



Eine Echtzeit-Online-Methode zur Beurteilung der künstlichen Grundwasseranreicherung und Grundwasserentnahme

Christian Moeck^{1,2} · Markus Merk³ · Dirk Radny^{1,4} · Adrian Auckenthaler⁵ · Mario Schirmer^{1,6} · Thomas Gabriel⁷

Eingegangen: 10. September 2021 / Überarbeitet: 5. März 2022 / Angenommen: 22. März 2022 / Online publiziert: 2. Juni 2022
© Der/die Autor(en) 2022

Zusammenfassung

Eine nachhaltige Wasserversorgung in urbanen Gebieten stellt aufgrund des Nutzungsdrucks sowie vielfältiger anthropogener Einträge eine große Herausforderung dar. Künstliche Grundwasseranreicherung hat das Potenzial, den Wasserbedarf zu decken und ggf. vorhandene Schadstoffkonzentrationen zu verdünnen. Durch hohe Infiltrationsraten kann zudem eine hydraulische Barriere gegenüber Schadstoffen aus anliegenden Nutzungsflächen entstehen. Grundvoraussetzung, um diese Barriere so effektiv wie möglich nutzen zu können, ist die genaue Beschreibung der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Schutzfunktion. Im geschilderten Fallbeispiel für ein Trinkwassergewinnungsgebiet in der Nordschweiz präsentieren wir ein einfaches Online-Werkzeug. Es wird genutzt, um die große Menge der erhobenen Daten zu digitalisieren sowie um die Interpretation von Konturenkarten zu ergänzen, indem es die Auswertung erhobener Daten vereinfacht und Grundwasserfließrichtungen und -magnituden visualisiert. Die Ergebnisse können zur Beschreibung komplexerer Fließsysteme genutzt werden, was zu einer effizienteren Grundwasserbeobachtung führt.

Schlüsselwörter Künstliche Grundwasseranreicherung · Grundwasserentnahme · Benutzerfreundliche Online-Methode · Echtzeit-Beobachtungen · Urbane Hydrogeologie · Schweiz

✉ Christian Moeck
christian.moeck@eawag.ch

Markus Merk
markus.merk@mailbox.org

Dirk Radny
radny@bafg.de

Adrian Auckenthaler
adrian.auckenthaler@bl.ch

Mario Schirmer
mario.schirmer@eawag.ch

Thomas Gabriel
t.gabriel@hardwasser.ch

¹ Abteilung Wasserressourcen und Trinkwasser, Eawag, Dübendorf, Schweiz

² Schweizer Grundwasser Netzwerk (CH-GNet), Dübendorf, Schweiz

³ Institut für Angewandte Geowissenschaften, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland

⁴ BfG, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Deutschland

⁵ Amt für Umweltschutz und Energie Basel-Landschaft, Liestal, Schweiz

⁶ Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie (CHYN), Université de Neuchâtel, Neuchâtel, Schweiz

⁷ Hardwasser AG, Pratteln, Schweiz

Real-time online method for assessing artificial groundwater recharge and abstraction

Abstract

A sustainable water supply in urban areas is a major challenge due to increasing water abstraction as well as diverse anthropogenic inputs. Artificial groundwater recharge has the potential to meet water demand and dilute pollutant concentrations that may be present. High infiltration rates can also create a hydraulic barrier to pollutants from adjacent land uses. The basic prerequisite for using this type of barrier as effectively as possible is an accurate description of the spatial and temporal distribution of groundwater recharge. In the presented case study for a drinking water extraction area in northern Switzerland, we introduce a simple online tool which can be used to complement the large amount of collected data and to digitize and interpret contour maps. The tool simplifies the analysis of collected data and helps to visualize groundwater flow directions and magnitudes. The results can be used to describe complex flow systems, leading to more efficient groundwater monitoring.

Keywords Managed aquifer recharge · Groundwater abstraction · User-friendly online method · Real-time observations · Urban hydrogeology · Switzerland

Einführung

In urban geprägten Gebieten stellt eine nachhaltige Wasserversorgung mit ausreichendem Wasserangebot und entsprechender Wasserqualität eine große Herausforderung dar (Burri et al. 2019; Epting et al. 2008). Der zunehmende Wasserbedarf geht oft mit abnehmender Grundwasserqualität und -quantität einher (Baillieux et al. 2015; Weatherl et al. 2021; Grischek et al. 1996; Minnig et al. 2018).

Künstliche Grundwasseranreicherung hat das Potenzial, den zunehmenden Wasserbedarf zu decken und gleichzeitig die Grundwasserressourcen nachhaltig zu schützen (Dillon et al. 2019), da Abbauprozesse während der Versickerung durch die ungesättigte Zone die Qualität des infiltrierten Wassers erhöhen (Greskowiak et al. 2005; Henzler et al. 2014; Massmann et al. 2006). Durch hohe Infiltrationsraten kann ein Wasserüberschuss erreicht werden, und ggf. vorhandene Schadstoffkonzentrationen werden verdünnt. Lokal kann sich ein „Grundwasserberg“ ausbilden (Grünheid et al. 2005; Moeck et al. 2018b). Dieser kann als hydraulische Barriere gegenüber Schadstoffen dienen, die über anthropogene Nutzungsflächen in das Grundwasser gelangen können (Moeck et al. 2020, 2016; Auckenthaler et al. 2010). Ein gutes räumliches und zeitliches hydrogeologisches Systemverständnis ist hierbei entscheidend.

Grundwasserleiter sind heterogen (Cirpka und Valocchi 2016; Sudicky 1986), und daher weisen Messungen des Grundwasserspiegels eine Variabilität auf, die dem Grad der Heterogenität entspricht. Daher besteht einer der Gründe für die Installation mehrerer Grundwassermessstellen darin, genügend Informationen zu erhalten, um mit dieser räumlichen Komplexität angemessen umgehen zu können (Butler et al. 2021; Rau et al. 2020). Dies kann durch die Untersuchung kleinräumiger Gradientenvariationen, die Verwendung von mindestens drei Brunnelementen zur Erzeugung von Gradientenfeldern oder durch die Bestimmung ei-

nes einzigen, großräumigen Gradienten für den Standort geschehen. In Fällen, in denen mehrere Grundwassermessstellen installiert wurden und die Richtung und Größe des hydraulischen Gradienten im gesamten Untersuchungsgebiet nahezu einheitlich ist, ist der letztgenannte Ansatz oft nützlich und zum Beispiel für die Charakterisierung von kontaminierten Standorten erforderlich. Hydrogeologen schätzen in der Regel einen standortbezogenen oder regionalen Gradienten anhand einer hydraulischen Konturkarte ab. Aufgrund der oben genannten Heterogenität von Grundwasserleitern und der oft nicht einheitlichen Strömungsrichtungen kann dies aber zu falschen Interpretationen führen.

Häufig werden numerische Grundwassermodelle genutzt, um die aktuelle hydraulische Untergrundsituation zu simulieren und verschiedenste grundwasserrelevante Szenarien zu berechnen (Moeck et al. 2018a; Hendricks Franssen et al. 2011; Scibek et al. 2007; Brunner et al. 2010; Schilling et al. 2017). Obwohl diese Modelle ein Standardwerkzeug sind, sind sie oft nicht leicht in der täglichen Arbeit von Trinkwasserversorgern anwendbar. Die Vielfalt, räumliche und zeitliche Dimensionen, Parametervariabilität und angestrebte Auflösung von Prozessen sind sowohl für die Entwickler, vor allem aber für die Anwender von Modellen, eine Herausforderung (Schöniger et al. 2015; Engelhardt et al. 2014; Doherty und Simmons 2013; Guthke 2017; Schilling et al. 2019). Daher müssen diese Modelle oft von den jeweiligen Experten bedient werden, die aber in der täglichen Arbeit eines Trinkwasserversorgers oft nicht eingebunden sein können. Daher benötigen Trinkwasserversorger idealerweise ein einfacheres Werkzeug, um Grundwasserfließrichtungen und -magnituden in relevanten Bereichen zu beobachten und zu analysieren. Hierbei nehmen die Digitalisierung und effiziente Datenerhebung sowie Auswertung eine wichtige Rolle ein. Wie Chen und Schnell (2020) anmerken ist ein erhebliches Potenzial der Digitalisierung im Grundwasserschutz und

Altlastenbearbeitung noch brachliegend, und oft wird nur ein geringer Teil der vorhandenen Daten genutzt. Dabei handelt es sich nicht nur um die Nutzung neuer Messgeräte, Server und Logger oder Software-Werkzeuge, sondern wie diese Daten genutzt werden, sodass in (quasi-)Echtzeit Messungen und deren Auswertung sowie resultierende Maßnahmen ergriffen werden können.

Im hier beschriebenen Fallbeispiel des Trinkwassergewinnungsgebietes Hardwald (Nordschweiz) werden rund 15 Mio. m³Jahr⁻¹ Trinkwasser produziert. Das Gewinnungsgebiet ist umgeben von diversen Industriestandorten. Das Grundwasser wird aus einem Lockergesteinsgrundwasserleiter entnommen, in welchen gleichzeitig doppelt so viel Rheinwasser künstlich infiltriert wird. Die Entnahme findet über eine Brunnengalerie bestehend aus 32 Brunnen statt. Aufgrund der hohen Infiltrationsrate wird ein Grundwasserberg erzeugt, der das Gebiet vor Einflüssen aus den umgebenden Industriestandorten schützt.

Wir demonstrieren, wie anhand einer benutzerfreundlichen Methode die räumliche und zeitliche Ausbildung der

hydraulischen Barriere kleinräumig und in (quasi-)Echtzeit beobachtet werden kann. Falls nötig können aufgrund der (quasi-)Echtzeit-Auswertung kurzfristig Maßnahmen wie Stoppen der Entnahme an Brunnen x oder Erhöhen der Infiltrationsrate in Weiher y ergriffen werden, um die hydraulische Barriere aufrecht zu erhalten oder zu verstärken. Eine anwenderfreundliche Benutzeroberfläche wurde in der Open-Source-Software „R“ (R Development Core Team 2008) entwickelt. Das vorgestellte Programm kann genutzt werden, um die Interpretation von z. B. Konturenkarten zu ergänzen oder zu verbessern, indem es Grundwasserfließrichtungen und -magnituden erzeugt und in unterschiedlicher Weise visualisiert. In dem vorgestellten Fallbeispiel demonstrieren wir, wie mit digitalisierten Arbeitsabläufen und der Nutzung von einfachen Technologien zur Erfassung, Verarbeitung und Visualisierung der aufgenommenen Daten, diese effizient und nachhaltig in die praktische Anwendung einfließen können.

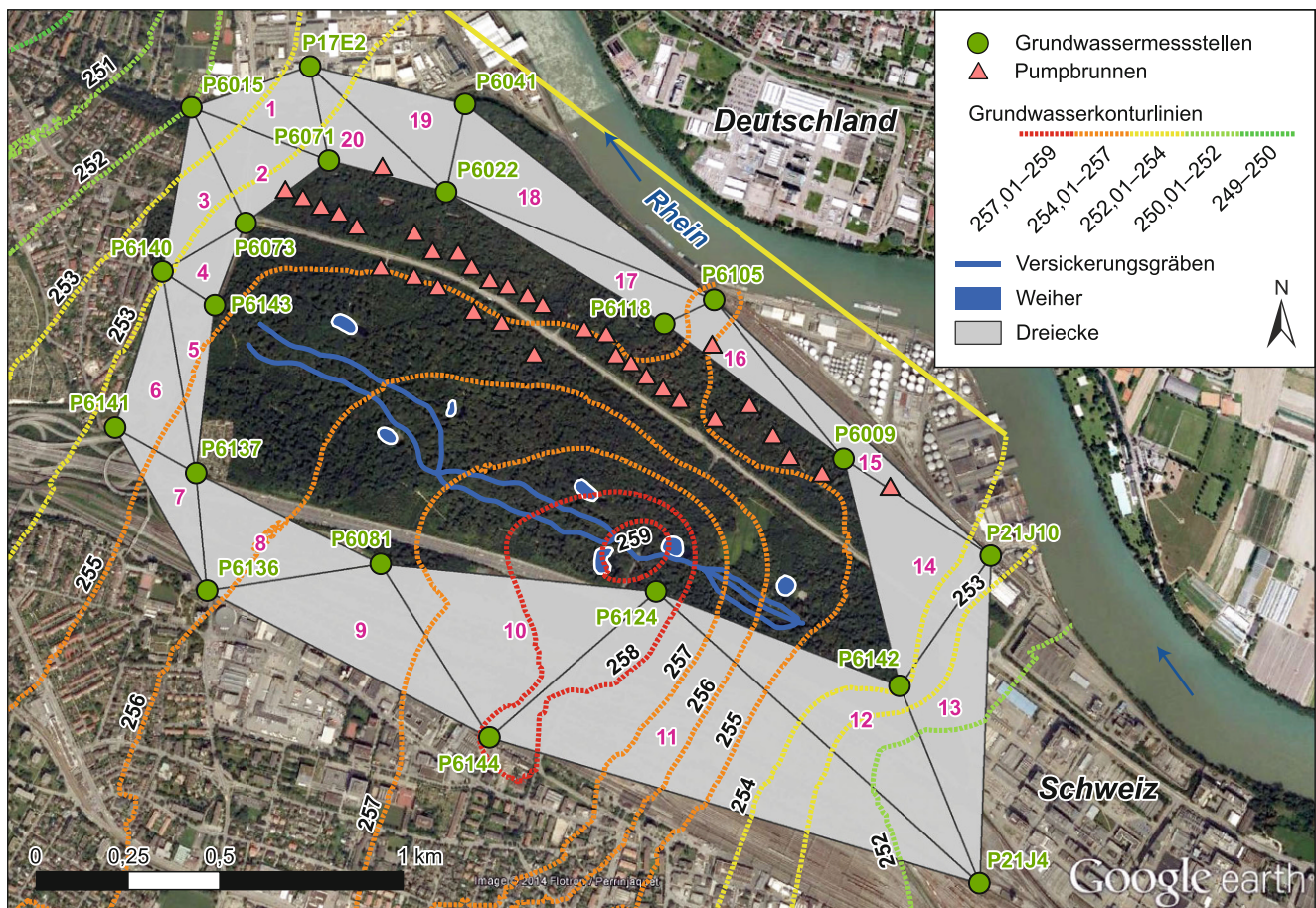


Abb. 1 Lage der Förderbrunnen, der Versickerungsanlage sowie der Grundwassermessstellen mit Grundwassergleichen; ebenfalls dargestellt: Dreiecke zur Bewertung von Grundwasserfließrichtung und -magnitude (s.a. Abschnitt „Methode“)

Fig. 1 Location of the groundwater abstraction wells, the infiltration system and the groundwater monitoring wells with groundwater levels; also shown: Triangles for the evaluation of groundwater flow direction and magnitude (see also section “Method”)

Standort und Hydrogeologie

Seit Mitte der 1950er-Jahre wird der Hardwald nahe Basel in der Nordschweiz als Trinkwassergewinnungsgebiet genutzt (Abb. 1). Aufgrund der starken Grundwasserbelastungen durch die umliegenden Industriebetriebe und Deponien erfolgte seit 1958 die künstliche Grundwasseranreicherung mit Flusswasser aus dem angrenzenden Rhein. Das mechanisch filtrierte Rheinwasser wird über mehrere Infiltrationskanäle und Weiher im Hardwald verteilt und über die Bodenpassage gravitativ infiltriert (Moeck et al. 2017a, 2021). Während der Versickerung werden verschiedenste (Spuren-)Stoffe aufgrund natürlicher Schadstoffminderungsprozesse entfernt. Zusätzlich wird seit 2013 das entnommene Grundwasser über Aktivkohle zur Beseitigung von Mikroverunreinigungen aufbereitet und mittels einer nachgeschalteten UV-Anlage entkeimt (Gabriel und Meier 2014).

Etwa doppelt so viel Grundwasser wie entnommen wird, wird angereichert. Die jährliche Entnahme entspricht rund 15 Mio. m³ Grundwasser. Durch die hohen Infiltrationsraten entsteht im Bereich der Grundwasseranreicherung ein „Grundwasserberg“ (Abb. 1), der die natürliche Grundwasserfließrichtung stark beeinflusst. Diese hydraulische Barriere schützt das Grundwasser gegenüber den im Nahbereich des Trinkwassergewinnungsgebiets vorhandenen anthropogenen Nutzungen (Moeck et al. 2017b; Popp et al. 2019; Auckenthaler et al. 2010).

Die hydrogeologisch wichtigsten Formationen sind im Liegenden der Festgesteinsgrundwasserleiter (Hauptmuschelkalk) und im Hangenden der quartäre Lockergesteinsgrundwasserleiter (Auckenthaler et al. 2010). Der Hauptmuschelkalk stellt den bedeutendsten Felsgrundwasserleiter im Untersuchungsgebiet dar. Die hydraulische Leitfähigkeit liegt bei $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$, kann jedoch räumlich variieren (Moeck et al. 2020). Die quartären Lockergesteine bestehen in erster Linie aus Schottern. Aufgrund der guten hydraulischen Durchlässigkeit von $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ stellen sie einen weiteren wichtigen regionalen Grundwasserleiter dar (Moeck et al. 2016, 2017b; Popp et al. 2019).

Methoden

Das Fließschema in Abb. 2 zeigt den Ablauf der hier verwendeten Methode. In den folgenden Abschnitten sind die jeweiligen Arbeitsschritte im Detail erläutert. Ein Anwendungsbeispiel, das den Zusammenhang zwischen täglichen Infiltrations- und Entnahmeraten mit dem Fließwinkel von Dreieck 14 – östlich im Dreieckgürtel liegend – darstellt, wird im Zusatzmaterial der Online-Ausgabe dieses Beitrags beschrieben.

Drucksensoreninstallation und Datenübertragung

Drucksensoren für Grundwasserspiegelmessungen wurden an 20 Messstellen installiert, die im quartären Lockergesteinsgrundwasserleiter verfiltert sind und eine vergleichbare Ausbautiefe vorweisen (Abb. 1). Die Drucksensoren mit LoRa-Funktionalität wurden von der Firma ALTECNO (<http://www.altecn.ch>) konzipiert und geliefert. LoRa (Long Range) bezeichnet eine Funktechnik, über die Geräte miteinander kabellos, strahlungsarm und ortsunabhängig kommunizieren können, wobei sich LoRa insbesondere dadurch auszeichnet, dass Daten über große Reichweiten und mit einem sehr geringen Energieverbrauch gesendet werden können.

Ein flächendeckendes LoRa-Netz wurde aufgebaut. Mit den Drucksensoren werden die jeweiligen Messwerte des Drucksignals (in Wasserstand umgerechnet), der Grundwassertemperatur und der elektrischen Leitfähigkeit alle 10 min erfasst. Über LoRa werden diese Werte dann an ein sogenanntes Gateway weitergeleitet. Dieses übermittelt die Daten an einen Server. Hier werden die Daten verarbeitet und können entsprechend ausgelesen werden. Anschließend werden die Daten auf den FTP-Server des Wasserversorgers exportiert. Der Export erfolgt einmal pro Tag zu einer definierten Zeit, kann aber auch zeitlich höher aufgelöst werden.

Berechnung Grundwasserfließrichtung und -magnitude

Für ein dreieckiges Element, welches durch jeweils drei Grundwassermessstellen mit den jeweiligen Grundwasserspiegelmessungen aufgespannt wird, kann die Grundwasserfließrichtung und -magnitude berechnet werden (Pinder et al. 1981; Devlin und McElwee 2007). Dieser Ansatz wurde in ein numerisches Grundwassermodell für das Untersuchungsgebiet übernommen (Moeck et al. 2018a) und weitergeführt, um eine Benutzeroberfläche in der Open-Source-Software „R“ (R Development Core Team 2008) zu erstellen. Exemplarisch ist die Methode in Abbildung S1 im Zusatzmaterial der Online-Ausgabe dieses Beitrags dargestellt.

Bei bekannten X- und Y-Koordinaten sowie bekanntem Grundwasserdruckspiegel h kann eine 2D-Fläche aus drei Punkten aufgespannt werden.

Die resultierenden linearen Gleichungen können nach den Faktoren a , b und c für die Koordinaten der drei Beobachtungspunkte ($i = 1-3$) aufgelöst werden.

$$h_i(x, y) = a + b x_i + c y_i \quad (1)$$

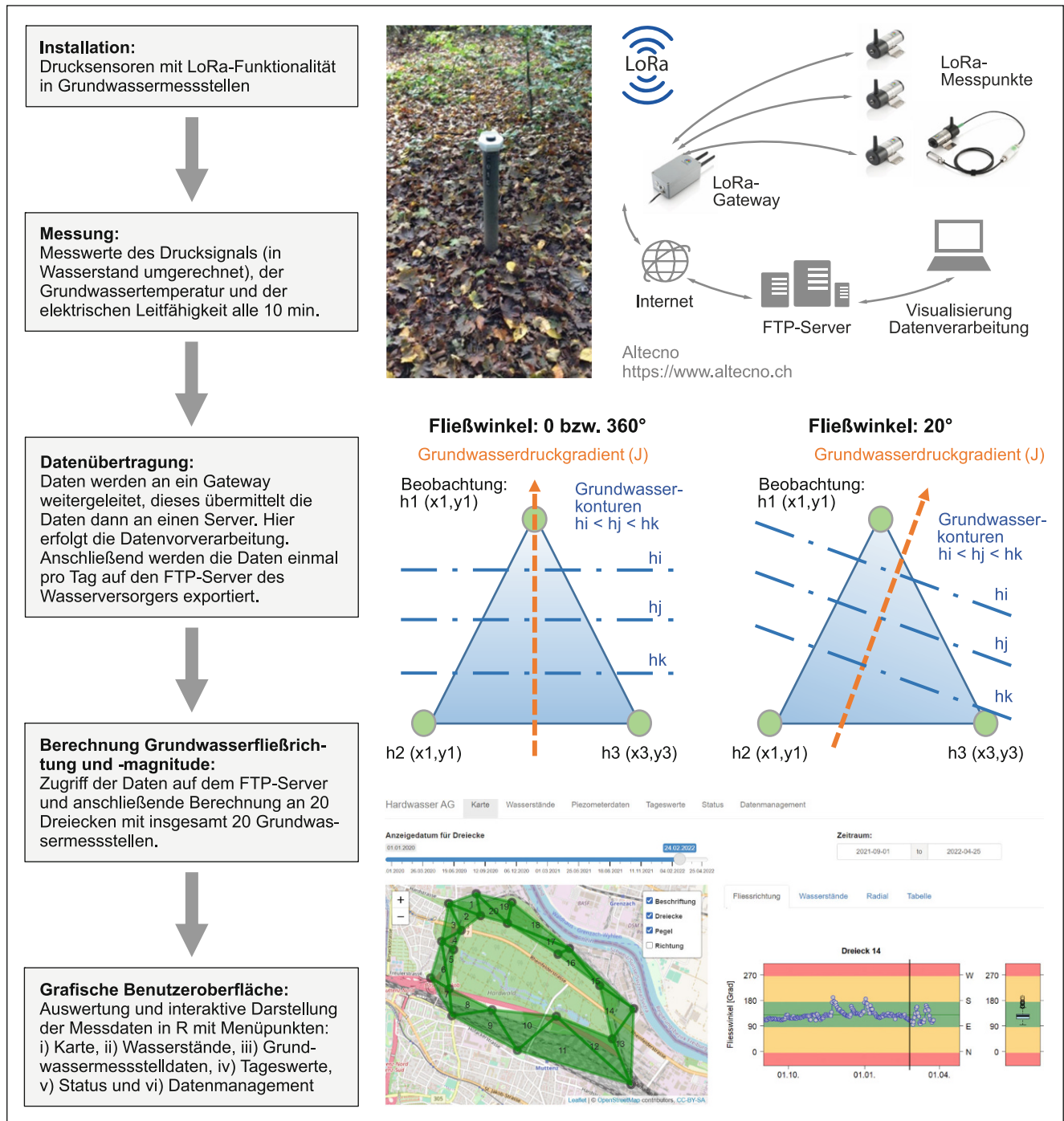


Abb. 2 Fließschema des Ablaufs der hier verwendeten Methode: Installation der Drucksensoren in Grundwassermessstellen, Messung und Datenübertragung (alle 10 min) an ein Gateway und einen Server, Berechnung der Grundwasserfließrichtung und -magnitude (täglich) sowie graphische Benutzeroberfläche

Fig. 2 Flow chart of the used methods and working steps: Installation of the pressure sensors in groundwater monitoring wells, measurement and data transmission (every 10 min) to a gateway and server, calculation of groundwater flow direction and magnitude (daily) and graphical user interface

Der Druckgradient wird als Richtungsvektor ausgedrückt, und der Richtungswinkel des Druckgradienten (θ) kann als Arcustangensfunktion beschrieben werden:

$$\theta = \tan^{-1}(cb) = \tan^{-1}(J_y J_x) = \tan^{-1}(\partial h / \partial y \partial h / \partial x) \quad (2)$$

Weiterhin kann die Magnitude des Druckgradienten (Gefälle der Grundwasseroberfläche) berechnet werden:

$$|J| = \sqrt{(b^2 + c^2)} \quad (3)$$

Demnach berechnet sich die Magnitude $|J|$ als geometrisches Mittel aus der X- und Y-Komponente. Daraus lässt sich dann eine Abstandsgeschwindigkeit der Grundwasserströmung berechnen:

$$v = \frac{q}{n_e}, \quad (4)$$

$$\text{wobei } q = k_f \frac{dh}{dl} \quad (5)$$

In dieser Formel steht v für die Abstandsgeschwindigkeit, dh/dl für das berechnete Gefälle der Grundwasseroberfläche, k_f für den Durchlässigkeitsbeiwert in Fließrichtung und n_e für die effektive Porosität. Als Werte wurde ein k_f von $2,5 \cdot 10^{-3}$ m/s und für die effektive Porosität 0,2 [-] angenommen (Moeck et al. 2018a, 2020).

Die Richtung wurde mit der atan2-Funktion berechnet. Gegenüber der einfachen atan-Funktion bleiben dabei die Vorzeichen der Richtung auch über 180° hinweg erhalten. Dieses Verfahren wurde an 20 Dreiecken mit insgesamt 20 Grundwassermessstellen angewendet (Abb. 1). Ziel ist es, dass der Zustrom zu den Trinkwasserbrunnen aus Bereichen außerhalb des Hardwalds vermieden wird. Durch die Berechnung der Fließrichtung kann dies überprüft und durch eine gezielte Steuerung der räumlichen Verteilung der Infiltration und/oder der Entnahmemenge optimiert werden.

Benutzeroberfläche

Die Auswertung und interaktive Darstellung der Messdaten wurde in R realisiert. Für die Benutzeroberfläche wurde Shiny als zusätzliches Paket geladen. Eine interaktive Karte (OpenStreetMap) wurde über das Paket Leaflet eingefügt und interaktive Grafiken mit Plotly erzeugt. Nach dem Programmstart öffnet sich ein Fenster im Web-Browser (Abb. 3). Über das Menü am oberen Rand gelangt man zu den verschiedenen Daten der Auswertung, kann den Status der Messeinrichtung überprüfen und die Daten erneut vom FTP-Server laden und auswerten lassen. Die jeweiligen Menüpunkte sind: i) Karte, ii) Wasserstände, iii) Grundwasserstand, iv) Tageswerte, v) Status und vi) Datenmanagement.

Karte

Die Hauptansicht ist in einen linken Bereich mit der Karte und einen rechten Bereich mit verschiedenen auswählbaren Abbildungen unterteilt (Abb. 3a).

Mit dem Schieberegler über der Kartenansicht lässt sich das Datum für die Anzeige der Dreiecke auswählen. Die Farbe der Dreiecke in der Kartenansicht richtet sich nach der jeweiligen Abweichung der Grundwasserströmungsrichtung von der vorgegebenen Zielstromrichtung. Die Zielstromrichtung basiert auf vorherigen numerischen Modellierungsergebnissen (Moeck et al. 2018a). Bis zu einer Abweichung von $\pm 45^\circ$ wird das Dreieck in Grün dargestellt (Grundwasserfließrichtung wie gewünscht), und ab einer Abweichung von $\pm 135^\circ$ wird das Dreieck in Rot abgebildet. Bei Fließrichtungsabweichungen zwischen $\pm 45^\circ$ und $\pm 135^\circ$ erscheint das Dreieck in Gelb. Dreiecke, bei denen eine Berechnung der Grundwasserströmungsrichtung nicht möglich ist, werden in Grau dargestellt. Das ist beispielsweise der Fall, wenn Messlücken an einem der Messpunkte vorliegen oder wenn der Unterschied im Grundwasserspiegel zwischen zwei Grundwassermessstellen innerhalb des Dreiecks $< 0,02$ m beträgt (siehe hierzu auch den Abschnitt „Annahmen und Limitierungen“). Auch wird das Dreieck bei einem Unterschied im Grundwasserspiegel $< 0,05$ m zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Wasserstand an den drei verwendeten Grundwassermessstellen in Grau dargestellt. Diese zusätzlichen Beschränkungen wurden eingefügt, um zu vermeiden, dass zu geringe Gradienten der Grundwasseroberfläche und nicht interpretierbare Grundwasserfließrichtungen aufgrund fast gleicher Wasserstände zu einer Falschinterpretation für die jeweiligen Dreiecke führen.

Über das Menü im rechten oberen Eck der Karte können die Beschriftungen der Dreiecke deaktiviert werden. Es besteht auch die Möglichkeit, die Grundwasserströmungsrichtung zusätzlich durch blaue Linien anzuzeigen. Die Länge der Linien ist dabei proportional zum Gradienten der Grundwasseroberfläche. Beim Anklicken der jeweiligen Dreiecke in der Karte werden die Grundwasserströmungsrichtung (in Grad) sowie der Gradient angezeigt. Durch das Anklicken wird im rechten Bereich das jeweilige ausgewählte Dreieck für die verschiedenen auswählbaren Abbildungen wiedergegeben. In der Abbildung „Fließrichtung“ ist der zeitliche Verlauf des jeweiligen Dreiecks für den ausgewählten Zeitraum dargestellt (Abb. 3a). Zusätzlich wird ein Boxplot der Fließrichtungen für den ausgewählten Zeitraum erstellt. In der Abbildung „Wasserstände“ ist der zeitliche Verlauf der jeweiligen drei Grundwassermessstellen zu dem ausgewählten Dreieck und für den ausgewählten Zeitraum dargestellt (Abb. 3b). Weiterhin wird ein Boxplot der Wasserstände der drei Grundwassermessstellen für den ausgewählten Zeitraum erstellt.

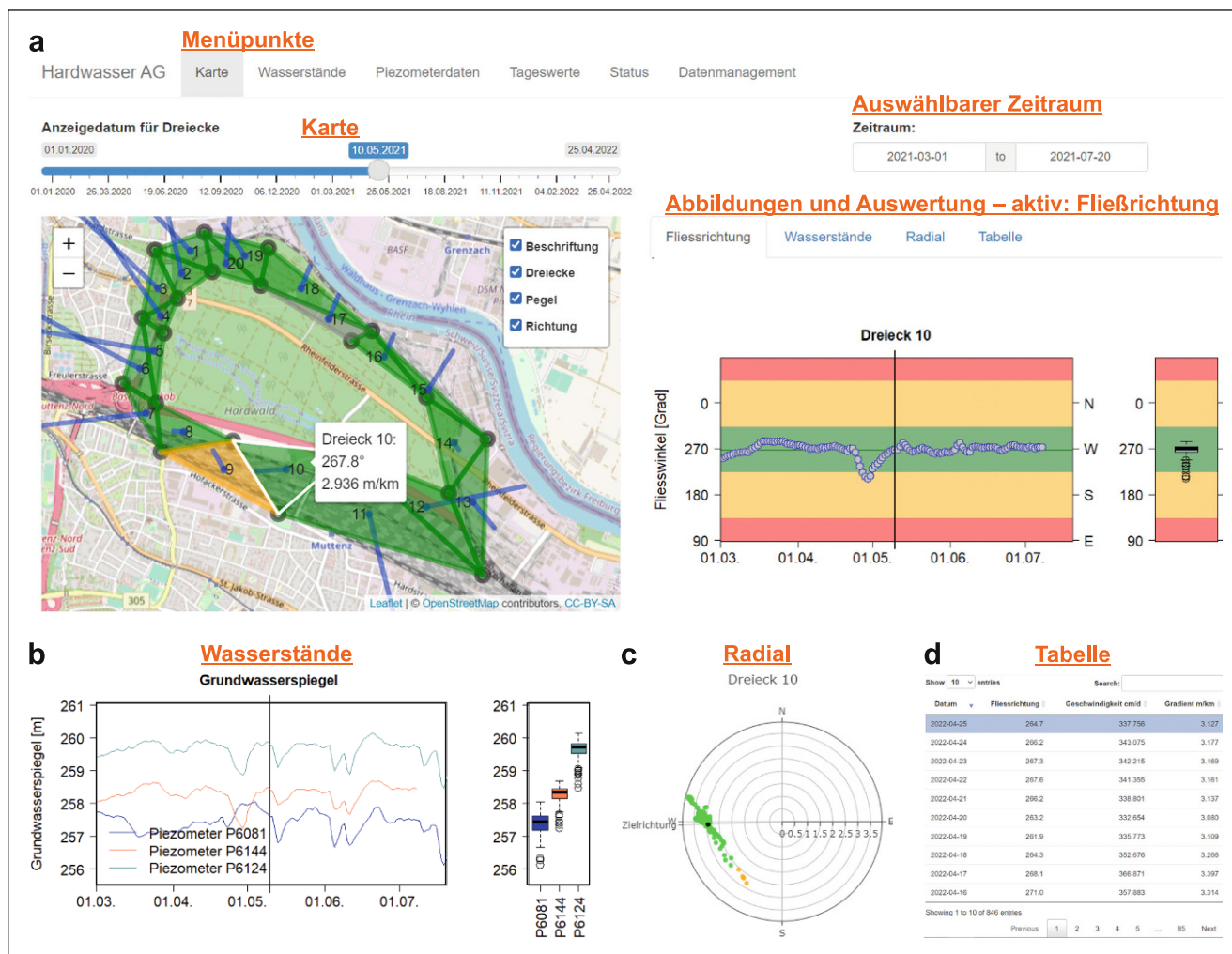


Abb. 3 a Hauptansicht mit Karte (*linker Bereich*) und vier verschiedenen, auswählbaren Abbildungen (*rechter Bereich*; Abbildung für Fließrichtung in aktueller Ansicht aktiv); die jeweiligen Abbildungen für **b** Wasserstände, **c** Radial und **d** Tabelle für das ausgewählte Dreieck **Fig. 3 a** Main view with map (*left area*) and four different selectable figures (*right area*; figure for flow direction active in current view); the respective figures for **b** water levels, **c** radial and **d** table for the selected triangle

In der Abbildung „Radial“ sind die jeweiligen Grundwasserfließrichtungen zu dem ausgewählten Dreieck und für den ausgewählten Zeitraum als Radialplot abgebildet (Abb. 3c). In dieser Ansicht richtet sich die Farbe der Dreiecke nach der jeweiligen Abweichung der Grundwasserströmungsrichtung von der vorgegebenen Zielstromrichtung. Die Farbeinteilung ist gleich der Einteilung der Kartenansicht. Die Verwendung von Plotly erlaubt es, einen gewünschten Bereich zu vergrößern, einzelne Datenreihen auszuwählen und schließlich als Bilddatei zu exportieren. Zusätzlich kann durch das Anklicken eines Punktes in der Abbildung der jeweilige Fließwinkel und -gradient mit dem dazugehörigen Datum angezeigt werden. Der schwarze Punkt zeigt den Fließrichtungswinkel für das über den Schieberegler ausgewählte Datum an.

In der Tabelle sind in vier Spalten das jeweilige Datum, Fließrichtung, Geschwindigkeit (in cm pro Tag), sowie der Gradient (in m pro km) wiedergegeben (Abb. 3d).

Wasserstände

Hier werden die gesamten Wasserstände interaktiv dargestellt (Abb. S2), und gewünschte Bereiche können ausgewählt, verkleinert oder vergrößert werden. Einzelne Datenreihen können ein- und ausgeblendet und die Darstellungen können anschließend als Bilddatei exportiert werden. Fährt man mit der Maus über eine Kurve, erscheint eine Anzeige mit Datum und zugehörigem Wasserstand. Um diese Anzeige für alle Kurven zu generieren, kann die entsprechende Funktion aktiviert werden. Zusätzlich können vertikale und horizontale Linien erzeugt werden, die bis zu den jeweiligen Achsen reichen und das Ablesen der Achsen erleichtern.

Grundwasserstand

Hier werden der Grundwasserstand, die Temperatur sowie die elektrische Leitfähigkeit für die ausgewählte Grundwassermessstelle und den Zeitraum dargestellt (Abb. S3). Die Angabe des Grundwasserstands ist in m ü. M., die Temperatur in °C und die elektrische Leitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$. Auch wenn momentan die Grundwassertemperatur und elektrische Leitfähigkeiten nur dargestellt werden, können diese Daten exportiert und für anschließende Auswertungen genutzt werden, wie z.B. die Abschätzung der Fließzeitberechnung (Cirpka et al. 2007; Moeck et al. 2017b; Vogt et al. 2009).

Tageswerte, Status und Datenmanagement

Tabellenhaft werden die Tageswerte aller Grundwassermessstellen sowie die Grundwasserströmungsrichtungen innerhalb aller Dreiecke angezeigt. Bei Messfehlern bzw. unrealistischen Werten (siehe dazu auch Unterkapitel „Annahmen und Limitierungen“) und/oder bei Nicht-Übertragung der Messungen, liegt in der Tabelle für das jeweilige Datum eine Datenlücke vor. Das Menü „Status“ zeigt den aktuellen Stand des Messsystems an, z.B. wann die letzte Messung durchgeführt worden ist. Das Datenmanagement dient zum Aktualisieren der dargestellten Daten. Nach dem Herunterladen der neuen Daten werden diese an die bestehenden Datenreihen angefügt und als individuelle Tabellen in einer Datei abgespeichert. Die Grundwassermessstellendaten werden vom FTP-Server geladen, lokal gespeichert und automatisiert ausgewertet. Auch lässt sich eine Auswahl der Daten exportieren. Die Rohdaten stehen im rds-Dateiformat zur einfachen Weiterverarbeitung in R, sowie die Tageswerte der Grundwassermessstellen und der Fließrichtungen als csv-File zum Download zur Verfügung.

Annahmen und Limitierungen

Die Berechnungen beruhen auf der Annahme, dass die hydraulischen Parameter innerhalb der Fläche zwischen den drei Beobachtungspunkten homogen sind, was in der Realität aufgrund von kleinskaliger Heterogenität nicht immer gegeben ist (Devlin und Schillig 2017; Moeck et al. 2018a). Dies ist relevant, wenn die Distanz zwischen den drei Beobachtungspunkten relativ groß ist und ggf. verschiedene geologische Einheiten oder anderweitige Heterogenität innerhalb des Dreiecks vorliegen. Dies bedeutet auch, dass die Methode in verkarsteten und geklüfteten oder sehr heterogenen Grundwassersystemen nicht angewendet werden kann. Aufgrund der relativ kleinen Dreiecke in einem relativ homogenen Sand-Kies-Grundwasserleiter im vorgestellten Anwendungsfall ist der Effekt von Heterogenität jedoch als vernachlässigbar anzunehmen.

Eine Limitierung in der beschriebenen Methode ist, dass nur horizontale Fließrichtungen berücksichtigt werden (Devlin 2003) und somit das 3D-Grundwasserfließfeld, in dem (Tiefen)wasseraufstieg stattfinden könnte, potenziell zu einer Verzerrung der Fließrichtung führen kann. Wie bereits zuvor beschrieben, liegen alle Grundwassermessstellen im hier vorgestellten Anwendungsfall im quartären Lockergesteinsgrundwasserleiter und in etwa in gleicher Ausbautiefe, somit sollte diese Limitierung im beschriebenen Beispiel ebenfalls als vernachlässigbar bewertet werden.

Mögliche Schadstofftransportprozesse, bei denen Dispersion und vertikaler Transport (z. B. durch Klüfte) stattfinden, können durch die beschriebene Methode nicht erfasst werden. Dies ist wichtig, wenn die Methode in anderen Untersuchungsgebieten angewendet wird, in denen der advective Transport nicht der dominierende Prozess für die Migration von Schadstoffen ist (Devlin und Schillig 2017).

Aufgrund ihrer Geometrie sind die aufgespannten Dreiecke generell nicht gleich zu gewichten. Zum Beispiel können bei sehr großen oder kleinen Basis- zu Höhenverhältnissen Unsicherheiten im Fließgradienten entstehen. McKenna und Wahi (2006) schlagen daher vor, dass nur Dreiecke mit einem Verhältnis von Basis zu Höhe zwischen 0,5 und 5,0 in Betracht gezogen werden sollten, obwohl je nach Toleranz des Projekts auch etwas größere Bereiche sinnvoll sein könnten. Dies ist im hier beschriebenen Anwendungsfall mit Ausnahme von Dreieck 5 (Verhältnis von Basis zu Höhe hier 0,26) gewährleistet. Auch können Messfehler und ein kleiner Fließgradient aufgrund geringer Grundwasserspiegelunterschiede sowie schlechte hydraulische Anbindung einer Grundwassermessstelle an einen Grundwasserleiter zu einer Verzerrung der Ergebnisse und Interpretation beitragen (Devlin und Schillig 2017; Devlin und McElwee 2007; Moeck et al. 2018a; Rau et al. 2019).

Auf der anderen Seite zeigen Devlin und McElwee (2007), dass die Beobachtungspunktanordnung und eine größere Anzahl von Grundwassermessstellen (>5) dazu beitragen, die vorher genannten Unsicherheiten zu vermindern. Im vorgestellten Fallbeispiel wurde dies berücksichtigt und die Auswertung und Darstellung findet nicht statt, wenn der Unterschied im Grundwasserspiegel zwischen zwei Grundwassermessstellen innerhalb des Dreiecks $<0,02\text{ m}$ beträgt. Auch wird das Dreieck bei einem Unterschied im Grundwasserspiegel $<0,05\text{ m}$ zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Wasserstand an den drei verwendeten Grundwassermessstellen in Grau dargestellt und dient nicht für die Interpretation. Diese zusätzlichen Beschränkungen wurden eingefügt, um nicht interpretierbare Grundwasserfließrichtungen aufgrund fast gleicher Wasserstände zu vermeiden. Nichtsdestotrotz kann die Berechnung und Auswertung nützlich sein, um „unty-

pische“ Grundwassermessstellen zu identifizieren (Devlin und Schillig 2017; Moeck et al. 2018a).

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Für ein Trinkwassergewinnungsgebiet in der Nordschweiz präsentieren wir ein einfaches und anwenderfreundliches Werkzeug, um Grundwasserfließrichtungen zwischen Bereichen der künstlichen Grundwasseranreicherung und der Grundwasserentnahme zu beobachten und zu analysieren. Das vorgestellte Programm kann genutzt werden, um die Interpretation von Konturenkarten zu ergänzen oder zu verbessern, indem es Grundwasserfließrichtungen und -magnituden erzeugt und in unterschiedlicher Weise visualisiert. Die Methode kann zur Bestimmung von Gradienten aus jeweils drei Brunnen eines gesamten Brunnennetzes verwendet werden. Die Ergebnisse können zur Beschreibung komplexerer Fließsysteme genutzt werden. Mit relativ wenig Aufwand kann die Methode zur Berechnung der Grundwasserfließrichtung und -magnitude auf andere Untersuchungsgebiete übertragen werden. Die interaktive Darstellung der Messdaten kann durch die Open-Source-Software „R“ und das Einladen von verschiedenen Paketen realisiert und den eigenen Bedürfnissen angepasst werden. Darüber hinaus zeigen wir, dass die oft in großen Datenmengen vorliegenden Grundwassermessungen ein erhebliches Potenzial in der Digitalisierung im Grundwasserschutz und -management darstellen. Die beschriebene Datenverwaltung und Auswertung kann zusätzlich zu den bereits vorhandenen Werkzeugen genutzt werden, um in (quasi-)Echtzeit Messung, Auswertung sowie Maßnahmen im Arbeitszyklus zu implementieren. Das hier vorgestellte Online-Werkzeug ist beim lokalen Wasserversorger bereits implementiert und wird genutzt, um kontinuierlich die große Menge der erhobenen Daten zu digitalisieren und die Interpretation von Konturenkarten zu ergänzen, indem es die Auswertung vereinfacht und Grundwasserfließrichtungen und -magnituden visualisiert und somit zu einer genauen Beschreibung der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Barrierschutzfunktion beiträgt.

Zusatzmaterial online Zusätzliche Informationen sind in der Online-Version dieses Artikels (<https://doi.org/10.1007/s00767-022-00517-2>) enthalten.

Danksagung Die initiale Idee für die durchgeführte Arbeit wurde im Rahmen des Projekts „Regionale Wasserversorgung Basel-Landschaft 21“ erarbeitet. Wir bedanken uns bei der Hardwasser AG für die Bereitstellung von Daten und Infrastruktur und für die angenehme Zusammenarbeit. Darüber hinaus danken wir Zhao Chen und Christoph Neukum für die Kommentare und Anregungen, die das Manuskript verbessert haben.

Funding Open Access funding provided by Lib4RI – Library for the Research Institutes within the ETH Domain: Eawag, Empa, PSI & WSL.

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

- Auckenthaler, A., Bänninger, D., Affolter, A., Zechner, E., Huggenberger, P.: Drinking water production close to contaminant sites: a case study from the region of Basel, Switzerland. In: Proceedings of the 7th international groundwater quality conference GQ, S. 167–170. (2010)
- Baillieux, A., Moeck, C., Perrochet, P., Hunkeler, D.: Assessing groundwater quality trends in pumping wells using spatially varying transfer functions. *Hydrogeol J* **23**(7), 1449–1463 (2015)
- Brunner, P., Simmons, C.T., Cook, P.G., Therrien, R.: Modeling surface water-groundwater interaction with MODFLOW: some considerations. *Groundwater* **48**(2), 174–180 (2010)
- Burri, N.M., Weatherl, R., Moeck, C., & Schirmer, M.: A review of threats to groundwater quality in the anthropocene. *Science of the Total Environment* **684**, 136–154 (2019)
- Butler Jr, J.J., Knobbe, S., Reboulet, E.C., Whitemore, D.O., Wilson, B.B., Bohling, G.C.: Water well hydrographs: an underutilized resource for characterizing subsurface conditions. *Groundwater* **59**(6), 808–818 (2021)
- Chen, Z., Schnell, K.: Digitalisierung im Grundwasserschutz und in der Altlastenbearbeitung – Hype oder Fortschritt? *Grundwasser* **25**(4), 257–258 (2020)
- Cirpka, O.A., Valocchi, A.J.: Debates—stochastic subsurface hydrology from theory to practice: does stochastic subsurface hydrology help solving practical problems of contaminant hydrogeology? *Water Resour. Res.* **52**(12), 9218–9227 (2016)
- Cirpka, O.A., Fienen, M.N., Hofer, M., Hoehn, E., Tessarini, A., Kipfer, R., Kitanidis, P.K.: Analyzing bank filtration by deconvoluting time series of electric conductivity. *Groundwater* **45**(3), 318–328 (2007)
- Devlin, J.F.: A spreadsheet method of estimating best-fit hydraulic gradients using head data from multiple wells. *Groundwater* **41**(3), 316–320 (2003)
- Devlin, J., McElwee, C.: Effects of measurement error on horizontal hydraulic gradient estimates. *Groundwater* **45**(1), 62–73 (2007)
- Devlin, J.F., Schillig, P.C.: HydrogeoEstimatorXL: an Excel-based tool for estimating hydraulic gradient magnitude and direction. *Hydrogeol J* **25**, 867 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1518-4>
- Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Lloria, M., Pyne, R., Jain, R., Bear, J., Schwarz, J., Wang, W., Fernandez, E.: Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeol J* **27**(1), 1–30 (2019)

- Doherty, J., Simmons, C.T.: Groundwater modelling in decision support: reflections on a unified conceptual framework. *Hydrogeol J* **21**(7), 1531–1537 (2013)
- Engelhardt, I., De Aguinaga, J., Mikat, H., Schüth, C., Liedl, R.: Complexity vs. simplicity: groundwater model ranking using information criteria. *Groundwater* **52**(4), 573–583 (2014)
- Epting, J., Huggenberger, P., Rauber, M.: Integrated methods and scenario development for urban groundwater management and protection during tunnel road construction: a case study of urban hydrogeology in the city of Basel, Switzerland. *Hydrogeol J* **16**(3), 575–591 (2008)
- Gabriel, T., Meier, T.: Infobroschüre Herausforderung der Trinkwassergewinnung aus Flussinfiltraten. Hardwasser AG, Muttenz (2014)
- Greskowiak, J., Prommer, H., Massmann, G., Johnston, C.D., Nützmann, G., Pekdeger, A.: The impact of variably saturated conditions on hydrogeochemical changes during artificial recharge of groundwater. *Appl. Geochem.* **20**(7), 1409–1426 (2005)
- Grischek, T., Nestler, W., Piechniczek, D., Fischer, T.: Urban groundwater in Dresden, Germany. *Hydrogeol J* **4**(1), 48–63 (1996)
- Grünheid, S., Amy, G., Jekel, M.: Removal of bulk dissolved organic carbon (DOC) and trace organic compounds by bank filtration and artificial recharge. *Water Res.* **39**(14), 3219–3228 (2005)
- Guthke, A.: Defensible model complexity: A call for data-based and goal-oriented model choice. *Groundwater* **55**(5), 646–650 (2017)
- Hendricks Franssen, H., Kaiser, H., Kuhlmann, U., Bauser, G., Stauffer, F., Müller, R., Kinzelbach, W.: Operational real-time modeling with ensemble Kalman filter of variably saturated subsurface flow including stream-aquifer interaction and parameter updating. *Water Resour. Res.* (2011). <https://doi.org/10.1029/2010WR009480>
- Henzler, A.F., Greskowiak, J., Massmann, G.: Modeling the fate of organic micropollutants during river bank filtration (Berlin, Germany). *J. Contam. Hydrol.* **156**, 78–92 (2014)
- Massmann, G., Greskowiak, J., Dümbier, U., Zuehlke, S., Knappe, A., Pekdeger, A.: The impact of variable temperatures on the redox conditions and the behaviour of pharmaceutical residues during artificial recharge. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **328**(1–2), 141–156 (2006)
- McKenna, S.A., Wahi, A.: Local hydraulic gradient estimator analysis of long-term monitoring networks. *Groundwater* **44**(5), 723–731 (2006)
- Minnig, M., Moeck, C., Radny, D., Schirmer, M.: Impact of urbanization on groundwater recharge rates in Dubendorf, Switzerland. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **563**, 1135–1146 (2018)
- Moeck, C., Radny, D., Borer, P., Rothardt, J., Auckenthaler, A., Berg, M., Schirmer, M.: Multicomponent statistical analysis to identify flow and transport processes in a highly-complex environment. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **542**, 437–449 (2016)
- Moeck, C., Radny, D., Auckenthaler, A., Berg, M., Hollender, J., Schirmer, M.: Estimating the spatial distribution of artificial groundwater recharge using multiple tracers. *Isotopes Environ Health Stud* **53**(5), 484–499 (2017a)
- Moeck, C., Radny, D., Popp, A., Brennwald, M., Stoll, S., Auckenthaler, A., Berg, M., Schirmer, M.: Characterization of a managed aquifer recharge system using multiple tracers. *Sci. Total Environ.* **609**, 701–714 (2017b)
- Moeck, C., Affolter, A., Radny, D., Dressmann, H., Auckenthaler, A., Huggenberger, P., Schirmer, M.: Improved water resource management for a highly complex environment using three-dimensional groundwater modelling. *Hydrogeol J* **26**(1), 133–146 (2018a)
- Moeck, C., Radny, D., Huggenberger, P., Affolter, A., Auckenthaler, A., Hollender, J., Berg, M., Schirmer, M.: Spatial distribution of anthropogenic inputs into groundwater: a case study. *Grundwasser* **23**(4), 297–309 (2018b)
- Moeck, C., Molson, J., Schirmer, M.: Pathline density distributions in a null-space Monte Carlo approach to assess groundwater pathways. *Groundwater* **58**(2), 189–207 (2020)
- Moeck, C., Popp, A.L., Brennwald, M.S., Kipfer, R., Schirmer, M.: Combined method of $3\text{H}/3\text{He}$ apparent age and on-site helium analysis to identify groundwater flow processes and transport of perchloroethylene (PCE) in an urban area. *J. Contam. Hydrol.* **238**, 103773 (2021)
- Pinder, G.F., Celia, M., Gray, W.G.: Velocity calculation from randomly located hydraulic heads. *Groundwater* **19**(3), 262–264 (1981)
- Popp, A.L., Scheidegger, A., Moeck, C., Brennwald, M.S., Kipfer, R.: Integrating Bayesian groundwater mixing modeling with on-site helium analysis to identify unknown water sources. *Water Resour. Res.* **55**(12), 10602–10615 (2019)
- Rau, G.C., Post, V.E., Shanafield, M., Krekeler, T., Banks, E.W., Blum, P.: Error in hydraulic head and gradient time-series measurements: a quantitative appraisal. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **23**(9), 3603–3629 (2019)
- Rau, G.C., Cuthbert, M.O., Post, V.E., Schweizer, D., Acworth, R.I., Andersen, M.S., Blum, P., Carrara, E., Rasmussen, T., Ge, S.: Future-proofing hydrogeology by revising groundwater monitoring practice. *Hydrogeol J* **28**(8), 2963–2969 (2020)
- R Development Core Team: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. <http://www.R-project.org> (2008)
- Schilling, O.S., Gerber, C., Partington, D.J., Purtschert, R., Brennwald, M.S., Kipfer, R., Hunkeler, D., Brunner, P.: Advancing physically-based flow simulations of alluvial systems through atmospheric noble gases and the novel 37Ar tracer method. *Water Resour. Res.* **53**(12), 10465–10490 (2017)
- Schilling, O.S., Cook, P.G., Brunner, P.: Beyond classical observations in hydrogeology: the advantages of including exchange flux, temperature, tracer concentration, residence time, and soil moisture observations in groundwater model calibration. *Rev. Geophys.* **57**(1), 146–182 (2019)
- Schöniger, A., Illman, W.A., Wöhling, T., Nowak, W.: Finding the right balance between groundwater model complexity and experimental effort via Bayesian model selection. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **531**, 96–110 (2015)
- Scibek, J., Allen, D.M., Cannon, A.J., Whitfield, P.H.: Groundwater—surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **333**(2–4), 165–181 (2007)
- Sudicky, E.A.: A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer—spatial variability of hydraulic conductivity and its role in the dispersion process. *Water Resour. Res.* **22**(13), 2069–2082 (1986). <https://doi.org/10.1029/WR022i013p02069>
- Vogt, T., Hoehn, E., Schneider, P., Čirpka, O.A.: Untersuchung der Flusswasserinfiltration in voralpinen Schottern mittels Zeitreihenanalyse. *Grundwasser* **14**(3), 179–194 (2009)
- Weatherl, R.K., Henao Salgado, M.J., Ramgraber, M., Moeck, C., & Schirmer, M.: Estimating surface runoff and groundwater recharge in an urban catchment using a water balance approach. *Hydrogeology Journal* **29**(7), 2411–2428 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02385-1>

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