

KOMMENTAR



Stellungnahme zum Kommentar von Wilfried Uhlmann und Carolin Pezenka zum Beitrag „Quantifizierung lokaler Grundwassereintritte in die Spree und deren Bedeutung für die Verockerungsproblematik in der Lausitz“ in Grundwasser 25 (3), 231–241 (2020)

Sven Frei¹  · Benjamin Silas Gilfedder^{1,2}

Eingegangen: 4. März 2021 / Überarbeitet: 17. März 2021 / Angenommen: 26. April 2021 / Online publiziert: 14. Juni 2021

© Der/die Autor(en) 2021

Statement on the comment by Wilfried Uhlmann and Carolin Pezenka on the publication “Mapping and quantifying groundwater inflow to the Spree River (Lusatia) and its role in Fe precipitation and coating of the river bed” in Groundwater 25 (3), 231–241 (2020).

Wir bedanken uns für das entgegengebrachte Interesse an unserer Arbeit sowie für die sachliche und aufschlussreiche Diskussion seitens der Autoren des Kommentares. Als Verfasser des Beitrages „Quantifizierung lokaler Grundwassereintritte in die Spree und deren Bedeutung für die Verockerungsproblematik in der Lausitz“ freut es uns insbesondere zu hören, dass unsere Forschung in fachspezifischen Kreisen Gehör findet und somit einen konstruktiven Beitrag leisten kann. Als Teil unserer Studie benutzen wir Radon (Rn) als natürlichen Tracer für die Quantifizierung von lokalen Grundwassereintritten in die Spree und Kleine Spree im Bereich des Lausitzer Braunkohlereviere. Als Teil des Kommentares von Wilfried Uhlmann und Carolin Pezenka werden einige Aspekte unserer Arbeit kritisch hinterfragt und mit dieser Antwort wollen wir dazu Stellung nehmen. Als zentrale Kritikpunkte wurden genannt: 1) Mangelnde Reflexion der Witterungsverhältnisse im Untersuchungszeitraum mit Hinblick auf die ermittelten Grundwasserzuflussraten, 2) Nichtbeachtung der Anbindung zwischen Grundwasser und Vorfluter bei der Quantifizierung der Grundwasserzuflussraten, 3) Nichtbeachtung des Ausbauszustandes des

Fließgewässers, 4) Nichtbeachtung relevanter Oberflächenzuflüsse bei der Modellierung der Rn-Massenbilanz und 5) Fehlerhafte Bilanzierung des Eisenrückhalts.

Bevor wir auf die Punkte 1–5 im Detail eingehen, wollen wir zunächst kurz die Rahmenbedingungen klären, unter denen diese Studie entstanden ist. Die Daten zu dieser Studie wurden im Rahmen einer Masterarbeit eines der Co-Autoren (Fabian Wismeth) erhoben. Im Vorfeld zu den Feldarbeiten in der Lausitz wurde von Herrn Wismeth intensiv nach wissenschaftlicher Literatur zur Verockerungsproblematik in der Lausitz recherchiert. Dabei stellte sich jedoch heraus, dass zahlreiche Informationen und Daten, wohl aufgrund der politischen Brisanz des Themas, nicht öffentlich zugänglich sind und wenn dann oft nur als Teil der „grauen Literatur“. In dem Kommentar von Wilfried Uhlmann und Carolin Pezenka werden Daten und Kartenmaterial präsentiert, die für die Durchführung und Interpretation unserer Arbeit in der Vergangenheit sehr hilfreich gewesen wären. Da für das in dem Kommentar präsentierte Material allerdings keine Referenzen angegeben werden, müssen wir davon ausgehen, dass dieses nicht öffentlich zugänglich ist. Im Vorfeld zu den Feldarbeiten hat Herr Wismeth zudem intensiv den Kontakt mit der LMBV (Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft) gesucht, um an für seine Arbeit relevante Informationen (Grundwassergleichpläne, Grundwassermessstellen etc.) zu kommen und um ggf. eine Kooperation mit der LMBV zu etablieren. Leider blieben die Kontaktbemühungen seinerseits erfolglos. Auf der anderen Seite bietet der spärliche Zugang zu Daten und Informationen die Möglichkeit einer unabhängigen und vor allem objektiven Bewertung der Lage in der

✉ Sven Frei
sven.frei@uni-bayreuth.de

¹ Lehrstuhl für Hydrologie, Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung (BAYCEER), Universität Bayreuth, Bayreuth, Deutschland

² Limnologische Station, Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung (BAYCEER), Universität Bayreuth, Bayreuth, Deutschland

Lausitz. Eine Möglichkeit die wir mit unserer Studie umgesetzt haben.

Mangelnde Reflexion der Witterungsverhältnisse im Untersuchungszeitraum

Für zwei Messkampagnen, durchgeführt im Mai und August 2018, wurden als Teil unserer Studie lokale Grundwasserzuflüsse für die Spree und Kleine Spree, basierend auf dem Rn-Verfahren (Wanninkhof et al. 1990; Cook 2013; Frei und Gilfedder 2015), ermittelt. Für beide Termine waren sowohl die klimatischen Bedingungen als auch die Abflussverhältnisse vergleichbar. Trotz der vergleichbaren Bedingungen waren die durch das Rn-Verfahren ermittelten Grundwasserzuflüsse im Mai mit 6840 m³/d (Kleine Spree) und 19.800 m³/d (Spree) im Vergleich zum August mit 2650 m³/d (Kleine Spree) und 38.100 m³/d (Spree) sehr unterschiedlich. Bei der Bestimmung der lokalen Grundwasserzuflüsse mit dem Rn-Verfahren lässt sich der Einfluss der Witterungsverhältnisse nicht explizit in der Massenbilanzmodellierung berücksichtigen. Vielmehr unterliegt die Anwendung des Verfahrens der grundlegenden Annahme, dass sich der Einfluss der Witterung auf den Austausch zwischen Grund- und Oberflächengewässer in den gemessenen Rn-Aktivitäten im Fließgewässer widerspiegelt (Cook et al. 2018). Die Quantifizierung der Grundwasserzuflussraten basiert dabei auf der inversen Modellierung der Rn-Massenbilanz für die einzelnen untersuchten Flussabschnitte, unter Berücksichtigung der im Fließgewässer gemessenen Rn-Aktivitäten (Frei und Gilfedder 2015). Die Modellierung der lokalen Massenbilanzen für Rn ist mit Unsicherheiten verbunden, die sich direkt auf die ermittelten Grundwasserzuflussraten auswirken. Der größte Unsicherheitsfaktor ist dabei die Bestimmung einer repräsentativen Endmember-Aktivität für Rn (Peterson et al. 2010; McCallum et al. 2012). Um diesen Unsicherheitsfaktor in unserer Studie zu berücksichtigen, arbeiten wir mit einer Verteilung an wahrscheinlichen Endmember-Aktivitäten, die auf Werten basiert, die vor Ort im Einzugsgebiet gemessen wurden (siehe Abb. 3 in unserer Studie). Unter Berücksichtigung der Unsicherheit bzgl. der Endmember-Aktivitäten ergeben sich Variationsbereiche für die Grundwasserzuflüsse zwischen 5500 und 8520 m³/d (Kleine Spree) und 14.400 und 31.000 m³/d (Spree) für den Mai 2018 sowie zwischen 2040 und 4190 m³/d (Kleine Spree) bzw. 29.500 und 58.400 m³/d (Spree) für den August 2018. Der Anteil des gesamten Grundwasserzuflusses am Oberflächenabfluss variiert dabei, für die beiden Fließgewässer und Messperioden, zwischen 3 und 5 %. Eine abschließende und vollends überzeugende Antwort, weshalb die ermittelten Zuflussraten im Mai so unterschiedlich zu den Werten

im August sind, können wir an dieser Stelle leider nicht liefern. Wir können jedoch festhalten, dass diese Werte sich aufgrund der Rn-Messdaten (unter Berücksichtigung der Unsicherheiten des Verfahrens) ergeben und hinsichtlich der in unserer Studie ebenfalls ermittelten Wasserbilanz für die untersuchten Fließabschnitte der Spree und Kleinen Spree in durchaus plausiblen Größenordnungen liegen.

Nichtbeachtung der Grundwasserverhältnisse in der Flussumgebung

Die lokale Anbindung des Grundwassers an ein Fließgewässer lässt sich bei dem verwendeten Modellansatz nicht, wie etwa bei numerischen Grundwassermodellen, explizit in dem Modellansatz berücksichtigen (Frei und Gilfedder 2015). Hier unterliegt das Verfahren (ähnlich wie unter Punkt 1 beschrieben) der grundlegenden Annahme, dass sich die lokale Anbindung bzw. der Austausch zwischen Grund- und Oberflächenwasser in den gemessenen Rn-Aktivitäten im Fließgewässer widerspiegelt. Neben oberirdischen Zuflüssen mit hohem Grundwasseranteil sind direkte Grundwasserzuflüsse die wichtigste Quelle für Rn in einem Fließgewässer (Cook 2013). Zunehmende Rn-Aktivitäten sind deshalb ein eindeutiges Indiz für lokalen Grundwasserzufluss. Ebenso weisen stabile bzw. nur leicht abfallende Rn-Aktivitäten auf eintretendes Grundwasser hin, da hier ein Teil des zerfallenen bzw. entgasteten Rn durch lokale Grundwasserzuflüsse ausgeglichen wird.

Die Autoren stellen in Ihrem Kommentar fest, dass zwischen den Messpunkten K4 und K8 (Kleine Spree) sowie SP6 und SP9 (Spree) der Grundwasserspiegel unter dem Niveau der beiden Fließgewässer liegt und es somit zu keinem Grundwasserzufluss kommen kann. Für die beschriebene Situation sollten die Rn-Aktivitäten im Fließgewässer, aufgrund von Zerfall und Entgasung, kontinuierlich absinken (Cartwright et al. 2011). Basierend auf den durchgeführten Rn-Messungen können wir dies jedoch nicht bestätigen. Bei der Kleinen Spree kommt es zwischen den Messpunkten K4 und K5 zu einer deutlichen Zunahme der Rn-Aktivitäten während beider Messkampagnen. Für die Spree zwischen Messpunkt SP7 und SP9 bleiben die Rn-Aktivitäten für beide Messkampagnen auf einem relativ konstanten Niveau. Das Ausbleiben eines klaren abnehmenden Verlaufs bei der gemessenen Rn-Aktivität werten wir als Hinweis darauf, dass es lokal zu einem Grundwasserzufluss kommen muss. Die flächendeckende Bestimmung der lokalen hydraulischen Gradienten für die mehr als 40 beprobten Flussabschnitte pro Kampagne, über den sich die Richtung des Austausches zwischen Grundwasser und Fließgewässer bestimmen lässt, war uns wegen des hohen zeitlichen Aufwandes leider nicht möglich. Die Bestimmung des hy-

draulischen Gradienten ist jedoch für die Durchführung des Rn-Verfahrens auch nicht zwingend erforderlich. An dieser Stelle hätten wir sehr von einer Zusammenarbeit mit der LMBV profitiert, die uns ggf. mit aktuellen Grundwassergleichplänen unterstützen hätte können, mit denen es möglich gewesen wäre, die simulierten lokalen Zuflussraten mit hydraulischen Gradienten zu vergleichen, um so die Plausibilität unserer Ergebnisse zu überprüfen.

Nichtbeachtung des Ausbauszustandes des Fließgewässers

Laut Aussage der Autoren des Kommentars wurden für beide Fließgewässer lokale Abdichtungsmaßnahmen im Bereich der Messpunkte K4 und K6 (Abdichtung der Flusssohle mit Betonplatten) sowie zwischen SP6 und SP9 (Folienabdichtung) durchgeführt, um einen Austausch zwischen dem Grundwasserleiter und dem Fließgewässer zu unterbinden. Unabhängig davon, dass wir zum Zeitpunkt der Studie keine detaillierten Informationen zu den in der Vergangenheit durchgeführten flussbautechnischen Maßnahmen hatten, zeigen unsere Rn-Messungen hier ein widersprüchliches Bild. Steigende bzw. stagnierende Rn-Aktivitäten deuten klar auf den lokalen Eintritt von Grundwasser hin. Ob es sich hier allerdings um Wasser aus dem lokalen Aquifer handelt oder ob sich lokal im Auenbereich eine Art hängender Grundwasserleiter herausgebildet hat, der kleinräumig das Fließgewässer lateral speist, kann dabei nicht geklärt werden.

Nichtbeachtung relevanter Oberflächenzuflüsse

Die beiden Zuflüsse in die Spree zwischen den Messpunkten SP8 und SP9 (Einleitung aus der Grundwasserbehandlungsanlage Tzschellen) und den Messpunkten SP14 und SP15 (Einmündung des Grabens Neustadt) wurden in der Tat in unserer Studie nicht berücksichtigt. Vergleicht man jedoch die Rn-Aktivitäten in diesen Abschnitten (SP8: ~ 290 und ~ 260 Bq/m³, SP9: ~ 295 und ~ 265 Bq/m³) der Spree (Abb. 2 in unserer Studie) wird deutlich, dass sich die Rn-Aktivitäten hier nur geringfügig verändern. Dennoch können sich bei der Massenbilanzmodellierung, unter Berücksichtigung der beiden Zuflüsse, die ermittelten Grundwasserzuflussraten räumlich begrenzt verändern.

Fehlerhafte Bilanzierung des Eisenrückhalts

Neben den lokalen Grundwasserzuflussraten präsentieren wir in unserer Studie eine Bilanzierung der Menge an aus-

gefallenem Eisen im Einzugsgebiet der Spree bzw. Kleinen Spree. Die Bilanzierung des ausgefallenen Eisens erfolgt unabhängig von den simulierten Grundwasserzuflussraten, basierend 1) auf den gemessenen Sulfatfrachten in der Spree und Kleinen Spree sowie 2) dem stöchiometrischen Verhältnis zwischen Eisen und Schwefel bei der Pyrit-Verwitterung ($2 [SO_4^{2-}] \approx [Fe^{2+}]$). In unserer Studie gehen wir davon aus, dass Sulfat konservativ im Einzugsgebiet transportiert wird und die Hauptquelle für Sulfat in den Fließgewässern die Pyrit-Verwitterung darstellt. Es ist an dieser Stelle nochmal deutlich hervorzuheben, dass die von uns errechneten Werte für den Eisenrückhalt sich nicht ausschließlich auf die ausgefallene Menge an Eisen in den Fließgewässern beziehen, sondern für das gesamte Einzugsgebiet der Spree und Kleinen Spree gelten. Dies umfasst die Fließgewässer, die Bergbaufolgeseen, der Grundwasserleiter sowie Eisen, das in Grundwasserbehandlungsanlagen zurückgehalten wird und wobei Sulfat in die Fließgewässer gelangt. Letztere, wie die Grundwasserbehandlungsanlage Tzschellen, wurden in unserer Studie nicht explizit erwähnt. Basierend auf den von uns durchgeführten Messungen ist es nicht möglich den spezifischen Anteil des ausgefallenen Eisens separat für die Fließgewässer, die Restseen sowie den Aquifer zu bestimmen, sondern unsere Werte beziehen sich immer auf das gesamte System.

In dem Kommentar von Wilfried Uhlmann und Carolin Pezenka wurde die Eisenausfällung im Grundwasserleiter kategorisch ausgeschlossen, mit der Begründung, dass im Untersuchungsgebiet bisher kein aerobes Grundwasser an den Messstellen nachgewiesen werden konnte. In verschiedenen Studien (z. B. Haberer et al. 2015; Shen et al. 2018; Zhang et al. 2020) wurde jedoch gezeigt, dass es insbesondere im Fluktationsbereich zwischen wasser-gesättigter und wasser-ungesättigter Zone sowie im „capillary fringe“, aufgrund der hohen Verfügbarkeit von Sauerstoff zu aeroben Reaktionen kommen kann. Dieser Bereich wird für gewöhnlich bei einer Wasserentnahme an Grundwassermessstellen nicht beprobt. Ohne diesen Sachverhalt am Standort explizit untersucht zu haben, vermuten wir, dass hier durchaus die Möglichkeit des Eisenrückhalts im Aquifer besteht.

Die Autoren des Kommentars kritisieren die „absurd hohen Mengen an Eisenhydroxidschlamm“ die durch unsere Bilanzierung ermittelt wurden. Die Autoren gehen allerdings fälschlicher Weise davon aus, dass die errechneten Mengen 1) sich ausschließlich auf die Fließgewässer beziehen und nicht wie oben dargelegt auf das gesamte Einzugsgebiet und 2) auf den durch das Rn-Verfahren ermittelten Grundwasserzuflussraten basieren, was nicht der Fall ist. Als Teil des Kommentares werden eigene Raten an zurückgehaltenem Eisen präsentiert, die sich ausschließlich auf die Fließgewässer beziehen und damit nicht direkt mit den Werten aus unserer Studie vergleichbar sind. Wie genau

diese Raten bestimmt wurden und welche Annahmen dabei getroffen wurden, lässt sich an dieser Stelle nicht klären, da es sich laut Aussagen der Autoren um nicht-veröffentlichtes Material handelt. Daher eignen sich die im Kommentar präsentierten Raten unserer Meinung nach auch nicht um „den praktischen Nutzen der von Frei et al. (2020) vorgeschlagenen Methode der Eisenbilanzierung grundsätzlich infrage zu stellen“, da eine objektive Bewertung nach wissenschaftlichen Kriterien nicht möglich ist.

Ebenfalls wird erwähnt, dass wir die stärkste Sulfatquelle im Einzugsgebiet (Grundwasserbehandlungsanlage Tzschelln) nicht in unserer Bilanzierung berücksichtigt haben. Dies ist so nicht richtig, da zwar der Zufluss an Wasser in die Spree aus der Anlage bei der Rn-Massenbilanz nicht berücksichtigt wurde, der Anstieg der Sulfatkonzentration im Fließgewässer, verursacht durch das zufließende Wasser aus der Anlage, aber schon. Die Menge an ausgefallenem Eisen, die in der Grundwasserbehandlungsanlage zurückgehalten wird, ist damit Teil unserer Bilanzierung für den Gesamtückhalt an Eisen im Einzugsgebiet.

Weitere Kritikpunkte beziehen sich auf das stöchiometrische Verhältnis ($2 [SO_4^{2-}] \approx [Fe^{2+}]$) welches benutzt wurde, um von den gemessenen Sulfatfrachten auf die ausgefallene Menge an Eisen zu schließen: 1) Jeder Grundwasserzutritt müsste zwischen Eisen und Sulfat ausgeglichen sein sowie 2) jede anderweitige Herkunft an Sulfat wird ausgeschlossen. Zu Punkt 1 können wir festhalten, dass wir im Bereich des Altarms (SP9–SP10), wo ein sehr großer Anteil des Wassers aus dem Grundwasserleiter stammt (sehr hohe gemessene Rn-Aktivitäten zwischen 1370 und 1530 Bq/m³ bei sehr geringen O₂-Gehalten um die 5 mg/l), nahezu ein perfekt ausgeglichenes stöchiometrisches Verhältnis (95–98 %) zwischen Sulfat und gelöstem Eisen nachweisen konnten. Bezüglich Punkt 2 gehen wir in unserer Studie davon aus, dass die Pyrit-Verwitterung die dominante Quelle für Sulfat im Einzugsgebiet darstellt. Welche andere Quelle für Sulfat gibt es, die vergleichbare Mengen im System freisetzt? Weitere geogene Quellen, wie z. B. die Gibbs-Verwitterung, sind uns im Bereich des Lausitzer Abbaubereiches nicht bekannt.

Die Parametrisierung der FINIFLUX-Simulationen, wie von den Autoren des Kommentares angemerkt, spielt bei der Bilanzierung des Eisenrückhaltes keine Rolle, da diese nicht auf den errechneten Grundwasserzuflussraten basiert. Die Probenahme am Punkt K10 erfolgte im Zufluss aus der Überleitung des Bernsteinsees und nicht aus dem See selbst (Proben wurden generell immer aus den Überleitern genommen und nicht aus den Restseen). Dieser Zufluss, mit seiner spezifischen Rn-Aktivität, wurde in der Massenbilanzmodellierung berücksichtigt und ist deshalb Teil der Auswertung und Diskussion. Für die Berücksichtigung von räumlich eng begrenzten Zuflüssen aus Überleitern oder zufließenden Fließgewässern, als Teil der FINIFLUX-Simula-

tionen (Frei und Gilfedder 2015), wird modelltechnisch ein zusätzliches Element an der entsprechenden Stelle eingefügt (Länge des Elements ist dabei identisch mit der Breite des Zuflusses). Modelltechnisch wird dabei der Knotenpunkt SP7 in die Spree verlegt, wobei die Rn-Aktivität für den Messpunkt SP7 über ein lineares Mischungsmodell bestimmt wird. Dies führt dazu, dass der Zufluss als Teil von Abb. 2 in unserer Studie zwischen den Knotenpunkten SP6 und SP7 wirksam wird, wobei die Rn-Aktivität des Zuflusses Schwarzer Schöps als rotes Viereck verzeichnet ist. Dieses Vorgehen ist bei allen anderen Zuflüssen identisch und wir entschuldigen uns, wenn es diesbezüglich zu Verständnisproblemen gekommen ist.

Die generelle Kritik der Autoren des Kommentares, dass Rn-Aktivitäten nicht zwischen den Messpunkten gemessen wurden und sich damit über die Zwischenabschnitte keine Schlussfolgerungen treffen lassen, können wir nicht ganz nachvollziehen. Jedes messtechnische Verfahren wie z. B. „differential gauging“ sowie jedes numerische Prozessmodell basiert auf Erfassung bzw. Berechnung von Zustandsvariablen an diskreten Stützstellen im Raum. Je enger die Messpunkte dabei zusammenliegen, desto genauer sind natürlich die Aussagen hinsichtlich des Verlaufs der Zustandsvariablen. Unabhängig von der benutzten Auflösung des Messverfahrens wird es immer Zwischenbereiche geben, die nicht durch die Messung erfasst werden. Was schlagen die Autoren des Kommentars vor? Ein unendlich kleines Messintervall?

Abschließende Bemerkung

Abschließend möchten wir beiden Autoren nochmals für ihre intensive Auseinandersetzung mit unserer Arbeit danken. Allerdings halten wir bestimmte Aussagen der Autoren für nicht ganz gerechtfertigt. Insbesondere stören uns im Fazit des Kommentars die folgenden Aussagen: „Der Beitrag Frei et al. (2020) suggeriert, dass man mit der ²²²Rn-Methode zu zuverlässigen Ergebnissen hinsichtlich der Grundwasserzutritte zu Fließgewässern gelangen kann. Quasi mittels Blindtests in Fließgewässerabschnitten mit physikalisch ausgeschlossenem Grundwasserzutritt wurde diese Erwartungshaltung jedoch widerlegt“. Wir denken nicht, dass in dem Kommentar von Wilfried Uhlmann und Carolin Pezenka irgendein Aspekt unserer Arbeit widerlegt werden konnte, da nichts von den dargelegten Erkenntnissen und Material im Detail in einer öffentlich zugänglichen Arbeit präsentiert wurde, was eine objektive und unabhängige Auseinandersetzung ermöglichen würde. Hier ermutigen wir die Autoren des Kommentares, ihre Ergebnisse in einer Zeitschrift zu veröffentlichen, die durch einen Peer-review-Prozess wissenschaftliche Standards erfüllt. Eine sehr gute Idee ist allerdings der Vorschlag einer zukünftigen Zusam-

menarbeit mit der LMBV bzw. deren Auftragnehmern (dies hatten wir ursprünglich eigentlich schon im Rahmen der veröffentlichten Studie vorgesehen), wofür wir immer offen sind. Allerdings muss für uns als Wissenschaftler, die an einer Hochschule aktiv zum Thema forschen, gewährleistet sein, dass etwaige Ergebnisse einer Zusammenarbeit auch als Teil von wissenschaftlichen Veröffentlichungen genutzt werden können.

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

- Cartwright, I., Hofmann, H., Sirianos, M.A., Weaver, T.R., Simmons, C.T.: Geochemical and ^{222}Rn constraints on baseflow to the Murray River, Australia, and timescales for the decay of low-salinity groundwater lenses. *J. Hydrol.* **405**(3–4), 333–343 (2011)
- Cook, P.G.: Estimating groundwater discharge to rivers from river chemistry surveys. *Hydrol. Process.* **27**(25), 3694–3707 (2013)
- Cook, P.G., Rodellas, V., Stieglitz, T.C.: Quantifying surface water, porewater, and groundwater interactions using tracers: tracer fluxes, water fluxes, and end-member concentrations. *Water Resour. Res.* **54**(3), 2452–2465 (2018)
- Frei, S., Wismeth, F., Gilfedder, B.: Quantifizierung lokaler Grundwassereintritte in die Spree und deren Bedeutung für die Verockerungsproblematik in der Laustiz. *Grundwasser*, **25** (2020)
- Frei, S., Gilfedder, B.S.: FINIFLUX: An implicit finite element model for quantification of groundwater fluxes and hyporheic exchange in streams and rivers using radon. *Water Resour. Res.* **51**(8), 6776–6786 (2015)
- Haberer, C.M., Rolle, M., Cirpka, O.A., Grathwohl, P.: Impact of heterogeneity on oxygen transfer in a fluctuating capillary fringe. *Groundwater* **53**(1), 57–70 (2015)
- McCallum, J.L., Cook, P.G., Berhane, D., Rumpf, C., McMahon, G.A.: Quantifying groundwater flows to streams using differential flow gaugings and water chemistry. *J. Hydrol.* **416**, 118–132 (2012)
- Peterson, R.N., Santos, I.R., Burnett, W.C.: Evaluating groundwater discharge to tidal rivers based on a Rn-222 time-series approach. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **86**(2), 165–178 (2010)
- Shen, M., Guo, H., Jia, Y., Cao, Y., Zhang, D.: Partitioning and reactivity of iron oxide minerals in aquifer sediments hosting high arsenic groundwater from the Hetao basin, PR China. *Appl. Geochem.* **89**, 190–201 (2018)
- Wanninkhof, R., Mulholland, P.J., Elwood, J.W.: Gas exchange rates for a first-order stream determined with deliberate and natural tracers. *Water Resour. Res.* **26**(7), 1621–1630 (1990)
- Zhang, Z., Xiao, C., Adeyeye, O., Yang, W., Liang, X.: Source and mobilization mechanism of iron, manganese and arsenic in groundwater of Shuangliao City, Northeast China. *Water* **12**(2), 534 (2020)

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