut. Die Filterstrecken liegen im oberen, mittleren und unteren Teil des Förderbrunnens und sind im Ringraum durch jeweils 2,5 m mächtige Tonsperren hydraulisch voneinander abgetrennt.

Für das Messstellennetz wurden 14 Grundwassermessstellen um den Förderbrunnen entlang von vier Transekten in mehr oder weniger nördlicher, östlicher, süd-westlicher und westlicher Richtung installiert (hellblaue und dunkelblaue Punkte in Abb. 1b). Auf allen Transekten wurden drei Mehrfachmessstellen mit einem Abstand von $r_1 \approx 3,5$ m, $r_2 \approx 6,5$ m und $r_3 \approx 10,5$ m zum Förderbrunnen errichtet. In den östlichen und westlichen Richtungen wurde zusätzlich jeweils eine vierte Mehrfachmessstelle mit einem Abstand von $r_4 \approx 21$ m zum Förderbrunnen installiert. Um eine tiefenorientierte Beobachtung der Grund-

Abb. 1 a Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets; **b** Übersicht des Messnetzes am Versuchsstandort

Fig. 1 a Map of the study area; **b** Overview of the monitoring well network at the test site



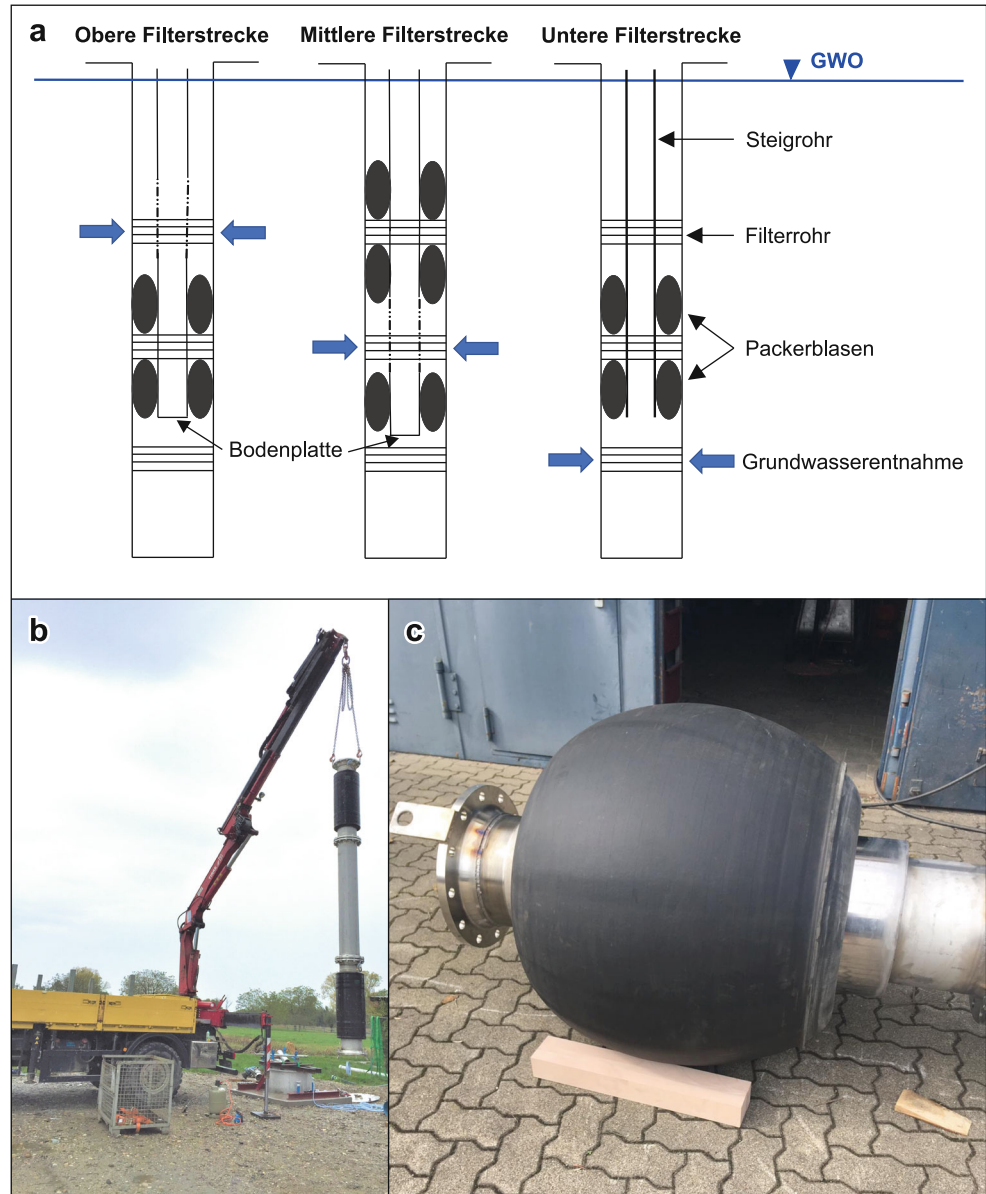
wasserabsenkung zu ermöglichen, wurden die Messstellen als Messstellenbündel (hellblaue Punkte in Abb. 1b) oder als Mehrkanalmessstellen (Einarson und Cherry 2002) (dunkelblaue Punkte in Abb. 1b) ausgebaut. Jedes Messstellenbündel besteht aus drei Grundwassermessstellen, die jeweils als Vollrohre in unterschiedliche Tiefen reichen und dort in einer ~0,3 m langen Filterstrecke enden. Die Mehrkanalmessstellen hingegen bestehen aus einem Vollrohr mit sieben Einzelkanälen, die jeweils in unterschiedlichen Tiefen über eine Länge von ~0,4 m verfiltert sind. Das Gesamtmessnetz umfasst 14 Grundwassermessstellen mit insgesamt 58 Beobachtungspunkten. Die Beobachtungs-

punkte wurden auf Höhen zwischen $z_{min} \approx 20,8$ m und $z_{max} \approx 39,1$ m angeordnet, bezogen auf die hier angesetzte Basis des Grundwasserleiters, die sich 41,05 m unterhalb der ungestörten Grundwasseroberfläche im Bereich des Brunnens befindet (Abb. 3).

Wie in Maier et al. (2022a) beschrieben, wurden am Versuchsstandort Pumpversuchsreihen durchgeführt, in denen die Grundwasserentnahme über jeweils eine der drei Filterstrecken des Förderbrunnens erfolgte. Dabei wurde mit einer frequenzgesteuerten Tauchpumpe Grundwasser gefördert und anschließend über eine Rohrleitung in die Elz abgeleitet.

Abb. 2 a Schematische Darstellung der Konfigurationen des Doppel-Packer-Systems für die Grundwasserentnahme über die obere, mittlere und untere Filterstrecke; **b** Konfiguration des Doppel-Packer-Systems; **c** Packerblase unter Zugabe von Luftdruck

Fig. 2 a Schematic sketch of configurations of the double packer system for the groundwater extraction from the upper, middle and lower screen sections; **b** Configuration of the double packer system; **c** Inflated packer bladder



Um im Rahmen der Pumpvorgänge eine Grundwasserentnahme über eine einzelne Filterstrecke zu ermöglichen, wurde ein Doppel- bzw. Mehrfach-Packer-System in den Brunnen eingeführt (Abb. 2a,b). Aufgrund des vorliegenden, großen Brunnendurchmessers wurde das Packer-System aus Rohrdichtkissen in Eigenbau angefertigt. Der Aufbau wurde modular ausgeführt, sodass je nach angestrebter Entnahmetiefe die Konfiguration individuell angepasst werden kann. Abb. 2a zeigt schematisch die verschiedenen Konfigurationen des Packer-Systems, die für die Grundwasserentnahme über die obere, mittlere und untere Filterstrecke verwendet wurden. Abb. 2b zeigt einen Teil des Aufbaus, in dem zwei Rohrdichtkissen durch ein Vollrohr verbunden wurden. Die Rohrdichtkissen wurden je nach Tiefe der Grundwasserentnahme unter oder über der be-

pumpten Filterstrecke platziert (Abb. 2a) und über die Zugabe von Luftdruck (Abb. 2c) an die Brunneninnenwand gepresst. Durch ein unterhalb des Packeraufbaus positioniertes Gewicht wurde das Aufschwimmen der gesamten Konstruktion verhindert. Wir weisen darauf hin, dass der in dieser Studie gewählte Durchmesser des Förderbrunnens und die damit verbundene Notwendigkeit eines speziellen Packer-Systems keine Voraussetzung für die Durchführung der Versuche darstellt, sondern sich aus weiteren Anforderungen im Projekt ergaben.

Während der Pumpversuche wurde die Veränderung der Standrohrspiegelhöhe an allen zur Verfügung stehenden Beobachtungspunkten zeitlich hochauflösend aufgezeichnet. Dafür wurden faseroptische Drucksensoren (Leven und

Tab. 1 Verwendete Drucksensoren und Grundwasserdatenlogger für die Messung der Standrohrspiegelhöhe während der Grundwasserentnahme

Table 1 Pressure sensors and groundwater data loggers used to measure the water levels during groundwater extraction

Art des Sensors	Spezifikation	Auflösung	Messfrequenz
Faseroptische Drucksensoren	Modell: FOP-MIV-NS-369D (Smartec, Schweiz)	ca. 1 mm	0,2 Hz
Grundwasserdatenlogger	Micro-Diver, TD-Diver, CTD-Diver (Van Essen Instruments)	ca. 2 mm	0,2 Hz
	Dipper-PT (Seba Hydrometrie)	nicht bestimmt	0,033 Hz
Wasserstandsmesser	Manuelle Messung	< 1 cm	–

Barrash 2022) und verschiedene Grundwasserdatenlogger verwendet (Tab. 1).

Im Anschluss an die Durchführung der Pumpversuche erarbeiteten wir einen Datensatz mit den Absenkungen im *Steady-shape*-Strömungsregime, wobei Messungen bei unterschiedlicher Förderrate zusammengeführt wurden. Für Details der Datenprozessierung verweisen wir auf Maier et al. (2022a), der vollständige Datensatz der Pumpversuche ist verfügbar unter Maier et al. (2021) und Maier et al. (2022b).

Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Datengrundlage betrachtet einen Pumpversuch je Entnahmetiefe mit vergleichbarer Entnahmerate, die wir im Folgenden als Pumpversuch I, II und III entsprechend der Entnahme über die obere, mittlere bzw. untere Filterstrecke bezeichnen. Der finale Datensatz enthält je Pumpversuch eine Absenkungsmessung s_{Mess} für jeden Beobachtungspunkt. Da je Entnahmetiefe der Druckaufnehmer einer Messstelle ausfiel, besteht der ausgewertete Datensatz aus $n_{Mess} = 3 \cdot 57 = 171$ Messungen der Absenkung.

Numerisches Grundwassermodell

Wir betrachten zwei radialsymmetrische Grundwasserströmungsmodelle, die in Konzeption und Aufbau den Anregungen von Maier et al. (2022a) folgen. Das erste Modell nimmt eine einzelne homogene Schicht an und wird als 1-Schicht-Modell bezeichnet. Das zweite Modell beschreibt einen geschichteten Grundwasserleiter mit drei horizontalen Schichten und wird als 3-Schicht-Modell bezeichnet. Wir weisen jeder Schicht eine radiale Durchlässigkeit K_r und eine vertikale Durchlässigkeit K_z zu (lokale Anisotropie). Aufgrund der kurzen Versuchsdauer und der geringen Absenkung im Vergleich zur Mächtigkeit des Grundwasserleiters (beobachtet: maximal 3 % der ursprünglichen wassererfüllten Mächtigkeit) wird in beiden Modellen die

Absenkung wie in einem gespannten Grundwasserleiter berechnet, sodass die wassererfüllte Mächtigkeit des Grundwasserleiters als unabhängig vom Grundwasserstand angenommen wird.

Abb. 3 zeigt den schematischen Aufbau des 1-Schicht- und des 3-Schicht-Modells, wobei die schwarzen gestrichelten Linien die Schichtgrenzen des 3-Schicht-Modells markieren. In beiden Modellen werden die Filterkiesschüttungen auf Tiefen von $\pm 0,5$ m der Filterstrecken des Brunnenrohrs (rote Abschnitte in Abb. 3, Durchlässigkeit $K_{FK} = 10^{-2}$ m/s) und die Bohrlochabdichtungen aus Quellton zwischen den Filterkiesschüttungen (graue Abschnitte in Abb. 3, Durchlässigkeit $K_{Ton} = 10^{-7}$ m/s) als isotrope Einheiten berücksichtigt.

Wir simulieren die drei Pumpversuche I, II und III und lösen die radialsymmetrische stationäre Strömungsgleichung mit einem Finite-Elemente-Modell in Matlab (Maier et al. 2022a, b).

Im nächsten Schritt kalibrieren wir das 1-Schicht-Modell und das 3-Schicht-Modell mit den Messdaten der drei Pumpversuche. Zunächst führen wir eine Inversion nach dem tomographischen Ansatz durch, d. h. wir berücksichtigen alle drei Pumpversuche bei Verwendung der $n_{Mess} = 171$ Messungen der Absenkung. Anschließend entkoppeln wir die drei Pumpversuche und führen für jeden Pumpversuch eine separate Inversion mit jeweils $n_{Mess} = 57$ Messungen durch.

Bei jeder Modellkalibrierung betrachten wir die simulierte stationäre Absenkung s_t an den Beobachtungspunkten. Um Absenkungen s_{sim} im quasi-stationären Strömungsregime zu erhalten, müssen Absenkungsdifferenzen zwischen Beobachtungspunkten ermittelt werden, wofür ein Referenzpunkt festzulegen ist. Um jedoch die Fehlerfortpflanzung von Messungenauigkeiten zu vermeiden, ermitteln wir die Differenzen $s_{sim} = |s_t - s_{ref}|$ zwischen den stationären Absenkungen s_t und der Absenkung s_{ref} an einem virtuellen Referenzpunkt (Maier et al. 2022a).

Anschließend betrachten wir die Differenzen zwischen den simulierten Absenkungen s_{sim} in Abhängigkeit der Modellparameter \mathbf{p} und den gemessenen Absenkungen s_{Mess} . Dabei umfasst der Parametervektor \mathbf{p} die Logarithmen der Durchlässigkeiten K_r und K_z aller berücksichtigten Schichten sowie die Absenkung s_{ref} am virtuellen Referenzpunkt. Als Zielwertfunktion φ minimieren wir die Summe der quadrierten normierten Residuen:

$$\varphi = \sum_{i=1}^{n_{Mess}} \left(\frac{s_{sim,i}(\mathbf{p}) - s_{Mess,i}}{\sigma_i} \right)^2 \quad (6)$$

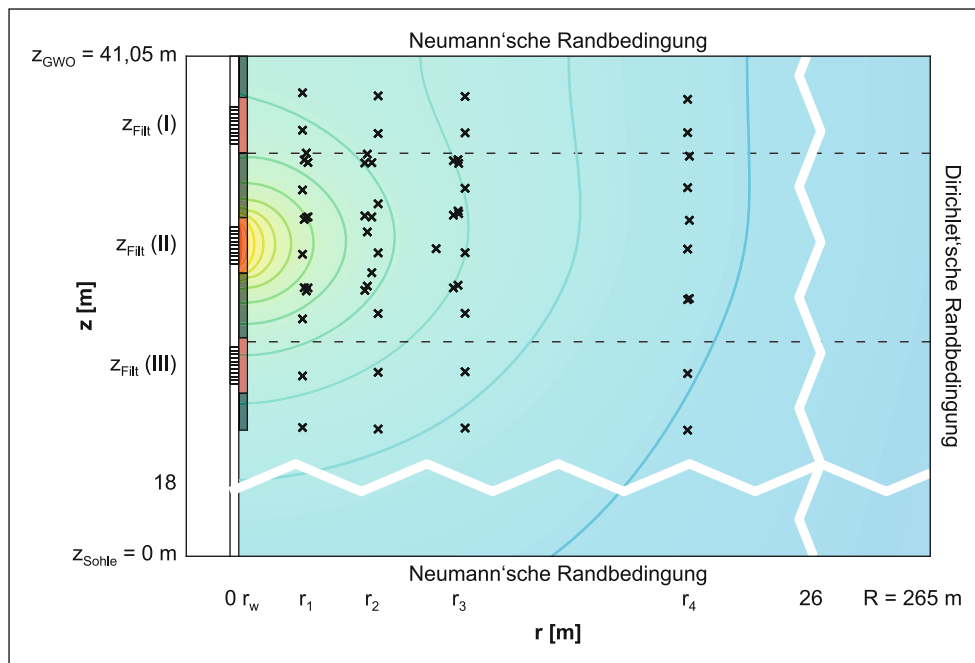


Abb. 3 Schematische Darstellung des homogen-anisotropen 1-Schicht-Modells und des geschichteten, anisotropen 3-Schicht-Modells. *Schwarz gestrichelte Linien:* Grenzen der Schichten; *graue und rote Rechtecke* rechts neben dem Brunnenrohr des Förderbrunnens: Bohrlochabdichtung aus Ton und Filterkiesschüttung des Förderbrunnens; *schwarze Kreuze:* Beobachtungspunkte in radialen Abständen von $r_1 \approx 3,5$ m, $r_2 \approx 6,5$ m, $r_3 \approx 10,5$ m und $r_4 \approx 21$ m zum Förderbrunnen

Fig. 3 Schematic representation of the homogeneous, anisotropic 1-layer model and the layered, anisotropic 3-layer model. *Black dashed lines:* layer boundaries; *gray and red rectangles* to the right of the well pipe of the production well: clay borehole sealing and gravel pack; *black crosses:* observation points at radial distances of $r_1 \approx 3.5$ m, $r_2 \approx 6.5$ m, $r_3 \approx 10.5$ m and $r_4 \approx 21$ m to the production well

wobei σ_i den Fehler der Messung i beschreibt. Hierbei verwenden wir das folgende Fehlermodell:

$$\sigma = a + \frac{b \cdot s_{\text{Mess}}^2}{c + s_{\text{Mess}}} \quad (7)$$

mit den Koeffizienten a , b und c , wobei a den absoluten Fehler bei kleinen Messwerten und b den relativen Fehler bei großen Messwerten beschreibt, und c einen kontinuierlichen Übergang von einem messwertunabhängigen zu einem messwertproportionalen Fehler garantiert (Maier et al. 2022a). Als Fehlerquellen kommen die Messungenauigkeiten bzw. Messfehler der Sensoren, Ungenauigkeiten bei der Bestimmung von Messpunktabständen (Maier et al. 2020) aber auch konzeptionelle Fehler der angepassten Modelle (z. B. Wahl und Lage der horizontalen Schichten, Vernachlässigung horizontaler Heterogenität) in Frage (Maier et al. 2022a). Da der Modellfehler nicht a-priori abgeschätzt werden kann, müssen die Koeffizienten des Fehlermodells mit den geohydraulischen Parametern in der Modellanpassung mitgeschätzt werden.

Wir kalibrieren das 1-Schicht-Modell und das 3-Schicht-Modell unter Verwendung der Erwartungs-Maximierungsmethode (Dempster et al. 1977). Dafür kalibrieren wir jeweils das 1-Schicht- und 3-Schicht-Modell und aktualisie-

ren iterativ das Fehlermodell entsprechend der Residuen der simulierten und gemessenen Absenkungen (Maier et al. 2022a). Als Kriterium für die Akzeptanz der Modellkalibrierungen betrachten wir Änderungen in den Modell- und Fehlerparametern, die kleiner als 1% sind. Mit dieser Optimierungsstrategie ermitteln wir zusätzlich zu den Modellparametern auch die Fehlerparameter, anhand derer wir anschließend eine Aussage über die Güte der Modelle treffen können.

Anschließend berechnen wir die Schätzstandardabweichung $\hat{\sigma}_{p_i}$ der Modellparameter i durch linearisierte Fehlerfortpflanzung:

$$\hat{\sigma}_{p_i} = \sqrt{C_p(i, i)} \quad (8)$$

mit der Parameter Kovarianzmatrix C_p :

$$C_p = (J^T \Sigma^{-1} J)^{-1} \quad (9)$$

In Gl. 8 beschreibt J die Jacobi-Matrix, die die partiellen Ableitungen der simulierten Absenkungen nach den Modellparametern enthält. Σ beschreibt die Diagonalmatrix der quadrierten Fehler.

Im letzten Schritt bestimmen wir die effektive radiale Durchlässigkeit K_r^{eff} und die effektive vertikale Durchlässig-

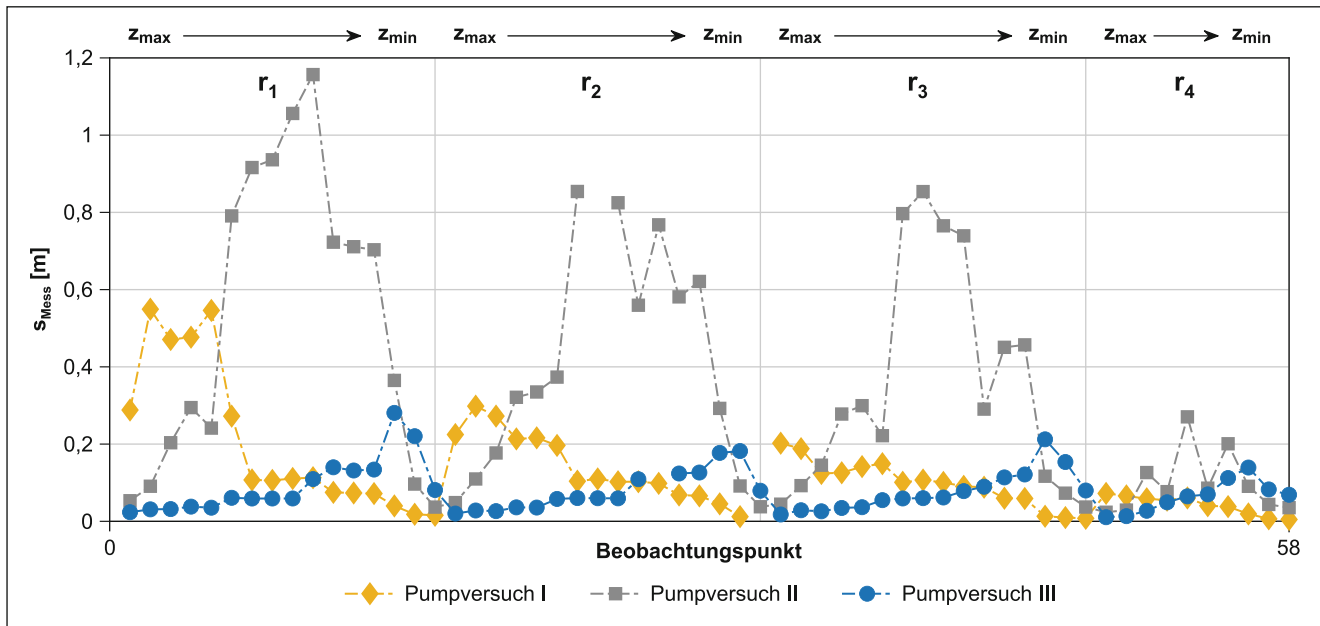


Abb. 4 Absenkungen s_{Mess} , die während der Pumpversuche I, II und III bei Grundwasserentnahme im *Steady-shape*-Strömungsregime über die obere, mittlere und untere Filterstrecke gemessen wurden
Fig. 4 Drawdown s_{Mess} recorded during the pumping tests I, II and III with groundwater extraction under steady-shape conditions from the upper, middle and lower well screen section

sigkeit K_z^{eff} bezogen auf die Gesamtmächtigkeit des Grundwasserleiters. Dafür verwenden wir das arithmetische und harmonische Mittel der radialen bzw. vertikalen Durchlässigkeiten einzelner Schichten:

$$K_r^{eff} = \frac{1}{z_{Sohle} - z_{GWO}} \int_{z_{Sohle}}^{z_{GWO}} K_r(\zeta) d\zeta \tag{10}$$

$$K_z^{eff} = (z_{Sohle} - z_{GWO}) \left(\int_{z_{Sohle}}^{z_{GWO}} \frac{1}{K_z(\zeta)} d\zeta \right)^{-1} \tag{11}$$

Das Verhältnis von K_r^{eff} zu K_z^{eff} ergibt das Anisotropieverhältnis ϑ :

$$\vartheta = \frac{K_r^{eff}}{K_z^{eff}} \tag{12}$$

Ergebnisse der gemessenen Absenkungen

Abb. 4 zeigt die Absenkungen s_{Mess} , die während der Pumpversuche in den Beobachtungsmessstellen im *Steady-shape*-Strömungsregime gemessen wurden. Wir sortieren die Beobachtungsmessstellen nach ansteigender radialer Entfernung zum Förderbrunnen und markieren die Abschnitte der Messdaten zugehörig zu den Messabständen r_1, r_2, r_3 , und r_4 in Abb. 4. Die Pumpversuche I, II und III entsprechen jeweils der Grundwasserentnahme über die obere, mittlere und untere Filterstrecke (verschiedene Farben und Symbole in Abb. 4) mit einer auf 10l/s harmonisierten Entnahmerate.

Für alle drei Pumpversuche nehmen die Absenkungen erwartungsgemäß mit zunehmender radialer Distanz zum Förderbrunnen ab (Vergleich der Abschnitte in Abb. 4).

Beim Vergleich der Messwerte zwischen den drei Pumpversuchen wird ersichtlich, dass die Absenkungen bei Grundwasserentnahme über die mittlere Filterstrecke (Pumpversuch II) deutlich höher sind als die Absenkungen bei Grundwasserentnahme über die obere oder untere Filterstrecke (Pumpversuch I oder Pumpversuch III). Da die betrachteten Entnahmeraten gleich waren, lassen sich diese Unterschiede nur mit vertikalen Unterschieden der hydraulischen Durchlässigkeit erklären, wobei die Durchlässigkeit im Nahbereich der mittleren Filterstrecke kleiner sein muss als die Durchlässigkeiten in den Nahbereichen der oberen oder unteren Filterstrecken (Maier et al. 2022a).

Vergleich verschiedener Inversionsansätze

Anpassung der gemessenen Absenkungen

Abb. 5 zeigt die gemessenen Absenkungen s_{Mess} gegenüber den simulierten Absenkungen s_{sim} resultierend aus der Kalibrierung des 1-Schicht-Modells (Abb. 5a-e) und des 3-Schicht-Modells (Abb. 5f-j) bei Verwendung verschiedener Inversionsansätze. Wir vergleichen das Ergebnis der Inversion aller drei Pumpversuche nach dem tomographischen Ansatz (Maier et al. 2022a, Abb. 5a,f) mit den Ergebnissen der separaten Inversion der einzelnen Pumpversuche

mit unterschiedlichen Entnahmetiefen (Abb. 5b–d,g–i). Die Resultate entsprechen den Ergebnissen der Modellkalibrationen unter Berücksichtigung des jeweils mitkalibrierten Fehlermodells.

Für das 1-Schicht-Modell zeigt die Inversion nach dem tomographischen Ansatz (Abb. 5a) eine gute Anpassung der Absenkungen, die bei der Grundwasserentnahme über die obere oder über die untere Filterstrecke gemessen wurden, unterschätzt jedoch deutlich die bei der Grundwasserentnahme über die mittlere Filterstrecke gemessenen Absenkungen. Wie im Abschnitt *Feldmessungen* dargestellt, waren die Absenkungen in Pumpversuch II höher in den Pumpversuchen I und III. Das 1-Schicht-Modell kann diese Unterschiede nicht abbilden (Maier et al. 2022a). Im Gegensatz zur Inversion nach dem tomographischen Ansatz spielen solche Unterschiede bei der separaten Inversion der Pumpversuche keine Rolle. Das 1-Schicht-Modell kann mit Ausnahme einzelner Ausreißer die Absenkungen aller Pumpversuche wiedergeben, wenn sie unabhängig voneinander untersucht werden (Abb. 5b–d).

Tab. 2 Horizontale und vertikale hydraulische Durchlässigkeit, deren Schätzstandardabweichungen, die Absenkung s_{ref} an einem virtuellen Referenzpunkt sowie der resultierende Anisotropiefaktor, wie sie sich aus der Kalibrierung des 1-Schicht-Modells ergeben
Table 2 Horizontal and vertical hydraulic conductivities, their standard deviations, the drawdown s_{ref} at a virtual reference point and the resulting anisotropy factor resulting from the calibration of the 1-layer model

	K_r [m/s]	$\hat{\sigma}_{\ln K_r}$ [m/s]	K_z [m/s]	$\hat{\sigma}_{\ln K_z}$ [m/s]	S_{ref} [m]	θ [–]
Tomographischer Ansatz	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,055	$1,8 \cdot 10^{-4}$	0,135	$7,06 \cdot 10^{-2}$ $6,64 \cdot 10^{-2}$ $6,21 \cdot 10^{-2}$	6,3
Pumpversuch I – obere Filterstrecke	$9,9 \cdot 10^{-4}$	0,053	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,118	$8,24 \cdot 10^{-2}$	4,0
Pumpversuch II – mittlere Filterstrecke	$4,2 \cdot 10^{-4}$	0,076	$4,0 \cdot 10^{-5}$	0,154	$2,30 \cdot 10^{-1}$	10,5
Pumpversuch III – untere Filterstrecke	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,085	$3,0 \cdot 10^{-4}$	0,221	$7,47 \cdot 10^{-2}$	3,6
Reduzierter Datensatz	$1,0 \cdot 10^{-3}$	0,103	$2,1 \cdot 10^{-4}$	0,208	$7,91 \cdot 10^{-2}$ $6,88 \cdot 10^{-2}$ $1,30 \cdot 10^{-1}$	5,0

Tab. 3 Horizontale und vertikale hydraulische Durchlässigkeit, deren Schätzstandardabweichungen, die Absenkung s_{ref} an einem virtuellen Referenzpunkt sowie der resultierende Anisotropiefaktor, wie sie sich aus der Kalibrierung des 3-Schicht-Modells ergeben
Table 3 Horizontal and vertical hydraulic conductivities, their standard deviations, the drawdown s_{ref} at a virtual reference point and the resulting anisotropy factor resulting from the calibration of the 3-layer model

	Layer	K_r [m/s]	$\hat{\sigma}_{\ln K_r}$ [m/s]	K_z [m/s]	$\hat{\sigma}_{\ln K_z}$ [m/s]	S_{ref} [m]	θ [–]
Tomographischer Ansatz	1	$2,7 \cdot 10^{-3}$	0,087	$5,9 \cdot 10^{-5}$	0,261	$3,16 \cdot 10^{-2}$	17,7
	2	$2,7 \cdot 10^{-4}$	0,119	$6,3 \cdot 10^{-5}$	0,116	$2,75 \cdot 10^{-2}$	
	3	$2,6 \cdot 10^{-3}$	0,116	$2,4 \cdot 10^{-4}$	0,338	$2,19 \cdot 10^{-2}$	
Pumpversuch I – obere Filterstrecke	1	$2,1 \cdot 10^{-3}$	0,335	$4,4 \cdot 10^{-5}$	1,331	$1,00 \cdot 10^{-8}$	138
	2	$6,4 \cdot 10^{-4}$	0,416	$2,3 \cdot 10^{-5}$	0,325		
	3	$2,1 \cdot 10^{-3}$	1,882	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,9		
Pumpversuch II – mittlere Filterstrecke	1	$3,2 \cdot 10^{-3}$	0,578	$6,3 \cdot 10^{-5}$	0,668	$6,14 \cdot 10^{-2}$	12,9
	2	$3,3 \cdot 10^{-4}$	0,129	$6,2 \cdot 10^{-5}$	0,194		
	3	$1,2 \cdot 10^{-3}$	0,573	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,703		
Pumpversuch III – untere Filterstrecke	1	$6,4 \cdot 10^{-4}$	68,79	$2,9 \cdot 10^{-3}$	118,7	$5,84 \cdot 10^{-7}$	936
	2	$4,8 \cdot 10^{-6}$	33,72	$6,3 \cdot 10^{-7}$	34,14		
	3	$3,6 \cdot 10^{-3}$	0,208	$7,4 \cdot 10^{-5}$	0,424		
Reduzierter Datensatz	1	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,105	$3,5 \cdot 10^{-5}$	0,483	$4,18 \cdot 10^{-2}$	23,9
	2	$2,1 \cdot 10^{-4}$	0,162	$8,8 \cdot 10^{-5}$	0,168	$1,04 \cdot 10^{-1}$	
	3	$3,4 \cdot 10^{-3}$	0,183	$1,8 \cdot 10^{-4}$	0,496	$1,18 \cdot 10^{-2}$	

Für das 3-Schicht-Modell zeigen sowohl die Inversion nach dem tomographischen Ansatz (Abb. 5f) als auch die unabhängigen Modellanpassungen der drei Pumpversuche (Abb. 5g–i) eine gute Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Absenkungen.

Parameterschätzung

Wir betrachten im nächsten Schritt die radialen und vertikalen Durchlässigkeiten K_r und K_z , die für das 1-Schicht-Modell (Abb. 6a,b) und für jede Schicht des 3-Schicht-Modells (Abb. 6e,f) unter Verwendung der verschiedenen Inversionsansätze ermittelt wurden. Im Fall des 1-Schicht-Modells entsprechen K_r und K_z den effektiven radialen und vertikalen Durchlässigkeiten K_r^{eff} und K_z^{eff} . Die Parameter K_r und K_z , deren Schätzstandardabweichungen sowie s_{ref} , die sich aus der Kalibrierung der 1-Schicht- und 3-Schicht-Modelle ergeben, sind in Tab. 2 und 3 aufgeführt.

Beim 1-Schicht-Modell ähneln sich die Ergebnisse von K_r^{eff} und K_z^{eff} bei den separaten Modellanpassungen von

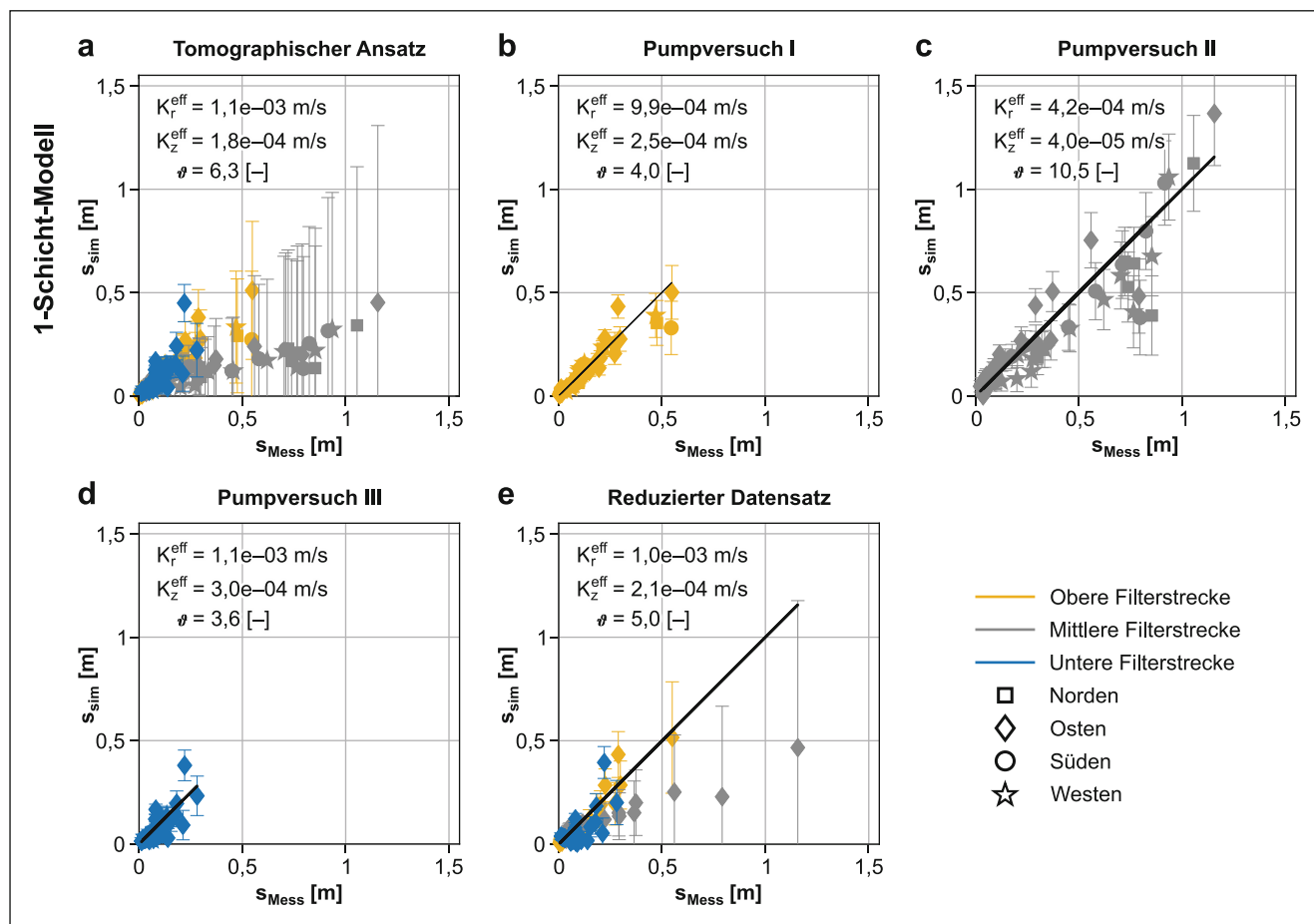


Abb. 5 Darstellung der simulierten (s_{sim}) versus den gemessenen (s_{Mess}) Absenkungen resultierend aus der Kalibrierung des 1-Schicht-Modells (a–e) und des 3-Schicht-Modells (f–j) unter Verwendung verschiedener Inversionsansätze: a,f Inversion unter Berücksichtigung der drei Pumpversuche nach dem tomographischen Ansatz und unter Verwendung aller vorhandener Absenkungsmessungen. b,g Inversion unter Berücksichtigung von Pumpversuch I. c,h Inversion unter Berücksichtigung von Pumpversuch II. d,i Inversion unter Berücksichtigung von Pumpversuch III. e,j Inversion unter Berücksichtigung der drei Pumpversuche nach dem tomographischen Ansatz bei ausschließlicher Berücksichtigung der Absenkungsmessungen aus östlicher Richtung. Pumpversuch I, II und III entsprechen jeweils der Grundwasserentnahme aus der oberen, mittleren und unteren Filterstrecke. In allen Teilabbildungen sind die resultierenden effektiven Durchlässigkeiten K_r^{eff} und K_z^{eff} und das Anisotropieverhältnis ϑ mitangegeben

Fig. 5 Simulated (s_{sim}) versus measured (s_{Mess}) drawdown resulting from the calibration of the 1-layer model (a–e) and the 3-layer model (f–j) using different inversion approaches: a,f inversion of the three pumping tests in a tomographic approach using all existing drawdown measurements. b,g Inversion considering pumping test I. c,h Inversion considering pumping test II. d,i Inversion considering pumping test III. e,j inversion of the three pumping tests in a tomographic approach without the drawdown measurements in east direction. Pumping tests I, II and III correspond to groundwater extraction from the upper, middle and lower well screen sections. The resulting effective permeability K_r^{eff} and K_z^{eff} and the anisotropy ratio ϑ are also given in all sub-figures

Pumpversuch I und III und dem tomographischen Ansatz (Abb. 6a,b). Im Unterschied dazu ergibt die Modellanpassung unter der ausschließlichen Verwendung der Absenkungsdaten aus Pumpversuch II deutlich geringere Durchlässigkeitsbeiwerte. Dies bestätigt die vertikale Variabilität der hydraulischen Durchlässigkeit (vgl. Abschnitt *Feldmessungen*) und deutet darauf hin, dass der obere und untere Bereich des Grundwasserleiters eine höhere hydraulische Durchlässigkeit als der mittlere Bereich aufweisen. Bei der Inversion nach dem tomographischen Ansatz werden die hohen gemessenen Werte der Absenkung in Pumpversuch II als besonders fehlerhaft interpretiert (d.h. der geschätzte

relative Fehler ist besonders groß), sodass diese Werte bei der Anpassung der geohydraulischen Parameter kaum ins Gewicht fallen. Entsprechend ähneln die ermittelten Parameter der tomographischen Inversion denjenigen, wenn nur die Daten aus Pumpversuch I oder III ausgewertet werden.

Abb. 6c und d zeigen die Schätzstandardabweichungen der log-Durchlässigkeiten K_r und K_z . Alle Standardabweichungen liegen im Bereich der Größenordnung 0,1 m und lassen keinen auffälligen Trend zwischen den verschiedenen Inversionsansätzen erkennen.

Mit dem 3-Schicht-Modell werden – unabhängig von der Wahl des Inversionsansatzes – die radialen Durchlässigkei-

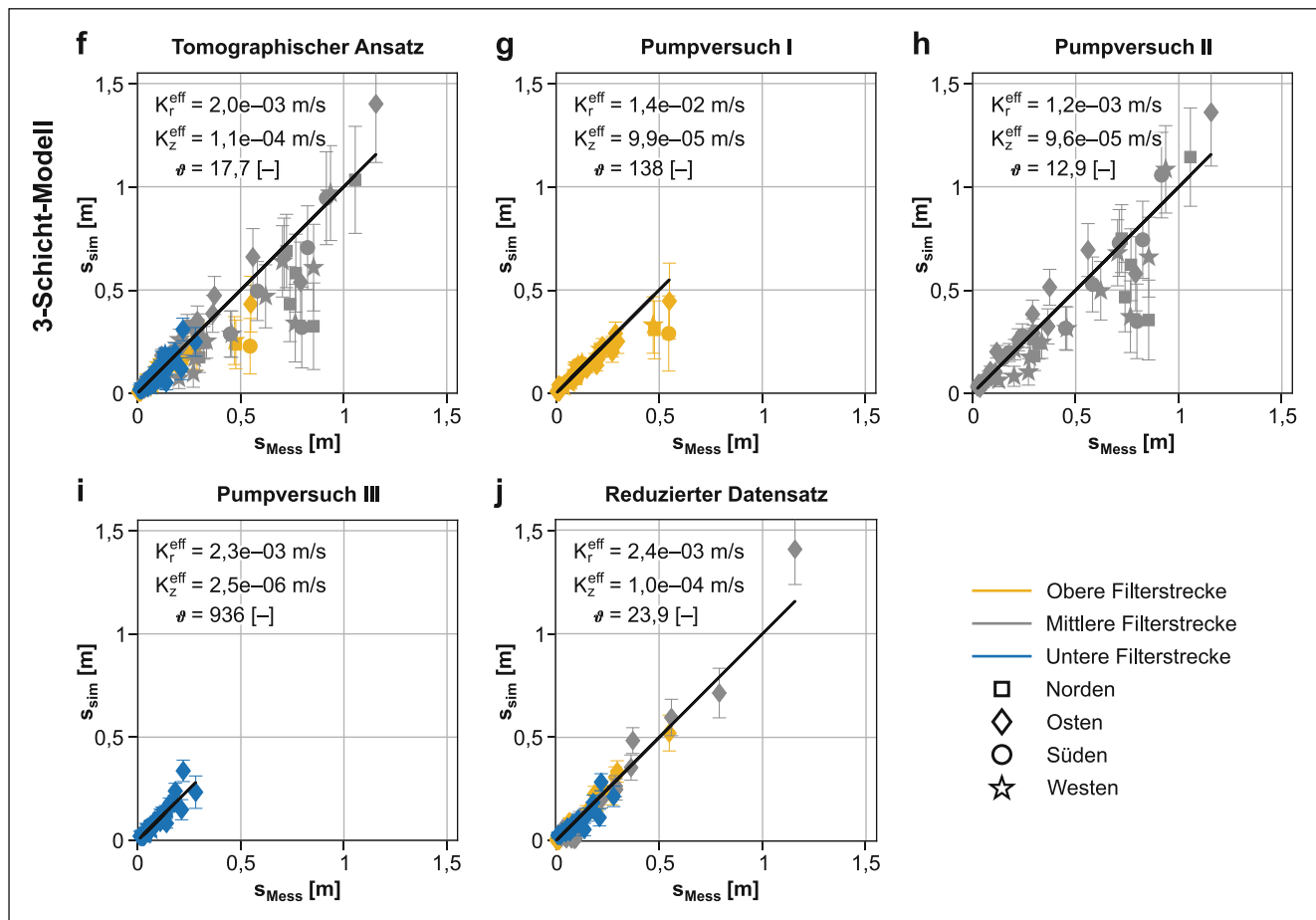


Abb. 5 (Fortsetzung)

Fig. 5 (continued)

ten K_r , der oberen und unteren Schichten höher geschätzt als die der mittleren Schicht (Abb. 6e, Tab. 3). Die vertikalen Durchlässigkeiten K_z hingegen zeigen für fast alle Inversionsansätze (Ausnahme: Inversion von Pumpversuch III) einen Trend zu steigenden Durchlässigkeitsbeiwerten mit zunehmender Tiefe (Abb. 6f, Tab. 3). Obwohl die verschiedenen Inversionsansätze ähnliche Tendenzen für die Verteilung von K_r und K_z zeigen, variieren die ermittelten Parameter von K_r und K_z deutlich. Folglich divergieren ebenso die Ergebnisse der effektiven radialen und effektiven vertikalen Durchlässigkeiten K_r^{eff} und K_z^{eff} zwischen den verschiedenen Inversionsansätzen (Abb. 5f–i). Die Ergebnisse reichen von $K_r^{\text{eff}} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ (Pumpversuch II) bis $K_r^{\text{eff}} = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ (Pumpversuch I) sowie von $K_z^{\text{eff}} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ (Pumpversuch III) bis $K_z^{\text{eff}} = 9,9 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ (Pumpversuch I). Dadurch ergeben sich Anisotropie-Verhältnisse, die sich um bis zu zwei Größenordnungen unterscheiden.

Um die stark variierenden Parameter genauer zu untersuchen, betrachten wir die Schätzstandardabweichungen der log-Durchlässigkeiten $\log K_r$ und $\log K_z$ (Abb. 6g,h, Tab. 3).

Im Allgemeinen zeigen die Ergebnisse der separaten Inversionen von Pumpversuch I, II und III deutlich höhere Unsicherheiten als die Ergebnisse der Inversion nach dem tomographischen Ansatz (Abb. 6g,h). Zudem lässt sich für die Ergebnisse der separaten Inversionen der Pumpversuche folgender Zusammenhang erkennen: Die Standardabweichungen der log-Durchlässigkeiten von K_r und K_z vergrößern sich mit zunehmendem Abstand zur Schicht, in der die Filterstrecke der Grundwasserentnahme liegt (Abb. 6g,h). Folglich sind die geschätzten Parameter für Schichten jenseits der beanspruchten Schicht mit größerer Unsicherheit behaftet.

Parameter des Fehlermodells

Tab. 4 zeigt die geschätzten Parameter der Fehlermodelle für die unterschiedlichen Modellkalibrierungen. Diese Koeffizienten beschreiben, welche Abweichungen zwischen Simulationsergebnissen und Messungen akzeptiert werden müssen, wenn das Modell nicht verworfen werden soll.

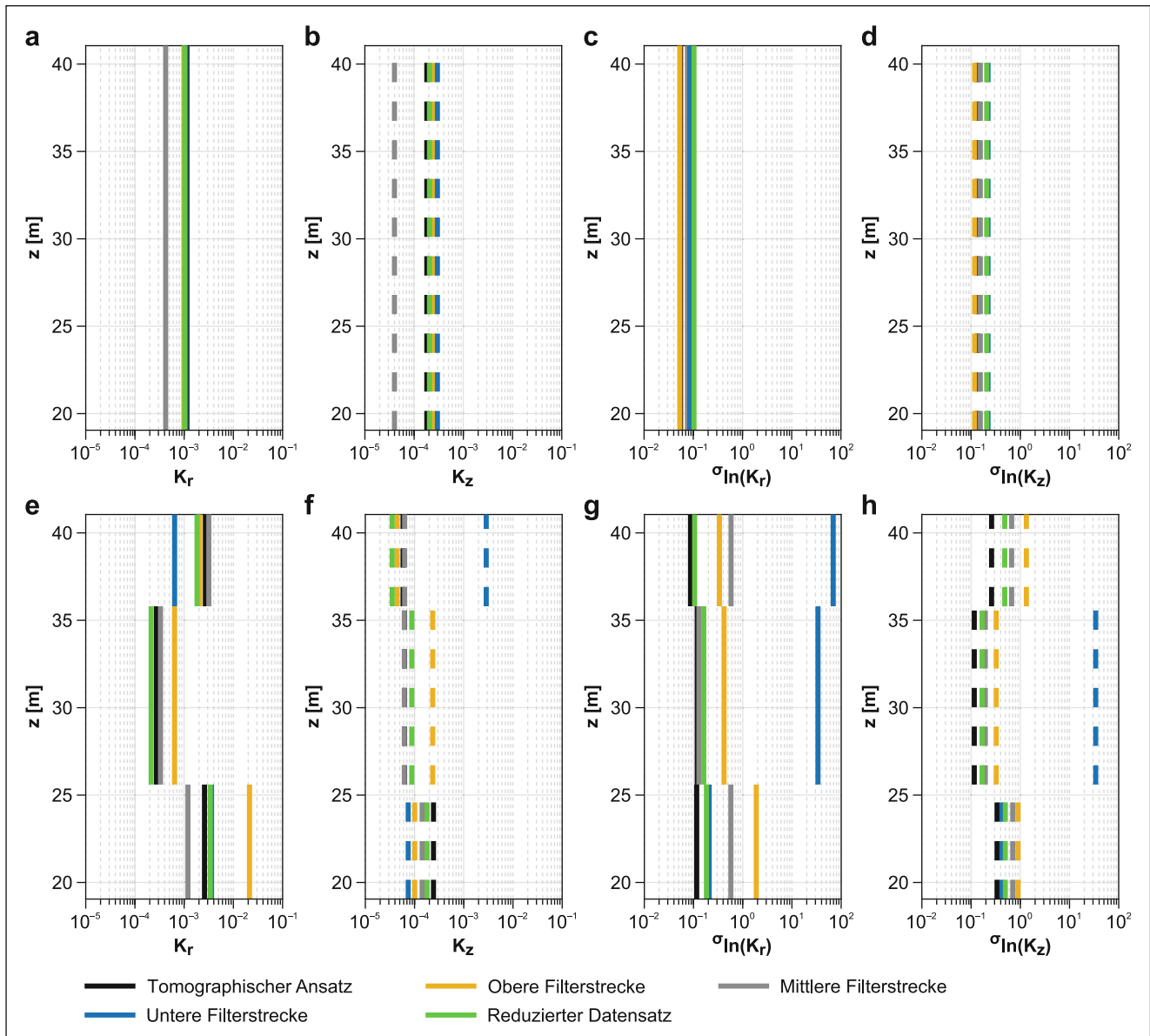


Abb. 6 Ermittelte radiale und vertikale Durchlässigkeiten K_r und K_z des 1-Schicht-Modells (a,b) und des 3-Schicht-Modells (e,f) für jede betrachtete Schicht. Entsprechende Schätzstandardabweichungen der log-Durchlässigkeiten des 1-Schicht-Modells (c,d) und des 3-Schicht-Modells (g,h) **Fig. 6** Radial and vertical conductivities K_r and K_z of the 1-layer-model (a,b) and the 3-layer-model (e,f) for each layer. Associated standard deviations of the log conductivities resulting from the 1-layer-model (c,d) and the 3-layer-model (g,h)

Beim 1-Schicht-Modell zeigen die absoluten Fehler keine wesentlichen Auffälligkeiten zwischen den unterschiedlichen Inversionsansätzen (Tab. 4). Werden die Pumpversuche I, II und III in einer separaten Inversion betrachtet, so ergeben sich ähnliche relative Fehler b zwischen 20% und 35% (Tab. 4). Im Gegensatz dazu ist der relative Fehler resultierend aus dem tomographischen Ansatz mit 93% deutlich höher.

Für das 3-Schicht-Modell ergeben sich bei der separaten Inversion der Pumpversuche I, II und III sehr ähnliche absolute Fehler, die alle im mm-Bereich liegen (Tab. 4).

Für den tomographischen Ansatz hingegen ergibt sich ein geringerer absoluter Fehler.

Während der relative Fehler der separaten Inversion von Pumpversuch II dem relativen Fehler der Inversion nach dem tomographischen Ansatz ähnelt, weist die Inversion von Pumpversuch III einen vierfach so großen relativen Fehler auf, jedoch auch bei einem Wert des Koeffizienten c im Bereich der gemessenen Werte. Dies ist bei der Inversion von Pumpversuch I noch auffälliger: Koeffizient b ist mit 145 enorm groß; der geschätzte Koeffizient c mit 245 m liegt allerdings auch in einem physikalisch unsinnigen Bereich. Bei großen Werten von b und c vereinfacht

Tab. 4 Ergebnisse der angepassten Fehlerparameter

Table 4 Estimated parameters of the error model

Inversionsansatz	a [m]	b [-]	c [m]
<i>1-Schicht-Modell</i>			
Tomographischer Ansatz	$2,7 \cdot 10^{-3}$	0,93	0,295
Pumpversuch I – obere Filterstrecke	$6,7 \cdot 10^{-3}$	0,33	0,267
Pumpversuch II – mittlere Filterstrecke	$2,3 \cdot 10^{-2}$	0,20	$3,5 \cdot 10^{-11}$
Pumpversuch III – untere Filterstrecke	$2,2 \cdot 10^{-14}$	0,35	0,012
Reduzierter Datensatz	$1,6 \cdot 10^{-2}$	0,83	0,434
<i>3-Schicht-Modell</i>			
Tomographischer Ansatz	$7,8 \cdot 10^{-4}$	0,24	$3,2 \cdot 10^{-11}$
Pumpversuch I – obere Filterstrecke	$5,4 \cdot 10^{-3}$	145	245
Pumpversuch II – mittlere Filterstrecke	$4,1 \cdot 10^{-3}$	0,22	$3,26 \cdot 10^{-7}$
Pumpversuch III – untere Filterstrecke	$1,9 \cdot 10^{-3}$	1,03	0,781
Reduzierter Datensatz	$1,1 \cdot 10^{-2}$	0,14	$9,21 \cdot 10^{-7}$

sich das Fehlermodell zu einem quadratischen Fehlermodell, $\sigma = a + \frac{b}{c} s_{\text{Mess}}^2$. Das Verhältnis b/c von $0,59 \text{ m}^{-1}$ für Pumpversuch I und $1,32 \text{ m}^{-1}$ für Pumpversuch III stellt dabei den Koeffizienten der quadratischen Fehlerkomponente dar. Wie der Vergleich zwischen den simulierten und gemessenen Absenkungen in Abb. 5 zeigt, bestehen bei dem Fit des 3-Schicht-Modells keine wirklichen Besonderheiten, es bestehen aber sowohl bei Pumpversuch I als auch bei Pumpversuch III überproportionale Abweichungen bei den starken Absenkungen, die zu einer Dominanz des quadratischen Fehlerterms führen.

Erkenntnisse aus den Modellvergleichen

Im Allgemeinen zeigt das 1-Schicht-Modell bei Betrachtung einer einzelnen Filterstrecke nicht nur eine bessere Anpassung zwischen den jeweils simulierten und gemessenen Absenkungen, sondern auch einen geringeren relativen Fehler im Vergleich zu der gleichzeitigen Betrachtung mehrerer Filterstrecken. Die geschätzten Durchlässigkeitsbeiwerte unterscheiden sich jedoch zum Teil stark voneinander. Hätten wir den teilverfilterten Entnahmehrungen nur mit einer einzigen Filterstrecke ausgestattet, hätten wir die damit gewonnenen Absenkungen fälschlicherweise so interpretiert, dass der Grundwasserleiter zwar anisotrop aber vertikal homogen ist. Dies ist eine Scheinsicherheit, denn eine anders gewählte Filterstrecke hätte andere Ergebnisse geliefert.

Im Allgemeinen ist das 3-Schicht-Modell flexibel genug, um die Messdaten aus allen drei Pumpversuchen bei gemeinsamer Modellkalibrierung wiederzugeben. Werden nur die Daten eines einzelnen Pumpversuches betrachtet, hängen die geschätzten Parameter von der Wahl der verwendeten Filterstrecke ab. Die zugehörigen Parameterunsicherheiten deuten darauf hin, dass bei der Verwendung einer einzelnen Filterstrecke lediglich die Durchlässigkeit der Schicht mit akzeptabler Unsicherheit bestimmt werden kann, in der auch die Filterstrecke der Grundwasserentnah-

me liegt. Insofern kann ein Mehrschichtmodell nur dann gut kalibriert werden, wenn die Grundwasserentnahme in unterschiedlichen Tiefen vorgenommen wird und die Daten der unterschiedlichen Pumpversuche gemeinsam ausgewertet werden.

Methodenoptimierung

Der experimentelle Aufwand hängt nicht nur von der Anzahl der Filterstrecken im Förderbrunnen ab, sondern auch von der Anzahl der Beobachtungsmessstellen. Wir betrachten im Folgenden daher einen reduzierten Datensatz, in dem die Feldmessungen aus nur einem der vier Beobachtungstransecte berücksichtigt werden. Hierfür verwenden wir alle Messstellen östlich des Förderbrunnens, da diese die größte Anzahl tiefenorientierter Beobachtungspunkte aufweisen.

Abb. 5f und j zeigen, dass die Anpassungen zwischen simulierten und gemessenen Absenkungen mit dem 1-Schicht- und 3-Schicht-Modell ähnlich gut sind wie unter Berücksichtigung des gesamten Datensatzes. Das 3-Schicht-Modell erzielt bei Betrachtung des reduzierten Datensatzes sogar eine überaus gute Modellanpassung. Dies lässt sich mit potenziellen lokalen Heterogenitäten oder einer horizontalen Anisotropie erklären, die bei der Betrachtung von Feldmessungen aus nur einer Richtung weitgehend ausgeblendet werden.

Die geschätzten Parameter der radialen und vertikalen Durchlässigkeiten K_r und K_z für den reduzierten Datensatz stimmen sowohl für das 1-Schicht-Modell (Abb. 6a,b) als auch für das 3-Schicht-Modell (Abb. 6e,f) gut mit den geschätzten Parametern überein, die sich aus der Inversion des kompletten Datensatzes ergeben. Folglich sind auch die daraus resultierenden effektiven radialen und vertikalen Durchlässigkeiten sowie die entsprechenden Anisotropieverhältnisse vergleichbar (zum Vergleich siehe Abb. 5a,e für das 1-Schicht-Modell und Abb. 5f,j für das 3-Schicht-Modell). Auch die Schätzstandardabweichungen der jewei-

ligen log-Durchlässigkeiten $\log K_r$ und $\log K_z$ sind für den reduzierten Datensatz und für den kompletten Datensatz sehr ähnlich (1-Schicht-Modell: Abb. 6c,d; 3-Schicht-Modell: Abb. 6g,h).

Als Letztes betrachten wir die Fehlerparameter, die sich bei der Modellkalibrierung mit dem reduzierten Datensatz ergeben (Tab. 4). Sowohl für das 1-Schicht-Modell als auch für das 3-Schicht-Modell ist der absolute Fehler mit $a = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ und $a = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ bei der Verwendung des reduzierten Datensatzes höher als bei der Verwendung des gesamten Datensatzes ($a = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ und $a = 7,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}$). Der relative Fehler verbessert sich sowohl für das 1-Schicht-Modells mit $b = 0,83$ für den reduzierten Datensatz gegenüber dem gesamten Datensatz ($b = 0,93$), als auch für das 3-Schicht-Modell mit $b = 0,14$ für den reduzierten Datensatz gegenüber dem gesamten Datensatz ($b = 0,24$).

Im Allgemeinen weisen die Ergebnisse des reduzierten Datensatzes keine erheblichen Unterschiede zu den Ergebnissen auf, in denen der gesamte Datensatz berücksichtigt wird. Dies deutet darauf hin, dass wir an dem Standort nur ein Transekt mit Grundwassermessstellen hätten anlegen müssen. Allerdings sind Messpunkte außerhalb eines solchen Transekts notwendig, um eine mögliche horizontale Heterogenität oder Anisotropie überhaupt feststellen zu können.

Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit haben wir eine Feldmethode für die Bestimmung der vertikalen Variabilität und Anisotropie der Durchlässigkeit in geschichteten Grundwasserleitern betrachtet. Den Ausgangspunkt bildete die numerische Inversion von Pumpversuchen in einem mehrfach teilverfilterten Brunnen nach einem tomographischen Ansatz (Maier et al. 2022a). Dabei wurde Grundwasser in verschiedenen Tiefen entnommen und die Absenkung an umliegenden, tiefenorientierten Beobachtungspunkten gemessen. Die Datengrundlage der Inversion basiert auf drei Pumpversuchsreihen in einem fluvialen Kiesgrundwasserleiter in der Oberrheinischen Tiefebene, in denen Grundwasser über jeweils eine von drei Filterstrecken eines Großbrunnens entnommen wurde. Wir verwendeten ein homogen-anisotropes Grundwassermodell und ein geschichtetes, anisotropes Grundwassermodell, bestehend aus drei horizontalen Schichten, um die gemessenen Absenkungen anzupassen. Wesentliche Zielgrößen der Modellkalibrierungen waren die radialen und vertikalen hydraulischen Durchlässigkeiten der jeweils berücksichtigten Schichten. Im Vergleich zu Maier et al. (2022a) haben wir in der vorliegenden Arbeit die drei Pumpversuche getrennt betrachtet, um zu untersuchen, ob eine mehrfache Teilverfilterung notwendig ist. Zum Abschluss untersuchten wir, ob vergleichbare Ergebnisse mit

nur einem Transekt tiefenorientierter Grundwassermessstellen hätten erzielt werden können.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Kombination von Pumpversuchen mit einer Grundwasserentnahme aus verschiedenen Tiefen erforderlich ist, um die vertikale Variabilität und Anisotropie eines heterogenen Grundwasserleiters abschätzen zu können. Im Falle eines homogen-anisotropen Grundwasserleiters wäre es ausreichend, das Grundwasser über eine einzelne unvollständige Filterstrecke zu entnehmen. In einem heterogenen Grundwasserleiter können bei einem solchen Ansatz hingegen nur die Durchlässigkeiten in der Tiefenschicht der Entnahme gut bestimmt werden, auch wenn die Beobachtungspunkte über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters verteilt sind. Unsere Ergebnisse weisen zudem darauf hin, dass bei der Betrachtung einer einzelnen Entnahmetiefe die Verwendung eines geschichteten Grundwassermodells hinfällig wird. Wenn hingegen Pumpversuche mit Entnahmen in mehreren Tiefen gemeinsam ausgewertet werden sollen, sollte die Anzahl der berücksichtigten Schichten der Anzahl der Entnahmetiefen entsprechen. Aus den horizontalen und vertikalen Durchlässigkeiten der einzelnen Schichten kann die über die gesamte Mächtigkeit gemittelte hydraulische Anisotropie abgeleitet werden.

Während sich im vorliegenden Fall bestätigte, dass mehrere Entnahmetiefen notwendig sind, hätte es ausgereicht, ein einzelnes Transekt tiefenorientierter Messstellen zu installieren. Um allgemein die horizontale Anisotropie ausschließen zu können, werden jedoch Messpunkte in unterschiedlichen Richtungen benötigt. Daher empfehlen wir, das Messnetzwerk in einer Richtung möglichst vielfältig auszubauen und in anderen Richtungen lediglich einzelne Kontrollpunkte zu errichten.

Um die vertikale hydraulische Struktur des Untergrundes besser aufzulösen und Schichtgrenzen eines Grundwassermodells zu optimieren, empfiehlt es sich, die hier betrachteten tiefenorientierten Pumpversuche mit lokalen Methoden zur Bestimmung der vertikalen Durchlässigkeitsunterschiede wie dem Direct-Push-Injection Logging (Dietrich et al. 2008; Lessoff et al. 2010) und Bohrlochflowmetermessungen in vollverfilterten Messstellen zu kombinieren.

Danksagung Wir bedanken uns beim Regierungspräsidium in Freiburg für die Unterstützung der Feldarbeiten und die Überlassung des Geländes. Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Karlsruhe hat den Versuchsbrunnen und dessen technische Ausrüstung geplant und realisiert sowie die Durchführung und Auswertung der Pumpversuche finanziert. Wir danken den Gutachtern für die wertvollen Hinweise, die zur Verbesserung des Manuskripts beigetragen haben.

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) stellt den Versuchsbrunnen für weitere wissenschaftliche Untersuchungen in Absprache gerne zur Verfügung.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Bair, E.S., Lahm, T.D.: Variations in capture-zone geometry of a partially penetrating pumping well in an unconfined aquifer. *Ground Water* **34**(5), 842–852 (1996)
- Bohling, G.C., Zhan, X.Y., Butler, J.J., Zheng, L.: Steady shape analysis of tomographic pumping tests for characterization of aquifer heterogeneities. *Water Resour. Res.* **38**(12), 1324 (2002)
- Bohling, G.C., Butler, J.J., Zhan, X.Y., Knoll, M.D.: A field assessment of the value of steady shape hydraulic tomography for characterization of aquifer heterogeneities. *Water Resour. Res.* **43**(5), W5430 (2007)
- Dempster, A.P., Laird, N.M., Rubin, D.B.: Maximum likelihood from incomplete data via *EM* algorithm. *J Roy Stat Soc B Met* **39**(1), 1–38 (1977)
- Dietrich, P., Butler, J.J., Faiss, K.: A rapid method for hydraulic profiling in unconsolidated formations. *Ground Water* **46**(2), 323–328 (2008)
- Einarson, M.D., Cherry, J.A.: A new multilevel ground water monitoring system using multichannel tubing. *Ground Water Monit R* **22**(4), 52–65 (2002)
- Lessoff, S.C., Schneidewind, U., Leven, C., Blum, P., Dietrich, P., Dagan, G.: Spatial characterization of the hydraulic conductivity using direct-push injection logging. *Water Resour. Res.* **46**, W12502 (2010)
- Leven, C., Barrash, W.: Fiber optic pressure measurements open up new experimental possibilities in hydrogeology. *Groundwater* **60**(1), 125–136 (2022)
- Maier, R., Gonzalez-Nicolas, A., Leven, C., Nowak, W., Cirpka, O.A.: Joint optimization of measurement and modeling strategies with application to radial flow in stratified aquifers. *Water Resour. Res.* **56**(7), e2019WR026872 (2020)
- Maier, R., Strasser, D., Stoll, M., Cirpka, O.A., Leven, C.: Data set on pumping tests in a partially penetrating well to resolve vertical aquifer heterogeneity and hydraulic anisotropy. Forschungsdatenportal Eberhard Karls Universität Tübingen, Tübingen (2021). <http://hdl.Handle.Net/10900.1/274eabc9-0edd-40b1-9e34-541c09c4479c>
- Maier, R., Leven, C., Sánchez-León, E., Strasser, D., Stoll, M., Cirpka, O.A.: Model and inversion codes for the analysis of pumping tests in a partially penetrating well to resolve vertical aquifer heterogeneity and hydraulic anisotropy. Forschungsdatenportal Eberhard Karls Universität Tübingen, Tübingen (2022b). <http://hdl.Handle.Net/10900.1/A67994b5-19be-4934-9bdb-12fdc0aaef23>
- Maier, R., Leven, C., Sánchez-León, E., Strasser, D., Stoll, M., Cirpka, O.A.: Revealing vertical aquifer heterogeneity and hydraulic anisotropy by pumping partially penetrating wells. *Hydrogeol J* **30**, 463–477, (2022a)
- Zlotnik, V., Ledder, G.: Theory of dipole flow in uniform anisotropic aquifers. *Water Resour. Res.* **32**(4), 1119–1128 (1996)

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.