

GRUNDWASSER- MODELLIERUNG

WARUM UNSICHERHEITEN ZU QUANTIFIZIEREN SIND

Für die Erstellung multipler Grundwassermodelle und deren Unsicherheitsanalyse existiert zwar eine Vielzahl an Methoden, aber in der Praxis bleibt dieses Potenzial oftmals ungenützt. Da Standard-Grundwassermessdaten nicht genügend Informationen für das Identifizieren hydraulischer Parameter beinhalten und auch das Hinzuziehen von unkonventionellen Messdaten Parameterunsicherheiten nicht komplett eliminiert, ist eine Unsicherheitsanalyse von Grundwassermodellen unabdingbar. Dieser Artikel zeigt Vorteile und Wege auf, wie dies in der Praxis umgesetzt werden kann.

Christian Moeck, Eawag und CH-GNet*

Oliver S. Schilling, Universität Basel und Eawag

Rouven Künze, TK CONSULT AG

Mario Schirmer, Eawag

Philip Brunner, Université de Neuchâtel

RÉSUMÉ

MODÉLISATION DES EAUX SOUTERRAINES: POURQUOI IL EST NÉCESSAIRE DE QUANTIFIER LES INCERTITUDES DE MODÉLISATION

Les prévisions fiables se basant sur la modélisation des eaux souterraines nécessitent une conceptualisation adaptée du système d'eaux souterraines considéré et le calibrage d'une multitude de paramètres. De manière générale, les données de mesure directes sur les eaux souterraines ne sont cependant que rarement et ponctuellement disponibles. Les mesures des niveaux des eaux souterraines, qui sont traditionnellement utilisées pour le calibrage des modélisations, ne contiennent toutefois pas assez d'informations pour identifier des valeurs de paramètre explicites. Afin de réduire l'incertitude de prévision de ces modélisations, le recours à diverses autres données de mesure s'est certes révélé prometteur, mais même dans ce cas, plusieurs combinaisons de paramètres peuvent tout aussi bien reproduire les mesures disponibles dans de nombreux cas. Tandis qu'il est de ce fait courant, dans les applications académiques, d'utiliser plusieurs combinaisons de paramètres calibrées de la même fa-

EINLEITUNG

Da Grundwasser mit einem Anteil von 80% für die Schweizer Trinkwassergewinnung von überragender Wichtigkeit ist, ist sein Schutz ein Thema von grosser wasserwirtschaftlicher und politischer Bedeutung [1]. Ein solides Wissen über Strömungs- und Transportprozesse im Grundwasser ist für alle grundwasserrelevanten Themenfelder entscheidend und für die Entwicklung von nachhaltigen Bewirtschaftungsstrategien unumgänglich. In diesem Zusammenhang wird Grundwassermodellierung routinemässig angewendet [2]. Angesichts der Vorhersagefähigkeit und der Möglichkeit, eine Vielzahl von verschiedenen Szenarien zu betrachten, stellt Grundwassermodellierung ein praktikables Instrument dar, um die Auswirkungen einer bestimmten Wasserbewirtschaftungsstrategie vorherzusagen und fundierte Entscheidungen zu treffen [3, 4]. Um zuverlässige Vorhersagen machen zu können, müssen hydrogeologische Strukturen und repräsentative hydraulische Parameter, einschliesslich ihrer räumlichen Verteilung, be-

* Kontakt: christian.moeck@eawag.ch

(©AdobeStock)



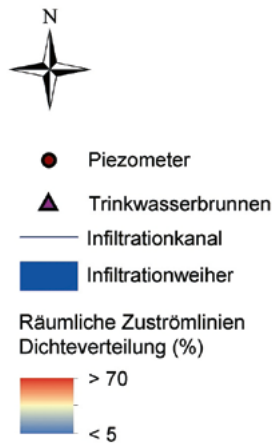
Fig. 1 Lage der ausgewählten Fallbeispiele mit Luftaufnahmen der Wasserversorgung und Umgebung.

stimmt und in das Grundwassermodell eingebaut werden. Denn Variationen in den hydraulischen Parametern, wie z. B. in der hydraulischen Leitfähigkeit (k_f) oder Porosität, wirken sich direkt auf den Transport von Schadstoffen aus. Zur Bestimmung der räumlichen Verteilung hydraulischer Parameter können verschiedene Feldmethoden angewandt werden [5, 6]. Trotz der grossen Vielfalt von Methoden zur direkten und indirekten Messung von hydraulischen Parametern kann deren räumliche Verteilung nie komplett bestimmt werden. Vorhandene Messungen sollten daher immer als spärlich vorhandene Punktinformation betrachtet werden.

In starkem Gegensatz dazu stehen die Anforderungen numerischer Grundwassermodelle, die eine zwei-(2D-) oder dreidimensionale (3D-)Grundwassermodell-Konzeptualisierung und Parameterverteilung voraussetzen. Eine Kalibrierung von Grundwassermodellen ist daher unabdingbar, um eine geeignete Parameterverteilung zu ermitteln. Allerdings wurde wiederholt nachgewiesen, dass Grundwasserspiegelmessungen allein nicht genügend Informationen enthalten, um geeignete Parametrisierungen für die meisten Modellierungszwecke zu finden [7–12]. Die Beschränkung der Kalibrierung von Modellen auf Grundwasserspiegelmessungen steht in grossem Gegensatz zur ständig wachsenden Verfügbarkeit von anderen Grundwasserbeobachtungen und -messungen [13]. Die Berücksichtigung unkonventioneller Beobachtungen, wie z. B. Grundwassertemperaturen, Grundwasserverweil- und fließzeiten sowie Mischungsverhältnisse, stellt eine vielversprechende Alternative dar, um die Vorhersageunsicherheit von Modellen massiv zu verringern. Selbst vereinfachte Ansätze zur Integration von Tracerkonzentrationen und Messungen des Austauschs zwischen Grund- und Oberflächengewässern führen zu deutlich vertrauenswürdigen Modellen [13]. Allerdings birgt das Hinzuziehen weiterer Beobachtungen auch Tücken: So verbessern bspw. Temperaturbeobachtungen zwar typischerweise die Simulation des Wärmetransports, können aber gleichzeitig die Simulation von Grundwasserströmungen und Stofftransport verschlechtern [14, 15]. Lange Simulationszeiten von sehr komplexen Modellen stellen ebenfalls eine gewisse Hürde dar, aber aufgrund der rasanten Entwicklung von immer leistungsfähigeren Computern und Cloud-basierten, kommerziellen Supercomputer-Infrastrukturen ist dies langfristig von immer kleinerer Bedeutung.

Die Geometrie des Zuströmbereichs kann jedoch nicht nur aufgrund von Unsicherheiten in den hydraulischen Parametern beeinflusst sein, sondern z. B. auch durch unzureichend bekannte Randbedingungen oder zukünftige Grundwasserentnahmemengen. Die explizite Berücksichtigung der Randbedingungen erhöht zwar die Komplexität und den Zeitbedarf der Grundwassermodellierung, aber wenn Randbedingungen Hauptfaktoren für die Vorhersageunsicherheit sind, besteht bei einer Nichtberücksichtigung die Gefahr, dass eine Kalibrierung der hydraulischen Parameter falsche Randbedingungen kompensiert [16, 17]. Dies wiederum kann negative und nur sehr schwer zu identifizierende Auswirkungen auf Modellvorhersagen haben.

Da Modellparameter aufgrund der Ambivalenz von Zustandsvariablen wie z. B. Grundwasserspiegelmessungen oft nicht eindeutig bestimmbar sind, sind in den meisten Fällen mehrere Parameterkombinationen gleichermaßen in der Lage, die vorhandenen Messdaten zu reproduzieren [13, 18]. Grund-



wassermodellvorhersagen sollten daher prinzipiell auf der Grundlage mehrerer Parameterkombinationen errechnet werden. Wegen des oft zusätzlichen Aufwands wird dies in der Praxis nur selten durchgeführt, zudem werden eindeutige, deterministische Aussagen beim Entscheidungsfindungsprozess generell bevorzugt [19, 20]. In der Praxis werden Grundwassermodelle daher oft durch Parameterreduktion vereinfacht, um eine Eindeutigkeit der Modellergebnisse zu erzwingen [21]. Hierbei wäre z.B. eine Zonierung des Untergrundes zu homogenen Einheiten zu nennen, die jedoch nicht zu einer substanziellen Reduktion der Vorhersageunsicherheiten aufgrund der natürlichen Heterogenität des Untergrundes führt [7, 22]. Um diesen Problemen Abhilfe zu schaffen, wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl recheffizienter Methoden entwickelt, die einerseits eine grosse Flexibilität für die parallele Erstellung multipler Grundwassermodelle und deren Unsicherheitsanalyse bieten, und es andererseits auch erlauben, verschiedene Beobachtungstypen sowie Expertenwissen systematisch in die Modellerstellung und -evaluation mit einzubeziehen [23]. Allerdings klafft zwischen akademischen Ansätzen und Ansätzen in der Praxis nach wie vor eine Lücke [19]. Die Gründe für die bestehende Lücke sind vielfältig. Nach unserer Einschätzung sind in der Praxis zwar sowohl das Bewusstsein wie auch die Kompetenzen vorhanden, um die notwendige Quantifizierung der Unsicherheiten von Modellen umzusetzen,



Fig. 2 Räumliche Zuströmlinien-Dichteverteilungen für (a) die Trinkwasserbrunnen und (b) den Sand-und-Kies-Grundwasserleiter. Die Partikelrückverfolgung wurde für 880 kalibrierte Modellrealisierungen durchgeführt (verändert nach [16]).

aber auf Kundenseite sind die Vorteile dieser Ansätze oft noch nicht genügend bekannt.

Ein erhebliches Potenzial für den Grundwasserschutz und Bewirtschaftungsstrategien ist hier noch brachliegend und oft wird nur ein geringer Teil der vorhandenen Möglichkeiten der Erstellung multipler Grundwassermodelle und von deren Unsicherheitsanalyse genutzt. Daher plädieren wir dafür, die Vorteile der Unsicherheitsanalyse breiter, verständlicher und überzeugender darzulegen und den Kunden das wirtschaftliche Potenzial dieses Ansatzes zu verdeutlichen. In anderen Bereichen wie z.B. in der Meteorologie (Wettervorhersagen mit Regenwahrscheinlichkeit), aber auch in der Finanzbranche (Anlageprodukte mit kurz- und langfristiger Unsicherheitsabschätzung) sind die Betrachtung und

Angaben von Vorhersageunsicherheiten bereits jetzt gängige Praxis. Anhand von Fallbeispielen (Fig. 1) wollen wir hier aufzeigen, welche Vorteile eine systematische Quantifizierung der Unsicherheit von Grundwassermodellen liefert, welche Vorteile moderne Modellkalibrationen haben und wie die daraus gewonnenen Erkenntnisse Entscheidungsträgern helfen können, die allgemeine Zuverlässigkeit von Vorhersagen besser zu verstehen und spezifische Stärken und Schwächen eines Modells zu erkennen. Darüber hinaus unterstreichen wir den wichtigen Zusammenhang zwischen Datenverfügbarkeit und Modellzuverlässigkeit, und wie eine kluge Planung der anzuwendenden Tracertests und Beobachtungen mit Modelliermethoden die Unsicherheit von Grundwassermodellen signifikant verringern kann.

BEISPIEL 1: WASSERVERSORGUNG BASEL

Im Hardwald in Muttenz wird Rheinwasser zur Grundwasserneubildung künstlich versickert und anschliessend zur Trinkwassergewinnung genutzt. Jährlich werden etwa 14,2 Mio. m³ Grundwasser entnommen, infiltriert werden rund 33 Mio. m³ Rheinwasser. Durch die hohen Infiltrationsraten entsteht im Bereich der Anreicherung eine hydraulische Barriere [24], die das Grundwasser vor den im Nahbereich des Trinkwassergewinnungsgebiets vorhandenen urbanen und industriellen Einflüssen schützt [25–28]. Für die Sicherheit der Trinkwasserfassung ist ein gutes Verständnis der Grundwasserzirkulation und Auswirkung der Wasserbewirtschaftungsstrategie unabdingbar, wobei es hier zu erwähnen gilt, dass das gewonnene Grundwasser zur Beseitigung von Mikroverunreinigungen noch durch Aktivkohle aufbereitet und mittels einer nachgeschalteten UV-Anlage entkeimt wird [29].

Das Gebiet ist hydrogeologisch komplex und wird durch zahlreiche Randzuflüsse beeinflusst. Um der Komplexität Rechnung zu tragen, wurden zur Erstellung eines geologischen 3D-Modells der Region die geologischen Daten aus mehr als 1200 Bohrprotokollen verwendet [24, 30–32]. Das Modell bildet die Grundlage für den Aufbau eines Grundwassermodells basierend auf dem FEFLOW-Code (*DHI-Wasy GmbH*) [33, 16]. Das stationäre Grundwassermodell wurde anhand von Grundwasserpegelmessungen von 116 Messstellen unter Verwendung des Codes PEST [22] kalibriert. Das Softwarepaket automatisiert die Kalibrierung und die Unsicherheitsanalyse eines beliebigen numerischen Modells. Die räumlichen Variationen von k_f wurden mithilfe eines *Pilot-Point*-Ansatzes für jede der Modellschichten beschrieben. *Pilot Points* sind eine Alternative zum Zonierungsansatz, bieten eine grosse Flexibilität bei der Kalibrierung heterogener Systeme und erlauben es zudem, Expertenwissen systematisch miteinzubeziehen [22]. Anschliessend wurde der *Pilot-Point*-Ansatz mit einer *Null-Space-Monte-Carlo*-Analyse [34] kombiniert, um insgesamt 1000 verschiedene k_f -Verteilungen zu generieren. Insgesamt führten rund 88% der generierten Parameterkombinationen zu Simulationen, die als zufriedenstellend

und daher als «kalibriert» bezeichnet werden konnten [16]. Während alle kalibrierten Parameterkombinationen ähnliche räumliche Muster wie das geologische Modell aufzeigten, wiesen sie dennoch eine beachtliche Heterogenität und Varianz auf.

Um die Zuströmbereiche des beprobten Grundwassers auszuschneiden, wurde Partikelrückverfolgung auf alle kalibrierten Modellparametersätze angewandt. Aufgrund der Varianz in den k_f -Verteilungen konnte aus der jeweiligen Anzahl an Partikeln, die auf einen Trinkwasserbrunnen trafen, eine räumliche Zuströmlinien-Dichteverteilung errechnet werden (*Fig. 2*). Konkret zeigte dies für die Trinkwasserbrunnen des Hardwalds, dass der primäre Zustrom des Grundwassers aus der Nähe der Versickerungsanlage erfolgt (*Fig. 2*) – also das für den Bewirtschaftungsplan erwünschte Ergebnis. Nur bei einigen wenigen Brunnen könnte ein Teil des gepumpten Wassers auch aus einer regionalen Grundwasserkomponente stammen [16]. Das Ergebnis der Zuströmlinien-Dichteverteilung kann als eine Kompilation vieler möglicher Systemzustände betrachtet werden. Tatsächlich wurde eine Mischung aus künstlich infiltriertem Wasser und regionalem Grundwasser beobachtet [24–26, 35].

Zusätzlich zeigte sich, basierend auf einer linearen Unsicherheitsanalyse, dass die Vorhersageunsicherheit nur geringfügig durch die Kalibrierung gegen Grundwasserstände reduziert werden kann, was darauf hindeutet, dass der genutzte Grundwassermessdatensatz nicht genügend Informationen für die inverse Schätzung der Parameter beinhaltet. Das Hinzufügen von unkonventionellen Beobachtungen würde dazu beitragen, die Kalibration und die Vorhersagen zu verbessern.

BEISPIEL 2: WASSERVERSORGUNG EMMENTAL UND REGION BERN

Die Trinkwasserfassung Aeschau bei Signau im Emmental ist mit einer Entnahmemenge von 24 000 l/min eine der grössten Trinkwasserfassungen des Kantons Bern. Via acht Trinkwasserbrunnen wird Grundwasser aus einem Grundwasserleiter, der aus komplexen, fluvio-glazialen Sand-Kies-Ablagerungen besteht, in unmittelbarer Nähe der Emme gepumpt. Um möglichen Gefahren durch landwirtschaftliche Prozesse vorzu-

beugen, müssen die Fliesspfade durch das Brunnenfeld gut verstanden und das Kontaminationsrisiko durch ein geeignetes Pumpenmanagement eingedämmt werden.

Einem historischen Gutachten gemäss wurden die Brunnen gezielt in 10–15 m Tiefe eines ehemaligen Flussbetts mit erhöhter k_f und dadurch erhöhter Ergiebigkeit versenkt [36]. Weil die erhöhte k_f auf eine präferenzielle Ausrichtung der alluvialen Kiese und Sande aufgrund vergangener Fliessrichtung der Emme zurückzuführen ist und nicht auf andere Gesteinsarten, ist dessen direkte Identifikation und Ausscheidung schwierig [8, 37–40]. Um dennoch quantifizieren zu können, in welchem Masse das gepumpte Grundwasser aus jungem Uferfiltrat besteht, und um zu ermitteln, inwiefern das historische Flussbett durch inverse Modellierung identifiziert werden kann, wurden mehrere Feld- und Modellstudien durchgeführt [40–45].

Um eine möglichst akkurate Abbildung der lokalen Fliesspfade zu garantieren, wurde das vollumfänglich gekoppelte Grundwasser-Oberflächengewässer-Fliessmodell *HydroGeoSphere* verwendet (*Aquanty. Inc.*; [46]). In einem ersten Schritt wurden das Brunnenfeld und die Emme als ein System, bestehend aus einem homogenen Grundwasserleiter und einem der Emme unterliegenden, homogenen Flussbett, konzeptualisiert. Mittels PEST wurden die k_f -Werte gegen gemessene Grundwasserstände kalibriert [47]. In einem weiteren Schritt wurde das Modell als ein komplett heterogenes System konzeptualisiert und mittels *Ensemble-Kalman*-Filter (EnKF) gegen einen weiteren Datensatz an gemessenen Grundwasserständen kalibriert, wobei 128 verschiedene heterogene k_f -Verteilungen generiert wurden [44, 46]. Während die kalibrierte homogene und alle heterogenen k_f -Verteilungen die beobachteten Grundwasserstände gleichermaßen gut abbildeten, wurde in keinem der betrachteten Fälle ein ehemaliges Flussbett in 10–15 m Tiefe entlang der Trinkwasserbrunnen ersichtlich [46]. Grundwasserstände erwiesen sich als ambivalent in Bezug auf deren Aussagekraft über die Verteilung von k_f [13]. Als Alternative zur Kalibrierung einzig gegen Grundwasserstände wurden im Falle des homogenen Modells zusätzlich Tracer-basierte Grundwasseraufenthaltszeiten und Mischverhältnisse

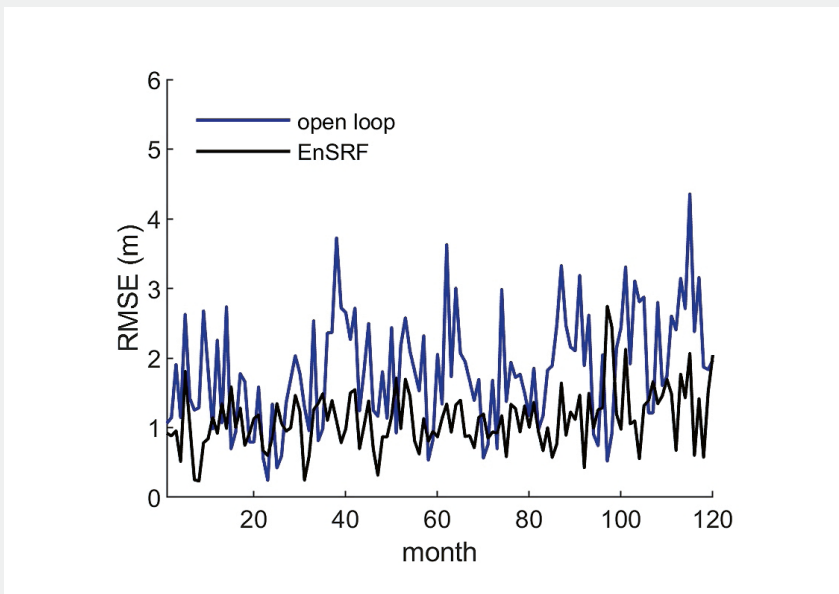


Fig. 3 Root Mean Square Error (RMSE) der Grundwasserstände. RMSE sagt aus, um wie viel die Simulation von der Messung abweicht. Resultate stellen einen kalibrierten Modelllauf, der nicht aktualisiert wird (open loop), sowie ein kalibriertes Modell, das in Echtzeit aktualisiert wird (EnSRF), dar (aus [52]).

zwischen Uferfiltrat und regionalem Grundwasser im gepumpten Trinkwasser herbeigezogen und zusätzlich zu den k_f -Werten auch die Porosität kalibriert [47]. Während auch das so kalibrierte, immer noch homogene Modell nicht in der Lage war, ein historisches Flussbett abzubilden, reproduzierte das gegen Grundwasserstände, Aufenthaltszeiten und Mischverhältnisse kalibrierte Modell als einziges Modell auch diese Messungen in angemessener Weise – selbst für Messungen, die erst Jahre nach der ursprünglichen Studie durchgeführt wurden [45]. Es zeigte sich, dass ein numerisches Fliessmodell eines für die Schweiz typischen, alluvialen Sand- und Kies-Grundwasserleiters, das lediglich gegen Grundwasserstände kalibriert wurde, keine verlässlichen Aussagen über Aufenthaltszeiten oder Mischverhältnisse zulässt. Dies ist selbst dann der Fall, wenn dem Modell eine heterogene k_f -Verteilung innewohnt. Es müssen daher nicht nur eine Vielzahl von gleichmassigen kalibrierten k_f -Verteilungen identifiziert werden, sondern auch geeignete weitere Messdaten herangezogen werden.

BEISPIEL 3: WASSERVERSORGUNG ZÜRICH

Das Grundwasserwerk Hardhof fördert seit den 1930er-Jahren Grundwasser [49] und spielt mit einer aktuellen täg-

lichen Fördermenge von ca. 25 000 m³ eine wichtige Rolle für die Wasserversorgung der Stadt und Region Zürich. Das stadtseitig zu den vier Horizontalfilterbrunnen (HFB) zufließende Grundwasser ist aufgrund seiner Lage und der Stadtentwicklung mit Risiken behaftet [50]. Deshalb wurde in den 80er-Jahren ein künstliches Anreicherungssystem installiert, welches das zu den Brunnen zufließende städtische Grundwasser mittels hydraulischer Barriere vom Hardhof weggleiten soll. Tracerveruche [51] zeigten allerdings eine nicht ausreichende Wirksamkeit des Anreicherungsprozesses.

Untersuchungen zeigen, dass der Schotter-Grundwasserleiter Limmattal einen uneinheitlichen Aufbau mit schwankenden k_f -Werten sowie einer sehr variablen Mächtigkeit aufweist [53]. Der Grundwasserfluss wird von den Interaktionen mit Limmat und Sihl sowie anthropogenen Nutzungen dominiert. Grundwasserneubildung und Randzuflüsse haben ebenfalls, auch wenn reduziert, einen Einfluss auf die hydrogeologische Situation. Alle diese Einflussgrößen weisen eine grosse zeitliche Dynamik und Varianz auf. Eine optimale Bewirtschaftung der Anreicherungsanlagen kann daher nur unter Berücksichtigung der aktuellen Einflussgrößen in Echtzeit erfolgen. Aufgrund der Komplexität des hydrogeologischen Systems wurde für die Bewirtschaftung

ein numerisches Grundwassermodell (SPRING) erstellt und mit *Pilot Points* unter Verwendung von PEST gegen Grundwasserstandsmessungen kalibriert. Die Nichteindeutigkeit einer Kalibrierung alleine gegen diese Grundwasserstände wurde bereits ausführlich diskutiert. Bei der täglichen, instationären Anwendung des Grundwassermodells pflanzen sich Modellfehler unweigerlich fort und Vorhersagen können teils stark vom realen Systemzustand abweichen (Fig. 3).

Eine Lösung zur Reduzierung der Unsicherheiten im Echtzeitbetrieb ist die periodische automatische Neukalibrierung eines Grundwassermodells. Allerdings ist diese rechenintensiv und eine optimale Charakterisierung des aktuellen hydrogeologischen Systemzustands auch dann nicht garantiert [54]. Alternativ zur automatisierten Kalibrierung (z. B. mittels PEST) haben sich EnKF in den letzten Jahren zur periodischen Neukalibrierung von Grundwassermodellen bewährt (z. B. [54–57]). Auf Basis der aus den periodischen Neukalibrierungen und Messungen bekannten Unsicherheiten können dann beispielsweise mittels *Latin Hypercube Sampling* [58] mehrere gleichmassigen kalibrierte Kombinationen an hydraulischen Parametern, Rand- und Anfangsbedingungen erzeugt werden. Mit diesen Modellen kann analog zum *Null-Space-Monte-Carlo-Ansatz* eine Verteilung (ein Ensemble) an Grundwasserständen simuliert werden, die die Unsicherheiten widerspiegeln. Einerseits besteht so die Möglichkeit, die modellierten Grundwasserstände und wahlweise auch Parameter kontinuierlich zu korrigieren. Andererseits ermöglicht das Ensemble die Ableitung einer Dichtefunktion der Zielgrößen und somit die stochastische Interpretation von Grundwasservorhersagen (vgl. *Fallbeispiel 1*). Generell wurde gezeigt, dass Grundwassermodell-Unsicherheiten mittels EnKF substantiell minimiert werden können (s. z. B. [52, 54, 55]).

Im Echtzeitsystem Hardhof dient die Parameterkombination mit der höchsten errechneten Wahrscheinlichkeit einer nachgelagerten Prozessoptimierung. Auf Basis der assimilierten Grundwasserstände wird die Infiltrationsmenge täglich so optimiert, dass ein minimaler Anteil an Stadtwasser in den Horizontalfilterbrunnen resultiert. Die Echtzeit-assimilierung und die Optimierung

erfolgen täglich [59] und sind somit ein wichtiger Bestandteil für die Festlegung des aktuellen Betriebsregimes.

KOMMUNIKATION UND SCHLUSSFOLGERUNG

Wir möchten betonen, dass eine effektive Kommunikation von Modellergebnissen an Entscheidungsträger von entscheidender Bedeutung ist und die Unsicherheiten eines Modells und dessen Kalibrierung klar kommuniziert werden sollten. Da der Begriff «Unsicherheit» selbst in der Fachliteratur viele verschiedene Definitionen kennt, schlagen wir für eine klare Kommunikation von Modellunsicherheiten vor, die vom *International Panel on Climate Change* [60] beschriebene Terminologie als Standard für die angewandte Grundwassermodellierung zu verwenden. Diese Terminologie stellt ein weithin geprüftes Vokabular zur Bewertung von Unsicherheiten spezifischer Ergebnisse mithilfe von Expertenurteilen und statistischen Analysen sowie statistischen Deskriptoren zur Verfügung. Darüber hinaus empfehlen wir, Modellprognosen mit einer Genauigkeit anzugeben, die mit Modellannahmen und der Qualität verfügbarer Beobachtungen übereinstimmt. Auch sollte ein Format gewählt werden, das am direktesten auf die betreffende Entscheidung anwendbar ist. So sollten visuelle Darstellungen gegenüber Tabellen und Text bevorzugt werden, idealerweise unter Einbezug der Unsicherheitsgrenzen einzelner Vorhersagen oder der Unsicherheit eines Ensembles an Ergebnissen mehrerer Simulationen.

Die optimale Entscheidung ist fast nie diejenige, die einer durchschnittlichen Schätzung der interessierenden Variablen entspricht. Die Quantifizierung der Unsicherheiten von Modellen ist daher von grösster Bedeutung, nicht nur, weil sie eine Risikoabschätzung erst ermöglicht, sondern vor allem, weil sie es erlaubt, in einem unsicheren Rahmen optimale Lösungen zu finden.

Der Hauptvorteil der vorgestellten Techniken liegt darin, dass Unsicherheiten, die jeder Grundwasserstudie innewohnen, quantifiziert werden können. Sie ermöglichen eine Bewertung der Unsicherheiten, die sich aus der natürlichen Heterogenität und einem Mangel an Grundwasserbeobachtungen

und Informationen über Planung und Management ergeben. Traditionelle Modellierungsansätze können die zugrunde liegenden Unsicherheiten nicht abbilden. Einzelne Simulationen können einer ersten hydrogeologischen Abschätzung dienen, jedoch sollten Modellergebnisse und damit verbundene Entscheidungen nicht auf einer einzigen Modellsimulation beruhen. Das Einbeziehen mindestens eines neben Grundwasserständen zusätzlichen Messdatentyps in die Kalibrierung von Grundwassermodellen erhöht nicht nur die Identifizierbarkeit von Modellparametern, sondern verbessert auch die Vorhersagefähigkeit des Modells. Das Einbeziehen weiterer unkonventioneller Beobachtungen erhöht nicht nur die Identifizierbarkeit der Parameter, sondern kann auch helfen, falsche oder ungenaue Randbedingungen zu identifizieren. Das Implementieren eher unkonventioneller Messdatentypen in der Kalibrierung ist daher die zu bevorzugende Alternative zu einer nichtgerechtfertigten, künstlichen Verringerung der Komplexität von Grundwassermodellen. Ergebnisse und gewonnene Erkenntnisse aus Grundwassermodell-Unsicherheitsanalysen unterstreichen den wichtigen Zusammenhang zwischen Datenverfügbarkeit und Modellzuverlässigkeit und können, bei entsprechender Kommunikation, den Entscheidungsträgern dabei helfen, die allgemeine Zuverlässigkeit von Modellvorhersagen besser zu verstehen.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *BAFU (2021): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2020. Abfluss, Wasserstand und Wasserqualität der Schweizer Gewässer. Stand 2020. Bundesamt für Umwelt, Bern*
- [2] *Gorelick, S.M.; Zheng, C.M. (2015): Global change and the groundwater management challenge. Water Resour. Res., 51 no. 5: 3031–3051*
- [3] *Freeze, R.A. et al. (1990): Hydrogeological decision analysis: 1, a framework. Ground Water, 28(5), 738–766. doi: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb01989.x*
- [4] *Doherty, J.; Simmons, C.T. (2013): Groundwater modelling in decision support: reflections on a unified conceptual framework. Groundwater, 21, 1531–1537. Doi: 10.1007/s10040-013-1027-7*
- [5] *Brauchler, R. et al. (2012): Bestimmung von hydraulischen Parametern in Lockergesteinen: Ein Vergleich unterschiedlicher Feldmethoden. Grundwasser, 17(2), 57–67*
- [6] *Diem, S.; Vogt, T.; Hoehn, E. (2010): Räumliche*

- Charakterisierung der hydraulischen Leitfähigkeit in alluvialen Schottergrundwasserleitern: Ein methodenvergleich. Grundwasser, 15(4), 241–251*
- [7] *Anderson, M. P.; Woessner, W. W.; Hunt, R. J. (2015): Applied groundwater modelling (2nd ed.). Oxford, UK: Academic Press*
 - [8] *Brunner, P. et al. (2017): Advances in understanding river groundwater interactions. Rev. Geophys., 55(3), 818–854. doi: 10.1002/2017RG000556*
 - [9] *Delottier, H.; Pryet, A.; Dupuy, A. (2016): Why should practitioners be concerned about predictive uncertainty of groundwater management models? Water Resources Management, 31, 61–73. <https://doi.org/10.1007/s11269016-1508-2>*
 - [10] *Doherty, J.; Hunt, R. J. (2009): Two statistics for evaluating parameter identifiability and error reduction. Journal of Hydrology, 366(1–4), 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.018>*
 - [11] *Moore, C.; Doherty, J. (2006): The cost of uniqueness in groundwater model calibration. Advances in Water Resources, 29(4), 605–623. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.07.003>*
 - [12] *Brunner, P.; Doherty, J.; Simmons, C. T. (2012): Uncertainty assessment and implications for data acquisition in support of integrated hydrologic models. Water Resour. Res., 48(7)*
 - [13] *Schilling, O. S.; Cook, P. G.; Brunner, P. (2019): 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), 146–192. doi: 10.1029/2018RG000619*
 - [14] *Bravo, H. R.; Jiang, F.; Hunt, R. J. (2002): Using groundwater temperature data to constrain parameter estimation in a groundwater flow model of a wetland system. Water Resour. Res., 38(8), 1553. <https://doi.org/10.1029/2000WR001172>*
 - [15] *Irvine, D. J. et al. (2015): Heat and solute tracers: How do they compare in heterogeneous aquifers? Groundwater, 53(S1), 10–20. <https://doi.org/10.1111/gwat.12146>*
 - [16] *Moeck, C.; Molson, J.; Schirmer, M. (2020): Pathline density distributions in a Null-Space Monte Carlo approach to assess groundwater pathways. Groundwater, 58(2), 189–207*
 - [17] *Doherty, J.; Welter, D. (2010): A short exploration of structural noise. Water Resources Research, 46(5)*
 - [18] *Dausman, A.M. et al. (2010): Quantifying Data Worth Toward Reducing Predictive Uncertainty. Groundwater 48 no. 5: 729–740*
 - [19] *Renard, P. (2007): Stochastic hydrogeology: What professionals really need? Groundwater, 45: 531–541. doi: 10.1111/j.1745-6584.2007.00340.x*
 - [20] *Rubin, Y. et al. (2018): Stochastic hydrogeology's biggest hurdles analyzed and its big blind spot. Hydrology and Earth System Sciences, 22(11), 5675–5695*
 - [21] *Doherty, J. (2003): Ground water model calibration using pilot points and regularization. Groundwater*

- 41 no. 2: 170–177
- [22] Doherty, J. (2017): *PEST. Model-independent parameter estimation – User Manual parts I and II (7th Edition)*. Brisbane, Australia: Watermark Numerical Computing
- [23] Asher, M.J. et al. (2015): *A review of surrogate models and their application to groundwater modeling*. *Water Resour. Res.* 51 no. 8: 5957–5973
- [24] Moeck, C. et al. (2016): *Multicomponent statistical analysis to identify flow and transport processes in a highly-complex environment*. *Journal of Hydrology*, 542, 437–449
- [25] Moeck, C. et al. (2017): *Characterization of a managed aquifer recharge system using multiple tracers*. *Science of The Total Environment* 609: 701–714
- [26] Moeck, C. et al. (2017): *Estimating the spatial distribution of artificial groundwater recharge using multiple tracers*. *Isotopes in environmental and health studies*, 53(5), 484–499
- [27] Popp, A. L. et al. (2019): *Integrating Bayesian Groundwater Mixing Modeling With On-Site Helium Analysis to Identify Unknown Water Sources*. *Water Resour. Res.*, 55(12), 10602–10615
- [28] Auckenthaler, A. et al. (2010): *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* (pp. 167–170)
- [29] Gabriel, T.; Meier, T. (2014): *Aktivkohlefilteranlage – Die neue Anlage der Hardwasser AG*. *Aqua & Gas*, Nr. 12, S. 20–29
- [30] Butscher C.; Huguenberger, P. (2007): *Implications for karst hydrology from 3D geological modeling using the aquifer base gradient approach*. *Journal of Hydrology* 342:184–198
- [31] Spottke, I. et al. (2005): *The southeastern border of the Upper Rhine Graben: a 3D geological model and its importance for tectonics and groundwater flow*. *International Journal of Earth Sciences* 94 no. 4: 580–593
- [32] Scheidler, S. et al. (2021): *Regional groundwater flow and karst evolution – theoretical approach and example from Switzerland*. *Environ Earth Sci* 80, 201. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09471-3>
- [33] Moeck, C. et al. (2018): *Improved water resource management for a highly complex environment using three-dimensional groundwater modelling*. *Hydrogeology journal*, 26(1), 133–146
- [34] Tonkin, M.; Doherty, J. (2009): *Calibration-constrained Monte Carlo analysis of highly parameterized models using subspace techniques*. *Water Resources Research* 45
- [35] Moeck, C. et al. (2021): *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*. *Journal of contaminant hydrology*, 238, 103773
- [36] Arbenz, P. et al. (1925): *Expertenbericht zu Handen der Baudirektion des Kantons Bern betreffend Wasserableitung aus dem Emmental durch die Stadt Bern*. Bern
- [37] Huguenberger, P. et al. (1998): *Abiotic aspects of channels and floodplains in riparian ecology*. *Freshwater Biol.*, 40, 407–425. doi:10.1046/j.1365-2427.1998.00371.x
- [38] Siegenthaler, C.; Huguenberger, P. (1993): *Pleistocene Rhine gravel. Deposition of a braided river system with dominant pool preservation*. In J. L. Best & C. S. Bristow (Eds.), *Braided Rivers: Form, Process and Economic Application* (Vol. 75, pp. 147–162). London: Geological Society
- [39] Linde, N. et al. (2015): *Geological realism in hydrogeological and geophysical inverse modeling: A review*. *Adv. Wat. Res.*, 86, 86–101. doi:10.1016/j.advwatres.2015.09.019
- [40] Schilling, O. S. et al. (2022): *Buried paleo-channel detection with a groundwater model, tracer-based observations, and spatially varying, preferred anisotropy pilot point calibration*. *Geophys. Res. Lett.*
- [41] Figura, S. et al. (2013): *Competing controls on groundwater oxygen concentrations revealed in multidecadal time series from riverbank filtration sites*. *Water Resour. Res.*, 49, 7411–7426. doi: 10.1002/2013WR013750
- [42] Figura, S. et al. (2013): *Klima und Grundwasser. Rückblicke und Vorhersagen von Temperatur und Sauerstoff mittels historischer Aufzeichnungen*. *Aqua & Gas*, 93(7-8), 28–33
- [43] Käser, D.; Hunkeler, D. (2016). *Contribution of alluvial groundwater to the outflow of mountainous catchments*. *Water Resour. Res.*, 52(2), 680–697
- [44] Kurtz, W. et al. (2017): *Integrating hydrological modelling, data assimilation and cloud computing for real-time management of water resources*. *Environ. Model. Softw.*, 93, 418–435. doi:10.1016/j.envsoft.2017.03.011
- [45] Popp, A. L. et al. (2021): *A framework for untangling transient groundwater mixing and travel times*. *Water Resour. Res.*, 57(4), e2020WR028362. doi:10.1029/2020WR028362
- [46] Tang, Q. et al. (2018): *Simulating flood induced riverbed transience using unmanned aerial vehicles, physically-based hydrological modelling and the ensemble Kalman filter*. *Water Resour. Res.*, 54(11), 9342–9363. doi: 10.1029/2018WR023067
- [47] Schilling, O. S. et al. (2017): *Advancing physically-based flow simulations of alluvial systems through observations of ^{222}Rn , $^3\text{H}/^3\text{He}$, atmospheric noble gases and the novel ^{37}Ar tracer method*. *Water Resour. Res.* Dol: 10.1002/2017WR020754
- [48] Brunner, P.; Simmons, C. T. (2012): *HydroGeoSphere: a fully integrated, physically based hydrological model*. *Ground water*, 50(2), 170–176
- [49] Stadt Zürich Wasserversorgung (2015): *Grundwasserwerk Hardhof – Wie Grundwasser zu Trinkwasser wird*
- [50] Bauser, G. (2011): *Real-time control of an urban groundwater well field – offline simulations and on-line application*. Dissertation ETH Zürich Nr. 19487
- [51] Kaiser, H.P. (2001): *Grundwasserströmungen im Hardhof, Tracerversuche 2000/2001*. («Groundwater flow in the Hardhof. Tracer tests 2000/2001»). Water works of the city of Zurich, Switzerland. (Not published)
- [52] Li, N. et al. (2021): *Improving parameter and state estimation of a hydrological model with the ensemble square root filter*. *Advances in Water Resources*, 147, 103813
- [53] Jäckli Geologie (2020): *Grundwasserwerk Hardhof (GWR b1-71). Wasserversorgung Stadt Zürich. Überprüfung und Aktualisierung der Schutzzonen – Hydrogeologischer Bericht*
- [54] Hendricks Franssen, H.-J. et al. (2011): *Operational real-time modeling with Ensemble Kalman Filter of variably saturated subsurface flow including stream-aquifer interaction and parameter updating*. *Water Resour. Res.*, doi:47.10.1029/2010WR009480
- [55] Evensen, G. (2003): *The ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation*. *Ocean Dynamics*, 53(4):343–367
- [56] Franssen, H.-J.-H. et al. (2009): *Echtzeitmodellierung der Grundwasserströmung am Beispiel Hardhof Zürich*. *gwa* 04/09, S.267–274
- [57] Kurtz, W. et al. (2014): *Joint assimilation of piezometric heads and groundwater temperatures for improved modeling of river-aquifer interactions*. *Water Resour. Res.*, 50, 1665–1688, Dol: 10.1002/2013WR014823
- [58] Cochran, W.G. (1977): *Sampling Techniques*, 3rd edn. John Wiley and Sons, New York
- [59] Kuhlmann, U. et al. (2007): *Handbuch Grundwassermodell Hardhof – Version 5*. Stadt Zürich Wasserversorgung
- [60] Budescu, D. V. et al. (2014): *The interpretation of IPCC probabilistic statements around the world*. *Nature Climate Change*, 4(6), 508–512

> SUITE DU RÉSUMÉ

çon pour obtenir une quantification fiable des incertitudes inhérentes à ces modélisations, cette approche est rarement appliquée dans la pratique. Nous plaçons donc en faveur du comblement de cette lacune et démontrons comment une quantification des incertitudes inhérentes aux modélisations des eaux souterraines peut aider les décideurs à mieux comprendre la fiabilité générale des prévisions fondées sur ces modélisations et à identifier leurs forces et leurs faiblesses. En outre, nous montrons comment une planification minutieuse et prospective des données de mesure à collecter permet de réduire de manière substantielle les incertitudes inhérentes aux modélisations.