

Fachsektion Hydrogeologie e.V.

in der DGGV e.V.

In Zusammenarbeit mit

**Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
(RWTH) Aachen**

Schriftenreihe Heft 5, Tagungsband 2024

Unsere wichtigste Georessource Grundwasser Analysieren – Prognostizieren – Gestalten



Elisenbrunnen, © Stadt Aachen / Andreas Herrmann

Herausgegeben von: T. R. Rüde, T. Demmel, J. Becker, F. Fahrenbach, M. Rüsgen

Fachsektion Hydrogeologie e.V.

in der DGGV e.V.

Schriftenreihe Heft 5, 2024

Unsere wichtigste Georessource Grundwasser Analysieren – Prognostizieren – Gestalten

29. Tagung der Fachsektion Hydrogeologie in der DGGV,
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH)

Aachen, 20.-23. März 2024



Schriftenreihe der FH-DGGV e.V.

Fachsektion Hydrogeologie e.V. in der DGGV e.V.

Emmy-Noether-Str. 17, 76131 Karlsruhe

Herausgegeben von:

Thomas R. Rüde, Thomas Demmel, Julia Becker, Felix Fahrenbach, Maike Rüsgen

Redaktion:	Maike Rüsgen
Layout:	FH-DGGV e.V.
Druck:	B.I.R.G.H.A.N. GmbH, Neustadt/Weinstraße
ISBN:	978-3-926775-79-5

Inhaltsverzeichnis

Willkommen in Aachen	1
Danksagung.....	2
Organisatorisches von A bis Z	5
Programm.....	9
Fortbildungen	13
Posterübersicht	17

Sessions:

1 Forum Junge Hydrogeologie	27
2 Klimawandel und Grundwasserdargebot in der Zukunft.....	49
3 Grundwasserwirtschaftliche Aufgaben in den Bergbaurevieren	93
4 Geothermische Nutzung des Untergrundes	107
5 Fachsitzung gemeinsam mit DGGV: Hydrogeologische Aspekte der Endlagerung	127
6 Landwirtschaftliche Einträge in das Grundwasser	141
7 Neue Stoffe in der Grundwassersanierung	149
8 Fachsitzung gemeinsam mit IAH: Gase und Isotope im Grundwasser	157
9 Anorganische Spurenelemente in gekoppelten Stoffkreisläufen – Quellen, Mobilität, hydro(bio)geochemische Prozesse	167
10 Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildung.....	179
11 Grundwasser: Interaktionen mit der vadosen Zone und Oberflächengewässern	195
13 Grundwasserbewirtschaftung in Karstregionen.....	209
14 Hydrogeologie der Festgesteine	223
15 Grundwasser in der Stadt(entwicklung)	231
16 Hydrogeologie arider Gebiete	249
17 Erkundung von Grundwasserressourcen	257
18 Künstliche Grundwasseranreicherung	267
19 Brunnen und Quelfassungen – Anforderungen, Untersuchungsmethoden, Erfahrungen	279
20 Wie sicher sind unsere Modellprognosen? – Bewertung von hydrogeologischen Modellen, Wasserbilanzen und Modellkalibrierungen	291
21 Digitale Transformation in der hydrogeologischen Forschung und Praxis	301
22 Künstliche Intelligenz und Machine Learning in der Grundwasserforschung.....	321
23 Hydrogeologie in der Praxis – Fallbeispiele der Staatlichen Geologischen Dienste	337
Autorenverzeichnis	363

Willkommen in Aachen

Jeden Morgen trinken drei von vier Menschen in Deutschland Grundwasser. Dass dies wenig bewusst ist, liegt nicht nur an der Maskierung als Kaffee oder Tee, sondern auch am langen Weg über Rohwasser, Wasseraufbereitung und zentraler Wasserverteilung. Wasser ist ein unverzichtbares Lebensmittel und Grundwasser unsere wichtigste Georessource. Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft rücken immer mehr in den Fokus von Gesellschaft und Politik. In der Bewirtschaftung des Grundwassers sind diese Prinzipien seit Langem verinnerlicht und mit dem sperrigen Fachbegriff des erneuerbaren Grundwasserdargebotes hinterlegt. Der Erhalt der Ökosystemleistung zur Bereitstellung von Grundwasser in hochwertiger Quantität und Qualität ist eine ständige Aufgabe in Forschung und Berufspraxis. Dies gilt insbesondere in Deutschland mit seiner mehrfach überplanten Landesfläche, hohen Bevölkerungsdichte und erheblichen Wirtschaftsleistung.

Auf die Grundwasserbewirtschaftung kommen neue Herausforderungen durch Spurenstoffe und den Klimawandel zu. Die Komplexität dieses Themas zeigt die in einigen Regionen zukünftig erhöhte Grundwasserneubildung, die Zunahme von Extremereignissen wie Dürreperioden und die offenen Fragen zum Einfluss steigender Temperaturen auf die Grundwasserqualität. Der Nutzungsdruck auf die nachhaltig verfügbare Grundwasserreserve wird steigen und Mechanismen zur Festlegung einer Vorrangnutzung werden an Bedeutung gewinnen. Mit der nationalen Wasserstrategie hat die Bundesregierung diese und weitere Grundwasserthemen in die politische Agenda aufgenommen.

Die 29. Tagung der Fachsektion Hydrogeologie, als der nationalen Vereinigung für das Grundwasser, bietet den Rahmen, um sich zu den hier umrissenen Themen und Herausforderungen auszutauschen, neue Ideen zu entwickeln und Partnerschaften für entsprechende Aktivitäten zu bilden. Mit dem Untertitel „Analysieren – Prognostizieren – Gestalten“ greifen wir die dreiteilige Struktur des Mottos der RWTH Aachen - Lernen. Forschen. Machen. - zu ihrem 150. Jubiläum auf. „Analysieren“ verweist auf Sessions zur eingehenden Kenntnis von Grundwassersystemen sowohl hinsichtlich Quantität als auch Qualität. Die Befassung mit Grundwasser hat immer eine auf die Zukunft gerichtete Komponente und wird mit Themen unter der Überschrift „Prognostizieren“ aufgenommen. Als angewandte Wissenschaft „gestalten“ Hydrogeolog*innen die zukünftige Grundwassernutzung und ihre Anpassung an den Klimawandel.

Wir freuen uns auf den persönlichen Austausch mit Ihnen und heißen Sie in der Kaiserstadt Aachen willkommen.

Prof. Dr. Thomas R. Rude

Danksagung

Wir danken dem wissenschaftlichen Komitee für die Kooperation:

Peter Achtziger-Zupančič, Fraunhofer IEG
Michael Altenbockum, Altenbockum & Partner, Geologen
Andre Banning, Universität Greifswald
Johannes Barth, FAU Erlangen-Nürnberg
Julia Becker, RWTH Aachen
Steffen Bender, Hereon - Climate Service Center Germany (GERICS)
Stefan Broda, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Zhao Chen, TU Dresden
Nils Cremer, Erftverband
Katya Dimitrova-Petrova, Universität Potsdam
Heiko Dirks, Ingenieurbüro Prof. Kobus und Partner GmbH
Joanna Doummar, American University of Beirut
Felix Fahrenbach, RWTH Aachen
Judith Flügge, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
Tobias Geyer, LGRB, RP Freiburg
Patricia Göbel, Universität Münster
Nico Goldscheider, Karlsruher Institut für Technologie
Katharina Greven, NEW NiederrheinWasser GmbH
Bernd Hanauer, HG Büro für Hydrogeologie und Umwelt GmbH
Stephan Hannappel, HYDOR Consult GmbH
Uwe Hekel, HPC AG
Harrie-Jan Hendricks-Franssen, Forschungszentrum Jülich GmbH
Theresa Hennig, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Frank Herrmann, Forschungszentrum Jülich GmbH
Holger Kaiser, BAUER Resources GmbH
Stefan Kollet, Forschungszentrum Jülich GmbH
Michael Kühn, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Tanja Liesch, Karlsruher Institut für Technologie KIT
Christian Melchers, Forschungszentrum Nachbergbau, THGA
Nils Michelsen, TU Darmstadt
Nils Moosdorf, Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung
Thomas Oertel, Wasserbeschaffung Niederrhein Westfalen GmbH
Sascha Oswald, Universität Potsdam
Angela Prein, HLNUG
Renard Prevoo, Watermaatschappij Limburg, Niederlande

Robert Reinecke, Johannes Gutenberg-University Mainz
Joerg Rinklebe, Universität Wuppertal
Ingo Sass, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Ingo Schäfer, Geologischer Dienst NRW
Thorsten Schäfer, Friedrich-Schiller-Universität Jena
Maria-Theresia Schafmeister, Universität Greifswald
Mario Schirmer, Eawag - Wasserforschungsinstitut im ETH-Bereich
Stephan Schulz, TU Darmstadt
Christoph Schüth, TU Darmstadt
Timo Spörlein, Bayerisches Landesamt für Umwelt
Christine Stumpp, Universität für Bodenkultur Wien (BOKU)
Robert van Geldern, FAU Erlangen-Nürnberg
Florian Wellmann, RWTH Aachen
Stefan Wohnlich, Ruhr-Universität Bochum

Organisatorisches von A bis Z

Auskunft im Eurogress

Am Rondell im Eingangsbereich des Eurogress wird Ihnen während der Tagung immer jemand für Fragen zur Verfügung stehen. Hier erhalten Sie bei Bedarf auch einen Stadtplan oder einen Netzplan des ÖPNV.

Exkursionen

Verbindlicher Anmeldeschluss für die Exkursionen war der 19.02.24. Freie Exkursionsplätze können während der Tagung noch am Empfangscounter gebucht werden.

Parken

Innerhalb des Aachener Alleenrings (Turmstraße, Saarstraße, Monheimsallee, Heinrichsallee, Wilhelmstraße, Römerstraße, Boxgraben, Junkerstraße) ist Parken nur zeitbegrenzt (60 Min.) und kostenpflichtig möglich (auch in der Lochnerstraße). In der Bleiberger Straße hingegen finden sich meist ausreichend und kostenfreie Plätze. Von dort aus erreichen Sie das Institutsgebäude in der Lochnerstraße in ca. 5 Minuten zu Fuß.

Am Eurogress gibt es keine kostenfreien Parkplätze. Das Parkhaus Eurogress liegt unmittelbar am Kongresszentrum und verfügt über ausreichend (kostenpflichtige) Parkplätze.

Im Stadtgebiet gibt es vielerorts kostenpflichtige Parkplätze, die mit der EasyPark-App übers Smartphone bezahlt werden können. Aktivieren Sie in der App den Tarif „EasyPark Lokal Aachen“, so zahlen Sie nur die Parkgebühr und keine zusätzliche Servicegebühr (nähere Informationen auf <https://www.easyparkpartners.de/willkommen-aachen>).

Posterausstellung

Die Poster können am Mittwoch, 20.03.2024 ab 14:00 Uhr aufgehängt werden. An den Posterwänden ist die Beitragsnummer angebracht. Befestigungsmaterial wird gestellt. Für alle Poster ist während der Postersession (Freitag, 22.03.24, 17:00 – 19:00 Uhr) eine Präsenz am Poster vorgesehen.

Taxi

AAV Aachen: 0241 - 3 69 11

Alfataxi: 0241 - 2 22 22

Veranstaltungsorte

LIH, Lochnerstr. 4–20

Die nächstgelegenen Busaltestellen zum Fachbereich Hydrogeologie des LIH in der Lochnerstraße 4–20 sind „Karlsgraben“ und „Lochnerstraße“.

Eurogress Aachen, Monheimsallee 48

Das Eurogress Aachen erreichen Sie vom Hauptbahnhof aus mit den Bus-Linien 3A und 13A Richtung Ponttor. Die Haltestelle „Aachen Eurogress“ liegt direkt am Kongresszentrum. Die Busse fahren werktags im 7 Minuten-Takt. Vom LIH kommend nehmen Sie ab der Haltestelle Lochnerstraße die Buslinien 13A/13B Richtung Ponttor

Park-Terrassen Aachen

Die Abendveranstaltung am 21.03.24 findet in den Park-Terrassen Aachen im Burtscheider Kurpark statt. Vom Eurogress aus beträgt die Gehzeit ca. 20 Minuten. Mit dem Bus steuern Sie am besten die Haltestelle Normaluhr oder Rosenquelle an.

Verpflegung

Folgendes ist in der Teilnahmegebühr enthalten:

- Kaffee, Tee, Kaltgetränke, Snacks und Mittagessen während der Konferenz
- Imbiss und Getränke im Rahmen des Icebreakers (20.03.24, 18:00 – 21:00 Uhr im Eurogress)
- Buffet und alkoholfreie Getränke im Rahmen des Gesellschaftsabends (21.03.24, 19:30 – 22:30 Uhr in den Park-Terrassen)

Vorträge und Präsentationen

Für Vorträge sind 15 Minuten vorgesehen (12 Minuten Vortrag + 3 Minuten Diskussion). Die Session-Verantwortlichen sind angehalten, diesen Zeitplan strikt einzuhalten. In jedem Hörsaal gibt es einen Laptop/Rechner mit Beamer. Als Anzeigesoftware stehen Microsoft PowerPoint sowie Adobe Acrobat Reader zur Verfügung. Das Präsentationsformat ist 16:9. Gerne nimmt die technische Assistenz im jeweiligen Vortragsraum Ihre

Dateien auf einem USB-Stick in den Pausen vor Ihrer Session entgegen. Bitte geben Sie Ihre Vortragsdatei rechtzeitig und mindestens eine Pause vor Ihrer eigenen Session ab.

WLAN

Im Eurogress Aachen steht Ihnen kostenfreies WLAN zu Verfügung.

Netzwerkname: FH-DGGV-Aachen

Passwort: Grundwasser#2024

Zahlung

Buchungen vor Ort (Tagestickets, Exkursionen) sind nur gegen Rechnung möglich.

Programm

Mittwoch, 20.03.2024

	Lochnerstr. R503	Lochnerstr. R504	Lochnerstr. R507
08:45	Workshop Isotopen		
10:00-13:00		Forum Junge Hydrogeologie	Workshop PASTAS
13:00-14:00	<i>Mittagspause</i>		
14:00-17:00	Fortsetzung Workshop Isotopen	Fortsetzung Forum Junge Hydrogeologie	Fortsetzung Workshop PASTAS

	Eurogress
14:00-18:00	Aufbau Firmen-Aussteller und Posterausstellung
17:00	<i>Registrierung / Anmeldung</i>
18:00-21:00	Icebreaker Ort: Foyers

Donnerstag, 21.03.2024

	Eurogress		
08:00-09:00	<i>Registrierung / Anmeldung</i>		
	Brüssel Saal		
09:00-10:00	Eröffnung und Grußworte		
10:00-10:30	Keynote 1		
10:30-11:00	<i>Kaffeepause</i>		
	Brüssel Saal	Konferenzraum 1	Konferenzraum 2
11:00-12:30	2: Klimawandel und Grundwasserdargebot in der Zukunft	20: Wie sicher sind unsere Modellprognosen?	8: Fachsitzung gemeinsam mit IAH: Gase und Isotope im Grundwasser
12:30-13:30	<i>Mittagspause</i>		
13:30-15:00	2: Klimawandel und Grundwasserdargebot in der Zukunft	23: Hydrogeologie in der Praxis – Fallbeispiele der Staatlichen Geologischen Dienste	13: Grundwasserbewirtschaftung in Karstregionen
15:00-15:30	<i>Kaffeepause</i>		
15:30-16:45	21: Digitale Transformation in der hydrogeologischen Forschung und Praxis	17: Erkundung von Grundwasserressourcen	7: Neue Stoffe in der Grundwassersanierung
16:45-17:00	<i>Pause</i>		
17:00-19:00		Mitgliederversammlung der FH-DGGV	
19:30 - 22:30	Gesellschaftsabend Ort: Park-Terrassen Aachen Essen und alkoholfreie Getränke sind inklusive.		

Freitag, 22.03.2024

	Eurogress		
08:00-09:00	<i>Registrierung / Anmeldung</i>		
	Brüssel Saal		
09:00-09:45	Keynote 2		
	Brüssel Saal	Konferenzraum 1	Konferenzraum 2
09:45-10:45	21: Digitale Transformation in der hydrogeologischen Forschung und Praxis	9: Anorganische Spurenelemente in gekoppelten Stoffkreisläufen	16: Hydrogeologie arider Gebiete
10:45-11:15	<i>Kaffeepause</i>		
11:15-12:30	4: Geothermische Nutzung des Untergrundes	6: Landwirtschaftliche Einträge in das Grundwasser	10: Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildung
12:30-13:30	<i>Mittagspause</i>		
13:30-15:00	4: Geothermische Nutzung des Untergrundes	14: Hydrogeologie der Festgesteine	3: Grundwasserwirtschaftliche Aufgaben in den Bergbaurevieren
15:00-15:30	<i>Kaffeepause</i>		
15:30-17:00	15: Grundwasser in der Stadt(-entwicklung)	5: Fachsitzung gemeinsam mit DGGV: Hydrogeologische Aspekte der Endlagerung	19: Brunnen und Quellsfassungen – Anforderungen, Untersuchungsmethoden, Erfahrungen
17:00-18:00		Mitgliederversammlung IAH-D	
17:00-19:00	Postersession Ort: Foyers		
19:00-21:00		Öffentlicher Abendvortrag	

Samstag, 23.03.2024

	Eurogress		
08:00-09:00	<i>Registrierung / Anmeldung</i>		
	Brüssel Saal		
09:00-09:30	Keynote 3		
09:30-10:00	Preisverleihungen und Ehrungen		
10:00-10:30	<i>Kaffeepause</i>		
	Brüssel Saal	Konferenzraum 1	Konferenzraum 2
10:30-12:00	18: Künstliche Grundwasseranreicherung	22: Künstliche Intelligenz und Machine Learning in der Grundwasserforschung	11: Grundwasser: Interaktionen mit der vadosen Zone und Oberflächengewässern
	Brüssel Saal		
12:00-12:30	Verabschiedung		
12:30-13:00	<i>Pause</i>		
13:00-18:00	Exkursionen		

Fortbildungen

Mittwoch, 20.03.2024, 8:45-17:00

Lehrstuhl für Ingenieur- und Hydrogeologie der RWTH, Lochnerstr. 4-20, R503

Isotopenmethoden zur Grundwasseraltersanalyse mit Fokus auf jungen Grundwasserkomponenten (< 70 Jahre)

Gesine Lorenz¹, Michael Heidinger¹, Diana Burghardt², Max Gustav Rudolph²

¹: Hydroisotop GmbH, Schweitenkirchen

²: TU Dresden

Wasser ist eine der wichtigsten Ressourcen der Menschheit. Die Qualität wird, neben den mineralischen Inhaltstoffen, wesentlich über die Herkunft (Neubildungsgebiet) und die Verweilzeit bzw. den Schutz vor oberflächennahen Einflüssen bestimmt.

Stabile und radioaktive Isotope bieten hier ein breites Methodenspektrum für ein fundiertes Verständnis der Grundwasserzirkulation. So erlauben Isotope Aussagen über schnellabfließende, oberflächennahe Grundwasserkomponenten, die mittlere Verweilzeit des Grundwassers, das Grundwasseralter oder die Komponentenbeteiligung in komplexen Grundwassersystemen, aber auch Aussagen über das Neubildungsgebiet und die klimatischen Bedingungen während der Neubildung.

Eine Ergänzung erfahren Isotopenmethoden über die Anwendung von Tracertests und die Untersuchung von Spurengasen sowie spezifischen organischen Substanzen.

Mit der Kombination von Datierungstracern (z.B. ⁸⁵Kr und ³H) kann die mittlere Verweilzeit von jungen Grundwasserkomponenten bestimmt und somit die Geschütztheit eines Grundwasservorkommens sowie Informationen für die Bemessung für oberirdische Schutzgebiete gezogen werden. Dies ist vor allem für Trinkwassererschließungen von großer Bedeutung, um den langfristigen Einfluss von Pestiziden und Schadstoffen auf die Grundwasservorkommen zu beurteilen.

Weitere Isotopensysteme im Grundwasserbereich, die im Rahmen des Seminars vorgestellt werden, sind ³H/³He, SF₆ und FCKW-Gase sowie ein kurzer Exkurs über $\delta^{18}\text{O}$ -/ $\delta^2\text{H}$ -H₂O.

Der Kurs bietet eine detaillierte Einführung in die wichtigsten Methoden zur Grundwasseraltersbestimmung mit anschaulichen Beispielen bis hin zur Auswertung von analytischen Ergebnissen (inkl. Übungen). Zudem wird ein Isotopen-basiertes Simulationstool für die Prognose von Grundwasseraltern bzw. -verweilzeiten vorgestellt, welches in einem Forschungsprojekt der TU Dresden entwickelt wurde.

Ziel ist insbesondere die Vermittlung von Kenntnissen darüber, bei welchen hydrogeologischen Fragestellungen Datierungsmethoden sinnvoll einzusetzen sind und wie die analytischen Ergebnisse von Untersuchungen zu bewerten sind.

Der Kurs setzt keine Kenntnisse in den Datierungsmethoden voraus, Grundkenntnisse in der Geologie und Hydrogeologie sind jedoch erforderlich. Durch die behandelten Auswerterroutinen bietet sich der Kurs auch für eine Auffrischung bzw. Vertiefung der bisherigen Erfahrung an.

Dieser Kompaktkurs stellt eine verkürzte Version der „Isotopenmethoden zur Grundwasseraltersanalyse“ dar, die regelmäßig innerhalb des Fortbildungsprogramms der FH-DGGV angeboten werden. Der Kompaktkurs beschränkt sich auf Methoden, mit denen die „jüngeren“ Grundwasseralter untersucht werden.

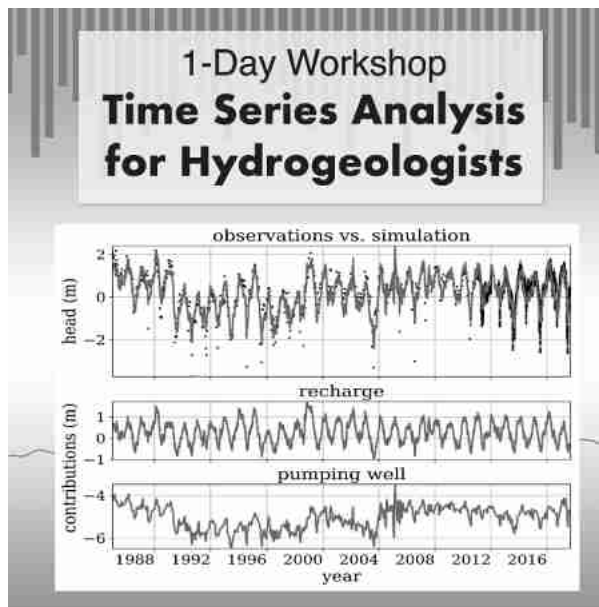
Mittwoch, 20.03.2024, 10:00-17:00

Lehrstuhl für Ingenieur- und Hydrogeologie der RWTH, Lochnerstr. 4-20, R507

Workshop on modeling hydraulic head time series with Pastas

Raoul Collenteur

Eawag, Dübendorf, Schweiz



Time series modeling has become an increasingly popular method to solve groundwater problems. This workshop provides a theoretical and practical introduction into time series modeling, with hands-on exercises using the open-source modeling software Pastas and Jupyter Notebooks. We focus on lumped-parameter models using impulse response functions to describe groundwater level fluctuations. This data-driven method can for example be used to investigate which hydrological forcings (e.g.,

precipitation, evaporation) influence the groundwater levels, but also to quantify groundwater recharge and the effect of groundwater pumping.

This workshop is aimed at groundwater researchers and practitioners interested in using methods of time series analysis in their hydrogeological studies. No previous experience with time series modeling is required, but some familiarity with Python is highly recommended to successfully complete the in-class exercises performed in Jupyter Notebooks. During the day there will be a number of example case studies and plenty of opportunities for discussions. After this course participants will be able to identify when the approach can be helpful and apply simple Pastas models to solve real-world groundwater problems.

Posterübersicht

Klimawandel und Grundwasserdargebot in der Zukunft

- ID 134 Modellierung der Auswirkungen dürrebedingter Trockenheit auf das oberflächennahe Grundwasser im Landkreis Cuxhaven**
Stephan Hannappel, Philipp Wolke, Alexander Strom
- ID 154 Die BMBF-Fördermaßnahme „Nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung“ (LURCH)**
Sarah Fieger, Thomas Track, Christina Jungfer
- ID 159 Ein Stresstest zur Bewertung der zukünftigen Grundwasserverfügbarkeit für die landwirtschaftliche Bewässerung in Deutschland**
Ian McNamara, Frank Herrmann, Thorben Uschan, Martina Flörke
- ID 164 Modeling the impact of climate change on groundwater flow and temperature in Brandenburg**
Michael Tsypin, Mauro Cacace, Magdalena Scheck-Wenderoth
- ID 168 Klimawandel und Wasserwirtschaft in Nordostdeutschland - Modellgestützte Klimaprojektionen als Grundlage von wasserwirtschaftlichen Planungen**
Felix Möhler, Alexandra Pavlova
- ID 169 Vorschlag für ein Punktesystem zur Bewertung der klimawandelbedingten Herausforderungen im Grundwassermanagement**
Frank Herrmann, Ian McNamara, Niklas Wagner, Thorben Uschan, Stefan Kollet, Martina Flörke
- ID 171 KIMoDIs – KI-basiertes Monitoring-, Datenmanagement- und Informationssystem zur gekoppelten Vorhersage und Frühwarnung vor Grundwasserniedrigständen und -versalzung – Fallbeispiel Niedersachsen**
Eva González, Jörg Elbracht
- ID 178 Global Groundwater Recharge Contribution to Groundwater Storage Variability**
Sara Nazari, Nils Moosdorf
- ID 188 Nachhaltiges integriertes Wasser- und Landnutzungsmanagement im Mekong-Delta, Vietnam – eine besondere Herausforderung**
Harro Stolpe

- ID 205 Modellgestützte Untersuchung zum Einfluss eines Waldumbaus auf die Grundwasserneubildung und die Hydrodynamik im Einzugsgebiet eines Wasserwerks (Briesen, Brandenburg)**
Franziska Mehler, Felix Möhler, Matthias Clausen, Ines Schwenzer
- ID 207 Operationalisierung der Berechnung und Auswertung von jährlichen Grundwasserneubildungsraten in Niedersachsen.**
Mithra Hajati, Gabriele Ertl, Jörg Elbracht
- ID 220 KliBiW7 Globaler Klimawandel und Folgenabschätzung auf die Grundwasserstände in Niedersachsen – Teilprojekt D**
Melanie Witthöft, Tobias Schlinsog
- ID 341 Kann die Grundwasserbewirtschaftung der Zukunft nachhaltig sein?**
C. Siebert, S. Wohnlich, J. Barth, D. Borchardt, H. Dürr, P. Herzog, E. Meyer, U. Meyer, D. Radny, R. Reinecke, P. Saile, H. Köthe
- ID 344 Ermittlung nutzbarer Grundwasserdargebote und Erstellung einer Verwaltungsanwendung für das Modellgebiet Nordsachsen**
Maïke Rath, Matthias Beyer, Marcus Richter, Katrin Reinhardt, Martin Pohl, Torsten Abraham

Grundwasserwirtschaftliche Aufgaben in den Bergbaurevieren

- ID 196 Grubenwässer der Altbergbaue im Geopark Erz der Alpen**
Sylke Hilberg, Dominik Hauser, Gert Furtmüller
- ID 262 Untersuchungen des Schwefel- und Kohlenstoffkreislaufs in den Grubenwässern der stillgelegten Steinkohlebergwerke im Ruhrgebiet und Saarland**
Barbara Teichert, Henning Jasnowski-Peters, Harald Strauss, Stefan Schlömer, Lisa Rose, Till Genth, Christian Melchers, Sebastian Westermann

Geothermische Nutzung des Untergrundes

- ID 204 Thermische Auswirkungen großskaliger, geschlossener, saisonaler Kies-Wasser-Speicher**
Christoph Bott, Maximilian Noethen, Abdulrahman Dahash, Peter Bayer
- ID 147 Digital methods for the planning and construction of geothermal plants**
Holger Kaiser

ID 249 Das Mobilisierungspotenzial von Schadstoffen bei der Nutzung von Steinkohlezechen als saisonale Wärmespeicher

Laura Blaes, Thomas Heinze, Tobias Licha

ID 251 Grubenwasser als übersaisonales Speichermedium für Wärmeenergie – Ein in-Situ-Reallabor für zyklische Ein- und Ausspeicherungen von Kälte und Wärme.

Martin Binder, Alireza Arab, Christian Engelmann, Chaofan Chen, Lukas Oppelt, Thomas Nagel, Thomas Grab, Traugott Scheytt

ID 310 Modellierung des Potenzials zur Lithium-Gewinnung aus Tiefen-Geothermie am Oberrhein

Ulrich Maier, Bettina Wiegand, Iulia Ghergut, Martin Sauter

Fachsitzung gemeinsam mit DGGV: Hydrogeologische Aspekte der Endlagerung

ID 257 Hydrochemical boundary conditions relevant for corrosion processes of canisters for high-level radioactive waste in a deep geological repository in crystalline host rock in Germany

Torben Weyand, Thimo Philipp, Christiane Stephan-Scherb

ID 306 Geochemische Profile im hydrogeologischen System Opalinuston

Marie Bonitz, Theresa Hennig, Anja Schleicher, Jessica Stammeier, David Jaeggi, Michael Kühn

Landwirtschaftliche Einträge in das Grundwasser

ID 328 Stickstoff-Argon-Methode (Stickstoff-Exzess) als Routinemonitoring für Denitrifikation in Grundwassermessstellen: Methode und erste Messergebnisse

Vera Winde

Fachsitzung gemeinsam mit IAH: Gase und Isotope im Grundwasser

ID 312 Multi-Isotopen (COSH)-Hydrobiogeochemie im unterirdischen Ästuar des Hochenergie-Bereichs einer Barriere-Insel

Michael Ernst Böttcher, Magali Roberts, Anja Reckhardt, Katharina Pahnke-May, Iris Schmiedinger, Sascha Plewe, Gudrun Massmann

ID 266 Isotopenuntersuchungen der Trinkwassergewinnung durch Uferfiltration am Standort Ofterschwang (Oberallgäu) im Rahmen des BMBF-LURCH IsoGW Projekts

Sarah Schmidt, Robert van Geldern, Johannes Barth, Michael Heidinger

Anorganische Spurenelemente in gekoppelten Stoffkreisläufen – Quellen, Mobilität, hydro(bio)geochemische Prozesse

ID 131 Das Verhalten redox-sensitiver Elemente in Oberharzer Bergbauteichen
Elke Bozau, Enio Selfo, Tobias Licha

ID 156 Fixierung von Spurenelementen: Positiver Nebeneffekt der gesteigerten Denitrifikation
Felix Ortmeyer, Hyojin Kim, Birgitte Hansen, Rasmus Jakobsen

ID 279 Mobility of dissolved and colloid-associated trace elements in AMD-influenced pore- and groundwaters
Sarah Nettemann, Daniel Mirgorodsky, Erika Kothe, Thorsten Schäfer

ID 331 Isotope hydrogeochemistry indicates pathways of water and sulfate in Lake Constance
Vera Winde, Michael E. Böttcher, Anna Noffke, Albrecht Leis, Till Harum, Patricia Roeser, Jens Kallmeyer, Iris Schmiedinger, Antje Schwalb, Martin Wessels, Thomas Wolf

Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildung

ID 243 Analysis of low flow measurements in river basins in Hesse, Germany
Laura Eck, Angela Prein, Hannah Budde, Christoph Schüth

ID 263 Neubildung von Grundwasservorräten – Validierung und Anwendung einfacher Berechnungen mittels Tabellenkalkulation
Alina Weißer, Freya Fünfgeld, Uwe Hekel

ID 295 Combining stable water isotope approaches and water storage measurements to assess vertical soil water fluxes quantity and timing: insights from a managed agricultural landscape in NE Germany
Katya Dimitrova-Petrova, Christine Stumpp, Lena Scheiffele, Sascha Oswald

- ID 296 Estimating groundwater recharge time-series using shallow root zone soil moisture at different spatial scales for an agriculturally managed test site**

Lena Scheiffle, Katya Dimitrova Petrova, Sascha E. Oswald

- ID 301 Abschätzung der Grundwasserneubildung mit Hilfe datengetriebener Ansätze – Validierung anhand tatsächlich gemessener Wasserflüsse**

Thomas Fichtner, Stefan Werisch, Andreas Hartmann

Grundwasser: Interaktionen mit der vadosen Zone und Oberflächengewässern

- ID 203 Untersuchung der Beanspruchungen erdberührter Bauteile durch Grundwasser während Hochwasserereignissen**

Sonja Letzelter, Héctor Montenegro, Denis Maier

- ID 288 Oberflächenwasser-Grundwasser-Wechselwirkungen im Trinkwassereinzugsgebiet der Stadt Görlitz**

Zhao Chen, Diana Burghardt, Paul Franke, Bernd Bauer, Andreas Hartmann

- ID 324 Physical and biogeochemistry of (sub)surface freshwaters entering the southern coast of the Baltic and North Seas**

Michael Ernst Böttcher, Cátia Milene Ehlert von Ahn, Anna-Kathrina Jenner, Patricia Roeser, Rhodelyn Saban, Christoph Malik, Carla Nantke, Iris Schmiedinger

Grundwasserbewirtschaftung in Karstregionen

- ID 198 Hydrogeologische Konzepte zur Konnektivität von Hochgebirgsseen**

Julia Freutsmiedl, Sylke Hilberg

- ID 299 Assessing Storage Potential in a Mediterranean Karst Aquifer: A Vadose-Phreatic Modeling Approach for Managed Aquifer Recharge**

Lysander Bresinsky, Jannes Kordilla, Yakov Livshitz, Martin Sauter

- ID 320 Neue Erkenntnisse zum hydrogeologischen Einzugsgebiet des Briloner Karstaquifers**

Alexander Kaltenbrunn, Nadine Göppert, Nico Goldscheider

Grundwasser in der Stadt(-entwicklung)

ID 253 Kies- bzw. Schottergärten zur Stärkung der Grundwasserneubildung in der Stadt

Patricia Göbel, Meßer Johannes

ID 224 Thermische Mobilisierung als Unterstützung einer in situ chemischen Oxidation - Geothermie als Geoengineering

Volker Jungk, Wolfram Canzler, Christoph Manthey

ID 267 Verhalten und Nutzung organischer Spurenstoffe an einem Uferfiltratstandort am Rhein

Alexandra Hellwig, Lydia Woschick, Clara Vogt, Björn Droste, Dirk Antunovic, Anette Albrecht, Hans-Peter Rohns, Traugott Scheytt

ID 282 Konstruktive Lösungen zur Vereinbarung von Schienennetzerweiterung und öffentlicher Trinkwasserversorgung im Ballungsraum

Meike Beier, Arnd Allendorf

Hydrogeologie arider Gebiete

ID 135 Satellitengestützte Messung der Grundwasserentnahme in Wadi Ad-Dawasir, Saudi-Arabien

Heiko Dirks, Randolph Rausch, Nikita Sargsyan

ID 206 Groundwater Monitoring in Niger: A Focus on Basement Aquifer Groundwater Level Measurements in Urbanized Niamey, Uncovering Varied Recharge Mechanisms through Groundwater Signatures.

Manal Wannous, Kevin De Vriendt, Didier Zinsou

Erkundung von Grundwasserressourcen

ID 277 GIS-Methoden zur flächendeckenden Generierung von Grundwasserflurabständen in Festgesteinsgebieten ohne Grundwasserbeobachtungsrohre

Abdelouahed Oussouss, Julian Gath, Nandimandalam Janardhana Raju, Wolfgang Gossel

Künstliche Grundwasseranreicherung

- ID 170 EU INTERREG Projekt Blue Transition – How to make my region climate resilient – Teilprojekt GE-2 – Geest Adaptation**

Eva González, Jennifer Bals, Bárbara Blanco Arrue, Jörg Elbracht, Mike Müller-Petke

- ID 309 Bewertung der Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung aus Oberflächenwasserreservoirs in Indien mit hydrochemischen Indikatoren**

Isabelle Schmidt, Paul Königer, Karthikeyan Brindha, Michael Schneider

Brunnen und Quelfassungen – Anforderungen, Untersuchungsmethoden, Erfahrungen

- ID 123 Der Abnahmepumpversuch und die Bestimmung irregulärer Brunneneintrittsverluste**

Christian Gillbricht

- ID 157 Bestimmung der Absenkreichweite eines Brunnens mit der Sichardt-Formel – Grenzen und Weiterentwicklung**

Annika Desens, Georg Houben

Digitale Transformation in der hydrogeologischen Forschung und Praxis

- ID 139 Wissensmanagement mit GFM-Visu. Visualisierung, Prozessanalyse, Überwachung und Dokumentation.**

Folke Diederich, Christian Authmann

- ID 150 HYPAGS: approximation of virtual sieve curves and hydraulic parameter ranges for variably saturated flow from single input values of hydraulic conductivity**

Aaron Peche, Georg Houben, Sven Altfelder

- ID 290 Echtzeitüberwachung und numerische Modellierung auf der web-basierten Grundwassermanagementplattform INOWAS**

Jana Glass, Catalin Stefan, Ralf Junghanns

ID 339 KI-basiertes Grundwassermanagement in Brandenburg: Notwendigkeit und bisherige Entwicklungen

Maria Wetzels, Lena Katharina Schmidt, Angela Hermsdorf, Stefan Kunz, Tanja Liesch, Benedikt Heudorfer, Fabienne Doll, Stefan Broda

Künstliche Intelligenz und Machine Learning in der Grundwasserforschung

ID 174 Einbeziehung räumlicher Informationen für die Regionalisierung von hydrogeologischen Parametern in maschinellen Lernmodellen

Marc Ohmer, Fabienne Doll, Tanja Liesch

ID 217 Deep reinforcement learning: a new avenue to support groundwater management

Philipp Höhn

ID 221 KI-basierte Bewertung des Denitrifikationspotenzials im Grundwasser

Julian Xanke, Thilo Fischer, Marc Ohmer, Tanja Liesch

ID 326 Schätzung der Grundwasservulnerabilität gegenüber Pflanzenschutzmitteleinträgen mittels Random Forest und Künstlicher Neuronaler Netze

Anne-Karin Cooke, Sweety Mohanty, Felix Joger, Stefan Broda

Hydrogeologie in der Praxis – Fallbeispiele der Staatlichen Geologischen Dienste

ID 143 Die Hydrogeologische Landesaufnahme in Hessen – Von der blattschnittbezogenen Bearbeitung zur systemorientierten Kartierung

Hannah Budde, Christoph Kludt, Bernd Leßmann, Angela Prein, Renate Senner, Sybille Siebert, Dieter Kämmerer

ID 167 Erstellung eines 3D hydrogeologischen Strukturmodells für die Hauptstadtregion Berlin-Brandenburg

Felix Möhler, Malte Kalter, Kerstin Kernbach, Ulrike Hörmann, Johannes Birner, Bertram Monninkhoff

ID 176 Prognose der Niedrigwasserschüttung von Quellen in Baden-Württemberg vor dem Hintergrund des Klimawandels

Volker Armbruster, Andreas Morhard

- ID 186 Automatisierte Auswertung hydraulischer Durchlässigkeiten aus Korngrößenanalysen**
Tim Hartmann, Eva González, Grit Griffel, Jörg Elbracht
- ID 194 Hydrogeologische 3D-Modelle Niedersachsen**
Grit Griffel, Nico Deus, Eva González, Jörg Elbracht, Tim Hartmann, Melanie Witthöft
- ID 211 3D-Strukturmodell und Studie zur geeigneten Simulationssoftware für die Flutungsprognose im ehemaligen Steinkohlenrevier Lugau/Oelsnitz**
Maria Ussath
- ID 219 Integration von Salzhalden in das dichteabhängige, großräumige Grundwasserströmungsmodell Werra**
Christian Zimmermann, Jörn Geletneky, Christoph König
- ID 222 Wie steht es um das Grundwasser in Hessen?**
Theresa Frommen, Mario Hergesell, Sandra Schäfer
- ID 332 Leitfaden zur Ausweisung von Wasserschutzgebieten in Schleswig-Holstein – Erfahrungen bei der Kooperation mit Wasserversorgern**
Klaas Stoeper, Bernd König

1 Forum Junge Hydrogeologie

20.03.2024, 10:00 - 17:00, LIH, R504

Julia Becker (Lehr- und Forschungsgebiet Hydrogeologie, RWTH Aachen)

Felix Fahrenbach (Lehr- und Forschungsgebiet Hydrogeologie, RWTH Aachen)

Vortrag 1.1 (ID 307)

Hydrogeochemische Prozesse beim Betrieb von Pumpspeichern in Braunkohletagebauen Deutschlands

Tobias Schnepfer^{1,2}, Michael Kühn^{1,2}, Thomas Kempka^{1,2}

¹: GFZ Deutsches GeoForschungsZentrum, Fluidsystemmodellierung, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Deutschland

²: Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, Karl-Liebknecht-Str. 24-25, 14476 Potsdam, Deutschland

Kontakt: tschnep@gfz-potsdam.de

Erfahrungen mit Tagebauflutungen in deutschen Braunkohlerevieren zeigen, dass hydrogeochemische Prozesse zu kritischen ökologischen und ökonomischen Faktoren für die Realisierung von Pumpspeicherprojekten (Pumped Hydro Storage; PHS) werden können. Je nach Sulfid- und Sauerstoffverfügbarkeiten, sowie Puffer- und Verdünnungsprozessen können saure Grubenwässer und erhöhte Sulfat- und Metallkonzentrationen einen negativen Einfluss auf angrenzende Ökosysteme und Grundwasserressourcen sowie die installierte PHS-Infrastruktur haben. Im Rahmen des ATLANTIS-Projekts hatte diese Studie das Ziel, Veränderungen der Wasserzusammensetzung im unteren Wasserreservoir aufgrund des Betriebs von Pumpspeicherkraftwerken unter verschiedenen hydrogeochemischen Randbedingungen zu quantifizieren (Abbildung 1).

Für die Parameterstudie wurden Datensätze zur Hydrochemie, Hydrogeologie und Morphologie von gefluteten deutschen Braunkohleminen verwendet, mit denen ein hydrochemischer Reaktionspfad für numerische Simulationen entwickelt wurde. Die chemischen Modellrechnungen wurden mit PHREEQC (Parkhurst und Appelo, 2013) realisiert, während der In- und Output über Python/PHREEQPY (Müller, 2022) gemanagt wurde. Über diesen neuen Workflow konnten zahlreiche Parameterkombinationen für die Simulation verschiedener hydrogeologischer Ausgangsszenarien analysiert und ausgewertet werden. Die in den Szenarien berücksichtigten Einflussfaktoren umfassen unter anderem die anfängliche Flutung der Tagebaue, regelmäßige Wasserzuflüsse aus den Quellen

Niederschlag, Grundwasser und Abraumhalden, Mineralverfügbarkeiten in den Sedimenten sowie die Pumpzyklen zwischen dem unteren und oberen Speicherbecken des Pumpspeicherkraftwerks.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das Volumen des zwischen dem unteren Speicherbecken und den angrenzenden Grundwasserleitern während der Pumpzyklen migrierenden Wassers (Abbildung 1) zu gering ist, um die Wasserqualität des Reservoirs langfristig zu beeinflussen. Die langfristige Verfügbarkeit von Pufferkapazitäten im Speicher und den angrenzenden Abraumhalden bestimmen die Entwicklung von saurem oder neutralem Grubenwasser. Sulfatkonzentrationen werden vor allem durch Verdünnungsprozesse beeinflusst, was die Bedeutung zusätzlicher Zu- und Abflüsse unterstreicht. Abhängig von diesen Ein- und Austrägen sowie der Sauerstoffverfügbarkeit und den vorhandenen Sulfidmengen in den Grubensedimenten variiert die Zeit bis zum Erreichen des chemischen Gleichgewichts im unteren Speicherbecken von einigen Wochen bis zu mehreren Jahren.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass unter bestimmten hydrogeochemischen Randbedingungen, wie der Verfügbarkeit ausreichender Pufferkapazitäten und der Verdünnung durch regelmäßige Zu- und Abflüsse, der Betrieb von Pumpspeicherkraftwerken in stillgelegten Braunkohletagebauen aus ökologischer Sicht sicher realisiert werden kann.

Müller, M. (2022). PhreeqPy - Python Tools for PHREEQC. <https://www.phreeqpy.com/>. Zuletzt aufgerufen am 30.10.2023.

Parkhurst, D. L., & Appelo, C. A. J. (2013). Description of input and examples for PHREEQC version 3—a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. US geological survey techniques and methods, 6(A43), 497.

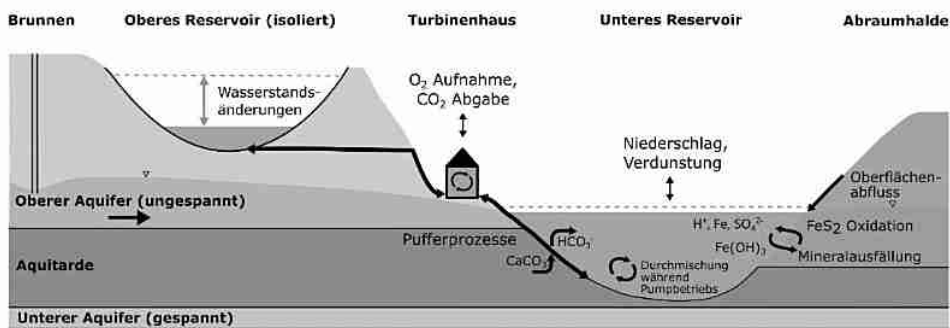


Abb. 1: Der Betrieb eines Pumpspeicherkraftwerks in einem ehemaligen Braunkohletagebau kann hydrogeochemische Wechselwirkungen zwischen Reservoirwasser, Sedimenten und Aquifern hervorrufen.

Vortrag 1.2 (ID 233)

Hydrochemische Charakterisierung des rheinseitigen Grundwassers am Uferfiltrat-Standort Flehe

*Lydia Woschick¹, Alexandra Hellwig¹, Clara Vogt¹, Dirk Antunovic²,
Hans-Peter Rohns², Anette Albrecht², Björn Droste², Traugott Scheytt¹*

¹: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Straße 12, 09599 Freiberg

²: Stadtwerke Düsseldorf AG, Qualitätsüberwachung Wasser, Wiedfeld 50, 40589 Düsseldorf

Kontakt: lydia.woschick@student.tu-freiberg.de

Bestehende Grundwassernutzungskonzepte in Deutschland sind auf hohe Grundwasserspiegel und Wasserpegel in Flüssen ausgerichtet. Der Klimawandel und der ansteigende Wasserbedarf in Industrie, Landwirtschaft und Ballungsräumen führen jedoch zu einem erhöhten Wasserverbrauch. Im Rahmen des Verbundprojekts iMolch wird ein umfassendes Konzept zur nachhaltigen Nutzung von Grundwasserressourcen erarbeitet. Hierbei liegt ein besonderer Fokus auf der Entwicklung innovativer Überwachungs- und Prognosetechniken sowie Handlungsstrategien für die Grundwasserbewirtschaftung mittels Spurenstoffe, Spurenelemente und biologischer Parameter (BMBF; Projektnummer: 02WGW1667D). Das Ziel dieses Beitrags ist die Erkennung der Systemzusammenhänge im Grundwasserleiter unter Verwendung chemischer Parameter sowie deren Erprobung am Standort der Stadtwerke Düsseldorf. Dafür erfolgt zuerst eine hydrochemische Charakterisierung des landseitigen und flussseitigen Grundwassers.

Grundlage dieser Arbeit bildet ein mittels intensiven Monitorings erhobener Datensatz der Stadtwerke Düsseldorf vom Wasserwerk Flehe für die Zeit von 2018 bis 2019. Das Wasserwerk Flehe liegt im Süden der Stadt Düsseldorf und verfügt über eine Brunnengalerie, die parallel zum Rhein verläuft. An diesem Standort setzt sich das Rohwasser überwiegend aus Uferfiltrat und in geringem Maße aus landseitigem Grundwasser zusammen. Im Trockenjahr 2018 wurde an 15 Grundwassermessstellen, die senkrecht zur Brunnengalerie verlaufen, in regelmäßigen Abständen von 2 Wochen hydrochemische Parameter und Stoffkonzentrationen anorganischer sowie organischer Substanzen gemessen. Zu diesen Stoffen zählen u. a. Indikatoren für Abwasser oder landwirtschaftliche Nutzung.

Der Vergleich zwischen den Daten der Grundwassermessstellen und dem Rheinpegel sowie den Stoffkonzentrationen im Rhein ermöglichte die Identifikation zeitlicher und räumlicher Trends der Stoffe im Grundwasser am Standort Flehe. Es zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen den gemessenen Stoffkonzentrationen (u. a. Carbamazepin) im Grundwasser und dem Rheinpegel. Bei Hochwasser werden beispielsweise Stofffrachten, welche aus dem Rhein ins Grundwasser gelangen, weit ins Landesinnere transportiert. Aus

den Daten geht hervor, dass diese erhöhten Stoffkonzentrationen auch jenseits der Pumpbrunnen messbar waren. Daraus folgt, dass bei hohen Rheinpegeln die Brunnengalerie trotz laufender Pumpen vom rheinseitigen Grundwasser überspült wird und somit am Wasserwerk Flehe in diesem Zeitraum ausschließlich Uferfiltrat gewonnen wird.

Vortrag 1.3 (ID 323)

Strömungsverhältnisse bei der Uferfiltration im Extremjahr 2018

*Clara Vogt¹, Alexandra Hellwig¹, Lydia Woschick¹, Björn Droste²,
Dirk Antunovic², Anette Albrecht², Hans-Peter Rohns², Traugott Scheytt¹*

¹: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Straße 12, 09599 Freiberg

²: Stadtwerke Düsseldorf AG, Qualitätsüberwachung Wasser, Wiedfeld 50, 40589 Düsseldorf

Kontakt: Clara.Vogt@student.tu-freiberg.de

Durch den Klimawandel nehmen Extremwetterereignisse auch in Deutschland zu. Dazu zählen unter anderem langanhaltende Trockenperioden, welche auch auf die Wasserstände von Flüssen und Grundwasser einen großen Effekt haben. Die sich verändernden Voraussetzungen wirken sich auf die Bewirtschaftung dieser Wasserressourcen aus. Neben vielen weiteren Problemen wird die Trinkwassergewinnung an Standorten mit Uferfiltration dadurch deutlich beeinflusst.

Das vom BMBF geförderte Projekt iMolch (Projektnummer 02WGW1667D) entwickelt nachhaltige Wassermanagement-Konzepte zur Optimierung der Grundwasserbewirtschaftung vor dem Hintergrund der Auswirkungen des Klimawandels.

Der vorliegende Beitrag untersucht, wie sich extreme klimatische Bedingungen im Jahr 2018 auf die Strömungsverhältnisse auf einen Uferfiltrations-Standort am Rhein ausgewirkt haben. Die Stadtwerke Düsseldorf nutzen an mehreren Standorten Uferfiltration zur Gewinnung von Trinkwasser aus dem Rhein. Im Rahmen des Projekts wird u. a. der Standort Flehe im Stadtgebiet Düsseldorf untersucht. Das Wasserwerk besteht aus zwei Pumpwerken, welche aus 51 betriebenen Brunnen das Rohwasser fördern. Die Trinkwasserbrunnen sind auf einer Länge von einem Kilometer im Abstand von 50 bis 60 m zum Flussufer parallel zum Rhein angeordnet. Zur Grundwasserqualitätsüberwachung wurden 15 Grundwassermessstellen senkrecht zum Flussufer installiert, mit verschiedenen Filtertiefen und in einem Abstand von 20 bis 90 Metern. An den Messstellen wurde ein intensives Monitoring zwischen dem 31.01.2018 und 08.05.2019 durchgeführt. Die Messungen erfolgten in einem Abstand von etwa zwei Wochen und erfassten neben dem Wasserstand auch zahlreiche physikalische, chemische und biologische Parameter. Die Daten werden durch

stündliche Werte der Fördermengen des Wasserwerkes und geologische Profile des Untergrundes ergänzt.

Zunächst wurden räumliche und zeitliche Änderungen der Wasserstände im Bezug zum Rheinpegel analysiert. Der Fokus lag dabei auf dem Rheinniedrigstand im Sommer 2018, welcher im Oktober den niedrigsten bekannten Wasserstand am Pegel Düsseldorf erreichte. Der Untergrund am Standort besteht aus sandigen Kiesen der Niederterrassen des Rheins und darunter liegenden oligozänen Sanden. Deren hohe Durchlässigkeit (k_f -Wert etwa $3 \cdot 10^{-3}$ m/s) resultiert in hohen Abstandsgeschwindigkeiten von mehreren Metern pro Tag und niedrigen Verweilzeiten im Grundwasserleiter. Hohe hydraulische Gradienten führen dazu, dass der Rhein die Brunnengalerie bei Hochstand überspült und sich trotz laufender Pumpbrunnen kein Absenkrichter bildet, wohingegen während des Extremereignisses im Sommer 2018 fast nur noch landseitiges Grundwasser gefördert wurde. Damit einher gingen signifikante Veränderungen der förderbaren Wassermenge und der Wasserbeschaffenheit.

Vortrag 1.4 (ID 292)

Messung der Methanemissionen von Aufwallungen in der Moosach

Felicitas Kaplar

*Technische Universität München, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, Lehrstuhl für Hydrogeologie
Kontakt: fk@hydroisotop.de*

Auch wenn Flüsse als Methanquelle bekannt sind und mittlerweile im Global Methane Budget berücksichtigt werden, steht nur eine geringe Datenmenge für die Methanemission von Flüssen in die Atmosphäre zur Verfügung. Dies betrifft insbesondere die Methanemission durch Ebullition.

Um der Inkonsistenz der Daten entgegenzuwirken und damit eine detailliertere Modellierung des Methanflusses zu ermöglichen, wurden in dieser Arbeit mit Hilfe von Blasensammlern die aufsteigenden Gasblasen in der Moosach an vier Standorten entlang eines Flussquerprofils gesammelt. Ein Blasensammler wurde am Gleithang des Flusses installiert, zwei in der Flussmitte und der vierte Blasensammler befindet sich am Prallhang. Der Untersuchungszeitraum begann für drei der vier Blasensammler mit dem Einbau am 08.06.2022. Der vierte Blasensammler wurde nachträglich am 25.07.2022 eingebaut. Die letzte Probennahme fand für alle vier Standorte am 12.09.2022 statt. Die Probennahme erfolgte regelmäßig etwa ein bis zweimal pro Woche, wobei das gesammelte Gas mit Hilfe einer Gasmaus von einem Schlauchboot aus entnommen wurde.

Anschließend wurden im Labor das Volumen, die Methan Konzentrationen sowie die Isotopen Signaturen der Proben bestimmt. Da bei der ersten Messung eine Methankonzentration von etwa 60% gemessen wurde, musste die Analyse Methodik angepasst werden. Für die Messungen mit einem GC-FID war es nötig die Proben vor der Messung im Verhältnis 1:100 zu verdünnen. Zusätzlich wurden die Methankonzentrationen mit einer GCM Micro Box gemessen, welche zudem die Analyse der Stickstoff- und Kohlenstoffdioxidkonzentrationen der Proben ermöglichte.

Um herauszufinden welche Faktoren einen potenziellen Einfluss auf die Menge der aufsteigenden Gasblasen, sowie auf die Methankonzentration der Gasblasen und das Isotopenverhältnis haben, wurden diese mit der Wassertemperatur, der Wassertiefe, der Zeit zwischen den Probennahmen und Niederschlagswerten verglichen.

Durch die Charakterisierung des Sedimentes an den gewählten Standorten konnte gezeigt werden, dass die Menge an produziertem Gas sowie die Methan Konzentration Standortabhängig sind, wobei die Korngrößenverteilung, die Porosität und der Glühverlust vermutlich eine wesentliche Rolle einnehmen. Nicht eindeutig festgestellt werden konnte, welche Faktoren beziehungsweise welche Kombination aus Einflüssen für eine Zu- beziehungsweise Abnahme der Ebullition-Rate verantwortlich sind. Standortabhängige Unterschiede zeigen sich auch in den Isotopenanalysen. Zudem wurde ein starker Isotopenshift in der ersten Hälfte der Messperiode am Gleithang festgestellt. Mögliche Ursachen des Isotopenshiftes werden im Rahmen dieser Arbeit nicht detailliert analysiert. Durch den Vergleich mit den Auswertungen von drei Peepern, welche etwa 2 m flussabwärts der Blasen-sammler installiert wurden, konnte bestätigt werden, dass die Methan Emission von Flüssen in die Atmosphäre durch Ebullition höher ist als die Emission durch diffusive Prozesse.

Vortrag 1.5 (ID 149)

Der Einfluss des Klimawandels auf Süßwasserlinsen von Barriereinseln und ihre Brackwasserzonen - eine Multiparameterstudie

Lena Thissen¹, Janek Greskowiak¹, Lidia Gaslikova², Gudrun Massmann¹

¹: Institut für Biologie und Umweltwissenschaften (IBU), Institut für Chemie und Biologie des Meeres (ICBM), Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Oldenburg, Deutschland

²: Abteilung Küstenklima und regionale Meeresspiegelveränderungen, Institut für Küstensysteme – Analyse und Modellierung, Helmholtz-Zentrum Hereon, Geesthacht, Deutschland

Kontakt: lena.thissen@uol.de

Wenn Regenwasser in den Boden von Inseln, die von Salzwasser umgeben sind, infiltriert, bilden sich Süßwasserlinsen. Diese Linsen und ihre Brackwasserzonen werden vom

Klimawandel beeinflusst. Sowohl der Meeresspiegelanstieg als auch Änderungen der Grundwasserneubildung wirken sich auf die Größe der Linse und die Mächtigkeit der Brackwasserzone aus. In dieser generischen Studie wird der Einfluss des Klimawandels auf Süßwasserlinsen anhand eines Querschnittsmodells einer hypothetischen Insel mithilfe von Klimaprojektionen untersucht. Mit hochaufgelösten Meeresspiegelprojektionen, jährlichen Werten des Meeresspiegelanstiegs und monatlichen Grundwasserneubildungsprojektionen mehrerer Klimamodelle für die ostfriesische Barriereinsel Norderney werden Änderungen der Süßwasserlinse und ihrer Brackwasserzone zwischen den Dreißigjahresperioden 1971-2000 und 2071-2100 berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit das Volumen und die Tiefe von Süßwasserlinsen in Zukunft abnehmen werden und die Mächtigkeit der Brackwasserzone zunehmen wird.

Die Studie ist in zwei Teile geteilt: Zunächst wird der Einfluss der Randbedingungen auf Inseln verschiedener Breite untersucht, anschließend wird eine Multiparameterstudie mit verschiedenen hydrogeologischen Parametern durchgeführt. Die Randbedingungen haben einen größeren Einfluss auf schmalere Inseln als auf breitere. Der Effekt des Klimawandels hängt stark von den verwendeten Klimamodellen ab. Der Einfluss der hydrogeologischen Parameter, zumindest im betrachteten Variationsbereich, ist weniger ausgeprägt. Von den betrachteten Parametern haben die hydraulische Leitfähigkeit und ihre Anisotropie den größten Einfluss. Unter den untersuchten hydrogeologischen Bedingungen werden sehr wahrscheinlich in Zukunft die Süßwasser- und damit die Trinkwasserressourcen von Inseln schrumpfen.

Vortrag 1.6 (ID 229)

Numerische Modellierung der Landabsenkung in Rafsanjan, Iran, aufgrund erhöhter Grundwasserentnahme zur Bewässerung von Pistazien

Matthias Bockstiegel, Stephan Schulz

*Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Darmstadt,
Schnittspahnstraße 9, 64287 Darmstadt, Deutschland
Kontakt: bockstiegel@geo.tu-darmstadt.de*

Die übermäßige Nutzung von Grundwasser zählt als Hauptursache für Landabsenkungen weltweit und stellt vor allem aride und semiaride Gebiete vor große Herausforderungen. Längerfristige Folgen kontinuierlicher Kompaktion, wie zum Beispiel der Verlust der Aquiferspeicherkapazität, bleiben hierbei lange unentdeckt. Im Iran hat die enorme Grundwasserentnahme über die letzten Jahrzehnte schon in vielen Bereichen zu signifikanter Landabsenkung geführt. Insbesondere stark landwirtschaftlich genutzte Regionen mit

erhöhtem Bewässerungsbedarf sind von diesem Phänomen betroffen. Innerhalb der Rafsanjan-Ebene, Irans Zentrum des Pistazienanbaus, treten dadurch Landabsenkungsraten von bis zu 25 cm a^{-1} auf. Die daraus resultierenden Folgen zeigten sich bereits 1977 in Form von Erdrissen und herausstehenden Brunnengehäusen.

In dieser Studie werden satellitenbasierte InSAR-Analysen mit einer Grundwasserströmungsmodellierung kombiniert, um die grundwasserinduzierte Landabsenkung innerhalb der Rafsanjan-Ebene besser bewerten und vorhersagen zu können. Hierfür wurde ein Grundwasserströmungsmodell basierend auf hydrogeologischen Daten entwickelt. Jährlich variierende Entnahmeraten wurden mittels objektbasierter Klassifikation abgeschätzt und ergänzt. Modellergebnisse historischer Landabsenkungen (1961 bis 2020) werden sowohl mit Hilfe gemessener Grundwasserstände als auch Landabsenkungsraten aus InSAR-Zeitreihen kalibriert und durch Ergebnisse örtlicher Nivellierungskampagnen validiert. Für diesen Zweck wurde ein Kalibrierungsschema konzipiert, das die hydraulischen Parameter des Aquifers sowie die mechanischen Charakteristika der vorkommenden Sedimente koppelt und deren Abhängigkeit in Bezug auf die Landabsenkung berücksichtigt. Diese Kombination liefert darüber hinaus genauere Informationen über die Wasserfreisetzung durch die Kompaktion des Aquifers.

Die simulierte Grundwasserabsenkung liefert im gesamten Modellgebiet einen RMSE von 3,49 m und NRMSE von 0,139. Ergebnisse der Landabsenkung zeigen eine leichte Überschätzung und weisen einen RMSE von $2,5 \text{ cm a}^{-1}$ sowie einen NRMSE von 6,7 % auf. Erstaunlicherweise besteht jedoch keine zwingende Korrelation zwischen simulierter Landabsenkung und dem Rückgang des Grundwasserspiegels. In einigen Gebieten wurden trotz starkem Grundwasserrückgang nur geringe oder gar keine Landabsenkungsraten gemessen und simuliert. Die Landabsenkung innerhalb der Rafsanjan-Ebene kann somit nicht ausschließlich auf die Absenkung des Grundwasserspiegels zurückgeführt werden. Stattdessen fokussieren sich die höchsten Landabsenkungsraten auf Gebiete mit mächtigeren Schichten feinkörniger Sedimente, bei denen die irreversible Umlagerung der Körner zu einer inelastischen Kompaktion führt. Folglich hat die Landabsenkung innerhalb der Rafsanjan-Ebene bereits jetzt zu einem irreversiblen Rückgang der Speicherkapazität des Aquifers um $8,8 \text{ km}^3$ geführt.

Zukünftige Szenarien landwirtschaftlicher Entwicklung zeigen, dass eine fortschreitende Landabsenkung aus wirtschaftlichen Gründen für die Region unvermeidbar ist. Dennoch können durch die Implementierung verbesserter Bewässerungsmethoden die Absenkungsraten und der assoziierte Verlust der Aquiferspeicherkapazität bis zum Jahr 2050 um bis zu 50 bzw. 36 % reduziert werden. Die Minimierung der Landabsenkung kann darüber hinaus zu einer Verminderung des Risikos kurzfristiger Schäden, wie beispielsweise der Infrastrukturschädigung, führen.

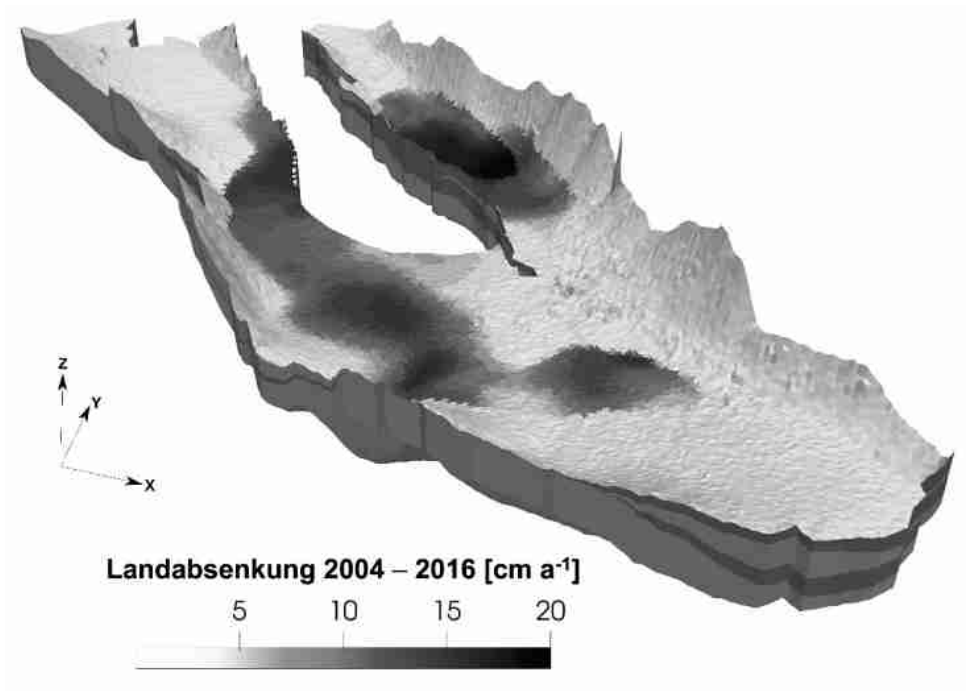


Abb. 1: Landabsenkung 2004 - 2016

Vortrag 1.8 (ID 122)

Post-drought increase in regional-scale groundwater nitrate in southwest Germany

Karuna Jutglar^{1,2}, Jost Hellwig², Michael Stoelzle², Jens Lange¹

¹: Hydrology, Faculty of Environment and Natural Resources, University of Freiburg, Freiburg, Germany

²: Environmental Hydrological Systems, Faculty of Environment and Natural Resources, University of Freiburg, Freiburg, Germany

Kontakt: k.jutglar@hydrosconsult.de

Elevated nitrate concentrations in groundwater are a common challenge for water management. One important factor in this context is higher frequencies and intensities of wet-dry cycles that may cause increased nitrate concentrations in groundwater due to nitrate flushes after drought termination. Yet systematic studies on regional-scale impacts of droughts on groundwater nitrate concentrations are missing so far. Here we analyzed time series of 44 shallow groundwater wells and 41 springs all across the German Federal State Baden-

Wuerttemberg from 2000 to 2018 to characterize patterns of post-drought increase in groundwater nitrate. In general, half of the exceptional nitrate concentrations, which exceeded the 80th percentile of long-term nitrate measurements, could be related to droughts in the research timeframe. The 2003 drought event stood out in terms of drought severity and post-drought nitrate concentration increases in our data. The great majority (91%) of all monitoring sites showed at least one exceptionally high nitrate concentration in the 4 years following the 2003 drought event. Springs were mainly located in forests of steep low mountain ranges and wells in cropland of flat river valleys. Therefore, delay times between drought intensity and nitrate concentration increases as well as magnitudes of nitrate concentration increase were diverse among wells and springs. We derived two distinct nitrate response patterns: (i) nitrate increases immediately following drought events (more common for springs and fractured rock aquifers) and (ii) delayed nitrate increases (more common for wells and porous aquifers). Springs generally showed quicker (median of 101 days) but weaker (median of +1.3 mg/L) postdrought nitrate increases than wells (185 days, +3.4 mg/L). Only few sites exhibited no post-drought nitrate increase and post-drought mean-nitrate concentrations of groundwater reservoirs were extraordinarily high in 2006. Overall, we demonstrate that post-drought nitrate increase in groundwater is omnipresent, while different landscapes and hydrogeological characteristics create a diverse regional pattern. As severe droughts become more frequent in a changing climate, post-drought nitrate increase may intensify problems regarding water quality and supply.

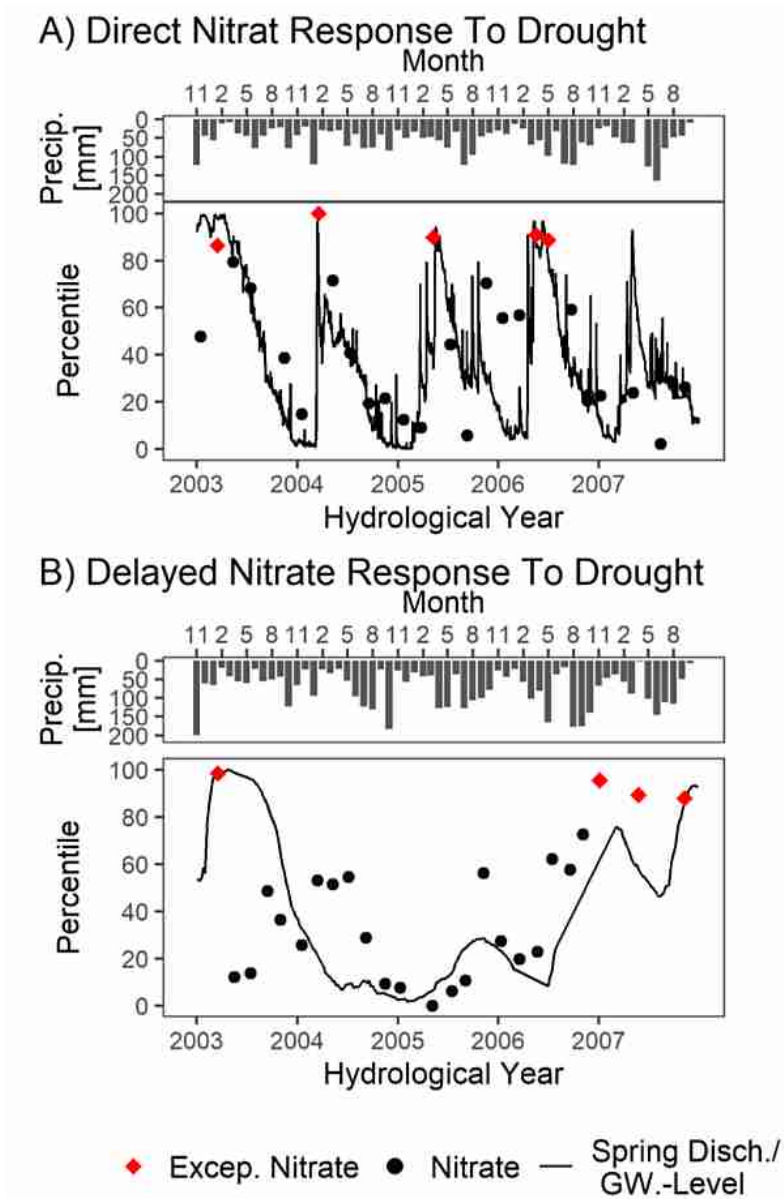


Abb. 1: Nitrate response to drought.

Vortrag 1.9 (ID 335)

Der Einfluss des geogenen Phosphoreintrags durch Gesteins-Wasser-Wechselwirkung auf die Eutrophierungsproblematik des Laacher Sees

*Sascha Rudolph¹, Sven Philipp^{1,2}, Michael Pirrung¹, Karl-Heinz Köppen²,
Thorsten Schäfer¹*

¹: Friedrich-Schiller-Universität Jena, Deutschland

²: Wasser und Boden GmbH, Boppard-Buchholz, Deutschland

Kontakt: sascharudolph@live.com

Der Lacher See (Osteifel, RLP) hat einen Phosphor-Gehalt von durchschnittlich 34 µg/l, womit sich dieser in einem eutrophierten Zustand befindet [1]. Trotz verschiedener Maßnahmen seit dem Beginn des Monitorings in den 1950er Jahren konnte der oligotrophe Zustand nicht erreicht werden, weshalb der geogene Phosphor-Eintrag in den Laacher See, aus der Wechselwirkung von Grundwasser und Aquifermatrix, Gegenstand dieser Untersuchungen ist.

Aus der geochemischen Analytik (RFA und Totalaufschluss + ICP-MS) der Lithologien im Laacher-See-Gebiet (unterdevonische Siliziklastika & quartäre Vulkanite) wurde die Relevanz der Lithologien als geogene Quellen eingeordnet: Die den See umgebenden basanitisch-tephritischen Laven und Schlacken zeigen die höchsten P-Gehalte (2.304 – 3.207 mg/kg) gegenüber der phonolitischen Asche-Lapilli-Tephra des Laacher-See-Vulkans (111 – 777 mg/kg) und den unterdevonischen Siliziklastika (663 – 1.515 mg/kg). Dieser geochemische Trend spiegelt sich in Batchversuchen mit künstlichem Regenwasser im Verhältnis 1:10 über einen Zeitraum von 24 h wider: Die Laven und Schlacken haben die höchste P-Freisetzung von 274,0 – 1.537,7 µg/l gegenüber der Laacher-See-Tephra (LST) (112,0 – 212 µg/l) und dem Unterdevon (8,2 – 64,6 µg/l).

Die hydraulischen und labortechnischen Untersuchungen aus u. a. Siebanalysen und Pumpversuchen weisen eine hohe hydraulische Durchlässigkeit für vulkanische Aquifergesteine (Lava: 10^{-4} m/s, Laacher See Tephra: $2 \cdot 10^{-5}$ – $3 \cdot 10^{-4}$ m/s) und niedrige für die unterdevonischen (10^{-5} – 10^{-7} m/s) und tertiären Gesteine (10^{-7} – 10^{-10} m/s) auf. Die Grundwasserneubildung und -zufluss in den Laacher See werden mittels Guelph-Infiltrometerversuchen, dem Monitoring der Grundwasserdynamik und einer hydrologischen Wasserhaushaltsbilanz quantifiziert.

Die hydrogeochemische Modellierung der Grundwasseranalytik im Anstrom des Laacher Sees mit PHREEQC zeigt eine Untersättigung der Apatit-Phasen mit Sättigungsindizes (SI) von -6,52 bis -0,94 [2]. Damit ist ein Nichtgleichgewicht zwischen der Aquifermatrix und dem Grundwasser anzunehmen, womit die Apatit-Lösung ratenlimitiert ist. Zudem

konnte dargestellt werden, dass weitere P-Phasen wie die sekundäre Fe-PO_4 -Phase Vivianit mit SI von -17,31 – -12,57 gegenüber dem Apatit untergeordnet auftreten. Weiterhin wurde die Bedeutung der Mofetten (rezente, magmatische CO_2 -Entgasungen) auf den Lösungsprozess des Apatits verdeutlicht: In den Grundwässern des Laacher-See-Gebiets treten Fluorapatit und unter saureren Bedingungen die gelöste Spezies H_2PO_4^- als dominierende P-Phasen auf. Ein verringerter pH-Wert infolge des gelösten CO_2 im Grundwasser erhöht die Apatit-Löslichkeit, was den geogenen Phosphoreintrag verstärkt.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden in ein konzeptionelles geologisch-hydrogeologisches Modell des Laacher See Gebiets zusammengeführt. Dieses wird entlang von zwei Transekten aus je 3-4 Grundwassermessstellen durch den Vergleich von hydrochemischer Beprobung und reaktiver Transportmodellierung überprüft mit dem Ziel der Quantifizierung des geogenen P-Eintrags in den Laacher See.

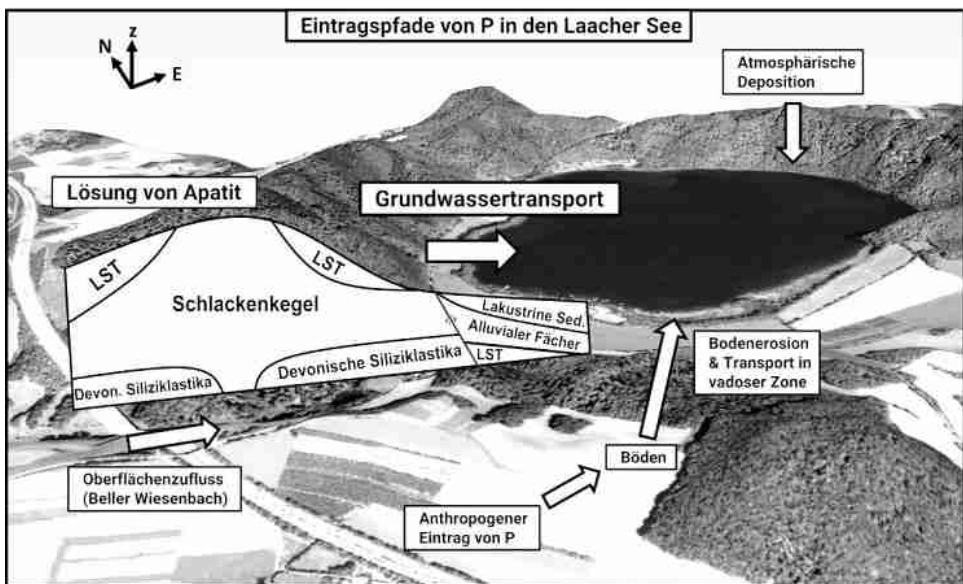


Abb. 1: Eintragspfade von Phosphor in den Laacher See.

[1] Block, U. et al. (2015). Übersicht über die Phosphatthematik am Laacher See. Fachhochschule Bingen, 41.

[2] Parkhurst, D. L., & Appelo, C. A. J. (2013). Description of input and examples for PHREEQC version 3—a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. US geological survey techniques and methods, 6(A43), 497.

Evaluating the effectiveness of groundwater management measures through modelling and stakeholder participation: the case of the Frankfurt Rhine-Main Area

Rodrigo Sánchez González

Fraunhofer ISI, Germany

Kontakt: rodrigo.sanchez.gonzalez@isi.fraunhofer.de

The Frankfurt Rhine-Main area has a long and interesting history with groundwater management. In the last decades, several action plans were elaborated to address the problems of that time. The groundwater management plan, for example, aimed at a sustainable variation of the groundwater level. The aquifer recharge plant in Biebesheim was crucial for this and is a good example of a successful technical solution.

The need to readapt prevails. It is expected that climate change and urban growth will have a significant impact on the groundwater availability. Predicting what will happen in the future is impossible; however, most of the biggest questions concerning groundwater management could be answered through modelling and stakeholder participation.

The measures are the core of this work. They were derived from local and national action plans. 30 measures were selected for a preliminary evaluation. They cover different fields such as rainwater management, drinking water supply, wastewater treatment, renaturation, agriculture, etc. The aim is to cover all activities that have a direct or indirect impact on the groundwater quality and quantity.

The evaluation will be partly quantitative and partly qualitative. The quantitative part will be assessed by means of numerical models. For example, measures aiming at an increase in the groundwater recharge or a decrease in the groundwater extraction (water efficiency measures) will be assessed by the hydrogeological models (covering the unsaturated and saturated zones). Measures aiming at a reduction in point and diffuse pollution (coming from the agriculture and treated effluents) will be assessed by their corresponding numerical solute transport model. The effect of other measures, such as rainwater management, may require developing additional models.

Despite that models are useful to produce and compare results in a structured way, they do not illustrate the whole picture. The interests and concerns from the stakeholders, their limitations and their capacity to act are essential to determine the feasibility of the measures. A qualitative analysis is more suitable here. Interdisciplinary work is crucial for this.

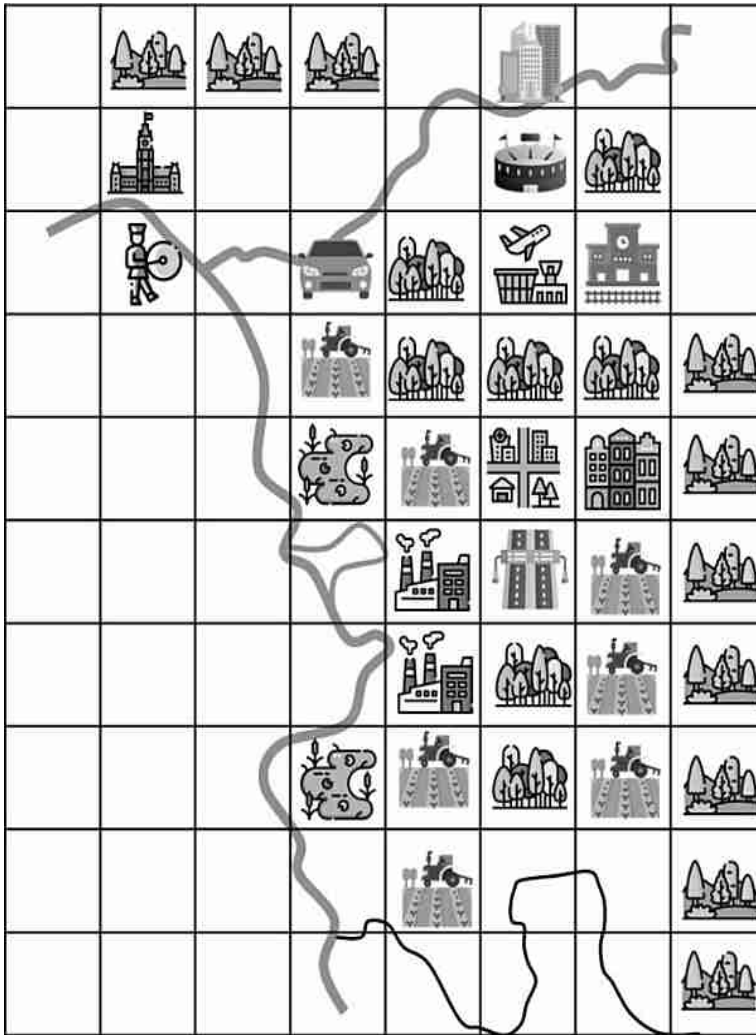


Abb. 1: Raster representation of the Water System Model for the Frankfurt Rhine-Main Area.

Further complexity will be added by considering synergies and trade-offs. For example, renaturing watercourses may enhance groundwater recharge, but it could promote the intrusion of pollutants. Sealing the riverbed does the opposite. But combining the first measure with the introduction of the fourth treatment step at an upstream wastewater treatment plant will yield more positive results.

A crucial part of this work is to discuss the advantages and disadvantages from different measure combinations with different degrees of implementation and considering socio-economic, technologic, environmental, and politic-administrative aspects. The final

intention is to locate and visualize the results in a GIS interface to facilitate the interpretation for the decision makers.

Vortrag 1.11 (ID 241)

Entschlüsselung der wichtigsten Einflussfaktoren auf die mikrobielle und faunistische Artenvielfalt im städtischen Grundwasser von Halle (Saale)

Laura Meyer¹, Julia Becher¹, Martina Herrmann², Christian Griebler³, Peter Bayer¹

¹: Martin Luther University (MLU) Halle-Wittenberg, Nat. Fak. III, Institute of Geosciences & Geography, Applied Geology

²: Friedrich Schiller University (FSU) Jena, Institute of Biodiversity, Aquatic Geomicrobiology

³: University of Vienna, Faculty of Life Sciences, Dept. of Functional and Evolutionary Ecology

Kontakt: laura.meyer@geo.uni-halle.de

In urbanisierten Regionen wird oberflächennahes Grundwasser durch verschiedene anthropogene Einflüsse oft stark beeinträchtigt, was sich beispielsweise in einer deutlich erhöhten Temperatur niederschlägt. Urbane Grundwasserökosysteme sind ohne Zweifel einer zunehmenden Belastung ausgesetzt, was unbekannte Folgen für die Biodiversität und die Wasserqualität mit sich bringt. Die Verteilung und Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften sowie die funktionelle Rolle der biologischen Vielfalt wurden im städtischen Raum bisher allerdings nur unzureichend erforscht.

Unser Projekt setzt sich zum Ziel, räumliche und zeitliche Trends der Biodiversität im urbanen Untergrund am Beispiel der Stadt Halle (Saale) zu untersuchen. Aufgrund der sehr unterschiedlichen hydrogeologischen Gegebenheiten, sowohl im städtischen als auch im außerstädtischen Bereich des Untersuchungsgebiets, zeigt sich ein breites Spektrum an hydraulischen, thermischen und hydrogeochemischen Bedingungen. Dies bietet eine ideale Basis, um die Rolle von räumlich und zeitlich variablen abiotischen Faktoren und anthropogenen Einflüssen auf die Zusammensetzung der mikrobiellen und faunistischen Gemeinschaften im Grundwasser zu erforschen.

Über einen Zeitraum von einem Jahr wurden im Rahmen von 5 Feldkampagnen wiederholte Probenahmen an 91 Grundwassermessstellen durchgeführt. Physikochemische Schlüsselparameter (Temp, LF, pH, und Sauerstoff) wurden on-site mittels Multiparametersonde gemessen. Die Messungen sowie die Probenahmen für spätere chemische und mikrobiologische Laboranalysen wurden im Standwasser der Messstellen als auch im gepumpten Grundwasser durchgeführt. Außerdem wurde pro Messstelle eine

Grundwasserfaunaprobe entnommen, um die Evertebratengemeinschaft morphologisch-taxonomisch zu analysieren. Die mikrobiologischen Analysen umfassen die Charakterisierung der Bakteriengemeinschaften inklusive 16S rDNA Amplikon-Sequenzierung, Bestimmung der Gesamtzellzahl und Aktivitätsmessungen (Konzentration intrazelluläres ATP). Auf der Grundlage dieses Datensatzes erfolgt eine Korrelationsanalyse auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen. So soll es möglich sein, Schlüsselfaktoren zu ermitteln, welche die Biodiversitätsmuster im städtischen Grundwasser steuern. In unserer Präsentation werden erste Ergebnisse vorgestellt und diskutiert sowie ein Ausblick auf geplante Forschungsaktivitäten gegeben.

Vortrag 1.12 (ID 293)

Karbonatische Grundwasserleiter zur thermischen Speicherung von Energie: Batch- und Säulendurchströmungsversuche zur Analyse von Clogging- und Scaling-Prozessen

Leonie Gabler¹, Alireza Arab¹, Martin Binder^{1,2}, Traugott Scheytt¹

1: TU Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für Hydrogeologie und Hydrochemie, Deutschland

2: Universität Basel, Hydrogeologie/Angewandte und Umweltgeologie, Schweiz

Kontakt: Leonie.Gabler@geo.tu-freiberg.de

In den letzten Jahrzehnten haben Aquifer Thermal Energy Storage (ATES)-Systeme eine erhöhte Aufmerksamkeit erfahren. ATES dient der vorübergehenden Speicherung lokal und zeitlich überschüssiger thermischer Energien in Grundwasserleitern. Der Erfolg von ATES ist hierbei nicht nur von den Eigenschaften des Grundwasserleiters (hydraulische Durchlässigkeit, Wärmeleiteigenschaften, Porosität), sondern auch vom Zustand der technischen Ausrüstung abhängig.

Während des ATES-Betriebs können – insbesondere aufgrund der deutlich unterschiedlichen Druck- und Temperaturbedingungen über- und untertage – Clogging und Scaling-Phänomene auftreten (unerwünschte hydrogeochemische Reaktionen, Auflösungs-, Ausfällungs- und Ausflockungsprozesse, mikrobiologisches Wachstum). Infolge der damit verbundenen Verringerung der Effizienz, insbesondere verursacht durch die Reduktion der Permeabilität des Reservoirs sowie der Erhöhung der Kosten für Reinigung und Austausch verstopfter und korrodierter Teile, scheitern ATES-Projekte häufig.

Im BMBF-Projekt UnClog-ATES werden Clogging- und Scaling-Prozesse interdisziplinär untersucht (Mikrobiologie, Geologie, Hydrogeologie, Geochemie) sowie Einflussfaktoren für den Spezialfall „karbonatische Grundwasserleiter“ bestimmt. Basierend auf den

Erkenntnissen werden Gegenmaßnahmen (z. B. Scaling-Inhibitoren oder CO₂-Zugabe) gezielt (weiter-) entwickelt.

In 1-D-Säulendurchströmungsversuchen und Batchversuchen werden ATES-Bedingungen (Druck, Temperatur, Hydraulik und chemische Zusammensetzung) systematisch simuliert. Erstere dienen der Abbildung der im Realsystem ablaufenden Transportprozesse, Letztere der Variation des hydrochemischen Milieus und der Gesteinszusammensetzungen. Dabei kommen unterschiedliche ATES-relevante Gesteine zum Einsatz: Treuchtlinger Marmor (ein Jura-Kalkstein von der Schwäbischen Alb; hauptsächlich Calcit) als repräsentatives Gestein für den Malm, sowie Erzgebirgsmarmor aus Hammerunterwiesenthal im Erzgebirge (Calcit und Dolomit). Als Fluid werden u. a. Proben aus ebendiesem Erzgebirgsmarmor-Steinbruch verwendet. Für die Batch- und Durchströmungsversuche sind Zyklen bei ATES-typischen Temperaturen zwischen 5 °C und 60 °C vorgesehen. Um die Veränderung der hydrochemischen und geochemischen Bedingungen während der Versuche zu erfassen, werden Fluidparameter in Messzellen quasi-kontinuierlich überwacht sowie umfassende hydrochemische und geochemische Analysen vor, während und nach den Versuchen durchgeführt, siehe Abbildung 1.

Die Versuche werden von einer hydrochemischen Modellierung (PHREEQC) begleitet – zwecks Quantifizierung der Prozesse, aber auch für die A-priori-Abschätzung von Experimentalparametern. Erste Simulationsergebnisse ergaben z. B. eine Ausfällung von Calcit bei Verwendung des genannten Gesteinsmaterials und Fluids und einer Temperatur von 15 °C. Eine Modifikation des Modelllaufs zeigte, dass diese Ausfällungen durch die Zugabe einer bestimmten Menge an gelöstem CO₂ verhindert und die Carbonate in Lösung gehalten werden können.

Durch die gezielte Kombination der Laborerkenntnisse mit o. g. PHREEQC-Modellierungen können die hydrochemischen Prozesse in simulierten ATES-Systemen nachgebildet werden. Langfristig soll UnClog-ATES zu einer Verbesserung der Vorhersage-Genauigkeit biogeochemischer Reaktionen und zur Schaffung von Methoden sowohl für die Abschätzung des Clogging-Potenzials als auch für die Entwicklung und Prüfung möglicher Gegenmaßnahmen beitragen.

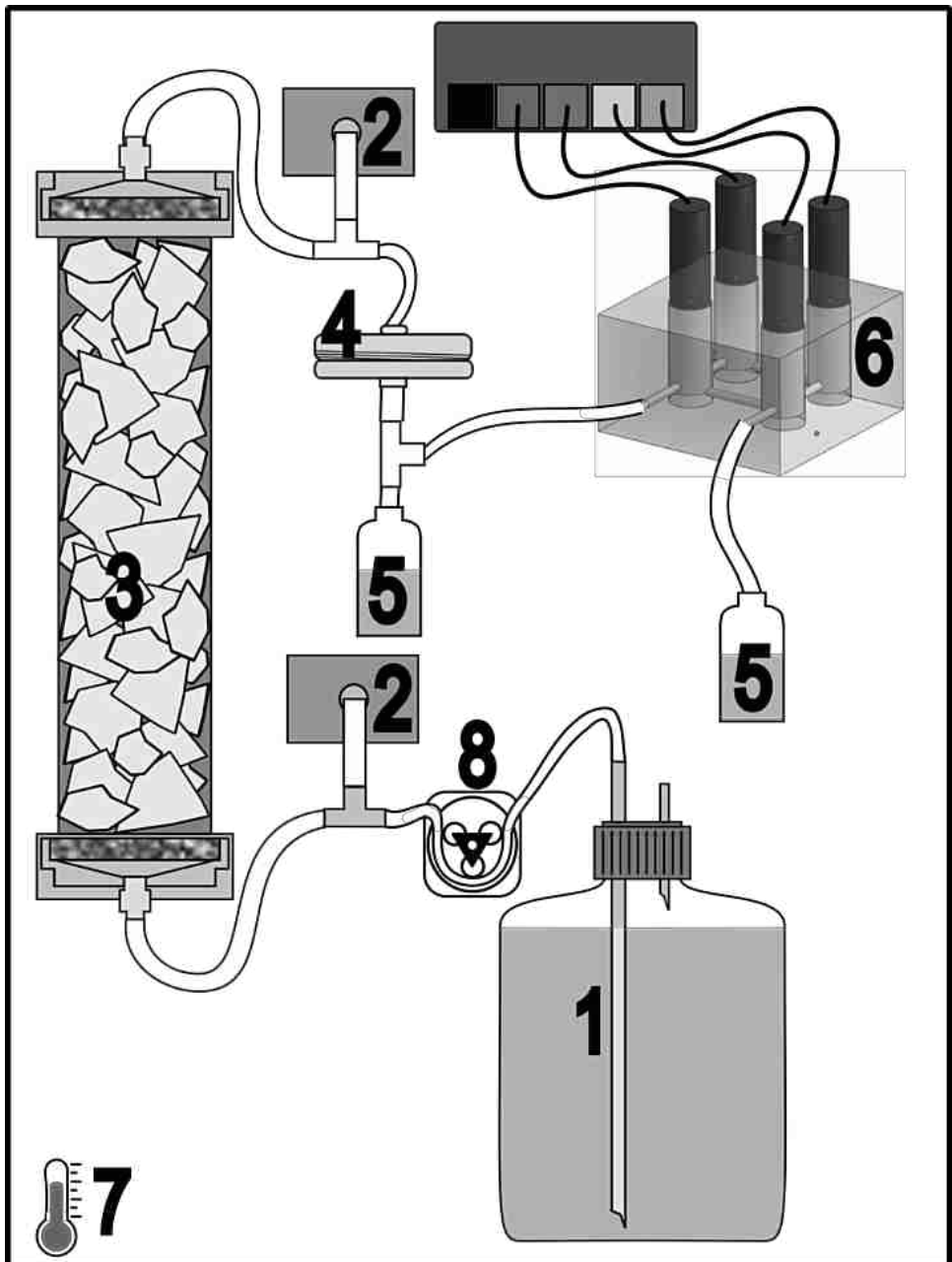


Abb. 1: Setup der Säulendurchströmungsversuche: 1) Reservoir-Behälter, 2) Drucksensoren, 3) Edelstahlsäule mit zerkleinertem Gestein und Edelstahl-Filterscheiben, 4) Filterhalter mit PES-Membranfilter, 5) Probenahmegefäße, 6) Durchflussmesszelle mit Sonden für pH, elektrische Leitfähigkeit, Redox-Potenzial und Sauerstoffgehalt sowie einem Messsystem auf Arduinobasis, 7) gesamter Versuchsaufbau in einem Thermoschrank mit 8) Pumpe.

Active Distributed Temperature Sensing (A-DTS) Experimente zur Quantifizierung von Fließgeschwindigkeiten

David Hoffmann¹, Andreas Englert¹, Carsten Leven², Peter Bayer¹

¹: Martin-Luther-Universität Halle, Deutschland

²: Universität Tübingen, Deutschland

Kontakt: david.hoffmann@geo.uni-halle.de

Viele hydrogeologische Fragestellungen erfordern die genaue Kenntnis der hydraulischen Durchlässigkeit von Grundwasserleitern. Eine weitverbreitete Methode zur Bestimmung der vertikalen Durchlässigkeitsverteilung sind Flowmeter-Messungen. Diese besitzen jedoch durch große Mittelvolumen eine geringe Auflösung. Außerdem können unklare Strömungsverhältnisse in einer Messstelle zu Unsicherheiten führen. In dieser Arbeit wird ein Ansatz vorgestellt, die Erkundung der vertikalen Durchlässigkeitsverteilung zu verbessern.

Distributed Temperature Sensing (DTS) ist eine faseroptische Methode zur Temperaturmessung entlang eines Lichtleiterkabels. Dieses kann zusätzlich mit einem Heizkabel ausgestattet werden (Active-DTS / A-DTS), wodurch sich beim Aufheizen und Abkühlen die Temperaturentwicklung entlang des Kabels beobachten lässt. Wird ein solches heizbares Kabel in eine Grundwassermessstelle eingebracht, kann die Temperaturentwicklung zur Bestimmung der Grundwasserfließgeschwindigkeit in der Messstelle genutzt werden.

Am Testfeld Lauswiesen wurden im Sommer 2022 zwei A-DTS-Experimente durchgeführt. Ziel war, die Verteilung der Grundwasserfließgeschwindigkeit in einer Messstelle aus der Temperaturentwicklung beim Heizen und Abkühlen entlang des Lichtleiterkabels zu bestimmen. Dabei wurde aus der Messstelle unter konstanten Bedingungen Grundwasser gefördert. Nach einer DTS-Hintergrundmessung wurde im Zuge der beiden A-DTS-Experimente einmal mit 15 W/m über den Zeitraum von 20 Minuten und einmal mit 25 W/m über einen Zeitraum von 5 Minuten geheizt und gleichzeitig die Temperaturentwicklung vertikal aufgelöst beobachtet. Im Anschluss an den Heizvorgang wurde das Abkühlen entlang des A-DTS-Kabels beobachtet. Zum späteren Vergleich wurden an der Messstelle zudem klassische Flowmeter-Messungen durchgeführt.

Für die Auswertung der A-DTS-Experimente wurde die tiefenabhängige Fließgeschwindigkeitsverteilung in der Messstelle invers aus den Temperaturverläufen beim Heizen und Abkühlen bestimmt, um die hydraulische Durchlässigkeit des Grundwasserleiters vertikal aufzulösen. Hierzu wurden drei unterschiedlichen Methoden genutzt: ein grafisches

Verfahren, ein Verfahren mit Anpassung des Moving Infinite Line Source Models (MILS) und ein Wärmetransportmodell für beheizte faseroptische Kabel.

Die grafische Auswertung zeigt, dass die für die Experimente gewählte Pumprate und Heizparameter nur einen geringen Einfluss auf die Maximaltemperatur über die Tiefe haben. Auch die Temperaturentwicklung beim Heizen und Abkühlen in den verschiedenen Tiefen weist nur geringe Unterschiede auf. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Pumprate zu hoch gewählt wurde, da die Anwendbarkeit der beiden verwendeten Modelle mit höherer Fließgeschwindigkeit abnimmt. Die Experimente sollten zudem nicht bei hohen Umgebungstemperaturen durchgeführt werden, da dies zu einer Überhitzung des Kabels im Bereich außerhalb des Grundwassers führen kann. Aufgrund der Witterungsbedingungen (volle Sonneneinstrahlung, 30 °C) konnte das Heizen mit 25 W/m nur für 5 Minuten aufrechterhalten werden. Für die MILS-Anwendung wäre allerdings eine längere und intensivere Heizphase von Vorteil, um advektiven und diffusiven Wärmetransport besser unterscheiden zu können.

2 Klimawandel und Grundwasserdargebot in der Zukunft

21.03.2024, 11:00 - 15:00, Brüssel Saal

Steffen Bender (Hereon - Climate Service Center Germany (GERICS))

Frank Herrmann (Forschungszentrum Jülich)

Vortrag 2.1 (ID 240)

Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt in Hessen

Mario Hergesell

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Deutschland

Kontakt: mario.hergesell@hlnug.hessen.de

In Hessen wird das Trinkwasser nahezu vollständig aus Grundwasser gewonnen. Die zuletzt gehäuft aufgetretenen Trockenjahre 2018-2020 haben aufgezeigt, dass es während länger andauernder Trockenheit auch in einem vermeintlich wasserreichen Bundesland wie Hessen bereits heute zu vorübergehenden lokalen Engpässen in der Trinkwasserversorgung kommen kann. Die deutlich erkennbaren Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser erfordern entsprechende Anpassungsmaßnahmen im Hinblick auf einen nachhaltigen Schutz der Wasserressourcen und die langfristige Sicherung der Wasserversorgung in Hessen. Hierfür ist es notwendig, möglichst frühzeitig langfristige Entwicklungen im Grundwasser zu erkennen.

Für die Untersuchung der langfristigen Entwicklung der Grundwasserneubildung setzt die KLIWA-Kooperation länderübergreifend das Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW ein. Dabei werden sowohl die beobachtete Entwicklung in der Vergangenheit (ab 1951), als auch künftige Entwicklungspfade (bis 2100) auf Basis regionaler Klimaprojektionen betrachtet. Bis zum Jahr 2002 war die Grundwasserneubildung in Hessen durch eine große jährliche Variabilität gekennzeichnet, wobei sich nasse, trockene und durchschnittliche Jahre abwechselten. Seit dem Trockenjahr 2003 liegt die jährliche Grundwasserneubildung meist unterhalb des langjährigen Mittelwertes. Grundwasserneubildungsreiche Nassjahre wurden in Hessen seit 2003 gar nicht mehr beobachtet. Dadurch lag die Grundwasserneubildung in den vergangenen 20 Jahren 28 % unter dem langjährigen Mittel (1971-2000).

Für die Zukunft ergibt sich auf Grundlage der 13 regionalen Klimaprojektionen des KLIWA-Ensembles kein eindeutiger Trend für die Grundwasserneubildung. Es gibt Projektionen mit Zu- und Abnahmen, was zu einer großen Ergebnisbandbreite ($\pm 35\%$) und somit großen Unsicherheiten am Ende des Jahrhunderts (2071-2100) führt. Der Median des Gesamtensembles weicht dabei nur wenig ($\pm 5\%$) vom Ist-Zustand (1971-2000) ab.

Für die Ableitung von Anpassungsmaßnahmen im Kontext Wasserversorgung ist bei der Verwendung der auf regionalen Klimaprojektionen basierenden Simulationsergebnisse ein Risiko-basierter Ansatz zu verfolgen. Die alleinige Betrachtung des Medians ist für diese Zwecke nicht zielführend. Die KLIWA-Kooperation vertritt den Standpunkt, dass in Bezug auf die Wasserversorgungssicherheit und das Vorsorgeprinzip der ungünstigste Entwicklungspfad des Ensembles die entscheidende Rolle spielt. Auch ist zu beachten, dass bei der Verwendung von über 30 Jahre hinweg gemittelten Änderungssignalen essenzielle Informationen verloren gehen. Da die Wasserversorgung besonders durch die Extrema vor Herausforderungen gestellt wird, sollte die Betrachtung von 30-jährigen Mitteln ergänzt werden, z. B. um Stresstests und Auswertungen zur Variabilität, Abfolge und Häufigkeit von Extremjahren (KLIWA 2023).

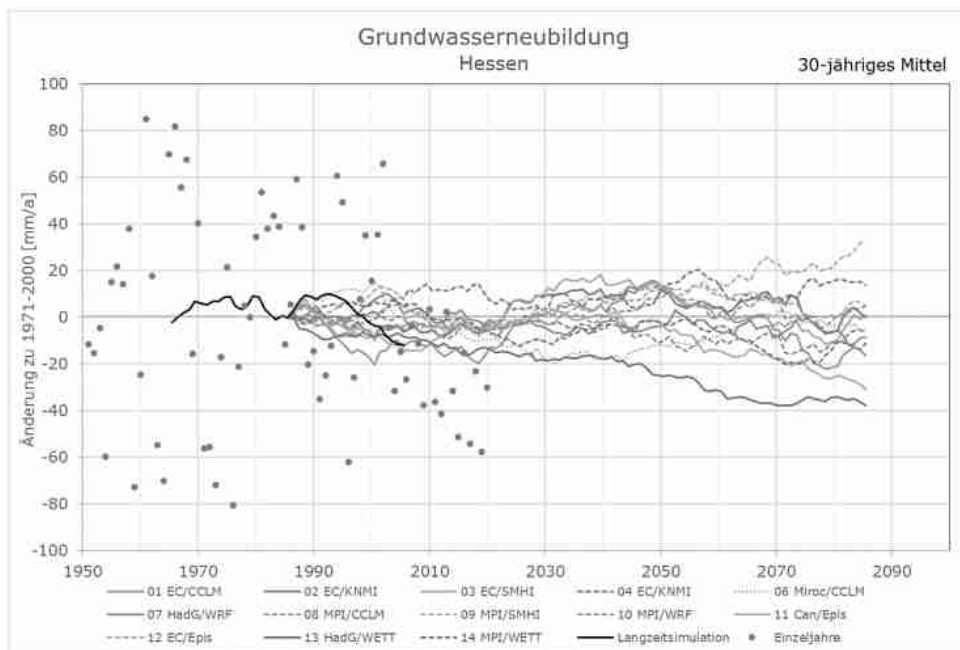


Abb. 1: GWN-Projektionen Hessen.

Die KLIWA-Ergebnisse fließen als wichtige Grundlagen für die Formulierung von Anpassungsmaßnahmen und Handlungsempfehlungen in die jeweiligen Konzepte der Länder ein. Der im Juli 2022 von der Hessischen Landesregierung beschlossenen Zukunftsplan Wasser

beinhaltet eine Vielzahl an Maßnahmen, welche den vorsorgenden Schutz der Wasserressourcen, die langfristige Sicherung der Wasserversorgung sowie eine effiziente Wassernutzung zum Ziel haben.

KLIWA AG Grundwasser (2023): Positionspapier der Kooperation KLIWA - Aussagen zur Grundwasserneubildung auf Basis regionaler Klimaprojektionen im Kontext Wasserversorgung.- HyWa, 67, 5: 344-349.

Vortrag 2.2 (ID 137)

Grundwassermanagement im Klimawandel: Dargebot und Bedarf in Wasserkonzepten

Frank Müller, Uwe Boester, Natascha Bäßler

ahu GmbH, Deutschland

Kontakt: u.boester@ahu.de

Der Klimawandel betrifft in zunehmendem Maß jeden Lebensbereich und stellt insbesondere die Wasserwirtschaft vor große Herausforderungen. Zwar sind die Prognosen und Projektionen in Abhängigkeit des betrachteten Zeitraums mit zunehmender Unsicherheit behaftet, doch zeigt sich bereits jetzt, dass in vielen Regionen weltweit und in Deutschland Auswirkungen auf Wasserbedarf und Wasserdargebot absehbar sind. Hessen reagiert auf diese Unsicherheit, die den Wasserhaushalt und damit die öffentliche Wasserversorgung betrifft, mit der Förderung der Erstellung kommunaler Wasserkonzepte. Die Konzepte stellen u. a. dem prognostizierten Bedarf einer Gemeinde/Kommune das projizierte Grundwasserdargebot aus Niederschlag gegenüber. Ziel ist es, den Wasserhaushalt insgesamt (Oberflächen- und Grundwasser) zu erfassen und sowohl die aktuelle Wassernutzung als auch Alternativmaßnahmen zu benennen, quantifizieren und Maßnahmen abzuleiten. Neben einer Aufnahme des IST-Zustands werden Prognosen und Projektionen für die Entwicklung von Bedarf und Wasserressourcenverfügbarkeit bis 2065 miteinander verglichen.

Die Beobachtungsdaten einzelner, beispielhafter Gewinnungsanlagen zeigen die Grundwasserstandentwicklung der letzten 30 Jahre vor Ort. Unterschiede zwischen einzelnen Gewinnungsgebieten sind ebenso feststellbar, wie die Langzeitentwicklung seit 2003 mit abnehmenden Grundwasserständen. Als Vergleich dieser Grundwasserstände mit der Klimaentwicklung wird die Grundwasserneubildung aus Niederschlag genutzt. Zur Abschätzung dieser Grundwasserneubildungskomponente liegen in Hessen hoch aufgelöste Beobachtungsdaten seit 1951 sowie Projektionsdaten bis 2100 vor. Die Referenzperiode für die Grundwasserneubildung aus Niederschlag im IST-Zustand ist die Klimanormalperiode 1991-2020. Als Ausgangsdaten für die Projektionen der Grundwasserneubildung aus Niederschlag für die Periode 2036-2065 liegen 13 Klimaprojektionen für Hessen vor.

Diese Projektionen decken eine große Bandbreite der Grundwasserneubildung ($\pm 36\%$) ab. Vergleichsfläche sind die hydrogeologischen Teilräume Hessens, sodass auch für die Projektionen auf kommunaler Ebene Entwicklungsszenarien definiert werden können.

In die Prognose des Wasserbedarfs gehen alle aktuellen Wassernutzungen (Öffentliche Wasserversorgung, Industrie, Landwirtschaft, Nutzung Dritter) mit ein und aufgrund der Bevölkerungs-, Klima- und Wirtschaftsentwicklung werden Bedarfsprognosen erstellt. Sowohl die Bedarfsprognose als auch die Dargebotsprojektion werden drei Szenarien definiert (oberes, mittleres, unteres), die in ihrer Bandbreite die möglichen Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Wasserwirtschaft abbilden.

Aus dieser Betrachtung ergeben sich Maßnahmenvorschläge für die Praxis, die sowohl Oberflächenwasser- als auch Grundwassernutzungen umfassen, sowie die nachhaltige Wasserversorgung der Bevölkerung sicherstellen sollen. Anhand von Beispielsmaßnahmenkatalogen und konkreten Maßnahmen werden die Möglichkeiten zur nachhaltigen Sicherung der Wasserversorgung für Wasserversorger, Verbraucher und Natur abgeleitet. Die Wasserkonzepte (kommunal und übergeordnet/regional) schließen von Beginn an Wasserdargebot, Verbraucher (Haushalte, Industrie, Landwirtschaft) und Naturschutzbelange (Ökologie) mit ein, um mit den Maßnahmen nachhaltig das Grundbedürfnis einer sicheren Wasserversorgung gewährleisten und frühzeitig auf die anstehenden Veränderungen reagieren zu können.

Vortrag 2.3 (ID 177)

Anders als erwartet: Grundwasser im Klimawandel

Gunnar Lischeid^{1,2}, Jenny Kröcher^{1,2}, Justus Weyers², Jörg Steidl¹, Christian Lehr²

¹: Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF)

²: Universität Potsdam

Kontakt: lischeid@zalf.de

Die trockenen und sehr warmen Jahre 2015 und dann wieder ab 2018 haben das Bewusstsein für Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt geschärft. Ob und inwiefern die vorliegenden Daten jedoch bereits einen längerfristigen gravierenden Wandel belegen oder es sich dabei nach wie vor nur um vorübergehende Anomalien handelt, ist umstritten. Die vorliegenden Trendanalysen liefern ein uneinheitliches Bild: Es werden sowohl signifikante Zunahmen als auch signifikante Abnahmen der Grundwasserspiegel beobachtet, oft ohne erkennbare Gründe für das unterschiedliche Verhalten. Modellierungen der langjährigen Dynamik der Grundwasserneubildung liefern ebenfalls ein heterogenes Bild.

Unsere Analysen langjähriger Monitoring-Daten der Landesämter in drei Bundesländern (Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Bayern) mittels Hauptkomponentenanalyse zeigten teilweise unerwartete, aber über alle Bundesländer konsistente Ergebnisse, die manche der gängigen Erwartungen in Frage stellen. Dieser Daten-getriebene Ansatz erfordert keine anderen Daten als die Ganglinien möglichst vieler Grundwassermessstellen. Damit ließen sich sowohl lokale als auch regionale anthropogene Effekte von natürlichen Effekten unterscheiden. Nachweisen ließen sich beispielsweise Unterschiede zwischen Poren- und Kluftgrundwasserleitern oder Auswirkungen regionaler Unterschiede der Witterungsdynamik innerhalb einzelner Bundesländer. Als dominierender Effekt, der den größten Teil der Unterschiede zwischen den verschiedenen Grundwasserganglinien ausmacht, erwies sich jedoch das Ausmaß der Dämpfung bzw. Glättung in den Ganglinien, das vom Flurabstand und der Bindigkeit der Grundwasserüberdeckung bestimmt wurde. Der Grad der Dämpfung korrelierte wiederum sehr eng mit dem Vorzeichen und der Stärke langjähriger Trends in den Grundwasserganglinien.

Es zeigte sich, dass hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser der tieferen ungesättigten Zone eine Schlüsselrolle zukommt, die jedoch bisher weitgehend ignoriert wurde. Anders als oft angenommen, kann hier nicht von einem annähernd konstanten Wassergehalt, z. B. bei Feldkapazität, ausgegangen werden. Stattdessen ist es hier teilweise über Jahrzehnte hinweg zu einer kontinuierlichen Entleerung des Wasservorrats gekommen, der auch in Perioden nasserer Jahre nur unvollständig wieder aufgefüllt wurde. An Messstellen mit Flurabständen um die 20 m hat diese Entwicklung bereits Anfang der 1980er Jahre eingesetzt, in Bereichen geringerer Flurabständen erst später, aber vielerorts schon deutlich vor 2015. Anders als oft erwartet erweisen sich deshalb nicht die Messstellen mit flurnahem Grundwasser, sondern gerade die mit sehr großen Flurabständen als geeignete Frühwarnsysteme.

Für die Modellierung der Grundwasserneubildung ergeben sich ebenfalls einschneidende Konsequenzen. Erstens muss die Dämpfung des hydrologischen Signals in der tieferen ungesättigten Zone explizit in den Modellen berücksichtigt werden. Zweitens sind für die Modellierung Gedächtniseffekte auf der Skala einiger Jahrzehnte zu berücksichtigen. Drittens zeigte sich, dass die Richards-Gleichung prinzipiell nicht in der Lage ist, diese starke Dämpfung abzubilden. Dafür ist eine Erweiterung der Richards-Gleichung um einen „fractional calculus“-Ansatz erforderlich, wie er seit Anfang der 2000er Jahre entwickelt und wiederholt angewendet, aber dennoch in der Fachwelt weitgehend ignoriert wurde.

Analyse der historischen und Prognose der zukünftigen Quellschüttungen des Blautopfs unter den Bedingungen des Klimawandels

Nico Goldscheider, Xinyang Fan, Nadine Goeppert

Karlsruher Institut für Technologie, Deutschland

Kontakt: nico.goldscheider@kit.edu

Der Klimawandel wird vielfältige, teils gravierende aber regional sehr unterschiedliche Auswirkungen auf die Verfügbarkeit und Dynamik der Grundwasserressourcen haben. Die Prognosen sind allerdings oft mit großen Unsicherheiten behaftet. Die Analyse historischer Datenreihen ermöglicht ein besseres Verständnis der Zusammenhänge zwischen Klima und Grundwasser und erhöht somit das Vertrauen in die Vorhersagen. In dieser Studie wurde die Reaktion der Quellschüttung des Blautopfs bei Blaubeuren auf historische und zukünftige Klimaveränderungen quantifiziert. Der Blautopf entwässert ein Einzugsgebiet von 165 km² auf der Schwäbischen Alb, Deutschlands größter Karstregion, und gehört mit einer Schüttung von rund 0,3 bis 30 m³/s zu den größten Quellen Mitteleuropas.

Die Studie beinhaltet drei Schritte: 1. Statistische Analyse historischer Zeitreihen (1952–2021) von Klimavariablen und Quellschüttungen; 2. Aufbau eines Reservoir-Modells (KarstMod), das mit den beobachteten Quellschüttungen kalibriert wurde; 3. Simulation zukünftiger Quellschüttungen mit drei verschiedenen Klimawandelszenarien (RCP 2.6, 4.5 und 8.5 als Extremszenario). Die statistische Zeitreihenanalyse zeigt steigende Lufttemperaturen und schwankende Jahresniederschläge, aber bisher keine signifikanten Änderungen der jährlichen Mittel- und Niedrigabflüsse des Blautopfs. Der jährliche Spitzenabfluss scheint sich jedoch ab 1988 aufgrund abnehmender Niederschläge, steigender Lufttemperaturen bzw. Evapotranspiration sowie geringerer Schneeschmelze zu niedrigeren Werten (< 13,6 m³/s) verschoben zu haben. Die veränderte Schneedynamik zeigt sich auch in einer Erhöhung der Quellschüttungen im Januar und einer Verringerung im April, wobei das Signifikanzkriterium knapp verfehlt wird (s. Abbildung 1). Den Prognosen aller Klimaszenarien zufolge könnte der Spitzenabfluss in diesem Jahrhundert um 50 % zurückgehen. Aufgrund der zunehmenden Evapotranspiration wird der Basisabfluss bis zum Jahr 2100 je nach gewähltem Klimaszenario voraussichtlich um 35–55 % zurückgehen. Der gewählte dreistufige methodische Ansatz ist sehr gut auf andere Karstquellen übertragbar. Die Ergebnisse für den Blautopf zeigen die zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserressourcen in Karstregionen, illustrieren aber auch die oft komplexen Zusammenhänge und die sich daraus ergebenden Unsicherheiten.

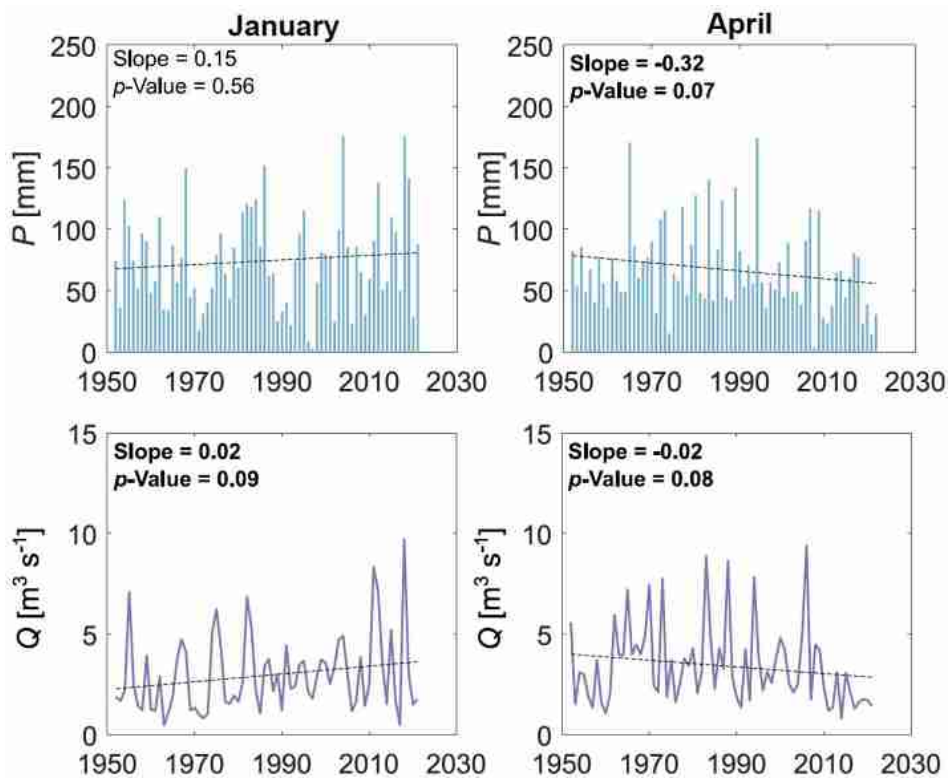


Abb. 1: Beobachtete Trends der Niederschläge und Quellschüttungen des Blautopfs im Zeitraum 1952 bis 2021: Im Januar sind steigende Niederschläge und Quellschüttungen zu beobachten, im April dagegen abnehmende Niederschläge und Quellschüttungen, wobei die Signifikanzschwelle ($p < 0,05$) jeweils nicht erreicht wird (verändert nach Fan et al. 2023).

Fan X, Goeppert N, Goldscheider N (2023): Quantifying the historic and future response of karst spring discharge to climate variability and change at a snow-influenced temperate catchment in central Europe. *Hydrogeology Journal*, published online, <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02703-9>

Reaktion des Grundwassers auf Dürreperioden – Eine Deutschland- weite Analyse

*Pia Ebeling¹, Andreas Musolff¹, Rohini Kumar², Andreas Hartmann³,
Jan H. Fleckenstein^{1,4}*

¹: Department Hydrogeologie, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, Leipzig

*²: Department Hydrosystemmodellierung, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ,
Leipzig*

³: Institut für Grundwasserwirtschaft, Technische Universität Dresden

⁴: Hydrologische Modellierung, Universität Bayreuth

Kontakt: pia.ebeling@ufz.de

Grundwasservorkommen sind von entscheidender Bedeutung für die Wasserversorgung, die Aufrechterhaltung des ökologischen Mindestwasserabflusses und die Integrität aquatischer und vom Grundwasser abhängiger Ökosysteme. Gleichzeitig stehen diese Ressourcen jedoch zunehmend durch die Auswirkungen des Klimawandels unter Stress. Es wird erwartet, dass extremere Wetterbedingungen wie außergewöhnliche Dürreperioden den Druck auf die Grundwasserressourcen in Zukunft weiter verstärken werden, da die Wassernachfrage steigt und die Wasserverfügbarkeit selbst in feuchten Regionen wie Deutschland abnehmen kann. Um langfristige Trends und dürregefährdete Gebiete identifizieren zu können, ist es wichtig, Ähnlichkeiten und Unterschiede in der Dynamik von Grundwasserständen an unterschiedlichen Standorten zu charakterisieren und zu verstehen. In diesem Beitrag analysieren wir die Reaktionszeit der Grundwasserstände auf klimatische Schwankungen an 6626 Grundwassermessstellen in Deutschland über die letzten 30 Jahre hinweg. Wir verwenden den Standardized Groundwater Index (SGI) für mittlere monatliche Beobachtungen und verwenden eine k-means Cluster-Analyse, um Grundwassersysteme mit ähnlichem Verhalten zu identifizieren. Die daraus hervorgehenden acht Cluster der Grundwassermessstellen lassen klare regionale Strukturen erkennen, die auf eine zugrunde liegende räumliche Steuerung hindeuten. Dabei konnten wir unterschiedliche Reaktionsmuster feststellen, die mit regional unterschiedlichen meteorologischen Treibern, verschiedenen charakteristischen Dämpfungseffekten und Zeitverzögerungen und dem Grundwasserflurabstand sowie anthropogenen Einflüssen in Zusammenhang stehen. Im Mittel konnten die meteorologischen Anomalien 50% der Abweichungen in den Grundwasserständen unter Beachtung der individuellen charakteristischen Zusammenhänge erklären. Konsistente Langzeittrends in zwei der identifizierten Cluster lassen sich vermutlich auf anthropogene Einflüsse zurückführen. Diese Studie trägt dazu bei, die regionalen und lokalen Ausprägungen und Kontrollgrößen der Grundwasserstände zu quantifizieren und damit auch

Grundwassersysteme zu identifizieren, die besonders empfindlich auf klimatische Veränderungen reagieren, woraus möglicherweise ein Handlungsbedarf für die Wasserversorgung erwachsen kann.

Vortrag 2.6 (ID 155)

Einfluss des Klimawandels auf die Grundwasserqualität: Entwicklung von Nitratkonzentrationen und potenzielle Aufbereitung

Felix Ortmeyer^{1,2}

1: Universität Greifswald, Deutschland

2: Technische Universität Darmstadt, Deutschland

Kontakt: felix.ortmeyer@tu-darmstadt.de

Der Klimawandel hat nicht nur Einfluss auf das Grundwasserdargebot der Zukunft. Der erwartet starke Einfluss auf die Wasserressource steht auch in direktem Zusammenhang mit der Grundwasserqualität. So muss bei der Untersuchung der Entwicklung zukünftiger Nitratkonzentrationen der Klimawandel ebenfalls berücksichtigt werden.

In einem Modell wurden Vorhersagen zum Wasserhaushalt auf der Grundlage von Klimaprojektionen gemacht (Ortmeyer et al. 2021). Um die Entwicklung der Nitratkonzentration in einem beispielhaften Grundwasserleiter zu simulieren, wurden die Klimaszenarien RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5 verwendet. Die Berechnung der jährlichen Grundwasserneubildung für die drei Klimaszenarien erfolgte mit Hilfe von herunterskalierten Daten zu Niederschlag und Temperatur. Diese Neubildungsdaten wurden mit den erwarteten Düngern kombiniert und die Nitratkonzentrationen anhand der ermittelten Nitratabbaukapazität des Grundwasserleiters geschätzt. Zur besseren Auflösung erfolgte eine Unterteilung des Untersuchungsgebietes in 1000 x 1000 m große Zellen. Dies ermöglicht eine bessere Wiedergabe der Heterogenität des Grundwasserleiters.

Die Ergebnisse zeigen große Unterschiede in der Entwicklung der Nitratkonzentrationen bei Verwendung der verschiedenen Klimaszenarien, jedoch in allen Szenarien einen erheblichen Anstieg. Weitere Modellierungen, wie z. B. mit nur 50 % der Nitratabbaukapazität der Grundwasserleiter, verdeutlichen mit früheren Durchbrüchen und höheren Konzentrationen die große Problematik abnehmender und endlicher Nitratabbaukapazitäten, welche zusammen mit dem Klimawandel die Herausforderung umso größer machen.

In einem zweiten Schritt wurde das Modell der Nitratprojektion mit der Aufbereitungsmethode der gesteigerten Denitrifikation, also der Zugabe von organischem Kohlenstoff als Elektronendonator, kombiniert (Ortmeyer 2023). Das Modell veranschaulicht das erhebliche Potenzial der verstärkten Denitrifikation als wirksame Aufbereitungsmethode. Der

erwartete Anstieg der Nitratkonzentrationen, der sich aus dem Klimawandel und einer quantitativ abnehmenden Wasserressource ergibt, kann in diesem Modell deutlich verringert werden. Bei allen Projektionen kann der Grenzwert von 50 mg /L durch diese Behandlung eingehalten werden.

Das vereinfachte Modell, welches aber die entscheidenden Parameter beinhaltet, ermöglicht die Projektion von Nitratkonzentrationen und verdeutlicht vor allem den Einfluss des Klimawandels. Aus den Entwicklungen kann das Düngeverhalten und die Agrarpolitik sowie eine mögliche Aufbereitung durch eine gesteigerte Denitrifikation in regionalen Maßstäben auf Grundwasserleiterebene abgeleitet und angewendet werden.

Ortmeyer, F., Mas-Pla, J., Wohnlich, S., Banning, A. (2021). Forecasting nitrate evolution in an alluvial aquifer under distinct environmental and climate change scenarios (Lower Rhine Embayment, Germany). *Science of the Total Environment*, 768, 144463. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144463>

Ortmeyer, F. (2023). Treatment by enhanced denitrification of forecasted nitrate concentrations under different climate change scenarios. *Journal of Environmental Management*, 344, 118740. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118740>

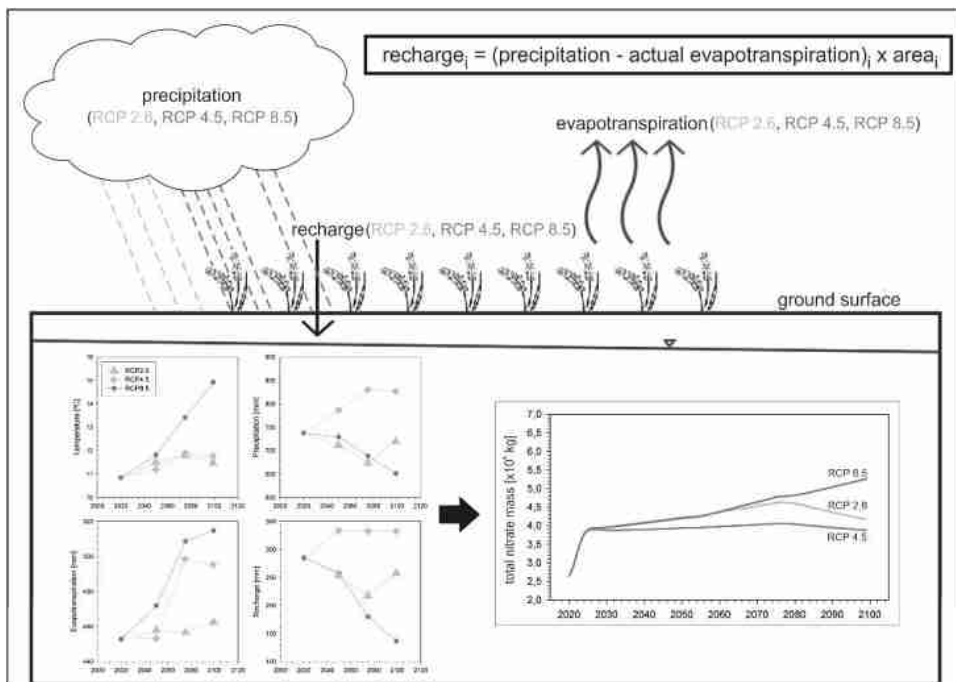


Abb. 1: Graphische Zusammenfassung: Entwicklung der Nitratkonzentrationen auf der Grundlage verschiedener Klimaszenarien (Ortmeyer et al. 2021)

Vortrag 2.7 (ID 195)

Modellgestützte Untersuchung der zukünftigen Grundwasserversalzung in Nordwestdeutschland

*Stephan L. Seibert¹, Janek Greskowiak¹, Gualbert H. P. Oude Essink^{2,3},
Gudrun Massmann¹*

¹: AG Hydrogeologie und Landschaftswasserhaushalt, Institut für Biologie und Umweltwissenschaften, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Deutschland

²: Unit Subsurface and Groundwater Systems, Deltares, Utrecht, Niederlande

³: Department of Physical Geography, Utrecht University, Utrecht, Niederlande

Kontakt: stephan.seibert@uol.de

Das Thema Grundwasserversalzung hat im norddeutschen Küstenraum in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen und ist verstärkt in das Bewusstsein lokaler Akteure vorge drungen. Dies liegt vor allem an den Trockenperioden der vergangenen Jahre, die national erhebliche Auswirkungen auf Ökosysteme und die Wasserwirtschaft hatten, sowie der globalen Häufung katastrophaler Wetter- und Klimaereignisse, welche zu einer stärkeren gesellschaftlichen Wahrnehmung der globale Klimakrise führen.

Mit Hinblick auf Küstengrundwasserversalzung bestehen jedoch weiterhin viele Unsicherheit bezüglich der Ursachen und wesentlichen Antriebskräfte. Eine Verbesserung des Prozessverständnisses mittels hydrogeologischer Feldmethoden ist dabei begrenzt, da Versalzungsprozesse oftmals langsam verlaufen und Auswirkungen nicht unmittelbar in Erscheinung treten. Numerische Modellierungstechniken in Kombination mit gestiegenen Rechenkapazitäten stellen heutzutage vielversprechende Hilfsmittel dar, um dieses Prozessverständnis simulationsbasiert zu verbessern.

Im Rahmen des SALTSA-Projekts wurde die Grundwasserversalzung in Nordwestdeutschland (Weser-Ems-Region) mittels großskaliger numerischer Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodelle untersucht. Die Simulation der paläo-hydrogeologischen Entwicklung, welche wesentliche Randbedingungsänderungen des Holozäns berücksichtigte, ermöglichte die Rekonstruktion der aktuellen Salzverteilung im Untersuchungsgebiet. Hauptantreiber der regionalen Versalzung waren der Holozäne Meeresspiegelanstieg sowie die Entwicklung der Paläogeografie. In den letzten Jahrhunderten und mit fortschreitender Entwicklung der Küstenlinie haben zudem Landabsenkung sowie großflächige Entwässerungsmaßnahmen zu einer Beschleunigung der Versalzung geführt.

Basierend auf der rekonstruierten Salzverteilung wurden anschließend Zukunftsszenarien simuliert, um die zu erwartende Versalzungsdynamik im Verlauf des 21. Jahrhundert abschätzen zu können. Dazu wurde eine Vielzahl von Modellläufen realisiert, welche u. a. die

prognostizierten Änderungen des Meeresspiegels und der Grundwasserneubildung berücksichtigten. Des Weiteren wurden die Auswirkungen von Änderungen der Drainagetiefe, möglicher Landabsenkung sowie veränderter Grundwasserentnahme systematisch untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass die aktuelle Salzverteilung nicht im Gleichgewicht mit den hydrogeologischen Randbedingungen ist, sodass „autonome“ Versalzungsprozesse auch zukünftig eine Versalzungszunahme in den tieferliegenden Marschgebieten verursachen werden, selbst bei Ausbleiben klimabedingter Veränderungen. Ein extremer Meeresspiegelanstieg von ~1.3 m bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (RCP8.5, 95 Perzentil) bewirkt eine Versalzungszunahme in ähnlicher Größenordnung. Großflächige Landabsenkung sowie eine Vertiefung der Drainagen sind weitere potenziell wichtige Antreiber zukünftiger Versalzung.

Die Ergebnisse des SALTSA-Projekts könnten regionalen Entscheidungsträgern als Informationsgrundlage für Anpassungsstrategien dienen. Darüber hinaus stellt der angewandte Modellierungsansatz eine Blaupause für ähnliche Küstengrundwassersysteme dar. Wichtige Aspekte für die Verbesserung zukünftiger Modelle sind das Sammeln und öffentliche Bereitstellen von Beobachtungsdaten, inklusive Salinitätsdaten, der Höhen der Oberflächengewässer und Drainagen sowie der Gebietsabflüsse.

Vortrag 2.8 (ID 298)

Entwicklung und Erprobung eines Monitoringsystems zum Management von Grundwasserentnahmen zur Feldberegung in Nordost-Niedersachsen

Daniel Nienstedt¹, Manuela König¹, Michael Bruns¹, Jörg Martens², Björn Stiller³

¹: Consulaqua Hildesheim, Deutschland

²: Kreisverband der Wasser- und Bodenverbände Uelzen, Deutschland

³: Hamburg Wasser, Deutschland

Kontakt: d.nienstedt@cah-hildesheim.de

In Nordost-Niedersachsen erfordert der steigende Grundwasserbedarf zur Feldberegung bei knapper werdenden Grundwasserressourcen eine an zukünftige Klimaveränderungen angepasste Bewirtschaftung des Dargebots.

Voraussetzung hierfür ist ein Monitoringsystem, das auch in großen Bewirtschaftungsgebieten mit einem handhabbarem Messaufwand die erforderlichen Daten rechtzeitig liefert, um ein bedarfsgerechtes und gleichzeitig ressourcenschonendes sowie ökologisch vertretbares Management der Grundwasserentnahmen zur Feldberegung zu gewährleisten.

Das sich derzeit in den Landkreisen Lüneburg und Uelzen für vier Pilotgebiete in der Realerprobung befindliche System erreicht dies mit der Installation von repräsentativen Leitmessstellen, basierend auf einer geringen und praxistauglichen Anzahl an Grundwasser- und Abflussmessstellen sowie durch Fokussierung auf wenige grundwassernahe, naturschutzrelevante Schutzgüter. Eine Leitmessstelle umfasst jeweils drei Komponenten: eine Grundwassermessstelle im Hauptförderhorizont der Beregnungsbrunnen, eine Grundwassermessstelle im oberflächennahen Grundwasserleiter sowie eine Abflussmessstelle im Gewässer (vgl. Abbildung). Mittels Datenfernübertragung an allen Messstellen und eine autarke Energieversorgung mit Solarpanelen an den Abflussmessstellen wird ein hoher Automatisierungsgrad gewährleistet.

Die erhobenen Messwerte sowie sämtliche Grundwasserentnahmen fließen neben weiteren Daten in ein instationäres numerisches Grundwasserströmungsmodell als Planungs- und Entscheidungsinstrument ein. Dies ermöglicht eine Bewertung des aktuellen mengenmäßigen Zustands der betroffenen Grundwasserkörper und Oberflächengewässer. Auf dieser Grundlage werden mithilfe von Szenario-Berechnungen Prognosen und Handlungsempfehlungen zur Mengenbewirtschaftung der folgenden Beregnungssaison abgeleitet.

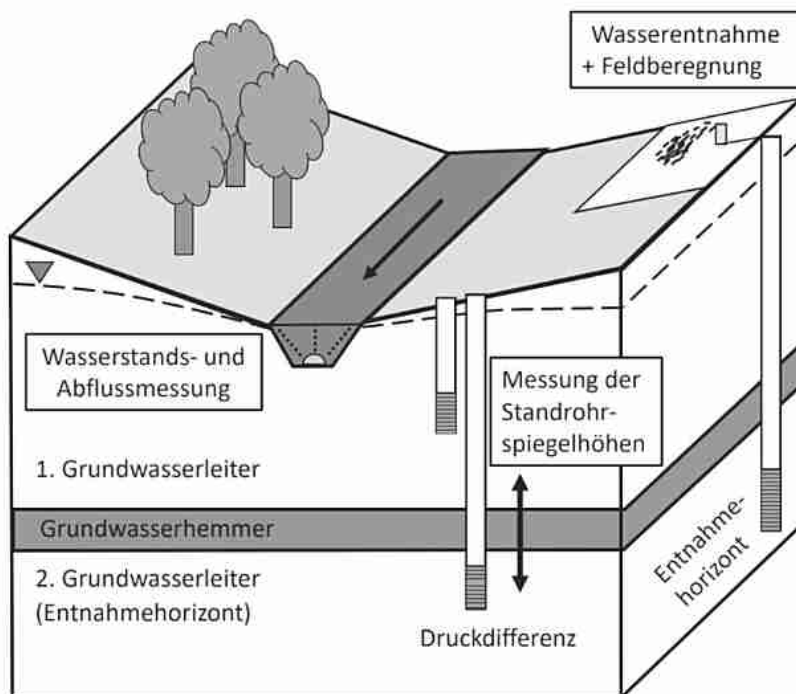


Abb. 1: Schematische Darstellung einer repräsentativen Leitmessstelle.

Ein interaktives Grundwassermodell im Bereich Wassermanagement auf der Basis von FEFLOW

Julia Mayer, Ferdinand Flechtner, Katja Eulitz

DHI, Deutschland

Kontakt: jmr@dhigroup.com

Die Auswertung der Grundwasserstandsentwicklung zeigt in vielen Regionen einen Rückgang der Grundwasserstände (z. B. NLWKN 2020). Gleichzeitig steigen jedoch häufig der Wasserbedarf und die Zahl der Wasserrechtsanträge, insbesondere in landwirtschaftlich geprägten Regionen. Vor diesem Hintergrund wird auch in der Forderung des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW Wasser-Impuls: Zukunftsbilder 2030 bis 2100) beschrieben, dass bei der Entwicklung und Umsetzung langfristiger Zukunftskonzepte im Bereich der Wasserwirtschaft digitale Lösungen eine wesentliche Unterstützung darstellen sollen. Dazu werden u. a. Prognose- und Bewirtschaftungsmodelle für ganze Einzugsgebiete vorgeschlagen.

In diesem Sinne wurde für den Landkreis Vechta ein Grundwassermodell in FEFLOW® (Diersch 2014) erstellt, um die Bearbeitung von Wasserrechtsanträgen zu unterstützen (Flechtner et al. 2022). Grundwassermodelle sind jedoch oft teuer und nur für Experten nutzbar. Dies bedeutet, dass die Modellierung weiterer Szenarien (z. B. erhöhte Förderraten oder zusätzliche Brunnenstandorte), die für den Auftraggeber oder die Behörde von Interesse sind, d. h. die Weiterverwendung des Modells, in der Regel von externen Experten durchgeführt werden muss.

Um der Behörde ein Prognose- und Bewirtschaftungsmodell wie vom DVGW beschrieben zur Verfügung zu stellen, das von der Behörde selbstständig im Tagesgeschäft genutzt werden kann, wurde das Grundwassermodell von DHI WASY zu einem interaktiven Modell erweitert. Dieses kann von der Behörde im Tagesgeschäft über eine Benutzeroberfläche mit wenigen, einfachen Arbeitsschritten selbst bedient werden, ohne auf externe Experten angewiesen zu sein. Die Modellergebnisse der von der Behörde erstellten Szenarien werden automatisch exportiert und in einem interaktiven HTML-Format dargestellt, sodass dem Kunden alle relevanten Daten und Ergebnisse für weitere Entscheidungen schnell und auf einen Blick zur Verfügung stehen.

Ziel sollte es sein, die Modelle den Nutzern nicht als "Black Box" zu übergeben, sondern sie so aufzubauen, dass sie vom Nutzer selbst bedient werden können. Dies ist mit dem hier beschriebenen interaktiven Grundwassermodell für den Landkreis Vechta gelungen.

Diersch, Hans-Jörg. (2013). FEFLOW—Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. 10.1007/978-3-642-38739-5.

Flechtner, Ferdinand & Windler, Maximilian & Peters, Kira & Klinger, Daniel. (2022). Interaktives Grundwasserströmungsmodell zur Unterstützung von Wasserrechtsanträgen in landwirtschaftlich geprägten Regionen. Interactive groundwater flow model to support water right applications in agricultural regions. Grundwasser. 28. 10.1007/s00767-022-00528-z.

Herausgeber: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft Küsten- und Naturschutz (2020). Grundwasserbericht Niedersachsen; Sonderausgabe zur Grundwasserstandssituation in den Trockenjahren 2018 und 2019, Band 41; Cloppenburg

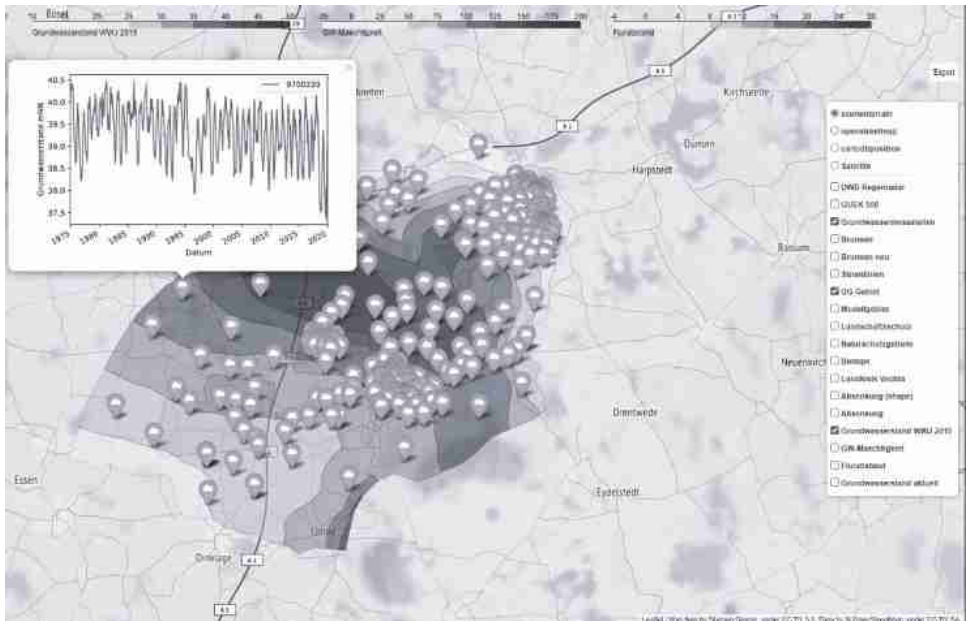


Abb. 1: Übersichtskarte Modellgebiet Vechta.

Vortrag 2.10 (ID 191)

Klimaangepasste Grundwasserbewirtschaftung in Poren- und Karstgrundwasserleitern

Frederick Höckh, Janek Geiger, Michael Finkel, Olaf Cirpka

Universität Tübingen, Deutschland

Kontakt: frederick.hoeckh@uni-tuebingen.de

Der Einfluss des Klimawandels auf das alltägliche Leben ist bereits in vielen Bereichen spürbar. In einigen Regionen Deutschlands wird im Sommer die Nutzung von Trinkwasser eingeschränkt, um den Verbrauch der zurückgehenden Verfügbarkeit anzupassen. Die

langfristige Anpassung der Grundwasserbewirtschaftung an die sich ändernden Bedingungen erfordert verlässliche Prognosen über die zukünftige Entwicklung des Wasserdargebots. Durch die Simulation verschiedener Wasserverbrauchs- und Klimaszenarien soll das Wasserdargebot der Zukunft abgeschätzt und verschiedene Wassermanagementstrategien, wie saisonale Ressourcenschonung oder Managed Aquifer Recharge, simuliert und evaluiert werden.

Im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme "Nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung (LURCH)" untersucht das Projekt "GW 4.0 - Klimaangepasste Grundwasserbewirtschaftung durch Echtzeit-Planungs-Tools und modellbasierte Zukunftsszenarien" die Kluft- und Karstgrundwasserleiter des Oberen Gäus (Oberer Muschelkalks, Grabfeld- und Erfurtformation des Keupers) die in Austausch stehen mit den Porengrundwasserleitern der lokalen quartären Talfüllungen. Durch die intensive wasserwirtschaftliche Nutzung der Grundwasserleiter existieren teils weit zurückreichende Wasserstandsmessungen, sowie Pumpversuche, Markierungsversuche und Kartierungen von Verkarstungserscheinungen. Diese Informationen werden in dem regionalen MODFLOW-6 Grundwassermodell des etwa 300 km² großen Gebiets gebündelt, das den Kern für die Berechnung der Zukunftsszenarien bildet. Die zeitlich variablen Randbedingungen, Flüsse und Grundwasserneubildung, werden von einem Flussmodell und dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW simuliert.

Ziel ist es, die Auswirkungen der klimawandelbedingten Änderungen äußerer Randbedingungen auf das Grundwasser quantifizieren und bewerten zu können. Dabei sind sowohl kurze/saisonale Zeitskalen von Relevanz als auch langfristige Prognosen. Die kurzfristigen und saisonalen Prognosen sollen Anpassungen der Bewirtschaftungsstrategie, wie präferierte Brunnennutzung, erhöhten Fremdwasserbezug oder Einschränkung der Abgabe, ermöglichen, während die langfristigen Prognosen Indikatoren liefern, ob die aktuelle Infrastruktur und Bewirtschaftungsstrategie den sich ändernden Bedingungen ausreichend gewachsen sind. Die langfristigen Zukunftsszenarien basieren auf Prognosen zu Entwicklung von Bevölkerung des Statistischen Landesamts Baden-Württemberg und regionalen Klimaprognosen u. a. nach dem RCP-8.5 Szenario. Daraus soll abgeleitet werden, wie sich Grundwasserentnahme bzw. Wasserverbrauch, Niederschlag, die daraus resultierende Grundwasserneubildung und damit das Wasserdargebot entwickeln.

Das Modell soll durch den Aufbau eines Messnetzes und regelmäßige Dateneinspeisung auf einem aktuellen Stand gehalten werden und aktuelle Grundwasserkarten liefern. Durch die Entwicklung einer Benutzeroberfläche soll das Modell als Werkzeug für Behörden und Wasserversorger dienen, um erste Einschätzungen über die Auswirkungen von bspw. Baumaßnahmen oder Wasserentnahmestrategien treffen zu können. Der flexible Aufbau des Modells soll dabei auch Eingriffe in die Modellarchitektur, wie den Einsatz zusätzlicher Brunnen, erlauben. Außerdem soll durch die Bereitstellung aktueller und prognostizierter

Grundwasserkarten das Thema Grundwasser für die breite Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

Vortrag 2.11 (ID 179)

Quantifizierung der mit dem Klimawandel verbundenen Entwicklungen des Grundwasserdargebots im Rhein-Main-Gebiet

Heike Pfletschinger-Pfaff, Christoph Euler, Martin Ergh, Markus Kämpf

BGS Umwelt GmbH, Deutschland

Kontakt: pfletschinger-pfaff@bgsumwelt.de

Im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme LURCH werden im Verbundprojekt WaRM (Nachhaltige, flexible Grundwasserbewirtschaftung in Ballungszentren auf Basis eines Wassersystemmodells am Beispiel der Metropolregion Frankfurt/Rhein-Main) Nutzungskonflikte und entsprechende Lösungsansätze hinsichtlich sich verändernden Rahmenbedingungen für vorhandene Wasserressourcen für ein nachhaltiges und flexibles Grundwassermanagement untersucht. Ein Teilprojekt beinhaltet die Ermittlung regionaler Änderungen des Grundwasserdargebots aufgrund prognostizierter Änderungen der Klimasignale anhand von numerischen Modellrechnungen.

Die zukünftige klimatische Entwicklung und deren Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung stellen eine maßgebliche Randbedingung für die Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen und damit auch für die Sicherstellung der Wasserversorgung in der Rhein-Main-Region dar. Innerhalb von Bodenwasserhaushalt- und Grundwassermodellrechnungen werden die Änderungen des Grundwasserdargebots aus dem Änderungssignal eines Klimaensembles bestimmt. Das mögliche Maß der Klimawirkungen wird innerhalb des Projektes mit systematisch ausgewählten Klimaprojektionen erfasst, die mit Bezug auf die Grundwasserbewirtschaftung die zukünftige charakteristische Bandbreite der antreibenden atmosphärischen Größen Niederschlag und Verdunstung bis 2100 abbilden.

In Bodenwasserhaushaltsberechnungen wird für die einzelnen Klimaprojektionen die Änderung der flächenhaften Grundwasserneubildung als maßgebliche Größe des Grundwasserdargebots für die nahe (bis 2050) und ferne Zukunft (bis 2100) ermittelt. Dies beinhaltet auch die Berechnung des variierenden Wasserbedarf für bewässerungsbedürftige landwirtschaftliche Kulturen.

Die berechnete regionale mittlere Grundwasserneubildung zeigt für die nahe Zukunft überwiegend eine moderate Entwicklung. Für die ferne Zukunft zeigt sich eine große Bandbreite zwischen deutlicher Abnahme und deutlicher Zunahme der Grundwasserneubildung. Insbesondere in der fernen Zukunft weisen die Klimaprojektionen auf ausgeprägtere

mehrjährige Nass- und Trockenphasen hin, die für die Grundwasserbewirtschaftung im Untersuchungsgebiet maßgeblich sind. Das Klimaänderungssignal beim Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft wirkt v.a. durch einen Anstieg der Verdunstung in der Vegetationsperiode. Dies wird durch eine saisonale Verlagerung der Niederschläge mit trockeneren Sommern verstärkt. In der fernen Zukunft ist so für alle berechneten Klimaprojektionen mit einem Anstieg des Bewässerungsbedarfs bei gleicher Kulturführung auszugehen. In Verbindung mit den Grundwassermodellrechnungen werden die prägenden Einflüsse der hydrogeologischen Gebietseigenschaften auf die zukünftige Veränderung bei der Grundwasserneubildung als Folge des Klimawandels offenkundig. Eine vergleichsweise starke Zunahme der Verdunstungsraten entsteht in Bereichen, in denen der atmosphärische Verdunstungsanspruch aus dem Bodenwasserspeicher bedient werden kann. Dies trifft insbesondere auf Wälder mit Grundwasseranschluss und Böden mit einem großen Speichervermögen zu. Die übrigen Bereiche profitieren eher von einer saisonalen Umverteilung der Niederschläge mit höheren Niederschlägen im Winter, die den wesentlichen Beitrag zur Grundwasserneubildung erbringen.

Anhand der Modellergebnisse werden innerhalb des Verbundprojektes Maßnahmen zur Lösung ermittelter Nutzungskonflikte geprüft.

Vortrag 2.12 (ID 128)

Naturwissenschaftliche und wasserrechtliche Hintergründe von Konkurrenzsituationen bei der Grundwassernutzung

Till Rubbert, Florence Dornbusch

Bieske und Partner Beratende Ingenieure GmbH, Deutschland

Kontakt: t.rubbert@bieske.de

Die natürliche Ressource Grundwasser wird in der Bundesrepublik Deutschland zunehmend auch in der Öffentlichkeit als das wahrgenommen und wertgeschätzt, was sie de facto ist: eine unverzichtbare Grundlage nicht nur für die öffentliche Trinkwasserversorgung, sondern auch für die Landwirtschaft, die Lebensmittelindustrie und verschiedene andere Industriezweige. Insbesondere für die Trinkwasserversorgung stellt die Grundwasserentnahme den zentralen Gewinnungsbaustein dar. Die neuzeitliche Wasserversorgung in Deutschland mit ihrer dezentralen Organisationsstruktur erweist sich dabei seit jeher als praktisch durchweg leistungsfähig, zuverlässig und stressresistent. Mit wenigen temporären und lokalen Ausnahmen traf diese Zuverlässigkeit auch während der vergleichsweise trockenen Jahre seit 2003 zu, wenngleich der Auslastungsgrad der Wasserversorgungsunternehmen seit 2018 zunehmend höhere Ausmaße von zum Teil über 90 Prozent erreichte.

In diesem Kontext kristallisiert sich heraus, dass in Zukunft häufiger konkurrierende Ansprüche unterschiedlicher Grundwassernutzer auftreten und zu lösen sein werden. Während die Trinkwasserversorgung in der politischen und öffentlichen Diskussion einen (zunehmend) hohen Stellenwert einnimmt, darf dabei nicht außer Acht gelassen werden, dass auch landwirtschaftliche und industrielle Grundwassernutzungen in der Regel im gesamtgesellschaftlichen Interesse liegen. So ist Trinkwasser schließlich nur eines von zahlreichen weiteren Lebensmitteln, die der Mensch benötigt. Und ein funktionierendes wasserabhängiges Gewerbe mit den daran gekoppelten Arbeitsplätzen ist – unabhängig von individuellen Diskussionen um einzelne Unternehmen und Industriezweige – für ein Industrieland wie Deutschland von erheblicher gesellschaftlicher Bedeutung. Die Diskussion um potenzielle Konkurrenzsituationen bezüglich der Nutzung von Grundwasserressourcen in Deutschland darf daher aus Autorensicht nicht eindimensional und undifferenziert vorgenommen werden, sondern bedarf einer angemessenen Würdigung der komplexen Situation und der zum Teil gegensätzlichen Interessenlagen. Einer gesonderten Betrachtung bedürfen zudem die in vielen Fällen zunehmend auftretenden Konfliktsituationen mit ökologischen Interessenvertretungen – unabhängig vom angestrebten Zweck der geplanten Gewässerbenutzung.

Das vorstehend skizzierte Szenario einer Konkurrenzsituation um Grundwasserentnahmen, die sich in der wasserwirtschaftlichen Praxis in Deutschland in einer Konkurrenz um Wasserrechte niederschlägt, wird in den kommenden Jahren und Jahrzehnten alle Betroffenen in gleichermaßen zunehmender Häufigkeit beschäftigen. Die Betroffenen sind Grundwassernutzer, d. h. Wasserversorgungsunternehmen, Lebensmittelproduzenten, landwirtschaftliche Betriebe und Industrieunternehmen, genauso wie Behörden und politische Entscheidungsträger, Ingenieurbüros und Juristen. In diesem Zusammenhang nicht zu vergessen ist die Bevölkerung, die letztlich auch direkt oder indirekt von einer zunehmenden Konkurrenzsituation von Wassernutzungen betroffen sein wird. Entsprechend liegt es im gesamtgesellschaftlichen Interesse, tragfähige Lösungsansätze zu entwickeln, um die Problematik einer wachsenden Konkurrenzsituation der Grundwassernutzung so weit wie möglich zu beherrschen und zu entschärfen. Diese Lösungsansätze können sowohl politisch-rechtlicher, wasserwirtschaftlicher oder naturwissenschaftlich-technischer Natur sein.

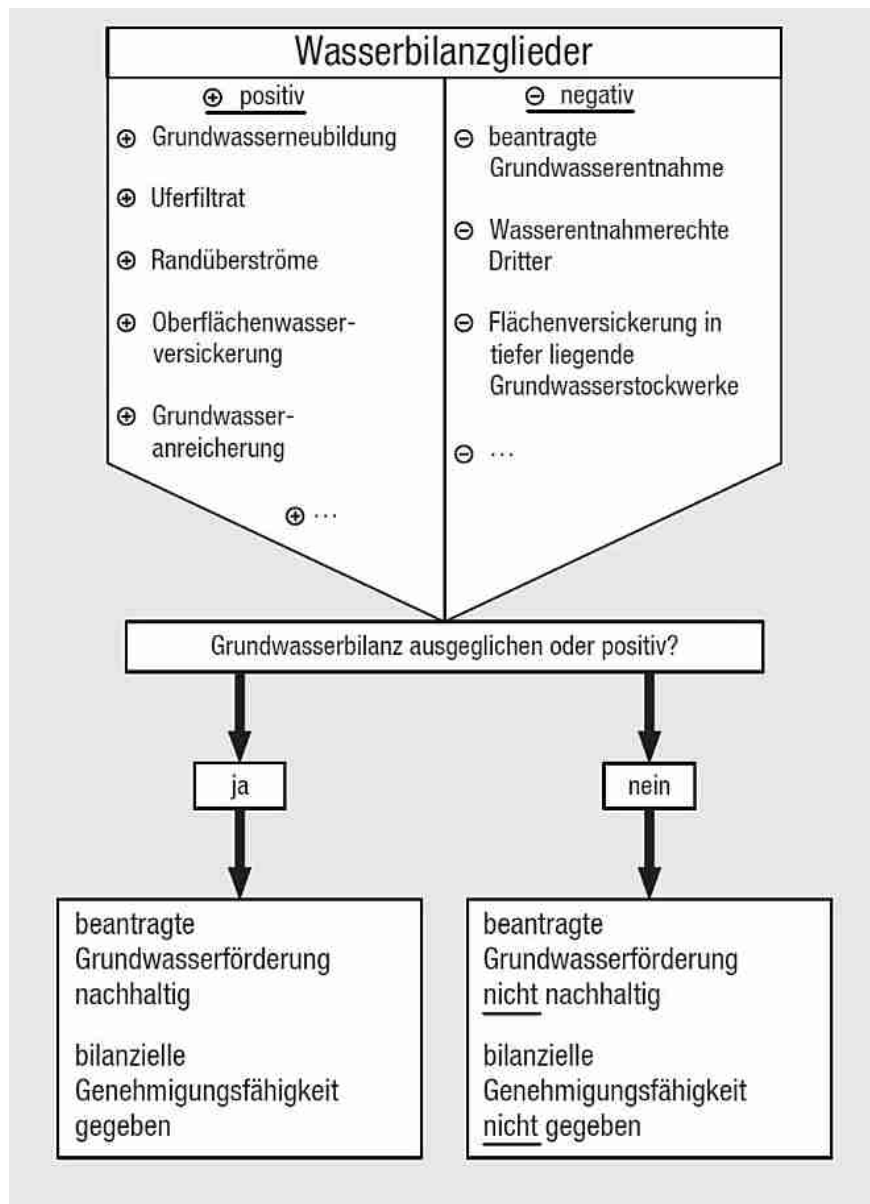


Abb. 1: Flussdiagramm-Bilanzierung.

Poster 2.1 (ID 134)

Modellierung der Auswirkungen dürrebedingter Trockenheit auf das oberflächennahe Grundwasser im Landkreis Cuxhaven*Stephan Hannappel, Philipp Wolke, Alexander Strom**HYDOR Consult GmbH, Deutschland**Kontakt: hannappel@hydor.de*

Häufigere und intensivere Dürreereignisse unterstreichen vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels die Notwendigkeit von Instrumenten für die Öffentlichkeit und Praxis zur Zustandsbeschreibung der Umweltkompartimente Boden und Wasser unter Dürre. Bestehende Tools bieten Informationen in einer mesoskaligen Auflösung von mehreren Kilometern an, was keine Aussagen auf der Ebene von Flurstücken ermöglicht. Zudem wird auf der Mesoskala kein kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser in die effektive Wurzelzone berücksichtigt, was die Aussagefähigkeit zum Bodenfeuchtezustand in den grundwassergeprägten Gebieten Norddeutschlands zusätzlich einschränkt.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Gefahren und Risiken durch Dürre in räumlich hoher Auflösung von 100 x 100 m² unter Einbeziehung der Grundwasserflurabstände jeweils getrennt für Böden mit und ohne Grundwasseranbindung im Landkreis Cuxhaven modelliert. Oberflächennahes Grundwasser ist in weiten Teilen des Landkreises enorm wichtig für die Wasserversorgung von Boden und Vegetation. Der effektive Wurzelraum der Böden weist auf etwa 41% der Landkreisfläche eine Grundwasseranbindung bei mittleren Grundwasserständen auf, wobei es sich um Niederungen und die tiefliegenden Sietländer der Marschgebiete handelt. Eine Abkopplung des effektiven Wurzelraums vom Grundwasser bei niedrigen Grundwasserständen (September 2019) wurde nur sehr lokal, z. B. im Gebiet des Dorumer Moors, sowie den Geestrandbereichen beobachtet. Insgesamt erfahren ca. 4% der grundwasserangebundenen Flächen eine Abkopplung bei niedrigem Grundwasser (31 km²). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass in den Niedrigwassersituationen seit 2018 auf Böden mit Grundwasseranschluss die Notwasserversorgung der Vegetation weitestgehend gedeckt war und die Abkopplung nur lokal ein Problem darstellte. Ein Grund dafür ist das Wassermengenmanagement, das in den Niederungen und Marschgebieten durch die Schöpfwerke betrieben wird und die Grundwasserstände reguliert. Methodisch ist daraus abzuleiten, dass die Einbeziehung detaillierter Grundwasserflurabstände auf grundwassergeprägten Böden, wie sie in Norddeutschland häufig vorkommen, unerlässlich für die Modellierung der Gefahren und Risiken durch Trockenheit und Dürre sind.

Die Ergebnisse veranschaulichen für die Öffentlichkeit und Praxis den Verlauf von Dürren auf Flurstücksebene mit ihren Auswirkungen auf den Bodenfeuchtezustand. Am Beispiel der Dürre im Jahr 2018 konnte herausgearbeitet werden, dass bei Böden mit hohem

Wasserspeichervermögen (z. B. Torf) der Dürrezustand später einsetzt, aber wesentlich länger andauert (9 bis 10 Monate) als bei sandigen Böden auf der Geest mit geringem Wasserspeichervermögen (4 bis 6 Monate). Auf dieser Grundlage wurden mögliche Gefährdungsparameter mit dem Ziel eines flächendifferenzierten Dürrierisikomanagements abgeleitet. Die maximale Dürredauer und die Abkopplung der Grundwasseroberfläche bei niedrigen Grundwasserständen erweisen sich dabei als geeignete und praxistaugliche Parameter.

Die gewonnenen Erkenntnisse regen die Diskussion über neue Ansätze in der Dürremodellierung an. Dazu gehört die Einbeziehung der Grundwasserflurabstände in bestehende hydrologische Modelle zur Berechnung des Bodenwasserhaushalts und die Etablierung von Gefährdungs- und Risikoparametern in Hinblick auf ein zukünftiges Dürrierisikomanagement auf der Skala von Flurstücken.

Poster 2.2 (ID 154)

Die BMBF-Fördermaßnahme „Nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung“ (LURCH)

Sarah Fieger, Thomas Track, Christina Jungfer

DECHEMA e.V., Deutschland

Kontakt: sarah.fieger@dechema.de

Wasser ist Leben und der Schlüssel für eine nachhaltige Entwicklung. Aber sowohl die Auswirkungen des Klimawandels als auch zunehmende Nutzungskonkurrenzen und -konflikte zwischen Trinkwasserversorgung, Land- und Forstwirtschaft, Industrie und Energiesektor beeinträchtigen gegenwärtig die Verfügbarkeit und den guten Zustand der Grundwassersysteme in Deutschland.

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung die Fördermaßnahme "Nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung" (LURCH) ins Leben gerufen. Ziel ist es, die nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung in Deutschland zu sichern und so das Grundwasser als Trinkwasserressource und Ökosystem zu schützen.

Im Rahmen der Fördermaßnahme LURCH (Laufzeit 12/2022 bis 05/2026) fördert das BMBF zehn Verbundprojekte (Abbildung 1), die die drei Themenfelder Grundwasserqualität, Grundwasserquantität und Nachhaltige Bewirtschaftung adressieren. Durch die hohe Einbindung von Stakeholdern aus Wirtschaft, Wasserbehörden und anderen Einrichtungen der Kommunen und Länder ergibt sich ein hoher Praxisbezug.



Abb. 1: Untersuchungsstandorte der LURCH-Verbundprojekte.

In den Verbundprojekten werden vielfältige Aspekte bearbeitet. So werden z. B. innovative Monitoring-Strategien und Indikatoransätze entwickelt, um den Zustand des Grundwassers zu bewerten und Verbesserungsmaßnahmen ableiten zu können. Dabei kommt auch künstliche Intelligenz zum Einsatz. Als weiteres Werkzeug für die Grundwasserbewirtschaftung wird eine frei zugängliche, deutschlandweite Verteilungskarte der stabilen Wasserisotope aufgebaut und deren Nutzen für spezifische Fragestellungen demonstriert. Auf regionalem Maßstab werden Modellsysteme entwickelt, die Klimavorhersagen und -projektionen integrieren und Planungswerkzeuge bereitstellen. Anhand verschiedener Szenarien werden Stressfaktoren für die Trinkwasserversorgung aus Grundwasser untersucht und mögliche

Bewirtschaftungsmaßnahmen abgeleitet. Auch der Umgang mit Nitratbelasteten Grundwasserressourcen und Möglichkeiten zur Nitratreduktion sowie zur Sanierung von PFAS-belastetem Grundwasser werden in Labor-, Technikums- und Feldversuchen erprobt.

Ergänzend zu den zehn Verbundprojekten wird das Vernetzungs- und Transfervorhaben „LURCHplus“ gefördert, für das die DECHEMA e.V. verantwortlich ist. LURCHplus begleitet und vernetzt die Verbundprojekte, fördert den Austausch an Schnittstellen und unterstützt den Ergebnistransfer in die Anwendung.

Der Vortrag wird einen Überblick zur Fördermaßnahme LURCH mit ihren vielfältigen hydrogeologischen Themen geben. Interessierte und Experten erhalten dabei auch einen Einblick in die aktuelle Projektlandschaft zur nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung. Für den Verlauf der Tagung regt der Vortrag alle Teilnehmenden zum Austausch mit den Akteuren der Fördermaßnahme LURCH an.

Poster 2.3 (ID 159)

Ein Stresstest zur Bewertung der zukünftigen Grundwasserverfügbarkeit für die landwirtschaftliche Bewässerung in Deutschland

Ian McNamara^{1,2}, Frank Herrmann¹, Thorben Uschan², Martina Flörke²

¹: Forschungszentrum Jülich, IBG-3, Germany

²: Engineering Hydrology and Water Resources Management, Ruhr-Universität Bochum, Germany

Kontakt: i.mcnamara@fz-juelich.de

Die zukünftige Nachfrage nach Grundwasser für die Feldbewässerung in der Landwirtschaft ist in vielen Studien als sehr relevante Komponente des wachsenden Nutzungsdrucks auf die Grundwasserressourcen in Deutschland identifiziert worden. Vor dem Hintergrund, dass die für eine Bewässerung ausgestattete landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland in der vergangenen Dekade wahrscheinlich jährlich um mehr als 1,5 % gewachsen ist und dass in den Dürresommern seit 2018 in vielen Regionen ein erhöhter potenzieller Bewässerungsbedarf existierte, erscheinen umfassende Studie notwendig, die die zukünftigen Grenzen der Grundwasserverfügbarkeit für die landwirtschaftliche Bewässerung in Deutschland aufzeigen. Diese Grenzen genauer zu ermitteln, erscheint vor allem im Hinblick auf die in der Nationalen Wasserstrategie dargelegte Leitlinie für den Umgang mit Wasserknappheit sinnvoll, der zufolge jederzeit ausreichende, möglichst ortsnahe (Grundwasser-) Ressourcen für die Trinkwasserversorgung zur Verfügung stehen sollen. Insbesondere Stresstests sind geeignete Instrumente, um langfristige Entwicklungen zu Grundwasserdargebot/Grundwasserneubildung und Grundwassernutzung in einen Zusammen-

hang mit Wasserknappheit und möglichen daraus resultierenden Nutzungskonflikten zu bringen.

Das Design des in diesem Beitrag vorgestellten Stresstests orientiert sich an den flächendeckend für ganz Deutschland notwendigen Szenarien zur Grundwasserneubildung, zu den tatsächlichen Bewässerungsbedarfen und zur Entwicklung der zukünftigen Wasserabgabe an die Bevölkerung. Diese Szenarien sind ausschließlich aus Bevölkerungsprojektionen, aus Projektionen mit Klimamodellen und dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA (Grundwasserneubildung, Bewässerungsbedarf) sowie Projektionen des Flächenwachstums der bewässerten Landwirtschaftsfläche abgeleitet. Außerdem liegt die Annahme zugrunde, dass die Wassernutzung der zwei Sektoren Bewässerungslandwirtschaft und öffentliche Wasserversorgung ausschließlich aus dem Grundwasser erfolgen wird. In der für den Stresstest notwendigen Kombination sind im Rahmen des Projektes WADKlim (Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit – Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland) erstmals für ganz Deutschland solche Szenarien in hoher räumlicher Auflösung geschaffen worden. Aufbauend auf den projizierten Größen wurden für diese Szenarien Grundwassernutzungsindizes (GWNI, d. h. der Quotient aus Grundwassernutzung und Grundwasserneubildung) auf der NUTS-3 Ebene (d. h. Landkreise und kreisfreie Städte) berechnet und vergleichend analysiert.

Als Ergebnis dieser Analysen lassen sich die Regionen identifizieren, in denen es in Zukunft einen zunehmenden Nutzungsdruck auf Grundwasserressourcen durch die Bewässerung in der Landwirtschaft geben wird (vgl. Abbildung). Auch ohne ein Wachstum von Bewässerungsflächen lassen sich Regionen identifizieren, in denen in mehrjährigen Trockenphasen eine reduzierte Grundwasserneubildung und damit nichtnachhaltige Wassernutzung und ggf. Wasserknappheit vorliegt (z. B. ab $GWNI > 0,4$). Das Wachstum von Bewässerungsflächen hat potenziell einen größeren Einfluss auf die Veränderung der Grundwassernutzungsindizes als der klimatische Entwicklungspfad (Klimaprojektion). Außerdem kann aus den Szenarien indirekt auf die maximale Wachstumsrate der Bewässerungsflächen geschlossen werden, bei der noch eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung erhalten bleibt.

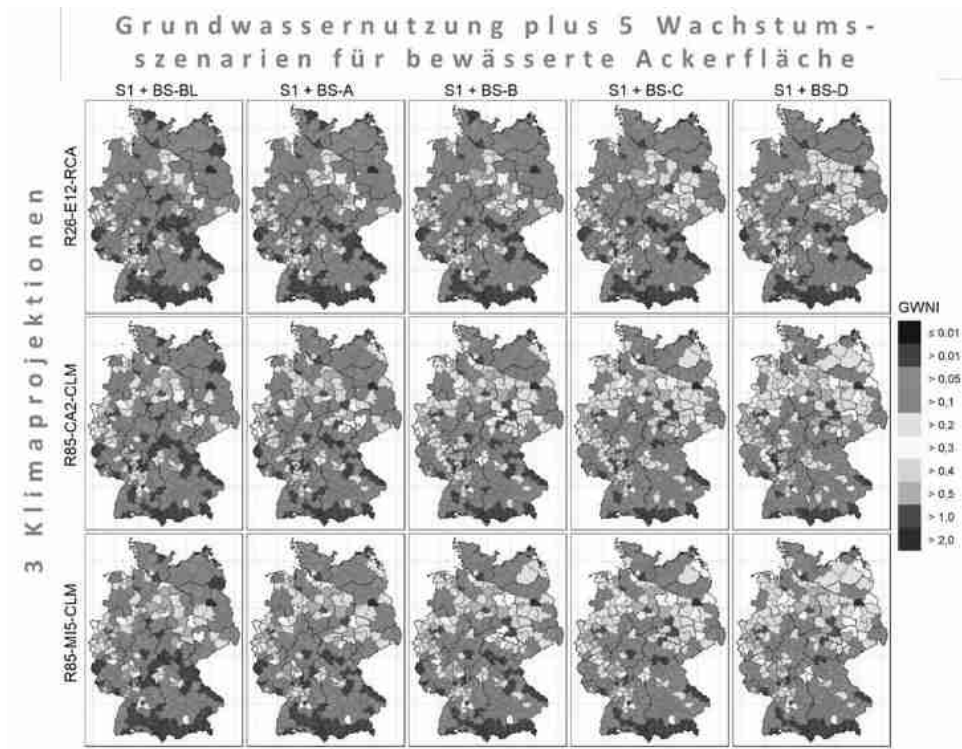


Abb. 1: Zukunftsszenarien zum Grundwassernutzungsindex (GWNI). Datenbasis für GWNI-Berechnung: Projektion öffentliche Wasserversorgung im Jahr 2070 und Projektion des Bewässerungsbedarfs im langjährigen Mittel 2061-2090 (Spalten) sowie Projektion der Grundwasserneubildung im langjährigen Mittel 2061-2090 (Zeilen).

Poster 2.4 (ID 164)

Modeling the impact of climate change on groundwater flow and temperature in Brandenburg

Michael Tsypin^{1,2}, Mauro Cacace¹, Magdalena Scheck-Wenderoth^{1,3}

¹: GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam

²: Technische Universität Berlin

³: RWTH Aachen University

Kontakt: tsypin@gfz-potsdam.de

The regional groundwater flow dynamics in sedimentary basins is the result of three primary interacting forces: climate, geology, and topography. How will these interactions

evolve over time if we consider transient effects such as meteorological cycles and climate change? Will the change only affect the position of the water table, or are there certain conditions (recharge areas, thick unsaturated zone, or high permeability) under which the groundwater dynamics show a stronger feedback effect to changes in precipitation and surface temperatures? In this study, we coupled the subsurface 3D model of Brandenburg with a distributed hydrologic model to simulate the long-term behavior of groundwater dynamics and the thermal field. The model was validated against an extensive dataset of well measurements and meteorological observations. Our data-driven hydrogeological model extends far beneath Quaternary freshwater aquifers, encompassing all strata down to the basement, thus enabling to capture thermal and hydraulic anomalies arising from geological heterogeneities in the North German basin.

We found that the shallow groundwater dynamics in the local flow system, comprising Quaternary and post-Rupelian Tertiary aquifers, is significantly influenced by the spatial and temporal recharge variability, as suggested by the modeled Darcy flux, groundwater levels, and temperature distribution. Recharge fluxes, assigned to the hydrogeological model, reproduce the magnitude of annual groundwater level changes but highlight the need for considering damping of the net recharge signal and additional sinks, like groundwater extraction, for explaining long-term groundwater level trends. Seasonal changes in shallow groundwater temperatures are locally enhanced by forced advection in areas with high recharge and downward hydraulic gradients.

Deeper within the pre-Rupelian to Keuper aquifer complex, a regional flow system shows a greater dependence on structural dip and permeability contrasts between stratigraphic units. These aquifers are recharged on the uplifted flanks of the basin. Another recharge mechanism involves cross-flow through erosional windows in Rupelian aquitard to the overlying aquifers, with the direction of flow being controlled by existing hydraulic gradients as imposed by the surface topography. Thus, in the long-term, as recharge patterns evolve and surface temperatures continue to rise, those areas characterized by greater advective potential can become effective pathways for transmitting climate alterations on subsurface PT conditions to a wider area and greater depths.

Klimawandel und Wasserwirtschaft in Nordostdeutschland - Modellgestützte Klimaprojektionen als Grundlage von wasserwirtschaftlichen Planungen

Felix Möhler, Alexandra Pavlova

GCI GmbH, Deutschland

Kontakt: felix.moehler@gci-kw.de

Das WW Lindau (Zerbst) im Westfläming an der Landesgrenze zu Brandenburg stellt mit einer technischen Kapazität von 50.000 m³/d ein bedeutendes Wasserwerk im Verbundsystem der Trinkwasserversorgung Magdeburg GmbH (TWM) dar. Das Förderwasser wird durch natürliches Grundwasserdargebot aus Grundwasserneubildung auf der Hochfläche gespeist. Messwerte zeigen für die letzten 50 Jahre einen kontinuierlichen klimabedingten Rückgang der Grundwasserneubildung und unabhängig von der Wasserwerksbewirtschaftung fallende Grundwasserstände.

Zur strategischen Planung der Bewirtschaftung des WW Lindau und als Grundlage für eine Messnetzoptimierung hat die TWM die GCI GmbH mit modellgestützten wasserhaushaltlichen Untersuchungen mit Klimaprojektionen beauftragt. Hierzu wurde ein ca. 1.200 km² großes instationäres Grundwasserströmungsmodell aufgebaut. Das heutige gewinnbare Grundwasserdargebot und dessen Entwicklung bis zum Jahr 2100 im Einzugsgebiet des WW Lindau wurde unter Annahme sich verändernder klimatischer Bedingungen projiziert. Die Annahmen, die den Klimaszenarien zugrunde liegen, stützen sich auf den aktuellen Stand der globalen und regionalen Klimaforschung.

Grundlage der hier vorgestellten Klimaauswertungen ist das mitteldeutsche Kernensembel1 (MDK), das von den Ländern Sachsen-Anhalt, Sachsen und Thüringen im Jahr 2020 veröffentlicht wurde. Das MDK reduziert zahlreiche vorliegende Klimaprojektionen auf Basis verschiedener Klimamodelle auf jeweils sieben Klimaprojektionen für die Klimaszenarien RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5 mit dem Ziel, mit der Auswahl die Bandbreite der Änderung der einzelnen Klimavariablen sowie die Gesamtbandbreite über möglichst alle Klimavariablen abzubilden.

Die vorliegenden 21 Klimaprojektionen des MDK wurden für das Modellgebiet statistisch ausgewertet. Nach einer Biaskorrektur für Niederschlag und Verdunstung wurde die Grundwasserneubildung instationär bis zum Jahr 2100 mit einem Bodenwasserhaushaltsmodell berechnet. Dabei zeigte sich eine große Bandbreite potenzieller Änderungen der Grundwasserneubildung. Die auf Basis der MDK-Daten projizierte modellgebietsweite regionale Veränderung der Grundwasserneubildung liegt im Bereich von ca. -30% bis +40%

bis 2100 gegenüber 1975-2020. Lokal sind weitere Abweichungen möglich. Die große Bandbreite ergibt sich aus hohen Unsicherheiten von für die Zukunft projizierten Niederschlagsmengen und räumlichen wie zeitlichen Verteilungsmustern des Niederschlages.

Die Untersuchungen zeigen, dass langfristig mit weiteren erheblichen Veränderungen des GW-Dargebotes und der Hydrodynamik im Einzugsgebiet zu rechnen ist. Das Messnetz im Einzugsgebiet kann auch im Hinblick auf erwartbare Veränderungen hin optimal ausgerichtet werden. Auf dieser Grundlage kann die TWM den andauernden Prozess des Klimawandels im Einzugsgebiet des WW Lindau erfassen und frühzeitig auf die Veränderungen reagieren, um die Trinkwasserversorgung langfristig zu sichern.

Struve, Ehlert, Pfannschmidt, Heyner, Franke, Kronenberg, Eichhorn, 2020: Mitteldeutsches Kernensemble zur Auswertung regionaler Klimamodelldaten – Dokumentation – Version 1.0, (2020), Halle (Saale), März 2020

Poster 2.6 (ID 169)

Vorschlag für ein Punktesystem zur Bewertung der klimawandelbedingten Herausforderungen im Grundwassermanagement

Frank Herrmann¹, Ian McNamara¹, Niklas Wagner¹, Thorben Uschan², Stefan Kollet¹, Martina Flörke²

¹: Forschungszentrum Jülich, Institut für Bio- und Geowissenschaften, Agrosphäre (IBG-3), Jülich

²: Ruhr-Universität Bochum, Bochum

Kontakt: f.herrmann@fz-juelich.de

Wasserknappheit als Phänomen und Herausforderung im Grundwassermanagement hat sich in vielen Studien der vergangenen Jahre als ein vielschichtiges Problem herausgestellt, das sich objektiv nicht nur auf Basis eines einzelnen hydro-klimatologischen Indikators charakterisieren lässt. Wasserknappheit variiert stark auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen und ist häufig eher eine subjektive Wahrnehmung einzelner Interessensgruppen. Eine objektive Charakterisierung und Bewertung von Wasserknappheit scheint nur auf Basis einer flächendeckenden Modellierung und Bilanzierung der Wasserverfügbarkeit sowie einer sektorübergreifenden Ermittlung der Wassernutzung möglich zu sein. Derartigen Studien sind in der Praxis jedoch durch Limitierungen in den Modellen und Datenbeständen häufig enge Grenzen gesetzt. Auf eine Knappheit des Schutzgutes Grundwasser kann dann meist auch nur indirekt geschlossen werden.

Aus der Perspektive der Nationalen Wasserstrategie der Bundesregierung (BMUV, UBA) ist es wünschenswert, einen deutschlandweiten Überblick über die regional unterschiedlich ausgeprägten Herausforderungen im Zusammenhang mit klimawandelbedingter

Grundwasserknappheit zu bekommen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Projektes WADKlim (Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit – Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland) ein Vorschlag für ein Punktesystem zur Darstellung von Herausforderungen im Grundwassermanagement erarbeitet. Zunächst wurden für eine Charakterisierung der Herausforderungen zehn sogenannten Grundwasserthemen ausgewählt. Die in den Grundwasserthemen notwendigen Analysen grundwasser-hydrologischer Größen erfolgten ausschließlich auf Basis von Simulationen mit den Modellen mGROWA und ParFlow sowie unter Verwendung offizieller Datenbestände zur Wassernutzung und -gewinnung. Die betrachteten Grundwasserthemen umfassen mehrere Aspekte zur zeitlichen Veränderung der Grundwasserneubildung und des unterirdischen Wasserspeichers (Trendanalysen) sowie die regional differenzierte Berechnung von Grundwassergewinnungsindizes auf der NUTS-3 Ebene (d. h. Landkreise und kreisfreie Städte).

Im Rahmen des Beitrags wird die Grundidee hinter der Zusammenstellung der Grundwasserthemen erläutert. Zusätzlich werden exemplarisch für ein Grundwasserthema dessen zugrundeliegende Simulationsergebnisse sowie die regional unterschiedlich ausgeprägte Bedeutung diskutiert. Die den zehn Grundwasserthemen zugeordneten Punktwerte können aufaddiert werden und visualisieren damit die regional unterschiedlich ausgeprägten Herausforderungen, vor denen die Grundwasserbewirtschaftung derzeit steht (vgl. Abbildung). Ein Teil der Grundwasserthemen kann auch als klimatologische Gefährdung für Grundwasserressourcen gelesen werden. Wenn zusätzlich zur klimatologischen Gefährdung eine bedeutende Grundwassergewinnung stattfindet oder zukünftig vermehrt stattfinden soll, steigt für individuelle Regionen das Risiko, mit Grundwasserknappheit und den daraus resultierenden Nachteilen und Konflikten konfrontiert zu werden.

Das vorgeschlagene Punktesystem ist anwendbar auf verschiedene Gebietskulissen, z. B. auch auf Grundwasserkörper. Die betrachteten Grundwasserthemen können prinzipiell auch aus anderen regional verfügbaren Modellsystemen abgeleitet werden. Das Punktesystem insgesamt ist erweiterbar und kann durch neue Grundwasserthemen ergänzt werden. Außerdem ist ein äquivalentes Punktesystem anwendbar auf andere Themengruppen (z. B. Grundwasserqualität etc.).

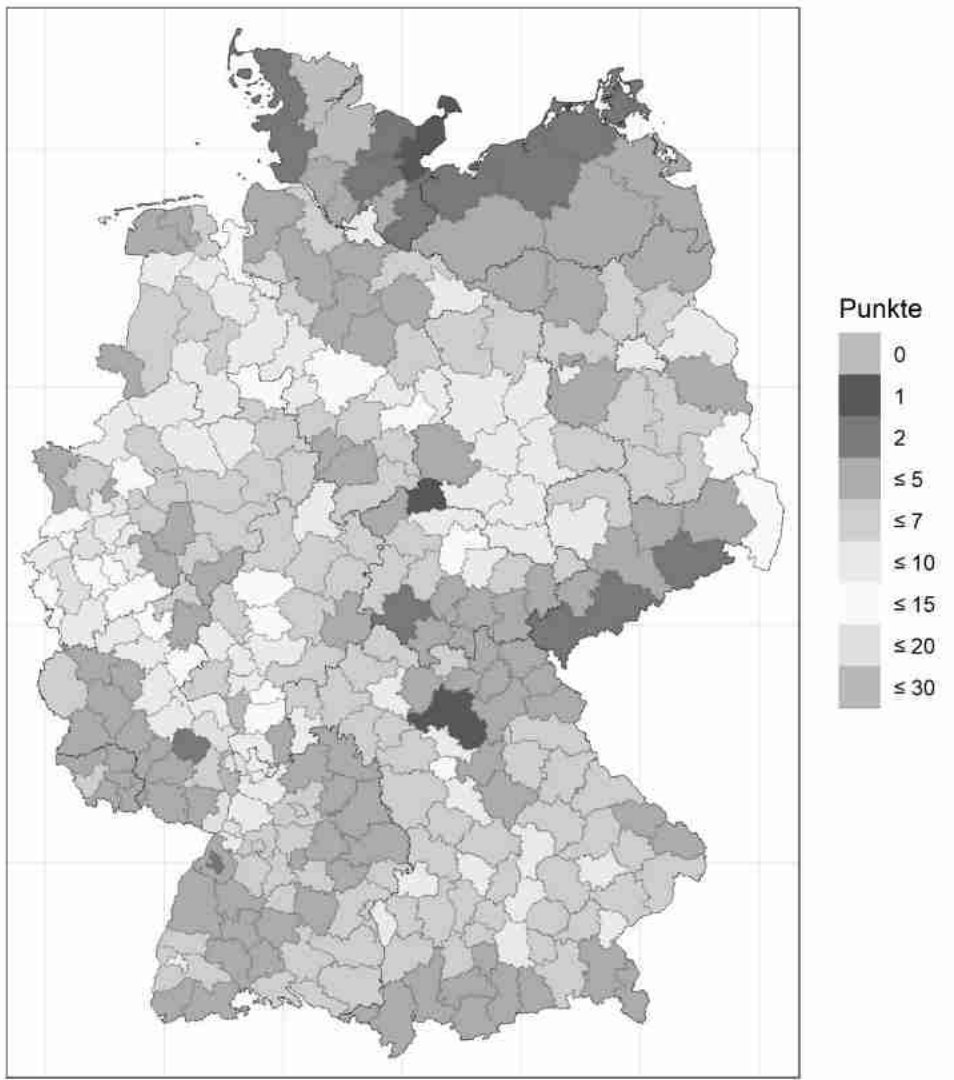


Abb. 1: Die Kombination der in den zehn Grundwasserthemen vergebenen Punkte liefert einen qualitativen Überblick zu den regional unterschiedlich ausgeprägten Herausforderungen im Grundwassermanagement.

KIMoDIs – KI-basiertes Monitoring-, Datenmanagement- und Informationssystem zur gekoppelten Vorhersage und Frühwarnung vor Grundwasserniedrigständen und -versalzung – Fallbeispiel Niedersachsen

Eva González, Jörg Elbracht,

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Deutschland

Kontakt: eva.gonzalez@lbeg.niedersachsen.de

Simulationen zeigen, dass sich der Trend hin zu wärmeren und trockeneren Sommern fortsetzen wird. Gleichzeitig steigt der Wasserbedarf an, wodurch sich der Nutzungsdruck auf die Ressource Grundwasser bundesweit erhöht. Durch Grundwasserniedrigstände und damit verbundene Meerwasserintrusionen oder aufsteigende salinare Tiefenwässer verschlechtert sich außerdem die Grundwasserqualität, wodurch es u. a. der öffentlichen Trinkwasserversorgung nicht mehr zur Verfügung steht.

Zur Vorhersage von Grundwasserniedrigständen und Versalzung des Grundwassers soll im Projektverbund KiMoDiS, unter Leitung der BGR, ein auf Künstlicher Intelligenz (KI) basierendes Monitoring-, Datenmanagement- und Informationssystem entwickelt werden. Mit diesem System und unter Verwendung von Klimavorhersagen und -projektionen soll eine Frühwarnung vor Grundwasserniedrigständen und -versalzung ermöglicht werden. Zudem ist beabsichtigt eine intelligente Planung von Gegenmaßnahmen, wie beispielsweise die Steuerung von Grundwasserentnahmen, zu ermöglichen.

Das LBEG ist Praxispartner in dem Projekt und wird die Ergebnisse der KI-gestützten Modellierung mit simulierten Grundwasserständen aus der numerischen Grundwasserströmungsmodellierung vergleichen. Mit der Software GEBAH kann zusätzlich in ausgewählten Gebieten abgeschätzt werden, ob eine Versalzung des Grundwassers in Zukunft zu erwarten ist. Der Ergebnisvergleich dient der Nutzererprobung und Qualitätssicherung des neu entwickelten Frühwarn-, Event-Detektions- und Entscheidungshilfe-Tools.

Nach erfolgreichen Tests ist vorgesehen, dass das Tool die Palette an Fachanwendungen auf dem niedersächsischen NIBIS®-Kartenserver erweitert. Es wäre damit eine wichtige Ergänzung zu den bereits vorhandenen Informationsangeboten, die das LBEG auf dem Kartenserver zur Verfügung stellt, und die als Grundlagen in nahezu allen wasserwirtschaftlichen Planungen in Niedersachsen genutzt werden.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert das Verbundprojekt „KIMoDIs“ zur Fördermaßnahme „Nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung (LURCH)“

im Rahmen des Bundesprogramms „Wasser: N“. Wasser: N ist Teil der BMBF-Strategie „Forschung für Nachhaltigkeit (FONA)“. Förderkennzeichen: 02WGW1662H

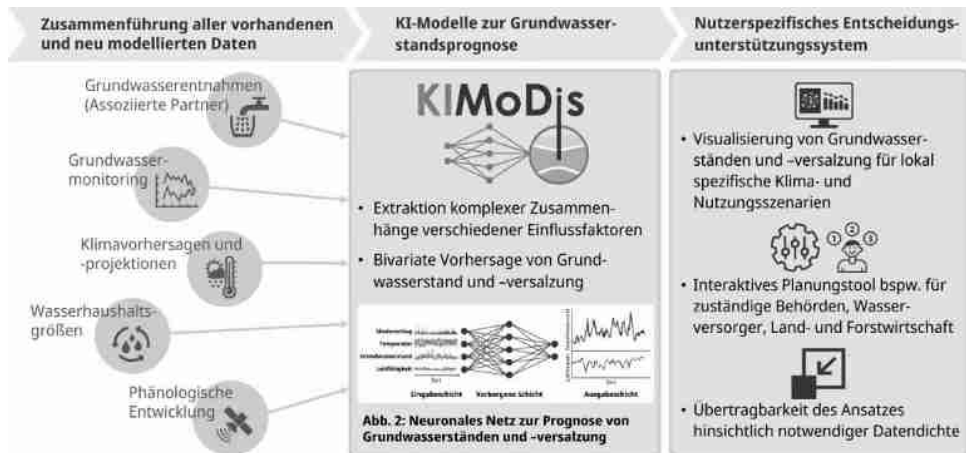


Abb. 1: Projektstruktur und Umsetzung.

Poster 2.8 (ID 178)

Global Groundwater Recharge Contribution to Groundwater Storage Variability

Sara Nazari¹, Nils Moosdorf^{1,2}

¹: Leibniz Centre for Tropical Marine Research (ZMT), Bremen, Germany

²: Institute of Geosciences, Kiel University, Kiel, Germany

Kontakt: sara.nazari@leibniz-zmt.de

Approximately a quarter of the world's freshwater withdrawal is sourced from groundwater resources to meet fundamental freshwater needs [1]. Global groundwater depletion raises urgent concerns. Depletion occurs when the rate of groundwater withdrawal surpasses the recharge.

Accordingly, we developed a Global Groundwater Recharge (GGR) model to evaluate rain-fed groundwater recharge impacts on groundwater storage dynamics. The GGR model consists of three layers (topsoil, subsoil, and aquifer) that utilize satellite data and environmental parameters. It has a spatial resolution of $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ and daily temporal resolution, covering the spatial extent of 180.0°W - 180.0°E longitude and 60.0°N - 60.0°S latitude, and the years from 2001 to 2020. The Global Gravity-based Groundwater Product (G3P) [2] was used to investigate groundwater storage dynamics. G3P is derived from the Gravity

Recovery and Climate Experiment (GRACE) mission satellite and GRACE Follow-On. Both the recharge and storage trends were calculated on the river basin scale.

The results revealed that the average global recharge from 2001 to 2020 is 176 mm a-1, showing an average annual increase of 0.2 mm a-1. When analyzing groundwater recharge contribution, basins were categorized into four types: thriving, compensatory, resilient, and dwindling. Notably, 34% of the basins exhibit thriving trends, indicating regions with increasing recharge and storage. This pattern is prominent in areas like Sub-Saharan Africa, southern Australia, and North America, offering opportunities to enhance groundwater usage. In 26% of the basins belonging to the compensatory type, an increase in recharge corresponds to a decrease in storage. It suggests that direct anthropogenic drivers are major factors causing storage loss. This is particularly evident in the Indo-Gangetic Plain, where over-exploitation is a major factor causing storage loss. However, the recharge compensatory role may mitigate sinking storage in these basins that are home to 2.65 billion people. In 18% of the basins that belong to the resilient type, a decrease in recharge coincides with an increase in storage. These basins present resilience to reduced recharge, potentially due to reductions in groundwater abstraction or the impact of other recharge sources, like surface water. Moreover, 22% of the basins were found to be groundwater sustainability hotspots where both decreases in recharge and storage are observed. This dwindling recharge exacerbates storage loss, affecting 1.69 billion inhabitants. These basins are predominantly located in Europe, Western North America, and Eastern South America.

Our results contribute to understanding the crucial role of recharge spatiotemporal dynamics in ensuring sustainable water resources, particularly in the regions facing more acute depletion challenges.

1. United Nations, The United Nations World Water Development Report 2022. Groundwater: Making the invisible visible. 2022.
2. Güntner, A., et al., Global Gravity-based Groundwater Product (G3P). V. 1.11. 2023, GFZ Data Services.

Poster 2.9 (ID 188)

Nachhaltiges integriertes Wasser- und Landnutzungsmanagement im Mekong-Delta, Vietnam – eine besondere Herausforderung

Harro Stolpe

Ruhr-Universität Bochum, Deutschland, U+Ö im Bauwesen / E+E Environmental Engineering+Ecology

Kontakt: harro.stolpe@rub.de

Das F&E Projekt ViWaT-Planning trägt am Beispiel des Mekongdeltas zur Entwicklung eines methodischen Konzeptes für ein System von Planungsinformationen bei. Es handelt sich um ein Konzept für eine strategische, regionale Wasser- und Landnutzungsplanung. Es geht um eine den Landnutzungen entsprechende integrierte Verwendung der Wasserressourcen: einerseits Süßwasser als Oberflächenwasser, Grundwasser, Regenwasser und Transferwasser., andererseits Salzwasser, Brackwasser: salines Grundwasser und Oberflächenwasser.

Dabei wird - soweit verfügbar - auf die oft verstreut bei unterschiedlichen Institutionen in Vietnam vorliegenden Daten, Informationen, Bewirtschaftungserfahrungen und auf eigene wissenschaftliche Ergebnisse zurückgegriffen.

Im Vordergrund steht die Konzeptionierung eines transparenten, fortschreibbaren Systems von Planungsinformationen und Planungskarten. Dies trifft auf ein in Vietnam bestehendes Defizit an allgemein zugänglichen, abgestimmten und verbindlichen Planungsaussagen.

Auch ist dabei die Charakteristik von Flussdeltas, die durch den Klimawandel besonders betroffen sind, und die Besonderheit des Mekongdeltas als eine flächendeckend äußerst intensiv genutzte Agrar- und Aquakulturregion zu berücksichtigen.

Die Wasser- und Landnutzung im Mekongdelta sollte möglichst auf einer nachhaltigen und angepassten Nutzung der Wasser- und Landressourcen basieren. Die bestehende Situation ist jedoch im Gegensatz dazu durch eine Überzahl von Problemen gekennzeichnet: Oberflächenwasserverunreinigung, Übernutzung des Grundwassers, verringerte Biodiversität usw.

Das Projekt ViWaT-Planning ist auf der Ebene der Regionalplanung angeordnet. Auf dieser Ebene sollte die regionale Koordinierung und Harmonisierung der Wasser- und Landnutzungen im Sinne von mehr Nachhaltigkeit erfolgen.

Die hierfolgte Konzeptionierung allgemein zugänglicher Planungsinformationen auf regionaler Ebene (Planungsatlas) ist ein Schritt in diese Richtung. Sie ermöglicht weiter-

gehende Planungen auf subregionaler oder lokaler Ebene im Rahmen solcher überörtlichen Aussagen und Orientierungen.

Der Beitrag stellt eine Zusammenfassung der Ergebnisse des F&E-Projektes ViWaT-Planning dar. ViWaT-Planning wurde von 2018 bis 2022 vom BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) gefördert und in Zusammenarbeit mit deutschen und vietnamesischen Partnern durchgeführt.

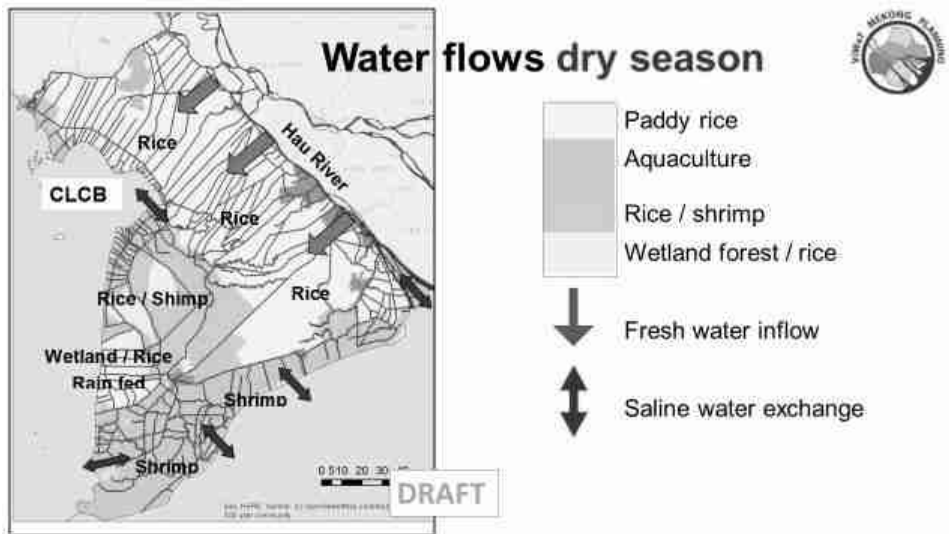


Abb. 1: Übersicht über das System der Wasser- und Landnutzung im Mekongdelta, Vietnam

Poster 2.10 (ID 205)

Modellgestützte Untersuchung zum Einfluss eines Waldumbaus auf die Grundwasserneubildung und die Hydrodynamik im Einzugsgebiet eines Wasserwerks (Briesen, Brandenburg)

Franziska Mehler¹, Felix Möhler¹, Matthias Clausen², Ines Schwenzer²

¹: GCI GmbH, Deutschland

²: FWA mbH, Deutschland

Kontakt: franziska.mehler@gci-kw.de

Forsthydrologische Studien zeigen, dass unter Kiefern die Grundwasserneubildung (GWN) im Vergleich zu anderen Baumarten am geringsten ist. Der Forst in der Trinkwasserschutzzone des Wasserwerks Briesen besteht überwiegend aus Kiefernmonokulturen.

Daraus ergab sich die Fragestellung, ob ein Waldumbau zur Sicherung der Trinkwasserversorgung auch im Hinblick auf den Klimawandel beitragen kann.

Für alle umbaurelevanten Waldflächen wurden anhand der forstlichen Standortkartierung die im Gebiet dominanten Standortformengruppen (A2, Z2, M2) identifiziert. Das LfU Brandenburg veröffentlichte für diese Gruppen Empfehlungen hinsichtlich der Mischung der Baumarten, welche an die örtlichen Bedingungen angepasst sind und die als klimaresistent eingeschätzt werden. Ausgehend davon wurden fünf Baumarten (Buche, Eiche, Birke, Eberesche, Kiefer) ausgewählt und deren Mischungsverhältnis für die Standortformengruppen festgelegt.

Mit einem Bodenwasserhaushaltsmodell wurde die Grundwasserneubildung unter den fünf Baumarten für die Referenzperiode 1976 – 2005 separat berechnet. Anhand des definierten Mischungsverhältnisses wurde die GWN für die Standortformengruppen berechnet. Die sich daraus ergebende Verteilung der GWN wurde für drei Szenarien (kein, teilweiser und gesamter Waldumbau) als Randbedingung in einem stationären Grundwasserströmungsmodell angesetzt. Eine vereinfachte Klimabetrachtung wurde durchgeführt, indem die Neubildung der drei Szenarien jeweils pauschal um 25 % reduziert wurde.

Die Ergebnisse zeigen, dass modellgebietsweit die GWN in der Referenzperiode je nach Umfang des Waldumbaus 10 – 20 % höher liegt als unter den Kiefernwäldern. Berücksichtigt man den Einfluss des Klimawandels kann der Rückgang der GWN und der Abfall der Grundwasserstände durch einen Waldumbau gedämpft werden.

Poster 2.11 (ID 207)

Operationalisierung der Berechnung und Auswertung von jährlichen Grundwasserneubildungsraten in Niedersachsen.

Mithra Hajati^{1,2}, Gabriele Ertl¹, Jörg Elbracht¹

¹: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Deutschland

²: Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz

Kontakt: mithra-christin.hajati@lbeg.niedersachsen.de

Wie wirken sich Trockenperioden langfristig auf die Grundwasserreserven aus? Brachte der letzte niederschlagsreiche Winter Entspannung für die Grundwasserneubildung? Wie sieht der Trend bei mir in der Region aus – wird es auch zukünftig genügend (Grund-) Wasser geben? Mit der Operationalisierung von Grundwasserneubildungsberechnungen sollen jährliche Auswertungen Auskunft auf diese Fragen geben. Das Landesamt für Bergbau Geologie und Energie (LBEG) und das Niedersächsische Kompetenzzentrum Klimawandel (NIKO) baut dies derzeit auf. Die Berechnung der Grundwasserneubildung

wird seit mehr als 10 Jahren mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA am LBEG für Niedersachsen durchgeführt. Für die Operationalisierung wurden die klimatischen Eingangsdaten überarbeitet: Für den Niederschlag geht das nach Richter korrigierte HYRAS Produkt des DWD (2022) und für die potenzielle Verdunstung die Grasreferenzverdunstung des DWD (2023) ein. Das Modell wurde an großen Einzugsgebieten neu kalibriert und evaluiert. Im Ergebnis zeigt sich, dass die derzeitige Trockenperiode seit mehr als 10 Jahren anhält (Abbildung), sich aber regional sehr unterschiedlich auswirkt. So hebt sich insbesondere Zentralniedersachsen durch einen Rückgang der Grundwasserneubildung ab, da hier insbesondere erhöhte Verdunstungsraten auftreten (LBEG, 2023). Teile des Harz, aber auch Nordniedersachsens verzeichnen dagegen vereinzelt positive Trends der Grundwasserneubildung. Insgesamt zeigen sich jedoch in 115 von 124 Grundwasserkörpern fallende lineare Trends. Die Auswertung jährlicher Grundwasserneubildungsraten ermöglicht eine differenzierte Auswertung der derzeitigen Trockenperiode und wie diese lokal auf Niedersachsen wirkt. Diese Erkenntnisse können in Wasserrechte, Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel (z. B. Grundwasseranreicherung) und in weitergehende Studien einfließen.

DWD (2022). Raster der Tagessumme des Niederschlags in mm für Deutschland—HYRAS-DE-PRE (Version v5.0) [Raster; Netcdf]. Climate Data Center (CDC).

https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/daily/hyras_de/precipitation

DWD (2023). Tägliche Raster der FAO Grasreferenzverdunstung (Version v1.0) [Raster; Netcdf]. Climate Data Center (CDC). https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/daily/evaporation_fao/

LBEG (2023). Zeitreihenanalyse der Grundwasserneubildung je niedersächsischem Grundwasserkörper (Methode: mGROWA22) (Version v1.0) [Bild; Png]. Niedersächsisches Bodeninformationssystem (NIBIS). <https://nibis.lbeg.de/cardomap3/?permalink=1GhPspUd>

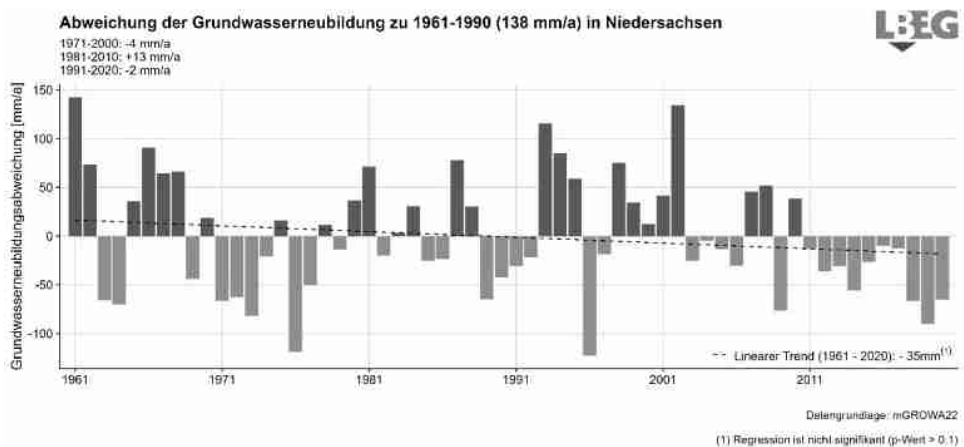


Abb. 1: Abweichung der Grundwasserneubildung in Niedersachsen bezogen auf die WMO-Referenzperiode 1961-1990.

KliBiW7 Globaler Klimawandel und Folgenabschätzung auf die Grundwasserstände in Niedersachsen – Teilprojekt D

Melanie Witthöft¹, Tobias Schlinsog²

¹: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Deutschland

²: CONSULAQUA, Hildesheim

Kontakt: melanie.witthoeft@lbeg.niedersachsen.de

Im Forschungsprojekt KliBiW (Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland) wurde in Phase 7 die Folgenabschätzung des Klimawandels auf Grundwasserstände in Niedersachsen bearbeitet. In insgesamt vier Teilprojekten wurde die Entwicklung von Grundwasserständen unter dem Einfluss des globalen Klimawandels anhand unterschiedlicher Methoden untersucht und bewertet. Dafür berechneten statistische Verfahren zur Grundwasserganglinienverlängerung (Teilprojekt A), Übertragungsfunktionen aus multivariaten Regressionen (Teilprojekt B), eine Methode der künstlichen neuronalen Netze (KNN; Teilprojekt C) sowie die numerische Grundwasserströmungsmodellierung (Teilprojekt D) mittels Klimaprojektionsdaten Grundwasserstände für die Nahe und Ferne Zukunft. Hierbei stand der Methodenvergleich zur Vorhersage von Grundwasserständen für die Nahe und Ferne Zukunft im Vordergrund.

In Teilprojekt D wurden vom LBEG zwei dreidimensionale numerische Grundwasserströmungsmodelle verwendet, um mit Hilfe von projizierten Grundwasserneubildungsdaten (mGROWA22) zukünftige Grundwasserstandsveränderungen zu simulieren. Dabei wurde die Entwicklung von Grundwasserständen an in den Modellgebieten Sandelermöns und Vörden-Hunteburg liegenden und in KliBiW7 als anthropogen unbeeinflusst definierten Grundwassermessstellen modelliert (siehe Abb.1). Die numerische Grundwasserströmungsmodellierung ist ein etabliertes Verfahren zur Beantwortung wasserwirtschaftlicher Fragestellungen unter Berücksichtigung der umgebenden hydrogeologischen Verhältnisse und dient hier in erster Linie zur Einordnung und zur Absicherung der Ergebnisse der auf statistischen Zusammenhängen basierenden Methoden der Teilprojekte A bis C.

Für 7 Kernindikatoren wurden die projizierten Änderungen für die Nahe Zukunft (2021-2050) und die Ferne Zukunft (2071-2100) bezogen auf den Referenzzeitraum (1981-2010) dargestellt. Berechnet wurden die absoluten Änderungssignale über den Delta-Change Ansatz. Zur Berücksichtigung der Bandbreite der Klimaprojektionsdaten wurden drei gebiets-spezifische Projektionen ausgewählt.

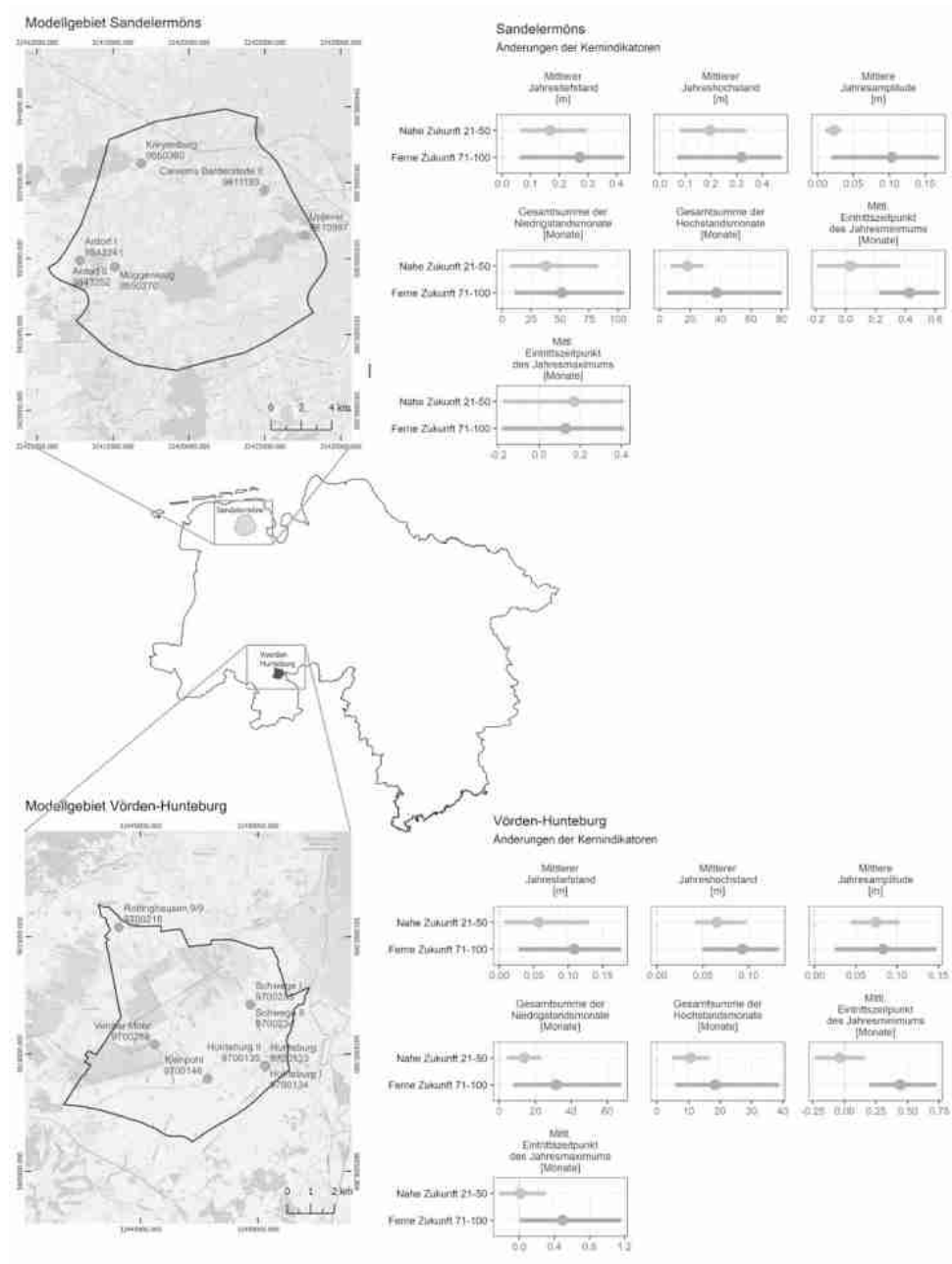


Abb. 1: Modellgebiete und projizierte Änderungen der Kernindikatoren.

Beide Strömungsmodelle zeigen für die Änderungen der Kernindikatoren zukünftig sowohl Zunahmen als auch Abnahmen. Für die Mehrzahl wird jedoch eine Zunahme modelliert. Generell fallen die Änderungen gering aus. Nach den Ergebnissen der Modellierungen zukünftiger Grundwasserstandsveränderungen durch die beiden Strömungsmodelle nimmt die Anzahl von Monaten mit Grundwasserniedrigstands- und Grundwasserhochstandssituationen in beiden Modellgebieten bis zum Ende des Jahrhunderts zu. Die Intensitäten verändern sich dabei jedoch nicht wesentlich. Die Mittelwerte der jährlichen Maxima und Minima sowie die sich daraus ergebenden Mittelwerte der Jahresamplituden nehmen sowohl für die nahe als auch für die ferne Zukunft nur leicht zu. Daraus ergibt sich eine Erhöhung der mittleren winterlichen Grundwasserstände, ebenso wie eine Erhöhung, also Abschwächung, der sommerlichen Minima. Des Weiteren findet, vor allem in der Fernen Zukunft, eine leichte Verschiebung der Eintrittszeitpunkte von Jahresminimum und -maximum hin zu einem späteren Zeitpunkt im Jahr statt. Diese Ergebnisse sind nicht übertragbar auf andere Grundwassermessstellen in Niedersachsen.

Poster 2.14 (ID 341)

Kann die Grundwasserbewirtschaftung der Zukunft nachhaltig sein?

Siebert, C.¹, Wohnlich, S.², Barth, J.³, Borchardt, D.¹, Dürr, H.⁴, Herzog, P.⁵, Meyer, E.⁶, Meyer, U.⁷, Radny, D.⁵, Reinecke, R.⁸, Saile, P.⁵, Köthe, H.⁹

¹: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ, Dept. Catchment Hydrology

²: Ruhr-Universität Bochum, Hydrogeochemie und Hydrogeologie

³: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen, GeoZentrum Nordbayern Applied Geology

⁴: Ruhr-Universität Bochum, Ingenieurhydrologie und Wasserbau

⁵: Bundesanstalt für Gewässerkunde

⁶: Universität Münster, Limnologie

⁷: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

⁸: Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, Geographie

⁹: International Centre for Water Resources and Global Change (ICWRGC)

Kontakt: stefan.wohlich@rub.de

Der Klimawandel ist Realität und wird zukünftig deutlich häufigere und längere sommerliche Trocken- und Hitzeperioden und intensivere Niederschläge in der Wintersaison in vielen Regionen Europas und Deutschlands verursachen. Vorboten sind in den letzten Jahren zu beobachten und führen vielerorts zu erheblichen Qualitätseinbußen sowie Defiziten in der Wasserführung der Vorfluter, dem pflanzenverfügbaren Bodenwasser sowie den zur Wassergewinnung essenziellen Grundwasservorkommen. Die Folge ist ein steigender Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft. Zugleich benötigt der urbane Raum Trinkwasser und die Industrie und gewerbliche Wirtschaft einen zuverlässigen und ausreichenden

Zugang zu Wasser- und insbesondere Grundwasserressourcen. Diese Kombination aus erhöhten Bedarfen intensiviert die Grundwassernutzung. Resultierend sind verringerte Basisabflüsse, woraus negative Effekte auf die aquatischen und assoziierten Ökosysteme aber auch auf wirtschaftliche Aspekte wie die Energieerzeugung, Schiffbarkeit und Gewinnung von Uferfiltrat abzuleiten sind.

Angesichts der bereits heute sichtbaren und perspektivisch verstärkten Effekte des Klimawandels sind trotz der Priorisierung der Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser regional Konkurrenzsituationen zwischen den industriellen und landwirtschaftlichen Akteuren, den lokalen und überregionalen Wasserversorgern und dem Schutz grundwasserabhängiger Ökosysteme vorhersehbar.

Zusammenfassend wird deutlich, dass eine nachhaltige Bewirtschaftung der Wasser- und insbesondere Grundwasserressourcen nur durch eine holistische Einbeziehung der hydrologischen, soziodemographischen und ökonomischen Sphären möglich sein wird. Assoziierte Forschungsfragen sind in allen Feldern zu identifizieren. Unser Fokus liegt auf der Identifikation der wichtigsten hydrogeologischen Fragen, wie der perspektivischen Entwicklung der Grundwasserneubildung, der Zuverlässigkeit der Basisabflussmengen und der Grundwassergüte.

Poster 2.15 (ID 344)

Ermittlung nutzbarer Grundwasserdargebote und Erstellung einer Verwaltungsanwendung für das Modellgebiet Nordsachsen

Maike Rath¹, Matthias Beyer¹, Marcus Richter², Katrin Reinhardt², Martin Pohl³, Torsten Abraham³

¹: BGD ECOSAX GmbH, Deutschland

²: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

³: G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH

Kontakt: m.rath@bgd-ecosax.de

Durch den Klimawandel werden im Trend der letzten 5-10 Jahre landesweit fallende Grundwasserstände (GW-Stände) registriert. Konträr zum Rückgang der GW-Ressourcen steigen jedoch die Nutzungsansprüche insbesondere für landwirtschaftliche und private/öffentliche GW-Nutzungen. Der Kenntnisstand zu den noch nutzbaren GW-Dargeböten und damit zum bereits vorhandenen Ausnutzungsgrad und dem Potenzial für die Vergabe weiterer Entnahmerechte ist vielfach defizitär. Um die knapper werdenden GW-Ressourcen nachhaltig bewirtschaften zu können, ist es nötig, eine Bilanzierung der noch nutzbaren GW-Dargeböte durchzuführen.

Auf Basis der EU-WRRL erfolgt bereits eine mengenmäßige Bilanzierung für die GW-Körper. Aufgrund ihrer Größe, sowie der innerhalb der GW-Körper oft heterogenen hydrogeologischen Verhältnisse ist eine Dargebotsbilanzierung auf dieser Maßstabsebene für lokale oder regionale Fragestellungen nicht ausreichend. Vielmehr ist es erforderlich, anhand naturwissenschaftlicher Grundlagen (v. a. der geohydraulischen Verhältnisse) hydrogeologisch begründete Bewertungseinheiten (BWE) abzugrenzen, die deutlich kleiner als der gesamte Grundwasserkörper sind. Dies ermöglicht eine zielgerichtete Betrachtung und Bewirtschaftung der räumlich differenzierten GW-Ressourcen.

Ziel ist es deshalb, eine Methodik für die Aufstellung detaillierter Wasserbilanzen für naturwissenschaftlich abgegrenzte BWE zu entwickeln und in einer Verwaltungsanwendung für die Genehmigungsbehörden nutzbar zu machen. Die Methodik und die Verwaltungsanwendung wird zunächst für das Modellgebiet Nordsachsen entwickelt und erprobt. Anschließend ist eine Übertragung auf weitere Regionen des Freistaates Sachsen vorgesehen.

Die Projektbearbeitung beinhaltete zunächst die Recherche, Zusammenstellung und Auswertung hydrogeologischer und geohydraulischer Daten im Modellgebiet. Im Ergebnis wurde die Grundwasserdynamik für 6 quartäre und einen tertiären GWL-Komplex aktualisiert und präzisiert. Dies bildete die Grundlage zur Abgrenzung von 13 BWE unter Berücksichtigung der hydraulischen Randbedingungen (vgl. Abb. 1).

Der zweite Teil umfasste die Qualifizierung des bereits beim LfULG vorliegenden 3D-Untergrundmodells zur möglichen Ableitung von horizontspezifischen Ergiebigkeitsabschlägen, welche zur Quantifizierung der Verminderung des nutzbaren Dargebots aufgrund hydrogeologisch ungünstiger Bedingungen herangezogen werden können. Die verdichtende Parametrisierung des Modells erfolgte anhand bereits vorliegender Kennwerte sowie der Recherche und Auswertung vorhandener Pumpversuche und Korngrößenanalysen und der Ergebnisse von 110 durchgeführten Feld-Tests. Anhand des im Ergebnis vorliegenden Datenpools wurden - auch unter Beachtung der Ausführungen des hydrogeologischen Kartenwerks der ehem. DDR (HK 50) - GWL-spezifische k_f -Wert-Verteilungen sowie anhand der grundwassererfüllten Mächtigkeiten Transmissivitäts- bzw. Ergiebigkeitskarten erarbeitet.

Die Ausweitung auf andere Regionen Sachsens soll sukzessive unter gleichzeitiger Optimierung der Bearbeitungsmethodik erfolgen. Der nächste Teil der Projektbearbeitung umfasst die Diskussion und Festlegung der Inhalte, sowie der technischen Umsetzung der Verwaltungsanwendung. Ein wesentlicher Bestandteil dieser wird neben der Ausweisung noch verfügbarer Grundwasserressourcen für verschiedene Klimaszenarien in den Bewertungseinheiten auch die Darstellung aller bereits bekannten Grundwasserentnahmen sein.

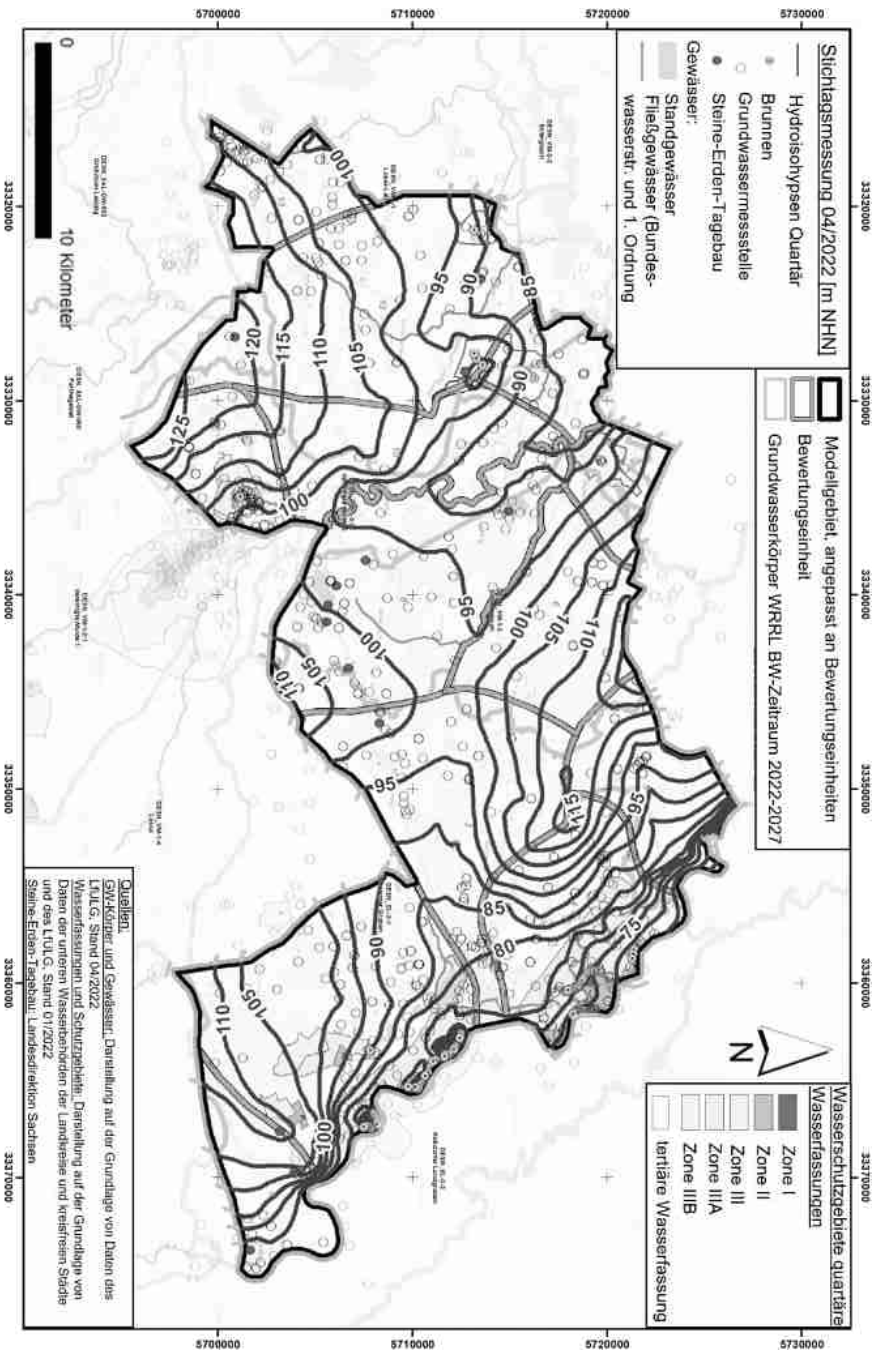


Abb. 1: Modellgebiet.

3 Grundwasserwirtschaftliche Aufgaben in den Bergbaurevieren

22.03.2024, 13:30 - 15:00, Konferenzraum 2

Nils Cremer (Erftverband)

Christian Melchers (Forschungszentrum Nachbergbau, THGA)

Vortrag 3.1 (ID 136)

Langfristige Sicherung der Wasserversorgung als Voraussetzung für einen erfolgreichen Strukturwandel im Rheinischen Revier

Stefan Simon, Alina Herber, Dietmar Jansen

Erftverband, Deutschland

Kontakt: stefan.simon@erftverband.de

Die Braunkohlegewinnung im Rheinischen Revier erfordert eine umfangreiche Sumpfung des Grundwassers. Die hieraus resultierende Grundwasserabsenkung reicht weit über den eigentlichen Abbaubereich hinaus und führt u. a. zu Auswirkungen auf die Wasserversorgung mit Grundwasser in Menge und Güte. Das bergbaubedingte Wassermengendefizit im Untergrund beläuft sich seit den 1950er Jahren auf mehr als 20 Mrd. Kubikmeter. Einzugsgebiete von Trinkwassergewinnungsanlagen oder industriellen Entnehmern erfahren teilweise Veränderungen in ihrer Lage und Größe. Durch Sulfatausträge aus Braunkohlenabraumkippen kommt es zu Überschreitungen des Grenzwertes für die Trinkwassergewinnung und in der Folge zum Ausfall von Gewinnungsstandorten.

Im Nordraum des Rheinischen Reviers dienen eine große Anzahl von Grundwasser-Infiltrationsanlagen und Direkteinleitungen in Gewässer dem Schutz von grundwasserabhängigen Feuchtgebieten, Oberflächengewässern sowie der Sicherung der Trinkwasserversorgung. Die Infiltrationsanlagen werden mit aufbereitetem Sumpfungswasser (derzeit ca. 80 Mio. m³/a), die Direkteinleitungen ebenfalls mit Sumpfungswasser oder Trinkwasser (derzeit ca. 20 Mio. m³/a) beschickt. Die Anlagen werden auch nach Tagebauende noch über einen langen Zeitraum bis zum Abschluss des Wiederanstiegs des Grundwassers benötigt werden. Durch den Rückgang der Sumpfungsmengen reicht diese ab ca. 2030 nicht mehr aus, um den Bedarf an Öko-, Ausgleichs- und Ersatzwasser zu decken. Für die fehlenden Mengen ist eine Zufuhr von aufzubereitetem Rheinwasser bzw. Trinkwasser aus anderen Räumen geplant. Der im Rahmen des Monitorings Garzweiler II erarbeitete

„Rheinwassergütebericht für die geplante Wasserverwendung im Rheinischen Revier“ (<https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMV18-653.pdf>) beurteilt die Rheinwassergüte im Hinblick auf verschiedenen Schutzgüter und zeigt weiteren Untersuchungsbedarf aus.

Im Rahmen der Arbeitsgruppe Wasserversorgung (Monitoring Garzweiler II) wurde eine Bestandsaufnahme aller Gewinnungsstandorte der öffentlichen Wasserversorgung und der Lebensmittelindustrie im Nordraum bzgl. der Betroffenheit durch Infiltrations- bzw. Einleitwassereinflüsse durchgeführt. Mindestens 12 Gewinnungsanlagen der Trinkwasserversorgung (Förderung: ca. 15 Mio. m³/a, Infiltrationsmenge: ca. 20 Mio. m³/a) sind hiernach in unterschiedlichem Umfang von einer Umstellung von Sumpfungs- auf Rheinwasser betroffen (Abbildung 1). Zur Vermeidung eines Eintrags von Spurenstoffen aus dem Rheinwasser in Trinkwassereinzugsgebiete kommen Brunnen- oder Standortverlagerungen, eine Fremdwasserzufuhr oder eine Aufbereitung des Rheinwassers infrage.

Den durch Sulfatausträgen aus Abraumpkippen betroffenen Wassergewinnungsanlagen im Rheinischen Revier wird durch eine Verlagerung von Fördermengen an andere Standorte begegnet.

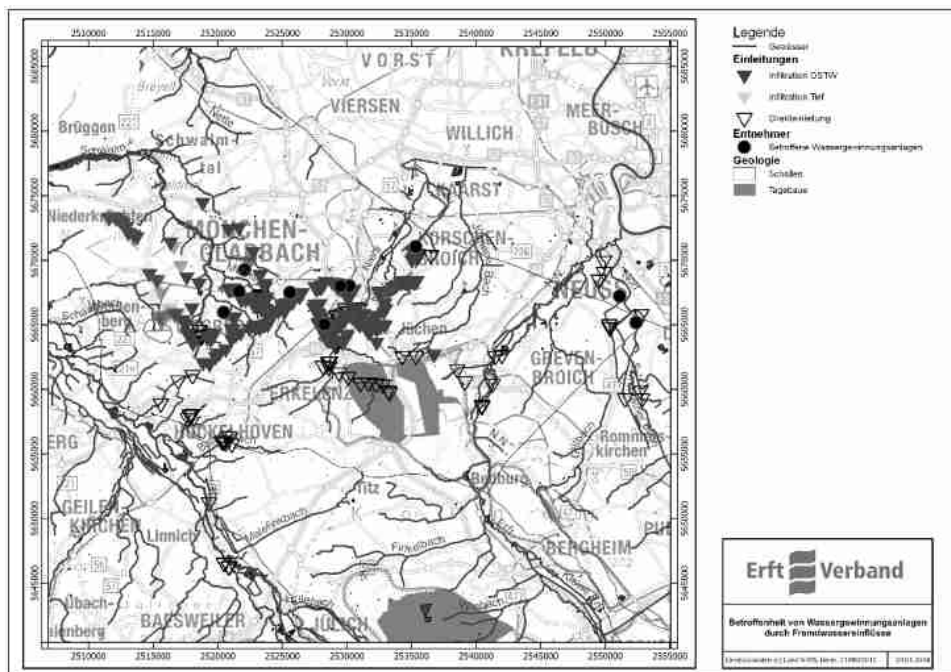


Abb. 1: Betroffenheit von Wassergewinnungsanlagen durch Fremdwassereinflüsse

Die Erarbeitung von Wasserversorgungskonzepten bildet die wesentliche Grundlage für eine langfristig sichere Wasserversorgung im Rheinischen Revier und damit die wesentliche Voraussetzung für einen erfolgreichen Strukturwandel.

Vortrag 3.2 (ID 153)

Die „MUSE“ in der nachbergbaulichen Wasserhaltung - Neue Ansätze für das Poldermonitoring

Tobias Rudolph, Marcin Pawlik, Bodo Bernsdorf

Technische Hochschule Georg Agricola, Deutschland

Kontakt: tobias.rudolph@thga.de

In den durch Steinkohlenbergbau verursachten Senkungsmulden innerhalb des Ruhrgebietes, den sogenannten Poldergebieten, sind unbefristete künstliche Entwässerungsmaßnahmen erforderlich. Diese betreffen sowohl Grundwasserkörper als auch Fließgewässer. An diesen müssen zusätzlich Eindeichungsmaßnahmen im Hinblick auf den Hochwasserschutz vorgenommen werden. Das Polderwassermanagement betrifft im Ruhrgebiet große Flächen und stellt eine Ewigkeitsaufgabe dar.

Hierbei besteht die Herausforderung nicht nur in der technischen Umsetzung der Entwässerung, sondern auch in dem Monitoring der Einflüsse auf die Umwelt in den durch Polder geprägten Regionen. Mit dem Projekt MUSE (Multisensor-Geomonitoring zur Optimierung der nachbergbaulichen Wasserhaltung) des Forschungszentrums Nachbergbau (FZN) der THGA Bochum soll ein Konzept mit einem multisensorischen Geomonitoring-Ansatz entwickelt werden, um die Umweltveränderungen im Zusammenhang mit den Poldermaßnahmen zu beobachten. Dabei sind Optimierungsmöglichkeiten für das Wassermanagement zu untersuchen. Beispielweise kann eine neuartige Nutzung von Polderwasser zur Bewältigung des Vegetationsstresses bei langanhaltender Trockenheit hilfreich sein. In diesem Beitrag wird das Untersuchungskonzept des Projektes MUSE dargestellt.

Der multisensorische Geomonitoring-Ansatz, welcher die verschiedenen Erdbeobachtungsmethoden aus der satellitengestützten Fernerkundung, den hochauflösenden Drohnenaufnahmen und den punktuellen Sensormessungen umfasst, wird für die Polderflächen im Einzugsgebiet des Vorfluters Boye, einem Nebenfluss der sich in einem naturnahen Umbau befindlichen Emscher, erprobt. Die somit erfassten Umweltzustände für das Untersuchungsgebiet sollen später durch raumzeitliche Analysen in Bezug zu den laufenden Wasserhaltungsmaßnahmen gesetzt werden, um einen ersten Überblick der polderregionspezifischen Umweltveränderungen zu erlangen. Die Autoren danken der RAG-Stiftung (Förderkennzeichen: 2021-0002) für die finanzielle Förderung und danken den

Kooperationsmitgliedern EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH (EFTAS), RAG Aktiengesellschaft (RAG AG) und Emschergenossenschaft und Lippeverband (EGLV) für die gute Zusammenarbeit.

Vortrag 3.3 (ID 237)

Hydrogeochemisches Monitoring zur Detektion von Grubenwasser im Ruhrrevier: Multivariater Tracer-Ansatz und Ermittlung von Baselines

Henning Jasnowski-Peters, Sebastian Westermann, Christian Melchers

TH Georg Agricola Bochum, Forschungszentrum Nachbergbau, Deutschland

Kontakt: henning.peters@thga.de

Die Grubenwasseranstiege in den ehemaligen deutschen Steinkohlerevieren, hier mit dem Fokus auf das Ruhrrevier, sollen langfristig kontrolliert und nachhaltig ablaufen. Daher wird das zukünftige Wasserhaltungskonzept des Betreibers RAG AG von einem Risikomanagement und integralen Monitoringkonzept begleitet und überwacht. Oberste Prämisse für das Schutzgut „Wasser“ ist der Schutz der Trinkwasserreservoirs. Im Ruhrgebiet und südwestlichen Münsterland werden ca. 6 Millionen Menschen mit Trink- und Brauchwasser versorgt, das zum größten Teil von dem Grundwasserleiter der oberkretazischen Halternen Sande gespeist wird. Daher ist es für ein funktionierendes Risikomanagement unabdingbar, die Grubenwässer, also Grundwässer im kohleführenden Oberkarbon, die in Kontakt mit den Grubenbauen gekommen sind, eindeutig als solche im Untergrund zu identifizieren und deren Infiltration von Grundwasserleitern im Deckgebirge möglichst frühzeitig festzustellen sowie zu minimieren. Auch die Überwachung der Wasserwegsamkeiten in dem für die langfristige Wasserhaltung ausgebauten untertägigen Hauptstreckennetz soll das Tracer-Konzept mittels multivariatem Tracer-Ansatz bisher bestehend aus den bereits evaluierten Tracern Bromid (Br⁻) und Lithium (Li⁺) sowie stabiler Isotopengeochemie bestehend aus den Wasserisotopen und der Strontiumisotopie (δD , $\delta^{18}O$ und $^{87}Sr/^{86}Sr$) unterstützen. Laut Grubenwasserkonzept und der Reduktion der Wasserhebungsstandorte von 13 auf 6 kommt dem Entwässern der zentralen Wasserprovinzen (d. h. Wasserprovinz Zollverein, Prosper-Haniel, Amalie und Carolinenglück), der untertägigen Mischung und Einleitung der Grubenwässer in den Rhein bei Lohberg dabei ein Hauptaugenmerk zu. Grubenwässer müssen von dem regionalen Aquifer im Cenomanium-Turonium und den Formationswässern der Emscher-, Haltern- und Recklinghausen Formationen im Deckgebirge unterschieden werden. Mehr als 750 Datensätze bestehend aus Literatur-, Betreiber- und eigens erhobenen Daten wurden für die Evaluation der hydrogeochemischen Tracer benutzt. Es erwiesen sich bereits als univariate Tracer die Spurenelemente Bromid als „Cl⁻/Br⁻“-normierter Tracer und Lithium (Li⁺) als „Li⁺/Na⁺“-normierter Tracer hinreichend

aussagekräftig bei der Unterscheidung des Na-Cl dominierten regionalen Cenomanium-Turonium Aquifers von den ebenfalls größtenteils Na-Cl dominierten tiefen Grubenwässern. Der multivariate Ansatz, also die Verschneidung der geochemisch-divers und unabhängigen Tracer miteinander, soll die größtmögliche Varianz in den Grund- und Grubenwässern abdecken und hinreichend die einzelnen Wasserkörper hydrogeochemisch abgrenzen. Hochauflösende Strontiumisotopendaten lieferten eine hinreichende Unterscheidung der Grubenwässer an den Einleitstellen der jeweiligen Wasserprovinzen sowie eine gute zeitliche Reproduzierbarkeit. Der multivariate Ansatz hat auch zum Ziel eine größtmögliche Reduktion an Messparametern zu bewirken. Die weiterführende hydrogeochemische Forschung an den Inhaltsstoffen in den jeweiligen Grund- und Grubenwässern soll einen Messparameter-Katalog definieren, der bei jeder weiteren Grundwasseruntersuchung im Rahmen des integralen Monitorings abgedeckt werden soll. Auch besteht das Potenzial für Grubenwässer mit Sulfidoxidations-Signaturen im internationalen Steinkohlenbergbau zu deren eindeutiger Detektion in nachbergbaulichen Fragestellungen beizutragen.

Vortrag 3.4 (ID 308)

ATLANTIS – Eine interdisziplinäre Machbarkeitsstudie zur hybriden Pumpspeicherung von Überschussenergie in stillgelegten Braunkohletagebauen

Thomas Kempka^{1,2}, Priscilla Ernst¹, Krzysztof Kapusta³, Nikolaos Koukoulas⁴, Jaroslaw Darmosz⁵, Christos Roumpos⁶, Tomas Fernandez-Steeger⁷, Elena Chabab¹, Christopher Otto¹, Tobias Schnepfer¹, Wioleta Basa³, Mariusz Kruczek³, Konstantina Pyrgaki³, Pavlos Krassakis⁴, Evangelia Zygouri⁴, Andreas Karavias⁴, Robert Chałupka⁵, Sylwester Drozdowski⁵, Dariusz Kowalczyk⁵, Gabriel Węgrzyn⁵, Dorota Orkisz⁵, Dariusz Najgebauer⁵, Georgios Louloudis⁶, Eleni Mertiri⁶, Petros Kostaridis⁶, Vlassis Andreou⁶, Aikaterini Servou⁶, Nikolaos Paraskevis⁶, Anika Braun⁷, Ershad Ud Dowlah Pahlowan⁷, Katrin Dohmen⁷

¹: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, Deutschland

²: Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, Potsdam, Deutschland

³: GIG National Research Institute, Kattowitz, Polen

⁴: Centre for Research and Technology, Hellas (CERTH), Athen, Griechenland

⁵: PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S.A., Belchatow, Polen

⁶: Public Power Corporation of Greece, Athen, Griechenland

⁷: Technische Universität Berlin, Fachgebiet Ingenieurgeologie, Berlin, Deutschland

Kontakt: kempka@gfz-potsdam.de

Der geplante Ausstieg aus der Braunkohleverstromung in Europa erfordert innovative und wirtschaftliche Strategien zur Unterstützung von Bergbauregionen im Wandel. Im Rahmen des EU-RFCS geförderten F&E-Projekts ATLANTIS wurde dazu eine integrierte Machbarkeitsstudie zur Transformation stillgelegter Tagebaue in hybride Energiespeicherprojekte erarbeitet. Die angestrebte Umwidmung von Tagebauen in hybride Pumpspeicherkraftwerke auf der Grundlage von Überschussenergie aus regenerativen Energiequellen in unmittelbarer Tagebaunähe und dem Stromnetz leistet wesentliche Beiträge zum EU Green Deal und Energieversorgungssicherheit, steigert die regionale Wertschöpfungskette und stabilisiert die regionalen Arbeitsmärkte im Kontext des durch den Ausstieg aus der Braunkohlegewinnung erforderlichen Strukturwandels. Das wesentliche Ziel des ATLANTIS-Projekts war die Entwicklung einer technischen und wirtschaftlichen Machbarkeitsstudie zur hybriden Pumpspeicherung in stillgelegten Braunkohletagebauen. Der vorliegende Beitrag wird wesentliche Einblicke in die im Projekt durchgeführten F&E-Aktivitäten aufzeigen, in deren Rahmen zwei Braunkohletagebaue in Griechenland und Polen bezüglich ihrer Eignung als Energiespeicher untersucht wurden. Die durchgeführten Forschungsarbeiten beinhalteten Feldkampagnen zur Probengewinnung, Laboranalysen und Elutionsversuche zur Charakterisierung der relevanten Materialparameter sowie hydrogeologische, hydrogeochemische und geotechnische Analysen zur Definition der Auslegungskriterien für beide Pumpspeicherkraftwerke. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass eine Stromproduktionskapazität von 350 MW kann bei einer Höhendifferenz von ca. 240 m und den im Szczercow-Tagebau im Lodzer Kohlebecken verfügbaren Speichervolumen realisiert werden kann. Damit können die Stromgewinnungskapazitäten der geplanten Photovoltaik- und Windparks im Umfeld des Tagebaus sogar deutlich erweitert werden. Eine Stromerzeugungskapazität von 180 MW wurde für den Kardia-Tagebau bei einer Höhendifferenz von etwa 100 m im Ptolemais-Kohlebecken in Griechenland ermittelt. Hier ist ein Ausbau regenerativer Energien in der Größenordnung von 1.2 GW im direkten Umfeld vorgesehen. Mögliche Umweltauswirkungen wurden mittels einer integrierten Risikoanalyse mit der Kopplung qualitativer und quantitativer Komponenten mithilfe von Experten aus den Bereichen Bergbau, Hydrogeologie, Hydrochemie, Geotechnik sowie Sozial- und Wirtschaftswissenschaften bewertet. Auf dieser Grundlage wurden Strategien zur Risikovermeidung und Auslegungsoptimierung beider Pumpspeicherkraftwerke erarbeitet, welche bereits in der aktuellen Abbauplanung und den Erdarbeiten zur Vorbereitung der beiden Speicherbecken umgesetzt werden. Darüber hinaus wurden dynamische Wirtschaftlichkeitsmodelle entwickelt, welche eine Optimierung des Speicherbetriebs unter Verwendung von aktuellen Tagesprognosen zur Energiemarktentwicklung erlauben, und somit betriebliche und wirtschaftliche Entscheidungsprozesse unterstützen. Weiterhin wurde im ATLANTIS-Projekt der regionale sozioökonomische Fußabdruck für beide Untersuchungsregionen ermittelt, um den durch die Umwidmung der ehemaligen Tagebaue entstehenden sozioökonomischen Mehrwert im Vergleich zur ansonsten üblichen Stilllegung von Tagebauen zu bestimmen. Die vorliegende Machbarkeitsstudie ist eine wesentliche Grundlage

für die Entscheidungsfindung der beteiligten Industriepartner und zeigt weiterhin die Potenziale zur Anwendung in der EU auf.

Vortrag 3.5 (ID 311)

Beurteilung der Gefährdung eines Wasserwerks durch Sulfat mithilfe des Risikomanagements nach DIN EN 15975-2

Florian Jenn, Franziska Mehler, Silvia Dinse

GCI GmbH, Königs Wusterhausen, Deutschland

Kontakt: florian.jenn@gci-kw.de

Infolge des Bergbaus im Lausitzer Revier traten im letzten Jahrzehnt erhöhte Sulfatkonzentrationen in der Spree auf. Dies kann für Wasserwerke entlang der Spree eine Belastung darstellen. Für das davon betroffene Wasserwerk Briesen wurde deshalb vom Ministerium für Wirtschaft und Energie Brandenburg eine Gefährdungsbeurteilung hinsichtlich des Parameters Sulfat beauftragt. Unterstützt durch ein Strömungsmodell wurden anschließend verschiedene Maßnahmen zur Risikobeherrschung bewertet.

Das Wasserwerk versorgt ca. 65.000 Einwohner, u. a. die Stadt Frankfurt (Oder), aus zwei Wasserfassungen: eine Gruppe von Vertikalfilterbrunnen mit Uferfiltratanteil und eine Heberbrunnenanlage. Da das verfügbare Grundwasserdargebot den Bedarf nicht deckt, wird das Grundwasser im Anstrom der Heberbrunnen mit Spreewasser angereichert. Uferfiltrat und künstliche Grundwasseranreicherung stellen einen wesentlichen Anteil an der Gesamtförderung da, sodass das Trinkwasser von der Beschaffenheit des Spreewassers stark beeinflusst wird. Sulfat wird deshalb seit dem Jahr 2013 als Belastungsparameter betrachtet. Entsprechend der Prognosen [1] ist auch weiterhin mit einer hohen bzw. steigenden Konzentration zu rechnen. Da Sulfat mit der vorhandenen Aufbereitung nicht entfernt werden kann, ist es möglich, dass die Konzentration im Trinkwasser den Grenzwert der Trinkwasserverordnung zukünftig überschreiten wird.

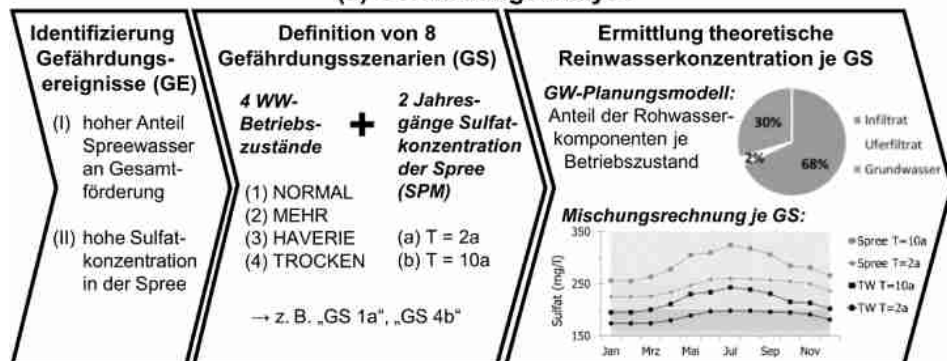
Auf Grundlage der DIN EN 15975-2:2013 [2] wurde deshalb die Gefährdung der Grenzwertüberschreitung für den Parameter Sulfat in folgenden Schritten beurteilt (Abb. 1):

- Beschreibung der Rahmenbedingungen des Trinkwassersystems
- Gefährdungsanalyse
- Risikoabschätzung
- Entwicklung von Maßnahmen zur Risikobeherrschung

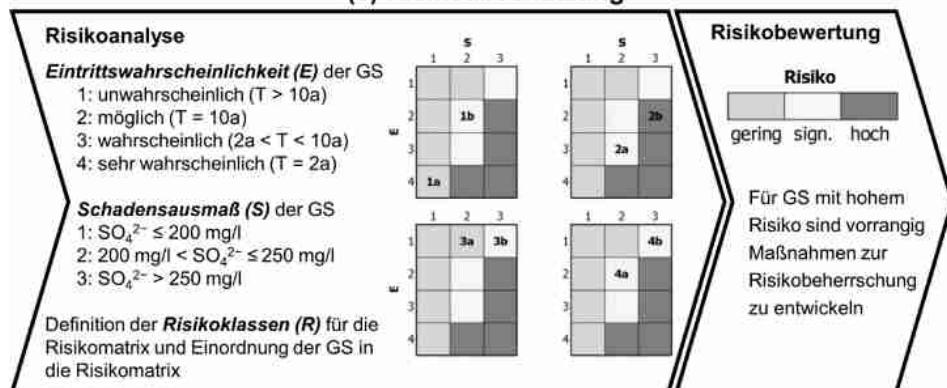
(1) Rahmenbedingungen am WW-Standort

- Förderregime
- Hydrogeologie
- Sulfatkonzentration des Spreewassers und des Grundwassers
- Bestehende Steuerungsmaßnahmen zur Einhaltung des Sulfat-Grenzwertes der Trinkwasserverordnung (250 mg/l)

(2) Gefährdungsanalyse



(3) Risikoabschätzung



(4) Maßnahmen zur Risikobeherrschung

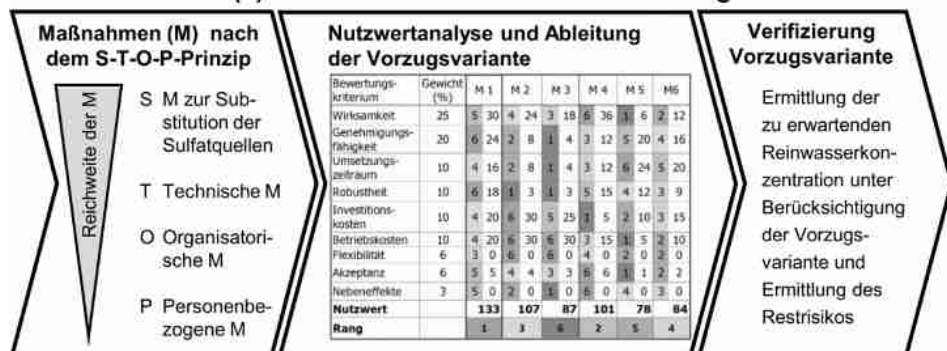


Abb. 1: Übersicht über die Gefährdungsbeurteilung.

Darauf kann der Wasserversorger ein vollständiges prozessorientiertes Risikomanagement im Sinne der DIN aufbauen. Die Gefährdungsbeurteilung wurde in einer interdisziplinären Gruppe aus Vertretern der zuständigen Ministerien und Fachämter, des Wasserversorgers und der beratenden Ingenieurbüros erarbeitet. Die Risikoabschätzung bietet ein nachvollziehbares Werkzeug, um die Gefährdungsszenarien zu vergleichen, zu priorisieren und geeignete Maßnahmen zur Risikobeherrschung zu ermitteln. Eine wesentliche Grundlage dafür ist die Berechnung der in den Szenarien zu erwartenden Sulfatkonzentrationen. Dazu wurde ein hydrogeologisches Strukturmodell aus vorhandenen Daten abgeleitet und darauf aufbauend ein numerisches Grundwasserströmungsmodell (Planungsmodell im Sinne der Technischen Regel DVGW W 107 [4]) mit dem Simulator FEFLOW erstellt. Dieser objektive Ansatz zur Berechnung der Szenarien stieß bei den Projektbeteiligten auf große Akzeptanz und ermöglichte eine sachorientierte Diskussion der Gefährdungsszenarien. Abschließend wurde ein Katalog von 14 Maßnahmen zusammengestellt und mit einer Nutzwertanalyse bewertet.

[1] DHI-WASY GmbH (2019): Ermittlung von Zielwerten für die Spree für den Parameter Sulfat als Grundlage für einen Bewirtschaftungserlass zum Umgang mit bergbaubedingten stofflichen Oberflächengewässerbelastungen

[2] DIN EN 15975-2:2013: Leitlinien für das Risiko- und Krisenmanagement, Teil 2: Risikomanagement

[3] GCI GmbH (2020): Gefährdungsbeurteilung für den WW-Standort Briesen bezüglich des chemischen Parameters Sulfat. Abschlussbericht. Online unter https://lbgr.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/VERS_VEROEFF_20200928.pdf

[4] DVGW (2016): Technische Regel W 107 – Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodelle in Wassergewinnungsgebieten

Vortrag 3.6 (ID 336)

Hydrogeologisches Systemverständnis und unechte Wasserbenutzungen nach §9 WHG am Beispiel des Grubenwasserteilanstiegs im Saarrevier

Thomas Walter

*Ministerium für Umwelt, Klima, Mobilität, Agrar und Verbraucherschutz, Saarland, Deutschland
Kontakt: t.walter@umwelt.saarland.de*

Wasserrechtliche Entscheidungen sind aufgrund der Vielfalt der zu genehmigenden Vorhaben, vor Allem aber auch wegen der unterschiedlichen natürlichen Gegebenheiten gerade im Grundwasserbereich weitestgehend Einzelfallentscheidungen. Dies gilt insbesondere auch für große Vorhaben mit weitreichendem räumlichen Umgriff wie z. B. die Genehmigungen von Grubenwasseranstiegen im Rahmen der Bergbaunachfolge.

Im Saarland wurde im Juni 2012 nach etwa 250 Jahren Bergbau – weitestgehend unter staatlicher Regie – der Abbau der Steinkohle beendet. Die RAG als letzter Bergbautreibender stellte daraufhin am 18.08.2017 den Antrag auf das „Heben und Einleiten von Grubenwasser am Standort Duhamel in die Saar als Folge des Ansteigenlassens des Grubenwasserspiegels auf -320 mNN in den Wasserprovinzen Reden und Duhamel“

Die Entscheidung, ob über die beantragten Erlaubnisse zum Heben des Grubenwassers nach § 9 Abs. 1 Nr. 4 WHG und des anschließenden Einleitens in die Saar nach § 9 Abs. 1 Nr. 4 WHG auch auf die sogenannten „unechten“ Benutzungstatbestände zu erweitern waren und welche Nebenbestimmung diese Erlaubnisse für das Monitoring und die Steuerung des Anstiegsvorgangs sowie der anschließenden Wiederinbetriebnahme der Wasserhaltung erforderlich sind, konnte nur auf der Basis eines hydrogeologischen und hydraulischen Verständnisses der Fließwege und der zu erwartenden hydrochemischen Prozesse erfolgen. Nach § 9 Abs. 2 Nr. 2 WHG sind „Maßnahmen, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß nachteilige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit herbeizuführen“, und nach § 9 Abs. 1 Nr. 4 WHG das Umleiten von Grundwasser erlaubnispflichtige Benutzungen. Beide Tatbestände wurden im Rahmen der Prüfung als genehmigungsrechtlich relevant angesehen und im Planfeststellungsbeschluss vom 17.08.2021 auch mit umfangreichen Nebenbestimmungen zur Kontrolle des Anstiegsprozesses und der zu erwartenden hydrochemischen und hydraulischen Veränderungen während der sich anschließenden Wiederaufnahme der Wasserhaltung genehmigt.

Dieser Planfeststellungsbeschluss ist mehrfach vor dem Oberverwaltungsgericht des Saarlandes beklagt worden, die ersten drei Klagen sind mit Urteil vom 10.7.2023 abgewiesen worden. Die rechtliche und fachliche Argumentation der Wasserbehörde im Planfeststellungsbeschluss und in den Klageerwiderungen hat somit getragen. Dies war nur möglich durch die intensive Diskussion zwischen Fach- und Rechtsseite, da ohne das wechselseitige Verständnis für die fachlichen und die rechtlichen Rahmenbedingungen insbesondere die im Klageverfahren vertretene gemeinsame Position nicht mit der argumentativen Kraft hätte entwickelt werden können, die schlussendlich auch das Oberverwaltungsgericht hat überzeugen können. Gerichtsverfahren können also mit einer fachlich begründeten Position gewonnen werden, insbesondere wenn sie auch für hydrogeologische Laien verständlich formuliert ist.

Poster 3.1 (ID 196)

Grubenwässer der Altbergbaue im Geopark Erz der Alpen*Sylke Hilberg¹, Dominik Hauser¹, Gert Furtmüller²*¹: Universität Salzburg²: Dr. Gert Furtmüller, Technisches Büro für GeologieKontakt: sylke.hilberg@plus.ac.at

Zentrales Thema des UNESCO Geoparks Erz der Alpen im Salzburger Bezirk Pongau in Österreich ist der prähistorische und historische Erzabbau. In den Schaubergwerken Mühlbach, St. Veit und Hütttau werden Besucher über den über Jahrhunderte in der Region betriebenen Kupferbergbau informiert. Eine umfassende Studie zu Bergbau- und Hüttenstandorten im Bundesland Salzburg aus dem Jahre 1998 umfasste auch die Standorte im Geopark Erz der Alpen und beschreibt montangeologische Grundlagen der Lagerstätten, beleuchtet den Erzbergbau in der Region aus montanhistorischer Sicht und stellt Bergbau- und Hüttenstandorte aus Sicht des Umweltschutzes dar. Eine Erfassung und Bewertung von Grubenwässern erfolgten in diesem Rahmen nicht. Dies lässt darauf schließen, dass die aktuell aus den Altbergbauen austretenden Grubenwässer keine erhebliche Umweltgefährdung darstellen, anderenfalls wären sie vermutlich bereits im Laufe der vergangenen Jahrzehnte detektiert worden. Dennoch ist der Einfluss von Stollen und Halden auf die Beschaffenheit der Grubenwässer in den Altbergbaugebieten des Geoparks Erz der Alpen für das Gesamtverständnis der Bergwerke relevant und wurde durch das präsentierte Projekt untersucht. Ziel der präsentierten Studie war es zudem, einen Beitrag zu der generellen Frage leisten zu können, ob sich Grubenwässer im Sulfid-Erzbergbau auch nach Jahrzehnten noch signifikant von unbeeinflussten Grundwässern unterscheiden und ob bzw. in welchem Ausmaß „Natural Attenuation“ im Grubenwasser stattfindet, wenn eine Grubenwasserbehandlung im Nachbergbau völlig ausbleibt.

Im Zuge von Gelände- und Stollenbegehungen wurden repräsentative Stellen zur wiederholten Beprobung von Gruben- und Grundwässern festgelegt. Die Auswahl der Probenahmestellen wurde so gestaltet, dass folgende Wassertypen erfasst werden konnten: (1) Wässer, die eindeutig innerhalb des Stollensystems zirkuliert sind, (2) Wässer, die durch bestehende Abraumhalden beeinflusst sein können, (3) Wässer, die außerhalb des Einflussbereichs bekannter Bergbaubereiche aber in vergleichbarem geologisch-hydrogeologischen Setting zirkulieren und damit als Referenzquellen dienen können. Es wurden Quellen und Fließgewässer erfasst. Neben der hydrochemischen Analyse auf Haupt- und Spurenparameter wurden ausgewählte Proben hinsichtlich ihrer Sulfatisotopie untersucht. Das Verhältnis von $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{34}\text{S}$ im Sulfat kann Auskunft darüber geben, ob die gemessenen Sulfatgehalte das Ergebnis von Sulfidoxidation oder der Lösung von mesozoischen

Sedimenten sind bzw. ob bei der Interpretation der gemessenen Sulfatkonzentrationen der Prozess der bakteriologischen Sulfatreduktion zu berücksichtigen ist.

Bisher vorliegende Ergebnisse geben einen guten Überblick über die noch bestehenden Auswirkungen des Bergbaus auf die Beschaffenheit von Quellen und Fließgewässern in der Region Geopark Erz der Alpen.

Poster 3.2 (ID 262)

Untersuchungen des Schwefel- und Kohlenstoffkreislaufs in den Grubenwässern der stillgelegten Steinkohlebergwerke im Ruhrgebiet und Saarland

Barbara Teichert¹, Henning Jasnowski-Peters¹, Harald Strauss², Stefan Schlömer³, Lisa Rose¹, Till Genth¹, Christian Melchers¹, Sebastian Westermann¹

¹: Technische Hochschule Georg Agricola, Deutschland

²: Universität Münster, Deutschland

³: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Deutschland

Kontakt: Barbara.Teichert@thga.de

Im Ruhrgebiet endete der aktive Steinkohlenbergbau 2018 und im Saarland bereits 2012. Die Einstellung der Abbautätigkeiten und die damit verbundene Anpassung der Grubenwasserhaltung führen langfristig zu einem Anstieg des Grubenwassers. Das Forschungsvorhaben untersucht die Grubenwässer von Pumpstandorten und Einleitstellen aus dem Ruhrgebiet und Saarland. Ein Charakteristikum der Grubenwässer sind erhöhte Sulfat- und Eisenwerte, die das Ergebnis der (Di)Sulfidoxidation in den untertägigen Grubenbauen sind. Ziel ist es die Zusammenhänge des Schwefel- und Kohlenstoffkreislaufes zu erfassen und darüber wichtige Informationen über die Prozesse, die in den nicht mehr zugänglichen Grubenbauen ablaufen, zu erhalten. Sulfatreduzierende Mikroben setzen das Sulfat mit Hilfe einer Kohlenstoffquelle zu Schwefelwasserstoff um. Erste Ergebnisse zeigen, dass als Kohlenstoffquelle sowohl Organik als auch Methan von Mikroben genutzt wird. Mit Hilfe der Schwefelisotopie des Sulfats und Sulfids sowie der Kohlenstoffisotopie des Methans und des gelösten anorganischen Kohlenstoffs lassen sich Prozesse wie die bakterielle Sulfatreduktion und die anaerobe Methanoxidation identifizieren. Erste Ergebnisse zeigen deutlich den kinetischen Isotopeneffekt, der mit der mikrobiellen Sulfatreduktion verbunden ist. Sulfatreduzierende Bakterien nutzen bevorzugt das $^{32}\text{SO}_4$, welches dann zu typischerweise ^{34}S -angereicherterem Sulfat sowie leichteren $\delta^{34}\text{S}$ Werten des Sulfids im Grubenwasser führt.

Von besonderer Wichtigkeit für den Unterhalt der untertägigen Infrastruktur ist die weitere Entwicklung der Schwefelwasserstoff (H_2S) Produktion in den deutschen Steinkohlerevieren. In besonderem Maße betroffen hiervon sind die Standorte Robert Müser im Ruhrgebiet und Camphausen und Viktoria im Saarland. Bislang gibt es keine gesicherten Daten zu den intrinsischen Vorgängen untertage über die Bildung und Quantifizierung von Schwefelwasserstoff. Wie sich die H_2S -Gehalte in Zukunft verhalten, insbesondere auch in den nicht mehr erreichbaren Grubenbauen ist nicht geklärt.

4 Geothermische Nutzung des Untergrundes

22.03.2024, 11:15 - 12:30, Brüssel Saal

Florian Wellmann (RWTH Aachen)

Ingo Schäfer (Geologischer Dienst NRW)

Vortrag 4.1 (ID 161)

Erkundung des geothermischen Untergrundpotenzials im Bereich der Niederrheinischen Bucht

Thomas Oswald

RWE Power AG, Deutschland

Kontakt: thomas.oswald@rwe.com

Für die Transformation der Wärmeversorgung wird der hydrothermalen Geothermie großes Potenzial zugewiesen. Hier besteht die Herausforderung darin, die bestehenden konventionellen Versorgungspfade im Zuge des bis 2030 festgelegten Ausstiegs aus der Braunkohlenverstromung durch nachhaltige Wärmequellen abzulösen.

Große Hoffnung liegt auf den tiefen hydrothermalen Karbonatformationen des U-Karbons (Kohlenkalk) sowie M-Devons (Massenkalk). Diese Systeme sind im tieferen Untergrund in der niederrheinischen Bucht noch kaum untersucht und damit noch als „green field“-Systeme zu bezeichnen. Die Erkundung des tieferen Untergrundes reichte im Bereich Aachen – Weisweiler nur bis in das flözführende O-Karbon. Gemeinsam mit der Fraunhofer-Institution für Energieinfrastrukturen und Geothermie (Fh-IEG) soll deshalb am Standort des Braunkohlenkraftwerks Weisweiler ein Real-Labor Tiefengeothermie eingerichtet werden. Vorlaufend hierzu soll der Untergrund systematisch auf das Wärmepotenzial untersucht werden.

Im Gegensatz zu diesen wenig erkundeten tiefen Festgesteinssystemen ist das Tertiär (Lockergestein) in der Niederrheinischen Bucht durch die langjährige und umfassende Erkundung der Braunkohle sehr gut erkundet. Dies bietet die Möglichkeit, sehr schnell für potenzielle Abnehmer das Untergrundpotenzial der mitteltiefen Geothermie zu quantifizieren und damit erste Projekte einzuleiten.

Der aktuelle Stand der Untersuchungen und die Erkundungskonzepte werden für die tiefe sowie mitteltiefe Geothermie vorgestellt.

Vortrag 4.2 (ID 202)

Heizen und Kühlen mit Aquiferspeichern in Deutschland

*Ruben Stemmler¹, Kathrin Menberg¹, Vanessa Hammer¹, Haegyeong Lee¹,
Richard Hanna², Philipp Blum¹*

¹: Karlsruher Institut für Technologie, Deutschland

²: Imperial College London, UK

Kontakt: ruben.stemmler@kit.edu

Etwa 30 % des deutschen Endenergieverbrauchs lassen sich Heiz- und Kühlprozessen im Gebäudesektor zuordnen. Daher ist eine nachhaltige und klimafreundliche Gebäudeheizung und -kühlung für die Umsetzung der Energiewende von großer Bedeutung. Eine vielversprechende Möglichkeit, die Dekarbonisierung dieses Sektors voranzutreiben, stellen thermische Aquiferspeicher (Aquifer Thermal Energy Storage, ATES) dar. Diese sind in Deutschland bisher jedoch nur wenig verbreitet. Diese Arbeit gibt daher einen Überblick, wie Aquiferspeicher zur Energiewende in Deutschland beitragen können. Dazu werden die ökologischen Vorteile von ATES untersucht, Methoden für die Bestimmung potenzieller Anwendungsmöglichkeiten auf nationaler wie auf Stadtebene entwickelt und Möglichkeiten der politischen Förderung vorgestellt.

Zur Bestimmung möglicher Treibhausgaseinsparungen durch ATES wurde ein niederschwelliges parametrisiertes Lebenszyklusanalysenmodell erstellt. Es erlaubt die einfache Ökobilanzierung einer großen Bandbreite möglicher Aquiferspeicher. Im Vergleich zu konventionellen Heiz- und Kühltechnologien ergeben sich Treibhausgaseinsparungen von bis zu 74 %. Aufgrund eines zunehmend regenerativ erzeugten Stroms für den Betrieb der Aquiferspeicher ist in Zukunft mit steigenden Einsparungen zu rechnen.

Zur Nutzbarmachung dieser Treibhausgaseinsparungen sind geeignete Regionen erforderlich, in denen die hydrogeologischen und klimatischen Bedingungen einen effizienten ATES-Betrieb ermöglichen. Diese Kriterien wurden daher für die bundesweite Bestimmung des räumlich aufgelösten qualitativen ATES-Potenzials verwendet. Etwa 54 % der untersuchten Fläche Deutschlands sind gut oder sehr gut für thermische Aquiferspeicher geeignet. Diese Bereiche finden sich vornehmlich in den drei geographischen Regionen (1) Norddeutsches Becken, (2) Oberrheingraben und (3) Süddeutsches Molassebecken.

Über die qualitative Eignungsuntersuchung hinausgehend dient die Stadt Freiburg im Breisgau als exemplarisches Untersuchungsgebiet für die Entwicklung eines Ansatzes zur

Bestimmung des technischen ATES-Potenzials auf der Stadtskala. Hierzu wurden in Abhängigkeit der lokalen Grundwasserströmungsgeschwindigkeit Aquiferspeicher unterschiedlicher Konfigurationen mittels hydraulisch-thermischer 3D-Modelle simuliert. Der Vergleich der so ermittelten ATES-Leistungsdichten mit dem Heiz- und Kühlergiebedarf zeigt, dass sich bedeutende Anteile des thermischen Energiebedarfs durch ATES decken ließen. Während für die Hälfte aller Wohngebäude Heizenergiedeckungsgrade von mehr als 60 % bestimmt wurden, könnte der Kühlergiebedarf für 92 % der Gebäude sogar vollständig durch Aquiferspeicher gedeckt werden. Der entwickelte Modellierungsansatz könnte in Zukunft auch in anderen Städten eingesetzt werden, um das Potenzial von Aquiferspeichern in der kommunalen Wärmeplanung direkt zu berücksichtigen.

Abschließend zeigt unsere Studie einige Möglichkeiten der politischen Förderung thermischer Aquiferspeicher auf. Basierend auf den Ergebnissen einer breit angelegten Onlineumfrage sowie Experteninterviews wurden Empfehlungen entwickelt, wie eine geeignete ATES-Policy legislative, regulatorische und sozioökonomische Marktbarrieren überwinden kann. Diese Empfehlungen betreffen neben legislativen und regulatorischen Anpassungen unter anderem Maßnahmen zur Steigerung des Bewusstseins und dem Aufbau von Expertise bezüglich ATES sowie die potenziell bedeutsame Rolle von ATES in der Energiewende auf kommunaler Ebene.

Vortrag 4.3 (ID 209)

Herausforderungen und Lösungsansätze aus der Praxis für das Gelingen des Masterplans Geothermie in NRW

Michael Denneborg, Uwe Boester

ahu GmbH, Deutschland

Kontakt: u.boester@ahu.de

Wenn die Wärmewende in NRW gelingen soll, muss die flache Geothermie bis 400 m eine zentrale Rolle spielen. Sondenfelder bis 400 m Tiefe ($> 30 \text{ kWth}$) werden in Zukunft erheblich an Bedeutung zunehmen, weil sie die Grundlage für kalte Nahwärmenetze und die Wärme- und Kälteversorgung von größeren Gebäuden und Quartieren sein können. Davon sind im Besonderen öffentliche Einrichtungen betroffen (Schulen, Verwaltungsgebäude etc.). Um Geothermie zu nutzen, werden zwangsläufig auch durch Grundwasserentnahmen genutzte Grundwasserstockwerke durchteuft.

Die bestehende Arbeitshilfe, LANUV Arbeitsblatt 39, gibt hier nur wenig Hilfestellung, da sie zum einen für Anlagen $> 30 \text{ kWth}$ nicht gilt, zum anderen widersprüchliche Aussagen enthält und dringend einer Überarbeitung bedarf.

Die Genehmigungspraxis ist auf die wachsende Bedeutung der flachen Geothermie weder vorbereitet noch ausgerichtet. Die im Genehmigungsprozess beteiligten Stellen vertreten jeweils nach Vorgabe ihre Position und ihre internen Ziele. Eine Harmonisierung dieser Interessen zu Gunsten des übergeordneten Ziels einer klimaneutralen Energie- bzw. Wärmeversorgung findet in der Praxis oftmals nicht statt. So informiert der Geologische Dienst NRW entsprechend seiner Aufgabe zu den Grundwasservorkommen, macht darüber hinaus aber keine konkreten Aussagen zu den Risiken einer geothermischen Anlage oder dazu, welche hydrogeologischen Fragen gezielt zu untersuchen wären. Die Genehmigung der UWB orientiert sich am WHG; hier ist oftmals ein allgemeiner Besorgnisgrundsatz die Bewertungsgrundlage, der nicht oder nur sehr schwer fachlich entkräftet werden kann. Das gilt auch, wenn es für diese Besorgnis fachlich keine oder nur hypothetische Annahmen gibt. Aus Sicht des Vorsorgeprinzips ist es dann nur logisch, keine Genehmigung zu erteilen.

Diese Herangehensweise verhindert eine Nutzung der flachen Geothermie, die insbesondere für größere Gebäude oder Quartiersentwicklungen tiefere Bohrungen benötigt.

Aus der Praxis ergeben sich daher konkrete Vorschläge zur Verbesserung/Vereinfachung des Verfahrens:

- Änderung der Bewertungsgrundlage: Ersatz der Bewertungsgrundlage „nutzbares Grundwasser“ durch ein Raumkonzept mit Tabuzonen,
- Überarbeitung der Arbeitshilfe: Berücksichtigung der Anlagen > 30 kW_{th}, Fokus auf Genehmigungsfähigkeit, Anforderungen und Auflagen,
- Anforderungen an Einzelfallentscheidungen (Standorterkundung → Risikoanalyse → Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen → Monitoring und Handlungsoptionen),
- Änderungen der Zuständigkeiten.

Vortrag 4.4 (ID 227)

Numerische Simulation der Wärmetransportprozesse und der Wärmerückgewinnung für ein Hochtemperatur-Aquiferwärmespeicher-Experiment am TestUM Testfeld*Johannes Nordbeck, Jan Niklas Nordheim, Sebastian Bauer**Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Deutschland**Kontakt: sebastian.bauer@ifg.uni-kiel.de*

Aquiferwärmespeicherung (ATES, Aquifer thermal energy storage) im geologischen Untergrund kann durch bis zu saisonaler Verschiebung von Wärme dazu beitragen, die zeitliche Diskrepanz zwischen Erzeugung und Nachfrage regenerativer Energiequellen zu überbrücken. Hohe Vor- und Rücklauftemperaturen bieten dabei den Vorteil einer direkten Integration in die Wärmenetze sowie höherer Be- und Entladeraten als auch Speicherkapazitäten. Da nur wenige solcher Speicher bisher gebaut und betrieben wurden, fehlen noch Betriebserfahrungen und verlässliche Kenntnisse der im Untergrund induzierten Temperaturveränderungen. Der am Feldstandort TestUM durchgeführte zyklische Hochtemperatur-ATES-Versuch bietet daher eine Grundlage zur Charakterisierung und Verifizierung des hydraulischen und thermischen Prozessverständnisses. Dazu wurde über einen Zeitraum von einem Jahr Speicherzyklen unter Nutzung einer Brunnendoublette nachgestellt und mit mehr als 500 Temperatursensoren überwacht, die ein zeitlich und räumlich hochaufgelöstes Temperaturfeld ergeben.

Basierend auf hydrogeologischen Erkundungen des Standorts wurde ein numerisches Prozessmodell entwickelt, welches Grundwasserströmung und Wärmetransportprozesse simuliert. Die Modellergebnisse zeigen generell eine gute bis sehr gute Übereinstimmung der modellierten mit den experimentell bestimmten Temperaturen, sowohl was die Rücklauf-temperatur der Brunnendoublette als auch die Aquifertemperaturen betrifft. Die Temperaturverteilung nahe dem Injektionsbrunnen ist stark von induzierter vertikaler Konvektion beeinflusst, die durch die starken Temperaturgradienten angetrieben wird, wohingegen die gesamte Temperaturverteilung eher durch horizontale als auch vertikale Wärmeverluste bestimmt wird. Die gemessenen Rücklauftemperaturen konnten nach einer Anpassung der vertikalen hydraulischen Permeabilität gut nachvollzogen und so eine stimmige Wärmebilanz der Injektions- und Extraktionszyklen erreicht werden. Ebenso konnten die experimentell beobachteten Zykleneffekte wie zunehmende thermische Rückgewinnung mit steigender Zyklenzahl und abnehmende thermische Rückgewinnung mit längerer Verweildauer im Aquifer gut nachvollzogen werden. Dieses Ergebnis zeigt, dass das im Modell hinterlegte quantitative Prozessverständnis in Kombination mit der Standorterkundung ausreichend und geeignet ist, um den Betrieb einer HT-ATES- Anlage vorherzusagen und

zu optimieren als auch die im Untergrund induzierte Temperaturverteilung zu prognostizieren.

Vortrag 4.5 (ID 250)

A new life for underground mines: opportunity for thermal energy storage (MineATES)"

Alireza Arab¹, Martin Binder^{1,2}, Christian Engelmann¹, Traugott Scheytt¹

¹: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Germany, Chair of Hydrogeology and Hydrochemistry, 09599 Freiberg (Saxony), Germany

*²: University of Basel, Hydrogeology / Applied and Environmental Geology, 4056 Basel, Switzerland
Kontakt: araba@geo.tu-freiberg.de*

Thermal Energy Storage (TES) has gained importance as a viable solution for storing surplus heat and cold underground. While conventional TES systems predominantly utilize natural aquifers, an alternative approach, referred to as "Mine Thermal Energy Storage" (MTES), has gained increasing attention for its utilization of former underground mines.

Despite the promise of TES, both in Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) and MTES, several operational challenges persist, such as clogging, scaling, corrosion, and energy loss across the system boundaries. The operational challenges not only impact the geological matrix but also affect the integrity of technical infrastructure components like pipes and heat exchangers.

The BMBF-funded research "MineATES," investigates the feasibility and limitations of employing water-filled cavities in underground mines for TES. The study primarily focuses on the "Reiche Zeche" silver mine, designated as a teaching and research site at the TU Bergakademie Freiberg in Freiberg, Germany where an in-situ "real-laboratory" is established. The purpose is to simulate the periodically varying heat exchange between mine water - here stored in an experimental basin and slowly flowed through with acid precipitation water (pH ~ 2 - 3) - and the surrounding Freiberg Gneiss rock. Comprehensive monitoring of hydrochemical parameters and molecular biological analyses complement multiple heating and cooling cycles within the mine. Furthermore, laboratory-scale column flow experiments and batch reactor tests mimic TES cycles, heating columns up to 60 °C and cooling them down to 10 °C. Comparative investigations include rock material and mine water from two other mines in Saxony, namely a former tin ore mine in Ehrenfriedersdorf and a former hard coal mine in Lugau/Oelsnitz.

The overarching goal of all experiments is to ascertain the nature, extent, and location of potential chemical alterations during TES operations.

Vortrag 4.6 (ID 256)

Mitteltiefer Geostar - Eine skalierbare Wärmequelle für Ballungsgebiete

Nora Koltzer, Jan Niederau, Marcel Halm, Ulrich Steiner, Florian Wellmann, Dirk Boernecke

Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG

Kontakt: jan.niederau@ieg.fraunhofer.de

Wärmebedarf und geothermische „Hot Spots“ liegen in Deutschland selten übereinander. Daher müssen innovative Konzepte entwickelt werden, um in Regionen hoher Wärme- und Energiebedarfe geothermische Energie bereitzustellen, auch wenn geologisches Potenzial für offene geothermische Systeme nicht gegeben ist. Dabei müssen die Bohrverfahren und der Anlagenbau wirtschaftlich konkurrenzfähig und in platzbeschränkten Ballungsgebieten einsetzbar sein. Eine Lösung für flache Geothermie bildet der bereits in Bochum eingesetzte flache Geostar. Dort wurden von einem Bohrplatz schräge sternförmig radialsymmetrisch angeordnete Bohrungen abgeteuft und als Erdwärmesondenfeld ausgebaut (siehe Abbildung). Wir präsentieren thermohydraulische Simulationsergebnisse, inwieweit dieses Anlagenkonzept skalierbar ist und in größere Tiefen (bis zu 1.5 km) umgesetzt werden kann. In einer Sensitivitätsstudie werden Parameter wie Einfallswinkel oder unterschiedlicher Ausbau der Geostar-Erdwärmesonden untersucht. Auch wird eruiert, wie der Betrieb eines Geostar abhängig von geologischen Randbedingungen (z. B. regionaler Grundwasserfluss) optimiert werden und zu einem wirtschaftlich attraktiven Anlagenkonzept umgesetzt werden.

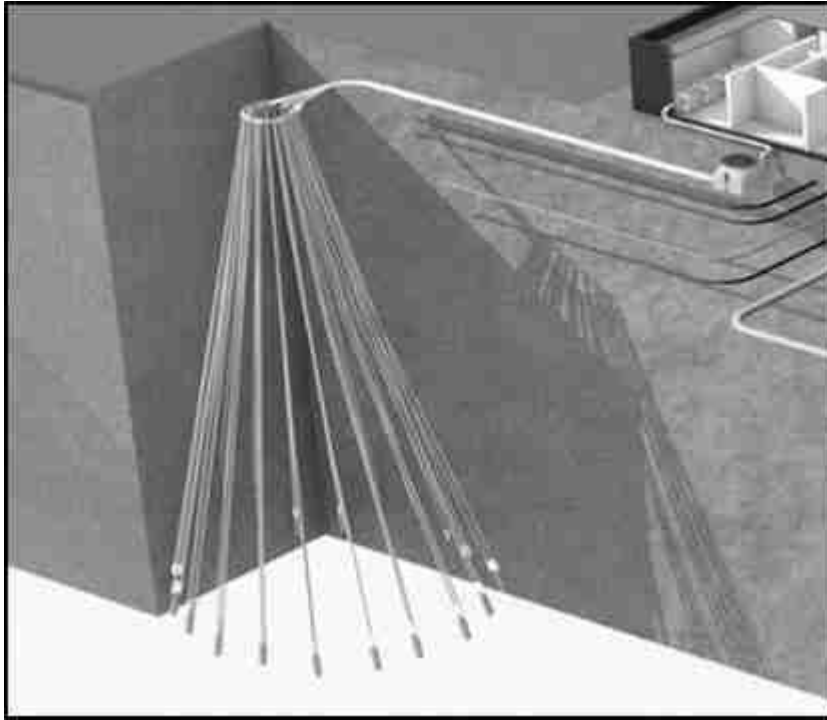


Abb. 1: Geostar.

Vortrag 4.7 (ID 274)

Unsicherheitsquantifizierung geothermischer Reservoirs: Das 3D-thermohydraulische numerische Modell des Oberjura-Reservoirs (Großraum München) für die Tiefengeothermie-Fernwärme

Carlos Andres Rivera Villarreyes¹, Ernesto Meneses Rioseco²

¹: DHI WASY GmbH, Germany;

²: Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG)

Kontakt: cvi@dhigroup.com

Die Stadtwerke München (SWM) haben sich zum Ziel gesetzt, den Wärmebedarf der Stadt München bis spätestens 2040 durch CO₂-neutrale Fernwärme zu decken. Dies soll zum großen Teil mithilfe tiefer Geothermie umgesetzt werden. Im Großraum München wurden bereits mehrere Anlagen installiert und weitere sind im Stadtgebiet München geplant.

Um das geothermische Potenzial zu verstehen, wurde ein 3D-Finite-Elemente-Modell mit FEFLOW entwickelt. Dazu wird sowohl auf ein bereits existierendes numerisches Modell

für den Großraum München zurückgegriffen als auch eine neue Interpretation der 3D Strukturgeologie verwendet. Der neue Strukturdatensatz ist Ergebnis einer kürzlich erfolgten Datenerhebung mittels einer seismischen Untersuchung im Stadtgebiet von München im Rahmen des Untersuchungsprogramms GRAME (Südlicher Raum München). Das neue numerische Modell wird validiert und anschließend für Vorhersagen für implementierte hypothetische neue geothermische Anlagen genutzt.

Die möglichst genaue Abbildung der Stratigraphie und des komplexen Störungszonen-Netzwerks werden über die Generierung eines neuen 3D unstrukturierten Finite Elemente Netzes in FEFLOW® erreicht. Mit dem regionalen Datensatz wurde ein neuer Algorithmus (Geode-solutions) zur Korrektur geometrischer Abweichungen und zur Neuvernetzung getestet. Dabei konnte die Schwierigkeit der optimalen Diskretisierung bezüglich Elementanzahl und ausreichender Abbildung der Materialparameter gelöst werden. Die Validierung erfolgt mittels Vergleichs der beiden Modelle in Temperatur- und Druckverteilung. Mit dem neuen 3D Modell wird eine Szenarioanalyse durchgeführt, bei der 12 neue geothermische Brunnen mit unterschiedlichen Förderraten in der GRAME Region getestet werden.

Die Ergebnisse der Szenarioanalyse zeigen, dass ein thermischer Durchbruch durch geeignete Positionierung der neuen geothermischen Bohrungen vermieden werden kann. Zusätzlich wirken sie der, durch bereits bestehende Anlagen im Außenbereich hervorgerufenen, starken Ausprägung der hydraulischen Druckhöhe entgegen.

Eine Kombination aus den zwei vorteilhaftesten Szenarien wird gewählt, um eine Unsicherheitsanalyse der Modellergebnisse mithilfe des in PESTPP implementierten Iterative Ensemble Smoothers (IES) durchzuführen. Bei der Quantifizierung der Unsicherheit mit PESTPP-IES, wird mit 120 erzeugten Werteverteilungen, der Einfluss der hydraulischen und thermischen Eigenschaften des Reservoirs auf die endgültigen Temperaturvorhersagen bewertet. Nach Inbetriebnahme der neu implementierten geothermischen Anlagen werden Temperaturveränderungen von nur wenigen Grad festgestellt. Dies geschieht trotz der Umsetzung eines breiten Spektrums von Reservoirseigenschaften bei den 120 zufällig generierten Realisierungen. Auch hier kann ein thermischer Durchbruch ausgeschlossen werden.

Diese Studie ist ein erster Meilenstein, der den Einsatz fortschrittlicher tetraedrischer 3D Vernetzungstechniken und die Quantifizierung von Unsicherheiten im Zusammenhang mit tiefer Geothermie im süddeutschen Molassebecken umfasst. Die in dieser Studie angewandte Methodik wurde erfolgreich validiert und kann daher für zukünftige Machbarkeitsstudien von tiefen geothermischen Anlagen im Großraum München empfohlen werden.

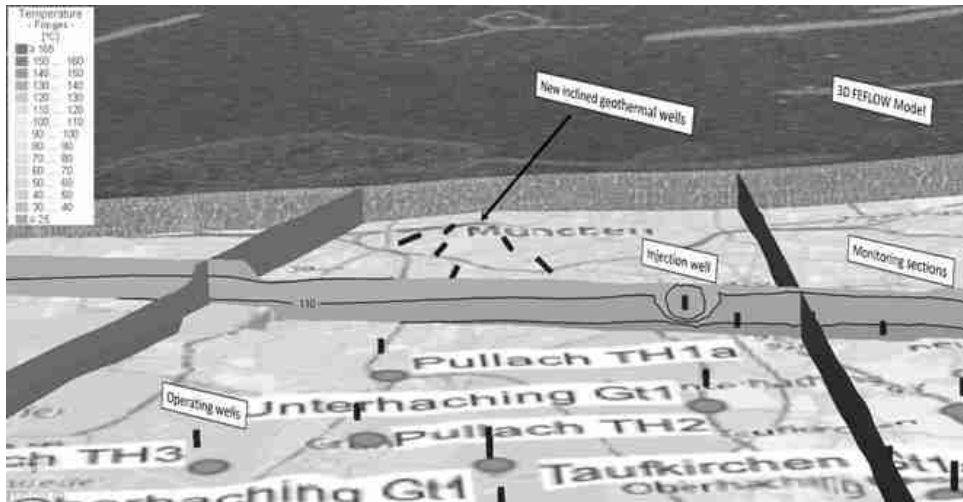


Abb. 1: Großraum München: Profilschnitte und Lage der geothermischen Bohrungen.

Vortrag 4.8 (ID 275)

Hydrogeologie und geothermische Nutzung der Grubenwässer der Grube Mercur in Bad Ems, Rheinisches Schiefergebirge

Georg Wieber¹, Peter Quensel¹, Stefan Pohl²

¹: Uni Mainz, Deutschland

²: Geoconsult Pohl

Kontakt: wieber@uni-mainz.de

Die Kurstadt Bad Ems an der Lahn ist bekannt für die Emser Thermen und die gleichnamigen Pastillen. In nur ca. 800 m Luftlinie von den Thermen entfernt ging in Bad Ems auch ein bedeutender Buntmetallerzbergbau um. Auf den Tiefbausohlen der Grube Mercur kam es während der Betriebsphase zu erheblichen Zutritten von Thermalwässern. Nach Flutung der Tiefbausohlen treten über den Tiefen Stollen temperierte Grubenwässer (25 °C) mit einer durchschnittlichen Schüttung von 35 l/s aus. Die Grube Mercur setzt sich aus 4 Abteilungen zusammen, die früher eigenständig betrieben wurden. Verbindungen bestehen über die VI. und die XVI. Tiefbausohle. Die Grubenwasserhydraulik ist äußerst komplex. Eine geothermische Nutzung findet über Rohrwärmetauscher im Tiefen Stollen der Abteilung Neuhoftung statt. Vorgesehen ist außerdem die Versorgung eines weiteren Wohngebietes über die Schächte der Abteilung Pfingstwiese. Zur Untersuchung der Nutzungsmöglichkeiten wurden intensive geochemische und geophysikalische Untersuchungen in den Schächten der Verbundgrube durchgeführt. Dabei konnten unterschiedliche

Beschaffenheiten der Grubenwässer in den Schächten und Modelle des Wärmeflusses aufgestellt werden.

Vortrag 4.9 (ID 281)

Gekoppelte Wärme- und Salztracereperimente am Testfeld Krauthausen

Andreas Englert¹, Hannah Gebhardt¹, David Hoffmann¹, Anja Klotzsche², Peter Bayer¹

¹: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Deutschland

²: Forschungszentrum Jülich GmbH, Deutschland

Kontakt: andreas.englert@geo.uni-halle.de

Zur Optimierung von geothermischen Anlagen oder zur Wärmespeicherung in Grundwasserleitern ist das genaue Verständnis von Wärmetransport im Grundwasser von entscheidender Bedeutung. Hierbei wird meist angenommen, dass sich die Gesteinsmatrix im thermischen Gleichgewicht mit dem Grundwasser befindet. Zur Überprüfung der Gültigkeit dieser Annahme für den Wärmetransport in einem Porengrundwasserleiter wurden am Testfeld Krauthausen gekoppelte Wärme- und Salztracereperimente durchgeführt.

Zur Injektion der Wärme wurde jeweils aus einer entfernten Messstelle Grundwasser gefördert und zu einem Wärmeübertrager geleitet. Letzterer wurde in einem Heißwasserkreislauf so gesteuert, dass es möglich wurde, nahezu konstant 40 °C heißes Wasser für die Injektion bereitzustellen. Als Salztracer wurde dem heißen Wasser über eine Dosierpumpe eine 34%-ige Calciumchloridlösung so beigemischt, dass die elektrische Leitfähigkeit des Injektionswassers konstant auf das Zehnfache erhöht war. Die Experimente wurden in einer Dipolkonfiguration durchgeführt: an der Injektions- und Extraktionsstelle wurden identische Volumenströme eingestellt und das extrahierte Grundwasser in einen Graben abgeleitet.

Im Rahmen von zwei Feldkampagnen im Sommer 2023 wurden vier gekoppelte Wärme- und Salztracereperimente durchgeführt. Hierbei wurden jeweils verschiedene Dipolkonfigurationen untersucht. Die Entfernungen zwischen Injektion und Extraktion betrugen 2,5 m, 5 m, 10 m und 20 m. Zu Anfang jedes Experiments wurde eine stationäre hydraulische Dipolkonfiguration hergestellt und daraufhin die Beaufschlagung des Injektionswassers mit Wärme und Salz gestartet. Je nach Abstand zwischen Injektion und Extraktion dauerte die Injektion 2,5 h, 5 h, 10 h und 20 h mit einer nachfolgenden Kaltwasserführung für 1 d, 2 d, 6 d, 10 d. Temperatur, Volumenstrom und Leitfähigkeit des Injektions- und Extraktionswassers wurde geloggt. Während der Experimente kamen zudem jeweils bis zu

80 Temperaturlogger, 15 Drucklogger und zwei elektrische Leitfähigkeitslogger zum Einsatz, um mit hoher zeitlich-räumlicher Auflösung die Bedingungen an Injektions-, Extraktionsbrunnen und umgebenden Grundwassermessstellen zu beobachten. Die beiden größerskaligen Experimente wurden durch tägliche Bohrloch-Bohrloch Georadarmessungen ergänzt, um auch Informationen über den Raum zwischen den Beobachtungsbohrungen zu erhalten.

Die Experimente zeigen, dass die neu entwickelte Injektionsanlage sowohl eine konstante Zufuhr von Wärme und Salz als auch den Beginn und das Ende der Injektion als ausgeprägten Step-Impuls ermöglicht. Um den täglichen Bohrloch-Bohrloch Georadarmessungen in den Grundwassermessstellen Platz zu schaffen, wurden elektrische Leitfähigkeits- und Temperaturlogger für 2 h entfernt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich nach dem Wiedereinsetzen der Logger noch für ca. 2 h die Vermischungseffekte der Georadarmessungen zeigen, danach aber wieder belastbare Temperaturen und elektrische Leitfähigkeiten gemessen werden. Nur bei starken vertikalen Temperaturgradienten lässt sich freie Konvektion in den Grundwassermessstellen selbst feststellen. Die bei allen vier Experimenten erreichte Datendichte in Raum und Zeit ist vielversprechend, um im Rahmen der anstehenden Auswertung einen detaillierten Einblick in Wärmetransportprozesse in Porengrundwasserleitern zu erhalten.

Vortrag 4.10 (ID 334)

The influence of temperature on migration of fines: implications for design flowrates of HT-ATES systems.

Martin van der Schans^{1,2}, Noor van Eimeren³, Bloemendal, Martin⁴

¹: Delft University of Technology

²: KWR Water Research Institute

³: RHDHV

⁴: Delft University of Technology

Kontakt: martin.van.der.schans@kwrwater.nl

Groundwater wells are used for storage and recovery of heat in aquifers for renewable space heating and cooling. Due to the large capital expenditures for well construction, the maximum flowrate is an important design criterium for such aquifer thermal energy storage (ATES) systems. These flowrates are in practice often restricted by constraints to the borehole entrance velocity, such as the design rules proposed by Sichardt (1928) and Huisman (1972). Such constraints limit the entrainment of fine grains from the formation and reduce clogging risks and curb turbulent losses.

However, these design criteria are based on experience with groundwater wells in ambient temperatures of around 10 °C (in the Netherlands). The water temperature in ATES systems commonly ranges up to 25 °C, and more recently for large scale heat storage even from 40 – 90 °C (HT-ATES). Hence, the warm stored groundwater has a much lower viscosity than ambient groundwater. As a result, the higher temperatures limit shear stress on fines and thus their migration from the formation to the extraction well and into the injection well. While at the same time, the higher temperatures also result in more electrostatic repulsion between colloids and the soil matrix. This study explores to what extent raising the groundwater temperature affects the mobilization and attachment of individual colloids at different flow rates. This is done using computations of the torque balance and simulations with a scale model (laboratory experiment). The possible implications for the maximum permissible flowrates at the borehole wall as design criteria in order to prevent clogging of HT-ATES wells are presented.

Vortrag 4.11 (ID 337)

Die Observations- und Erdwärmesondenbohrungen RWE EB1 und EB2 auf dem Weisweiler Horst der Niederrheinischen Bucht

Alexander Jüstel^{1,2}, Adam Jones^{1,3}, Lea Grummel¹, Frank Strozyk¹, Laura Delzig⁴, Erik Richter⁴, Dirk Gnodtke⁴, Thomas Reinsch⁴, Becker Stephan⁵, Martin Salamon⁵ Thomas Oswald⁶

¹: Fraunhofer IEG, Fraunhofer Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG, Kockerellstraße 17, 52062 Aachen, Deutschland

²: Lehrstuhl für Geologie und Paläontologie und Geologisches Institut, RWTH Aachen University, Wüllnerstraße 2, 52062 Aachen, Deutschland

³: Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, RWTH Aachen University, Lochnerstraße 4-20, 52056 Aachen, Deutschland

⁴: Fraunhofer IEG, Fraunhofer Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG, Am Hochschulcampus 1, 44801 Bochum, Deutschland

⁵: Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, De-Greiff-Straße 195, 47803 Krefeld, Deutschland

⁶: RWE Power AG, Stüttgenweg 2, 50935 Köln, Deutschland

Kontakt: alexander.juestel@ieg.fraunhofer.de

Im Rahmen des Strukturwandels im Rheinischen Revier werden aufgrund der Abschaltung des Kohlekraftwerkes in Weisweiler im Jahre 2029 zunehmend Alternativen für die kommunale Wärmeversorgung gesucht. Hierbei könnte die mitteltiefe (ab 400 m) und tiefe Geothermie (ab 1500 m) eine wichtige Rolle einnehmen, um einzelne Gebäude bis hin zu ganzen Quartieren und Stadtteilen mit regenerativer Wärme zu versorgen. Im Rahmen der

Erkundung von mitteltiefer und tiefer Geothermie im Raum Weisweiler und des Aufbaus eines Forschungsstandortes der Fraunhofer IEG auf dem Kraftwerksgelände Weisweiler wurde vom Bohrbetrieb der RWE Power AG bereits eine erste 100 m tiefe Erkundungsbohrung im Oktober 2023 angrenzend an den dortigen Tiefbohrungsbohrplatz abgeteuft. Die Bohrung wurde durch den Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen und durch die Fraunhofer IEG wissenschaftlich begleitet und in den darauffolgenden Monaten ausgewertet. Mit Fertigstellung wird sie durch die Fraunhofer IEG zum Untergrundobservatorium ausgebaut und Teil eines seismologischen Netzwerks, das dem Monitoring aller Untergrundaktivitäten am Standort und in der Region dient. Bei der Bohrung wurde in einer Tiefe von etwa 70 m das Oberkarbon der Inde Mulde erreicht, sodass ein Glasfaserkabel für das Aufzeichnen von natürlicher Seismizität im Festgestein installiert werden konnte. Im Januar und Februar 2024 wird die Bohrabteilung der RWE Power AG eine weitere, ca. 500 m tiefe Erkundungsbohrung auf demselben Gelände abgeteuft haben. Anschließend soll diese zu einer mitteltiefen Erdwärmesonde ausgebaut werden, um die späteren Gebäude am Forschungsstandort der Fraunhofer IEG über eine Wärmepumpe mit Wärme zu versorgen. Bei dieser zweiten Bohrung wird das Grundgebirge in einer ähnlichen Tiefe wie bei der vorherigen Bohrung erwartet. Aufgrund der größeren Tiefe und des erweiterten geophysikalischen Loggings werden dabei neue Erkenntnisse auch über die Stratigraphie und die Strukturen des Weisweiler Horstes erwartet. Die wissenschaftliche Betreuung auch dieser Bohrung wird durch den Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen und durch die Fraunhofer IEG gewährleistet. Die Loggingarbeiten werden von der DMT GmbH & Co. KG durchgeführt. Die Ergebnisse der beiden Bohrungen werden anschließend mit denen der 1,5 km weiter östlich gelegenen Bohrung „Frenzer Staffel-1“ aus dem Jahre 1985 verglichen. Beide neu abgeteufte Bohrungen liefern somit wichtige Informationen sowohl über den Aufbau der Niederrheinischen Bucht im Bereich des Weisweiler Horstes und die Strukturen der Inde Mulde als auch über die Gesteinseigenschaften der durchteuften Lithologien. Sie runden damit das 2018 initiierte INTERREG Projekt DGE-ROLLOUT ab und liefern wichtige Informationen für Folgeprojekte und die Planung einer Tiefbohrung am Kraftwerksstandort in Weisweiler. Diese soll die Strukturen und geothermalen Potenziale bis in eine Tiefe von mehreren tausend Metern erschließen.



Abb. 1: Kohlekraftwerk Weisweiler (Quelle: RWE Power AG, Guido Steffen)

Poster 4.1 (ID 204)

Thermische Auswirkungen großskaliger, geschlossener, saisonaler Kies-Wasser-Speicher

Christoph Bott¹, Maximilian Noethen¹, Abdulrahman Dahash², Peter Bayer¹

¹: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften und Geographie, Angewandte Geologie, 06120 Halle (Saale)

²: AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Center for Energy, Sustainable Thermal Energy Systems, 1210 Wien

Kontakt: Christoph.Bott@geo.uni-halle.de

Saisonale thermische Energiespeicher sind ein zentrales Element der Energiewende, um Quartiere effizient mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien zu versorgen. Neben den geologischen Anwendungen der Aquifer- und Erdwärmesondenspeicher bieten sich auch geschlossene Beckenanlagen zur Umsetzung an. Gefüllt mit einer wassergesättigten Kiesmatrix und betrieben über einen indirekten Wärmeübertrager wurden solche Kies-Wasser-Speicher als zentrale Komponente in innovativen Energiesystemen bereits implementiert, erwiesen sich aufgrund ihrer Bauwerkskomplexität jedoch als nicht wirtschaftlich genug. Folglich ist ein neuer Ansatz eine Kostenreduktion durch Nachnutzung bereits vorhandener Beckenstrukturen bei möglichst geringen Aufwendungen für die Dämmung. Dies führt allerdings zu möglicherweise erheblichen Wärmeverlusten in das umgebende Erdreich.

Schwerpunkt unseres Beitrags ist, die technischen Auswirkungen von Wärmeverlusten auf den Speicher (z. B. Energiebilanz, Speichereffizienz) und die Umweltauswirkungen des Speicherbauwerks (z. B. Temperaturbedingungen im Nahfeld) zu untersuchen. Gerade im Fall signifikanter Grundwasserströmung kann die resultierende Fahne im Abstrom bedeutsam sein und empfohlene Temperaturgrenzwerte überschreiten. Zugleich bieten die bewusst erlaubten Wechselwirkungen zwischen Speicher und Umgebung die Möglichkeit, das unmittelbare Erdreich als zusätzliches Speichervolumen zu aktivieren. Mittels eines neu entwickelten, individuell angepassten Co-Simulation-Tools (MATLAB/Simulink – COMSOL) untersucht und quantifiziert dieser Beitrag die thermischen Auswirkungen saisonaler Kies-Wasser-Speicher unter verschiedenen Speicher- und Umweltbedingungen. Ausgehend von einem Referenz-Szenario zeigen wir die Effekte diverser hydrogeologischer und technischer Einflussparameter (u. a. Grundwasserfließgeschwindigkeit, Isolationsmächtigkeit). Weiterhin lassen sich durch unsere Parameterstudie grundlegende Folgen für die Umwelt und die Energiebereitstellung im angebundenen Energiesystem ableiten. Eine Analyse der Energieflüsse offenbart dabei die intensivierte geothermische Nutzung des Untergrundes und gegebenenfalls zusätzliches Speicherpotenzial. Letztlich lassen sich Optimierungsansätze als Empfehlungen für den Planungsprozess identifizieren, um künftig effiziente, ökologisch und ökonomisch robuste Lösungen implementieren zu können.

Poster 4.2 (ID 147)

Digital methods for the planning and construction of geothermal plants

Holger Kaiser

BAUER Resources GmbH, Deutschland

Kontakt: holger.kaiser@bauer.de

Use of building information modelling (BIM) in planning of geothermal plants brings more efficiency. Planning can be automated. Visualizations are generated directly from the 3D planing. Optimal integrating in planing of the building. 3D modeling is input for partly autonomous excavators.

Use of drones and lidar sensors in mobile devices help planning and doing the earthwork. Volumes of trenches and pits as well as heaps of earth are calculated more accurate.

Protocols are written with apps. Mobile devices are used for augment reality of the planed pipework. As built models are generated with cameras of mobile devices.

IoT is used for pressure measuring and pressure monitoring.

All captured data on site can be used for transparent documentation and error detection.

Poster 4.3 (ID 249)

Das Mobilisierungspotenzial von Schadstoffen bei der Nutzung von Steinkohlezechen als saisonale Wärmespeicher*Laura Blaes^{1,2}, Thomas Heinze¹, Tobias Licha¹*¹: Ruhr-Universität Bochum;²: Ministerium für Umwelt, Klima, Mobilität, Agrar und Verbraucherschutz Saarland

Kontakt: L.Blaes@umwelt.saarland.de

Die Erschließung erneuerbarer Energien und die nachhaltige Nutzung von Georeservoiren zeigt sich auch durch ein steigendes Interesse an Grubenwassernutzung. In den dicht besiedelten Gebieten der ehemaligen Steinkohleregionen bieten geflutete Grubengebäude auf Grund ihrer anisotropen hydraulischen Wegsamkeiten und den vorhandenen wärmeübertragenden Flächen eine gute Möglichkeit für die saisonale Wärmespeicherung (Aquifer Thermal Energy Storage ATES). Neben den generellen Risiken, die bei einer Bergbaunachnutzung überwacht werden, muss hier auch das Gefährdungspotenzial durch diese Geotechnik neu mobilisierten Schadstoffe untersucht werden. In der Steinkohle sind natürliche Schadstoffe, etwa Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und NSO-Heterozyklen vorhanden, welche auch in den Grubenwässern nachgewiesen wurden. Hinzu kommen mögliche Belastungen durch verwendete und eingebrachte Betriebs- und Baustoffe, wie krebserregende polychlorierte Biphenyle oder Hydrauliköle. Durch die Verwendung der Steinkohlezechen als Grubenwärmespeicher werden diese deutlich erwärmt (bis zu 80 °C) und Schadstoffe können vermehrt im Grubenwasser gelöst werden. Zum heutigen Zeitpunkt liegen keine Erkenntnisse zum Mobilisierungspotenzial dieser Stoffe aus Steinkohlezechen bei unterschiedlichen Temperaturen vor.

Erste systematische Durchflussversuche an mit unterschiedlichen Kohletypen gefüllten Säulen bei verschiedenen Temperaturen zeigen, dass die Schadstoffmobilisierung nach einem first flush primär durch die Diffusion an der Phasengrenze dominiert wird. Der first flush ist insbesondere für die leichteren PAKs dominant. PAKs mit größerer Masse sind schwerer löslich und daher ist die maximale Konzentration im first flush nur geringfügig größer als bei der diffusionsgesteuerten Austragung. Zudem lassen sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Kohletypen und den mobilisierten PAKs erkennen. Die Mobilisierung verläuft annähernd exponentiell zur Temperatur und das Modell nach Worch liefert eine adäquate Beschreibung des Diffusionskoeffizienten.

Die mobilisierbare Konzentration ist nach ersten Erkenntnissen unabhängig von der Gesamtkonzentration der spezifischen PAK in der Kohle, sondern abhängig vom löslichen organischen Anteil in der Kohle. Diese Fraktion ist in Steinkohlen geringeren Inkohlungsgrades stärker vertreten, wodurch sich in diesen Kohlen mehr krebserregende PAK und

NSO Heterozyklen lösen, obwohl schwere PAK einen geringeren Gehalt in dieser Kohle haben als in Steinkohlen mit sehr hohen Inkohlungsgraden. Die Präsenz der Schadstoffe in Kohlen verläuft damit umgekehrt zu ihrem tatsächlichen Lösungspotenzial.

Je nach Betriebsart und Design der ATES-Anlage in Kohlezechen entsteht durch die Lösung der PAKs eine erhöhte Kontaminationsgefahr. Dies betrifft Arbeiten an den obertägigen Anlagen aber auch die Möglichkeit einer Eintragung der Schadstoffe in oberflächennahe Grundwasserleiter. In ATES-Anlagen mit zirkulierendem Grubenwasser besteht die Möglichkeit einer Aufkonzentration der Schadstoffe bis zur Sättigungskonzentration in Abhängigkeit vom noch vorhandenen Kohlevorkommen und der Betriebstemperatur. Bei geringerem Kohlevorkommen könnte der Kohletyp daher eine wichtige Rolle für das Gefährdungspotenzial spielen. Die Entwicklung passender Monitoringsysteme und die Untersuchung schadstoffabbauender mikrobieller Aktivität sind daher wesentlich für einen sicheren und nachhaltigen Betrieb von ATES-Anlagen in Steinkohlezechen.

Poster 4.4 (ID 251)

Grubenwasser als übersaisonales Speichermedium für Wärmeenergie – Ein in-Situ-Reallabor für zyklische Ein- und Ausspeicherungen von Kälte und Wärme.

Martin Binder^{1,2}, Alireza Arab¹, Christian Engelmann¹, Chaofan Chen^{3,4}, Lukas Oppelt⁵, Thomas Nagel^{3,4}, Thomas Grab⁵, Traugott Scheytt¹

¹: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Hydrogeologie und Hydrochemie, 09599 Freiberg (Sachsen), Deutschland

²: Universität Basel, Hydrogeologie / Angewandte und Umweltgeologie, 4056 Basel, Schweiz

³: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Bodenmechanik und Grundbau, 09599 Freiberg (Sachsen), Deutschland

⁴: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Umweltinformatik, 04318 Leipzig, Deutschland

⁵: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Technische Thermodynamik, 09599 Freiberg (Sachsen), Deutschland

Kontakt: martin.binder@geo.tu-freiberg.de

Die übersaisonale Speicherung überschüssiger Wärme und Kälte im Untergrund gilt als vielversprechende Antwort auf die Herausforderungen der Energie- und Wärmewende. Als Speichermedium nutzen die meisten thermischen Energiespeicherungssysteme (TES-Systeme) natürliche, i. d. R. poröse Grundwasserleiter im Rahmen des sogenannten „Aquifer Thermal Energy Storage“ (ATES). In letzter Zeit gewinnt die Energiespeicherung in gefluteten unterirdischen Bergwerken, bekannt als „Mine Thermal Energy Storage“ (MTES), aber ebenfalls verstärkt an Aufmerksamkeit. Dies ist nicht zuletzt auch auf die bisherigen

Erfolge bei der Nutzung von Grubenwässern für reine Heiz- oder Kühlzwecke zurückzuführen.

Ähnlich wie bei ATES-Systemen stehen MTES-Systeme vor einer Reihe (planungs-)technischer Herausforderungen. Viele geflutete Grubenbaue werden aktiv entwässert und weisen ausgeprägte Strömungen auf, insbesondere (aber nicht nur) in den Hauptstollen und -gängen. Der ungewollte Abtransport eingespeicherter Wärme oder Kälte aus dem ursprünglichen Bereich der Eingabe, sei es durch Konvektion oder Konduktion, führt letztlich zu reduzierten Rückgewinnungsraten und zu einer suboptimalen Effizienz. Die Nutzung räumlich begrenzter und hydraulisch weitgehend isolierter Abschnitte in den Grubenbauen kann eine Lösung für diese technische Herausforderung darstellen.

Im Rahmen des BMBF-geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekts „MineATES“ werden – in diesem Kontext – eine Vielzahl an experimentellen Untersuchungen in einem In-Situ-Reallabor im ehemaligen Silberbergwerk „Reiche Zeche (Himmelfahrt Fundgrube)“ der TU Bergakademie Freiberg in Deutschland durchgeführt (Abb. 1a). Der Forschungsschwerpunkt des dortigen Reallabors liegt auf der kontrollierten Simulation periodisch variierender Wärmetransfers zwischen Grubenwasser und dem umgebenden Gestein unter Berücksichtigung von Verlusten aufgrund von Konvektion und Konduktion.

Zu diesem Zweck wurde ein teilgefluteter Bereich im Nordfeld der ersten Sohle ausgewählt (Abb. 1b). Es handelt sich um ein annähernd quaderförmiges Versuchsbecken mit einem Fassungsvermögen von etwa 21 Kubikmetern, welches langsam von saurem Niederschlagswasser ($\text{pH} \sim 2 - 3$) durchströmt wird. Die vorherrschende geologische Formation in diesem Bereich ist der Freiburger Gneiss, welcher deutliche Klüfte aufweist. Wärmeverluste über die Systemgrenzen sind daher zu erwarten, werden aber in experimentell beherrschbaren Größenordnungen liegen.

Um die Reduzierung der Effizienzzraten aufgrund dieser Wärmeverluste systematisch zu untersuchen und zu quantifizieren, werden mehrwöchige Kühl- und Heizzyklen unter Verwendung einer mobilen Wärmeübertrager-Anlage durchgeführt. Im Vorfeld dieser Ein- und Ausspeicherungsversuche wurde die unmittelbare Umgebung des Versuchsbeckens bereits mit einem umfangreichen thermischen Monitoringsystem ausgestattet. Dafür wurden u. a. über 90 Temperatursensoren in verschiedenen Abständen zur Beckenwand eingegossen, teilweise bis zu 2 Meter tief und verteilt auf insgesamt 18 Bohrlöcher.

Parallel dazu wird ein numerisches Modell entwickelt, um den Wärmetransport unter Berücksichtigung der vorhandenen Strömungen und Klüfte im Bereich des Versuchsbeckens nachzubilden. Um diese Modelle gezielt parametrisieren zu können, werden die Strömungsbedingungen durch Markierungsversuche untersucht.

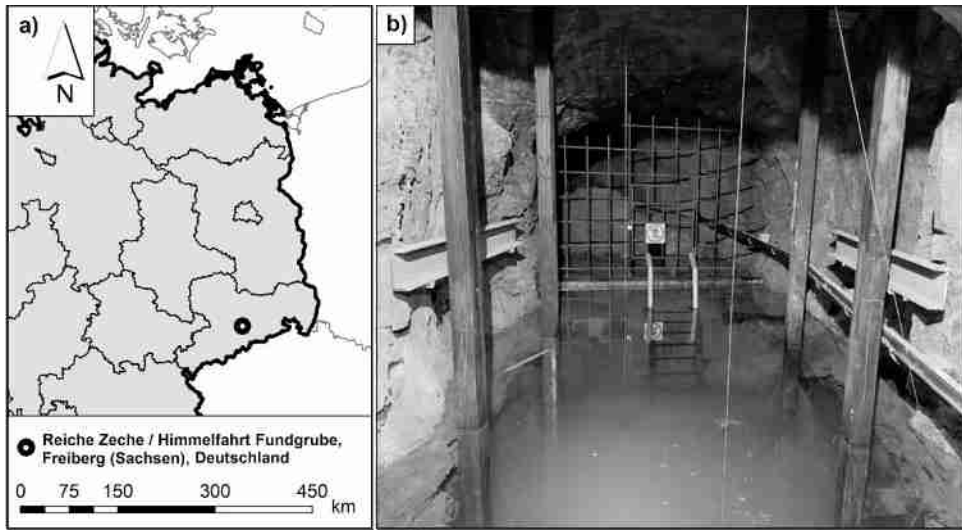


Abb. 1: In-Situ-Reallabor in der Reichen Zeche / Himmelfahrt Fundgrube, Freiberg - a) Lage der Reichen Zeche; b) Versuchsbecken im natürlichen Zustand.

Poster 4.5 (ID 310)

Modellierung des Potenzials zur Lithium-Gewinnung aus Tiefen-Geothermie am Oberrhein

Ulrich Maier¹, Bettina Wiegand¹, Iulia Ghergut¹, Martin Sauter²

¹: Universität Göttingen, Deutschland

²: Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG)

Kontakt: umaier@gwdg.de

Aufgrund der steigenden Nachfrage nach Lithium als Energiespeicher - vor allem für mobile Anwendungen - ist die Nutzung von Tiefenwässern als Nebenprodukt der tiefen Geothermie interessant geworden. Insbesondere am Oberrhein und im norddeutschen Becken sind nach derzeitigem Stand der Forschung Potenziale zu erwarten. Für die Abschätzung der Lithium-Ressourcen ist es essentiell, die Größe des Reservoirs und mögliche Freisetzungsprozesse aus den Gesteinen zu kennen. Am Beispiel des Geothermie-Standortes Bruchsal wird die Ergiebigkeit des Reservoirs durch Tracerversuche und numerische Modellierungen erkundet. Weitere langfristig relevante Informationen sind durch die geochemische Modellierung der Interaktionen zwischen Wasser und Festgestein zu erwarten.

5 Fachsitzung gemeinsam mit DGGV: Hydrogeologische Aspekte der Endlagerung

22.03.2024, 15:30 - 17:00, Konferenzraum 1

Maria-Theresia Schafmeister (Universität Greifswald)

Michael Kühn (Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ)

Vortrag 5.1 (ID 172)

Management von Parameterdaten für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im deutschen Standortauswahlverfahren

*Alexander Renz, Marieke Rempe, Lutz Stecken, Shorash Miro, Marlene Gelleszun,
Paulina Müller, Tobias Wengorsch, Martin Weiß, Christoph Behrens,
Florian Panitz, Merle Bjorge, Phillip Kreye, Wolfram Rühaak*

Bundesgesellschaft für Endlagerung, Deutschland

Kontakt: alexander.renz@bge.de

Für das Standortauswahlverfahren für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland müssen große Mengen an geologischen Daten gesammelt, verarbeitet und bewertet werden. Hinzu kommt eine Vielzahl weiterer Daten und Informationen, z. B. mit Blick auf die Betriebssicherheit. Während des aktuellen anliegenden Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens werden Daten aus 90 Teilgebieten der drei Arten von Wirtsgesteinen (Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein) bearbeitet, welche über die Hälfte des Gebiets der Bundesrepublik Deutschland abdecken. In jedem dieser Teilgebiete muss gemäß dem Standortauswahlgesetz eine repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchung durchgeführt werden, um den sicheren Einschluss der Abfälle zu bewerten. Nach dieser Bewertung, sowie erneuter Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, werden die vielversprechendsten Bereiche als Standortregionen vorgeschlagen und in Phase II mit zunehmender Detailtiefe erneut betrachtet.

Rohdaten für die Teilgebiete kommen von unterschiedlichen Quellen, zumeist von den staatlichen geologischen Diensten. Zur Verwendung der Daten sind verschiedene Arbeitsschritte notwendig: Umwandlung in standardisierte Datenformate, Ableitung (Interpretation) von Daten aus Rohdaten, Zusammenführung von Daten mit vorhandenen

Referenzdatensätzen und Verwendung in Modellen, Prüfung auf Plausibilität, etc. Auf diese Weise entstehen weitere Daten, mit welchen die Eignung eines Teilgebiets anhand definierter Kriterien bewertet wird.

Für das Standortauswahlverfahren ergibt sich so eine Kaskade von Rohdaten, Zwischenergebnissen und Kennzahlen, die durch verschiedene Arbeitsschritte miteinander verknüpft sind. Diese Kaskade ist sowohl groß (es wurden mehr als 100 Arbeitsschritte identifiziert), als auch komplex, da eine hohe Abhängigkeit zwischen diesen Elementen besteht. Für den Umgang mit den daraus resultierenden Herausforderungen, stellen wir folgende Ansätze vor:

- Entscheidungen für die Öffentlichkeit müssen nach den regulatorischen Anforderungen transparent dargelegt und dokumentiert werden (StandAG § 1 Abs. 2). Die BGE strebt dabei an, den Datenfluss durchgehend "rückverfolgbar" zu gestalten.
- Ungewissheiten im Zusammenhang mit den Parametern müssen systematisch im Standortauswahlverfahren berücksichtigt werden (§ 11 EndlSiUntV). Die BGE plant hier, die Ungewissheitsmargen entlang des Datenflusses zu bewerten und zu dokumentieren.
- Verwendete Daten müssen konsistent in den verschiedenen Arbeitsschritten pro Teilgebiet verwendet werden. Das angestrebte Datenmanagement soll hierfür sicherstellen, dass Redundanz vermieden wird (Single-Point-of-Truth).
- Verfahren zur Handhabung von heterogenen Datenlagen je Teilgebiet müssen etabliert werden. Hierfür entwickelt die BGE u. a. Referenzdatensätze als „Ausweichoption“ für Gebiete mit weniger verfügbaren Daten entwickelt.
- Alle erforderlichen Eingaben müssen zum richtigen Zeitpunkt vorliegen und von unterschiedlichen Mitarbeiter*innen gleichermaßen getätigt werden können. Dies erfordert eine Standardisierung von Kommunikationswegen und Datenverwaltung, sowie die zeitliche Abstimmung der Arbeitsschritte.

Die hierzu entwickelten und vorgestellten Werkzeuge beinhalten ein Konzept zur Visualisierung der Datenflusswege, basierend auf einer Datenbank und einem Klassifikationssystem für die Daten und Ungewissheiten sowie eine Software zur interaktiven Navigation und Visualisierung des Datenflusses.

Vortrag 5.2 (ID 214)

Hydro-Mechanical Characterization of the 45-year-old Excavation Damage Zone at Bedretto Underground Laboratory, Ticino, Switzerland

*Peter Achtziger-Zupančič^{1,2}, Florian Amann^{1,2}, Jonas Dickmann²,
Michał Kruszewski², Seyyed'Mohammad Moulaeifard³, Jacek Scibek^{3,4},
Alexis Shakas⁵, Pooya Hamdi²*

¹: Fraunhofer IEG, Aachen, Deutschland

²: Lehrstuhl für Ingenieur- und Hydrogeologie, RWTH Aachen, Deutschland

³: PointCab GmbH, Wernau, Deutschland

⁴: Graduate School of Engineering, Kyoto University, Japan

⁵: Institut für Geophysik, ETH Zürich, Schweiz

Kontakt: peter.achtziger-zupancic@ieg.fraunhofer.de

Radionuclide transport in crystalline rocks primarily occurs through preferential flow paths in fractures and faults. In deep tunnels experiencing high stress conditions, fractures are induced in the close vicinity of the tunnel walls, resulting in the creation of the Excavation Damage Zone (EDZ).

In this study, the EDZ of the 45-year-old Bedretto tunnel, located in the Bedretto Underground Lab for Geoscience and Geoenergies in Ticino, Switzerland, was characterized using a multi-disciplinary approach to assess its current hydrogeological-geotechnical conditions. Fracture distribution and associated geotechnical properties were measured on the tunnel wall, using manual and digital scanline approaches. Similar measurements were conducted on the rock cores drilled into the tunnel sidewall, along with geophysical measurements of the P-wave velocity, to assess the degree of micro-cracking. Permeability and transmissivity measurements were conducted in boreholes, on the tunnel wall and on core pieces/plugs, under both confined and unconfined conditions, using water and air/nitrogen as test fluids. High-resolution, high-frequency ground-penetrating radar (GPR) measurements were taken during injection in a time-lapse experiment. This unique, integrated dataset aims to characterize the EDZ in its current state after 45 years.

The hydraulic properties are linked to the abundance of macro-fractures in an about 25-60 cm deep EDZ. These fractures isolate intact rock spalls with micro-destruction. Permeability/transmissivity contrasts of a few orders of magnitude are observed in close proximity between open tunneling induced fractures, partially mineralized natural fractures and the granitic matrix. The origin of fractures is distinguishable by a visual inspection of cores, along the tunnel wall and by comparison of the fracture orientation distribution. Fractures

in the EDZ are primarily oriented sub-parallel to the tunnel axis, where GPR measurements indicated continuous fractures on a decimeter scale with open apertures measuring 100 μm .

The effort provides a baseline for the coming PRECODE (Progressive Excavation Disturbance Zone Evolution during and Post Mine-by Tunnelling) experiment where a new tunnel is excavated with minimal excavation disturbance. The evolution of the EDZ will be monitored closely over several years for the described properties and more, thus improving our understanding of processes leading to an EDZ and describing the changes over time by the improvement of constitutive laws.

Vortrag 5.3 (ID 338)

Modellierung von Grundwasserströmung und Radionuklidtransport in der Endlagersicherheitsforschung

Anke Schneider¹, Judith Flügge¹, Hong Zhao¹, Ulrich Noseck¹, Arne Naegel², Markus Knodel³, Gabriel Wittum³, Filip Jankovski⁴

¹: GRS, Deutschland

²: Goethe-Universität Frankfurt

³: Techsim UG

⁴: ÚGV Řež

Kontakt: anke.schneider@grs.de

Die Kenntnis der Grundwasserströmungsverhältnisse und damit der möglichen Transportpfade freigesetzter Schadstoffe im Umfeld eines potenziellen Endlagerstandortes für radioaktive Abfälle sind wichtige Faktoren im Standortauswahlverfahren und für den Sicherheitsnachweis für ein Endlager. Der Code d³f++ (distributed density driven flow; Fein et al. 1999, Schneider et al. 2020) wird seit 1994 in Kooperationsprojekten der GRS mit verschiedenen Universitäten entwickelt mit dem Ziel, die dichteabhängige Grundwasserströmung und den Radionuklidtransport in porösen Medien mit allen für die Langzeitsicherheitsanalyse relevanten Wechselwirkungen für große, hydrogeologisch komplexe Gebiete in praktikablen Rechenzeiten zu simulieren. Weitere Anforderungen kamen hinzu, wie die thermohaline Strömung, diskrete Kluftnetzwerke, freie Grundwasseroberflächen mit Vorfluterankopplung sowie Permafrostmodelle. Inzwischen umfassen die Modellgebiete mehrere tausend Quadratkilometer Fläche, der Modellzeitraum eine Million Jahre, und die Betrachtung von Ungewissheiten spielt eine wachsende Rolle. Der Finite-Volumen-Code d³f++ basiert auf UG4 (Vogel et al. 2014). Von Beginn an wurden Techniken wie Gitteradaptivität und moderne, schnelle Löser wie geometrische und algebraische Mehrgitterverfahren für Parallelrechner eingesetzt. Derzeit liegt der Fokus auf LIMEX-Verfahren (Nägel et al. 2019). Im aktuellen Projekt HYMNEII (BMUV-FKZ 02E12012) wird d³f++

mit den Kluftgeneratoren dfnWorks (Hyman et al. 2015) und FracMan (Golder 2018) gekoppelt mit dem Ziel, automatisiert DFN- bzw. EPM-Modelle für Kluftnetzwerke sowie Kombinationen aus beiden in d³f++ einlesen und berechnen zu können.

Vorgestellt werden Modelle der Standorte Čihadlo und Kraví Hora aus dem Standortauswahlverfahren in der Tschechischen Republik sowie die Nachmodellierung eines Laborversuches zum Schadstofftransport in einer künstlich erzeugten, exakt vermessenen, sehr rauen Kluft in einem Granitblock im Rahmen des Projektes EURAD/DONUT.

Fein, E., Schneider, A. (eds.): d³f – Ein Programmpaket zur Modellierung von Dichteströmungen. Abschlussbericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-139, Braunschweig 1999.
Golder Associates: FracMan Interactive Discrete Feature Data Analysis, Geometric Modeling and Exploration Simulation, User Documentation, v7.7, 2018.

Hyman, J.D., Karra, S., Makedonska, N., Gable, C.W., Painter, S.L., and Viswanathan, H.S. dfnworks: A discrete fracture network framework for modeling subsurface flow and transport. Computers & Geosciences, 84:10–19, 2015.

Nägel A, Deuffhard P, Wittum G.: „Efficient Stiff Integration of Density Driven Flow Problems“, 2019 (eingereicht, verfügbar als ZIB-Report 18-54).

Schneider, A., Gehrke, A., Kröhn, K.-P., Zhao, H.: Groundwater Flow and Transport in Complex Real Systems. Final report, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-566, Braunschweig, 2020.

Vogel, A., Reiter, S., Rupp, M., Nägel, A., Wittum, G.: UG 4 - A Novel Flexible Software System for Simulating PDE Based Models on High Performance Computers. Comput Vis Sci, 16 (4), pp 165-179, 2014.

Vortrag 5.4 (ID 255)

Grundwasserdatierung mittels $^{81}\text{Kr}/^{85}\text{Kr}$ im Rahmen der Nagra-Sondierbohrungen für ein geologisches Tiefenlager - Highlights und Erkenntnisse

Michael Heidinger¹, Gesine Lorenz¹, Emiliano Stopelli², Daniel Traber²

¹: Hydroisotop GmbH, Deutschland

²: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), Schweiz

Kontakt: mh@hydroisotop.de

Die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) hat ein untertägiges Erkundungsprogramm zur vergleichenden Bewertung möglicher Standorte für ein geologisches Tiefenlager für nukleare Abfälle durchgeführt. Zwischen 2019 und 2022 wurden in drei Standortregionen der Nordschweiz eine geneigte und acht vertikale Mehrzweck-Sondierbohrungen abgeteuft.

Im Rahmen dieser Arbeiten war die horizontgenaue Entnahme von Grundwasserproben und die Auswertung analytischer Daten von grundlegender Bedeutung, um solide Informationen über die Grundwasserzusammensetzung, die Entwicklung und die Verweilzeiten der

Grundwässer zu erhalten, die die gering durchlässige Abfolge des Wirtsgesteins (Opalinuston) in den umgebenden Einheiten begrenzen.

Insgesamt wurden achtzehn Tiefengrundwasserproben aus Testintervallen im Jura (Malm; Dogger) und der Trias (Keuper; Muschelkalk) in Tiefen zwischen ca. 350 m und 1150 m unter GOK erfolgreich entnommen. Im Folgenden werden ausgewählte Highlights und Erkenntnisse zur Ableitung des Grundwasserverweilzeit (^{81}Kr -Modellalter) für Proben aus den fünf untersuchten Malm-Intervallen vorgestellt:

- Um den technischen Herausforderungen bei den tiefen Erkundungsbohrungen (geringe Grundwasserförderraten und Pumpzeiten) zu begegnen wurden Werkzeuge zur Bewältigung entwickelt und eingesetzt.
- Die radioaktiven Isotopenparameter Krypton-81 ($T_{1/2} 229 \pm 11 \text{ ka}$) und Krypton-85 ($T_{1/2} 10,76 \text{ a}$) wurden in den wenig produktiven, stark gasführenden Malm Grundwässern erfolgreich beprobt und analysiert.
- Für die Korrektur der Kontamination mit Luft (Probenahme vor Ort, Entgasung, Aufbereitung usw.) dienen die atmosphärischen Krypton-85 Aktivitäten (BfS-Station Schauinsland).
- Zur Ableitung der Untergrenzen der jeweiligen ^{81}Kr -Modellalter wurden konservative Szenarien verwendet.
- Die kombinierten Isotopen-, Edelgas- und Hydrochemie-Daten trugen dazu bei, die Grundwassermischungen, die Wasser-Gesteins-Interaktion (incl. potenzieller diffusiver Gasaustausch) und die Modellalter weit über die klassische ^{14}C -DIC/DOC-Methode hinaus zu identifizieren.
- Wir zeigen, dass selbst unter schwierigen Betriebsbedingungen ein hohes Qualitätsniveau für Daten aus wenig produktiven, gasreichen Tiefengrundwässern erreicht werden kann.
- Die gewonnenen Isotopendaten des Grundwassers sind relevante, hochinformativ Datensätze zur Präzisierung des Standortmodells, das im Rahmen des Standortauswahlverfahrens für das Tiefenlager nuklearer Abfälle erforderlich wird.

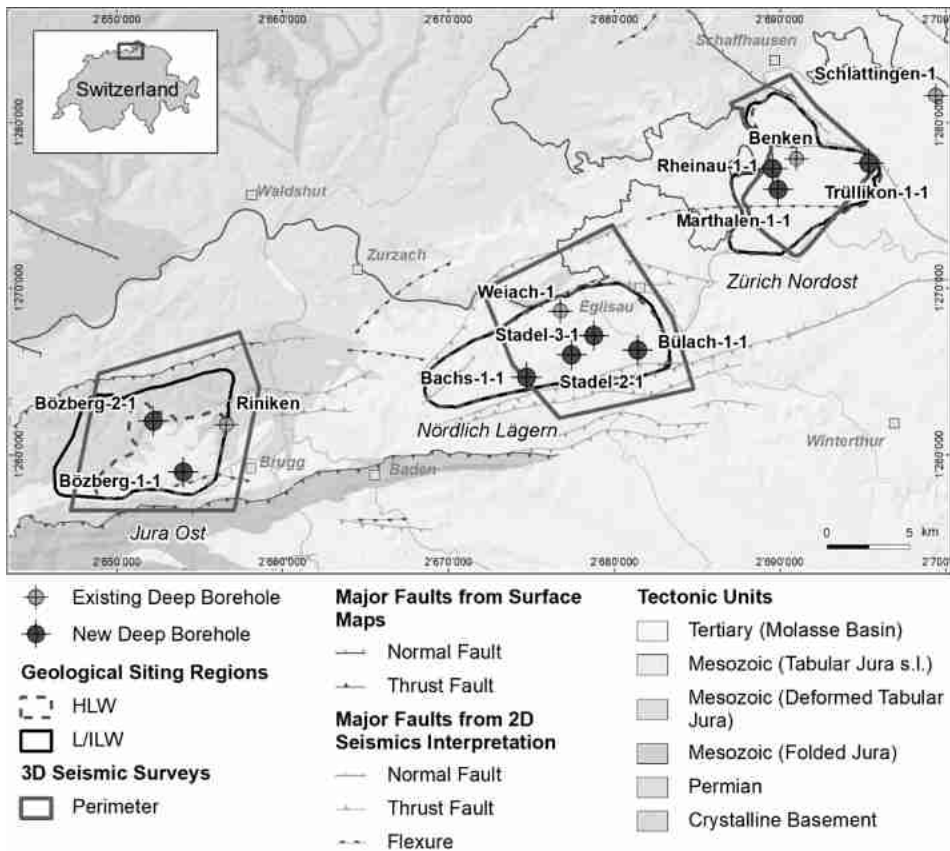


Abb. 1: Tektonische Übersichtskarte mit den drei untersuchten Standortregionen und Lage der Mehrzweck-Sondierbohrungen.

Vortrag 5.5 (ID 173)

Palaeo-hydrogeology and geochemistry of the weathering zone in the Opalinus Clay

Martin Mazurek¹, Paul Wersin¹, Jebril Hadi¹, Jean-Marc Greneche²

¹: Universität Bern, Schweiz

²: Université du Maine, Frankreich

Kontakt: paul.wersin@unibe.ch

The Opalinus Clay is a Mesozoic argillaceous rock with a high clay content. Due to its low permeability and favourable sealing properties, it is foreseen as host rock for a radioactive repository in northern Switzerland where it occurs at depths of 600 – 900 m below surface.

In the assessment of the safety of a geological waste repository, different likely and less likely scenarios are commonly considered, also including erosion scenarios above a future repository. In this context, a borehole in the community of Lausen (located about 15 km SE of the city of Basel), which penetrated across the weathered and unweathered Opalinus Clay down to 146 m depth, was investigated in terms of its hydrogeological and geochemical characteristics.

Porosity data reveal a progressive decompaction of the top 30 m of the Opalinus Clay which is accompanied by intense fracturing but also an increasing amount of the swelling smectitic clay fraction. In parallel, oxidation phenomena become progressively more important towards the top of the weathering zone, which is manifested by the decrease of the $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ratio, siderite and pyrite and the increasing occurrence of goethite. Oxidation processes have furthermore induced the dissolution of organic matter and calcite, the latter being completely absent in the top meters. Chemical and isotopic data in the porewaters suggest the buildup of a diffusion profile below the weathering zone (Fig. 1). Conversely, the patterns within the weathering zone are more complex, revealing a strong negative excursion of $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ signals at about 20 m depth which is not observed in the chemical data. Groundwater sampled in the weathering zone indicate reducing conditions, confirming some remaining reducing capacity in the highly oxidized rock.

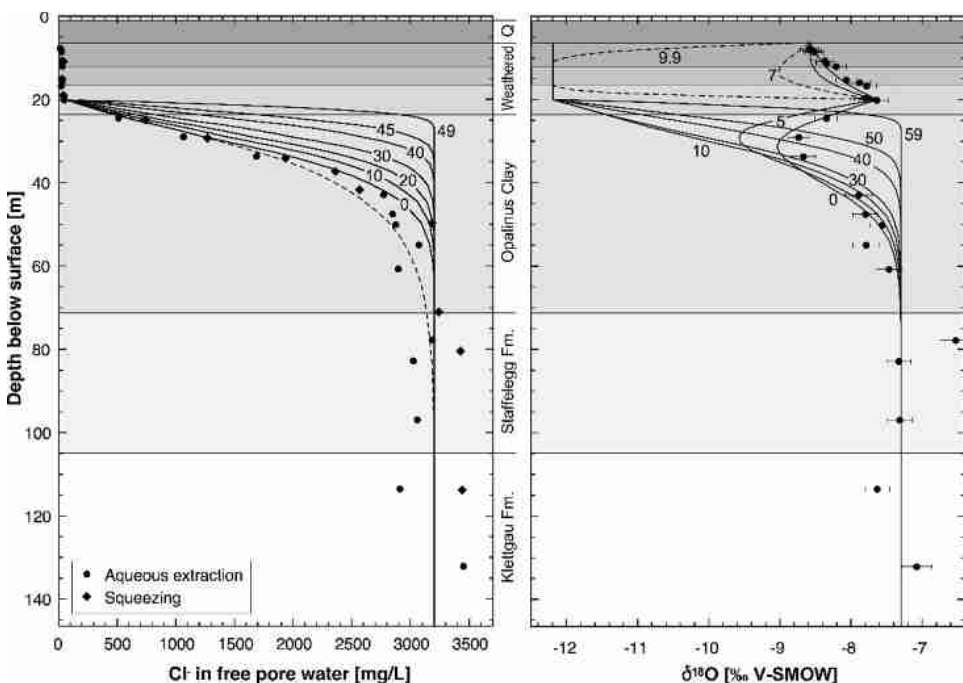


Abb. 1: Depth profiles of Cl^- (left) and $\delta^{18}\text{O}$ (right) in porewater derived from experimental data and diffusion modelling.

The combined information on rock, porewater and groundwater characteristics as well as modelling of tracer transport enabled to unravel the palaeo evolution at the site. The massive weathering zone is explained by the long-term exposure of the Opalinus Clay to unsaturated and oxidizing conditions occurring during cold and arid periods of the Pleistocene. This resulted in extensive fracturing and advective conditions, ingress of gaseous O₂ and most oxidation phenomena observed today. According to transport modelling the buildup of the observed curved diffusive profiles has occurred during the last 50-60 ka. At the onset of the Holocene, a rise in groundwater table led to a self-sealing of fractures and the re-establishment of a diffusive regime in the weathered zone. Moreover, conditions in the porewater and groundwater became anaerobic thanks to the remaining reducing capacity of the rock.

Vortrag 5.6 (ID 213)

Uranmigration in Abhängigkeit vom hydrogeochemischen System

Theresa Hennig¹, Michael Kühn^{1,2}

¹: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Fluidsystemmodellierung, Potsdam, 14473, Deutschland

²: Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, Potsdam OT Golm, 14476, Deutschland

Kontakt: theresa.hennig@gfz-potsdam.de

Modelle und Simulationen ermöglichen Prognosen, wie Prozesse in der Geosphäre in Zukunft ablaufen könnten, unter Berücksichtigung physikalischer und chemischer Gesetzmäßigkeiten. Sie sind die einzige Möglichkeit, Szenarien und Hypothesen zu testen und die langfristige Entwicklung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle zu bewerten, z. B. durch die Quantifizierung der potenziellen Radionuklidmigration im hydrogeologischen System des sogenannten einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG). Die Charakterisierung der Hydrogeologie und die Abschätzung ihrer potenziellen Veränderungen ist von entscheidender Bedeutung. Transportprozesse von Radionukliden werden durch die geochemischen Bedingungen innerhalb einer Formation gesteuert (Hennig et al., 2020; Hennig und Kühn, 2021, 2022, 2023), die wiederum durch Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen und die hydrogeologische Situation selbst bestimmt werden.

Anhand eines Beispiels wird gezeigt, wie stark die Migrationslängen über eine Million Jahre variieren können, je nach hydrogeologischem Umfeld. Die Migration von Uran wird für zwei verschiedene hydrogeologische Systeme im potenziellen Wirtsgestein Opalinuston (Schweiz) mit reaktiven Transportsimulationen untersucht. Die geochemischen Bedingungen beider Systeme werden auf der Grundlage ihrer paläohydrologischen Entwicklung modelliert und dienen als Ausgangsbedingungen für die Simulationen. Am Mont Terri liegt ein Gradient in der Porenwassergeochemie in Richtung der angrenzenden Aquifere vor

(Abb. 1a), der zu einer maximalen Migration von 80 m führt (Hennig und Kühn, 2021, 2022). Im Gegensatz zur Mont Terri Antiklinale ist der Opalinuston im Gebiet von Schlattingen tektonisch undeformiert. Daher sind die geochemischen Bedingungen konstant mit leicht abnehmenden Konzentrationen der Porenwasserkomponenten zum Grundwasserleiter hin (Abb. 1b) und einer maximalen Migrationslänge von 16 m (Hennig und Kühn, 2023). Die Uranmigration variiert über mehrere Zehnermeter.

Die Zuverlässigkeit der Modelle beruht auf dem Vergleich von Laboruntersuchungen mit den Daten aus Bohrlöchern und dem Felslabor Mont Terri. Für beide Beispiele stimmt die simulierte Porenwassergeochemie mit den Messdaten überein. Der Unterschied der Migrationslängen zwischen den Lokationen Mont Terri und Schlattingen verdeutlicht, dass konstante geochemische Bedingungen ohne Konzentrationsgradient innerhalb eines ewG für eine sichere Endlagerung zu bevorzugen sind. Die Migrationslängen von Radionukliden hängen stark von der räumlichen und zeitlichen Variation der hydrogeochemischen Bedingungen ab.

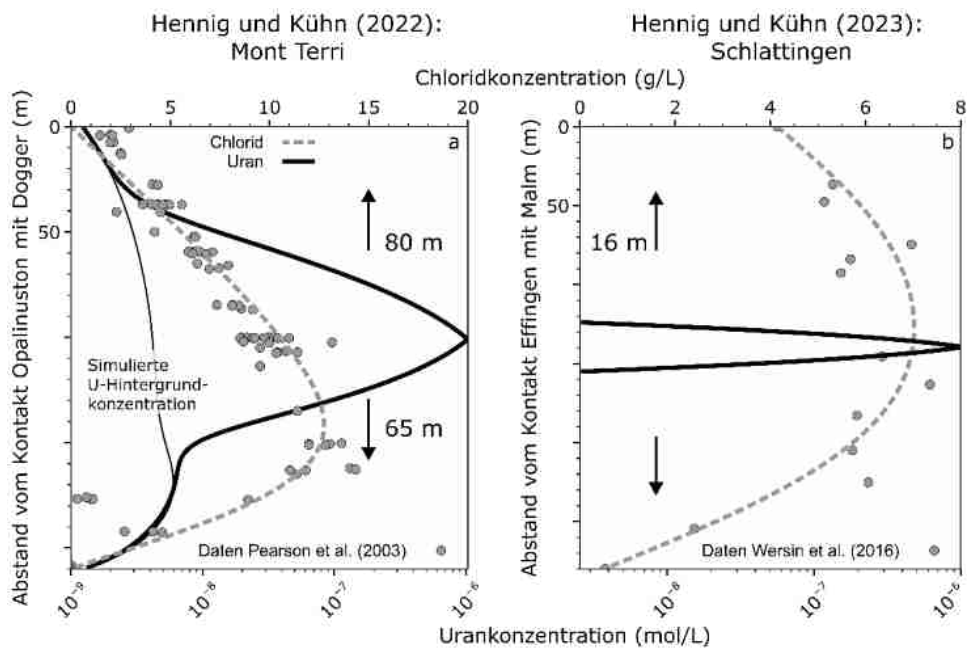


Abb. 1: Simulierte Uranmigration (grün) im hydrogeologischen Opalinuston-System am Mont Terri (a) und Schlattingen (b) nach einer Simulationszeit von 1 Ma. Die Standorte unterscheiden sich in ihrem Profil der Porenwassergeochemie aufgrund der lokalen hydrogeologischen Gegebenheiten, hier exemplarisch anhand von Chlorid (blau) gezeigt.

Hennig, T. und Kühn, M. (2023): Adv. Geosci., 62, 21–30, DOI: 10.5194/adgeo-62-21-2023

Hennig, T. und Kühn, M. (2022): Adv. Geosci., 58, 11-18. DOI: 10.5194/adgeo-58-11-2022

Hennig, T. und Kühn, M. (2021): Minerals, 11, 1087. DOI: 10.3390/min11101087

Hennig, T., et al. (2020): Appl. Geochem., 123, 104777. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104777

Pearson, F. J., et al. (2003): Reports of the Federal Office for Water and Geology, Geology Series no. 5, ISBN: 3-906723-59-3

Wersin, P., et al. (2016): Chem. Geol., 434, 43–61, DOI:10.1016/j.chemgeo.2016.04.006

Poster 5.1 (ID 257)

Hydrochemical boundary conditions relevant for corrosion processes of canisters for high-level radioactive waste in a deep geological repository in crystalline host rock in Germany

Torben Weyand¹, Thimo Philipp¹, Christiane Stephan-Scherb²

¹: Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), Deutschland

²: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Kontakt: torben.weyand@base.bund.de

Crystalline rock is a potential host rock for a deep geological repository for high-level radioactive waste in the ongoing site selection procedure in Germany. Since crystalline rock can be highly fractured a containment providing rock zone might not be identified. In this case, technical and geotechnical barriers may ensure the safe confinement of the radionuclides for one million years according to the site selection act (StandAG) and the requirements on the integrity of the technical barriers are particularly high. Hence, it is of great importance to evaluate and understand the processes that might lead to a potential loss of their integrity, especially the waste canisters. Preliminary safety analyses during the site selection process will include corrosion processes to assess the integrity according to applicable regulations. Therefore, it is necessary to have a thorough understanding of the different corrosion processes and their boundary conditions.

This study is part of the project “Long-Term Integrity of Canisters in Crystalline Host Rock – LaKris (4722B10401)”. The project evaluates the predominant corrosion mechanisms, taking into account the geochemical environment of the crystalline host rock in Germany to which the canisters might be exposed. The existing requirements on canister integrity according to the regulatory framework are reviewed. The importance of hydrochemical parameters, which could influence the corrosion of the canisters, including their limited availability and uncertainty of such data, will be discussed.

This contribution shows the current result of a literature survey of hydrogeochemical data in crystalline host rock in Germany. The data were gathered for potential regions for a depth of approx. 300 m to 1,500 m from publicly available reports. The parameters we are looking for are in particular pH, redox potential, total dissolved solids, salt content and ion concentrations (e.g. chloride, sulphate, sulphide). The review shows that hydrochemical

data for crystalline rock at repository-relevant depth have been collected primarily by geothermal exploration and not for all potential regions such data are available. In addition, the data show a relatively large range of values due to regional geological and mineralogical differences. Nevertheless, it is possible to derive preliminary trends and estimates for hydrogeochemical conditions which might be encountered in a repository in the crystalline host rock in Germany. The compiled hydrochemical data are compared with data from crystalline host rocks in other countries and are interpreted regarding implications for the integrity of the canisters. The data currently available indicate that the observations from other countries on aerobic corrosion, and corrosion by chlorides or the Sauna effect are comprehensive. As far as the corrosion by sulfides is concerned, transferability is unclear and detailed investigations are needed, as the sulphate contents could well be higher.

Poster 5.2 (ID 306)

Geochemische Profile im hydrogeologischen System Opalinuston

Marie Bonitz^{1,2}, Theresa Hennig¹, Anja Schleicher¹, Jessica Stammeier¹, David Jaeggi³, Michael Kühn^{1,2}

¹: *Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ*

²: *Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften*

³: *Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Schweiz*

Kontakt: maribo@gfz-potsdam.de

Der Opalinuston ist das gewählte Wirtsgestein für die geologische Tiefenlagerung nuklearer Abfälle in der Schweiz und wird dafür auch in Deutschland in Betracht gezogen. Für die langfristige Integrität des Endlagers sind zeitlich und räumlich stabile geochemische Bedingungen von wesentlicher Bedeutung. Angrenzende Grundwasserleiter können Veränderungen im System hervorrufen. Es ist daher essenziell, genau zu untersuchen, ob und wie die Geochemie und Mineralogie der Sedimentabfolge vom hydrogeologischen System beeinflusst wird. Veränderungen im Opalinuston und den umliegenden Formationen geben Aufschluss über geochemische Prozesse in der Vergangenheit und ermöglichen somit eine Einschätzung für die Zukunft.

In diesem Kontext wurde im Schweizer Felslabor in der Mont Terri Antiklinale (Abb. 1) eine 58 m lange Bohrung abgeteuft (BHS-1). Diese wurde vom Opalinuston (Toarcian) durch die gesamte Staffelegg-Formation (Toarcian-Sinemurian) gebohrt, die zwei wasserführende Abschnitte enthält (Hostettler et al. 2022). Das Grundwasser, die Schichteinheiten (Member) und deren Übergänge wurden mit verschiedenen Methoden analysiert.

Grundwasser wurde lokal im Beggingen- (Gryphitenkalk) und im Rietheim-Member (Posidonienschiefer), je nach Vorhandensein von geklüfteten Bereichen und mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung gefunden. Das Grundwasser im Rietheim-Member steht nicht direkt mit der Erdoberfläche in Verbindung, sondern wird offenbar kontinuierlich von einem benachbarten Aquifer gespeist (Preisig et al. 2021). Am Übergang vom Gross Wolf- zum Rietheim-Member nimmt Pyrit zu und viele Spurenelemente sind dort angereichert. Der verwendete Paläoredox-Proxy (Fe/Al) und die Anreicherung von Spurenelementen wie Uran weisen auf anoxische Bedingungen im Sedimentgestein und im Grund- und Porenwasser hin. Dies spricht eher für ein Ablagerungsmerkmal als für eine Mobilisierung. Somit ist der Einfluss des Grundwassers aufgrund seiner reduzierenden Bedingungen an diesem Übergang als begrenzt einzuordnen.

Das Ziel ist die Etablierung einer Methode zur analytischen Unterscheidung zwischen Merkmalen der Ablagerung, Diagenese, Alteration und Mobilisierung. Damit lässt sich die langfristige Integrität des Opalinustons als Wirtsgestein und der umliegenden Formationen beurteilen. Das gewonnene Verständnis des hydrogeologischen Einflusses auf die geochemischen Bedingungen innerhalb eines Systems soll auf andere potenzielle Endlagerstandorte übertragen werden.

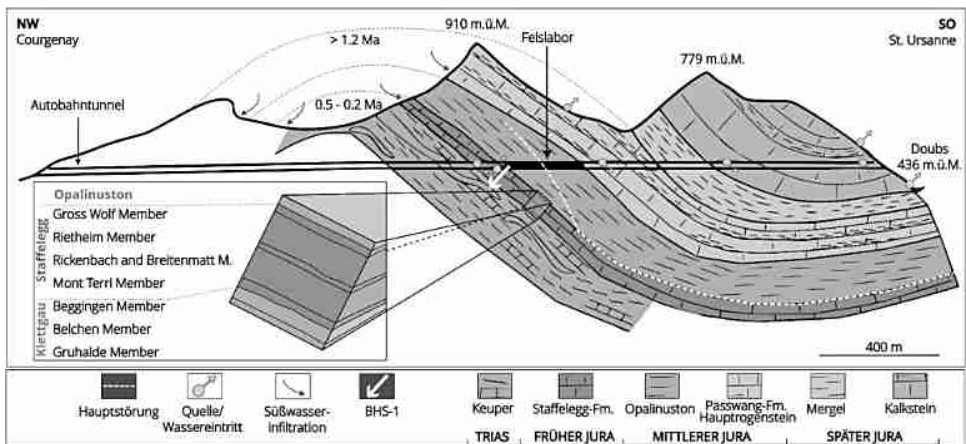


Abb. 1: Das geologische Profil zeigt den SO-Schenkel der Mont Terri Antiklinalen, in der sich das Felslabor befindet. Die Erosionsgeschichte und die damit verbundene Aktivierung der Aquifere ist schematisch abgebildet. Die BHS-1 Bohrung (Pfeil) ist in Bohrrichtung dargestellt. Der Detailausschnitt zeigt die untersuchten Formationen und ihre Member (verändert nach Preisig et al. 2021).

Hostettler, B., Reisdorf, A., Jaeggi, D., Menkveld-Gfeller, U., 2022. Mont Terri BHS-1 drillcore report, Stratigraphy of the Late Triassic to Early Jurassic Mont Terri BHS-1 drillcore. Mont Terri Technical Report TR 2021-02.

Preisig G., Ruegg, A., Bertrand, C., 2021. HS Experiment: The hydrogeology of the Mont Terri anticline and inflows into the security gallery at the boundaries of an aquiclude unit (Opalinus Clay) (Phase 25). Mont Terri Technical Note TN 2020-10.

6 Landwirtschaftliche Einträge in das Grundwasser

22.03.2024, 11:15 - 12:30, Konferenzraum 1

Stephan Hannappel (HYDOR Consult GmbH)

Katharina Greven (NEW NiederrheinWasser GmbH)

Vortrag 6.1 (ID 165)

Klimaangepasstes Wassermanagement in der Grünlandwirtschaft: Auswirkungen auf die biogeochemischen Nährstoffausträge im nordwestdeutschen Küstenraum

Mareike Schloo, Philipp Maurischat, Anna-Lena Rotenhagen, Gudrun Massmann

*Institut für Biologie und Umweltwissenschaften (IBU) der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg,
Deutschland*

Kontakt: mareike.schloo@uol.de

Aus der den nordwestdeutschen Küstenraum prägenden Binnenentwässerung entwickelte sich im Laufe der Jahrzehnte die heutige Nutzung der Flächen für die Grünlandwirtschaft. Die Kombination von landwirtschaftlicher Nutzung und Binnenentwässerung führt seit Jahrzehnten zu hohen Nährstoffausträgen in Grund-, Oberflächen und Küstengewässer. Zusätzlich wurden in den letzten Jahren, bedingt durch die starke Entwässerung im Winterhalbjahr und die Hitze- und Trockenperioden im Sommerhalbjahr, erhebliche Dürreschäden am Grünland verzeichnet. Die Auswirkungen von Trockenperioden auf die Grünlandvegetation und ihre Produktivität wurden in den letzten Jahren, besonders im intensiv genutzten Grünland Nordwestdeutschlands, deutlich. Um diesen Wasserbedarf des Intensivgrünlands in Verbindung mit den sommerlichen Trockenperioden gewährleisten zu können, soll im Rahmen des Projektes „Future Proof Grasslands“ ein angepasstes Wassermanagement erprobt werden. Die Flächenwasserhaltung wird saisonal reguliert, indem im Winter Wasser in den Flächen zurückgehalten wird, sodass Dürreschäden im Sommer vorgebeugt werden kann. Neben einem verbesserten Wasserrückhalt zielt das Projekt auch darauf ab, Stickstoff- und Phosphorausträge ins Grundwasser zu minimieren. Ziel des vorgestellten Teilprojektes ist es, die an den Wasserrückhalt in der Fläche gekoppelten biogeochemischen Stoffflüsse zu quantifizieren. Dazu werden zusätzlich unterschiedliche Nutzungsänderungen als Maßnahme zur Reduzierung der Nährstoffausträge betrachtet. Hierzu

werden auf Flächen in der Zielregion großflächig randomisierte Exaktversuche angelegt. Auf diesen wird der Einfluss des veränderten Wassermanagements auf die Nährstoffausträge in den nächsten Jahren untersucht.

Vortrag 6.2 (ID 245)

Stickstoffumsatz in tieferen, wasserwirtschaftlich genutzten Grundwasserleitern der Niederrheinischen Bucht

Felix Fahrenbach, Thomas R. Rüde

Lehr- und Forschungsgebiet Hydrogeologie RWTH Aachen

Kontakt: fahrenbach@hydro.rwth-aachen.de

In landwirtschaftlich geprägten Regionen wie der Niederrheinischen Bucht (NRW) wird der in der Grundwasserverordnung festgelegte Schwellenwert für Nitrat von 50 mg/L im ersten Grundwasserstockwerk häufig überschritten, sodass vermehrt tiefere Grundwasserstockwerke wasserwirtschaftlich genutzt werden. Über geologische Fenster kann es in diesen jedoch zu Durchbrüchen des Nitrats kommen, die nur durch im Grundwasserleiter stattfindende Abbauprozesse retardiert werden.

Um den Eintrag, Transport und Abbau von Nitrat in tieferen Grundwasserleitern besser zu verstehen, wird ein auf der Venloer Scholle gelegener Standort untersucht. Dieser umfasst – von Süden nach Norden – die Einzugsgebiete der Wassergewinnungen Dülken, Amern, Boisheim, Breyell und Lobberich. Die verschiedenen Brunnen erfassen den lokal zweiten und dritten Grundwasserleiter. Die Einzugsgebiete unterscheiden sich hinsichtlich der Verbreitung schützender Tonhorizonte. Während sich im Anstrom der Wassergewinnungen Dülken, Amern und Breyell hydraulische Fensterstrukturen befinden, sind die Tonhorizonte in den Einzugsgebieten der Wassergewinnungen Boisheim und Lobberich fast vollständig ausgebildet.

Im oberflächennahen Grundwasserleiter ist kein Nitratabbaupotenzial des Sediments bekannt. Für den zweiten Grundwasserleiter ist nur lokal, z. B. im Bereich der Wassergewinnung Breyell, ein Abbaupotenzial zu vermuten (Cremer 2015). Der Ablauf einer chemolithotrophen Denitrifikation im dritten Grundwasserleiter gilt als gesichert (z. B. Cremer 2015, Meyer et al. 2018, Greven et al. 2019). Der im Sediment verteilte Pyrit wird bei der Reaktion verbraucht, sodass das Abbaupotenzial langsam aufgezehrt wird bzw. an einigen Stellen bereits verbraucht ist.

Für eine tiefergehende Analyse der Nitratausbreitung im zweiten und dritten Grundwasserleiter wurden im August und September 2023 30 Grundwassermessstellen beprobt. Die

Proben werden zum einen auf Nitrat und weitere Hauptionen analysiert zum anderen erfolgt die Messung des Exzess- N_2 (N_2/Ar -Methode).

Mit diesem Beitrag sollen die Ergebnisse der durchgeführten Probennahme vorgestellt werden. Die mit Hilfe der N_2/Ar -Methode bestimmten Eintragskonzentrationen werden mit theoretischen, aus der Chlorid-, Sulfat- und Nitratkonzentration berechneten Eintragskonzentrationen verglichen. Diese Berechnungen lassen für die Wassergewinnung Dülken, Amern und Boenheim Eintragskonzentrationen von bis zu 100 mg/L erwarten. Im Bereich der Wassergewinnung Lobberich lassen die vorhandenen hydrochemischen Daten für den dritten Grundwasserleiter vermuten, dass anthropogen überprägtes Grundwasser noch nicht in diesen Bereich vorgedrungen ist. Die Ergebnisse der N_2/Ar -Methode sollen das Ausmaß der Denitrifikation aufzeigen und Eingang in die Modellierung des Nitrattransportes finden.

Cremer, N. (2015): Nitrat im Grundwasser. Konzentrationsniveau, Abbauprozesse und Abbaupotenzial im Tätigkeitsbereich des Ertverbandes. Bergheim.

Greven, K., Schindler, R., Rüde, T. R. (2019): Nitratbaupotenzial in einem tertiären Aquifer der Wassergewinnung Amern der NEW NiederrheinWasser GmbH. Teil 2: In-situ Bestimmung des Nitratbaubaus. Korrespondenz Wasserwirtschaft 12 (1), 32–37.

Meyer, B., Schindler, R., Rüde, T. R. (2018): Nitratbaupotenzial in einem tertiären Aquifer der Wassergewinnung Amern der NEW NiederrheinWasser GmbH. Teil 1: Auswertung von hydrochemischen Daten und Sedimentanalysen. Korrespondenz Wasserwirtschaft 11 (1), 27–33.

Vortrag 6.3 (ID 244)

Separation der Denitrifikationsmechanismen an einem landwirtschaftlichen Standort durch die Kopplung von hochauflösendem hydrogeochemischem Monitoring und numerischer Modellierung

Juan Carlos Richard-Cerda¹, Matthias Bockstiegel¹, Kay Knöller², Christoph Schüth¹, Stephan Schulz¹

¹: Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Darmstadt

²: Department Catchment Hydrology, Helmholtz-Centre for Environmental Research - UFZ

Kontakt: richard.cerda@geo.tu-darmstadt.de

Der übermäßige Einsatz stickstoffhaltiger Düngemittel in der Landwirtschaft ist ein komplexes globales Problem. Die Auswirkungen redoxsensitiver Stickstoffverbindungen weiten sich auf den Stickstoffkreislauf aus und interagieren mit anderen, im Boden vorhandene redoxsensitiven Spezies. Zur Untersuchung der dabei stattfindenden Prozesse haben wir an einem landwirtschaftlichen Standort im Hessischen Ried eine hochauflösende

Monitoringstation errichtet, die mit Sensoren und Probenahmeverrichtungen ausgestattet ist. Die Station ermöglicht die hydraulische und hydrogeochemische Untersuchung sowohl in der vadosen Zone als auch im oberen Bereich des Grundwassers.

Die Probenahme erstreckte sich über einen Zeitraum von vier Jahren, in denen verschiedene Pflanzen-, Getreide- und Gemüsearten wie Dill, Sonnenblumen, Winterweizen, Spinat, Erbsen und Zuckerrüben angebaut wurden. Die beobachtete Variabilität des Redoxpotenzials im zeitlichen Verlauf und in verschiedenen Tiefen bestätigen das nicht-stationäre Verhalten der redoxreaktiven Zone, wobei diese Schwankungen mit Fluktuationen des Grundwasserspiegels einhergehen. Über die Tiefe wurden erhebliche Schwankungen der NO_3^- -Konzentrationen beobachtet, die von 0,03 bis 246,08 mg l^{-1} reichten und die Vielfalt der stickstoffbeteiligten Prozesse widerspiegeln. Stickstoffisotope bestätigen sowohl das Vorkommen von Nitrifikation aus Ammonium als auch von Denitrifikation in tieferen Schichten. Darüber hinaus beweisen tiefenabhängige Schwankungen der Sulfatkonzentration sowie Isotopenanalysen von $\delta^{34}\text{S}$ - SO_4^{2-} -Signaturen das Vorhandensein einer autotrophen Denitrifikation, bei der Schwefel als Elektronendonator genutzt wird. Für eine Abschätzung der Stoffflüsse in das Grundwasser und die Bestimmung der Denitrifikationsraten wurde ein Stofftransportmodell entwickelt, das zusätzlich mit einem Wärmetransportmodell gekoppelt ist.

Vorläufige Ergebnisse deuten auf einen durchschnittlichen Eintrag von Nitrat in das Grundwasser von 255 $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ hin, das im flachen Grundwasser jedoch nahezu vollständig abgebaut wird. Die zeitgleiche Bildung von jedoch nur 108 $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ weist auf zusätzliche heterotrophe Denitrifikation hin, bei der anstelle von Schwefel organischer Kohlenstoff als Elektronendonator genutzt wird. Dies kann anhand der erhöhten Hydrogencarbonatkonzentrationen innerhalb der reaktiven Zone gestützt werden. Des Weiteren wurden zusätzliche, durch Nitrat ausgelöste Redox-Prozesse festgestellt. Hierunter fallen unter anderem die geogene Uran-Rollfront-Mobilisierung sowie die Selen-Anreicherung an der Redox-Grenzfläche, die vermutlich durch die seleno-pyrit-induzierte Denitrifikation verursacht wird.

Vortrag 6.4 (ID 300)

Isotopenanalysen zur flächenhaften Charakterisierung der Grundwasseralter und der Nitratbelastungen

Nico Trauth¹, Heinrich Eisenmann², Anko Fischer², Michael Stöckl², Anja Stang³

¹: Björnsen Beratende Ingenieure GmbH

²: Isodetect GmbH

³: Landesamt für Umwelt, Brandenburg

Kontakt: n.trauth@bjoernsen.de

Im Zuge der Umsetzung der Düngeverordnung wurden in Deutschland in den vergangenen Jahren die Nährstoffeinträge durch die Landwirtschaft stärker kontrolliert und auch reduziert. Jedoch konnte trotz der ergriffenen Maßnahmen nur eine geringe Verbesserung des Zustandes der Grundwasserkörper beobachtet werden. Eine Ursache hierfür ist wahrscheinlich die teils lang Verweilzeit im Grundwasser, wodurch der Einfluss der Maßnahmen noch nicht feststellbar ist. Für die Erfolgskontrolle sowie zur Planung der zukünftigen Maßnahmen durch die Landesbehörden ist daher die Kenntnis des Grundwasseralters von Bedeutung. Zu dessen Bestimmung eignet sich die Methode mittels Tritium- und Helium-Isotopen (T/He), da Tritium mit bekannter Halbwertszeit zu Helium-3 zerfällt.

Neben den diffusen Nährstoffeinträgen durch die Landwirtschaft können auch punktuelle Einträge über Abwässer (Leckagen im Abwassersystem, Sickergruben) in das Grundwasser eingetragen werden. Eine Unterscheidung ist über die Analyse von organischen Spurenstoffen möglich. So ist bei einem Nachweis von Arzneimitteln, Koffein, künstlichen Süßstoffen oder Wasch- und Reinigungsmitteln von einem Eintrag durch Siedlungsabwasser auszugehen. Des Weiteren sind die Verhältnisse zwischen schweren und leichten Isotopen des Nitrats ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) und Bors ($^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$) dazu geeignet, Aussagen über die Nitratherkunft zu treffen. Über die Nitrat-Isotope kann auch der Abbau von Nitrat über die Denitrifikation ermittelt werden.

Im Zuge von aktuellen Projekten in Brandenburg (LfU) wurde oberflächennahes Grundwasser aus porösen Aquiferen beprobt und die oben genannten Methoden angewendet. Die Analysenergebnisse wurden im Kontext der hydrogeologischen Gegebenheiten ausgewertet.

Das beprobte Grundwasser enthält zumeist noch Tritium oberhalb des Detektionslimits, was auf ein Alter jünger als ~70 Jahren hinweist. Die Grundwasseralter zeigen über den gesamten Datensatz hinweg einen plausiblen Zusammenhang mit dem jeweiligen hydrochemischen Milieu (Je niedriger das Redox-Potenzial, desto älter das Grundwasser) sowie mit der Tiefenlage der beprobten Filterstrecke (Je tiefer, desto älter das Grundwasser).

Die Nitrat- und Borisotope deuten für die meisten Proben als Nitratherkunft auf Gülle, Abwasser oder Bodenstickstoff hin. In einigen Grundwasserproben konnte Denitrifikation nachgewiesen werden, da hier die Nitratkonzentration niedrig ist und eine erhöhte Fraktionierung der Nitrat-Isotope stattfand. Auch sind die Sauerstoffkonzentrationen umso niedriger, je höher die Fraktionierung der Nitrat-Isotope fortgeschritten ist, was auf den anaeroben Prozess der Denitrifikation hinweist (Abbildung).

Die Ergebnisse der Studien liefern für das Landesamt eine Arbeitsgrundlage zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie mittels angepassten Maßnahmenkonzepten.

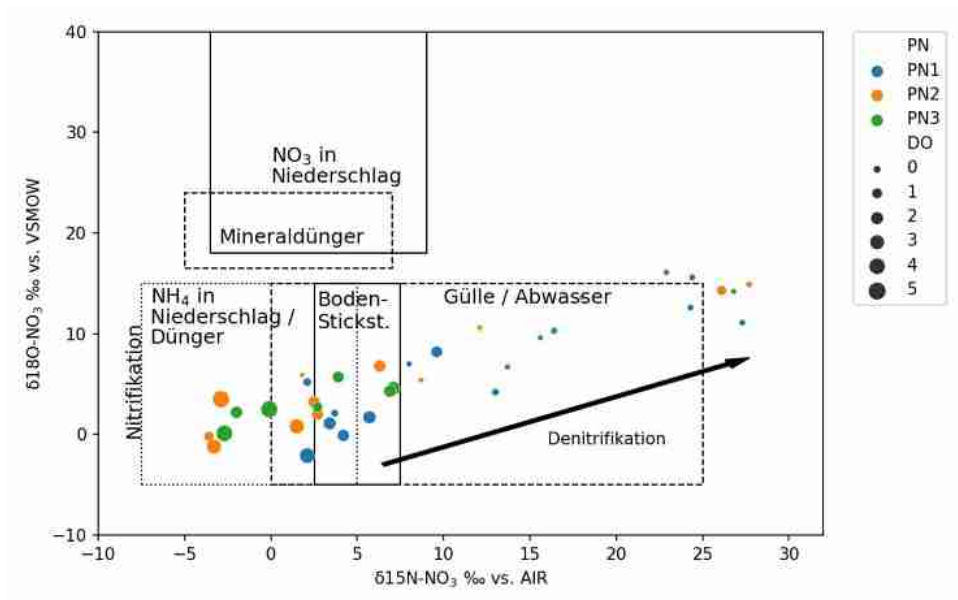


Abb. 1: Isotopenanalyse.

Vortrag 6.5 (ID 231)

Hochfrequente Nitratdynamik – Extremereignisse, Repräsentativität und Brunnenschäden

Johannes Haas^{1,2}, Steffen Birk², Tereza Kunkelova², Christian Griebler³

^{1:} GEOCONSULT ZT GmbH, Puch bei Hallein, Österreich

^{2:} Institut für Erdwissenschaften, NAWI Graz Geozentrum, Universität Graz, Österreich

^{3:} Department für Funktionelle und Evolutionäre Ökologie, Universität Wien, Österreich

Kontakt: johannes.haas@outlook.com

Mittels UV-Vis Sonden lassen sich hochfrequente Nitratkonzentrationszeitreihen aus dem Grundwasser erfassen die zu ausgewählten Zeitpunkten eine hohe Übereinstimmung mit Laboranalysen zeigen. Auch zeigen die Werte im Pegelwasser hohe Übereinstimmung mit den Werten aus der Pumpprobe, d. h. die In-situ Nitratwerte sind mit konventionell beprobten Nitratwerten vergleichbar und zeigen eine sehr hohe Dynamik, i.e. von 4 mg/l in einer Stunde bis 26 mg/l in nur 6h (Haas et al. 2023). Im weiteren Betrieb der UV-Vis Sonden zeigten sich noch größere (bis zu 42 mg/l in 6 h) Dynamiken, wobei ein Zusammenhang zwischen Bewuchs (Mais, Ölkürbis, Brache) und Extremereignissen (Starkregen und Überflutungen in der Südsteiermark, siehe z. B. ORF (2023)) ersichtlich ist.

Hierdurch verschärft sich die in Haas et al. (2023) angesprochene Repräsentativitätsproblematik weiter: Wie ist eine Stichtagsmessung (an der diverse rechtliche Fragestellungen hängen können) zu werten, wenn der Nitratgehalt im Grundwasser schon einen Tag früher oder später um fast 50 mg/l höher oder niedriger sein kann, insbesondere wenn davon auszugehen ist das aufgrund des Klimawandels solche Schwankungen häufiger und stärker werden?

Die Möglichkeit, dass es sich hierbei größtenteils um Artefakte, bedingt durch einen fehlerhaften oder beschädigten Pegelausbau handelt, ist nicht auszuschließen, schafft jedoch für die Repräsentativitätsproblematik keine Abhilfe. Hierzu müsste ein schadhafter Pegelausbau erst durch teure und aufwendige Maßnahmen festgestellt werden und ein Ersatzpegel müsste gebohrt und wiederum geprüft werden. Wir schlagen daher vor, das wichtige Messstellen mittels UV-Vis Sonden charakterisiert werden um Wissen über deren mögliche, hochfrequente Nitratdynamik zu erlangen, wodurch die Repräsentativität der Werte eingeschätzt werden kann. Alternativ (bzw. zusätzlich) sollten Beprobungen (sofern sie nicht gezielt ereignisbasiert sind) nur in längeren, stabilen Witterungsphasen durchgeführt werden.

Haas, J., Retter, A., Kornfeind, L., Wagner, C., Griebler, C. Birk, S. High-resolution monitoring of groundwater quality in unconsolidated aquifers using UV-Vis spectrometry. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 28, 53–66 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00767-022-00540-3>

ORF, Teile der Südsteiermark überflutet. <https://steiermark.orf.at/stories/3218674/> Grundwasser drückt nach, Erdbeben drohen. <https://orf.at/stories/3326500/> (2023)

Diese Arbeit wurde durch die österreichische Akademie der Wissenschaften (ÖAW) im Rahmen der ESS Projekte 2018 (<https://www.oew.ac.at/ess/ess-projekte-2018/>), „Impact of extreme events on the quantity and quality of groundwater in alpine regions – multiple-index application for an integrative hydrogeo-ecological assessment (Integrative Groundwater Assessment)“ gefördert.

Stickstoff-Argon-Methode (Stickstoff-Exzess) als Routinemonitoring für Denitrifikation in Grundwassermessstellen: Methode und erste Messergebnisse

Vera Winde

Hydroisotop GmbH, Deutschland

Kontakt: vw@hydroisotop.de

Im Rahmen des Grundwassermonitorings ist es wichtig die Konzentration an Nitrat und dessen Ursprung und Abbau zu verstehen und zu überwachen. Die Bestimmung der Nitratkonzentration allein gibt dabei keine Hinweise auf die Eintragsquellen, - pfade und dessen Abbaupotenzial.

Die Allgemeine Verwaltungsvorschrift Gebietsausweisung (AVV GeA) wurde Mitte 2022 geändert. Diese regelt die Methodik der Gebietsausweisung in die Kategorien gefährdete und nicht gefährdete Gebiete. Durch die Änderung wurde zusätzlich auch die Kategorie Gebiete mit denitrifizierenden Verhältnissen eingeführt. Dadurch müssen die mit Nitrat belasteten Gebiete neuausgewiesen werden. Die Rechtsgrundlage zur Ausweisung der mit Nitrat belasteten Gebiete ist die Düngeverordnung. Um diese Neuausweisung durchzuführen, sollen bei den Grundwassermessstellen in den Gebieten das Vorhandensein denitrifizierender Verhältnisse anhand der Stickstoff-Argon-Untersuchung landesweit geprüft werden.

Die Stickstoff-Argon-Methode ermöglicht die Bestimmung der durch Denitrifikation in das Grundwasser eingetragene Nitrat. Die Grundlage der Methode ist, dass Stickstoff und Argon in der Atmosphäre in einem bestimmten Verhältnis vorkommen. Wenn Nitrat durch Denitrifikation im Grundwasser zu Stickstoff abgebaut wird, wird das Stickstoff zu Argon-Verhältnis im Grundwasser verändert. Durch die Messung dieses Verhältnisses kann die Konzentration an ursprünglich in das Grundwasser eingetragene Nitrat (Nitrateintragskonzentration) berechnet werden. Diese Methode ist das einzige Messverfahren, bei dem quantitative Ergebnisse zum Nitratabbau erhalten werden.

Im Rahmen von Pilotmessungen an ausgewählten Grundwassermessstellen wurde geprüft inwieweit die Stickstoff-Argon-Methode allein und in Kombination mit weiteren Isotopenparametern ($^{18}\text{O-H}_2\text{O}$, $^2\text{H-H}_2\text{O}$, $^3\text{H-H}_2\text{O}$, $^{15}\text{N-NO}_3$, $^{18}\text{O-NO}_3$) alltagstauglich ist, eine Einschätzung der Denitrifikation am Entnahmestandort zu treffen und dies in die Routine der Monitoringprogramme zu integrieren. Zusätzlich haben wir versucht mit den ergänzenden Analysen die möglichen Nitratquellen, Herkunft des Wassers (Einzugsgebiet) zu bestimmen sowie Einschätzungen zum Nitratabbau zu machen.

7 Neue Stoffe in der Grundwassersanierung

21.03.2024, 15:30 - 16:45, Konferenzraum 2

Michael Altenbockum (Altenbockum & Partner, Geologen)

Thomas Oertel (Wasserbeschaffung Niederrhein Westfalen GmbH)

Vortrag 7.1 (ID 340)

„Neue Schadstoffe“ aus Sicht der Trinkwassergewinnung

Hans Ulrich Dahme, Laura Wiegand

*IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser Beratungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH,
Deutschland*

Kontakt: h.dahme@iww-online.de

Grundwasser und Uferfiltrate sind die wichtigsten Ressourcen für die Trinkwasseraufbereitung und deren Schutz endet nicht an den Grenzen der Wasserschutzgebiete. Schadstoffe werden in der Regel von außen in die Wasserschutzgebiete eingetragen. Nach der neuen Trinkwasserverordnung (TrinkwV) müssen Versorger eine Risikoabschätzung ihrer Quellen durchführen [1]. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, welche Industriechemikalien für die Wasserwirtschaft relevant sind. Die Stoffe müssen einerseits die notwendige Mobilität aufweisen, um die natürlichen und künstliche Barrieren wie Filter im Wasserkreislauf zu überwinden sowie andererseits die notwendige Persistenz besitzen, um eine ausreichende Verweilzeit im Wasserkreislauf aufzuweisen. Dazu hat das Umweltbundesamt (UBA) einige Forschungsvorhaben vergeben, an denen das IWW beteiligt ist. Die genannten Kriterien treffen für die Substanzgruppe der per- und polyfluorierten Alkylverbindungen (PFAS) zu. Das Projekt Mikroruhr zeigte bereits, dass PFAS wie PFOS und PFOA größere Bedeutung für die Trinkwasserversorgung haben, wobei erst mit der neuen TrinkwV von 2023 20 Verbindungen reguliert wurden. Um einen größeren, möglichst umfassenden Überblick über die Befundlage an PFAS in Trinkwässern und damit über die Betroffenheit der deutschen Wasserversorgung zu bekommen, konnten bisher in einer Datenbank rund 1.100 Ergebnis-Datensätze für PFAS aus verschiedenen deutschen Laboratorien gesammelt werden [3]. Immerhin wird bei 3,8 % der Proben der zukünftig geltende Grenzwert von 0,1 µg/L für die Summe der 20 PFAS in Trinkwasser überschritten.

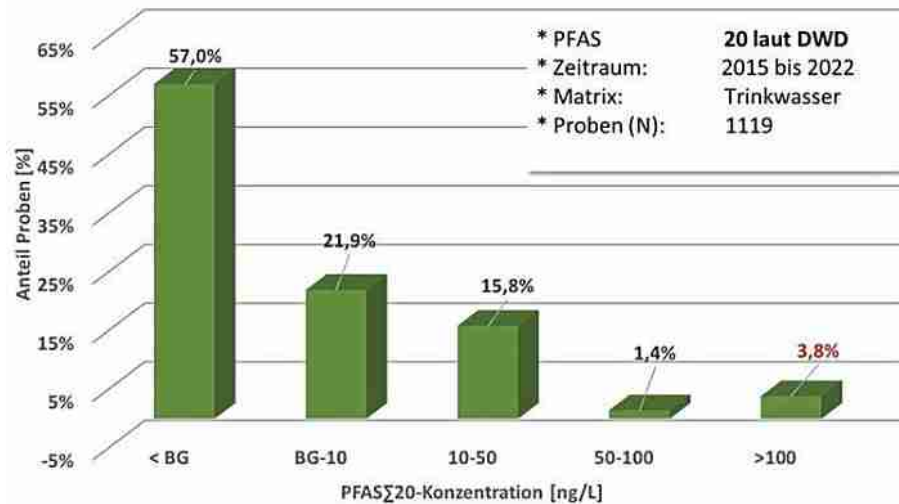


Abb. 1: PFASΣ20-Konzentrationen in Trinkwasserproben 2015-2022.

Zu der Substanzgruppe der PFAS gehören mittlerweile bis zu 10.000 Verbindungen, so dass zwischen den Parametern in den gesetzlichen Regulierungen und den möglichen Verbindungen in der Umwelt eine große Lücke klappt. Momentan existiert für die große Anzahl an PFAS-Verbindungen keine Messmethode, die alle relevanten Fragestellungen zufriedenstellend beantworten kann. Alle vorhandenen Messmethoden haben Ihre Vor- und Nachteile. Die LC-MS/MS Messtechnik zeigt Informationen zur Struktur, liefert die notwendigen Bestimmungsgrenzen und kann nach vorhandenen Normen durchgeführt werden. Heute können mehr als 50 Einzelverbindungen quantifiziert werden. Summenparameter wie adsorbierbares organisches Fluor AOF erfasst eine größere Anzahl an PFAS-Verbindungen, jedoch ist lediglich eine Bestimmungsgrenze von 1 µg/L erreichbar. Diese Bestimmungsgrenze ist für Trinkwasser nicht ausreichend. Die Analytik von PFAS stellt lediglich ein Beispiel von möglichen Schadstoffeinträgen dar. Im Beitrag sollen die unterschiedlichen analytischen Möglichkeiten dargestellt werden und welche Schadstoffe im Fokus beim Trinkwasser stehen. Neben den eigentlichen Ziel-Analyten müssen auch Transformationsprodukte mit in die Betrachtung einbezogen werden. Der zur Behandlung von Diabetes eingesetzte Wirkstoff Metformin wandelt sich zum Beispiel in der Umwelt zu Guanylharnstoff um. Transformationsprodukte sind ebenfalls bei Pflanzenschutzmitteln (PSM) sowie weiteren pharmazeutischen Wirkstoffen zu beobachten.

In diesem Spannungsfeld befindet sich die Analytik grundsätzlich, da mehr organische Verbindungen im Wasserkreislauf vorhanden sein können, als Parameter reguliert sind. Die Non-Target Analytik bietet eine weitere Möglichkeit, um den Schadstoffeintrag in den unterschiedlichen Wasserkörpern besser zu verstehen. Durch die vorhandenen

Regulierungen in den unterschiedlichen Regelwerken betrachten wir momentan lediglich die Spitze und nicht den gesamten Eisberg.

Vortrag 7.2 (ID 284)

Quellenidentifizierung und Abbaubewertung von PFAS mittels komponentenspezifischer Isotopenanalyse

Kevin Kuntze¹, Steffen Kümme², Anett Georgi², Heinrich Eisenmann¹, Anko Fischer¹

¹: Isodetect GmbH

²: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ

Kontakt: kuntze@isodetect.de

Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS) sind eine äußerst vielfältige Gruppe von Xenobiotika mit über 5000 verschiedenen bekannten Verbindungen. PFAS sind extrem stabil, gelten als nahezu biologisch nicht abbaubar und viele PFAS sind für Menschen und Tiere giftig und stehen im Verdacht, krebserregend zu sein. Sie sind daher eine besonders besorgniserregende neue Schadstoffklasse. In den letzten Jahren ist das enorme Ausmaß großflächiger Grundwasserverunreinigungen mit PFAS nicht nur in Deutschland deutlich geworden.

Die erfolgreiche Bewertung von Sanierungskonzepten und die Identifizierung von PFAS-Quellen erfordert geeignete Überwachungsmethoden. Die komponentenspezifische Analyse stabiler Isotope (CSIA) ist die aussagekräftigste Methode, um eine fundierte Quellencharakterisierung anhand des isotopischen Fingerabdrucks sowie eine Bewertung des Schadstoffabbaus vorzunehmen, da Änderungen der Isotopenverhältnisse direkt mit diesem Prozess verbunden sind. Wir werden erstmalig entwickelte innovative Methoden für empfindliche Kohlenstoff- und Schwefelisotopenanalysen von PFAS für eine solide Quellenidentifizierung und Abbaubewertung dieser prioritären Schadstoffklasse vorstellen.

Die größten Herausforderungen bei der Entwicklung einer Kohlenstoffisotopenanalyse für PFAS sind die begrenzte Anwendbarkeit der Gaschromatographie-Isotopenverhältnis-Massenspektrometrie (GC-IRMS), die vollständige Umwandlung der thermostabilen Verbindungen in CO₂ als Messgas und die Bildung unerwünschter Nebenprodukte bei der Umwandlung, z. B. Flusssäure (HF). Mit der erstmalig etablierten CSIA-Methode wurden Kohlenstoffisotopenverhältnisse von perfluorierten Carbonsäuren (PFCAs) mit einer Standardabweichung von ≤0,5 ‰ bestimmt. Es war möglich, PFOA-Chargen verschiedener Hersteller in einem Bereich von bis zu 20 ‰ eindeutig zu unterscheiden, was die Anwendbarkeit für forensische Untersuchungen zeigt. Es wurde eine Datenbank mit

Quellenisotopensignaturen von mit PFCA's kontaminierten Feldproben entwickelt. Darüber hinaus wurde die Anwendbarkeit dieser Kohlenstoffisotopenanalyse für die Bewertung von Sanierungsmaßnahmen durch Abbauprobieren mittels reduktiver Defluorierung unter Verwendung hydrierter Elektronen sowie durch chemischen Abbau von PFOA unter Verwendung von Hitze-/FeS-aktiviertem Persulfat nachgewiesen. Im Verlauf des PFOA-Abbaus wurden die Kohlenstoff-Isotopenverhältnisse zunehmend positiv, was einen PFOA-Abbau belegt.

Zusätzlich zur Kohlenstoffisotopenanalyse eröffnet die Schwefelisotopenanalyse ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$, $^{33}\text{S}/^{32}\text{S}$) Möglichkeiten zur Bewertung des Abbaus und zur Identifizierung der Quellen von PFAS, da die ersten Reaktionsschritte meist an funktionellen Schwefelgruppen der PFAS stattfinden. Daher hat die Schwefelisotopenanalyse ein hohes Potenzial für die Bewertung des Abbaus von schwefelhaltigen PFAS (z. B. PFOS). Durch die Verwendung von schwefelhaltigen Teststandards konnte eine hohe analytische Präzision und Genauigkeit der jeweiligen Schwefelisotopenverhältnisse nachgewiesen werden.

Die Methode zur komponentenspezifischen Isotopenanalyse geht deutlich über klassische, auf einfachen Konzentrationsmessungen basierende Überwachungskonzepte hinaus. Darüber hinaus ermöglicht eine Datenbank der abbaubedingten Veränderungen der Isotopenverhältnisse und der isotopischen Fingerabdrücke von PFAS eine zuverlässige Erfolgskontrolle nachhaltiger PFAS-Sanierungsprozesse sowie eine präzisere Identifizierung von PFAS-Quellen.

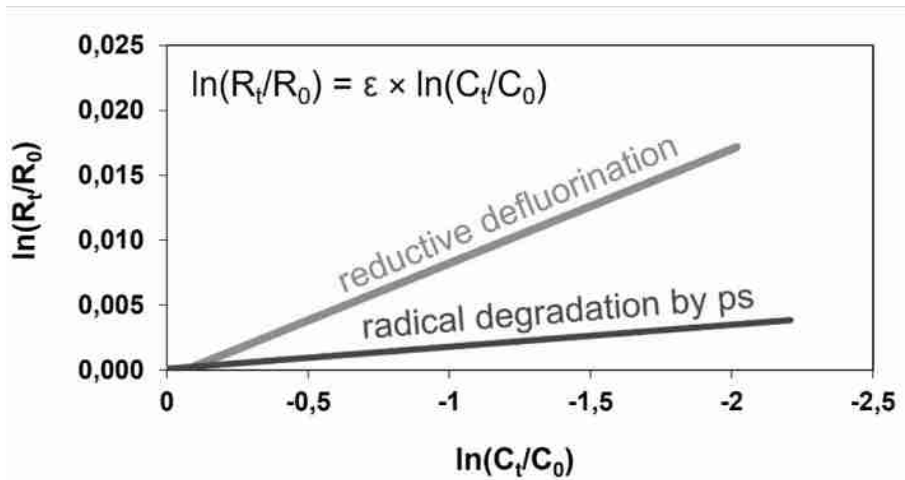


Abb. 1: Berechnung des Isotopenfraktionierungsfaktor Epsilon ϵ mittels der Rayleigh-Gleichung während des reduktiven (reductive defluorination) und oxidativen (radical degradation by ps) Abbaus von PFOA.

Vortrag 7.3 (ID 269)

Phytoscreening und -remediation von PFAS im Landkreis Rastatt: Was ist möglich?

Philipp Blum¹, Andreas Würth¹, Melanie Mechler², Kathrin Menberg¹, Mehmet A. Ikipinar³, Christian Beck¹, Peter Martus³, Runa S.Boeddinghaus², Joshua Walter⁴, Reiner Söhlmann⁴

¹: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Deutschland

²: Landwirtschaftliche Technologiezentrum (LTZ) Augustenberg

³: AECOM, Deutschland

⁴: Landratsamt Rastatt

Kontakt: blum@kit.edu

Ziel dieser Studie war die Durchführung eines Phytoscreenings und die Machbarkeit einer Phytoremediation von Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS) im Landkreis Rastatt. Hierfür wurden die Blätter von drei Baumarten, der Weißweide, der Schwarzpappel und der Schwarzerle beprobt, um die saisonalen und jährlichen Schwankungen der PFAS-Konzentrationen zu ermitteln. Die Ergebnisse des Phytoscreenings wiesen eindeutig auf art-spezifische Unterschiede hin, wobei die höchsten PFAS-Summenkonzentrationen $\Sigma 23$ im Oktober für Weißweide (max. $1800 \mu\text{g kg}^{-1}$) beobachtet wurden, gefolgt von Schwarzpappel (max. $32 \mu\text{g kg}^{-1}$) und Schwarzerle (max. $13 \mu\text{g kg}^{-1}$). Bei den Hauptinhaltsstoffen in den Blättern handelte es sich um hoch mobile kurzkettige Perfluoralkylcarbonsäuren (PFCA). Im Gegensatz dazu wurde die PFAS-Zusammensetzung im Boden aufgrund der geringeren Mobilität von langkettigen PFCA, PFOA und PFDA dominiert, wobei die $\Sigma 23\text{PFAS}$ zwischen $66\text{--}420 \mu\text{g kg}^{-1}$ im Feststoff und $0,18\text{--}26 \mu\text{g L}^{-1}$ im Eluat lagen. Die PFAS-Zusammensetzung im Grundwasser war mit dem in den Blättern beobachteten Spektrum vergleichbar. Die räumlichen Interpolationen von PFAS im Grundwasser und in den Blättern stimmen gut überein und belegen die erfolgreiche Anwendung des Phytoscreenings zur Erkennung und Abgrenzung der Auswirkungen der untersuchten PFAS auf das Grundwasser. Abschließend wurde die Machbarkeit einer Phytoremediation an zwei Standorten im Landkreis Rastatt exemplarisch untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Pflanzenaufnahme der Bestandsbäume minimal ist und die Effizienz dieser Sanierungsmaßnahme als sehr gering eingestuft werden muss.

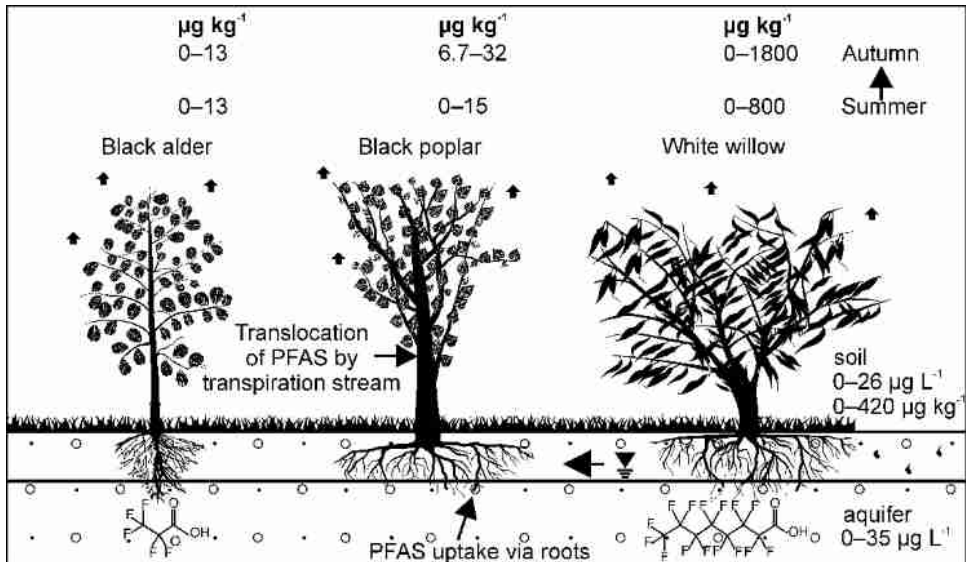


Abb. 1: Phytoscreening von PFAS bei verschiedenen Baumarten.

Vortrag 7.4 (ID 182)

GCI-Rohrpassivsammler –Eine Innovation zur zeitintegrativen Überwachung von Wasserinhaltsstoffen

Jörg-Helge Hein¹, T. Hensel², W. Pinkoss¹, F. Jenn¹, R. Bloch², P. Simmons²,
 F. Zietzschmann²

¹ GCI GmbH, Bahnhofstr. 19, 15711 Königs Wusterhausen

² Berliner Wasserbetriebe - Labor, Motardstr. 35, 13629 Berlin

Kontakt: joerg-helge.hein@gci-kw.de

Der Rohrpassivsammler ist eine innovative Messeinrichtung, die unter Nutzung der Anreicherung von Wasserinhaltsstoffen an Kollektormaterialien (Passivsammler) eine zeitintegrative Überwachung bei variierenden Konzentrationen für Spurenstoffe über lange Zeiträume ermöglicht. Ein weiterer Aspekt ist der sichere Ausschluss von Belastungen durch Permanentüberwachung. Der optimierte Messwasserstrom und die stoffspezifische Kalibrierung ermöglichen eine hohe Sensitivität mit quantitativer Auswertung der Kollektionsbefunde. Der Vorteil liegt in der lückenlosen und integralen Überwachung über lange Zeiträume bei gleichzeitig geringem Aufwand für Laboranalysen.

Das patentierte Messprinzip (Patent-Nr. DE 10 2016 003 8430, 2017) kann an allen Wasservorkommen eingesetzt werden. Insbesondere ist eine Verwendung in unter-Druck-

stehenden Anlagen realisierbar. Vielseitig erprobt ist der Einsatz im Bypass von Brunnen- und geklärten Abwasserförderströmen (s. Abb. 1), zur Detektion von sprengstofftypischen Verbindungen (STV), Industriechemikalien und Pharmaka. Die Beschaffenheitsüberwachung industrieller Indirekteinleiter wurde erfolgreich getestet. Derzeit wird u. a. die Anwendung für die Erfassung von PFAS an einem Wasserwerksstandort vorbereitet. Ziel ist die langfristige Überwachung der Einhaltung zulässiger Grenzwerte im Reinwasser am Werksausgang des WW. Die Kalibrierung wird an einem durch PFAS-belasteten Brunnenförderstrom durchgeführt. Betriebs- und Begleitparameter werden digital erfasst und mittels Datenfernübertragung aus dem Feldeinsatz an die WEB-Domain der GCI (Rohrpassivsammler.de) übertragen.

Entwicklungs- und Forschungspartner sind die Berliner Wasserbetriebe (BWB), das Fraunhofer Institut (IZI-BB), die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), die Technische Hochschule Wildau (TH Wildau) und das Institut für Bioprozess- und Analysenmesstechnik (IBA). Die Entwicklungen wurden und werden durch Forschungsgelder des Bundes (ZIM) und des Landes Brandenburg (BIG ILB) gefördert.

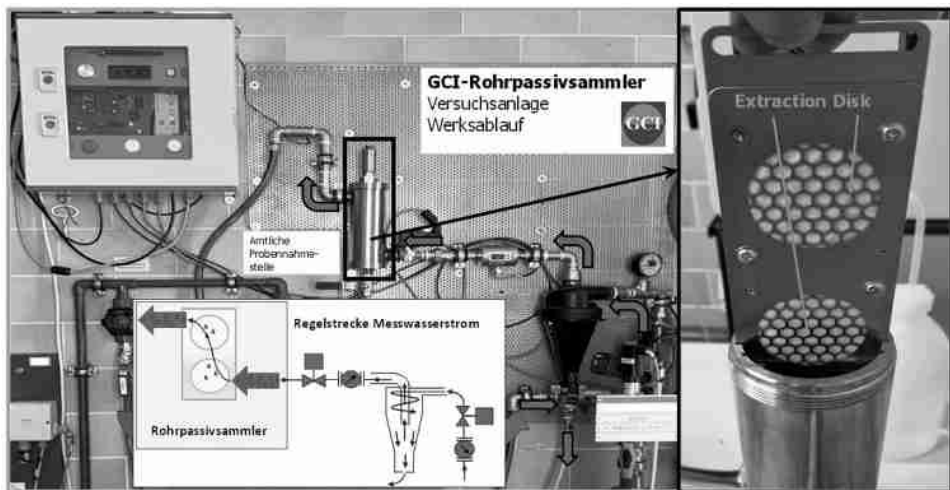


Abb. 1: GCI-Rohrpassivsammler

8 Fachsitzung gemeinsam mit IAH: Gase und Isotope im Grundwasser

21.03.2024, 11:00 - 12:30, Konferenzraum 2

Johannes Barth (FAU Erlangen-Nürnberg)

Judith Flügge (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH)

Christoph Neukum (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

Robert van Geldern (FAU Erlangen-Nürnberg, GeoZentrum Nordbayern)

Vortrag 8.1 (ID 158)

Verteilung des Tritium-Helium-Alters von Grundwasser in der Norddeutschen Tiefebene

*Annika Desens^{1,2}, Georg Houben², Jürgen Sültenfuß³, Vincent Post^{4,2},
Gudrun Massmann⁵*

¹: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)

²: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

³: Institute of Environmental Physics, University of Bremen

⁴: Edinsi Groundwater, Niederlande

⁵: Institute of Biology and Environmental Sciences, Carl von Ossietzky University of Oldenburg

Kontakt: annika.desens@nlwkn.niedersachsen.de

Das Alter von Grundwasser spielt bei vielen hydrogeologischen Fragestellungen, wie z. B. bei Untersuchungen zum Transport von Schadstoffen (z. B. Nitrat, Pestizide.), für Abschätzungen der Grundwasserneubildungsrate und zur Kalibrierung von numerischen Grundwassermodellen eine wichtige Rolle. Daneben ist es auch als ein Ausschlusskriterium für ein Endlager für hochradioaktiven Abfall definiert. Es ist aber auch eine ungemein komplex zu beschreibende Größe.

Im Rahmen eines von der BGR durchgeführten Projektes sind für die Norddeutsche Tiefebene knapp 2500 Tritium-Helium Alter von ca. 1000 Proben aus den letzten 20 Jahren ausgewertet worden. Darauf basierend wurden die Einflüsse der natürlichen und technisch bedingten Variabilität auf die Tritium-Helium-Alter analysiert, einschließlich Filtertiefe und -länge, Neubildungsrate und klimatischer Effekte. Ebenso wurden die Tritium-

Konzentrationen zum Zeitpunkt der Infiltration mit den Konzentrationen im Input verglichen und auf anthropogene Beeinflussung, z. B. durch Uferfiltration hin untersucht.

Im Ausblick stehen Untersuchungen zu Verteilung von Tritium in anderen hydrogeologischen Räumen Deutschlands.

Vortrag 8.2 (ID 175)

¹⁴C-Grundwasseralter als Indikator für anthropogene Veränderungen der Grundwasserströmung im Mekong Delta, Vietnam

Karsten Osenbrück, Anke Steinel, Nelly Montcoudiol, Roland Bäumle,

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Deutschland

Kontakt: karsten.osenbrueck@bgr.de

Das Mekong-Delta in Vietnam erstreckt sich über eine Fläche von ca. 40 000 km². Seit den 1990er Jahren führte starkes Wachstum der landwirtschaftlichen Produktion und der Bevölkerung zu einem kontinuierlichen Absinken der Grundwasserspiegel in weiten Teilen des Deltas. Damit verbunden sind möglicherweise auch gravierende Folgen für die Grundwasserqualität. Ziel dieser Studie war die Entwicklung eines konzeptionellen Modells der hydrogeochemischen Entwicklung im geschichteten Aquifersystem des Mekong-Deltas. Ein wichtiger Schritt dabei ist die zuverlässige Quantifizierung des Grundwasseralters anhand der Kohlenstoffisotope ¹³C und ¹⁴C.

Im März und April 2021 wurden insgesamt 119 Grundwasserproben aus tieferen Grundwasserstockwerken im Mekong Delta entnommen. Analysiert wurden Hauptionen und Spurenelemente sowie die stabilen Isotope von Wasser ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) und die Isotope vom gelösten anorganischen Kohlenstoff ($\delta^{13}\text{C-DIC}$, $^{14}\text{C-DIC}$). Basierend auf den Ergebnissen wurden die relevanten hydrochemischen Prozesse identifiziert und deren räumliche Verteilung mit Hilfe von multivariaten statistischen Methoden sowie geochemischen und reaktiven Transportmodellen untersucht. Zur Bestimmung der ¹⁴C-Anfangsgehalte wurde durch Modellierung der potenziell in der ungesättigten Zone ablaufenden geochemischen Prozesse ein Ensemble von Grundwasservarianten erstellt. Diese Varianten wurden anschließend mit den gemessenen Grundwasserproben in einer Massenbilanz-Modellierung der relevanten Elemente und Isotope mittels PHREEQC verknüpft.

In den tieferen Aquiferen überwiegen Na-Cl bis Na-HCO₃ Grundwasser-Typen mit einer großen Variation der gelösten Stoffkonzentration (TDS: 0,4 bis 30,8 g/L). Neben der Lösung von reaktiven Mineralien (u. a. Karbonate, Pyrit) stellen die Mischung mit Meerwasser sowie ein damit verbundener Kationenaustausch die relevanten hydrochemischen Prozesse dar. Die hochsaline Grundwasserkomponente ist wahrscheinlich auf einen Austausch

mit konnatem Meerwasser in den marinen Sedimenten des Deltas zurückzuführen. Die insgesamt hohen DIC-Konzentrationen (bis 15 mmol/L) resultieren aus unterschiedlichen Quellen, wie der Gleichgewichtseinstellung mit Boden-CO₂, Lösung von Karbonaten, Reduktion von Sulfat durch organischen Kohlenstoff und der Zumischung von Meerwasser-DIC. Dies spiegelt sich auch in der großen Variation der $\delta^{13}\text{C}$ -DIC-Werte ohne klare Korrelationen mit DIC- oder den ¹⁴C-Gehalten wider.

Nach Korrektur der hydrochemischen Prozesse ergeben sich ¹⁴C-Grundwasseralter in einem Bereich von ca. 6 bis mehr als 30 tausend Jahre, was für eine Neubildung des Grundwassers im Zeitraum niedriger Meerwasserstände im Oberen Pleistozän spricht. Entgegen der Erwartung zeigen die ¹⁴C-Alter keine klare Altersentwicklung entlang der vermuteten Fließrichtung oder der Tiefenlage des Grundwassers. Ein möglicher Grund dafür könnte der Einfluss von vertikalen Fließ- bzw. Leakage-Prozessen durch die gering durchlässigen Tonschichten sein, die zumindest lokal in einigen Bereichen des Deltas die ursprünglich horizontale Grundwasserströmung überprägen. Die fehlenden räumlichen Trends im ¹⁴C-Alter liefern damit Hinweise auf Änderungen der Grundwasserströmung, vermutlich verursacht, oder zumindest verstärkt, durch die intensiven Grundwasserentnahmen der letzten Dekaden und die damit verbundene starke regionale Grundwasserabsenkung.

Vortrag 8.3 (ID 226)

Mineralwässer: Hydrochemie und Isotopenverhältnisse als Werkzeuge zur Beurteilung ihrer Genese

Diana Burghardt¹, Frank Haubrich², Doreen Degenhardt¹

¹: TU Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft

²: G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH

Kontakt: diana.burghardt@tu-dresden.de

Dem Verband deutscher Mineralbrunnenbetreiber (VDM) zufolge werden in Deutschland aktuell rund 150 Mineralbrunnen betrieben. Mehr als 500 Mineralwässer werden dadurch in den Handel gebracht. Oftmals versprechen die Mineralbrunnenbetreiber mit ihren Internetauftritten ‚jahrhunderte alte‘ Wässer oder ‚Mineralwässer aus großen Tiefen‘. Lassen sich diese pauschalen Einordnungen auch durch Hydrochemie und Stabilisotopenverhältnisse der Mineralwässer und des darin gelösten Sulfates bestätigen? Dieser Frage wird in unserem Institut seit einigen Jahren im Rahmen von Studienarbeiten nachgegangen. Im Vortrag soll das Vorgehen der Beurteilung anhand ausgewählter Mineralwässer vorgestellt werden.

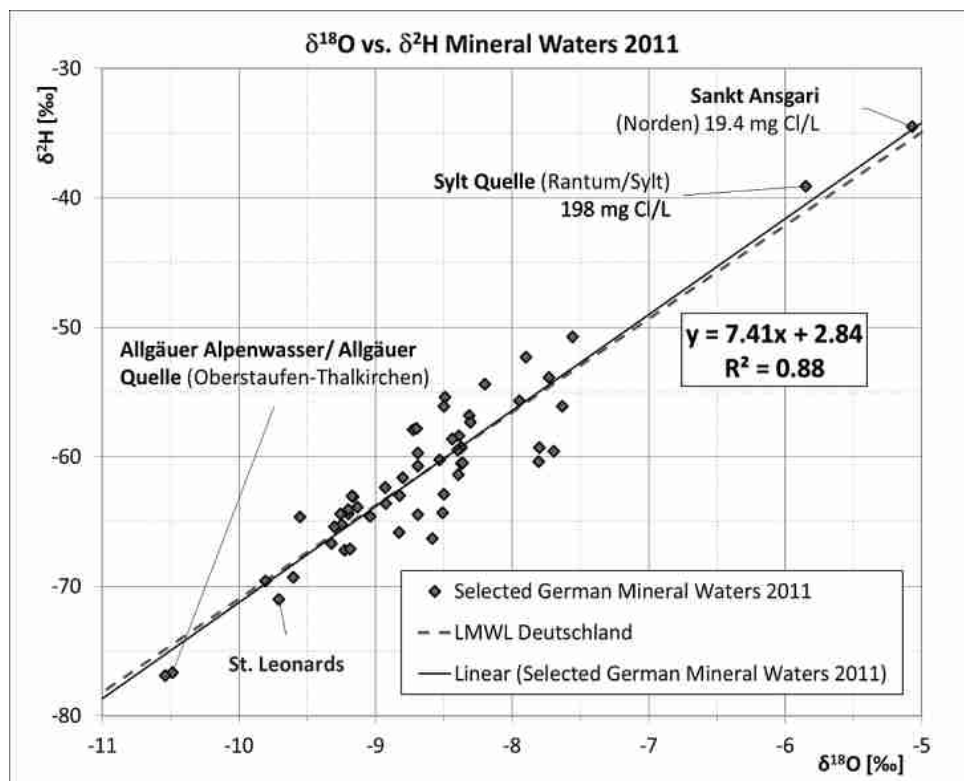


Abb. 1: Stabilisotopenverhältnisse verschiedener Mineralwässer.

Vortrag 8.4 (ID 315)

Wasser- und Kohlenstoff-Transfers unter dem Einfluss von submarinem Grundwasser-Abfluss im nördlichsten deutschen Tidebecken: eine isotopische Perspektive

*Michael Ernst Böttcher^{1,2,3}, Anna-Kathrina Jenner¹,
Cátia Milene Ehlert von Ahn^{1,4}, Antonia Schell¹, Patricia Roeser^{1,5},
Ramona Riedel⁶, Benjamin-S. Gilfedder⁶, Sebastian Janßen⁴, Nils Moosdorf⁴,
Johannes J. Rick⁷, Justus E. E. von Beusekom⁷, Carla Nantke¹, Iris Schmiedinger¹*

¹: Geochemie & Isotopen-Biogeochemie, Leibniz IOW, Deutschland

²: Marine Geochemie, Universität Greifswald, Deutschland

³: Interdisziplinäre Fakultät, Universität Rostock, Deutschland

⁴: ZMT, Bremen, Deutschland

⁵: Umweltgeologie, Universität Bonn, Deutschland

⁶: Limnische Forschungsanstalt, Universität Bayreuth, Deutschland

⁷: AWI Sylt, Deutschland

Kontakt: michael.boettcher@io-warnemuende.de

Submariner Grundwasserabfluss (SGD) verbindet die Wasser- und einige Elementkreisläufe an Land mit dem marinen Küstenraum und führt zu Bereichen steiler biogeochemischer Gradienten, die sich z. B. auf den Transport und die Transformation von Kohlenstoff-Spezies auswirken. Die Rolle, die ober- und unterirdische Frischwasserabflüsse für die Wasser- und Elementbilanzen in Küstenökosystemen spielen, ist weiterhin Gegenstand intensiver Erforschung. Die Mischungsprozesse von Süß- und Salzwässern werden mittels verschiedener stabiler Isotopensysteme und hydrochemischer Variablen verfolgt. Wir berichten hier über die Ergebnisse von Wassersäulen- und Porenwasser-Untersuchungen aus dem Königshafen (Sylt) und potenzieller Mischungs-Endglieder. Neben gelösten Nährstoff-, Haupt- und Spurenstoffen, wurden die Verhältnisse der H- und O-Isotopen des Wassers sowie der C-Isotope des gelösten anorganischen Kohlenstoffs (DIC) verfolgt, um die zeitliche und flächenhafte Dynamik und Intensität verschiedener Wasserquellen für die Bucht zu erfassen. Porenwassergradienten deuten auf unterschiedliche Beeinflussung durch Aussüßen, lokal bereits in 50 cm Tiefe und mit hoher räumlicher Heterogenität. Verschiedene Süßwasser-Quellen lassen sich isotopisch ausweisen. DIC ist in den Sedimenten, neben Mischungen, durch diagenetische Prozesse wie der Oxidation von organischem Material und der Auflösung von Karbonaten geprägt. Weitere Arbeiten finden statt, um die Dynamik der benthisch-pelagischen Kopplung via SGD und die Bedeutung für geochemische Tracer mit besonderer Hinwendung auf das Kohlenstoffsystem zu verfolgen.

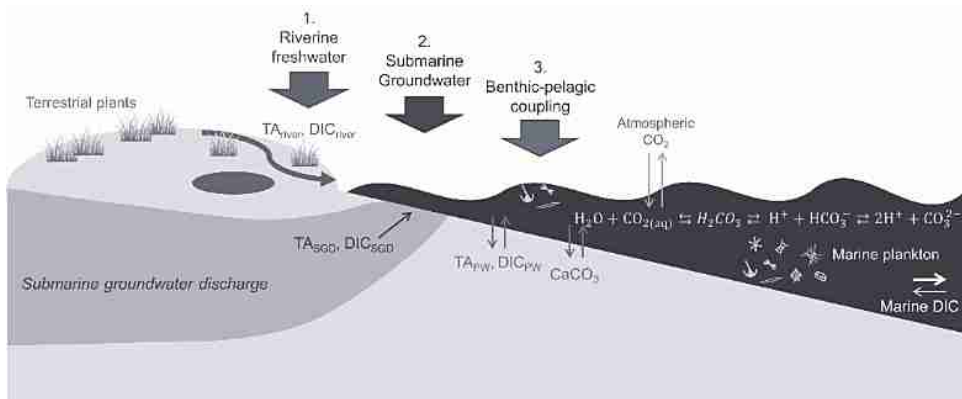


Abb. 1: Schematischer Querschnitt eines Küstengebiets in der Gezeitenzone (TA: total alkalinity, DIC: dissolved organic carbon) (Schell 2023)

Schell, A.C. (2023) The Potential of the Königshafen Bay (Sylt, Germany) as a source or sink for CO₂ and the Influence of Submarine Groundwater Discharge (SGD) on TA and DIC. MSc thesis, University of Greifswald and Leibniz IOW.

Danksagung: DFG (KiSNet), BMBF (COOLSTYLE/CARBOSTORE), DAAD, DFG Baltic Transcoast, und Leibniz IOW.

Vortrag 8.5 (ID 265)

LURCH-IsoGW: The Groundwater Isotope Map of Germany

Robert van Geldern¹, Johannes A. C. Barth¹, Dominik Kremer², Blake Walker², Paul Königer³, Stephan Braune³, Axel Schmidt⁴, Jessica Landgraf⁴, Heinrich Eisenmann⁵, Michael Heidinger⁶, Philip Schuler⁷, Aixala Gaillar¹

¹: GeoZentrum Nordbayern, FAU Erlangen-Nürnberg

²: Institute for Geography, FAU Erlangen-Nürnberg

³: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

⁴: Bundesanstalt für Gewässerkunde

⁵: Isodedect GmbH

⁶: Hydroisotop GmbH

⁷: CDM Smith Consult GmbH

Kontakt: robert.van.geldern@fau.de

Together, tritium and stable water isotopes represent a tool that can be used as a basis for sustainable groundwater management in the context of changing climate and land use. These tools can be used, for example, to determine groundwater ages, quantify quantities in bank filtration, determine mixing of groundwater or long-term climate-induced changes.

While some other European countries have published initial groundwater isotope maps, so-called isoscapes, Germany still has no such tool.

The overall objective of this joint project with a total of nine partners from science, federal and state authorities and industry is to create for the first time a nation-wide interpolated isoscape of stable water isotopes and tritium in groundwater for Germany. The data will be made available to potential users in an interactive, long-term and adjustable manner. This will be arranged from existing data of individual state offices, from literature, from companies as well as from new measurement campaigns within the project. The system will be expandable via historical data as well as future measurements after the end of the project. Signals of climate change, as they are already visible in the isotope ratios of precipitation, lysimeter seepage and surface water, will be recorded for the first time with isotope data. Together with the new isotope data sets on groundwater these various compartments can be systematically evaluated.

A first attempt to collect and measure groundwater isotope values for a larger area was made 2015 during a groundwater sampling campaign in the state of Bavaria. A total of ~650 samples were analyzed for their $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values. During the project the data set will be expanded to entire Germany. A joint European initiative on this tool for the sustainable use of water resources is a future vision of the project.

Vortrag 8.6 (ID 313)

Trace-element and isotope (bio)geochemistry of a modern carbonate travertine: The Nohn Waterfall (Eifel Region)

Patricia Roeser¹, Patrick Aretz¹, Michael E. Böttcher^{2,3,4}

¹: *Environmental Geology Group, Institute for Geosciences, University of Bonn, Kirschallee 1-3, 53115, Bonn, Germany*

²: *Geochemistry & Isotope Biogeochemistry, Leibniz Institute for Baltic Sea Research (IOW), Seestrasse 15, 18119, Warnemünde, Germany*

³: *Marine Geochemistry, University of Greifswald, Friedrich-Ludwig-Jahn Str. 17a, 17489, Greifswald, Germany*

⁴: *Interdisciplinary Faculty, University of Rostock, Albert-Einstein-Str. 21, 18059, Rostock, Germany*
Kontakt: patricia_roeser@uni-bonn.de

Processes in the dissolved carbonate system of fresh surface waters may contribute and are sensitive to variations of boundary conditions associated with anthropogenic climate change. Hard water springs emerge to the surface saturated with respect to CaCO_3 and supersaturated with respect to atmospheric carbon dioxide partial pressure. Overall, the path of surface water flows is in a delicate balance between degassing and precipitation,

eventually leading to carbonate precipitation. These processes lead to geochemical proxy-containing mineral formation and the enhanced liberation of CO₂. Based on their flow history, such creeks may impact the buffer capacity of surface waters in different ways, when entering rivers.

At the Nohn waterfall in the Eifel Region, the rate of these processes is enhanced through one large physical step, thereby originating this massive moss-covered travertine formation, early declared a natural monument because of its significance for local tourism. The travertine has developed to its present-day form due to railroad construction in the early twentieth century when at least three carbonate-rich groundwater sources were channeled to a single flow. Previously, these rather diffuse sources have fed water that built a wider paleo-travertine wall, also accessible to date.

Here we investigated the partitioning of stable isotopes (CHOS) and trace elements upon surface water evolution of this hard water creek leading to carbonate travertine formation. Besides physical in-situ parameters (temperature, pH, electric conductivity), the alkalinity, major and trace elements, nutrients, and the stable isotope composition of dissolved and solid phases were analyzed by titration, ICP-OES, ion chromatography, gas irmMS, and CRDS techniques, respectively. A physicochemical characterization of the aqueous solution was carried out by using the PHREEQC model. Textural and chemical compositions of solid phases were further analyzed by SEM-EDX in detail.

The evolution of the hard-water creek at Nohn is characterized by an induction period where degassing of carbon dioxide dominates, followed by a step-like calcite formation at the waterfall itself, further driving degassing. Stable isotope signatures (¹³C, ¹⁸O, ³⁴S) allow for an element source identification and mechanistic interpretation of the processes controlling the carbonate system. Process rates may vary due to changes in topography and/or biological activity. The dissolved sulfate at Nohn originates from the oxidation of metal sulfides in the aquifer that may be incorporated into the carbonate lattice (CAS) or form discrete barium sulfate phases. These first results are compared to sites in other areas (Westerhof, Rügen) developing under conditions different to Nohn with respect to surface topography and vegetation.

Poster 8.1 (ID 312)

Multi-Isotopen (COSH)-Hydrobiogeochemie im unterirdischen Ästuar des Hochenergie-Bereichs einer Barriere-Insel

Michael Ernst Böttcher^{1,2,3}, Magali Roberts⁴, Anja Reckhardt⁴, Katharina Pahnke-May⁴, Iris Schmiedinger¹, Sascha Plewe¹, Gudrun Massmann^{4,5}

¹: Marine Geologie, Leibniz IOW, Deutschland

²: Marine Geochemie, Universität Greifswald, Deutschland

³: Interdisziplinäre Fakultät, Universität Rostock, Deutschland

⁴: Institut für Chemie und Biologie des Meers, Cvo Universität Oldenburg, Deutschland;

⁵: Institut für Biologie und Umweltwissenschaften, Cvo Universität Oldenburg, Deutschland

Kontakt: michael.boettcher@io-warnemuende.de

Unterirdische Ästuar (subterranean estuaries, STE) verbinden die Wasser- und einige Elementkreisläufe an Land mit dem marinen Küstenraum und stellen Bereiche steiler biogeochemischer Gradienten dar, die sich z. B. auf den Transport und die Transformation von Kohlenstoff-Spezies auswirken. Die Verfügbarkeit von gelöstem Sulfat als wichtigstem anaeroben Elektronenakzeptor kommt hierbei neben dem Bestand reaktiver Kohlenstoffverbindungen eine besondere Bedeutung zu. Wechselwirkungen mit den mineralischen Festphasen in Aquifer und Sediment können zusätzlich zur hydrochemischen Modulation der das Sediment schließlich verlassenden Lösungen beitragen. Die interdisziplinäre Forschergruppe DynaDeep widmet sich der tiefgründigen Dynamik in den Prozessen eines durch permeable Sande geprägten STE im Norden der Insel Spiekeroog (Massmann et al. 2023). Das Strandsystem, im Kontakt mit der südlichen Nordsee, stellt ein einzigartiges hochdynamisches und bisher im globalen Kontext unerforschtes System dar, das die Interaktionen zwischen Süß- und Salzwasser mit Blick auf derzeitige und zukünftige Systemänderungen möglich macht. Bohrungen und Multi-Level-Brunnen erlauben saisonale Beobachtungen der Zusammensetzung in Porenwässern sowie Sedimentbeprobungen. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse von multi-Isotopen (COSH)-Untersuchungen an gelösten (Wasser, gelöste C-Spezies, Sulfat) und Festphasen (Eisensulfide, Karbonate), kombiniert mit den hydrochemischen Gradienten und textuellen Eigenschaften sedimentärer Festphasen vorgestellt/diskutiert. Die Wasserisotopenverhältnisse charakterisieren die einmischenden Süßwasser und lassen Vergleiche mit Brunnen auf der Insel zu (Seibert et al. 2019). Die C-Isotopensignaturen im DIC identifizieren den Abbau von DOC, aber auch die Korrosion von marinen Karbonaten als Quellen. Die Isotopensignaturen in Sulfat und Sulfiden zeugen in der Tiefe von mikrobieller Sulfatreduktion bei geringen Raten, und oberflächennah und mit abnehmenden Salinitäten potenzieller Sulfid-Oxidation oder Beimengung nicht-mariner Sulfatquellen.

Massmann G. et al. (2023) The DynaDeep observatory – a unique approach to study high-energy subterranean estuaries. *Front. Mar Sci.* 10:1189281.

Seibert S.L. et al. (2019) Iron sulfide formation in young and rapidly-deposited permeable sands at the land-sea transition zone. *Sci. Tot. Env.* 649, 264-283.

Poster 8.2 (ID 266)

Isotopenuntersuchungen der Trinkwassergewinnung durch Uferfiltration am Standort Ofterschwang (Oberallgäu) im Rahmen des BMBF-LURCH IsoGW Projekts

Sarah Schmidt¹, Robert van Geldern¹, Johannes A. C. Barth¹, Michael Heidinger²

¹: GeoZentrum Nordbayern, FAU Erlangen-Nürnberg

²: Hydroisotop GmbH, Schweitenkirchen

Kontakt: robert.van.geldern@fau.de

Uferfiltration ist eine natürliche, ökonomische Methode, flussnahe Grundwasserressourcen nachhaltig zu bewirtschaften. Insbesondere die Frage nach Trinkwasser, aber auch Brauchwasser (Landwirtschaft, geothermische Nutzung), stellt eine stetig wachsende Herausforderung für die Wasserwirtschaft dar. Im Rahmen des BMBF-LURCH Projektes IsoGW werden Best-Practice Teilprojekte an verschiedenen Pilotstandorten durchgeführt. Für die Quantifizierung der Grundwasserkomponenten, Abstandsgeschwindigkeiten oder Mischungsbilanzen sind stabile und radiogene Wasserisotope sehr gute Werkzeuge.

Um die Variabilität der hydrologischen Prozesse bei der Uferfiltration näher zu untersuchen, werden am Standort Ofterschwang im Oberallgäu Beiträge des landseitigen Grundwassers und des Flusses Iller an der Grundwasserförderung bestimmt. Erste istopenhydrologische Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass der Fluss Iller den Hauptanteil zur Grundwasserförderung beiträgt. Im Mittel ergab sich im Untersuchungszeitraum ein Flusswasseranteil von 89 % an der Wasserförderung.

Um zu testen, ob die Trinkwasserversorgung in der Gemeinde Ofterschwang langfristig durch die Uferfiltration des Flusswassers gewährleistet werden kann, werden die Untersuchungen dauerhaft weitergeführt. Dazu dienen zum einen regelmäßige Probenahmen an ausgewählten Grundwasser- und Oberflächenwasser-Probenahmestellen und die Beurteilung des Niederschlags durch einen installierten Niederschlagssammler. Zum anderen soll die landseitige Grundwasserkomponente durch Einbezug weiterer Grundwassermessstellen besser charakterisiert werden.

9 Anorganische Spurenelemente in gekoppelten Stoffkreisläufen – Quellen, Mobilität, hydro(bio)geochemische Prozesse

22.03.2024, 09:45 - 10:45, Konferenzraum 1

Andre Banning (Universität Greifswald)

Joerg Rinklebe (Universität Wuppertal)

Vortrag 9.1 (ID 125)

Vanadium im Grundwasser der Vulkaneifel – Geogene Quelle und Entfernung

Michael Kersten¹, Carsten Bahr²

¹: Johannes Gutenberg-Universität, Deutschland

²: GEH Wasserchemie GmbH, Deutschland

Kontakt: kersten@uni-mainz.de

In Grundwasserproben der Westeifel wurden erhöhte V-Konzentrationen von teilweise über 50 mg/L nachgewiesen. Generell zeigten die im Bereich der Känozoischen Vulkanite entnommenen Wasserproben erheblich höhere Konzentrationen als die im umliegenden Paläozoikum. Zur Suche nach der geogenen Quelle für diese Anomalie wurden Dünnschliffe der Gesteinsproben hergestellt und mittels Elektronenmikrosonde analysiert. Die Elementverteilungsbilder zeigten nicht die erwartete Korrelation zwischen den Elementen Fe und V, wohl jedoch eine P-V-Korrelation. Hotspot-Analysen von V-reichen Mineralkörnern wiesen auf das Mineral Fluorapatit mit bis zu 5 Gew.-% Vanadat als Substitution für das Phosphat als Quelle in den lokalen Vulkanitproben hin [1]. Eine hydrogeochemische Modellierung zeigte, dass die Wasserproben alle im Eh/pH-Prädomanzfeld der Vanadat(V)-Komplexe liegen. Zur Entfernung von Vanadium in der Trinkwasseraufbereitung wurden zunächst Kleinsäulentests mit granuliertem Eisenhydroxid (GEH) durchgeführt. Die Durchbruchskurven (BTCs) wurden erfolgreich mit einem homogenen Oberflächendiffusionsmodell (HSDM) simuliert, das chemische Gleichgewichtsadsorption und kinetischen Stofftransport kombiniert [2]. Die Adsorptionsparameter wurden dabei mit Hilfe eines Oberflächenkomplexierungsmodells für ein kompetitives Multikomponentensystem

ermittelt. Die Modellergebnisse deuten darauf hin, dass Vanadat wenig anfällig für kompetitive Adsorptionseffekte ist. Die Verwendung des HSDM zur Vorhersage der BTCs erfordert daher als einzigen Anpassungsparameter die Verwendung der Biot-Zahl zur Charakterisierung der kinetischen Stoffübertragung. Weiterhin konnten Ergebnisse von Versuchssäulen im Pilotmaßstab für drei Wasserwerke mit unterschiedlicher Grundwasserzusammensetzung mit nur einer Freundlich-Konstante $k_F = 3,2$ aus dem Adsorptionsmodell sowie einer für alle drei verschiedenen Teststandorte gleichen Biot-Zahl von 37 modelliert werden. Ende 2020 wurde schließlich eine erweiterte Wirksamkeitsprüfung (EWP nach §11 TrinkwV) in einem Wasserwerk der Verbandsgemeinde Daun (Landkreis Vulkaneifel) erfolgreich abgeschlossen [3]. In einem 13-monatigen, versorgungswirksamen Praxisbetrieb (Durchsatz: 34 m³/h) konnte nachgewiesen werden, dass ein Adsorptionsfilter auf Basis von GEH geeignet ist, Vanadium aus dem Grundwasser zuverlässig bis unter die Bestimmungsgrenze zu entfernen (Abb. 1). Mit der Aktualisierung der Liste der nach TrinkwV zulässigen Aufbereitungsstoffe (§20-Liste des UBA, Stand 01/2023) wurde für Eisenhydroxid der Verwendungszweck „Vanadiumentfernung“ ergänzt. Somit steht nun allen betroffenen regionalen Wasserversorgern ein effektives und validiertes Verfahren zur Verfügung.

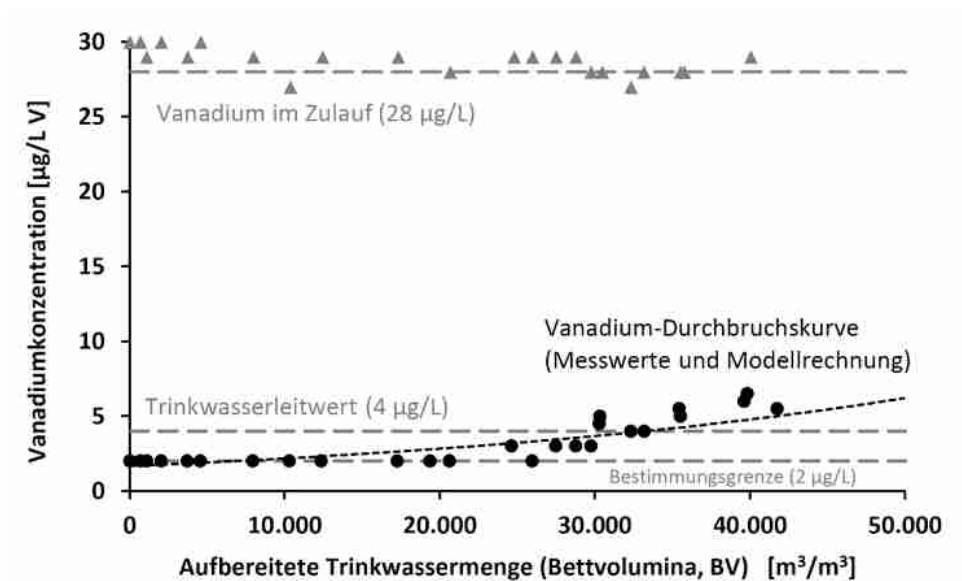


Abb. 1: Durchbruchskurve für Vanadium aus der erweiterten Wirksamkeitsprüfung für den Einsatz des GEH in einem Wasserwerk der Verbandsgemeinde Daun (Landkreis Vulkaneifel).

[1] Härter L., Kersten M., Riße A., Poppe R., Wieber G. (2020): Vorkommen von Vanadium im Grundwasser der Vulkaneifel. Grundwasser 25, 127-136.

[2] Dabizha A., Bahr C., Kersten M. (2020): Predicting breakthrough of vanadium in fixed-bed absorbent columns with complex groundwater chemistries: A multi-component granular ferric hydroxide-vanadate-arsenate-phosphate-silicic acid system. *Water Research X* 9, 100061.

[3] Bahr C., Jekel M., Amy G. (2022): Vanadium removal from drinking water by fixed-bed adsorption on granular ferric hydroxide. *AWWA Wat. Sci.* e1271, 10 pp.

Vortrag 9.2 (ID 141)

Multimethod identification of geogenic sources of fluoride, arsenic, and uranium in Mexican groundwater

*Cristian Abraham Rivera Armendariz¹, Andre Banning²,
Antonio Cardona Benavides³*

¹: Ruhr University Bochum, Germany

²: University of Greifswald, Germany

³: University Autonomous of San Luis Potosí, México

Kontakt: Cristian.RiveraArmendariz@rub.de

In the cities of Chihuahua, Zacatecas and San Luis Potosí, Mexico (Sierra Madre Occidental), concentrations of fluoride (F), arsenic (As) and uranium (U) have been detected in groundwater above drinking water standards. These elevated concentrations have been associated mainly with geogenic sources in volcanic rocks and basin-fill sediments. However, the specific host phases and processes that release these toxic elements into groundwater are rarely identified.

In a multi-method approach that combines the classical techniques of hydrochemistry, geochemistry and petrography with more advanced techniques such as Raman spectroscopy (RS), scanning electron microscopy (SEM), electron microprobe (EMP) and laser ablation (LA)-ICP-MS, this research proposes a methodology for the characterization and identification of As, F and U bearing phases in volcanic rocks and sediments, as well as some of the processes favoring the mobilization of these elements to groundwater. Based on bulk As, F and U concentrations identified by geochemistry, polished thin sections were created for petrographic analysis (mineralogical composition, percentage and distribution of glassy material, specific rock alterations). Detailed geochemical mapping was carried out in these samples by RS and SEM, and the EMP allowed the determination of major elements geochemical distribution, both in amorphous and crystalline components of the solid materials. While the previous methodologies have limitations for the quantification of trace elements, LA-ICP-MS allowed the analysis of trace and ultra-trace levels, as well as their distribution in the selected phases through profiles and mappings. The multi-elemental capacity of this technique allowed making inferences about the relationship of various trace elements with the bearing phases, especially volcanic glass.

Groundwater chemical composition allowed the identification of 3 groundwater flow systems: a) local flows, hosted in basin-fill sediments with average temperatures of 23.3 °C, and low As ($\approx 13 \mu\text{g L}^{-1}$), F ($\approx 0.8 \text{ mg L}^{-1}$) and U ($\approx 2 \mu\text{g L}^{-1}$) concentrations; b) intermediate flows, characterized by average temperatures of 24 °C, and intermediate concentrations of As ($\approx 21 \mu\text{g L}^{-1}$), F ($\approx 1.1 \text{ mg L}^{-1}$) and U ($\approx 4.2 \mu\text{g L}^{-1}$); c) regional flows, circulating mainly through rhyolites and ignimbrites, temperatures that can reach up to 31.5 °C, and higher concentrations of As ($\approx 59 \mu\text{g L}^{-1}$), F ($\approx 2.6 \text{ mg L}^{-1}$) and U ($\approx 5.8 \mu\text{g L}^{-1}$). Through microanalytical analyses, it was possible to identify F-rich minerals like fluorapatite ($\approx 2.3 \text{ wt\%}$), biotite ($\approx 2.2 \text{ wt\%}$) and fluorite ($\approx 37 \text{ wt\%}$). Glassy matrix rich in As ($0.28\text{--}392 \mu\text{g g}^{-1}$), U ($0.56\text{--}21 \mu\text{g g}^{-1}$) and F ($100\text{--}700 \mu\text{g g}^{-1}$) was mainly found in rhyolites and ignimbrites from the Tertiary volcanic outcrops of the tectonostratigraphic province of the Sierra Madre Occidental, and basin-fill sediments derived from these rocks. Based on the present study, the groundwater As, F, and U anomalies in the different study zones are associated with ignimbrites and rhyolites considered as their primary source, where processes like alteration, dissolution, oxidation, and devitrification, are directly linked to variations in the concentrations of these elements.

The results obtained through the analysis of water-rock interaction in this research can be applied to other semi-arid regions with geogenically impacted aquifers, due to the geological and climatic similarity with numerous volcano-sedimentary basins around the world.

Vortrag 9.3 (ID 200)

Occurrence and origin of high dissolved Se in a depleted limestone aquifer in central Jordan.

Frank Wagner, Mohammad Al-Hyari, Fritz Kalwa, Dennis Krämer

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Kontakt: frank.wagner@bgr.de

As an arid country, the water supply of Jordan depends strongly on the exploitation of slowly or non-renewable groundwater resources. Currently, the most extensively used aquifer in Jordan is the so-called A7/B2 aquifer, which represents a relatively shallow fractured limestone aquifer of high productivity and generally high water quality. Unfortunately, high dissolved levels of oxyanion forming trace elements, such as Se and Mo, have been recently observed in A7/B2 groundwater, representing an increasing challenge for the sustainable drinking water supply in Jordan (Al-Kuisi et al. 2015). Even though Selenium (Se) is known to be an essential micro-nutrient for humans, it can be toxic at higher levels of intake (Bailey 2017). Against this background, a case study has been carried out in frame

of Jordan-German technical cooperation to investigate the origin and the responsible processes resulting in dissolved Se levels up to (max.) 500 µg/L.

In the selected working area in Central Jordan, “high Se wells” with dissolved Se levels above the WHO guideline value of 40 µg/L were identified in all observed well fields and in close vicinity to wells yielding groundwater with low Se levels. The high Se wells tap the upper B2/A7 limestone aquifer, while the groundwater of the underlying sandstone aquifer always shows low dissolved Se levels. Aquifer material as well as intercalated/overlying rocks, incl. limestone, phosphorite, basalt and bituminous shale, have been sampled in order to identify the Se content as well as relevant Se-containing mineral phases. According to the XRF-measurements, the phosphoritic limestone has Se content within the low ppm range (1-5 ppm), whereas the non-phosphoritic and partly silicified limestone as well as the basalt samples show Se levels < 1 ppm. Only the bituminous shale shows high Se content up to 250 ppm, however, its limited occurrence in the central part and downstream of the working area does not explain high dissolved Se levels in vicinity of the western uplands, where major groundwater recharge occurs.

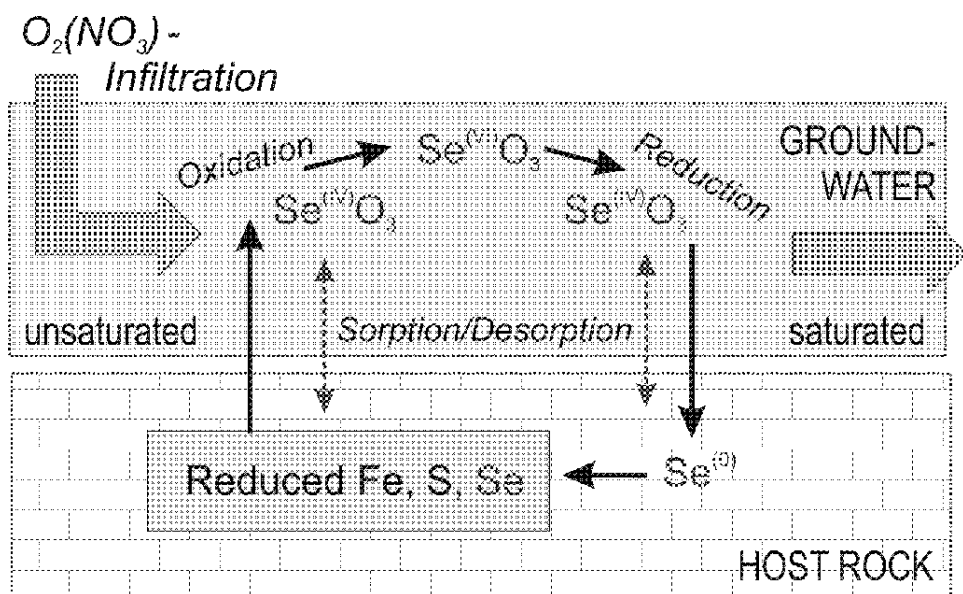


Abb. 1: Concept of occurrence and origin of high dissolved Se.

The combined hydrogeochemical and geochemical results aim to identify the Se-bearing mineral phases in the host rock based on geochemical analysis, including μ -XRF/SEM analytics and sequential extraction experiments. Statistical evaluation of hydrochemical data indicates relevant geochemical processes promoting Se mobilization and transport within the limestone aquifer. The presented conceptual understanding suggests the accelerating groundwater level drawdown in A7/B2 aquifer as a major driver for the

mobilization of geogene solid Se phases. The aeration of formerly saturated parts of the fractured limestone aquifer results in the oxidation of immobile Se(0) and, thus, the mobilization of oxidized Se(IV, VI) species (Fig. 1). As a conclusion, possible mitigation measures are suggested, such as an appropriate well management.

M. Al Kuisi, A. M. Abed, K. Mashal, G. Saffarini & F. Saqhour (2015): Hydrogeochemistry of groundwater from karstic limestone aquifer highlighting arsenic contamination: case study from Jordan. *Arabian Journal of Geosciences* 8: 9699–9720

Bailey (2017): Review: Selenium contamination, fate, and reactive transport in groundwater in relation to human health. *Hydrogeology Journal* 25, 271191-1217

Vortrag 9.4 (ID 208)

Durchführung ungesättigter Säulenversuche unter Perkolation von Niederschlagswasser zur Aufbereitung von mit (Schwer-)Metallen belasteten subhydrischen Sedimenten am Hüttenteich bei Freiberg, Sachsen, Deutschland

Clemens Hartmann, Traugott Scheytt

TU Bergakademie Freiberg, Deutschland

Kontakt: Clemens.Hartmann@geo.tu-freiberg.de

In den Stauanlagen des Erzgebirges befinden sich Sedimente mit erhöhten (Schwer-)Metallgehalten (As, Pb, Cd, Zn, Cu), die aus den umliegenden sowohl geogen als auch montan belasteten Einzugsgebieten eingetragen werden. Um eine vielfältige Verwertung dieser sogenannten subhydrischen Sedimente als Bodensubstrat, Recyclingdünger oder Zuschlagstoff für die Ziegelindustrie zu ermöglichen, ist oftmals eine vorherige Reduktion der Feststoffkonzentrationen der (Schwer-)Metalle durch praxistaugliche Aufbereitungstechnologien notwendig.

Eine nach dem European Community Bureau of Reference (BCR) modifizierte sequentielle Extraktion zeigte, dass über 50 % der relevanten (Schwer-)Metallkonzentrationen der massedominierenden Feinfraktion ($\leq 0,063$ mm) sorptiv gebunden sind. Daher soll zur Dekontamination der Sedimente eine Mobilisierung der (Schwer-)Metalle von der Fest- in die Wasserphase erfolgen. Um die Wirksamkeit dieser Aufbereitungsoption mittels natürlichen Niederschlagswassers auf Schüttkörpern einzuschätzen, wurden für sieben Probenahmepunkte je drei Säulenversuche im Labormaßstab durchgeführt. Als Lösemittel wurde lokal gesammeltes Niederschlagswasser, das einer Niederschlagsmenge von 1,5 Jahren entspricht, in drei gravitativ induzierten Perkulationsphasen, welche von Trockenphasen unterbrochen wurden, zugeführt. Je nach Sedimentprobe und zeitlichem Versuchsschritt betrugen die Perkulationszeiten zwischen 12 und 24 Stunden. Auf jede Perkolation

folgte eine Trockenphase. 48 Stunden nach Beginn jeder Perkolation wurde die nächste initiiert.

Um die (Schwer-)Metallabreicherung zeitabhängig aufzunehmen, wurde das gesamte Perkolat in einzelnen Sammelproben aufgefangen und deren Elementkonzentrationen mittels Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) bestimmt. Die Sedimente wurden mit Königswasser aufgeschlossen. Vor dem Säulenversuch wurden deren Elementkonzentrationen als Mischproben analysiert, während diese nach jedem Säulenversuch an Einzelproben aus je drei unterschiedlichen Sedimentteufen mittels ICP-OES bestimmt wurden.

Die Ergebnisse zeigen auf, dass die Feststoffkonzentrationen der relevanten (Schwer-)Metalle mehrheitlich reduziert werden. Eine breite Streuung der (Schwer-)Metallabreicherung innerhalb der Sedimentsäule tritt auf, wobei die Feststoffkonzentration mit der Tiefe abnimmt. Die absolute Abreicherungsrate hängt weniger vom initialen (Schwer-)Metallvorrat als vielmehr von reaktiven Stofftransportbedingungen (Reaktionsoberfläche zwischen Sedimentkorn und Wasserphase, Reaktionszeit, Einstellungszeitpunkt des chemischen Gleichgewichtes zwischen Wasser- und Festphase) während der Perkolation ab. Die aus den Konzentrationen der Perkolatproben abzuleitende (Schwer-)Metallabreicherung wird durch hohe initiale Raten induziert (First Flush). Diese nimmt mit zunehmender Anzahl an Perkolationen deutlich ab. Dem First Flush folgen je Perkolation mit Ausnahme von As exponentiell abnehmende mobilisierte (Schwer-)Metallkonzentrationen.

Die Ergebnisse tragen zum Prozessverständnis der Kinetik aus Lösung und Stofftransport von (Schwer-)Metallen in auf Schuttkörpern gelagerten, belasteten subhydrischen Sedimenten bei. Ausgehend von der Studie empfiehlt sich, die experimentellen Untersuchungen auf den Feldmaßstab zu skalieren, um diese in reale Zeit- und Raumdimensionen unter natürlichen Bedingungen zu übertragen.

Poster 9.1 (ID 131)

Das Verhalten redox-sensitiver Elemente in Oberharzer Bergbauteichen

Elke Bozau¹, Enio Selfo¹, Tobias Licha²

¹: TU Clausthal, Hydrogeologie

²: RU Bochum, Hydrogeochemie

Kontakt: elke.bozau@tu-clausthal.de

In der Umgebung von Clausthal-Zellerfeld wurden seit dem Mittelalter Teiche zur Energiegewinnung der Erzbergwerke angelegt (Schmidt 1997). Diese Teiche werden seit mehreren Jahren hydrogeochemisch untersucht (Bozau et al. 2015) und können anhand der

Analysedaten in mehrere Gruppen eingeteilt werden. Die meisten Teiche weisen spezifische elektrische Leitfähigkeiten zwischen 50 und 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf. Teiche, deren Chemismus hauptsächlich durch Niederschlagswasser geprägt ist, haben Leitfähigkeiten von $< 50 \mu\text{S}/\text{cm}$. Die spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten des Oberflächenwassers von ca. 40 Teichen wurden 2015 und 2023 gemessen. Nach den letzten Jahren der Trockenheit und der Entwaldung zeigen sich 2023 in sehr vielen Teiche leicht erhöhte Werte, die in den Konzentrationen der Hauptionen aufgrund der analytischen Messungenauigkeit jedoch nicht sichtbar sind. Im Juni 2023 wurden die Wassersäulen ausgewählter Teiche tiefenorientiert beprobt, auf redox-sensitive Elemente (Fe, Mn, U) sowie stabile Isotope ($\delta^{18}\text{O}$, δD) untersucht. Zusätzlich wurden Wasser- und Sedimentproben am tiefen Ablauf der Teiche gewonnen, wo durch den erneuten Zutritt von Sauerstoff eine Ausfällung von Eisenhydroxiden zu beobachten ist.

Aus der Temperaturverteilung, den spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten und den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten ist eine Schichtung der Wassersäule abzuleiten. Außerdem können durch diese Parameter Rückschlüsse auf die Tiefe des Wassers, das im Teichablauf zu finden ist, gezogen werden. Eine Verdunstung von Oberflächenwasser der Teiche ist durch erhöhte $\delta^{18}\text{O}$ - und δD -Werte belegt. Die elektrische Leitfähigkeit und die Konzentrationen von Hydrogencarbonat, Eisen und Mangan steigen mit der Wassertiefe an und erreichen über den Teichsedimenten ihren höchsten Wert. Die Nitrat- und Sulfatkonzentrationen nehmen mit zunehmender Wassertiefe ab. Im Vergleich zur Wassersäule treten am Ablauf der Teiche höhere Hydrogencarbonat-, Eisen- und Mangankonzentrationen sowie geringere Sulfatkonzentrationen auf.

Gleichgewichtsmodellierungen mit PHREEQC verdeutlichen, dass in der Wassersäule der CO_2 -Partialdruck mit der Tiefe steigt und am Ablauf der Teiche eine CO_2 -Entgasung sowie eine Ausfällung von Eisenhydroxiden stattfindet.

Bozau, E., Licha, T., Stärk, H.-J., Strauch, G., Voss, I., Wiegand, B. (2015): Hydrogeochemische Studien im Harzer Einzugsgebiet der Innerste. Clausthaler Geowissenschaften, 10, 35-46.

Schmidt, M. (1997): Wasserwanderwege. Piepersche Druckerei und Verlag GmbH, Clausthal-Zellerfeld.

Fixierung von Spurenelementen: Positiver Nebeneffekt der gesteigerten Denitrifikation

Felix Ortmeyer^{1,2,3}, Hyojin Kim¹, Birgitte Hansen¹, Rasmus Jakobsen¹

¹: *Geologischer Dienst von Dänemark und Grönland, Dänemark*

²: *Universität Greifswald, Deutschland*

³: *Technische Universität Darmstadt, Deutschland*

Kontakt: felix.ortmeyer@tu-darmstadt.de

Die Steigerung der Denitrifikation durch Zugabe von Elektronendonatoren (z. B. organischer Kohlenstoff) ist eine vielversprechende Behandlungsmethode, um der Abnahme der endlichen natürlichen Nitratabbaukapazität entgegenzuwirken. In zahlreichen Labor- aber auch einigen Geländeversuchen wird diese Methode intensiv untersucht, um das globale Problem der Nitratverschmutzung zu bekämpfen. Außerdem sind mit der natürlich vorkommenden Nitratreduktion in Grundwasserleitern häufig unerwünschte Mobilisierungen von Spurenelementen verbunden. Dies kann zusätzlich zu Überschreitungen der Trinkwassergrenzwerte führen.

In dieser Studie wurden zwei verschiedene Sedimente aus Grundwasserleitern in Dänemark (Quartär) und Deutschland (Kreide) verwendet. In beiden ist die geogene Nitratabbaukapazität nahezu erschöpft, welche sich vor allem durch organischen Kohlenstoff und Sulfid-Schwefel ergibt. In Kreislaufsäulenexperimenten wurde der Nitratabbau, insbesondere aber das Verhalten verschiedener Spurenelemente, über eine Versuchsdauer von bis zu 60 Tagen untersucht. Ausgewählte Spurenelemente (As, Co, Ni, V und Zn) wurden in einer Konzentration von jeweils 100 µg L⁻¹ dem nitrathaltigen Wasser zugesetzt. In beiden Sedimenten konnte eine Abnahme der Spurenelementkonzentrationen im Wasser der Säulenversuche beobachtet werden. Diese Abnahme erfolgt durch die Zugabe von organischem Kohlenstoff, der als Elektronendonator für eine gesteigerte Denitrifikation verwendet wird. Die Senken der Spurenelemente wurden mit einem sechsstufigen sequenziellen Extraktionsverfahren eingehend untersucht. Zu diesem Zweck wurden an fünf gleichmäßig verteilten Stellen entlang der Säulen Sedimentproben entnommen und die Veränderung der Spurenelementgehalte mit dem Ausgangssediment verglichen. Die Ergebnisse zeigen die Sorption von Spurenelementen, aber auch die Bindung in amorphe (Hydr-)Oxide, sofern diese im Laufe der Versuchszeit neu gebildet werden. Unterschiede gibt es auch zwischen den Sedimenten: in den Experimenten mit Sediment der Haltern Formation (Deutschland) weist das Wasser einen niedrigen pH-Wert (ca. 5,5) auf. In den quartären Schmelzwasserablagerungen aus Dänemark ist der pH-Wert des Wassers wesentlich höher (ca. 7,8) und die Spurenelemente binden auch an Karbonaten.

Da die Spurenelementkonzentrationen in den durchgeführten Experimenten nach Beendigung der Nitratreduktion nicht ansteigen, scheint die gesteigerte Denitrifikation zusätzlich einen positiven Nebeneffekt zu haben – die Fixierung von Spurenelementen. Weitere Forschungsprojekte zur Stabilität der Fixierung bei sich wieder ändernden Bedingungen und geochemische Untersuchungen zur Verteilung der Spurenelemente in Sedimenten sind geplant, um die Anwendbarkeit in der Praxis abzuschätzen.

Poster 9.3 (ID 279)

Mobility of dissolved and colloid-associated trace elements in AMD-influenced pore- and groundwaters

Sarah Nettemann¹, Daniel Mirgorodsky¹, Erika Kothe², Thorsten Schäfer¹

¹: Friedrich Schiller University Jena, Institute of Geosciences, Applied Geology

²: Friedrich Schiller University Jena, Institute of Microbiology, Microbial Communication

Kontakt: sarah.nettemann@uni-jena.de

The mobilization of heavy metals and radionuclides in soils and groundwater systems can be facilitated by association with mobile organic or inorganic natural nanoparticles [1].

The test site 'Gessenwiese', located near Ronneburg (Thuringia, Germany), is influenced by acid mine drainage (AMD) and characterized by moderate contamination with heavy metals (HM) and natural radionuclides (RN) due to former Uranium mining [2]. On site, bioremediation strategies combined with bioenergy production were implemented within the BMBF-funded USER-II project. The addition of calciferous soil substrate combined with microbial inoculation (mycorrhiza & *Streptomyces*) has led to an increased soil pH as well as reduced mobility of HM/RN within the soil. This study aims to elucidate the mobilization and transport dynamics of dissolved and colloid-associated HM/RN in the < 0.45 µm and < 1 kDa fraction of soil porewater (PW) and shallow groundwater (GW) from 2020 to 2022.

Median particle concentrations of 1E+08 particles/mL in PW and 3E+07 particles/mL in GW with a median size of approx. 130 nm were determined by Nanoparticle Tracking Analysis (NTA) and Scanning Electron Microscopy (SEM) imaging. DOC was positively correlated with the nanoparticle concentration and median DOC concentrations ranged from 2.7 mg/L in GW to 17.3 mg/L in PW. Liquid Chromatography - Organic Carbon Detection (LC-OCD) revealed that the majority of humic substances found in GW and PW were characterized by low aromaticity and a molecular weight of < 1000 g/mol apart from a few exceptions, pointing toward fulvic-acid-like compounds that can exhibit colloidal characteristics. Ultrafiltration revealed that a large percentage of the HM/RN are either

truly dissolved or associated with fulvic-like compounds in the < 1 kDa fraction. A rain event in September 2022 led to a short-term 10-fold increase in nanoparticle concentrations in the GW, highlighting the importance of monitoring colloid-associated transport of HM/RN in this area during heavy precipitation events that have been increasing over the last years.

[1] Kretzschmar, R. and Schäfer, T. (2005). *Elements* 1, (4), 205-210.

[2] Grawunder, A., et al. (2009). *Chemie der Erde-Geochemistry* 69, 5-19.

Poster 9.4 (ID 331)

Isotope hydrogeochemistry indicates pathways of water and sulfate in Lake Constance

Vera Winde^{1,2}, Michael E. Böttcher^{3,4,5}, Anna Noffke¹, Albrecht Leis⁶,
Till Harum^{6,7}, Patricia Roeser⁸, Jens Kallmeyer⁹, Iris Schmiedinger³,
Antje Schwalb¹⁰, Martin Wessels¹, Thomas Wolf¹

¹: Institut für Seenforschung (ISF des LUBW), Argenweg 50, 88085 Langenargen, Germany

²: Present address: Hydroisotop, Wölkestraße 9, D-85301 Schweitenkirchen, Germany

³: Geochemistry & Isotope Biogeochemistry, Leibniz Institute for Baltic Sea Research (IOW),
Seestrasse 15, 18119 Warnemünde, Germany

⁴: Marine Geochemistry, University of Greifswald, Friedrich-Ludwig-Jahn Str. 17a, 17489
Greifswald, Germany

⁵: Interdisciplinary Faculty, University of Rostock, Albert-Einstein-Str. 21, 18059 Rostock, Germany

⁶: JR-AquaConSol, Graz, Austria

⁷: Konsulent Geohydrologie, Graz, Austria

⁸: Environmental Geology, University of Bonn, Kirschallee 1-3, 53115 Bonn, Germany

⁹: Geomicrobiology, GFZ Telegrafenberg, Potsdam, Germany

¹⁰: Institute of Geosystems and Bioindication, Technische Universität Braunschweig, Langer Kamp
19c, 38106 Braunschweig, Germany

Kontakt: vw@hydroisotop.de

Sulfur cycling in lakes is typically characterized by low concentrations in dissolved sulfate. This electron acceptor, on the other hand, is the major driver for the anaerobic mineralization of organic matter in brackish-marine systems. Post-glacial development in marginal seas like the Baltic or Black Sea is characterized by a transition from fresh to brackish water conditions, and sulfur isotope signatures of lacustrine sediments may be superimposed by diagenesis. To better understand the link between sulfate sources and the developing sedimentary sulfur isotope signatures in Lake Constance, the main inflows, the

vertical water column profiles and sediment samples were isotopically ($^{34}\text{S-SO}_4$, $^{18}\text{O-SO}_4$, $^{18}\text{O-H}_2\text{O}$, $^2\text{H-H}_2\text{O}$) characterized.

The water isotope results represent a conservative tracer to detect and quantify river water plumes in the lake with input originating from high mountainous areas. They show inter-flow layer in different water depths depending on the season and river water discharge and can be tracked over the whole Lake. Dissolved sulfate concentrations and stable isotope signatures for the two major riverine contributors, Alpenrhein and Bregenzer Aach, differ substantially in their isotopic composition and that the impact of the Alpenrhein dominates the sulfate contribution into the lake system. This contribution can be traced throughout the lake with some indication for potential minor sulfur cycling within the water column. The Bregenzer Aach loses water to an underground passage towards Lake Constance - as demonstrated by wells - water-rock interactions adding minor further sulfate to the groundwater.

The upper 10 cm of surface sediments indicate fast net dissimilatory sulfate reduction and the formation of iron sulfides that are isotopically close to water column sulfate, but depleted in the heavier isotope at further depth, indicating lower sulfate reduction rates in the past.

10 Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildung

22.03.2024, 11:15 - 12:30, Konferenzraum 2

Christine Stumpp (BOKU)

Katya Dimitrova-Petrova (Universität Potsdam)

Vortrag 10.1 (ID 133)

Grundwasserneubildung unter einem sich verändernden Klima: Welche Rolle spielt die Vegetation?

Thomas Riedel¹, Tobias K. D. Weber², Axel Bergmann³

¹: IWW Zentrum Wasser, Deutschland

²: Institute of Soil Science and Land Evaluation, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany.

Present address: Soil Science Section, Faculty of Organic Agricultural Sciences, University of Kassel, Germany

³: RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH, Germany

Kontakt: t.riedel@iww-online.de

Prognosen zur zukünftigen Entwicklung der Grundwasserneubildung, vor allem im Hinblick auf die zu erwartenden klimatischen Veränderungen, werden aktuell in der Wasserwirtschaft vielfach als planerische Grundlage verwendet. Solche Prognosen können u. a. mittels Bodenwasserhaushaltsmodellen (z. B. HYDRUS-1D) aufgestellt werden. Die Prognosen der globalen Zirkulationsmodelle bzw. der regionalen Klimamodelle liefern die notwendigen hydrologischen Eingangsparameter für solche Simulationen. Nicht enthalten sind jedoch klimawandel-bedingte pflanzenphysiologische Veränderungen, die bei einer Bodenwasserhaushaltsimulation berücksichtigt werden sollten. Zum Beispiel reduzieren viele Pflanzen ihren Wasserverbrauch bei steigenden Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre, während sie gleichzeitig eine längere Wachstumsperiode erfahren und größere Blattflächen entwickeln. Größere Blattflächen bedeuten wiederum mehr Transpiration der Pflanzen und damit eine stärkere Zehrung des Bodenwassers, bei gleichzeitig reduzierter Bodenverdunstung. Andererseits werden größere Niederschlagsmengen im Winter den Bodenwasserhaushalt und damit das Pflanzenwachstum im Frühjahr begünstigen, während eine Abnahme der sommerlichen Niederschlagsmengen vermehrt zu Trockenstress im Spätsommer führen wird.

Die Ergebnisse unserer Bodenwasserhaushaltssimulationen für ein Trinkwassergewinnungsgebiet in Nordrhein-Westfalen zeigen, dass die Grundwasserneubildung weitgehend unempfindlich gegenüber den durch den Klimawandel bedingten Veränderungen im Wasserverbrauch der Pflanzen ist. Aufgrund einer geringfügigen Zunahme der jährlichen Niederschläge ist daher bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit einem Anstieg der jährlichen Gesamtneubildung um 10 bis 20 mm/Jahr im Untersuchungsgebiet zu rechnen.

Vortrag 10.2 (ID 247)

Hochauflösende Grundwasserneubildungsberechnung mit Hilfe integrierter Wasserhaushaltsmodellierung

Philipp Huttner, Maximilian Winderl, Katja Eulitz

DHI WASY GmbH, Deutschland

Kontakt: phhu@dhigroup.com

Vor allem für Einzugsgebiete lässt sich die flächige Grundwasserneubildung oft nur indirekt ableiten. Eine in der Vergangenheit gängige Methode war die Gleichsetzung der Grundwasserneubildung eines Einzugsgebiets mit dem langjährigen Basisabfluss (MNQ) des Gewässerpegels am Gebietsauslass. Einfache Niederschlags-Abfluss-Modelle (NAM) simulieren ebenfalls nur die Prozesse des Direkt- bzw. Zwischenabflusses und lassen lediglich Rückschlüsse auf die Gesamtsumme von Verdunstung und Grundwasserneubildung als offenen Bilanzterm zu.

Eine der heutzutage zuverlässigsten Methoden der indirekten Ermittlung der GWN ist die Simulation mit „Integrierten Wasserhaushaltsmodellen“ (IWHM). Hier werden alle Kompartimente des Wasserkreislaufs vollständig abgebildet und auf Grundlage der physikalischen Gesetze numerisch berechnet. Im Gegensatz zu den bisher gängigen Verfahren, werden die oberflächennahen Abflussprozesse nicht nur auf den Abfluss der Pegelmessstelle des nächstgelegenen Hauptgewässers kalibriert und die Parameter regionalisiert, es erfolgt auch eine stationäre und instationäre Kalibrierung auf räumliche verteilte Grundwassermessstellen. Integrierte Wasserhaushaltsmodelle werden idealerweise an der Umhüllenden von ober- und unterirdischem Einzugsgebiet abgegrenzt, sodass möglichst wenig seitliche Zuflussrandbedingungen angenommen werden müssen und ein geschlossenes System entsteht. Dabei sollten im Idealfall die einzigen Eingangsgrößen Niederschlag und potenzielle Verdunstung sein.

Mit einem IWHM können nach instationärer Kalibrierung sowohl Abflüsse an allen verfügbaren Pegelmessstellen des Oberflächengewässersystems als auch die absoluten Höhen und steigenden sowie fallenden Trends der Ganglinien an mehreren

Grundwassermessstellen hinreichend genau abgebildet werden und somit werden alle realen Prozesse des Wasserkreislaufs korrekt wiedergegeben.

Dieser integrierte Ansatz der gekoppelten Modellierung ermöglicht im Vergleich zu den herkömmlichen Wasserhaushaltsmodellierungen auf Bundeslandebene nicht nur die Differenzierung innerhalb eines Einzugsgebiets in beliebig hohe zeitliche und räumliche Auflösung, sondern gewährleistet auch eine deutlich höhere Zuverlässigkeit der berechneten Grundwasserneubildung, da Verdunstung und Grundwasserneubildung separat berechnet werden. Alle Kompartimente können in beliebige Teilflächen unterteilt und bilanziert werden. Dieser Modellansatz ermöglicht deutlich belastbarere Werte für die Grundwasserneubildung und das verfügbare Wasserdargebot, sodass die Behörden der deutschen Wasserwirtschaft dazu befähigt werden, langfristig nachhaltige Entscheidungen über neue Wasserrechte zu treffen.

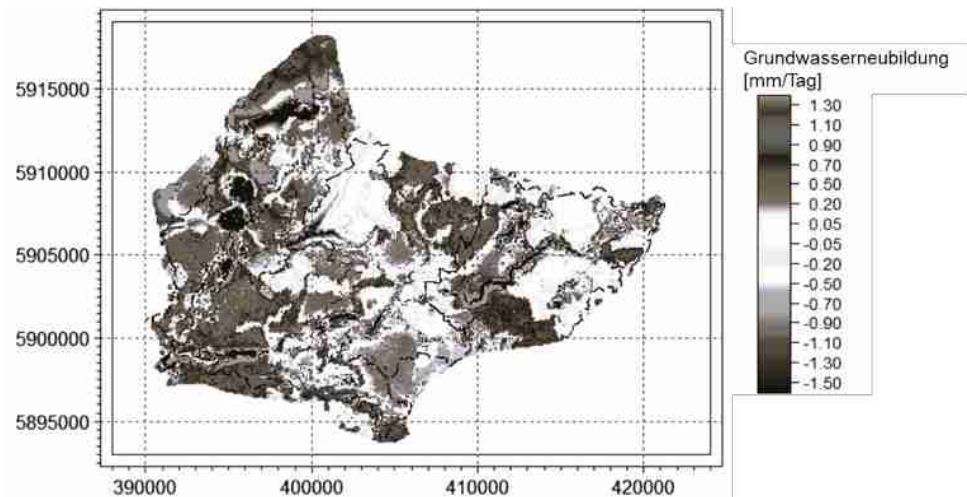


Abb. 1: Berechnete Grundwasserneubildung.

Ermittlung der Grundwasserneubildung mittels Zeitreihenmodellierung von Grundwasserstandsschwankungen

Steffen Birk¹, Ainur Kokimova¹, Raoul Collenteur², Mark Bakker³

¹: Universität Graz, Institut für Erdwissenschaften, NAWI Graz Geozentrum, Österreich

²: Eawag, Abteilung Wasserressourcen & Trinkwasser, Schweiz

³: Delft University of Technology, Water Management Department, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Niederlande

Kontakt: steffen.birk@uni-graz.at

Grundwasserneubildungsraten werden in der Regel indirekt aus anderen Daten ermittelt. Hierfür kommen hydrometeorologische Daten in Betracht, aus denen etwa mit Bodenwasserbilanzansätzen Sickerwasserraten abgeschätzt werden können. Andere Ansätze versuchen, aus gemessenen Grundwasserstandsschwankungen auf Neubildungsraten zu schließen. Dieser Beitrag stellt eine Methode der Zeitreihenmodellierung vor, die diese beiden Ansätze kombiniert. Dabei wird mit Hilfe eines bodenhydrologischen Modells die Grundwasserneubildung aus Niederschlagshöhen und potenziellen Verdunstungsraten ermittelt und mittels Impulsantwortfunktion in Grundwasserstandsschwankungen umgerechnet. Die Parameter des bodenhydrologischen Modells und der Impulsantwortfunktion werden durch Kalibrierung des Modells an gemessene Grundwasserstandsganglinien erhalten.

Die Eignung der Methode wurde zunächst am Standort Wagna (Österreich) durch Vergleich mit Sickerwasserraten aus Lysimetermessungen überprüft (Collenteur et al. 2021). An diesem gut untersuchten Standort erfolgt die Neubildung nur aus dem Niederschlag, relevante Wechselwirkungen mit Oberflächengewässern können ebenso ausgeschlossen werden wie Beeinflussungen durch Grundwasserentnahmen oder -anreicherungen. Die mit dem Zeitreihenmodell ermittelte jährliche Neubildung ist durchschnittlich etwa 9% (30 mm) höher als die Sickerwasserraten des Lysimeters. Die größte Abweichung wurde im Jahr 2011 festgestellt. In diesem trockenen Jahr finden sich Zeiträume mit stagnierenden oder sogar leicht ansteigenden Grundwasserständen, in denen im Lysimeter kein Sickerwasser festgestellt wurde. Im Unterschied zur punktuellen Lysimetermessung sind die Grundwasserstände offenbar durch die Neubildung aus einem größeren Gebiet beeinflusst, die beobachteten Unterschiede also zumindest teilweise ein Maßstabeffekt. Insgesamt zeigt sich aber, dass Lysimetermessung und Zeitreihenmodellierung auch für kürzere Zeiträume (z. B. Monate) zufriedenstellend übereinstimmen.

Um die Anwendbarkeit der Methode unter komplexeren Bedingungen zu erproben, wurde das Zeitreihenmodell auf 144 Grundwassermessstellen im Grundwasserleiter des Grazer Felds (Österreich) angewendet. Dabei wurden im Modell mögliche Beeinflussungen durch

den Fluss Mur und dessen wasserbauliche Veränderung berücksichtigt. Die ermittelten Neubildungsraten zeigen eine sehr große Bandbreite und an einigen Messstellen, insbesondere im urbanen Raum, außerordentlich hohe Werte, die unplausibel scheinen. Sehr wahrscheinlich liegen hier einerseits nicht ausreichend bekannte Einflussfaktoren vor (z. B. Wasserentnahmen, Baumaßnahmen). Andererseits vereinfacht das verwendete bodenhydrologische Modell die urbanen Neubildungsprozesse möglicherweise zu sehr. Die Modellergebnisse liefern damit aber wesentliche Hinweise auf mögliche lokale Beeinflussungen von Grundwasserständen, deren weitere Erkundung und Berücksichtigung im Modell verbesserte Abschätzungen der Grundwasserneubildung ermöglichen sollte.

Collenteur, R. A., Bakker, M., Klammler, G., Birk, S. (2021): Estimation of groundwater recharge from groundwater levels using nonlinear transfer function noise models and comparison to lysimeter data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 2931–2949. <https://doi.org/10.5194/hess-25-2931-2021>

Vortrag 10.4 (ID 294)

Hectare-scale groundwater recharge estimates in a cropped field derived by soil hydrological modelling and cosmic-ray neutron sensing

Lena M. Scheffele¹, Matthias Munz¹, Till Francke¹, Gabriele Baroni², Sascha E. Oswald¹

¹: *University of Potsdam, Germany*

²: *University of Bologna, Italy*

Kontakt: lena.scheffele@uni-potsdam.de

Groundwater studies often rely on an estimate of groundwater recharge (GWR) as upper boundary condition that is the areal input flux replenishing groundwater. Changing precipitation patterns and extreme weather events like drought years increase the need for using temporally resolved estimates rather than just annual averages and a closer look on the vertical water fluxes in the vadose zone. Measurement of the soil water flux is often only available for the decimeter to meter scale (e.g. tensiometers or lysimeters). Vadose zone models when calibrated with field-scale state variables such as soil moisture can offer a robust approach for deriving diffuse GWR at the hectare-scale, overcoming limitations of upscaling point scale measurements and estimates. Cosmic-ray neutron sensing (CRNS) provides average soil moisture information over a large support volume, making it especially advantageous for cropped fields due to its non-invasive operation without interference with agricultural practices. However, the spatial and vertical sensitivity of the method results in an inherently weighted water content. This, as well as its shallow and soil moisture dependent penetration depth poses some challenges for the application in soil hydrologic modelling.

In this study we systematically assess the calibration of a vertical HYDRUS 1D soil water flow model using different soil moisture products and the resulting GWR. A distributed point sensor network (SN) constitutes the soil moisture benchmark and yields a calibrated model based on highest resolution horizontally and vertically. We compare the use of three CRNS data products for model calibration: neutron counts together with the COSMIC operator (CO), CNRS-derived and thus weighted soil moisture (WT) and profile-shape corrected soil moisture (PC), the latter integrating CRNS information with deeper point measurements.

All CRNS-based models result in cumulative GWR comparable to SN. While CO and WT fail to represent the root-zone soil moisture in deeper layers, PC shows good results, even though the flux dynamics are slightly dampened. All models perform well considering the timing of the downward flux in comparison to an independent estimate based on tensiometer measurements. However, the quantitative estimates from the tensiometers, based on soil hydraulic properties (SHPs) measured on soil cores, result in unrealistic high values exceeding the annual precipitation input and a large spread related to uncertainty in SHPs. Whereas the modelled GWR result in well constrained estimates between 30 to 40 % of the annual precipitation, despite varying SHPs due to non-unique solutions in the inverse modelling. Overall, using CRNS data in model calibration successfully estimated GWR at the hectare-scale. The combination with data of few deeper point sensors allowed at the same time also to assess root-zone soil moisture.

Vortrag 10.5 (ID 225)

Impacts of tree species on groundwater recharge: An improved understanding of processes and challenges via deuterium oxide labelling

Kolja Bosch¹, Paul Königer¹, Susanne Stadler¹, Erkki Hemmens¹, Stefan Fleck², Bernd Ahrends², Henning Meesenburg², Christoph Neukum¹

¹: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Deutschland

²: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

Kontakt: kolja.bosch@bgr.de

In Germany, climate resilient tree species are increasingly used in the process of forest conversion towards climate-change adapted stands. However, information on the impact of this conversion on groundwater resources is scarce. To close this gap, the joint project “Effects of climate-adapted tree species selection on groundwater recharge” of the Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR) and the Northwest German Forest

Research Institute (NW-FVA), funded by the Forest Climate Fund (WKF), aims to better understand the processes of groundwater recharge at six forest sites. The study sites comprise monospecific stands of European beech, Norway spruce, Douglas fir, Scots pine, red oak and pedunculate oak in Northern Germany.

To assess groundwater recharge rates, we performed deuterium oxide (D_2O) tracer experiments on the Scots pine and on the Douglas fir sites since January 2023. At each site one plot of 4 m^2 was irrigated with 5 mm of D_2O labelled water consisting of 20 L of water mixed with 0.35 L of D_2O (99.8 atom % D). We will present the results of the tracer peak displacement until spring and late summer 2023 for each plot together with groundwater recharge estimates based on soil gravimetric water content and bulk density data of the forest soils. Preliminary results show that the tracer peak moved down to a depth of 1.5 m in the Scots pine and to 1 m in the Douglas fir stand (see figure). During the summer months, the tracer stagnated just below the root zone with high tracer peak values ($\delta^2H > 2500\text{‰}$). These distinct peaks will be used as starting point to estimate the groundwater recharge during the winter 2023/2024.

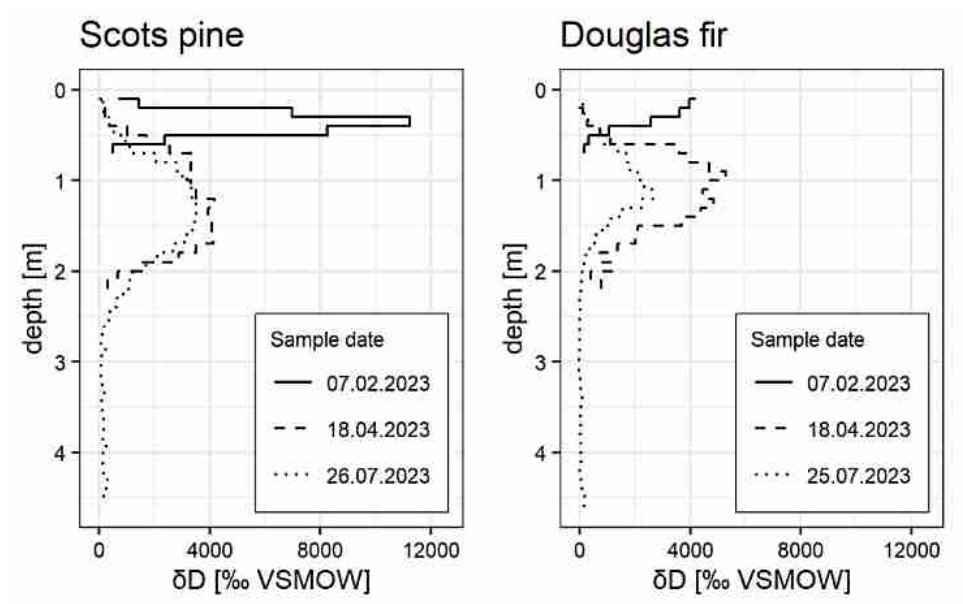


Abb.1: Depth profiles of δD values in the Scots pine and Douglas fir stands.

Analysis of low flow measurements in river basins in Hesse, Germany

Laura Eck¹, Angela Prein², Hannah Budde², Christoph Schüth¹

¹: Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Darmstadt, Deutschland

²: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden, Deutschland

Kontakt: hannah.budde@hlnug.hessen.de

Low flow measurements reflect the behaviour of streams during periods of dryness and can help to assess the economic and ecologic impact of dry spells. Low flow values can be directly associated with groundwater recharge and have important implications on sustainable (ground-) water extraction for water supply or agriculture.

Climate-induced alterations in the amount and timing of river flows can intensify competition for municipal water use, irrigation, and hydropower generation. Changes in climate are predicted to cause an increase in number and severity of hydrological droughts with implications on water quantity and water quality due to decreases in water volume. Low flow values and low water levels deliver information on compliance of threshold values for the volume-dependent concentration of contaminants in water during drought events.

During the exceptionally hot and dry summer of 2003, the Hessian Agency for Nature Conservation, Environment and Geology (HLNUG) carried out a state-wide low flow measurement program in over 750 gauges. After long times without precipitation, the dry weather discharge in streams equals approximately the baseflow which is a rough estimation of groundwater recharge.

The data from 2003 was used for a graphical representation of low flows for the corresponding river drainage basins. In total, 725 drainage basins were delineated. The measured discharge was normalised to the drainage basin size to allow a comparison.

For drainage basins where an outflow and at least one inflow were measured, the volume of the inflows and outflows was compared to determine whether the volume increased or decreased in the drainage basin. A balance of the discharge could be calculated for 316 of the 725 drainage basins. In total, 256 positive balanced discharge values were found; 52 drainage basins had a negative balanced discharge, and for 8 drainage basins, the balance of inflowing and outflowing discharge was equal to zero.

Dry weather discharge depends on a variety of geographic and anthropogenic factors that may interact with each other. The influence of drainage basin size, number of fault zones, and lithological unit on the measured low flow values were investigated. The quantitative influence of anthropogenic activities such as groundwater extraction from wells and gravel

pits, or water discharge in streams from water treatment plants were not examined because of insufficient data.

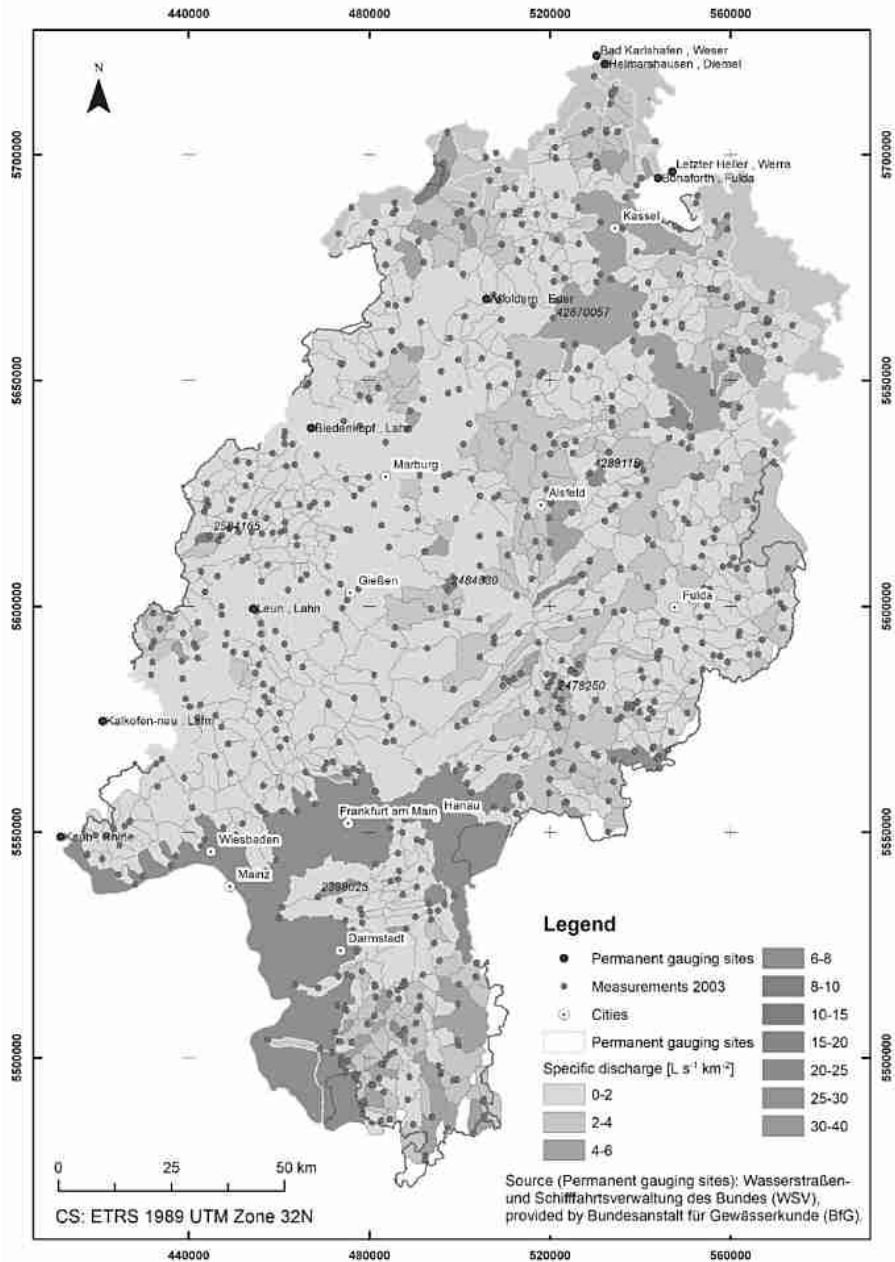


Abb. 1: Map of the drainage basins that were delineated using the results of the dry weather discharge measurement program in 2003. The measurement sites with the highest measured values, including the Edersee barrage, are labelled in italics.

A weak positive correlation (Spearman's $\rho = 0.217$, p value = $3.8E-09$) was found for drainage basin size and the corresponding low flow. It was concluded that larger catchments tend to generate higher discharge by providing more groundwater-fed baseflow during dry spells.

For the balanced discharge per drainage basin and the corresponding drainage basin area, a weak positive correlation (Spearman's $\rho = 0.115$, $p = 0.0411$) was found. All drainage basins with an area larger than $1,000 \text{ km}^2$ had a positive specific discharge, indicating that larger drainage basins are less susceptible to influences which decrease the discharge, such as groundwater extraction. No correlation was found between the number of fault zones per drainage basin (which tended to increase with the basin size) and the measured low flow and discharge. Drainage basins situated in the lithological unit of the Triassic Buntsandstein showed higher low flow and discharge values than drainage basins covered by Paleozoic and Tertiary volcanic rocks or Devonian marine sedimentary rocks.

Poster 10.2 (ID 263)

Neubildung von Grundwasservorräten – Validierung und Anwendung einfacher Berechnungen mittels Tabellenkalkulation

Alina Weißer, Freya Fünfgeld, Uwe Hekel

HPC AG, Niederlassung Rottenburg am Neckar

Kontakt: uwe.hekel@hpc.ag

Der Beitrag befasst sich mit der Validierung einer einfachen Methode zur Bestimmung der Grundwasserneubildung und ihrer Anwendung für Klimaszenarien. Das Verfahren wurde anhand von sechs für die Wassergewinnung genutzter Quelleinzugsgebiete im Nordschwarzwald validiert. Mit einem Grundwasserabfluss aus Schichtquellen stellen die untersuchten Einzugsgebiete quasi großmaßstäbliche Naturlysimeter zwischen 6 Hektar und 4 km^2 Flächengröße dar. Das gezeigte Beispiel stammt aus einem 20 Hektar großen Quelleinzugsgebiet im Buntsandstein.

Methode

Die Ermittlung der Grundwasserneubildung erfolgt mittels einer einfachen Tabellenkalkulation als Kombination einer klassischen Berechnung der potenziellen Evapotranspiration nach Haude (1955) und des Bodenwasserhaushaltsmodells nach Uhlig (1959).

Nach Uhlig wird die maximale Größe des Bodenwasserspeichers durch die von der Bodenart abhängigen nutzbaren Feldkapazität beschrieben.

Für die Bilanz des Bodenwasserspeichers ist die Differenz aus Niederschlag und Verdunstung maßgebend. Bei einem Verdunstungsüberschuss wird in Abhängigkeit vom bereits vorhandenen Bodenwasserdefizit die potenzielle zur tatsächlichen Evapotranspiration korrigiert. Bei einem Niederschlagsüberschuss wird der Bodenwasserspeicher aufgefüllt. Überschreitet der Bodenwasserspeicher die nutzbare Feldkapazität, gehen weitere Niederschlagsüberschüsse als Grundwasserneubildung ein. In der Bilanzrechnung können ein von der Niederschlagsintensität und vom Relief abhängiger Oberflächenabfluss sowie ein temperaturabhängiger Schneespeicher berücksichtigt werden.

Aus der Grundwasserneubildung und der Flächengröße des Quelleinzugsgebiets werden Wochensummen des abflussfähigen Grundwasservorrats bestimmt. Aus diesen Wochenimpulsen werden mittels der Exponentialfunktion für das Leerlaufverhalten die resultierenden Ganglinien der Quellschüttung berechnet. Die Gesamtganglinie der Quellschüttung ergibt sich aus der Superposition sämtlicher Ganglinien der Wochenimpulse.

Validierung

Im gezeigten Praxisbeispiel werden die Neubildungsmengen über die Referenzjahre 2021 und 2022 betrachtet (s. Abbildung). In diesem Zeitraum wurden wöchentliche Abflussmessungen durchgeführt. Die berechneten und gemessenen Quellschüttungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Diese und weitere Praxisanwendungen zeigen, dass die vorgestellte Neubildungsberechnung im lokalen Maßstab sehr gut funktioniert, wenn das Einzugsgebiet im Hinblick auf die eingehenden Parameter ausreichend homogen ist.

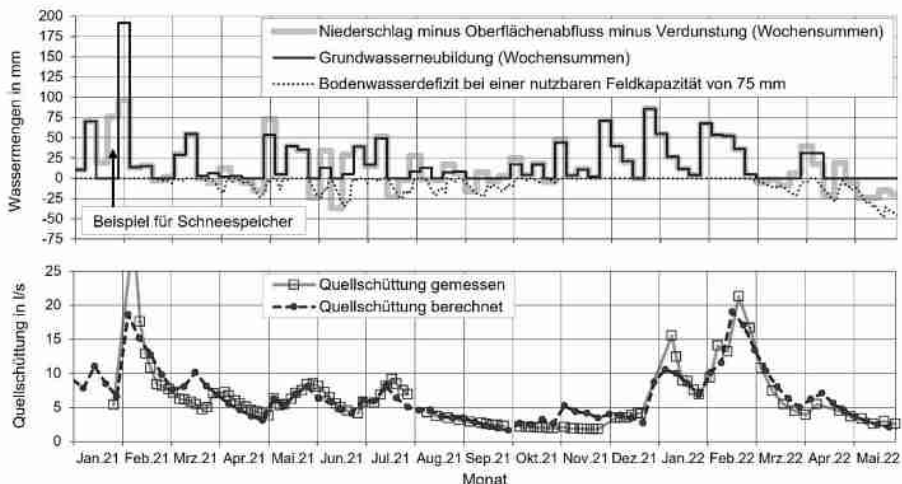


Abb. 1: Neubildungsmengen und Quellschüttung über die Referenzjahre 2021 und 2022.

Klimaszenarien

Mit dem validierten Verfahren können durch eine Variation von Parametern, z. B. mit dem Ansatz von wärmeren und trockeneren Klimaszenarien, Veränderungen berechnet und damit die Empfindlichkeit des Aquifersystems und mögliche Auswirkungen für die Wassergewinnung untersucht werden.

Poster 10.3 (ID 295)

Combining stable water isotope approaches and water storage measurements to assess vertical soil water fluxes quantity and timing: insights from a managed agricultural landscape in NE Germany

Katya Dimitrova-Petrova¹, Christine Stumpp², Lena Scheiffele¹, Sascha Oswald¹

¹: Institute of Environmental Science and Geography, University of Potsdam, Germany

²: Institute of Soil Physics and Rural Water Management, University of Natural Resources and Life Sciences Vienna, Austria

Kontakt: katya.dimitrova.petrova@uni-potsdam.de

Characterising groundwater recharge (GWR) is crucial for effective groundwater resources management, yet its assessment is challenging, as there are no direct ways of measuring it beyond point scale. The spatial variability introduced by land use management in agricultural landscapes further complicates the assessment. Furthermore, most GWR estimates rely on water balance approaches or models calibrated with water storage data, which is often limited to represent specific vadose zone compartments only.

In this study we aim to address the above challenges at the field scale. We employ a combination of approaches, including stable water isotope measurements and continuous water storage observations spanning the soil profile from topsoil to groundwater table, across various land use covers. The study was conducted in a highly instrumented research site near Potsdam, Brandenburg, situated on a gentle hillslope and covered by a variety of agricultural plots.

During two sampling campaigns in spring and autumn 2023 we collected bulk soil water from four soil profiles (0-150 cm) along with monthly groundwater samples and analysed them for stable water isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$). By integrating isotope data with soil moisture observations, we trace GWR using the peak shift method. Complementary GWR estimates are derived from timeseries of tensiometers and groundwater level fluctuations.

We present an overview of the experimental set up and preliminary GWR estimates. Our aim is to offer a complementary perspective on the key processes governing vertical water

fluxes within the vadose zone across different depths, land covers, and hillslope positions, advancing our understanding of GWR dynamics at this managed agricultural site.

Poster 10.4 (ID 296)

Estimating groundwater recharge time-series using shallow root zone soil moisture at different spatial scales for an agriculturally managed test site

Lena Scheiffele, Katya Dimitrova Petrova, Sascha E. Oswald

University of Potsdam, Germany

Kontakt: lena.scheiffele@uni-potsdam.de

Quantification of natural rates of groundwater recharge (GWR) is challenging yet crucial for water resource management. In the context of climate change, weather extremes combined with unsustainable groundwater abstraction rates may make this task even more demanding. In Brandenburg, one of the driest regions in Germany, dependence on groundwater for drinking water and agriculture is high. Here, the combination of increased drought frequency and shifting precipitation patterns may cause declining groundwater levels. Sustainable management of this vital resource depends therefore on accurate estimations of current and future recharge to replenish groundwater.

While GWR cannot be directly measured at field scale, root zone soil moisture (SM) observations at relevant spatial scale can inform soil hydrological models to simulate vertical percolation. Such data can be obtained from networks of profile SM sensors that provide detailed information of SM in depth or alternatively from cosmic ray neutron sensors (CRNS), which allow for hectare-scale non-invasive SM monitoring of the shallow root zone.

In this study we exploit the unique wealth of continuous soil moisture observations at a research test site near Potsdam, Brandenburg, running four years so far. At this observatory, various agricultural plots and fields at a slight hillslope overlay a glacial till aquifer with groundwater table at a depth between 1 to 10 m. The backbone of high temporal resolution SM observations is the Marquardt CRNS cluster providing an areal mean SM as well as spatial differences in SM. We have utilized different soil moisture products to calibrate a vadose zone model (HYDRUS 1D) and to derive daily estimates of the downward water fluxes below the root-zone, constituting GWR during four years. Additional measurements of soil texture and soil hydraulic properties as well as complementary water storage measurements at deeper depths provide a solid basis for constraining the model calibration.

We present preliminary results from various model calibrations and discuss whether this combination of CRNS and modelling approaches are suited to understand soil moisture partitioning and GWR at agriculturally managed lowland sites. These findings have implications for monitoring requirements and decision support in the field of groundwater resources at landscape scale.

Poster 10.5 (ID 301)

Abschätzung der Grundwasserneubildung mit Hilfe datengetriebener Ansätze – Validierung anhand tatsächlich gemessener Wasserflüsse

Thomas Fichtner¹, Stefan Werisch², Andreas Hartmann¹

¹: TU Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft

²: Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft Sachsen

Kontakt: thomas.fichtner@tu-dresden.de

Die Grundwasserneubildung stellt nicht nur eine wichtige Rolle bei der Sicherstellung der Ressourcen zur Trinkwasserversorgung dar, sondern dient beispielsweise auch als Basis für die Ermittlung des Anteils an Bodenwasser, welches zur Transpiration durch verschiedene Pflanzen und Bäume zur Verfügung steht. Ein wichtiges Ziel des Umwelt Monitorings ist daher unter anderem die verlässliche Abschätzung der Grundwasserneubildung als Bilanzgröße des Wasserhaushaltes. Im Zuge von klimatischen Veränderungen, einhergehend mit häufigeren und stärkeren Trockenheitsperioden sowie einer veränderten Niederschlags-Charakteristik kommt dieser Information eine große Bedeutung bei, da die Grundwasserneubildung besonders sensitiv auf Änderungen des Klimageschehens reagiert.

Da sich Grundwasserneubildungsraten nicht direkt messen lassen, erfolgt momentan die Abschätzung oft mittels Wasserhaushaltsmodellierung, die allerdings teilweise auf nicht überprüfbaren Modellannahmen aufgrund fehlender Datenverfügbarkeit beruht. Die daraus resultierenden Unsicherheiten führen zu einer nicht unerheblichen Unter- oder Überschätzung der tatsächlichen Wassermengen.

Eine vielversprechende Alternative für die Abschätzung der Grundwasserneubildung stellen dabei datengetriebene Ansätze dar. Die Berechnung der Grundwasserneubildung basiert hier auf den erfassten Meteorologischen Daten incl. der Ereignismuster des Niederschlages, den Isotopensignaturen des Niederschlages sowie den hydraulischen Parametern der Bodenhorizonte. Eine Validierung erfolgt hier mittels gemessener Statusgrößen im Boden, wie z. B. der Bodenfeuchte. Allerdings bestehen auch hier Unsicherheiten bezüglich

der tatsächlichen Wassermengen, die für die Grundwasserneubildung zur Verfügung stehen.

Zur Identifizierung solcher bestehenden Unsicherheiten erfolgte die Abschätzung der Grundwasserneubildung mit zwei datengetriebenen Ansätzen (FluSM, LWFBrook90.julia) anhand eines Datensatzes einer Lysimeterstation. Im Anschluss wurden die ermittelten Wassermengen anhand der an der unteren Randbedingung des Lysimeters tatsächlich gemessenen Wasserflüsse validiert.

Die erzielten Ergebnisse liefern dabei aufschlussreiche Erkenntnisse, um die genutzten datengetriebenen Ansätze weiterzuentwickeln und bisherige Unsicherheiten in der Abschätzung der Grundwasserneubildung zu erkennen und nach Möglichkeit zu verringern. Damit kann eine gute Basis für eine zukünftig verbesserte Abschätzung der Grundwasserneubildung gelegt werden.

11 Grundwasser: Interaktionen mit der vadosen Zone und Oberflächengewässern

23.03.2024, 10:30 - 12:00, Konferenzraum 2

Harrie-Jan Hendricks-Franssen (Forschungszentrum Jülich GmbH)

Stefan Kollet (Forschungszentrum Jülich GmbH)

Vortrag 11.1 (ID 216)

Auftreten von Mikroplastik entlang der Schnittstelle Oberflächenwasser-Grundwasser bei Uferfiltration

*Marco Pittroff^{1,2}, Matthias Munz¹, Constantin Loui¹, Mathias Bochow³,
Hermann-Josef Lensing², Sascha E. Oswald¹*

¹: Institut für Umweltwissenschaften und Geographie, Universität Potsdam, Deutschland

²: Abteilung Geotechnik, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe, Deutschland

³: Sektion Fernerkundung und Geoinformatik, Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches
GeoForschungsZentrum GFZ, Deutschland

Kontakt: marco.pittroff@baw.de

Mikroplastikpartikel (MPP) wurden mittlerweile weltweit in verschiedenen aquatischen Systemen wie Flüssen, Seen und dem Grundwasser gefunden, jedoch ist ihr Nachweis und Charakterisierung sehr aufwändig. So gibt es im Hinblick auf deren Verbreitung an der Schnittstelle zwischen Oberflächenwasser-Grundwasser, zentral bei der Gewinnung von Uferfiltrat, noch viele offene Fragen zum Rückhaltevermögen und Transportverhalten von Mikroplastik in den verschiedenen Kompartimenten (Oberflächenwasser, Grundwasser und Sediment).

Ziel dieser Studie war es, das Vorkommen und die räumlichen Verteilungsmuster von MPP in einem Oberflächengewässer (Havel, Berlin), dem angrenzenden Grundwasser sowie in ungestörten Flussbettsedimentkernen (Main, Marktbreit) zu erfassen und hinsichtlich ihrer potenziellen Transport- und Rückhaltemechanismen zu interpretieren. Für die MPP-Analytik wurde die bildgebende Nahinfrarot-Spektroskopie (NIR) genutzt, welche die Bestimmung der MPP-Anzahl ($\varnothing > 100 \mu\text{m}$), der Polymertypen und der Partikelgröße ermöglicht.

Die Ergebnisse zeigten mittlere Konzentrationen von 0,65 MPP/L im Flusswasser und nur 0,004 MPP/L im angrenzenden Grundwasser. Die am häufigsten vorkommenden Polymertypen im Grundwasser waren PE, PVC, PET und PS; und im Fluss PP und PE. In der Hälfte der Grundwasserproben wurde kein MPP gefunden. Betrachtet man nur die Proben mit quantifizierbarem MPP, so waren durchschnittlich 0,01 MPP/L im Grundwasser vorhanden. Dies bedeutet, dass insgesamt 98,5 % aller MPP größer 100 µm bei der Uferfiltration zurückgehalten wurden.

In den Flussbettsedimenten wurden MPP über die gesamte Tiefe von 100 cm mit durchschnittlich $21,7 \pm 21,4$ MPP/kg nachgewiesen. Für die MPP-Verteilung konnten drei vertikale Trends abgeleitet werden: nahezu konstant in den oberflächennahen Schichten (0–30 cm), eine Abnahme in den mittleren Schichten (30–60 cm) und ein deutlicher Anstieg in den tiefen Schichten (60–100 cm). Die dominierenden Polymertypen waren PE, PP und PS. Der Anteil kleinerer MPP (100–500 µm) nahm mit der Tiefe zu, die größten MPP wurden jedoch in den tiefen Schichten nachgewiesen. Aus der heterogenen MPP-Verteilung lassen sich Rückschlüsse auf komplexe hydro-morphologische Prozesse innerhalb der letzten Jahrzehnte ziehen.

Die Gesamtheit der verschiedenen Untersuchungen zeigt, dass Flussbettsedimente als vorübergehende oder langfristige Akkumulationsbereiche für MPP sowie als potenzieller Vektor für das Eindringen kleiner MPP in den lokalen Grundwasserleiter fungieren können.

Vortrag 11.2 (ID 215)

Transport und Rückhalt von Mikroplastikpartikeln in Sedimenten unter Berücksichtigung von Infiltrationsgeschwindigkeit, Partikel- und Korngröße

*Matthias Munz¹, Constantin Loui¹, Marco Pittroff^{2,1}, Denise Postler¹,
Sascha E. Oswald¹*

¹: Institut für Umweltwissenschaften und Geographie, Universität Potsdam, Deutschland

²: Abteilung Geotechnik, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe, Deutschland

Kontakt: munz@uni-potsdam.de

Als relevante terrestrische Transportwege für Mikroplastik gelten inzwischen Fließgewässer und somit stellen sie mit ihrer Fracht nicht nur eine Gefährdung von Meeren dar, sondern auch des oberflächennahen Grundwassers. An der Schnittstelle von Oberflächenwasser zum Grundwasser können die Flussbettsedimente sowohl als Akkumulationsbereiche für Mikroplastikpartikel (MPP) sowie potenziell als Eintragspfad bei der Verlagerung von

MPP in den lokalen Grundwasserleiter fungieren. Der Transport bzw. Rückhalt von MPP in solchen natürlichen Sedimenten hängt dabei vermutlich von einer Vielzahl von variablen hydrogeologischen Randbedingungen ab.

In dieser Studie wurde eine Serie von Laborexperimenten mit gesättigten Sedimentsäulen ($L = 50$ cm, $D = 8$ cm) durchgeführt, um die Effekte der verschiedenen Einflussfaktoren auf den Transport und den Rückhalt von MPP im gesättigten Sediment genauer zu quantifizieren. Hierzu wurden die vertikalen Verteilungsmuster von fluoreszierenden, sekundären Polystyrol Partikeln in Abhängigkeit von ihrer Partikelgröße ($\varnothing$ 100 μm bis 2000 μm), der Korngröße des Sediments (d_{50} 1,6 mm und 5,6 mm), der Fließgeschwindigkeit (1,8 m d^{-1} bis 27 m d^{-1}) und der Dauer des Infiltrationsflusses (2 bis 8 Porenvolumen) analysiert. Die Sedimentsäulen wurden tiefenorientiert in 10 cm Segmenten beprobt, das MPP in den Proben separiert und die zugrundeliegende MPP-Tiefenverteilung mittels Fluoreszenzbildanalyse ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen eine hohe Partikelretention in den oberen Sedimentschichten. Generell wurden nahezu alle MPP in den oberen 20 cm bzw. 15 cm der kiesigen bzw. sandigen Sedimente zurückgehalten. Die exponentiell abnehmende MPP-Tiefenverteilung entspricht einem Filtrationsprozess, wurde dabei aber maßgeblich von der Strömungsgeschwindigkeit, der Sedimentkorngröße und der Partikelgröße beeinflusst. Bei kiesigem Sediment und Strömungsgeschwindigkeiten ≥ 13 m d^{-1} wurde jedoch ein Anteil von ca. 0,3 % der zugegebenen MPP mit einer Größe von 100 μm bis 500 μm immerhin bis in Sedimenttiefen von 50 cm verlagert. Dies deutet darauf hin, dass MPP grundsätzlich das Potenzial haben, über den hyporheischen Austausch oder induzierte Uferfiltration, in grobkörnige Flussbettsedimente und alluviale Grundwasserleiter zu infiltrieren. Um den Einfluss verschiedener Polymertypen zu berücksichtigen, werden weitere Experimente mit eingefärbten PVC- und PET-Partikeln durchgeführt und in den Kontext der PS-Ergebnisse eingeordnet werden.

Somit liefert diese Studie wichtige Erkenntnisse, um die Transport- und Rückhalteprozesse von MPP im gesättigten Sediment, wie an der Schnittstelle zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser und den dort vorherrschenden variablen hydrogeologischen Randbedingungen, besser zu verstehen.

Vortrag 11.3 (ID 287)

Subsurface Fe (II) affects concentrations of dissolved O₂ in streamwater

Stefan Peiffer¹, Silvia Parra-Suarez¹, Romy Wild², Ben Gilfedder¹, Jürgen Geist², Johannes Barth³, Sven Frei¹

¹: Uni Bayreuth, Deutschland

²: TU München, Deutschland

³: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen, Deutschland

Kontakt: s.peiffer@uni-bayreuth.de

The interface between groundwater and surface water is a critical zone influencing ecohydrological and biogeochemical cycles within surface water ecosystems. It is characterized by complex redox gradients, with groundwater-mediated inflow of reduced substances interacting with oxidic water from the stream.

In this study, we have experimentally simulated the inflow of Fe(II)-rich groundwater into the open stream water of a flume system to quantify its effect on dissolved oxygen concentration in both the stream water and the hyporheic zone. The experimental setup consisted of 12 flumes, half of which were used for input of groundwater augmented with Fe(II), while the other half were used as controls. We studied the effects of coarse sediment vs. fine sediment and mean vs. low flow rate within a threefold replicated, crossed design. Weekly sampling campaigns were performed to analyze Fe(II), Fe(III), DOC, and DO concentrations in the pore water (hyporheic zone) and in the open water over five consecutive weeks.

Our results indicate that Fe(II) inflow substantially decreased DO concentrations in both the pore and open waters. Oxygen uptake rates increased by up to $\sim 1.7 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ at a mean flow rate and up to $\sim 0.4 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ at a low flow rate. This accounts for a contribution of Fe(II) input to the overall uptake rate of between 25 and 15 %, respectively. In conclusion, our study highlights the importance of considering the effects of hyporheic and riparian redox processes and subsequent subsurface inflow of Fe(II) into streams on their oxygen budget and the health of stream ecosystems. Against the background of rising groundwater contribution during drought affected low-flow conditions in headwater streams these systems may be particularly sensitive to Fe(II) related oxygen uptake.

Vortrag 11.4 (ID 268)

Integration von Prozessen in der vadosen Zone und in Oberflächengewässern in die Grundwassermodellierung

Katrin Brömme¹, Martin Becker¹, Simon Schröder¹, Harald Zepp², Timo König¹

¹: delta h Ingenieurgesellschaft mbH, Deutschland

²: Ruhr-Universität Bochum, Geographisches Institut, Deutschland

Kontakt: kb@delta-h.de

Lange hieß es, Grundwasser wird im Grundwassermodell modelliert und Oberflächenwasser im Oberflächenwassermodell. Das Grundwassermodell SPRING geht neue Wege und integriert wichtige Prozesse in der vadosen Zone und im Oberflächengewässer in die Modellierung (siehe Abbildung 1), um das gekoppelte Gesamtsystem aus Grundwasser und Oberflächenwasser besser abzubilden. Eine wichtige Motivation dabei sind aktuelle Fragestellungen zur Klimaresilienz des Landschaftswasserhaushalts und der Grundwasserressourcen oder zu Auswirkungen von Trockenperioden.

Mit der bereits eingeführten Methode RUBINFLUX bilanziert SPRING den Bodenwasserhaushalt in Tagesschritten und ermittelt daraus flächendifferenzierte Sickerwasserraten ins Grundwasser (Neubildung) sowie Direktabflüsse. Bisher war dabei die vadosen Zone als Einschichtmodell mit einer konstanten Simulationstiefe parametrisiert. Diese wird jetzt abhängig vom aktuellen Grundwasserstand in jedem Zeitschritt angepasst. Durch die Integration des kapillaren Aufstiegs ergibt sich umgekehrt auch eine Anpassung des Grundwasserstands, wenn der Bodenwassergehalt aufgefüllt wird.

Die Interaktion zwischen Grundwasser und Oberflächengewässer wurde bisher bereits in Form einer Leakagebeziehung beschrieben, bei der in Abhängigkeit von der Differenz zwischen Grundwasser- und Vorflutpotenzial entweder das Grundwasser ins Gewässer exfiltriert oder umgekehrt. Hinzu kommt jetzt eine Bilanzierung der Volumenströme auch im Oberflächengewässer. Sie wird möglich durch die Vernetzung der Gewässerabschnitte in Fließrichtung. Von der Quelle ausgehend stromabwärts werden so alle ein- und ausströmenden Volumenströme bilanziert und der Abfluss im Gerinne ermittelt. Dazu gehören neben den Leakagemengen die Anteile aus Direktabfluss sowie an der Geländeoberfläche austretende Sickermengen. Sie beschreiben Hangquellen, Zwischenabflüsse und Drainagemengen.

Da die Leakagemengen aus der Potenzialdifferenz zwischen Grundwasser und Gewässer ermittelt werden, soll der Wasserstand im Gerinne möglichst gut approximiert werden. Dafür wurden die Ansätze von Manning-Strickler und Kalinin-Miljukov implementiert. Letzterer berücksichtigt Speichereffekte in ablaufenden Wellen.

Am Beispiel des Hammbach-Wienbach im Lippe-Einzugsgebiet in NRW wird gezeigt, wie die integrierte Modellierung das Systemverständnis verbessert und damit eine Grundlage für Planungen schafft. Es ergeben sich die folgenden Vorteile: Influyente Gewässerabschnitte geben nur die Wassermenge ins Grundwasser ab, die tatsächlich vorhanden ist. Zeitweise trockenfallende Gewässerabschnitte können abgebildet werden. Bei der Kalibrierung kann zusätzlich mit Abflussganglinien verglichen werden. Die zusätzliche Bilanzierung der Oberflächengewässer verbessert die Aussagequalität des Modells insbesondere bei starker GW-OW-Interaktion wie am Hammbach-Wienbach.

Die Untersuchungen zum Hammbach-Wienbach-Gebiet wurden im BMBF-WaX-Verbundprojekt „KliMaWerk: Nachhaltige Bewirtschaftung des Landschaftswasserhaushaltes zur Erhöhung der Klimaresilienz: Management und Werkzeuge“ gefördert (FKZ: 02WEE1626E).

Prozess	Bisherige Simulation	Neue Simulation
Grundwasserneubildung	Annahme eines konstanten Flurabstands im Bodenwasserhaushaltsmodell	Variabler Flurabstand mit Anpassung in jedem Zeitschritt (Tag)
Grundwasserneubildung	Ohne kapillaren Aufstieg	Mit kapillarem Aufstieg
Abfluss im Gerinne	Unbekannt	Bilanzierung aller Wassermengen im Gerinne und Berechnung des Abflusses in jedem Gewässerabschnitt für jeden Zeitschritt (Tag)
Leakage zwischen GW und OW	Annahme eines konstanten Vorflutwasserstands	Variabler Vorflutwasserstand mit Anpassung in jedem Zeitschritt (Tag), Ableitung aus dem Abfluss

Abb. 1: Unterschiede zwischen den Simulationsmethoden.

König, Ch. M., Becker, M., Brömme, K. et al. SPRING Benutzerhandbuch, Ausgabe 6.1, delta h Ingenieurgesellschaft mbH, Witten (2022)

Zepp, H., König, C., Kranl, J. et al. Implizite Berechnung der Grundwasserneubildung (RUBINFLUX) im instationären Grundwasserströmungsmodell SPRING. Eine neue Methodik für regionale, räumlich hochaufgelöste Anwendungen. Grundwasser 22, 113–126 (2017)

Vortrag 11.5 (ID 305)

Water content and stream tracing under light rail transit

Lúcia Pedrosa¹, Christian Engelmann¹, Martin Binder^{1,2}, Markus Zingelmann³, Traugott Scheytt¹

¹: TU Bergakademie Freiberg, Chair for Hydrogeology and Hydrochemistry, Germany

²: University of Basel, Department of Environmental Sciences, Hydrogeology, Applied and Environmental Geology, Switzerland

³: Beak Consultants GmbH, Germany

Kontakt: Lucia.Pedrosa@geo.tu-freiberg.de

Railway systems are among the most important infrastructure for transportation of people and goods. However, their maintenance implies the use of contaminants such as herbicides and oil derivatives that can spread underneath railway embankments. To inspect and evaluate the hazard risk, it is necessary to fully understand the dynamics of water flow through the embankment, unsaturated and saturated zone. Hence, numerical experiments were performed following a one-variable-at-a-time approach to systematically investigate the influence of parameters on water content distribution and stream patterns. The parameters are hydraulic characteristics of the embankment and the subsurface, i.e., (saturated water content), (residual water content), α and (empirical coefficients shaping the soil water retention function), and (saturated hydraulic conductivity). Further factors are recharge (effective precipitation), groundwater table levels, influence of a less permeable layer at multiple depths, and thickness of the embankment. A graphical analysis and an overview table helped identify the variables influencing stream paths and further localize areas where the water accumulates or flows. The study identifies groundwater levels and empirical coefficients (specially) governing soil-water retention as the most sensitive parameters shaping water percolation fronts. Most of the scenarios show an area affected (case of conservative transport) between 0 and 2.5 m of depth, and 3 and 3.6 m of width. And when including the most extreme values this area may extend to 5.6 m of width and a maximum depth of 8.5 m.

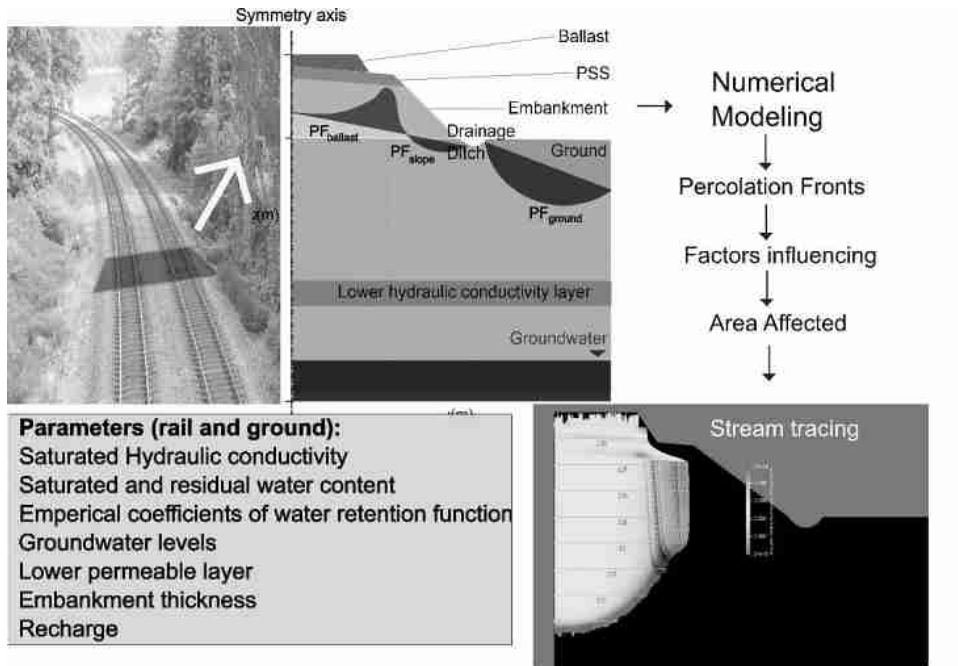


Abb. 1: Graphical abstract.

Vortrag 11.6 (ID 199)

Utilizing tritium and stable water isotopes to investigate surface and groundwater interaction at a barrage system

Jessica Landgraf, Dirk Radny, Simon Mischel, Michael Engel, Axel Schmidt

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Deutschland

Kontakt: landgraf@bafg.de

Large rivers are often shaped by various constructions like straightening, groynes, or barrage systems. These constructions affect river discharge and interaction with groundwater. They may even alter water quantity and quality of both compartments. To investigate the dynamics of surface and groundwater interaction at a barrage site, tritium and stable water isotopes as natural tracers are favorable. They contribute to identify flow paths and transit times which are both vital to characterize the relationship of surface and groundwater.

The Mosel River is especially interesting for tritium-based tracer investigations as it is fed with tritium-rich water by the nuclear power plant Cattenom in France. During a research project of the Mosel River in 2020 to 2022 we found a favorable site for investigating

surface and groundwater interaction at a barrage. The site at Lehmen (ca. 20 km from Koblenz) has a large barrage and five groundwater wells along the riverbank. Three of these groundwater wells are upstream while two are downstream of the lock. The geology of the site consists of sandy silt at the top, followed by alluvial loam, gravel terrace, and Devonian slate. The filter sections of the wells are placed within highly conductive gravel (hydraulic conductivity $2 \cdot 10^{-3}$ m/s). Monthly samples of four groundwater wells and surface water samples (one upstream, one downstream the barrage) from July 2020 to August 2022 were accompanied by high-frequency (30 min) surface and groundwater level monitoring. During sampling campaigns, field parameters (temperature, electric conductivity, pH value, oxygen content, and water hardness) were measured and all samples were analyzed in the lab for major ions, metals, stable water isotopes, and tritium.

At the lower Mosel River, we found mean tritium concentrations of 20 Bq/L which is significantly higher than atmospherically induced background concentrations (1 Bq/L). Four of the investigated groundwater wells along the barrage showed mean tritium concentrations of 15 Bq/L validating a frequent surface and groundwater interaction. A small hydraulic gradient of up to 5 cm was observed between surface water to the first upstream well while from upstream to downstream there is a large gradient of 4 m and another approx. 2.5 m to the well at the end of the monitored section. The chemical groundwater composition of all wells is similar to that of surface water. Combining the depicted results led to the conclusion that upstream Mosel water is infiltrating into groundwater, moves parallel to the barrage through the groundwater aquifer and exfiltrates downstream back into the river (reflow). Four high or low tritium concentration events of the river water were utilized to identify damped groundwater reaction with residence times of 90 – 120 days (tritium) and 60 – 75 days ($\delta^{18}\text{O}$). The interaction of surface and groundwater can be described as diffuse.

Our findings demonstrate that tritium concentrations contribute to validation of surface and groundwater interaction as well as to understanding the hydrological fluxes. In future research we see tritium and stable water isotopes incorporated to investigate flow paths at high temporal and spatial resolution, increasing the understanding of diffuse infiltration and exfiltration schemes.

Untersuchung der Beanspruchungen erdberührter Bauteile durch Grundwasser während Hochwasserereignissen

Sonja Letzelter, Héctor Montenegro, Denis Maier

Bundesanstalt für Wasserbau, Deutschland

Kontakt: sonja.letzelter@baw.de

Bei Bauwerken im Überflutungsbereich von Fließgewässern kann die Belastung durch Grundwasser bei Hochwasserereignissen entscheidend für die Bemessung sein. Die Annahme hydrostatischer Wasserdrücke entsprechend dem Scheitelwert des jeweiligen Bemessungsereignisses ist ein häufig verwendeter (weil recht einfacher) und konservativer Ansatz. Solch ein Ansatz kann jedoch die tatsächlich zu erwartenden Beanspruchungen des Gebäudes aus dem Grundwasserdruck deutlich überschätzen und einen erheblich aufwendigeren Entwurf veranlassen. Bezogen auf die Hochwasserdynamik ist die Reaktion des Grundwassers im Allgemeinen deutlich langsamer, selbst bei relativ durchlässigen Böden und großen hydraulischen Gradienten. Die Hauptursache für die meist verzögerte Reaktion des Grundwassers auf Hochwasserereignisse liegt in der teilgesättigten Zone über dem Grundwasser, die relativ niedrige, ungesättigte hydraulische Leitfähigkeiten und ein erhöhtes Volumen für die Wasserspeicherung im Boden impliziert.

Zur quantitativen Analyse der Infiltrations- und Aufsättigungsdynamik bei Hochwasserereignissen wurden mehrere vertikal-ebene Strömungsberechnungen unter Berücksichtigung variabler Sättigung durchgeführt. Betrachtet wird ein Bauwerk, das dem Hochwasserereignis ausgesetzt ist. Einher mit dem Hochwasser geht ein Anstieg des Grundwasserspiegels infolge der Umkehrung der lateralen hydraulischen Gradienten und der Oberflächeninfiltration. Die Mächtigkeit der ungesättigten Zone (bzw. die Lage des Grundwasserspiegels) in Bezug auf das Bauwerk ebenso wie die Mächtigkeit des gesättigten Grundwasserkörpers bestimmen die Reaktion des Grundwassers auf das Hochwasserereignis. Die Lage des Grundwasserspiegels sowie die Mächtigkeit des Grundwasserleiters wurden in der vorliegenden Untersuchung entsprechend charakteristischer Gegebenheiten der geotechnischen Ingenieurpraxis ausgewählt.

Die Untersuchungen berücksichtigen einen homogenen Bodenaufbau sowie den Einfluss einer Bodenschichtung und den Einfluss einer zufallsverteilten räumlichen Variabilität der Durchlässigkeitseigenschaften. Infolge der großen Nichtlinearitäten zwischen Porenwasserdruck, Sättigung und ungesättigter Durchlässigkeit, die typischerweise bei der Berechnung teilgesättigter Infiltrationsprozesse in vergleichsweise trockene Böden vorkommt, erwiesen sich die Berechnungen als sehr anspruchsvoll.

Alle untersuchten Varianten zeigten, dass sich unter den gewählten Bedingungen keine hydrostatischen Grundwasserdrücke auf die erdberührten Gebäudeteile einstellen.

Diese Ergebnisse stellen einen Beitrag zu derzeit geführten Diskussionen im Kontext der Überarbeitung der DIN 4095 zur Dränung baulicher Anlagen. Es zeigt sich, dass eine möglichst genaue Beschreibung der maßgebenden hydraulischen, geohydraulischen und geometrischen Bedingungen erforderlich ist, um die Auswirkungen eines Hochwasserereignisses (das bis zum betrachteten Gebäude führen kann) sachgemäß zu beurteilen.

Poster 11.2 (ID 288)

Oberflächenwasser-Grundwasser-Wechselwirkungen im Trinkwassereinzugsgebiet der Stadt Görlitz

Zhao Chen¹, Diana Burghardt¹, Paul Franke², Bernd Bauer², Andreas Hartmann¹

¹: Technische Universität Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft, Bergstraße 66, 01069 Dresden

²: Stadtwerke Görlitz, Demianiplatz 23, 02826 Görlitz

Kontakt: zhao.chen@tu-dresden.de

Die Trinkwasserversorgung der Stadt Görlitz basiert auf einer reinen Nutzung von Grundwasser. Dabei wird das natürliche Dargebot durch Uferfiltrat der Neiße sowie künstlich angelegte Infiltrationsteiche erhöht. Durch die Flutung eines nahegelegenen Bergbaurestloches und die Inbetriebnahme eines Horizontalfilterbrunnens hat sich das hydraulische Regime in den letzten Jahren maßgeblich verändert. Zudem ist mit dem Klimawandel durch häufiger auftretende sommerliche Trockenperioden ein sinkendes Grundwasserdargebot zu erwarten. Aus diesen Gründen muss das bestehende Grundwasserbewirtschaftungskonzept mit den zugehörigen Modellvorstellungen überprüft und angepasst werden. Zu diesem Zweck wurde das Institut für Grundwasserwirtschaft mit der Anpassung des hydrogeologischen konzeptionellen Standortmodells und des darauf aufbauenden Grundwasserströmungsmodells beauftragt. Begleitende hydrochemische und isopenhydrologische Untersuchungen dienten dabei einem besseren Prozessverständnis der Oberflächenwasser-Grundwasser-Interaktionen, die zwischen der Neiße, dem Bergbaufolgesee bzw. den künstlich angelegten Infiltrationsteichen und dem zur Trinkwassergewinnung genutzten Grundwasserleiter bestehen. Fehlende Daten von der polnischen Seite der Neiße, wo ebenfalls Uferfiltration betrieben wird, stellen derzeit die größten Unsicherheiten bei der Beschreibung der Einzugsgebietsgrenzen dar.

Poster 11.3 (ID 324)

Physical and biogeochemistry of (sub)surface freshwaters entering the southern coast of the Baltic and North Seas

Michael Ernst Böttcher^{1,2,3}, Cátia Milene Ehlert von Ahn^{1,4}, Anna-Kathrina Jenner¹, Patricia Roeser^{1,5}, Rhodelyn Saban¹, Christoph Malik^{1,6}, Carla Nantke¹, Iris Schmiedinger¹

¹: *Geochemie und Isotopen-Biogeochemie, Leibniz IOW, Deutschland*

²: *Marine Geochemie, Universität Greifswald*

³: *Interdisziplinäre Fakultät, Universität Rostock Deutschland*

⁴: *ZMT Bremen, Deutschland*

⁵: *Umweltgeologie, Universität Bonn, Deutschland*

⁶: *Umweltplan, Greifswald, Deutschland*

Kontakt: michael.boettcher@io-warnemuende.de

The composition of rivers, streams and submarine groundwater discharge (SGD) to the coastal waters of the southern Baltic and North Sea was investigated on a seasonal scale. They were analyzed for major and trace elements and the stable isotope signatures of water and dissolved species (dissolved inorganic and organic carbon, sulfate and sulfide). Analytical results were interpreted for their mineral saturation states in CO₂ partial pressure using PHREEQC. The composition of most of the surface waters is shown to be controlled by its tributaries, soil and aquifer lithological properties, discharge conditions, exchange with the atmosphere and internal processes (e.g., primary production). One of the investigated surface water systems on the Baltic Sea coast, the managed Warnow River, is impounded in a narrow lake-like system which increases the residence time of the water. This leads to increased evaporation and interaction with the surrounding sediments/soils. During most times of the year, the Warnow River showed to be a source of dissolved inorganic carbon for the coastal waters with potential CO₂ degassing to the atmosphere (Ehlert von Ahn et al., 2023). Calcium carbonate may be precipitating from surface waters after a threshold supersaturation value is reached, thereby lowering the Ca load, but enhancing the CO₂ partial pressure. Small creeks that enter the coastline of the North and Baltic Seas are characterized by small discharge, but high element loads. The same was observed in regard to SGD, demonstrating high importance for the biogeochemistry of the coastal waters. To conclude, the stable isotopes showed to be an excellent tool to differentiate carbon sources and the role of biological transformations on both (sub)surface aquatic systems.

Acknowledgements: The study was supported by the DFG research training group BAL-TIC TRANSCOAST, DAAD, the BMBF project CARBOSTORE/COOLSTYLE, and Leibniz IOW.

Ehlert von Ahn, C.M., Böttcher M.E., Malik C., Westphal J., Rach B., Nantke C., Jenner A.-K., Saban R., Schmiedinger I. (2023) Spatial and temporal variations in the isotope hydrobiogeochemistry of a managed river draining towards the southern Baltic Sea. *Geochemistry*, 125979.

13 Grundwasserbewirtschaftung in Karstregionen

21.03.2024, 13:30 - 15:00, Konferenzraum 2

Nico Goldscheider (Karlsruher Institut für Technologie)

Joanna Doummar (American University of Beirut)

Vortrag 13.1 (ID 160)

Die Mediterrane Karstaquifer-Karte (MEDKAM): Verbreitung und Bedeutung der Carbonatgesteine und Karstwasserressourcen im Mittelmeerraum

Julian Xanke¹, Nico Goldscheider², Michel Bakalowicz³, Juan Antonio Barberá⁴, Stefan Broda⁵, Zhao Chen⁶, Mohamed Ghanmi⁷, Andreas Günther⁵, Andreas Hartmann⁶, Hervé Jourde³, Tanja Liesch², Matías Mudarra⁴, Marco Petitta⁸, Nataša Ravbar⁹, Zoran Stevanović¹⁰

¹: TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser (German Water Centre), Section Risk Management, Karlsruher Straße 84, 76139 Karlsruhe, Germany

²: Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute of Applied Geosciences (AGW), Division of Hydrogeology, Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe, Germany

³: HydroSciences Montpellier (HSM), Univ. Montpellier, CNRS, IRD, Montpellier, France

⁴: Department of Geology and Centre of Hydrogeology of the University of Málaga (CEHIUMA), 29071, Málaga, Spain

⁵: Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Wilhelmstr. 25–30, 13593 Berlin, Germany

⁶: Faculty of Environmental Sciences, Institute of Groundwater Management, Technische Universität Dresden, Bergstraße 66, 01069 Dresden, Germany

⁷: Laboratory of Mineral Resources and Environment (LRME), Department of Geology, Faculty of Sciences of Tunis, University of Tunis El Manar, 2092, Tunis, Tunisia

⁸: Department of Earth Sciences, Sapienza University of Rome, P.Le A. Moro 5, 00185, Rome, Italy

⁹: Karst Research Institute ZRC SASU, Titov trg 2, 6230, Postojna, Slovenia

¹⁰: Department of Hydrogeology, Centre for Karst Hydrogeology, University of Belgrade, Faculty of Mining & Geology, Djusina 7, Belgrade, 11000, Serbia

Kontakt: julian.xanke@tzw.de

Carbonatgesteine im Mittelmeerraum bilden einzigartige Karstlandschaften und sind aus wasserwirtschaftlicher Sicht von besonderem Interesse, da sie potenzielle Karstaquifere darstellen. Die Mediterrane Karstaquifer-Karte und Datenbank (MEDKAM) wurde 2022 im Rahmen des Projektes KARMA (Karst Aquifer Resources Availability and Quality in the Mediterranean Area) entwickelt, das durch das PRIMA-Programm der Europäischen Union (EU) gefördert wurde. MEDKAM besteht aus einer Karte (Druckmaßstab 1:1,5 Mio., auch als WebGIS verfügbar), die die Verbreitung von Carbonat- und Evaporitgesteinen als potenzielle Karstgrundwasserleiter zeigt, mit zusätzlichen Informationen zu anderen hydrogeologischen Einheiten, ausgewählten terrestrischen und submarinen Karstquellen, Höhlen und karstgrundwasserabhängigen Ökosystemen. Zusätzlich wurden zwei weitere Karten erstellt, die die mittlere jährliche Grundwasserneubildung (1990-2019) und die Trends der Grundwasserspeicherung (2003-2020) in Karstaquiferen zeigen. MEDKAM basiert auf der Internationalen Hydrogeologischen Karte von Europa (IHME1500), die kürzlich um vier weitere Kartenblätter für die Region Nordafrika erweitert wurde. Die räumliche Verteilung im Mittelmeerraum, der pragmatisch anhand einer 250-km-Zone abgegrenzt wurde, zeigt, dass 39,5 % des Mittelmeerraums von Carbonatgesteinen bedeckt sind, was mehr als 1,2 Mio. km² entspricht, während nur 1,7 % aus Evaporitgesteinen bestehen. Die größten zusammenhängenden Carbonatgesteinsflächen finden sich dabei in den nordafrikanischen Ländern, die höchsten Anteile im Verhältnis zur Gesamtfläche des jeweiligen Landes weisen Malta mit 100 %, der Libanon mit 68,0 % und Montenegro mit 66,1 % auf. Carbonatgesteine an der Küste finden sich im Mittelmeerraum auf einer Länge von ca. 14.000 km, einschließlich der Inseln, was 33,6 % der gesamten Küstenlinie entspricht. Den längsten nicht zusammenhängenden Küstenkarst findet man in Griechenland mit ca. 5.000 km, gefolgt von Kroatien mit ca. 3.500 km und Italien mit ca. 1.400 km. Malta und Bosnien & Herzegowina haben einen Karstanteil an der Küste von 100 %, gefolgt von Kroatien mit 87,7 % und Montenegro mit 67,9 %. Die Grundwasserneubildung ist im nördlichen Teil höher als im südlichen und beträgt im Durchschnitt ca. 190 mm/a, wobei in vielen Regionen ein negativer Trend der Grundwasserspeicherung von durchschnittlich -0,3 mm/a zu beobachten ist. MEDKAM dient als Grundlage für weitere Forschung und verbesserte internationale Zusammenarbeit im Karstgrundwassermanagement und kann für verschiedene Anwendungen im Zusammenhang mit klimatischen, hydrologischen oder geographischen Fragestellungen oder regionalen Managementoptionen genutzt werden.

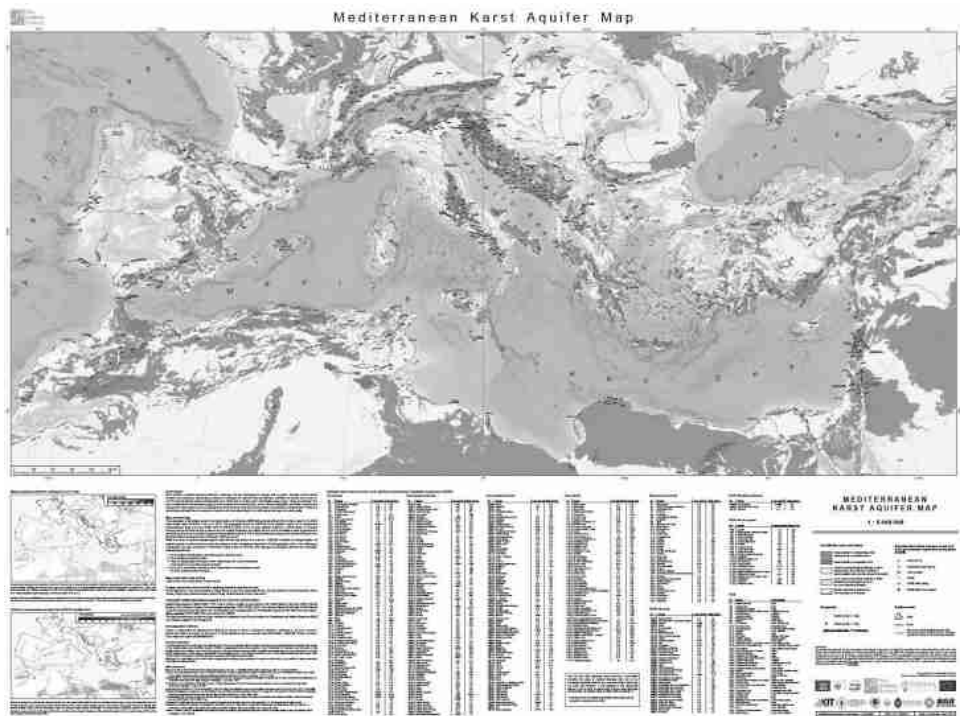


Abb. 1: Mediterrane Karstaquiferkarte MEDKAM.

Vortrag 13.2 (ID 272)

Characteristics and long-term changes of spring discharge in the Austrian Alps

Magdalena Seelig¹, Simon Seelig¹, Matevž Vremec¹, Jutta Eybl²,
Gerfried Winkler¹

¹: Institute of Earth Sciences, NAWI Graz Geocenter, University of Graz, Heinrichstraße 26, 8010 Graz, Austria

²: Department of Water Balance, Federal Ministry Republic of Austrian Agriculture, Forestry, Regions and Water Management, Vienna, Austria

Kontakt: magdalena.seelig@uni-graz.at

Springs provide a key water resource that is sensitive to changing climate and land use patterns in alpine regions. Sustainable water management needs to take variability and trends of spring discharge on seasonal and annual timescales into account. We conducted a comparative analysis of 96 spring discharge records across Austria, identifying

similarities and differences to display organizing principles and differentiate random fluctuations from significant changes. Our results reveal spatiotemporal discharge patterns that reflect varying dominance of the regional precipitation characteristics, snow cover dynamics, and aquifer property differences. Cluster analysis based on discharge seasonality and autocorrelation indicated a broad-scale classification resulting in 4 subordinated spring groups. For a subsample of 44 springs with time series of at least the last 20 years trend analysis of discharge, electrical conductivity and water temperature are conducted. Seasonal differences in the significance of long-term changes are identified for all parameters indicating that seasonal and interannual variability dominate available records. The findings of the trend analysis as well as the resulting spring groups stress the importance of analysing spring flow characterization and the dominant recharge processes regarding to upcoming challenges in water resource management due to climate changes.

Vortrag 13.3 (ID 246)

Thermokarst hydraulics in alpine rock glaciers

Simon Seelig¹, Magdalena Seelig¹, Karl Krainer², Gerfried Winkler¹

¹: *Institute of Earth Sciences, NAWI Graz Geocenter, University of Graz, Heinrichstraße 26, 8010 Graz, Austria*

²: *Institute of Geology, University of Innsbruck, Innrain 52, 6020 Innsbruck, Austria*

Kontakt: simon.seelig@uni-graz.at

Alpine aquifers, including rock glaciers, talus, and till deposits, represent key hydrologic elements in headwater catchments that occur frequently in permafrost-affected terrain. Water flowing through these sediment accumulations exhibits distinct flow patterns that are different from common flow dynamics in porous media. Water pathways tend to follow channels that are incised by thermokarst processes into these ice-debris mixtures or their massive ice cores. This study characterizes the water flow system within three active rock glaciers in the Austrian Alps, drained by springs at the respective rock glacier front. We show that a network of thermokarst channels running through the frozen rock glacier cores governs subsurface flow, at least during the summer months. Key hydraulic properties of these channels are explored by combining the evaluation of spring hydrographs and fluorescence tracer tests. The individual channels can reach several decimeters in diameter and exhibit a highly irregular geometry, including rapidly changing channel cross-sections and a convoluted overall structure. Flow along these channels is rapid and highly turbulent, implying fast transfer of energy and momentum. Friction losses are high along the channels and attributed to the presence of blocks and boulders that force the water to move around them. Heat transfer is dominated by advective transport, which leads to a positive feedback loop that drives the expansion of the thermokarst channels. Tracer breakthrough curves

exhibit multiple peaks and pronounced tailing, suggesting that water flows along a network of connected channels that include stagnant water zones. The preferential pathways provided by these networks largely dominate flow and transport processes within the rock glaciers. These processes therefore govern permafrost degradation, lake outburst hazards, and rock glacier front stability.

Vortrag 13.4 (ID 291)

Verbessertes Verständnis detaillierter Sediment- und geochemischer Transportprozesse durch einen vergleichenden Markierungsversuch

Yanina Katharina Müller, Nico Goldscheider, Elisabeth Eiche, Hanna Emberger, Nadine Göppert

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Deutschland

Kontakt: yanina.mueller@kit.edu

Etwa 9,2 % der Weltbevölkerung beziehen ihr Trinkwasser aus Karstgebieten, die durch starke und rasche Veränderungen in der Wasserqualität charakterisiert sind. Insbesondere Sedimentpartikel, die in Karstgrundwasserleitern transportiert werden, können als Vektoren für Krankheitserreger, toxische Spurenelemente und Schwermetalle fungieren. Das Transportverhalten von Partikeln kann sich dabei deutlich von demjenigen gelöster Stoffe unterscheiden, sodass Markierungsversuche mit konservativen Tracern nur bedingt für eine Untersuchung von Sedimenttransportprozessen geeignet sind.

Um unter natürlichen Bedingungen das Transportverhalten von Sedimentpartikeln im Vergleich zu gelösten Stoffen zu untersuchen, wurden in dieser Feldstudie Höhlensedimente suspendiert und zusammen mit konservativen Tracern (Uranin und Amidorhodamin G) in eine voll wassergesättigte (phreatische) Karströhre des Blauhöhlensystems auf der Schwäbischen Alb eingegeben. Die Anzahl der Sedimentpartikel wurde am Blautopf nach 1250 m Fließstrecke mittels Partikelzähler gemessen und die suspendierten Sedimente filtriert, chemisch aufgeschlossen und mit ICP-MS auf Geochemie hin untersucht.

Es konnte ein deutlich schnellerer Transport von Sedimentpartikeln (116–118 m/h) im Gegensatz zu konservativen Fluoreszenzfarbstoffen (108 m/h) nachgewiesen werden, was durch einen Transport von Partikeln im Hauptfließweg interpretiert wurde. Alle Partikelgrößen zeigten ein ähnliches Transportverhalten. Ein sedimentassoziiertes Transport konnte darüber hinaus für alle gemessenen Elemente (auch Spurenelemente und Seltene Erden) nachgewiesen werden (Mueller et al. 2023). Die höchsten Konzentrationen der geochemischen Elemente wurde während des Partikelpeaks gemessen (Abb. 1). Ein anthropogener Einfluss zeigte sich in der positiven Gadolinium Anomalie der Sedimentproben.

Das nachgewiesene unterschiedliche Transportverhalten von Sedimentpartikeln im Vergleich zu gelösten Farbstoffen verdeutlicht die Wichtigkeit einer differenzierten Betrachtung von Stofftransportprozessen, insbesondere im Kontext von Kontaminationsereignissen in Karstaquiferen.

Mueller, Yanina K.; Goldscheider, Nico; Eiche, Elisabeth; Emberger, Hanna; Goeppert, Nadine (2023): From cave to spring: Understanding transport of suspended sediment particles in a fully phreatic karst conduit using particle analysis and geochemical methods. In: Hydrol. Process. 37 (10), Artikel e14979. DOI: 10.1002/hyp.14979.

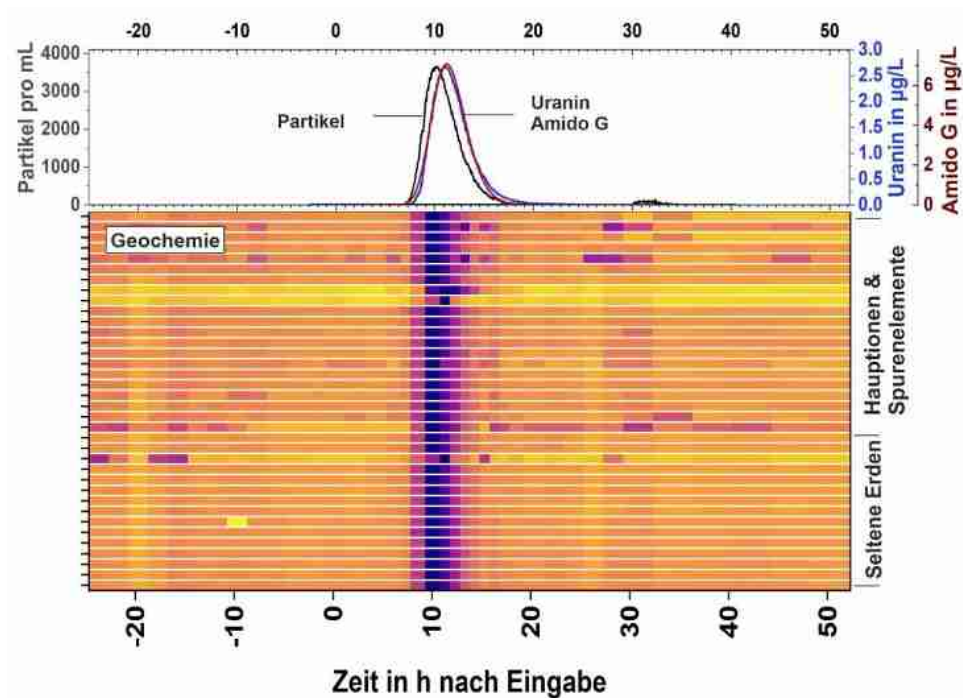


Abb. 1.: Durchgangskurven der 1 µm Partikel, Uranin und Amidorhodamin G sowie normalisierte Darstellung der Haupt- und Spurenelemente sowie Seltene Erden (c/c_{max}). Dunkle Farben indizieren die höchsten gemessenen Konzentrationen, helle Farben die geringsten gemessenen Konzentrationen.

Vortrag 13.5 (ID 303)

Transport aktiver Bakteriophagen in einem Karstgrundwasserleiter

*Rebecca Serbe¹, Ferry Schiperski², Lara Stelmaszyk³, Claudia Stange³,
Traugott Scheytt¹*

¹: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für Hydrogeologie und Hydrochemie

²: Technische Universität Berlin, Angewandte Geochemie

³: DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), Karlsruhe

Kontakt: Rebecca.Serbe@geo.tu-freiberg.de

Die hohe Vulnerabilität von Karstquellen hinsichtlich mikrobiologischer Kontaminationen ist seit langer Zeit bekannt. Die Einträge können dabei beispielsweise über landwirtschaftlich genutzte Flächen oder aus Abwasserleckagen erfolgen. Das geringe Rückhaltevermögen von Karstgrundwasserleitern gegenüber Schadstoffen, bedingt durch geringe Bodenentwicklung und ausgeprägte Fließwege mit hohen Fließgeschwindigkeiten, kann zum Auftreten von pathogenen Keimen an Karstquellen führen. Quellen, die zur Gewinnung von Trinkwasser genutzt werden, können oftmals nicht ausreichend vor dem Eintrag von Schadstoffen in das Rohwasser geschützt werden. Zwar gibt es zahlreiche kleinskalige experimentelle Versuche zur Bestimmung des Transportverhalts von Viren und Bakterien, jedoch nur wenige Feldversuche, die ihren Transport und Rückhalt über große Distanzen in Karstgrundwasserleitern untersuchten.

Im Einzugsgebiet der Gallusquelle (Schwäbische Alb) wurden bereits mikrobiologische und chemische Verunreinigungen des Quellwassers nach Starkregenereignissen nachgewiesen und mit dem Überschlag eines 9 km entfernten Regenrückhaltebeckens in Verbindung gebracht. Sowohl der Rückhalt als auch die Transportgeschwindigkeit für Bakterien und Viren sind bislang jedoch unbekannt. Für eine bessere Abschätzung des Kontaminationsrisikos und -umfanges wurden vier Tracerversuche mit nicht-pathogenen Bakteriophagen durchgeführt, um den Transport pathogener Viren zu simulieren. Die eingesetzten Bakteriophagen wurden mittels eines kulturbasierten Verfahrens nachgewiesen, was die Bestimmung aktiver (=infektiöser) Phagen ermöglicht.

Die durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten im Grundwasserleiter lagen während der Versuche zwischen 30 und 105 m/h und die aktiven Phagen konnten über Strecken von 3 bis 9 km an der Karstquelle nachgewiesen werden. Eine Injektion der Phagen am Regenrückhaltebecken belegt, dass aktive Phagen über den vermuteten Kontaminationspfad die Quelle erreichen können. Die quantitative Auswertung zeigt jedoch, dass der Rückhalt von Phagen verglichen mit dem gelösten Tracer Uranin um bis zu 98,5 % höher ist.

Regionale Grundwassermodellierung mit Schwerpunkt auf Randzustrom und der Bewertung von Auswirkungen kontrollierter Grundwasseranreicherung in Karstsystemen

Marcus Genzel¹, Thomas Reimann¹, Alireza Kavousi¹, Joanna Doummar², Philippe Renard⁴, Steffen Birk³, Max Gustav Rudolph¹, Andreas Hartmann¹

¹: TU Dresden, Deutschland

²: Amerikanische Universität Beirut, Libanon

³: Universität Graz, Institut für Erdwissenschaften, Österreich

⁴: Universität Neuchâtel, Zentrum für Hydrogeologie und Geothermie, Schweiz

Kontakt: marcusgenzel@gmx.net

Wasserknappheit stellt ein bedeutsames Problem in vielen Teilen der Welt dar. Um dieser Herausforderung zu begegnen, sind unter anderem Strategien zur kontrollierten Grundwasseranreicherung (Managed Aquifer Recharge, MAR) von entscheidender Bedeutung. Die nachteiligen Auswirkungen der übermäßigen Nutzung von Grundwasserressourcen sollen auf diese Weise gemildert und die Verfügbarkeit von Grundwasser verbessert werden. In Regionen mit Wasserknappheit, wie dem Libanon, wächst der Bedarf, bestehende MAR-Techniken für die Speicherung von Wasser oder die Erhöhung des Untergrundabflusses aus Karstsystemen in benachbarte alluviale Aquifere einzusetzen. Die Umsetzung von MAR in Karstsystemen stellt aufgrund ihrer extremen hydraulischen Anisotropie, Heterogenität und der starken Dynamik im Abflussverhalten dabei eine besondere Herausforderung dar.

Distributive numerische Grundwassermodelle, welche Diskret-Kontinuum-Ansätze wie beispielsweise MODFLOW-CFP berücksichtigen, die Integration stochastisch generierter Karströhrennetzwerke gewährleisten sowie idealisierte Modellkonzepte, ermöglichen die Quantifizierung der Wechselwirkungen zwischen Karst-Alluvial-Systemen und den Vergleich von MAR-Szenarien. Basierend auf diesem Ansatz wurde ein skriptbasiertes Konzept entwickelt, das ausschließlich Open-Source-Tools zugrunde liegt und einen skalierbaren, automatisierten und generalisierbaren Workflow für einen Multi-Modell-Ansatz bietet. Dieser umfasst eine automatische Kalibrierung durch die Parameterschätzungssoftware PEST sowie eine umfangreiches Pre- und Postprocessing. Das Konzept integriert verschiedene Python-Pakete, insbesondere FloPy, CFPy, pyKasso und bietet eine Schnittstelle zu geografischen Informationssystemen (GIS) zur systematischen Erstellung eines Multi-Modell-Konzeptes. Dabei werden verschiedene Realisierungen von Karströhrennetzwerken innerhalb von MODFLOW-CFP-Modellen berücksichtigt. Auf dieser Grundlage wird die Quantifizierung des Randzustroms ermöglicht und die Bewertung kontrollierter

Grundwasseranreicherung unterstützt. Postprocessing-Routinen bieten Einblicke in Fehleranalysen, lokale und globale Wasserbilanzen, Netzwerkwahrscheinlichkeiten, Parameterunsicherheiten und -sensitivitäten.

In einem ersten idealisierten Szenario, welches sich auf ein regional-skalisches Karst-Alluvial-Multi-Modell für die Quelle Nabaa El Berdaoui im Libanon konzentrierte, wurde das etablierte Modellierungskonzept für ein reales System bewertet. Das Modell bildet effektiv die beobachteten Daten der monatlichen Quellabflüsse nach. Es deutet jedoch auf eine begrenzte Eignung für verschiedene Injektions- und Infiltrationsszenarien an einem potenziellen MAR-Standort innerhalb der untersuchten Region hin. Die Ergebnisse sollten jedoch kritisch bewertet werden, insbesondere aufgrund der bestehenden Unsicherheiten durch die begrenzten Ausgangsdaten.

Poster 13.1 (ID 198)

Hydrogeologische Konzepte zur Konnektivität von Hochgebirgsseen

Julia Freutsmiedl, Sylke Hilberg

Universität Salzburg, Österreich

Kontakt: sylke.hilberg@plus.ac.at

Hochgebirgsseen stellen vor allem vor dem Hintergrund von Klimaveränderungen im hochdynamischen System von Gletschervorfeld- und Karlandschaften einen sehr speziellen Lebensraum für Zooplankton dar. Inwieweit sich die Biodiversität durch sich verändernde Rahmenbedingungen verändern wird und welche biotischen, abiotischen und anthropogenen Einflussfaktoren hierfür eine Rolle spielen, wird im Rahmen des transdisziplinären Forschungsprojekts „High Alpine Lake Biodiversity and Climate Change – A Transdisciplinary Approach“ (AlpLakeChange) in drei Tälern im Nationalpark Hohe Tauern untersucht.

Ein Teil der Forschungsfrage des Projekts AlpLakeChange bezieht sich auf den Zusammenhang zwischen den geologisch-hydrogeologischen Bedingungen in den jeweiligen Einzugsgebieten einerseits und dem Auftreten unterschiedlicher Planktongemeinschaften in Hochgebirgsseen andererseits. Im Zuge der hier präsentierten Studie wurden geologisch-hydrogeologische Kartierungen sowie hydrochemische und isotopehydrologische Untersuchungen durchgeführt und darauf aufbauend hydrogeologische Konzeptmodelle der Einzugsgebiete von sieben ausgewählten Hochgebirgsseen im Gschlössstal in Osttirol, Österreich erstellt.

Die Einzugsgebiete aller untersuchten Seen werden von Lithologien des Zentralgneises aufgebaut, die bereichsweise von glazialen Ablagerungen überdeckt sind. Grundwasser-

fluss kann innerhalb von silikatisch geprägten Kluftgrundwasserleitern oder oberflächennah in Schuttkörpern oder Moränen stattfinden. Dementsprechend sind die Wässer generell gering mineralisiert. Die hydrochemischen Analysen von Seewässern, Zu- und Abflüssen und Quellaustritten zeigen dennoch signifikante Unterschiede und damit unterschiedliche Einflüsse der verschiedenen auskartierten Gneise und Lockersedimente. Auch gibt die physikochemische Beschaffenheit der Seewässer Hinweise darauf, ob Grundwasserzuflüsse stattfinden und ob Seekaskaden durch Grundwassersysteme verbunden sind oder ausschließlich über Oberflächengewässer kommunizieren. Eine Kategorisierung der sieben untersuchten Seen nach dem jeweiligen Grundwassereinfluss dient in der Folge den Projektbiologen zur Interpretation ihrer Planktonanalysen.

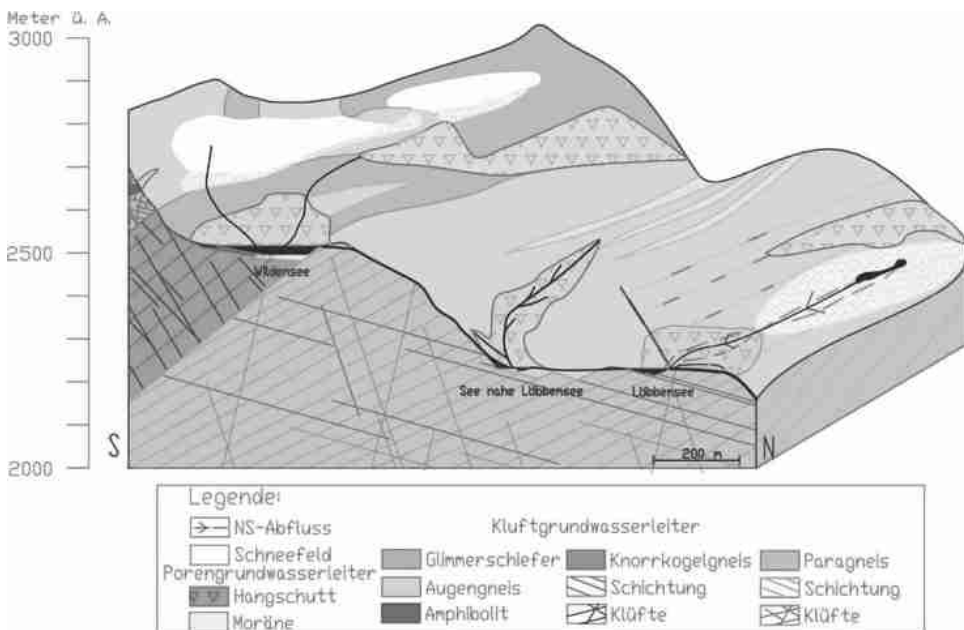


Abb. 1: Blockbild Löbensee.

Assessing Storage Potential in a Mediterranean Karst Aquifer: A Vadose-Phreatic Modeling Approach for Managed Aquifer Recharge

Lysander Bresinsky^{1,5}, Jannes Kordilla^{2,5}, Yakov Livshitz³, Martin Sauter^{4,5}

¹: University of Kassel, Institute of Water, Waste and Environmental Engineering, Kassel, Germany

²: Spanish National Research Council (CSIC), Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA), Barcelona, Spain

³: Hydrological Service of Israel, Israel Water Authority, Jerusalem, Israel

⁴: Leibniz Institute for Applied Geophysics, Hannover, Germany

⁵: University of Göttingen, Geoscientific Center, Applied Geology, Göttingen, Germany

Kontakt: l.bresinsky@uni-kassel.de

Karst aquifers serve as a vital freshwater source in the Mediterranean Basin, and climate change is projected to result in extended drought periods with low rainfall. In response, this necessitates adaptive groundwater management strategies that exploit the full storage potential of karst aquifers. Such strategies should prioritize the replenishment of aquifers during periods of average or above-average precipitation, offering a buffer against drought periods. However, karst aquifers are often well-matured karst systems due to lower base levels during the Messinian Salinity Crisis. This maturity gives rise to dual-domain flow behavior, characterized by slow diffuse flow through the rock matrix and rapid flow through the conduit network. Given their potential rapid drainage, well-matured karst aquifers are rarely considered suitable sites for managed aquifer recharge. However, it is worth noting that many Mediterranean karst aquifers, constrained in their outflow to the sea by marine clay deposits (Bakalowicz, 2015, Environ. Earth Sci.), can provide substantial storage for several years.

In our study, we employed dual-permeability flow modeling to assess the storage potential of the Western Mountain Aquifer (WMA) spanning Israel and the West Bank. The model, based on the volume-averaged Richards' equation in both domains, incorporates a minimum relative permeability term. This term is a heuristic measure to account for preferential infiltration observed in karst aquifers, even during near-dry conditions. By including both phreatic and vadose flow in the simulations, we aim to investigate the storage capacities of both compartments.

Our findings suggest that the WMA, despite being a well-developed karst aquifer, holds the potential for substantial storage spanning several years. This capacity is attributed to its extensive vadose zone, which is several hundred meters thick, and the restricted outflow from the aquifer. The latter is due to surrounding and overlaying formations with low permeability (e.g., Talme-Yafe, Negba, Daliya, and Menuha Formation), which are primarily

composed of chalk and marl. The study assesses multiple infiltration sites for managed aquifer recharge, considering current and projected climatic conditions based on the RCP4.5 climate change scenario.

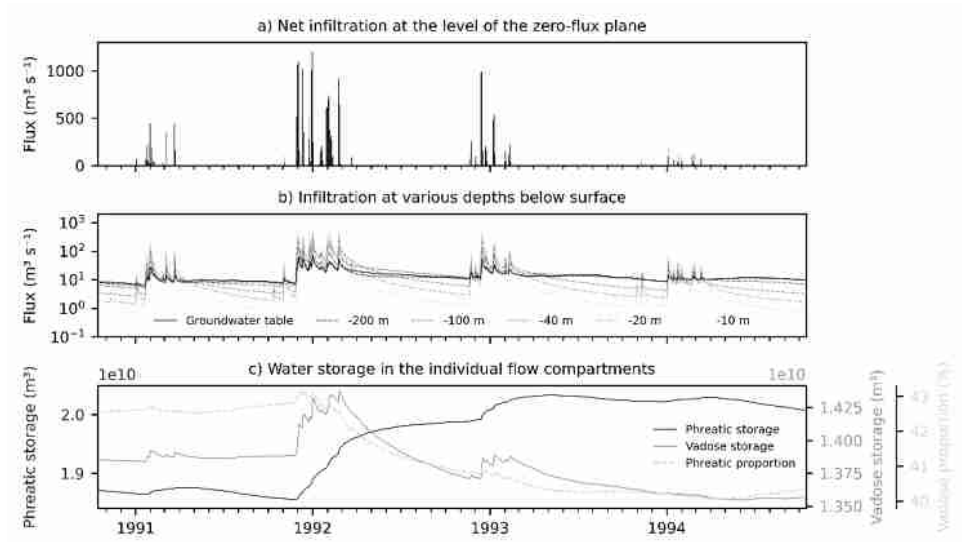


Abb. 1: Simulated surface net infiltration (a), infiltration at various sub-surface depths (b), and recharge-induced water storage changes in the vadose and phreatic compartment (c). The term storage refers to the stored water above the natural discharge point.

Poster 13.3 (ID 320)

Neue Erkenntnisse zum hydrogeologischen Einzugsgebiet des Briloner Karstaquifers

Alexander Kaltenbrunn, Nadine Göppert, Nico Goldscheider

Karlsruher Institut für Technologie, Deutschland

Kontakt: alexander.kaltenbrunn@kit.edu

Das Trinkwasser der Stadt Brilon (Hochsauerlandkreis, Nordrhein-Westfalen) wird größtenteils aus dem Karstaquifer der Briloner Hochfläche gewonnen. Der Karstaquifer wird durch devonische Massenkalk mit Mächtigkeiten bis 1000 m aufgebaut. Die unterirdische Entwässerung erfolgt über die Alme- und Moospringquellen, wobei letztere zur Trinkwasserversorgung genutzt wird. Trotz einer langen Forschungsgeschichte gibt es weiterhin offene Fragen zur komplexen örtlichen Hydrogeologie. Eine möglichst präzise Abgrenzung der Quelleinzugsgebiete ist aber Voraussetzung für einen effektiven

Trinkwasserschutz. In dieser Studie werden neue Erkenntnisse zum Einzugsgebiet des Briloner Karstaquifers vorgestellt.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden hydrochemische Daten der Grund- und Oberflächenwässer an 25 Beprobungsstellen in sechs Probennahme-Kampagnen erhoben. Zusätzlich fließen Daten von Grundwassermessstellen des Landes Nordrhein-Westfalen in die Auswertungen mit ein. Im westlichen Bereich des Massenkalks treten im Kern des Briloner Sattels die Brilon-Schichten an die Oberfläche. Sie bestehen aus geringdurchlässigen Tonschiefern und trennen den Massenkalk in einen nördlichen und einen südlichen Teil. Auf den Brilon-Schichten fließt die Aa, ein Quellfluss der Möhne, bevor sie nach dem Erreichen des zentralen Massenkalkbereichs zeitweilig in einer Bachschwinde versinkt. Eine Verbindung von der Bachschwinde zu den Alme- und Moosspringquellen ist sehr wahrscheinlich.

Als Ursprung der Aa wurde bisher eine Quelle im Tonschiefer der Brilon-Schichten angenommen. Die hydrochemischen Daten zeigen allerdings eine klare Übereinstimmung zwischen dem Grundwasser im südlichen Massenkalkbereich und der Aa. Die auffallende Ähnlichkeit beider Wassertypen bei den Hauptinhaltsstoffen und den Spurenelementen deutet auf einen Übertritt des Karstgrundwassers in die Aa hin. So liegt die elektrische Leitfähigkeit der Aa bei 470 bis 495 $\mu\text{S}/\text{cm}$, während Tonschiefergewässer im Briloner Raum ansonsten durch elektrische Leitfähigkeiten von deutlich unter 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ charakterisiert sind.

Die Übertrittsstelle des Karstgrundwassers in die Aa kann bei dem Zusammenfluss der Aa mit der Hillbringse lokalisiert werden, dort ist eine kleine Karstquelle auf 430 m ü. NN ausgebildet. Die Grundwasserganglinien zeigen im südlichen Massenkalkbereich Minimalwerte von 430 m ü. NN und bestärken so die Annahme, dass die Aa als Vorfluter des Karstgrundwassers fungiert.

Demnach gehört der ganze südliche Massenkalkbereich zum Einzugsgebiet der Aa, woraus sich die Bedeutung der Aa-Bachschwinde für das Gesamtsystem ergibt. In den Zeiträumen, in denen die Aa vollständig in den Untergrund versinkt, gehört der südliche Massenkalkbereich gänzlich zum Einzugsgebiet der Alme- und Moosspringquellen. Eine solche Vollversinkung wird in niederschlagsarmen Perioden im Spätsommer und Herbst beobachtet. Im Gegensatz dazu werden die Anteile des Aa-Wassers, welche über die Bachschwinde hinwegströmen, über die Möhne nach Norden abgeführt. Sie gehören folglich nicht zum Einzugsgebiet der Alme- und Moosspringquellen. Somit variiert das hydrogeologische Einzugsgebiet in Abhängigkeit der aktuellen Situation an der Aa-Schwinde erheblich.

Die Ergebnisse verbessern das Verständnis der hydrogeologischen Verhältnisse des Briloner Karstaquifers und sind so Grundlage für einen langfristigen Grundwasserschutz. Zukünftig sollen die vermuteten Verbindungen mithilfe von Markierungsversuchen beweiskräftig überprüft werden.

14 Hydrogeologie der Festgesteine

22.03.2024, 13:30 - 15:00, Konferenzraum 1

Peter Achtziger-Zupančič (Fraunhofer IEG)

Thorsten Schäfer (Friedrich-Schiller-Universität Jena)

Vortrag 14.1 (ID 121)

Die Erfurt-Formation: Ein Beispiel zur Aquifergenese eines Kluftgrundwasserleiters

Randolf Rausch¹, Simon Theo², Christian Kiffer³

¹: TU-Darmstadt, Deutschland

²: LGRB Baden-Württemberg

³: BoSS Consult

Kontakt: randolf_rausch@yahoo.de

Bei der Beschreibung von Grundwasserleitern wird davon ausgegangen, dass diese in der Zeit statische Systeme darstellen, d. h. die Grundwasserleiter in Hinblick auf ihre Durchlässigkeit und Speichervermögen sowie auf ihren Lösungsinhalt zeitlich unveränderlich sind. Betrachtet man jedoch die landschaftsgeschichtliche Entwicklung eines Grundwasserleiters über geologische Zeiträume, so erkennt man, dass Grundwasserleiter dynamische Systeme darstellen, die zeitlichen Änderungen unterliegen. Dies wird am Beispiel der Erfurt-Formation in Nord-Württemberg gezeigt. Es lassen sich drei räumliche Bereiche identifizieren, die nebeneinanderliegen und unterschiedliche Stadien der Aquifergenese entsprechen. Ausgehend von einem Geringleiter entwickelt sich ein gut durchlässiger und ergiebiger Grundwasserleiter, der mit Abnahme der Überdeckung und Verwitterung wieder zu einem Geringleiter wird. Das Beispiel zur Erfurt-Formation zeigt, dass hydrogeologisch verschiedene Bereiche, die heute räumlich nebeneinanderliegen, in einer Schichtstufenlandschaft aufeinanderfolgenden zeitlichen Stadien der Aquifergenese entsprechen. Dieses Model zur Aquifergenese kann auch auf andere Grundwasserleiter übertragen werden und sollte bei der Charakterisierung eines Grundwasserleiters berücksichtigt werden.



Abb. 1: Die Erfurt-Formation im Steinbruch „Schotterwerk Schuhmann“ in Vellberg-Eschenau. Die Erfurt-Formation (kuE) ist dort komplett aufgeschlossen. Im Liegenden die Meißner-Formation des Oberen Muschelkalks (moM), im Hangenden Grabfeld-Formation (kmGr). Foto: R. Rausch, April 2018.

Vortrag 14.2 (ID 126)

Die Rauigkeit von Klüften und ihre fraktale Dimension

Georg J. Houben, Axel Weitkamp, Stephan Kaufhold

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Deutschland

Kontakt: georg.houben@bgr.de

Die Rauigkeit von Klüften ist eine wichtige, aber oft vernachlässigte Einflussgröße auf die Strömung und den Transport in Festgesteinen. Sie kann lokal die Öffnungsweiten der Klüfte verringern (den wichtigsten Parameter im wesentlichen Fließgesetz in geklüfteten Medien, dem cubic law), die gebirgsmechanischen Eigenschaften beeinflussen sowie den Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung befördern und damit die Durchmischung und Reaktivität erhöhen.

Anhand von Buntsandsteinproben aus Süddeutschland wurden zunächst allgemeine Kluftparameter wie Anzahl und Öffnungsweite erfasst. Anschließend wurden die Kluftbeläge geochemisch-mineralogisch und per Rasterelektronenmikroskop untersucht. Die Rauigkeit selber wurde mit verschiedenen mechanischen und optischen Verfahren gemessen, wobei sowohl Profil- als auch Flächenmessungen durchgeführt wurden.

Die Rauigkeitsmessungen aller Messmethoden ergeben in Kombination das interessante Phänomen, dass die Rauigkeit mit der erfassten Bildgröße zunimmt, d. h. die Rauigkeit ist keine konstante Größe, sondern von der Probengröße abhängig. Dies ist auf die fraktale (selbst-affine) Natur der Rauigkeit zurückzuführen.

Bei einer Modellierung unter Berücksichtigung der Rauigkeit muss dieses Phänomen berücksichtigt werden, da ein upscaling von kleinskaligen Messwerten nicht ohne weiteres möglich ist.

Vortrag 14.3 (ID 163)

Inversion of hydraulic tomography data from a fractured-porous field site in Göttingen by a hybrid discrete fracture network model

Lukas Römhild¹, Lisa Maria Ringel¹, Quan Liu², Linwei Hu^{3,4}, Thomas Ptak², Peter Bayer¹

¹: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

²: Georg-August-Universität Göttingen

³: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

⁴: GeoAnalysis-Engineering GmbH

Kontakt: lukas.roemhild@geo.uni-halle.de

The accurate prediction of flow and transport processes in an aquifer strongly relies on the correct characterization of the heterogeneities in the hydraulic conductivity distribution. For that purpose, hydraulic tomography (HT) experiments are often utilized to infer the hydraulically relevant features within the domain of interest. However, the correct inversion of the data remains a challenging task depending on the individual site conditions. Particularly at fractured-porous sites, ideally, the underlying conceptual models used for porous aquifers (continuum-based models) and fractured rocks (discrete fracture models) have to be combined to achieve accurate results. Therefore, we implement a discrete fracture network (DFN) inversion approach that is expanded by considering a nonzero matrix permeability. By using this hybrid model, both matrix and fracture flow are considered.

The novel inversion algorithm is applied to HT data acquired at a fractured-porous field site in Göttingen (Germany), and the results are compared with those of a standard travel

time inversion assuming an equivalent porous media. It is shown that the results of both inversion methods reveal similar hydraulically relevant features within the aquifer, but only the hybrid DFN inversion allows for resolving individual fractures with high accuracy. Thereby, the underlying Bayesian inversion procedure yields probabilistic results. Furthermore, the inversion results are validated by conducting heat tracer tests at the same site and comparing the temperature responses with those obtained by simulating the experiments using the inversion results for the underlying material parameters. The DFN ensemble predicts the thermal response of the experiments correctly for the two major fractures in terms of location, amplitude, and time-dependent behaviour of the temperature anomaly.

We conclude that a hybrid DFN inversion approach considering both matrix and fracture flow is a promising approach for the hydraulic characterization of fractured-porous sites and can therefore lead to significant improvements in site-specific flow and transport modelling.

Vortrag 14.4 (ID 297)

Bestimmung der Kluftpermeabilität mithilfe bildgebender und topologischer Methoden

*Marco Fuchs¹, Anna Suzuki², Togo Hasumi², Sina Hale¹, Larissa Blesch¹,
Kathrin Menberg¹, Gabriel C. Rau^{1,3}, Philipp Blum¹*

¹: Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Karlsruhe, Deutschland

²: Tohoku University, Institute of Fluid Science, Sendai, Japan

³: The University of Newcastle, School of Environmental and Life Sciences, Newcastle, Australia

Kontakt: marco.fuchs@kit.edu

Für viele geowissenschaftliche Anwendungen wie z. B. die Endlagerung radioaktiver Abfälle, die tiefe Geothermie oder die Kohlenwasserstoffproduktion ist das Verständnis der hydro-mechanischen Eigenschaften von Klüften sowie deren Einfluss auf Fließprozesse innerhalb einer Kluft essenziell. Dabei ist besonders die Permeabilität entscheidend. In den letzten Jahren wurden daher zahlreiche Methoden entwickelt, um die Kluftpermeabilität zu untersuchen. Zu diesen zählen vor allem Durchflussexperimente im Labor sowie numerische hydraulische Modellierungen des Durchflusses durch eine Kluft. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass der Durchfluss hauptsächlich von der Geometrie und der Rauigkeit der Kluft kontrolliert wird. Deshalb stellt diese Studie mehrere Ansätze vor, um die Kluftpermeabilität direkt aus ihrer Geometrie zu ermitteln. Dazu vergleichen und bewerten wir in einem ersten Schritt bildgebende Methoden für Kluftflächen. Wir wenden (1) einen tragbaren Laserscanner, (2) ein kombiniertes System aus hochpräzisem Laserscanner und

robotischem Führungsarm, sowie (3) die photogrammetrische Structure from Motion-Methode (SfM) auf eine Schichtfuge in einem Rotliegend-Sandsteinblock an. Nach der Ermittlung der Kluftgeometrie wird der Durchfluss durch die Kluft numerisch simuliert, um die mittlere hydraulische Kluftöffnungsweite zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigen, dass der tragbaren Laserscanner nicht für diese Anwendung geeignet ist, da Messgenauigkeit und Auflösung zu beschränkt sind und somit die Geometrie der Kluft nicht hinreichend gut aufgelöst werden kann. Die Methoden (2) und (3) hingegen können die Geometrie auflösen. Im Vergleich zu experimentell ermittelten hydraulischen Kluftöffnungsweite von $81 \pm 1 \mu\text{m}$ ergeben die hydraulischen Simulationen auf Grundlage beider Methoden allerdings deutlich höhere Werte von $163 \mu\text{m}$ (2), bzw. $207 \mu\text{m}$ (3). Um die Diskrepanz zwischen Simulation und Messung zu verringern, wurde der Abstand der Kluftflächen schrittweise verringert und Kontaktflächen an den überlappenden Stellen angenommen. Bei 5% bzw. 7% Kontaktfläche konnte die hydraulische Öffnungsweite der experimentell ermittelten hydraulischen Kluftöffnungsweite mit $85 \mu\text{m}$ (2) bzw. $83 \mu\text{m}$ (3) nachgebildet werden.

In einem weiteren Schritt verwenden wir die topologische Methode der persistenten Homologie (PH), um die Permeabilität direkt aus der Kluftgeometrie zu berechnen, ohne auf Laborexperimente oder numerische Simulationen angewiesen zu sein. Dazu werden drei Datensätze derselben Sandsteinkluft mit unterschiedlicher räumlicher Auflösung erzeugt (Pixelgrößen: $200 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$ und $50 \mu\text{m}$). Die Ergebnisse dieser topologischen Methode zeigen hydraulische Öffnungsweiten zwischen $73 \mu\text{m}$ und $92 \mu\text{m}$, was gut mit den experimentellen Messungen übereinstimmt. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die Qualität der vorhergesagten Kluftpermeabilität generell mit steigender Auflösung zunimmt. Zusammenfassend zeigt diese Studie einen effektiven Arbeitsablauf auf, der die direkte Bestimmung der Kluftpermeabilität anhand der Geometrie einer Sandsteinkluft ermöglicht.

Vortrag 14.5 (ID 232)

Parametrisierung eines hydrogeologischen Strukturmodells für numerische Grundwassermodelle mit Hilfe unstrukturierter Netze auf GIS-Datenbasis

Wolfgang Gossel, Benedykt Pasek

Martin-Luther-Universität Halle, Deutschland

Kontakt: wolfgang.gossel@geo.uni-halle.de

Neuentwicklungen numerischer Grundwassermodellierungswerkzeuge können unstrukturierte Netze nutzen und Parameter sowie Randbedingungen für diese komplexen

Geometrien übernehmen. Auch Werkzeuge aus den Ingenieurwissenschaften sowie THMC- und Multiphysics-Werkzeuge können auf unstrukturierte und parameterisierte Netze zurückgreifen. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten für numerische Modellierungen, weil geologische Strukturen und darauf basierende Parameterschätzungen direkter transferiert werden können. Ein Ansatz über Octrees und dreidimensionale Interpolationen zur Parameterbelegung wird hier aufgezeigt und Modelle in dieser frühen Anfangsphase der Modellerstellung vorgestellt.

Für die Erstellung numerischer Grundwassermodelle werden oft sowohl für die hydrologischen wie geologischen Datengrundlagen GIS-Werkzeuge genutzt. Die universelle Einsetzbarkeit der dort verfügbaren Methoden und die häufige Nutzung für verschiedenste Aufgaben in den Angewandten Geowissenschaften sowie Standard-Datenformate sind für die Bearbeitung vorteilhaft. Aber auch (geo)statistische und konstruktive Spezialwerkzeuge kommen zum Einsatz, deren zielorientierte Interpretation adäquat in ein numerisches Modell überführt werden soll. In allen Fällen wird eine profilschnittgestützte Konstruktionsweise bevorzugt eingesetzt.

Die Automatisierung der Profilschnittgenerierung verspricht eine erhebliche Steigerung der Effizienz und Genauigkeit im geologischen Modellierungsprozess. Die entwickelten Werkzeuge, insbesondere das QGIS-Plug-In `gis4geology`, bieten diese Möglichkeit zur effizienten Verwaltung geologischer Daten, einschließlich der nahtlosen Integration von Bohrlochinformationen aus standardisierten Datenbanken. Diese Werkzeuge ermöglichen die Erstellung topologisch präziser 3D-Strukturmodelle und bieten eine breite Palette von Parametrisierungs- und Anpassungsoptionen.

Die bisherige Überführung der geologischen Strukturmodelle in geschichtete numerische Grundwassermodelle ist in mehreren Modellierungswerkzeugen, wie z. B. MODFLOW6, zugunsten unstrukturierter Netze erweitert worden, was neue Möglichkeiten eröffnet. Eine Diskretisierungsmöglichkeit, die sowohl den hydrogeologischen als auch den numerischen Erfordernissen in den meisten Fällen besser gerecht wird als die geschichteten Modelle sind Octree-Netze, die auf einer Zweiteilung übergeordneter Elemente in allen drei Raumrichtungen bei mehrfacher Eingangsdatendichte beruhen. Darauf folgend müssen Randbedingungen und Parameterverteilungen aus diesen geologischen und hydrologischen Modellierungssystemen in die zur numerischen Grundwassermodellierung notwendigen Verteilungen und damit auch Datenformate überführt werden. Hierfür müssen geeignete dreidimensionale Interpolationsmethoden angewendet werden.

Zusammenfassend bietet dieser Ansatz eine umfassende Lösung für hydrogeologische, geothermische und ingenieurgeologische 3D-Modelle. Er überwindet Beschränkungen kommerzieller Tools und fördert Open-Source-Zugänglichkeit und Flexibilität in der geologischen Forschung als auch eine umfassende Lösung für 3D-geologische Modelle und Parameterverteilungen. Zukünftige Arbeiten werden sich auf die Anwendung dieser Methoden

in komplexeren geologischen Gebieten konzentrieren, um ihr volles Potenzial auszuschöpfen und an verschiedene Modellierungsanforderungen anzupassen.

Vortrag 14.6 (ID 228)

Ermittlung des hydrochemischen Hintergrundgehaltes an Uran im Grundwasser des 4. Grundwasserleiters der ehemaligen Uranerzgrube Königstein

Sebastian Schramm, Traugott Scheytt

TU Bergakademie Freiberg, Deutschland

Kontakt: sebastian.schramm@geo.tu-freiberg.de

Für die Genehmigung des geplanten Wiederanstieges des Grundwassers in der Uranerzgrube Königstein ist die Festlegung eines hydrogeochemischen Hintergrundgehaltes an Uran erforderlich. Da nur ungenügend historische Daten vorhanden sind, soll die vorbergbauliche Konzentration an Uran im natürlichen Grundwasser aus Sandsteinbohrkernen abgeleitet werden. Diese Arbeiten erfolgen im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens im Auftrag des sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG).

Die Uranerzlagerstätte Königstein befindet sich hauptsächlich im 4. Grundwasserleiter, welcher lithostratigraphisch dem Cenoman zuzuordnen ist. Der 4. Grundwasserleiter, bestehend aus Oberhäslichformation und Wurmsandstein, ist gespannt und die Uranlagerstätte entstand vereinfacht betrachtet im Zuge einer Rollfrontdynamik.

Aus den durch die Kernmaterialien repräsentierten Festgesteine und den vor Ort erwarteten natürlichen hydrochemischen Bedingungen soll der natürliche Gehalt an Uran im Grundwasser bestimmt werden. Durch Röntgenfluoreszenzanalysen (RFA) werden die Elementgehalte ausgewählter Festgesteine bestimmt. Mittels Röntgendiffraktometrie werden die mineralogische Zusammensetzung der Gesteine bestimmt. Die hydrochemischen Eigenschaften des Grundwassers, dazu gehören pH, Redox-Potenzial und die Gehalte gelöster Ionen, sollen über rezent zur Lagerstätte fließende Grundwässer charakterisiert werden. Das Wasser wurde von der Messstelle k-77012 entnommen und kann als vom Bergbau unbeeinflusst betrachtet werden.

Durch Schüttelversuche, bei denen zur Lagerstätte zufließende Wässer mit zerkleinertem Gesteinsmaterial aus Bohrkernen zusammengebracht wurde, wurde der natürliche Grundwasserleiter simuliert. Sowohl bei dem natürlichen Grundwasserleiter als auch bei den Schüttelversuchen wurde das Erreichen des chemischen Gleichgewichtes angenommen. Dies ermöglicht die Vernachlässigung kinetischer Betrachtungen. Weiterhin wurde mit

dem thermodynamischen Modell PHREEQC das Sorptions-, Lösungs- und Fällungsverhalten von Uran unter Laborbedingungen nachvollzogen, um die relevanten Prozesse beschreiben und quantifizieren zu können. Nach einer Literaturrecherche der unterschiedlichen thermodynamischen Datensätze wurde eine Analyse der Speziation von Uran unter gemessenen Bedingungen durchgeführt.

Der Überwiegende Teil der Sandsteine im 4. Grundwasserleiter bestehen hauptsächlich aus Quarz. Weiterhin kommen Zweischicht-Tonminerale und Eisenoxide vor. Die Kationenaustauschkapazität kann als gering betrachtet werden. Bei einem pH von 5,5 bis 6 kommt Uran unter oxidierenden Bedingungen hauptsächlich UO_2^{2+} , UO_2OH^+ und UO_2CO_3 vor. Somit kann erwartet werden, dass die Uranspezies, die als Kationen vorliegen, durch Tonminerale adsorbiert werden. Erste Schüttelversuche zeigten, dass das Zusammenführen reduzierter Gesteinsmaterialie mit oxidierenden Wässern zu hohen Urankonzentrationen führte. Dies könnte den Lösungsprozess von Uran in der Rollfront charakterisieren.

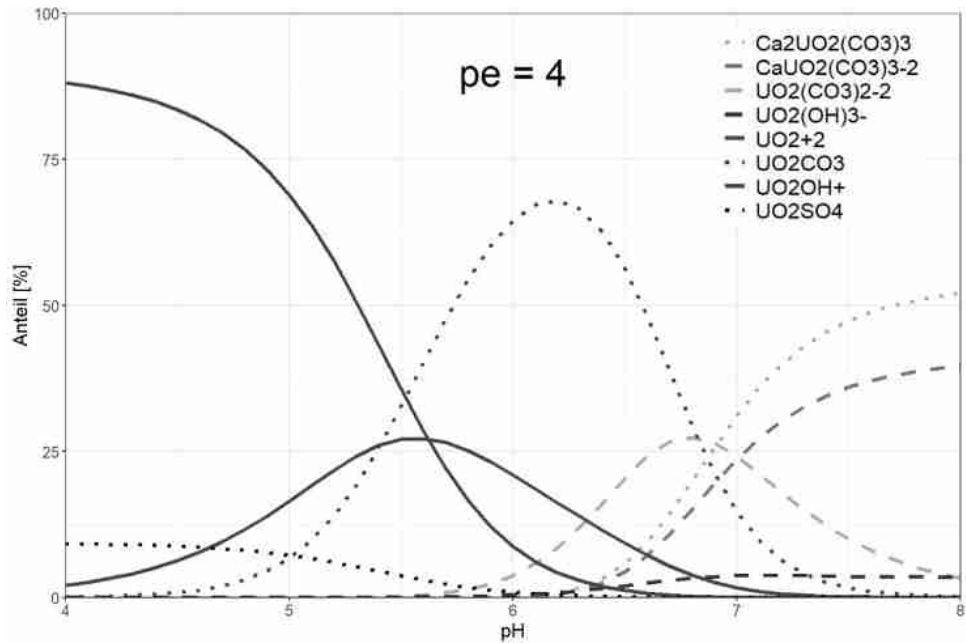


Abb. 1: Verteilung der Uranspezies im 4. Grundwasserleiter der Grube Königstein in Abhängigkeit vom pH unter oxidierenden Bedingungen; modelliert mit PHREEQC und der thermodynamischen Datenbank WATEQ4F.

15 Grundwasser in der Stadt(entwicklung)

22.03.2024, 15:30 - 17:00, Brüssel Saal

Mario Schirmer (Eawag - Wasserforschungsinstitut im ETH-Bereich)

Patricia Göbel (Universität Münster)

Vortrag 15.1 (ID 252)

Grundwasser stärken in einer wasserbewussten Stadt(-entwicklung)

Patricia Göbel¹, Mario Schirmer²

¹: Universität Münster, Deutschland

²: Eawag - Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Schweiz

Kontakt: pgoebel@uni-muenster.de

In der Siedlungswasserwirtschaft findet derzeit ein Paradigmenwechsel statt. Das Regenwasser wird nicht mehr allein als Gefahr z. B. infolge von zumeist lokalen Starkregenereignissen angesehen, sondern als wertvolle Ressource im städtischen Umfeld insbesondere zu Zeiten großer Hitze und zunehmend längeren Trockenperioden. Der Klimawandel und menschliche Aktivitäten erzeugen zunehmend Druck auf die Grundwasserressourcen, der in Siedlungsgebieten/Städten durch das Prinzip der Schwammstadt reduziert werden kann. Insofern wird sich die künftige Bewirtschaftung des Regenwassers am Wasserhaushalt der Kulturlandschaft unter Berücksichtigung des Klimawandels orientieren müssen. Grundwasserneubildung, Speicherung und Verdunstung (für den Entzug der Wärme) müssen gestärkt werden. Die Wasserressourcen des ungesättigten und gesättigten Untergrundes im urbanen Raum sind dabei weiterhin in einem guten Zustand zu erhalten bzw. an Stellen, wo die Ressourcen beeinträchtigt sind, zu regenerieren. Die Ideen der Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen im Zusammenspiel mit allen anderen urbanen Ressourcen wurden in einem Positionspapier der Fachsektion Hydrogeologie in der DGGV (FH-DGGV e. V.) erarbeitet. Dieses baut auf dem Positionspapier der Allianz „Gemeinsam für eine wasserbewusste Stadtentwicklung“ (DWA 2023) auf.

Aus Sicht der Hydrogeologie muss es das Ziel sein, die Zukunftsstädte nicht nur wasserbewusster, sondern auch grundwasserbewusster zu gestalten. Dabei muss die Ressource Grundwasser pro Grundwasser-Stockwerk in vier Dimensionen (Raum und Zeit) betrachtet werden. Zu folgenden Aspekten wurden Positionen erarbeitet:

- Den rechtlichen Rahmen für eine grundwasserbewusste Stadt schaffen.
- Die Planungsprozesse grundwasserbewusst gestalten.
- Das unterirdische Grundwasser-Einzugsgebiet des relevanten Grundwasserkörpers berücksichtigen.
- Die Wasserverfügbarkeit für die Trink-, Brauch- und Notwasserversorgung in der Stadt sicherstellen.
- Die Wasserverfügbarkeit für grundwasserbezogene Ökosysteme in der Stadt sichern.
- Die naturnahen und technischen Konzepte für naturnahen Wasserhaushalt in der Stadt verbessern.
- Die Wechselwirkungen mit dem Grundwasser betrachten.
- Die Förderung der Grundwasserneubildung mittels multifunktionaler Flächennutzung und der Vermeidung von Versiegelung bzw. Abkopplung in Bestandgebieten unter Beachtung diffuser Stoffeinträge.
- Das thermische Management des urbanen Untergrundes planen.
- Das Bewusstsein und die Wahrnehmung für Grundwasser stärken und Akteur*innen zur Umsetzung befähigen.

DWA (2023): Wasserbewusste Stadtentwicklung jetzt für die Zukunft. –
[https://de.dwa.de/files/_media/content/03_THEMEN/Wasserbewusste-Stadt/Position_Allianz%20Wasserbewusste%20Stadtentwicklung_.pdf]

Vortrag 15.2 (ID 258)

Einfluss urbaner Flächennutzung auf Grundwasserökosysteme

*Fabien Koch¹, Kathrin Menberg¹, Cornelia Spengler², Heide Stein²,
Andreas Fuchs², Hans Jürgen Hahn², Philipp Blum¹*

¹: *Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW),
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, Deutschland*

²: *Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Institut für
Umweltwissenschaften, Fortstraße 7, 76829 Landau, Deutschland*

Kontakt: fabien.koch@kit.edu

Der Klimawandel und anthropogene Aktivitäten verursachen vielfältige Veränderungen im Grundwasser (Menberg et al. 2014; Tissen et al. 2019), vor allem in dicht bebauten Gebieten. Während die physikochemischen Folgen bereits weitreichend erforscht sind, sind die Konsequenzen für Grundwasserökosysteme kaum bekannt. Als wichtigste Ökosystemleistungen tragen Grundwasserökosysteme entscheidend zur Reinigung des Grundwassers und damit auch zu sauberem Trinkwasser bei (Griebler & Avramov, 2015). Ein genaues Verständnis wie dieses empfindliche Ökosystem auf verschiedene Stressoren in urbanen Räumen, z. B. Temperatur und veränderte Flächennutzung reagiert, ist entscheidend für ein nachhaltiges Ressourcen- und Umweltmanagement.

Ziel dieser Studie ist daher die Untersuchung und Bewertung der Fauna in urbanem Grundwasser. Dazu wurden thermische und chemisch-physikalische Parameter in 39 Grundwassermessstellen in Karlsruhe von 2011 bis 2022, sowie sechs Messstellen in Baden-Württemberg von 2002 bis 2020 untersucht und zur ökologischen Bewertung des Grundwassers der Grundwasser-Ökosystem-Status-Index (Griebler et al., 2014) bestimmt. 2011-2014 zeigten nur 35% der Messstellen im Stadtgebiet und nur 50% der Messstellen in einem Waldgebiet nahe Karlsruhe einen "naturnahen" ökologischen Zustand (Koch et al., 2021). Im Jahr 2022 zeigten die Messungen im Wald- und Stadtgebiet signifikant abnehmende Individuenzahlen und Artenvielfalt in 62% bzw. 48% der Messstellen, obwohl die abiotischen Parameter nur geringe Veränderungen zeigten. Mit Hilfe von Korrelationsanalysen konnten Unterschiede in der räumlichen Verteilung von Grundwasserarten in Abhängigkeit von abiotischen Grundwassercharakteristika in den verschiedenen Stadtgebieten aufgezeigt werden. Messstellen im Waldgebiet zeichneten sich durch niedrigere Grundwassertemperaturen, niedrigere Nitratkonzentrationen und höhere Konzentrationen an gelöstem Sauerstoff aus, was auf eine Korrelation zwischen abiotischen Grundwassercharakteristika und Landnutzung hinweist. Zudem wiesen diese Messstellen eine größere Anzahl an Amphipoden (Krebstiere) auf. Auch weitere urban geprägte Messstellen in Baden-Württemberg zeigten Veränderungen der Abundanz und Biodiversität über die Zeit, was

auf einen Einfluss von lokalen Gegebenheiten, wie z. B. Veränderung der Versiegelung, des Oberflächenwassereinflusses, der Landnutzung oder der hydrologischen Bedingungen, auf die Fauna hindeutet. So konnte ein Zusammenhang zwischen der Änderung der Flächennutzung und der Zusammensetzung der Organismengemeinschaften (Verhältnis Oligochäten zu Crustaceen) in einer Messstelle in Neckargartach beobachtet werden (Abb. 1).

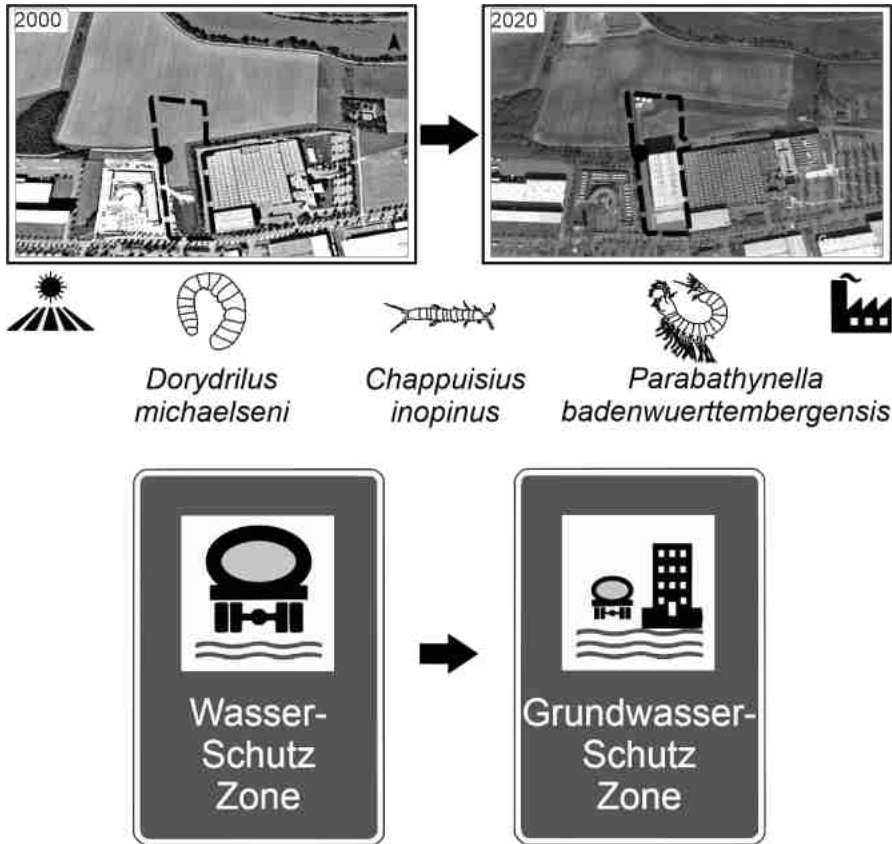


Abb. 1: Flächennutzung und Zusammensetzung der Organismengemeinschaften (Verhältnis Oligochäten zu Crustaceen) in einer Messstelle in Neckargartach.

Die Studie zeigt somit heterogene und zeitlich veränderliche Bedingungen im urbanen Grundwasser als Lebensraum, die eine eindeutige Bewertung des ökologischen Zustands mit den bestehenden Bewertungsansätzen erschweren. Zukünftig sollten daher zusätzliche Indikatoren, wie der Sauerstoffgehalt, die Grundwassertemperatur, die lokale Geologie, das Vorhandensein von Indikatorspezies, die Beschreibung von standortspezifischen Besonderheiten und natürliche Referenzwerte bei der Bewertung berücksichtigt werden. Darüber hinaus sollten Informationen über urbane Grundwasserökosysteme für eine nachhaltige Nutzung des Untergrunds in die Stadt- und Energieplanung integriert werden. Zudem

sind Studien in weiteren Städten, mit großflächigen, wiederholten Messkampagnen, unbedingt erforderlich, um die Ergebnisse zu verifizieren.

Griebler, C. and Avramov, M.: Groundwater ecosystem services: A review, *Freshw. Sci.*, 34(1), 355–367, doi:10.1086/679903, 2015.

Griebler, C., Stein, H., Hahn, H. J., Steube, C., Kellefmann, C., Fuchs, A., Berkhoff, S. and Brielmann, H.: Entwicklung biologischer Bewertungsmethoden und -kriterien für Grundwasserökosysteme, Umweltbundesamt, Dessau., 2014.

Koch, F., Menberg, K., Schweikert, S., Spengler, C., Hahn, H. J. and Blum, P.: Groundwater fauna in an urban area - Natural or affected?, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25(6), 3053–3070, doi:10.5194/hess-25-3053-2021, 2021.

Korbel, K. L. and Hose, G. C.: A tiered framework for assessing groundwater ecosystem health, *Hydrobiologia*, 661(1), 329–349, doi:10.1007/s10750-010-0541-z, 2011.

Menberg, K., Blum, P., Kurylyk, B. L. and Bayer, P.: Observed groundwater temperature response to recent climate change, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18(11), 4453–4466, doi:10.5194/hess-18-4453-2014, 2014.

Tissen, C., Benz, S. A., Menberg, K., Bayer, P. and Blum, P.: Groundwater temperature anomalies in central Europe, *Environ. Res. Lett.*, 14(10), 104012, doi:10.1088/1748-9326/ab4240, 2019.

Vortrag 15.3 (ID 223)

Oberflächennahes Grundwasser von Wien – Einflüsse auf das unterirdische Ökosystem

Eva Kaminsky¹, Constanz Englisch², Christian Griebler², Cornelia Steiner³, Eszter Nyéki³, Kay Knoeller⁴, Christina Formanek¹, Hans Sandén⁵, Christine Stumpp¹

¹: Universität für Bodenkultur Wien, Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Bodenphysik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Muthgasse 18, 1190 Wien, Österreich

²: Universität Wien, Department für Funktionelle und Evolutionäre Ökologie, Djerassiplatz 1, 1030 Wien, Österreich

³: GeoSphere Austria, Department für Rohstoffgeologie und Geoenergie, Wien, Österreich;

⁴: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Halle/ Saale, Deutschland

⁵: Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Waldökologie, Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien, Österreich

Kontakt: eva.kaminsky@boku.ac.at

Das oberflächennahe Grundwasser ist in Städten oft vielseitig genutzt (z. B. Trinkwasser und geothermale Nutzung) und gleichzeitig durch verschiedene Faktoren wie Abwasser, Bodenversiegelung/Bauten oder Altlasten beeinflusst. Wie Nutzungen und verschiedene Einflüsse zusammenspielen ist oft sehr komplex und nicht vollständig verstanden. In Wien wird das oberflächennahe Grundwasser zur geothermalen Energiegewinnung genutzt. Das Projekt „Heat below the City“ zielt darauf ab, Faktoren zu ermitteln, die das Grundwasser von Wien maßgeblich beeinflussen und mögliche Auswirkungen von

Temperatureinflüssen abzuleiten. Dafür wurden in zwei Messkampagnen (Herbst 2021 und Frühling 2022) über 150 Grundwassermessstellen beprobt und Hauptionen, Nährstoffe, stabile Wasserisotope, Nitratisotope, Schwermetalle, Abwasserindikatoren, Umweltgase, Mikroorganismen, sowie Fauna untersucht.

Die Qualität des oberflächennahen Grundwassers ist maßgeblich von der Geologie sowie von der variablen Grundwasserneubildung und anthropogenen Einflüssen abhängig. Die Grundwasserneubildung erfolgt dabei nicht nur durch Niederschlag, sondern auch durch Oberflächenwasser-Grundwasserinteraktionen und ist beeinflusst durch anthropogene Einträge wie Abwasserleckagen. Dies konnte anhand der elektrischen Leitfähigkeit, stabiler Wasser- und Nitratisotope, Nitratkonzentrationen und Abwasserindikatoren ermittelt werden. Des Weiteren wird die Wasserqualität stark durch anaerobe mikrobielle Prozesse beeinflusst. Nitrat über dem nationalen Limit der Grundwasserqualitätsverordnung (45 mg/L) ist nur in sauerstoffreichen Zonen vorhanden, während gelöstes Eisen, Mangan und auch Methan erhöht in anaeroben Zonen vorliegen. Sauerstoff ist außerdem wichtig für die Erhaltung der Ökosystemfunktionen und ist ein limitierender Faktor für die Grundwasserfauna. Grundwassertemperaturen in Wien liegen im Mittel bei 14 °C über der mittleren Lufttemperatur von 12 °C und erreichen sehr lokal Werte über 20 °C mit einem Maximum von 30 °C. Diese erhöhten Temperaturen finden sich nur teilweise in anaeroben Zonen und sind durch die oben genannten Faktoren überprägt. Diese Ergebnisse verdeutlichen die komplexen räumlichen Variationen und verschiedene Einflüsse im städtischen Grundwasser von Wien und tragen zu einem besseren Verständnis der hydrologischen und geochemischen Prozesse bei.

Vortrag 15.4 (ID 129)

Urbane Grundwasserbelastungen in einem Stadtgebiet in Rheinnähe: Praxisorientierte Anwendung eines 3D GW-Schadstofftransportmodells zur Schadstoffbilanzierung während kombinierter Sanierungsverfahren unter Berücksichtigung der Ergebnisse innovativer Erkundungsmethoden

Sebastian Leschik, Karsten Menschner

CDM Smith SE, Deutschland

Kontakt: sebastian.leschik@cdmsmith.com

Die frühere LCKW-Verwendung auf einzelnen Teilflächen eines urbanen Industriegebietes in Rheinnähe gilt als Ursache von großflächigen LCKW-Grundwasserbelastungen im oberen Grundwasserleiter (OGWL). Insgesamt handelt es sich um eine komplexe

Belastungssituation mit mehreren LCKW-Quellen und zwei abströmenden Hauptfahnen, in denen der Metabolit Vinylchlorid (VC) als Hauptanteil dominiert. Ein im Abstrom liegender Badeseesee wird aktuell über eine modelloptimierte Brunnengalerie mittels Pump & Treat (P&T) vor dem Eintritt von LCKW/VC gesichert. Im Rahmen der Sanierungsuntersuchung wurde für den Fahnenbereich eine innovative Sanierung durch aerobe in-situ Direktgasinjektion zur Stimulation des mikrobiologischen VC-Abbaus mittels 6 redox-kontrollierten Gasinjektionswänden favorisiert. Der höher belastete Quellabstrom einer Teilfahne wird aktuell mit Grundwasserzirkulationsbrunnen abgeschnitten, bis über die Sanierung (z. B. mittels in-situ-elektrothermischer Behandlung) des überbauten Bereichs einer aktiven Sekundärquelle befunden wird. Als Bilanzierungs- und Prognoseinstrument für die weitere Planung und Optimierung verschiedener Sanierungsvarianten wurde ein instationäres 3D-FE-GW-Schadstofftransportmodell erstellt. Das Modellgebiet liegt in der Rheinebene und erstreckt sich bis zum Rhein auf einer Fläche von ca. 4,1 km². Das zu Grunde liegende hydrogeologische Strukturmodell unterteilt sich anhand von über 100 Bohraufschlüssen in 4 Modellschichten mit unterschiedlichen hydrogeologischen Eigenschaften. Auf Basis des hydrogeologischen Strukturmodells wurde das GW-Strömungs- und Schadstofftransportmodell erstellt. Die Modellkalibrierung erfolgte u. a. anhand der Ergebnisse innovativer Erkundungsmethoden. Neben Direct-Push-CPT-MIP-Sondierungen wurden 4 Immissionspumpversuche zur Lokalisation der genauen Lage der Quellbereiche durchgeführt. Zudem wurden präferentielle Fließwege über Thermo-Flow-Messungen ermittelt. Die differenzierten Schadstoffflüsse wurden an verschiedenen Bilanzebenen in Bereich der Schadstofffahne als Grundlage ermittelt. Der LCKW-Input wurde anhand einer Trendanalyse der gemessenen LCKW-Konzentrationen an den Fahnenkernbereichen ermittelt und über exponentielle Inputfunktionen extrapoliert. Im Ergebnis der Modellkalibrierung konnte ein prognosefähiges Modell mit hinreichender Genauigkeit erstellt werden. Insgesamt erfolgten 6 verschiedene Prognoseläufe für verschiedene Gasinjektionswandgesamtlängen (von insgesamt 1200 m bis 2300 m Länge) und 5 unterschiedliche Sanierungszielwerte (20, 15, 10, 5 und 0,5 µg/L LCKW/VC). Im Ergebnis der Prognoserechnungen konnte nach Kosten-Nutzen-Analyse, die für den konkreten Fall als verhältnismäßig beurteilte Sanierungsvariante bestätigt werden. Ein weiterer Anwendungsfall für das GW-Modell war die Schadstoffbilanzierung von möglichen zusätzlichen lokalen Schadstoffeinträgen im Bereich der Hauptfahne. Mit dem GW-Modell wurden P&T-Szenarios im Hinblick auf eine Verminderung der Brunnenalterung sowie eine Reduzierung der Nutzung der Ressource Grundwasser berechnet. Im Quellbereich wurden die Auswirkungen einer in-situ-thermischen Sanierung auf das Grundwasser ermittelt. Die Anwendungen des robusten GW-Strömungs- und Stofftransportmodells zeigen, wie auf Basis von zahlreichen diversen Erkundungsdaten, eine praxisbezogene Modellierung für eine zielgerichtete Entscheidungsfindung unter komplexen Sanierungsbedingungen in einem urbanen Grundwasser-einzugsgebiet eingesetzt werden kann.

Ermittlung der zukünftigen Entwicklung des Dargebotes eines urban geprägten Grundwasservorkommens – Fallbeispiel Stadt Braunschweig

Tobias Langmann, Hans Matthias Schöniger

Technische Universität Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Deutschland

Kontakt: t.langmann@tu-braunschweig.de

Schon heute wirkt der Klimawandel durch zunehmende Temperaturen sowie veränderte Niederschlagsmengen und -muster negativ auf das Oberflächen- und Grundwasserdargebot ein und ist damit neben steigenden Wasserbedarfen ein bedeutender Stressor der Wasserversorgung. Mit dem niedersächsischen Wasserversorgungskonzept als Informations- und Planungsgrundlage und dem Grundsatz eines Vorranges der Wasserversorgung nach WHG aus lokalen/regionalen Wasservorkommen, werden regionale Studien zur Wasserverfügbarkeit und Wasserversorgung erforderlich. Diese Studien müssen ausgehend von profunden wissenschaftlichen Untersuchungen und Modellierungen des bewirtschafteten Hydrogeosystems Erkenntnisse liefern, um gemeinsam mit anderen Akteuren eine resiliente und nachhaltige Wasserversorgung für die Zukunft zu erarbeiten. Als eine solche Regionalstudie führen wir das Projektes HyPoWaBS (Hydrogeologische Potentialstudie für die Wasserversorgung der Stadt Braunschweig) durch. Die Wasserversorgung der Stadt Braunschweig mit ihren rund 250.000 Einwohnern erfolgt zurzeit überwiegend per Fernwasserlieferung aus Stauseewässern des paläozoischen Festgesteins des Westharzes. Zusätzlich wird ein Grundwasserwerk im nördlichen Stadtgebiet als Spitzen- und Reservewasserwerk betrieben.

Das Ziel des Projektes HyPoWaBS ist die Ermittlung des Nutzungspotenzials des lokalen Grundwasservorkommens unter der Stadt für die städtische Wasserversorgung. Dabei müssen die Besonderheiten der urbanen Hydro(geo)logie des ohnehin komplexen Hydrogeosystems berücksichtigt werden. Für die Ermittlung der Nutzungspotenziale und des aktuellen sowie künftigen Grundwasserdargebots wird eine Modellkette aus einem geologischen Strukturmodell, einem FE-Grundwasserströmungsmodell und einem deterministischen Wasserhaushaltsmodell eingesetzt. Die Modellierungsarbeiten werden durch Feldstudien mit Fokus auf die Wechselwirkung zwischen relevanten Hydrosystemen inkl. Grundwassermonitoring, isotope- (^{18}O , ^2H , ^3H , ^3He) und hydrogeochemischen Untersuchungen zu Grundwasserherkunft, mittleren Verweilzeiten und -neubildung flankiert. Als weitere Herausforderung kann die Verwendung des kalibrierten Grundwassermodells für die angestrebte Klimaimpactmodellierung auf einer urbanen Einzugsgebietsskala angesehen werden.

Kompensation der unterirdischen Verdichtung im urbanen Bereich durch Grundwasserüberleitungsanlagen und deren Dimensionierung mittels Grundwassermodellierung

Philipp Huttner, Ferdinand Flechtner, Katja Eulitz

DHI WASY GmbH, Deutschland

Kontakt: phhu@dhigroup.com

Die Flächen für Neuerschließungen und neue Bebauungsgebiete werden vor allem im städtischen und stadtnahen Gebieten immer weniger. Grundstücke mit grundsätzlich ungünstigen Rahmenbedingungen, wie z. B. flurnahem Grundwasserspiegel, werden dadurch heutzutage immer interessanter für Städteplaner. Ebenso steigt das Interesse und die Tendenz, alte Gebäude abzureißen und mit größerer Gründungstiefe für Tiefgaragen im Stadtkern zu planen. Diese Verdichtung im städtischen Bereich hat nicht nur auf die Grundwasserneubildung einen nachteiligen Effekt, sondern beeinflusst auch die natürliche Grundwasserströmung.

Der neue Baukörper stellt dabei oft ein unüberwindbares Hindernis für den natürlichen Grundwasserstrom dar, sodass es zu dauerhaftem Aufstau und zur Absenkung führen kann. Eine in der Praxis bereits vielfach angewandte und oft bewährte Lösung stellt dabei eine Grundwasserdüker-Überleitung dar (auch Grundwasserkommunikationsanlagen genannt). Dabei wird mit horizontalen, geschlitzten Filterrohren (ähnlich der Bauweise von horizontalen Trinkwasserbrunnen) das Grundwasser auf der Entnahmeseite gefasst, mittels Vollrohren über Transportleitungen unter oder um den Baukörper herumgeführt und auf der Abstromseite über abermals geschlitzte Filterrohre an den Grundwasserleiter wieder abgegeben, sodass der natürliche Grundwassergradient nahezu wieder hergestellt wird (gängige Anforderung der Behörden: dauerhafter Aufstau/Absenkung $< \pm 10$ cm und keine negative Beeinflussung der Nachbarbebauung).

Bisher wurden Planungen der Grundwasserdüker oftmals analytisch oder mit Hilfe einfacher Box-Grundwassermodelle berechnet. Aufgrund dieses einfachen Ansatzes werden Düker teilweise überdimensioniert oder völlig unpassend angeordnet. Durch den Aufbau deutlich komplexerer 3D-Grundwassermodelle mit der Software FEFLOW, in denen die Geometrie und Rohrhydraulik des Dükers durch innovative Ansätze besser abgebildet werden, können verschiedenste Konstellationen schnell und effizient modelliert werden. Die Innovation in diesem Ansatz ist die gemeinsame Abbildung von Grundwasserströmung und Rohrhydraulik in einem System. Oft wird dadurch erst eine effiziente Planung des Systems ermöglicht.

Den technischen Nachweis der Durchführbarkeit und der Funktionsweise kann man ausschließlich mit einer modellgestützten Grundwassermodellierung erbringen. Dabei wird auf Grundlage der Planungsunterlagen und meist öffentlich verfügbaren Daten ein 3-D Grundwassermodell aufgebaut, welches dabei die Grundwasserdüker in ihrer Geometrie mit abbildet. Das Modell wird anschließend für verschiedene hydrologische Zustände (z. B. Mittel-/Niedrig-/Hochwasser) stationär kalibriert, bis die vorherrschende Grundwasserströmung gut abgebildet wird. Sobald das Grundwassermodell als prognosefähiges Planungswerkzeug eingestuft werden kann, werden unterschiedliche Düker-Anordnungen iterativ zwischen numerischem Grundwassermodell und analytischen Ansätzen der Rohrreibungsverluste simuliert, bis der zulässige Aufstau unterschritten wird. Dabei ist oft eine Überarbeitung des Berechnungsnetzes notwendig, um die lokalen Einflüsse des Dükersystems belastbar abbilden zu können.

Dieser bisher noch nicht sehr weit verbreitete Ansatz wurde unter anderem am Flughafen München, für diverse U-Bahn-Stationen in München, in Geretsried und am City Tunnel in Leipzig erfolgreich angewendet.

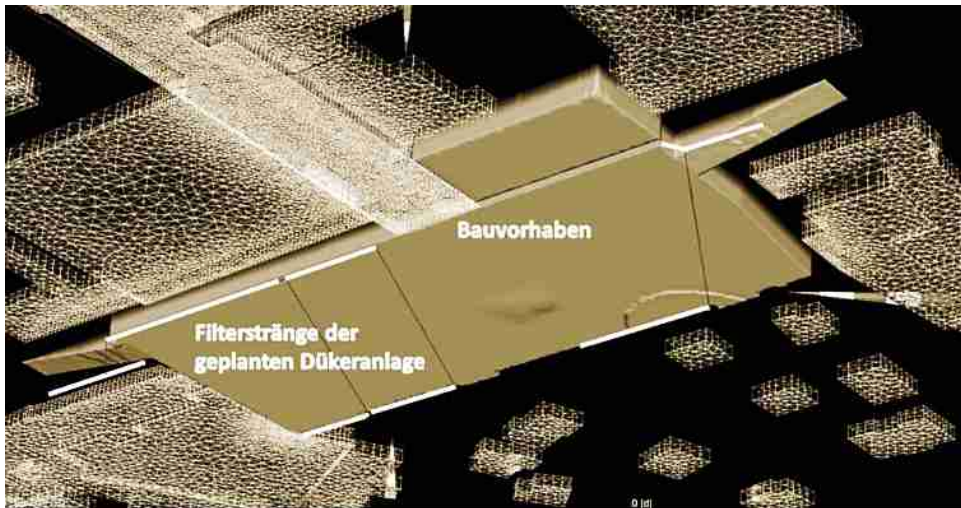


Abb. 1: Modell des Bauvorhabens.

Kies- bzw. Schottergärten zur Stärkung der Grundwasserneubildung in der Stadt

Patricia Göbel¹, Johannes Meßer²

¹: Universität Münster, Deutschland

²: Emscher Lippe Wassertechnik GmbH, Deutschland

Kontakt: pgoebel@uni-muenster.de

Die Nutzung von Kies- oder Schottergärten ist ein kontrovers diskutiertes Thema. Viele Gemeinden und Kommunen nutzen bereits die Möglichkeit, Kies-/ Schottergärten zu verbieten oder in den Bebauungsplänen zu untersagen. In den Städten wird ein wasserbewusster und nachhaltiger Umgang mit den Ressourcen Regenwasser und Grundwasser im Rahmen eines naturangepassten Wasserhaushaltes gefordert. Für die Menschen steht allerdings immer weniger Freifläche für die individuelle und biodiverse Gartengestaltung zur Verfügung, da aufgrund des Rückgangs der mittleren Grundstücksgröße bei gleichbleibender Grundfläche der Bebauung der Befestigungsgrad immer weiter steigt. Dies betrifft auch die Umsetzung von Maßnahmen zur Stärkung der Grundwasserneubildung durch Regenwasserversickerung.

Die Versickerung von Regenwasser in oberirdischen Mulden über die belebte Bodenzone ist kostengünstig, ressourcenschonend, wahrnehmbar für die Menschen und damit leicht zu unterhalten; die oberirdischen Mulden haben allerdings je nach Dimensionierung einen entsprechenden Platzbedarf. Demgegenüber ist die Versickerung über unterirdische Rigo- len platzsparend, dafür aber kostenintensiver, ressourcenverbrauchend und schwieriger zu unterhalten. Unterirdisch versteckte Versickerungsmulden (halb-)gefüllt mit natürlichen Materialien der Kies- und Schottergärten bei gleichzeitiger ökologischer Aufwertung mittels speziell angepasster Pflanzen könnten – insbesondere in Vorgärten – eine Lösung darstellen.

Zur Klärung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt wurden vergleichende Berechnungen für Schottergärten und herkömmliche Vorgärten durchgeführt (Meßer 2023). Die Bodenwasserbilanzierungen erfolgten mit dem Modell BOWAHALD für unterschiedliche Szenarien. Die Grundwasserneubildung erhöht sich deutlich; sofern ein durchlässiges Vlies unter dem Schotter verwendet wird. Dadurch findet kein Oberflächen- oder Zwischenabfluss statt. Der Grund für die höhere Grundwasserneubildung ist die, wegen des fehlenden Pflanzenwuchses, deutlich geringere Verdunstung (Abb. 1).

Würde man das von Dachflächen anfallende Regenwasser über eine unterirdisch versteckte Versickerungsmulde unter einem Schottergarten versickern, könnte der Eingriff der

Bebauung eines Grundstücks auf den Wasserhaushalt kompensiert werden. Dies trifft beispielsweise bei einer Doppelhaushälfte mit Garten und Vorgarten zu. Bereits die Einrichtung eines Schottergartens anstelle eines herkömmlichen Gartens erhöht die Grundwasserneubildung auf dem Gesamtgrundstück bereits um 10 %, während die Verdunstung entsprechend abnimmt.

Meßer, J. (2023): Der Wasser- und Wärmehaushalt von Schottergärten an einem Beispiel in Duisburg. – Korrespondenz Abwasser Abfall 70 (9): 666-674; Hennef.

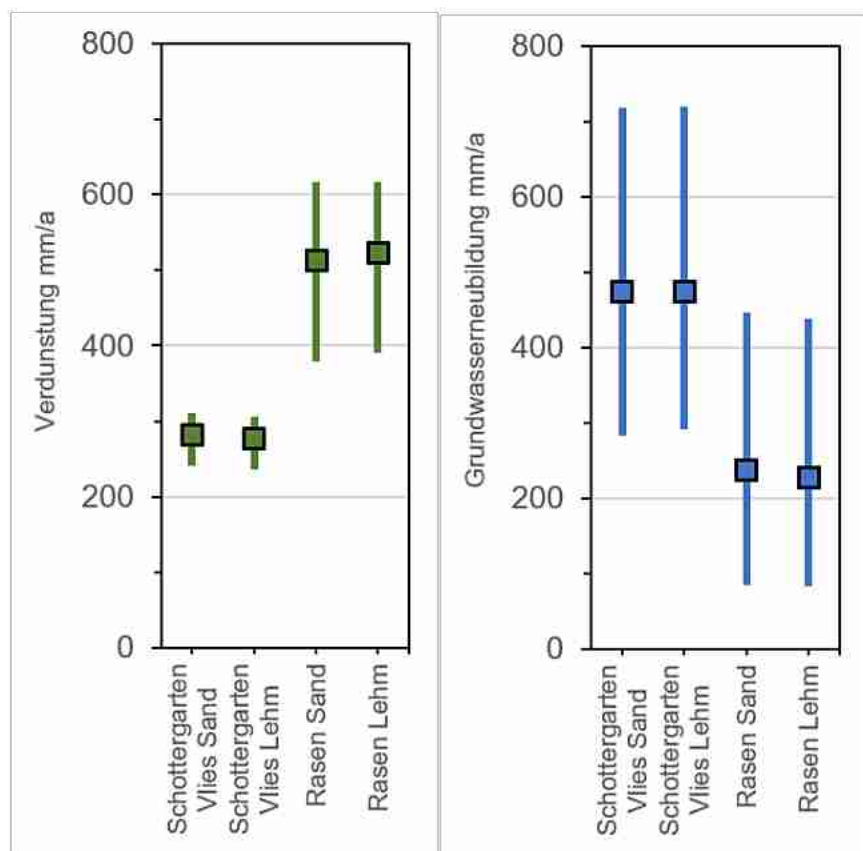


Abb. 1: Spannweite und Mittelwerte aus Einzeljahren für Verdunstung (links) und Grundwasserneubildung (rechts) bei Schottergärten und Rasenflächen über Sand- und Lehmböden (Klimadaten 1991-2010 Düsseldorf DWD) (aus Meßer (2023)).

Thermische Mobilisierung als Unterstützung einer in situ chemischen Oxidation - Geothermie als Geoengineering

Volker Jungk, Wolfram Canzler, Christoph Manthey

AKVO GmbH, Deutschland

Kontakt: v.jungk@akvo.de

Auf dem Gelände der ehemaligen Magdeburger Armaturenwerke befinden sich Boden- und Grundwasserverunreinigungen mit LCKW und untergeordnet MKW, die aus früheren Nutzungen resultieren. Der Untersuchungsstandort der heutigen StaHaB GmbH befindet sich im zentralen Teil des Geländes der ehemaligen MAW GmbH Magdeburg. Er ist zum einen durch einen aus dem westlichen Anstrom resultierenden Grundwasserschaden, zum anderen offensichtlich durch Quellbereiche bzw. Teile von Quellbereichen von LCKW, teilweise unter Industriehallen geprägt. Letztere verstärken die abstromig bereits vorliegenden Grundwasserbelastungen.

Da sich eine Pump-and-Treat-Maßnahme kaum auf das in den Schmelzwassersanden (ungesättigte und gesättigte Zone) und maßgeblich in den gering permeablen Grünsanden vorhandene Quellpotenzial im Bereich der StaHaB GmbH auswirkt, wurde festgestellt, dass ein Sanierungserfolg bei Fortführung dieses Verfahrens am Standort weder in den Haupteintragsbereichen noch im nahen Abstrom mit verhältnismäßigen Mitteln und in einem vertretbaren Aufwand erreichen lassen.

Zur Verkürzung der Dauer des Pump and Treat war es daher notwendig, ergänzende Sanierungsmaßnahmen direkt an den Quellen anzusetzen. Dazu wurde im Ergebnis verschiedener Untersuchungen unter anderem das Verfahren der in situ chemischen Oxidation (ISCO) als geeignet vorausgewählt und als Vorzugsvariante einer optimierten hydraulischen Maßnahme bestätigt, da unter anderem aufgrund einer Werkshalle herkömmliche Sanierungsverfahren mittels Bodenaustausch nicht möglich waren.

Für die Planung konnten in einem Pilotversuch 2018/2019 ortskonkrete Auslegungsparameter ermittelt werden. Im Ergebnis des Pilotversuchs wurde gezeigt, dass die Kombination einer thermischen Mobilisierung mit einer in situ chemischen Oxidation (ISCO) eine geeignete und verhältnismäßige Maßnahmenkombination zur Sanierung der überbauten Schäden darstellt.

Die in 2022/2023 realisierte Sanierungsmaßnahme kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Mobilisierung von in den Grünsanden adsorbierten LCKW durch Aufheizen des Grundwassers in Grünsandschichten,
- Grundwasserförderung südlich und östlich der Halle als Abstromsicherung und zur Bereitstellung von Prozesswasser (Infiltration),
- an Stelle eines konduktiven Aufheizens Erhitzung des geförderten Wassers vor der Re-Infiltration,
- Infiltration des erhitzten Wassers in die Grünsandschicht unterhalb der Halle im Anstrom und im Bereich der Kontamination,
- anschließende Infiltration von Natriumpermanganat-Lösung in die Schmelzwasserschicht unterhalb der Halle,
- 32 Wochen Betrieb mit anschließend einem Jahr Nachsorge.

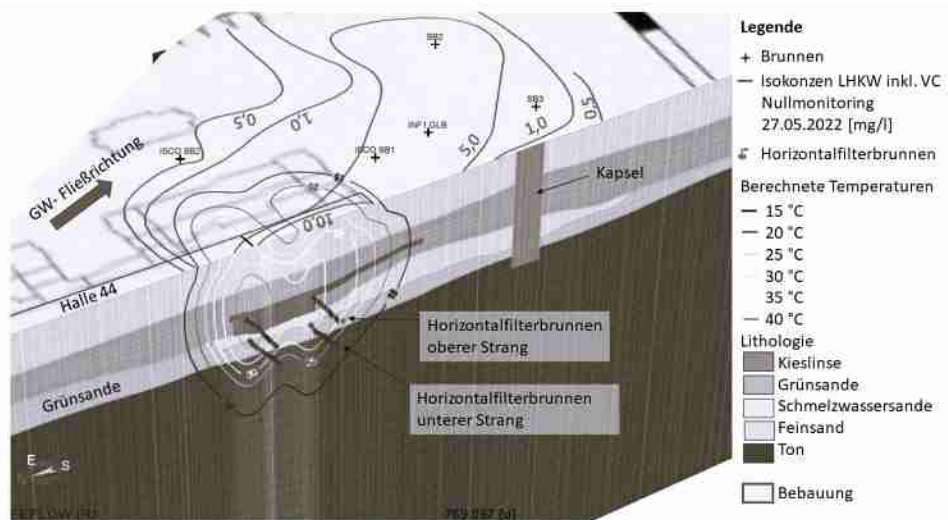


Abb. 1: 3D-Blockbild entlang des N-S-Profiles durch die Halle 44 (4-fach überhöht).

Die Maßnahme wurde mit einem instationären, hydrothermischen Modell mit gekoppeltem Stofftransport geplant, begleitet und ausgewertet. Auf Basis der Ergebnisse der Grundwassermonitoringkampagnen ließ sich gut nachvollziehen, dass die Sanierungsdurchführung mit thermischer mobilisierter in situ Oxidation erhebliche Mengen an LCKW, welche vordergründig in den Grünsandschichten gebunden waren sowie lokal in Phasen vorlagen, mobilisierte. Es konnte eine Entfrachtung von ca. 1.000 kg LCKW durch die ISCO-Maßnahme abgeschätzt werden. Es wurden somit in der Sanierung viel größere LCKW-Massen abgereinigt, als ursprünglich nach dem Pilotversuch bilanziert wurden (91 kg).

Die Sanierung wurde im Rahmen der Altlastenfreistellung durch die Landesanstalt für Altlastenfreistellung des Landes Sachsen-Anhalt finanziert.

Poster 15.4 (ID 267)

Verhalten und Nutzung organischer Spurenstoffe an einem Uferfiltratstandort am Rhein

Alexandra Hellwig¹, Lydia Woschick¹, Clara Vogt¹, Björn Droste², Dirk Antunovic², Anette Albrecht², Hans-Peter Rohns², Traugott Scheytt¹

¹: TU Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für Hydrogeologie und Hydrogeochemie, Gustav-Zeuner-Straße 12, 09599 Freiberg

²: Stadtwerke Düsseldorf AG, Qualitätsüberwachung Wasser, Wiefeld 50, 40589 Düsseldorf
Kontakt: Alexandra.Hellwig@geo.tu-freiberg.de

Der steigende Wasserbedarf für Industrie, Landwirtschaft und Privathaushalte sowie der Klimawandel führen zu niedrigeren Flusspegeln und Grundwasserspiegeln. Gleichzeitig müssen immer höhere Abwassermengen in Deutschland bewältigt werden. Dies hat negative Folgen sowohl für die Qualität der Oberflächengewässer als auch des Grundwassers und macht die Optimierung der Wasserbewirtschaftungspraxis von Grundwasserleitern immer notwendiger. Das vom BMBF geförderte Forschungsvorhaben iMolch (Projektnummer: 02WGW1667D) hat sich die Erstellung nachhaltiger Wassermanagement-Konzepte für Deutschland mithilfe innovativer Monitoring-Strategien zum Ziel gesetzt. Genereller Zweck der Untersuchungen ist ein komplexes Verständnis der hydrodynamischen und hydrochemischen Prozesse, um eine nachhaltigere Nutzung der Ressource Wasser auf Basis von Modellprognosen zu ermöglichen. Diese Studie untersucht am Beispiel eines urbanen Uferfiltratstandortes in Düsseldorf, Deutschland, die räumliche und zeitliche Variation verschiedener Substanzen. Aus diesen können Rückschlüsse auf Oberflächenwasserqualität, Grundwasserdynamik, Redoxprozesse und Transport sowie Rückhalt von organischen Spurenstoffen im Hinblick auf die Trinkwassernutzung gezogen werden.

Hydraulische und hydrochemische Messungen wurden über einen Zeitraum von 1 ½ Jahren (31.01.2018–08.05.2019) zweiwöchentlich über ein Untersuchungstransect am Rheinufer mit 15 Messstellen durchgeführt. Im Vordergrund der Auswertungen stehen dabei die Änderungen der Konzentrationen organischer Spurenstoffe über die Zeit sowie der Zusammenhang zu Fließstrecke, -dauer und klimatischen Verhältnissen. Dabei wird unterschieden zwischen landseitig eingetragenen Stoffen, wie beispielsweise Dünge- und Pflanzenschutzmitteln, und rheinseitig transportierten Stoffen, wie Medikamente und Reinigungssubstanzen, die über Abwässer in den Rhein gelangen. Mit größerer Entfernung zum Rhein nimmt die Abhängigkeit der Konzentrationen vom Rheinpegel ab. Nach der extremen

Trockenheit im Sommer 2018, in der ausschließlich niedrige Konzentrationen der Spurenstoffe im gesamten Untersuchungsgebiet nachgewiesen wurden, gibt es einen sprunghaften Anstieg der rheinseitig eingetragenen Substanzen, der mit einem deutlichen Rheinhochstand im Winter 2018/2019 verbunden ist. Hierbei fällt auf, dass auch in Messstellen jenseits der Brunnengalerie, auf der Landseite des Messstellentransseks, eine erhöhte Konzentration von rheinseitig eingetragenen Substanzen nachweisbar ist.

In Trockenzeiten, wie im Sommer 2018, ist der Anteil des Uferfiltrats am Rohwasser deutlich geringer. Dementgegen überspült der Rhein in wasserreichen Zeiten, wie beispielsweise im Winter 2018/2019, die Pumpbrunnengalerie, sodass der Zustrom von landseitigem Wasser völlig unterbunden wird. Das Auftreten von rheinseitig eingetragenen, organischen Spurenstoffen auf der rheinabgewandten Seite der Brunnengalerie bestätigt, dass der Rhein trotz laufender Wasserförderung das Wasser im Uferfiltrat bis zur Brunnengalerie und weit darüber hinaus ins Hinterland drückt. Diese Beobachtungen sind entscheidend für die spätere Erstellung der Modellprognosen zur Wasserqualität und verfügbarer Wassermenge, die in Nutzungskonzepten zur Minimierung der Trink- und Grundwasserbelastung resultieren.

Poster 15.5 (ID 282)

Konstruktive Lösungen zur Vereinbarung von Schienennetzerweiterung und öffentlicher Trinkwasserversorgung im Ballungsraum

Meike Beier, Arnd Allendorf

Hessenwasser GmbH & Co. KG, Deutschland

Kontakt: meike.beier@hessenwasser.de

Die Hessenwasser GmbH & Co. KG betreibt 21 Wasserwerke in 14 Trinkwassereinzugsgebieten (EZG) mit insgesamt 383 km² Fläche vorwiegend in Südhessen. Im Ballungsraum des Rhein-Main-Gebietes sind die EZG von zahlreichen Infrastrukturprojekten, v. a. dem Neu- und Ausbau von Bahntrassen, betroffen. Schwerpunkte sind ein Trinkwasserschutzgebiet südlich von Frankfurt (WSG Stadtwald) mit vier Bahnprojekten sowie das Hessische Ried, wo eine Schnellbahn- und Güterzugtrasse über ca. 15 km durch WSG der Hessenwasser verlaufen soll.

Bau und Betrieb der Bahntrassen bringen qualitative und quantitative Risiken für das Grund- und damit Trinkwasser mit sich. Die Gefährdungen umfassen Anströmungshindernisse durch in den Untergrund eingreifende Bauwerke, bauzeitliche Einflüsse durch Wasserhaltungen, Stoffeinträge während des Baus, im Normalbetrieb und durch Havarien sowie direkte Betroffenheiten von Anlagen.

In den ersten der seit dem Jahr 2008 eingeleiteten Planfeststellungsverfahren erfolgte noch überwiegend ein schriftlicher Austausch über Stellungnahmen im Rahmen der formellen Beteiligung der Hessenwasser. Mittlerweile suchen die für den Grundwasserschutz zunehmend sensibilisierten Vorhabenträger bereits vor Beginn der Verfahren den konstruktiven Austausch und einvernehmliche, pragmatische Lösungen für die bestehenden Konfliktpunkte, um Bau und Betrieb der Trassen mit der öffentlichen Trinkwasserversorgung zu vereinbaren.

Neben auf die Lage in den WSG-Zonen, die Entfernung zu den Brunnen und die Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung abgestimmten Entwässerungskonzepten, dem Verzicht auf Herbizide, Schutz- und Überwachungsmaßnahmen während der Bauphase sowie dem Ersatz von unmittelbar betroffenen Brunnen sind insbesondere Havarien zu betrachten.

Sowohl im Stadtwald als auch im Hessischen Ried ergibt sich durch verstärkten Güterverkehr bzw. den Neubau von auch durch Güterzüge genutzten Trassen ein deutlich erhöhtes Risiko von Havarien mit Freisetzung großer Schadstoffmengen in Brunnennähe. Problematisch sind hier insbesondere die Bereiche, in denen Betroffenheitsanalysen ergeben haben, dass die Fließzeiten vom Ort der Havarie zu den Brunnen weniger als ein Jahr, teils sogar nur wenige Wochen, betragen. Die Zeit reicht in diesen Fällen weder für Abwehr- und Sanierungsmaßnahmen noch für Planung, Genehmigung und Bau neuer Brunnen zum Ersatz der entfallenden Trinkwassermengen aus.

In diesen Fällen ist eine Ersatzwasserbeschaffung erforderlich, die beim Eintreten einer Havarie bereits zur Verfügung steht. Diese Ersatzwasserbeschaffungskonzepte werden auch seitens der Genehmigungs- und Wasserbehörden als Voraussetzung für die Erteilung der jeweiligen Planfeststellungsbeschlüsse gesehen.

Hessenwasser und die DB Netz AG als Vorhabenträger haben daher vereinbart, dass zusätzliche Brunnen sowie zur quantitativen Stützung und zum qualitativen Schutz der neuen Brunnen zusätzliche Anlagen zur künstlichen Grundwasseranreicherung (Infiltrationsorgane) im Rahmen der Planfeststellungsverfahren geplant und genehmigt sowie schließlich vor Inbetriebnahme der jeweiligen Trasse gebaut werden.

Auf diese Weise kann im unter hohem Nutzungsdruck stehenden Ballungsraum die notwendige Erweiterung der Schienenwege kompatibel mit der öffentlichen Trinkwasserversorgung, die sich aufgrund des Klimawandels sowie demografischer und wirtschaftlicher Entwicklung großen Herausforderungen hinsichtlich der Sicherstellung der benötigten Wassermengen gegenüberstellt, erfolgen.

16 Hydrogeologie arider Gebiete

22.03.2024, 09:45 - 10:45, Konferenzraum 2

Nils Michelsen (Technische Universität Darmstadt)

Heiko Dirks (Ingenieurbüro Prof. Kobus und Partner GmbH)

Vortrag 16.1 (ID 278)

Grundwasserübernutzung in Jordanien

Jan Stiasny

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Jordanien

Kontakt: jan.stiasny@bgr.de

Eindrücke aus der technischen Entwicklungszusammenarbeit im Bereich Grundwasser- und Brunnenmanagement

Die arabische Halbinsel gehört zu den trockensten Regionen der Erde. Jordanien ist eines der wasserärmsten Länder der Welt. Ein Großteil der Grundwasservorkommen ist fossil. Die Bevölkerungszunahme, das Wachstum in der Landwirtschaft, klimatische Veränderungen – dies alles trägt zur Verschärfung der Wassersituation bei. Diese Tatsachen sind wohl bekannt und häufig zu lesen. Aber was bedeutet es wirklich, wenn die Grundwasserreserven dermaßen rapide abnehmen?

Der Vortrag möchte die TeilnehmerInnen mitnehmen in eine aride Region, die von extremer Grundwasserübernutzung in einem Maße betroffen ist, wie man es aus Deutschland und Europa nicht kennt. Es werden die hydrogeologischen Gegebenheiten vorgestellt, die von so großer Bedeutung für die Wasserversorgung des Landes sind. Anhand von Monitoringdaten, die im Rahmen der technischen Zusammenarbeit der BGR gewonnen wurden, soll die Entwicklung des Hauptaquifersystems in den letzten Jahren nachvollzogen werden. Dadurch wird auch deutlich, vor welchen enormen Herausforderungen die lokalen Wasserversorger stehen, die im Rahmen der deutsch-jordanischen Kooperation im Grundwasser- und Brunnenmanagement unterstützt werden. Anhand von konkreten Beispielen aus einzelnen Gewinnungsgebieten lassen sich die Schwierigkeiten des Grundwassermanagements unter diesen Bedingungen verdeutlichen und die Folgen für die technische Gewinnungsinfrastruktur nachvollziehen. Dabei soll auch auf Aspekte der Grundwassererschließung und des Brunnenmanagements eingegangen werden, welche im Fokus des BGR-Vorhabens stehen.

Hydrochemistry of groundwater in Jordan – a nation-wide assessment

*Fritz Kalwa¹, Mohammad Alhyari¹, Muna Gharaibeh², Simone Seibert¹,
Rebecca Bahls¹*

¹: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Deutschland

²: Water Authority of Jordan, Jordanien

Kontakt: fritz.kalwa@bgr.de

The groundwater in Jordan is under heavy stress. Pumping from wells not only lowers the table of the groundwater, but also changes its chemical composition substantially. Saltwater upconing can happen at any well, which is improperly operated and the entry of oxygen into a deep aquifer can change the redox milieu in a way, that geogenic contaminants are mobilized. While decisionmakers and the general public tend to focus on the more obvious quantitative aspects, the “Water Authority of Jordan” (WAJ) is responsible for the monitoring of water quality at all abstraction points. Between 2020 and 2022, WAJ performed a nation-wide assessment of groundwater quality in cooperation with BGR. A total number of 440 production wells (governmental and private, as well as springs) was sampled, addressing all relevant aquifer units in the country. In the aftermath, 88 sampling points were selected to be sampled in the scope of an annual water quality monitoring (AWQM), assessing the dynamics of the hydrochemical development in the groundwater over the next years. They were selected with regard to their geographic location and the addressed aquifer. The AWQM is considered crucial by WAJ to document trends of increasing TDS and the mobilization of unwanted contaminants of anthropogenic or geogenic origin (e.g. Se, Mo).

The results are published on a Water Quality Dashboard, which is based on the open-source toolbox “Grafana”, to be available online and give the public and decisionmakers a better understanding of the water quality situation in the Jordanian underground. The dashboard is complemented with background information about the hydrogeology of Jordan and the most important hydrochemical parameters. Thus, the dashboard is not only meant to serve experts as a tool for a better overview, but also targets the interested public to raise awareness for the groundwater quality situation in the country. The results of this work can be used as a planning and management tool in all parts of the Jordanian water sector. Furthermore, it serves as a starting point for anybody, who wants to conduct groundwater quality-related research in the country.

Vortrag 16.3 (ID 145)

Cold smokers - a rare phenomenon of SGD

Christian Siebert¹, Danny Ionescu², Ulf Mallast³, Silke Merchel⁴, Broder Merkel⁵, Peter Möller⁶, Stefan Pavetich⁷, Thomas Pohl⁵, Tino Rödiger⁸, Yossi Yechieli⁹

¹: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ, Dept. Catchment Hydrology, Deutschland

²: Leibnitz-Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries, Experimental Limnology, Stechlin, Germany

³: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ, Dept. Monitoring und Erkundung, Deutschland

⁴: University of Vienna, Isotope Physics, Vienna, Austria

⁵: TU Bergakademie Freiberg, Scientific Diving Centre, Freiberg, Germany

⁶: GFZ Helmholtz Centre Potsdam, German Research Centre for Geosciences, Section 3.4, Potsdam, Germany

⁷: ANU – Australian National University, Research School of Physics, Dept. Nuclear Physics & Accelerator Applications, Canberra, Australia

⁸: TLUBN – Thuringian State Office of Environment, Mining and nature protection, Ref. 8.1, Weimar, Germany

⁹: Geological Survey of Israel, Jerusalem, Israel

Kontakt: christian.siebert@ufz.de

The modern Dead Sea (DS) is a hypersaline terminal lake, which fills a deep tectonic depression within the Jordan-Dead Sea Rift System. Missing inputs, high evaporation and pumping let the lake surface drop with an average rate of 1 m/a, leading to a shoreline at -437 m mean sea level in 2022. The lake's Mg-dominated brine shows increased salinity (TDS = 350 g l⁻¹) and density ($\rho = 1.237 \text{ g cm}^{-3}$), respectively and is characterized by halite oversaturation and halite deposition on the lake bottom.

The basin is filled with roughly 7 km of Neogene-Quaternary marine, lacustrine, evaporite and fluvial/deltaic sediments. The upper 50-70 m are the Pleisto-Holocene deposit of the DS, the successor of Lake Lisan that disappeared 10-15 ka ago. The lacustrine DS sediments consist of lamina of aragonite, gypsum and clay minerals, embedded autochthonic halite (layers) and at least one thick bed of rock salt at the base, marking the end of the Lisan period. Contrastingly, side wadis transported fluvial sediments producing fans of coarser clastic detritus from the catchment, which become finer towards distal parts and intercalate the lake laminae.

Surface- and groundwaters from the surrounding mountainous areas follow the steep gradients towards the lake. Groundwater, recharged in the highlands flow through the Cretaceous aquifers towards the DS and into the fluvial-limnic DS deposits. While fans represent conductive zones, the DS sediments show negligible matrix flow but permeable secondary

porosity. While passing, groundwater leach soluble components, particularly the thick salt layer, which refers to the birth period of the Dead Sea 10,000 years ago. As a result, thousands of sinkholes occurred during the last 4 decades - collapse structures that particularly affect the west coast of the lake. Eventually groundwaters emerge with variable salinities through on- and offshore springs as documented by scuba divers down to depths of at least 35 m.

During SCUBA dives repeatedly detected along the western shore, submarine discharging groundwater leads to the generation of salt chimneys, a phenomenon so far unknown from any other place in the world. Subaquatic chimneys composed of sulphides and carbonates are known from Mid Ocean Ridges and abyssal submarine volcanoes. Chimneys built of very soluble salts have not been described yet. Only in the hypersaline DS, that new form of cold-water smokers was found, rising up from the bottom of the DS. They result from the difference in chemical composition between the invading saturated halite dissolution brine and the Dead Sea, which is at halite saturation too but holds a remarkable chloride excess.

At the chemical interface with the DS brine, halite precipitates instantaneously, forming chimney pillars of several meters in height and up to meters in diameter. Chemical and isotopic evidences indicate, the brine leading to the formation of these chimneys is the result of fresh groundwater, leaching a massive halite layer in the subsurface adjacencies of the lake. That process however is associated with the falling level of the Dead Sea and the increasing development of onshore sinkholes. Thus, salt chimneys indicate intense subsurface cavitation and are easily to detect by e.g., drone-based aerial imaging or echo-sounding bathymetric surveys and provide a potent, predictive tool to locate shore areas that may collapse in the near future.

Vortrag 16.4 (ID 184)

Berücksichtigung von Trockendeposition in Chlorid-Massenbilanzen zur Neubildungsabschätzung: Ja, nein, vielleicht

Nils Michelsen, Matin Rezvani, Stephan Schulz

Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Darmstadt, Deutschland

Kontakt: michelsen@geo.tu-darmstadt.de

Chlorid-Massenbilanzen (CMB) sind eine beliebte Methode, um Grundwasserneubildungsraten abzuschätzen, vor allem in ariden Gebieten. Da das Verfahren mit relativ wenigen Parametern auskommt (atmosphärischer Chlorid-Eintrag, mittlerer Niederschlag, Chlorid-Konzentration im Untergrund), wird es für seine (scheinbare) Einfachheit

geschätzt. Einige erforderliche Daten sind tatsächlich leicht zu erheben, jedoch ist der atmosphärische Eintrag über nasse und trockene Deposition schwieriger zu bestimmen als es auf den ersten Blick erscheinen mag.

Um einen Einblick zu bekommen, wie die Methode von Forschenden angewendet wird, wurde eine Literaturstudie durchgeführt. Der Fokus lag hierbei auf der Frage wie in den CMB-Studien der atmosphärische Eintrag gemessen wurde. Die Analyse zeigte in dieser Hinsicht eine erstaunliche Heterogenität. Während einige Artikel die Wichtigkeit der Trockendeposition hervorheben, wird diese in anderen gänzlich ignoriert. Überraschend oft machen die Autoren keinerlei Angaben wie der atmosphärische Eintrag bestimmt wurde oder wie viele Proben dafür zur Verfügung standen.

Dieser Beitrag präsentiert keine "Musterlösung", sondern stellt einen Aufruf zu mehr Transparenz in CMB-Untersuchungen dar.

Poster 16.1 (ID 135)

Satellitengestützte Messung der Grundwasserentnahme in Wadi Ad-Dawasir, Saudi-Arabien

Heiko Dirks¹, Randolph Rausch², Nikita Sargsyan²

¹: Ingenieurbüro Prof. Kobus und Partner GmbH, Deutschland

²: Technische Universität Darmstadt, Deutschland

Kontakt: dirks@kobus-partner.com

Das fossile Grundwasser des Wajid Aquifers wird zur Bewässerung im agrarwirtschaftlichen Großzentrum Wadi Ad-Dawasir im Süden von Saudi-Arabien genutzt. Seit den 1980er Jahren, mit Beginn der industriellen Landwirtschaft in Saudi-Arabien, übersteigen die hohen Entnahmeraten die Grundwasserneubildung. Die vorliegende Arbeit untersucht die Grundwasserentnahmen im Zeitraum 2014 – 2021 und führt die Daten mit ebenfalls satellitengestützten historischen Analysen (1973 – 2006 und 2006 – 2012) zusammen. Verwendet wurden LANDSAT 8 – Multispektraldaten (NDVI Index), um Vegetation und damit bewässerte Flächen im Untersuchungsgebiet zu bestimmen. Mit Hilfe von Zeitreihen und Anbaumustern wurden zusätzlich unterschiedliche Kategorien von Feldfrüchten identifiziert, denen ein charakteristischer Wasserbedarf zugeordnet ist.

Trotz verschiedener Maßnahmen zur Regulierung und Reduzierung der Grundwasserentnahme (z. B. Subventionskürzungen, Unterstützung moderner Bewässerungstechnologie) wurde 2015 mit 2,17 Milliarden Kubikmetern ($\triangleq \text{km}^3$) ein neues Allzeithoch der jährlichen Grundwasserentnahmen erreicht. Das entspricht etwa 40% des derzeitigen gesamten Trinkwasserbedarfs in Deutschland. Die entnommene Grundwassermenge aus dem Wajid

Aquifer für den gesamten Zeitraum 1973 – 2021 beträgt etwa 78 Milliarden Kubikmeter, während die Grundwasserneubildung im selben Zeitraum 1,5 Milliarden Kubikmeter betrug. Der Aquifer ist stark übernutzt, und Grundwasserabsenkungen von mehr als 80 m sind die Folge. Als durchschnittliche Grundwasserabsenkung im Untersuchungsgebiet (18.000 km²) ergeben sich aus den Ergebnissen 11 cm/Jahr Wassersäule (water equivalent thickness). Dies passt gut zu dem per GRACE Daten ermittelten Wert von 3 – 6 cm/Jahr Wassersäule, bei dem methodisch die lateralen Grundwasserzuflüsse mitberücksichtigt sind.

Heute holen Farmer das Wasser aus Tiefen von mehr als 200 m an die Oberfläche. Die Ergebnisse zeigen die Notwendigkeit zur Beschränkung der Grundwasserentnahmen auf. Dazu gehört sowohl die direkte Messung und Limitierung der Grundwasserentnahmen als auch politische Entscheidungen zur Einschränkung des Anbaus von Pflanzen mit hohem Wasserverbrauch sowie geringem wirtschaftlichen Gewinn. Den Farmern müssen Alternativen zur Bewässerungslandwirtschaft bzw. zur Nutzung der Grundwasserressource geboten werden. Dazu gehören z. B. Nutzung von aufbereitetem Abwasser, hocheffiziente Bewässerungsmethoden (z. B. Gewächshäuser), oder Verdienstmöglichkeiten außerhalb der Landwirtschaft.

Poster 16.2 (ID 206)

Groundwater Monitoring in Niger: A Focus on Basement Aquifer Groundwater Level Measurements in Urbanized Niamey, Uncovering Varied Recharge Mechanisms through Groundwater Signatures.

Manal Wannous¹, Kevin De Vriendt¹, Didier Zinsou²

¹: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Deutschland

²: Niger Basin Authority, Niger

Kontakt: manal.wannous@bgr.de

In the urbanized area of the Sahelian city of Niamey, Niger, we conducted a study on the hydrodynamics of the basement aquifer. To investigate groundwater fluctuations, nine boreholes within this aquifer were equipped with data loggers, enabling daily measurements of the groundwater table between 2014 and 2022.

In general, we observed groundwater levels in the boreholes show a continuous ascending trend from 2014 to 2022. During the period of study, rainfall amounts were variable, however extreme events, which reached 100-130 mm/day were more frequent. The distinct signals obtained from each well suggest different recharge sources or varying connectivity between local groundwater boundaries and the aquifer.

Analysis of the hydrographs from the different boreholes reveals three distinct groups based on hydraulic behaviour:

- i) Hydrographs showing a continuous increase in groundwater levels.
- ii) Hydrographs showing a slight increasing in groundwater table with fluctuations around an average value.
- iii) Hydrographs showing a descending trend with decreasing levels during the observation period.

Notably, continuous groundwater rise had been documented in the Continental Terminal aquifer in rural areas surrounding the urbanized city in recent decades. This phenomenon was primarily attributed to land clearing and landscape changes that enhanced the infiltration process. However, within the city itself, increasing urbanization had led to compacted soil surfaces and reduced infiltration capacity.

Intriguingly, areas with enhanced infiltration may contribute to the recharge of the wells in Niamey through the city's drainage network and the region's geological faults.

17 Erkundung von Grundwasserressourcen

21.03.2024, 15:30 - 16:45, Konferenzraum 1

Nils Moosdorf (Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung)
Robert Reinecke (Johannes Gutenberg-University Mainz)

Vortrag 17.1 (ID 181)

Der belastbare Weg zum Schutz von tiefen Grundwasservorkommen für zukünftige Generationen – zuerst kommt die Begriffsdefinition

Gesine Lorenz, Michael Heidinger, Vera Hehn

Hydroisotop GmbH, Deutschland
Kontakt: GL@hydroisotop.de

Vor dem Hintergrund der bundesweiten Diskussionen über Tiefengrundwassernutzungen, ist eine Einigung darüber, was man unter einem Vorkommen mit Tiefenwassereinfluss versteht, von besonderer Bedeutung.

Die aktuellen Diskussionen drehen sich hierbei um die verantwortliche Nutzung (Landwirtschaft, Gewerbe, Industrie, Trinkwasserversorgung) bzw. inwieweit Tiefenwasservorkommen besonders geschützt werden sollten. Bevor die verschiedenen Stakeholder - Bevölkerung, Politik, Behörden und Wirtschaft - über den Schutz und die Bewirtschaftung dieser langsam regenerierenden Grundwassersysteme oder auch über mögliche Nutzungsalternativen beraten können, ist eine fachlich begründete Begriffsdefinition dringend geboten.

Analytische Methoden, die eine Einordnung des Begriffes Tiefengrundwasser erlauben, stellen für die Diskussionen der unterschiedlichen Gruppen eine wichtige gemeinsame Basis dar. Erst wenn eine objektive Einordnung über den Begriff „Tiefenwasseranteil“ erfolgt ist, kann unter Betrachtung des Bedarfes der aktuellen und zukünftigen Bevölkerung oder der Wirtschaft und unter Betrachtung des nutzbaren Dargebots entschieden werden, welcher Schutz und welche Nutzung für derartige Vorkommen seitens der Behörden nach fachlicher Abwägung gewährt wird.

Zahlreiche Behörden der Wasserwirtschaft haben seit 2022 die Erkundung von ausgewählten Entnahmestellen im Hinblick auf das mögliche Vorhandensein von Anteilen an

Tiefengrundwasser mittels kombinierter Umwelttracer untersuchen lassen. Die Untersuchungen erfolgen im Rahmen der Prüfung von Messstellen zur Eignung für anderweitige wasserwirtschaftliche Aspekte (z. B. AVV GeA oder WRRL). In diese Erkundung wurden unterschiedliche Grundwasserleiter in tertiären, mesozoischen und paläozoischen Gesteinen einbezogen.

Die Analyseergebnisse von Messstellen stellen aus Sicht der Autoren gleichzeitig eine gute aktuelle Datensammlung dar, um Ansätze für eine breit anwendbare, gut verständliche und fachlich fundierte Methodik zu entwickeln, die auf analytischer Basis eine objektive Einordnung des Begriffes Tiefengrundwasseranteil (langsam regenerierendes Grundwasser) erlauben.

Mit Hilfe eines speziellen Untersuchungs- und Modellierungsansatzes werden von den Autorinnen und dem Autor Grundwässer mit Anteilen an „tiefem“ oder „altem und wertvollem“ Grundwasser von mindestens 50 % identifiziert. Die Studie stellt Ergebnisse der Untersuchungen (Isotope $\delta^{18}\text{O}/^2\text{H}$, ^3H , Spurengas SF_6 , hydrochemische Zusammensetzung) und den Modellansatz vor, anhand dessen eine Einordnung zum Vorhandensein belastbarer Anteile Tiefengrundwasser je Messstelle erfolgt.

Vortrag 17.2 (ID 187)

KliWaMoL - Klimaangepasstes Grundwassermanagement & 3D-Modellierung im Raum Lüneburg

Jan Redeker, Nico Deus, Jörg Elbracht

*Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen, Stilleweg 2, 30655 Hannover
Kontakt: jan.redeker@lbeg.niedersachsen.de*

Die Auswirkungen des Klimawandels sowie die oberflächennahe Grundwassernutzung können erheblichen Einfluss auf die Grundwasserversalzung haben (González et al., 2021a, 2021b, 2023). Im Projekt „KliWaMoL“ soll am Beispiel einer typischen Binnenversalzung im Raum Lüneburg eine exemplarische Planungsgrundlage entwickelt werden, um diesem Prozess mit gezielten Bewirtschaftungsmaßnahmen zu begegnen. Außerdem sollen Konzepte zur künstlichen Grundwasseranreicherung erarbeitet werden, um vor dem Hintergrund der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt die fortschreitende Grundwasserversalzung zu verhindern. Dafür wird die Versalzung des Grundwassers im Raum Lüneburg aufbauend auf einem detaillierten hydrogeologischen 3D-Modell untersucht, u. a. mit aerogeophysikalischen Verfahren (SkyTEM). Die Untersuchungen konzentrieren sich auf ein Gebiet mit vorhandener Grundwasserversalzung, welches sich von Seevetal im Westen bis nach Bleckede im Osten erstreckt, mit Lüneburg im Zentrum. Es

erfasst damit mehrere ausgewiesene Bereiche der Grundwasserversalzung der hydrogeologischen Übersichtskarte (LBEG, 1987).

Innerhalb des Projektgebietes wurden zwei Teilbereiche aerogeophysikalisch untersucht. Die dänische Firma SkyTEM wurde beauftragt, mittels helikoptergestützter transient-elektromagnetischer Messverfahren Untergrunddaten zu erheben.

Diese Befliegungskampagne wurde im April 2023 durchgeführt, mit annähernd 2500 geflogenen Linienkilometern. Die Daten aus der Befliegung werden in ein hydrogeologisches 3D-Untergrundmodell eingehängt, welches sich zurzeit noch in Bearbeitung befindet. Über diese Methode lassen sich dann Bereiche niedrigen elektrischen Widerstands klassifizieren in entweder tonige Schichtpakete oder aber versalzten Grundwasserleiter. So ergibt sich eine Kartierung der Grundwasserversalzung im Projektgebiet. Im Anschluss sollen zudem Bereiche identifiziert werden, in denen künstliche Grundwasseranreicherung durchgeführt werden könnte, was über ein Strömungsmodell bewertet wird.

González, E., Deus, N., Elbracht, J., Siemon, B., Steuer, A., Wiederhold, H. (2021a): Modellierung der küstennahen Grundwasserversalzung in Niedersachsen abgeleitet aus aeroelektromagnetischen Daten. Grundwasser 26, 73–85. <https://doi.org/10.1007/s00767-020-00472-w>

González, E., Deus, N., Elbracht, J., Rahman, M.A., Wiederhold, H. (2021b): Current and future state of groundwater salinization of the northern Elbe-Weser region. Grundwasser, <https://doi.org/10.1007/s00767-021-00496-w>

González, E., Deus, N., Elbracht, J., Kirsch, R., Müller-Petke, M., Rahman, M. A., Scheer, W., Schlinsog, T., Siemon, B. & Wiederhold, H. (2023): EU-Interreg-Projekt TOPSOIL - Grundwasserversalzung an der deutschen Nordseeküste. – GeoBerichte 48: 67 S., 52 Abb., 5 Tab.; Hannover (LBEG).

LBEG (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen) (1987): Hydrogeologische Übersichtskarte von Niedersachsen 1 : 200 000 - Versalzung des Grundwassers <https://nibis.lbeg.de/cardomap3/?permalink=bPkA19D>

Vortrag 17.3 (ID 270)

Auf der Suche nach mehr Wasser – Die Erkundung von neuen Wassergewinnungsgebieten in Nordwestdeutschland mit Hilfe von geologischen 3D-Untergrundmodellen und der Software SubsurfaceViewer

Malko Bischke, Johannes Beienz, Dirk Enters

Niedersachsen Wasser Kooperations- und Dienstleistungsgesellschaft mbH, Deutschland

Kontakt: bischke@niedersachsen-wasser.de

Der Oldenburgisch-Ostfriesische Wasserverband (OOWV) versorgt im nordwestlichen Niedersachsen über 1 Mio. Menschen mit Trinkwasser aus insgesamt 15 Wasserwerken.

Im Jahr 2022 betrug die Abgabe über 83 Mio. Kubikmeter und erreichte damit in einigen Werken ca. 90% der wasserrechtlich genehmigten Fördermenge. Um die Versorgungssicherheit auch zukünftig gewährleisten zu können, müssen neue Grundwasserressourcen erschlossen werden. Mit Hilfe einer GIS-AHP-Ensemble Methodik wurden im Vorfeld potenzielle Gewinnungsgebiete innerhalb des Verbandsgebiets anhand verschiedener hydrogeologischer Kriterien räumlich eingegrenzt bzw. priorisiert. Als Grundlage für detaillierte hydrogeologische Erkundungen dienten dann geologische 3D-Modelle des wasserwirtschaftlich nutzbaren Untergrunds, die mit der Software SubsurfaceViewer erstellt wurden. Der SubsurfaceViewer wird von Niedersachsen Wasser und OOWV entwickelt und dient speziell der Modellierung und 3D-Kartierung von Lockersedimenten im regionalen Maßstab. Er ermöglicht es, verschiedenste Geoinformationen (u. a. Bohrdaten, bodenkundliche Profilbeschreibungen, digitale Geländemodelle und Karteninformationen und Voxelm Modelle geophysikalischer Messungen) bei der Erstellung eines geologischen Untergrundmodells zu integrieren.

Im Rahmen dieser Erkundungsmaßnahmen wurde ein bestehendes 3D-Modell des Landkreises Oldenburg um eine Gesamtfläche von 421 km² erweitert. Die Datengrundlage bestand aus über 8400 Profilbeschreibungen von Bohrungen des LBEG (Landesamt für Bergbau; Energie und Geologie Niedersachsen) und des OOWV, sowie dem DGM25. Die Erstellung des Untergrundmodells gliederte sich in zwei Teile: (1) Konstruktion eines engmaschigen Netzes aus insgesamt 137 geologischen Profilschnitten inkl. Plausibilitätskontrollen und (2) Erstellung von Schichtverbreitungskarten für alle vorkommenden Modelleinheiten. Danach erfolgte die Ermittlung von Volumenkörpern sowie die Erstellung von Rasterdaten der Schichtober- bzw. -untergrenzen.

Der wasserwirtschaftlich bedeutsame Untergrund besteht aus neogenen und quartären Lockersedimenten, die in 28 geologische Modelleinheiten gegliedert werden konnten. Die ältesten modellierten Schichten erreichen Tiefen von -240 m NHN. Für den Schutz des Grundwassers bzw. für die Förderung relevant sind 17 grundwasserhemmende Linsenkörper. Der Hauptaquifer besteht aus altpleistozänen bis elsterzeitlichen (glazi)fluviatilen Sanden (feinsandige Mittel- bis Grobsande).

Die 3D-Modellierung des geologischen Untergrunds ermöglichte es, geeignete Standorte für Erkundungsbohrungen bzw. Grundwassermessstellen und Pumpversuche zu bestimmen. Im Modell entdeckte Rinnenstrukturen wurden so im September 2023 durch weitere Aufschlussbohrungen näher erkundet. Entscheidende neue Erkenntnisse durch den Einsatz des SubsurfaceViewers sind genauere Informationen über die Verbreitung, Tiefenlage und Mächtigkeit sowohl des Hauptaquifers als auch den darüberliegenden, grundwasserhemmenden Deckschichten. Dadurch werden sowohl Kosten gespart als auch die langwierige Erkundungsphase vor dem Bau des Wasserwerks verkürzt. Die erhaltenen Untergrundinformationen bilden zudem die Grundlage bei der Erstellung eines Grundwasserströmungs-

modells, welches im weiteren Verlauf des Wasserrechtsverfahrens entscheidende hydrologische Informationen liefert.

Die Software SubsurfaceViewer ist für öffentliche Einrichtungen und Universitäten kostenfrei verfügbar (<https://www.subsurfaceviewer.de>).

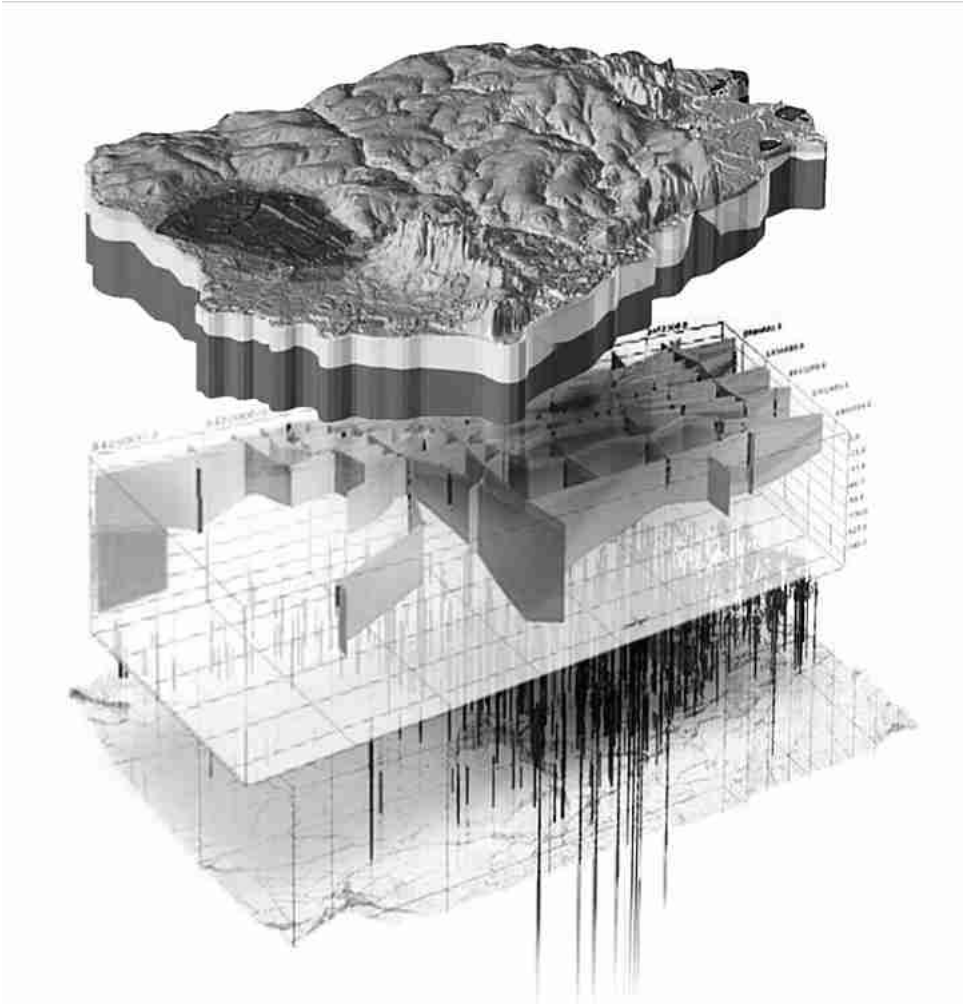


Abb. 1: Auf der Suche nach mehr Wasser – Geologische Modellierung mit dem SubsurfaceViewer (Abb. stark überhöht).

Komplexen Prozessen begegnen: Erkundung von Wasserressourcen in einer anthropogen überprägten Landschaft

Jenny Kröcher^{1,2}, Gunnar Lischeid^{1,2}, Gohar Ghazaryan^{1,3}

¹: Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF)

²: Institut für Umweltwissenschaften und Geographie, Universität Potsdam

³: Geographisches Institut, Humboldt-Universität zu Berlin

Kontakt: jenny.kroeche@zalf.de

Die Lausitz, eine Region, die durch jahrzehntelange, umfassende anthropogene Eingriffe wie Tagebauaktivitäten und die Intensivierung der Landnutzung überprägt ist, steht vor aktuellen und zukünftigen Herausforderungen im Wasserressourcenmanagement. Dazu gehören die Flutung von Tagebaugruben und der Wiederanstieg von abgesenktem Grundwasser in von Bergbau betroffenen Gebieten sowie die Wiedervernässung infolge intensiver Land- und Forstwirtschaft entwässerter Feuchtbiotope. Angesichts geringer Niederschläge und des Klimawandels sind zusätzliche wasserwirtschaftliche Herausforderungen in der Lausitz bewältigen. Die nachhaltige Nutzung der Ressource Grundwasser gewinnt in der Region daher zunehmend an Bedeutung.

Unsere Studie zielt darauf ab, diesen Herausforderungen zu begegnen und den komplexen Prozessen in der Landschaft durch effiziente Ansätze zur hochaufgelösten Erkundung und Überwachung der Wasserressourcen, insbesondere des Grundwassers, gerecht zu werden. Dafür bieten sich Verfahren der Dimensionalitätsreduktion wie die Hauptkomponentenanalyse von Zeitreihen (auch als „Empirical Orthogonal Functions“ Analyse bekannt) in Kombination mit Fernerkundungsdaten an.

Für die Erkundung der Wasserressourcen in der Region Lausitz wurde ein solcher datengestützter Ansatz über einen Zeitraum von 30 Jahren angewendet und dabei auf hydro(geo)logische Daten von etwa 17.000 Messstellen zurückgegriffen. Die Zeitreihen wurden zunächst hinsichtlich ihrer Vollständigkeit weitestgehend automatisiert analysiert, auf Basis ihrer Autokorrelation vervollständigt und einer Hauptkomponentenanalyse unterzogen. Die zeitliche Dynamik des Wasserhaushalts wird durch die ersten sechs Hauptkomponenten mit einer erklärten Varianz von über 80 % gut wiedergegeben. Dabei konnten verschiedene Effekte auf die Grundwasserressourcen identifiziert werden, darunter lokale bergbauliche Aktivitäten wie Sümpfungsmaßnahmen und Tagebaurenaturierung, sowie die Dämpfung des Signals der Grundwasserneubildung in der ungesättigten Zone.

Durch eine systematische Verschneidung der Zeitreihen mit multitemporalen, fernerkundungsgestützten Daten erfolgt schließlich eine raumzeitliche Interpolation unter

Berücksichtigung der natürlichen und anthropogenen Effekte auf den Wasserhaushalt, der Landnutzung und der Evapotranspiration.

Die Methode ermöglicht eine kontinuierliche und flächendeckende Erfassung der Grundwasserressourcen, ihrer langfristigen Veränderung und der auf sie wirkenden Effekte. Damit leistet sie einen wichtigen Beitrag zur Planung und Umsetzung einer nachhaltigen Bewirtschaftung der Ressource Grundwasser.

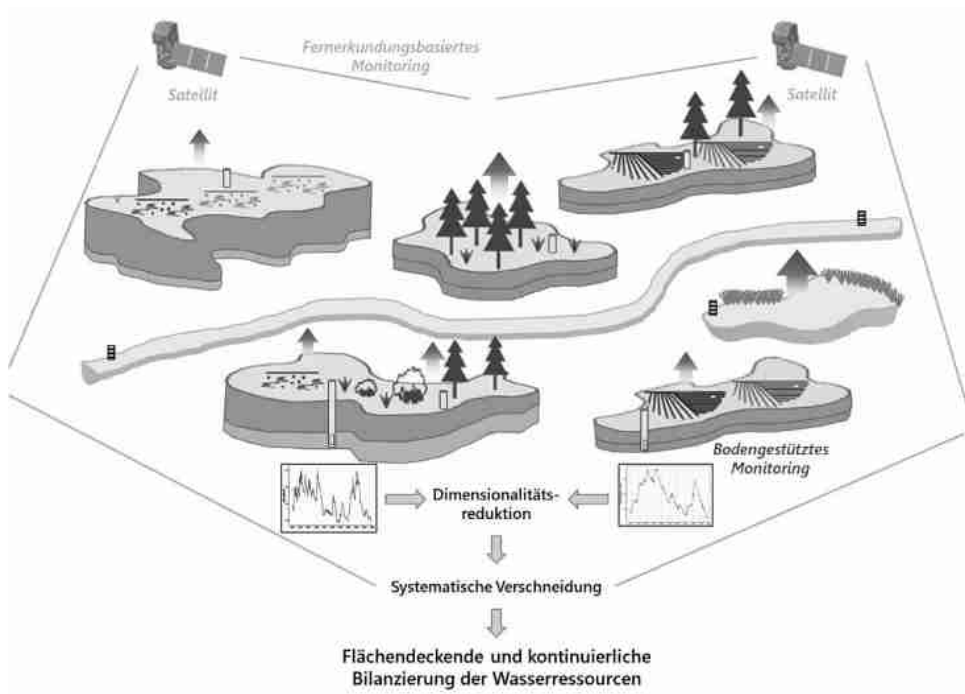


Abb. 1: Methodik zur Erkundung von Wasserressourcen in einer anthropogen überprägten Landschaft.

A Global Database of Coastal Permeability: Characterization and Implications for Coastal Groundwater Dynamics

Nils Moosdorf¹, Jarrid Tschaikowski¹, Daniel Kretschmer², Robert Reinecke²

¹: *Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung (ZMT), Deutschland*

²: *Universität Mainz*

Kontakt: nils.moosdorf@leibniz-zmt.de

In coastal regions, groundwater is particularly significant, often serving as the primary source of freshwater for both human population and ecosystems. However, harnessing coastal groundwater resources is a challenge due to the threat of seawater intrusion. Permeability exerts a profound influence on the flow dynamics of groundwater. Local coastal features, such as cliffs and beaches, play a pivotal role in shaping the permeability of these regions, yet a comprehensive global hydrogeological dataset detailing permeability of the coast was not available. Here we present the first global high-resolution database of coastal permeability, offering insights into landward, shoreline, and seaward permeabilities across diverse coastal classifications for those three categories. The dataset encompasses 4 million coastal segments, collectively spanning 2.1 million kilometers of coastline.

While landward permeability can be classified for 92.9% of the global coastline, 96.2% of the coastlines provide a shoreline permeability classification. However, seaward permeability classification encounters challenges in the far North, where limited DbSeabed data availability impedes accurate assessments. Among the shoreline classifications, Rocky Shores emerged as the most prevalent, closely followed by mangroves, beaches, and muddy coasts. Seaward permeability classes reveal a distribution pattern characterized by muddy gravel as the most abundant class, followed by gravelly mud, gravelly muddy sand, and muddy coasts. The dominance of Rocky Shores along global coastlines aligns with previous research trends, reflecting their prevalence in northern coastal regions, while sandy coasts primarily occur along the western coasts of the Americas, and muddy shores extend across substantial portions of central Europe and the Brazilian coast.

Notably, the database delineates differences in permeability between the immediate shoreline, with a median permeability of $1 \cdot 10^{-12.3} \text{ m}^2$, the seaward side (median: $1 \cdot 10^{-13.3} \text{ m}^2$), and the landward region (median: $1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$) of the coast. Despite substantial uncertainties on a global scale, this study leverages high spatial resolution data, with inputs possessing resolutions of up to 30 meters. However, thematic uncertainty remains a challenge, necessitating a simplification approach that assigns a single permeability value to specific coast classes across the globe. Despite still containing regions with limited data availability and subject to uncertainty, this dataset allows advanced coastal groundwater

modeling and geochemical flux estimation at a very high spatial resolution. As new data becomes available, the database may undergo refinements, further empowering large-scale assessments of coastal groundwater resources and their interactions with the ocean.

Poster 17.1 (ID 277)

GIS-Methoden zur flächendeckenden Generierung von Grundwasserflurabständen in Festgesteinsgebieten ohne Grundwasserbeobachtungsrohre

Abdelouahed Oussouss¹, Julian Gath¹, Nandimandalam Janardhana Raju², Wolfgang Gossel¹

¹: Martin-Luther-Universität Halle, Deutschland

²: Hydrogeology & Environmental Geology Lab, School of Environmental Sciences, New Delhi – 110067, India

Kontakt: wolfgang.gossel@geo.uni-halle.de

Die Bemessung der Grundwasserflurabstände in Festgesteinsgebieten ohne Grundwasserbeobachtungsrohre erfolgt meist sehr pauschal. Für die Berechnung der Grundwasserneubildung oder der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung stellen konkrete Grundwasserflurabstände jedoch eine wesentliche Eingangsgröße dar. Auf der Grundlage von GIS-Daten grundwassergekoppelter Oberflächengewässer und geometrischer Methoden wurden erste Verbesserungen gegenüber der pauschalen Einschätzung von Grundwasserflurabständen „> 20 m“ erreicht. Das in [Lähne 2014] erstmals beschriebene Verfahren HydroFaBer wurde nun auf der Grundlage von Messungen und numerischen Modellierungen verbessert, indem neben der Berücksichtigung der Oberflächengewässer auch die oberflächennahe Geologie über Schätzwerte der hydraulischen Leitfähigkeit und der Porosität sowie einer grob klassifizierten Grundwasserneubildung in die neue GIS-Methoden einbezogen wurde. Der Einfluss des Zirkelschlusses der Berücksichtigung der Grundwasserneubildung erwies sich als gering, da die Abhängigkeit der Grundwasserstandsganglinie von den zeitvariablen meteorologischen Eingangsgrößen nur eine geringe Korrelation zeigte.

Demgegenüber sind die Schätzungen der hydraulischen Durchlässigkeiten deutlich sensibler, was sich insbesondere in den numerischen Modellen zeigt. Die Kalibriermöglichkeiten über GIS-Funktionen erweisen sich an diesen Punkten als besonders hilfreich, indem bei der Differenz zur Geländeoberfläche Fehleinschätzungen der hydraulischen Durchlässigkeit in Form negativer Grundwasserflurabstände bei nicht vorhandenen Quellaustritten oder anderen Grundwasseraustritten sichtbar werden.

Am Beispiel eines auf diesen Methoden basierenden Kartenausschnitts soll die Entwicklung verdeutlicht werden.

Die entwickelten Methoden sind insbesondere auch für Länder ohne ein solch dichtes Grundwassermessnetz wie in Deutschland sehr wesentlich (Raju et al. 2014). Selbst wenn grundsätzlich genügend Grundwasseraufschlüsse in Form von Trinkwasserbrunnen vorhanden sind, ist es aufgrund der im Brunnenbau eingesetzten Technik meist nicht möglich, den Grundwasserstand zu messen. Auch hier können gut evaluierte GIS-Methoden bei den ersten Schätzungen z. B. zur Grundwassergefährdung weiterhelfen.

Lähne, R. (2014): Methodische Entwicklung zur Berechnung des Grundwasserflurabstandes in Festgesteinen als Bestandteil von Wasserhaushaltsmodellen.- Dissertation FG Hydro- & Umweltgeologie des Instituts für Geowissenschaften und Geographie an der Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg, 145 S., Halle(Saale).

Raju, N.J., Ram, P, Gossel, W. (2014): Evaluation of Groundwater Vulnerability in the Lower Varuna Catchment Area, Uttar Pradesh, India using AVI Concept. - Journal Geol. Soc. India 83:273-278

18 Künstliche Grundwasseranreicherung

23.03.2024, 10:30 - 12:00, Brüssel Saal

Christoph Schüth (TU Darmstadt, Institut für Angewandte Geowissenschaften)

Stephan Schulz (TU Darmstadt, Institut für Angewandte Geowissenschaften)

Vortrag 18.1 (ID 130)

Langfristige Erfolgskontrolle der Grundwasseranreicherung im Nordraum des Rheinischen Braunkohlereviers

Renate Jaritz

Erftverband, Deutschland

Kontakt: renate.jaritz@erftverband.de

Im Nordraum des Rheinischen Braunkohlereviers (Tagebau Garzweiler II), wo die jährliche Hebung von ca. 105 Mio. m³ Sumpfungswasser großräumige Grundwasserabsenkung verursacht, wird seit mehr als 30 Jahren aufbereitetes Sumpfungswasser des Braunkohlentagebaus Garzweiler II in die Aquifere infiltriert oder oberflächennah versickert. Zweck der Grundwasseranreicherung ist:

- Ausgleich von bergbaubedingter Grundwasserabsenkung in grundwasserabhängigen Feuchtgebieten
- Räumliche Begrenzung bergbaubedingter Grundwasserabsenkung
- Sicherung der öffentlichen Wasserversorgung
- Erhalt von feuchtgebietstypischer Vegetation trotz Grundwasserabsenkung

Es werden ca. 80 Mio. m³ von der Bergbautreibenden, RWE Power AG in Sickerschlitzen und -brunnen versickert oder direkt in Feuchtgebiete eingespeist. Ohne Grundwasseranreicherung würden z. B. grundwasserabhängige Feuchtgebiete des Naturparks Schwalm-Nette schwer geschädigt werden, da selbst in Feuchtgebieten, die mehr als 10 km vom Tagebau entfernt sind, Absenkungen von mehreren Metern auftreten würden. Die Wirksamkeit der Grundwasseranreicherung wird in einem Monitoring, an dem über 40 Behörden, Unternehmen und Verbände beteiligt sind, überprüft.

Neben den technischen Herausforderungen, die Anlagen langfristig zuverlässig zu betreiben, erfordert auch die Steuerung der Anlagen detaillierte Kenntnisse über die

Auswirkungen der Grundwasseranreicherung. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass der Tagebau voranschreitet und die Sumpfungsziele entsprechend variieren.

Die behördliche Regionalplanung hat Ziele vorgegeben, die mit der Grundwasseranreicherung eingehalten werden müssen. Hierbei werden keine Mindestwasserstände vorgegeben, maßgeblich ist vielmehr der Erhalt intakter Feuchtgebiete. Dafür dürfen die Grundwasserstände zwar weder zu hoch noch zu niedrig sein, müssen aber dennoch charakteristische jahreszeitliche und klimatische Variationen erfahren. Gleichzeitig wird gefordert, dass möglichst wenig Infiltrationswasser unmittelbar in die Wurzelzone der Feuchtgebietsvegetation gelangt.

Zur Beurteilung der Grundwasserstände werden statistische Ganglinienanalysen (z. B. Wiener-Filter-Analyse) und ein revierweites Grundwassermodell eingesetzt. Mittels Kriging mit Externer Drift werden die Ergebnisse der Ganglinienanalysen mit den Modellergebnissen kombiniert. Dadurch entsteht ein schlüssiges Bild des Sumpfungseinflusses (Abbildung), das mindestens 2 mal pro Jahr aktualisiert wird und wichtige Hinweise zur Feinsteuerung der Grundwasseranreicherung gibt. Die Karte zeigt erwartungsgemäß die höchsten Absenkungsbeträge in der Umgebung des Tagebaus; sie zeigt aber auch, dass die Absenkung in Richtung Nordwesten von einer Reihe Infiltrationsanlagen begrenzt wird und lokal Aufhöhung des Grundwasserstands festzustellen sind.

Weiterhin wird die Qualität des Grundwassers überwacht und die Ausbreitung des Infiltrationswassers im Untergrund ermittelt.

Nach dem voraussichtlichen Ende der Kohleförderung im Jahr 2030 wird noch eine begrenzte Zeit Sumpfungswasser zur Verfügung stehen. Die Grundwasseranreicherung wird jedoch bis zum vollendeten Grundwasserwiederanstieg fortgesetzt werden – auch um die Wiederauffüllung der Grundwasserleiter und eines Tagebausees zu beschleunigen. Es ist geplant, den Wasserbedarf durch die Entnahme von Rheinwasser zu decken.

Mit diesem Thema befasst sich auch die Exkursion „Grundwasseranreicherung im Nordraum“.

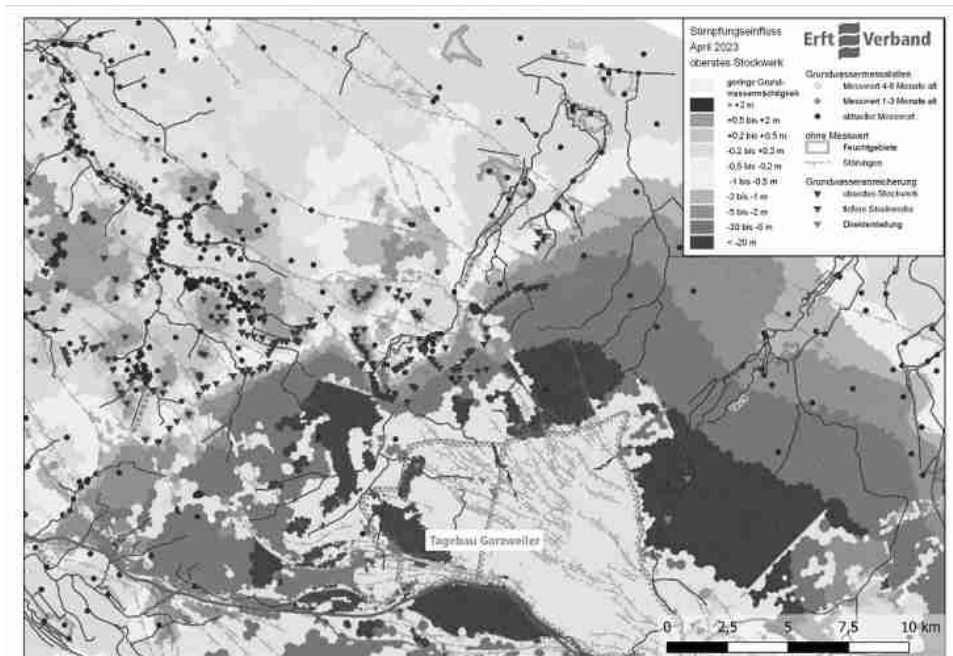


Abb. 1: Sümpfungseinfluß des Tagebaus Garzweiler.

Vortrag 18.2 (ID 152)

Development of a water storage toolbox for surface-induced managed groundwater recharge

Jan Stautzebach, Jörg Steidl, Christoph Merz

Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., Deutschland

Kontakt: Jan.Stautzebach@zalf.de

Water stress is increasing in Northeast Germany due to climate change. New approaches for water management are needed to mitigate the impacts on the water system and water users. Therefore, our study deals with the development of a web-based toolbox for subsurface water storage with focus on the lower catchment of the river Spree in the federal state of Brandenburg.

Our approach is based on a systematic combination of site selection criteria and spatial data on land use, soil, groundwater and potential water sources. This will provide relevant information for the preliminary planning of managed groundwater recharge measures by authorities and water suppliers. Considering surpluses from runoff and surface waters, also

caused by extreme weather events, suitable locations for surface-induced recharge will be identified.

Supported by additional modelling-based indications for implementation, efficiency and costs, as well as simplified site selection through a query system, the toolbox will offer an initial knowledge for such planning considerations.

Vortrag 18.3 (ID 235)

Assessment of suitability and feasibility of Managed Aquifer recharge based on qualitative methods coupled with a sensitivity analysis of a numerical model

Joanna Doummar¹, Ahmad Ezz Al-Dine¹, Thomas Reimann², Marcus Genzel², Alireza Kavousi²

¹: Department of Earth Sciences, American University of Beirut, Lebanon

²: Institute for Groundwater Management, Environmental Sciences, TU Dresden, Dresden, Germany

Kontakt: jd31@aub.edu.lb

Managed Aquifer Recharge (MAR) feasibility and suitability assessments for the fluvio-deltaic aquifer of the Upper Litani Basin in Lebanon was carried out using a Geographic Information System based Multi-criteria Decision Analysis (GIS-MCDA) coupled with integrated numerical modeling (MikeShe,2016). Criteria selected to delineate feasible and suitable zones were either obtained from previous research (slope, soil, vegetation) or from the model as input and output data (aquifer transmissivity and storativity, total recharge, delta head, drainage network, and groundwater flow rate). Two types of suitability sensitivity analysis were used: (1) the MCDA to generate weighting schemes and suitability maps for several criteria groups and (2) the MikeShe Autocal sensitivity tool to validate and refine the MCDA weights for four quantitative criteria (soil, vegetation, transmissivity and storativity). The MCDA approach shows that two thirds of the basin is considered moderately suitable and moderately feasible with less than 7% classified of low suitability and feasibility degree, and its corresponding sensitivity analysis unraveled that storativity and vegetation are the most and least sensitive factors consecutively. In addition, the Autocal sensitivity tool revealed that storativity is the highest MAR suitability contributing parameter (49%) while vegetation is the lowest (10%). While previous research has primarily relied on weights calculated using MCA only, this paper offers a standard relative weighting scale which could benefit future MAR suitability-related studies.

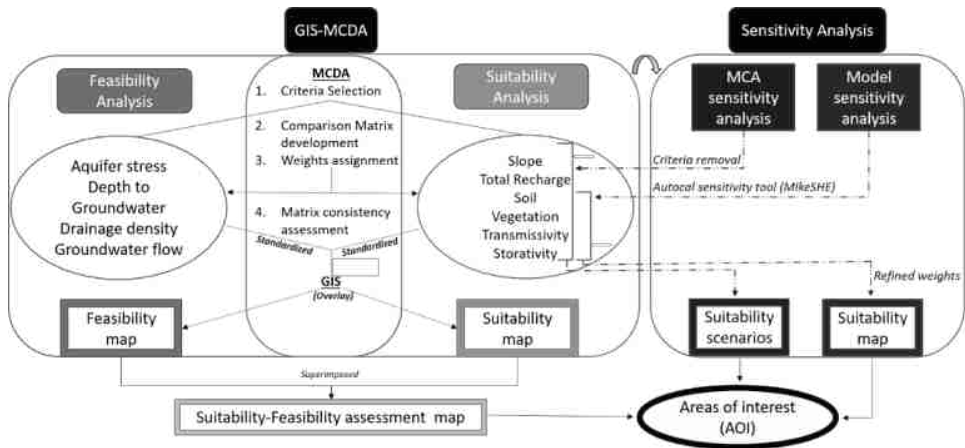


Abb. 1: Assessment of suitability and feasibility of Managed Aquifer recharge based on qualitative methods coupled with a sensitivity analysis of a numerical model.

Vortrag 18.4 (ID 289)

Die Grundwassermodellierungsplattform INOWAS: Webbasierte Werkzeuge für die Risikobewertung von bewirtschafteten Grundwasseranreicherungsstandorten

Catalin Stefan¹, Jana Glass¹, Christoph Sprenger², Ralf Junghanns¹

¹: Technische Universität Dresden

²: Kompetenzzentrum Wasser Berlin

Kontakt: jana.glass@tu-dresden.de

Trotz der finanziellen und ökologischen Vorteile der kontrollierten Anreicherung von Grundwasserleitern (MAR) als praktikable Lösung für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Wasserressourcen, ist ihr Beitrag zur sicheren Wasserversorgung auf globaler Ebene noch begrenzt. Dies liegt vor allem an fehlenden Daten zu den technologischen Kosten, den hydrogeologischen Standortmerkmalen, dem Fehlen nationaler Vorschriften und den damit verbundenen Betriebsrisiken wie der unvorhersehbaren Qualität und Quantität des angereicherten und gewonnenen Wassers. Eine ordnungsgemäße Überwachung von MAR-Anlagen in Kombination mit einer simulationsgestützten Optimierung kann die mit der MAR-Implementierung verbundenen Risiken besser beschreiben, die Optimierung des Betriebsmanagements unterstützen und damit das Vertrauen der Öffentlichkeit stärken.

Die INOWAS-Plattform (eine Zusammenstellung kostenloser webbasierter empirischer, analytischer und numerischer Simulationswerkzeuge für die Grundwasserbewirtschaftung

- www.inowas.com) wurde mit Echtzeit-Überwachung und -Modellierung sowie Risikobewertungswerkzeugen erweitert, um die Leistung von MAR-Systemen zu optimieren und gleichzeitig wirtschaftlichen und ökologischen Zwängen gerecht zu werden. Der Ansatz basiert auf der Aufrüstung konventioneller Überwachungssysteme mit Echtzeit-Umweltsensoren zur hochauflösenden räumlichen und zeitlichen Charakterisierung von Prozessen, die an MAR-Standorten stattfinden. Es wurde ein maßgeschneidertes Protokoll entwickelt, um Sensordaten aus verschiedenen Quellen zu nutzen und diese in die INOWAS-Plattform zu importieren, wo sie automatisch für die weitere Verwendung in Modellierungswerkzeugen verarbeitet werden können. Diese Werkzeuge umfassen die Bewertung der Grundwasserresidentzeit während der unterirdischen Passage zwischen Anreicherungs- und Entnahmestelle unter Verwendung saisonaler Temperaturschwankungen in Anreicherungsbecken und Entnahmefrühen. Im Zusammenhang mit MAR ist die Verweildauer im Untergrund ein entscheidender Indikator für die Abschwächung von hygienischen Parametern und anderen unerwünschten Substanzen. Zusätzlich hilft das Tool zur quantitativen mikrobiellen Risikobewertung (QMRA) das Kontaminationsrisiko für den Endnutzer durch Krankheitserreger in Abhängigkeit von den standortspezifischen Behandlungsschritten auf der Grundlage einer probabilistischen Risikobewertung abzuschätzen.

Numerische Modelle werden häufig für die Planung, Optimierung und Bewertung von MAR-Anlagen verwendet, aber eine optimale Nutzung der Modellierungsergebnisse wird dadurch behindert, dass die Modelle nicht häufig aktualisiert und mit aktuellen Beobachtungsdaten verglichen werden. Auf der INOWAS-Plattform wurden weitere Werkzeuge für die Integration von Echtzeit-Beobachtungsdaten in den webbasierten Modellierungsrahmen entwickelt, um die schnelle Integration von Daten in die Simulationen zu ermöglichen. Ein Szenario-Manager ermöglicht den einfachen Vergleich verschiedener Modellläufe und fördert die wissenschaftlich fundierte Entscheidungsfindung der Beteiligten.

Die webbasierten Werkzeuge bieten einfach zu bedienende Instrumente zur Verringerung der mit MAR-Anlagen verbundenen Risiken, wodurch diese besser kontrollier- und steuerbar werden sowie die gesellschaftliche Akzeptanz gefördert wird.

Role of Soil Biofilms in Clogging and Fate of Pharmaceuticals: A Laboratory-Scale Column Experiment

*Edinsson Muñoz-Vega¹, Stephan Schulz¹, Paula Rodriguez-Escales²,
Alexander L. Vogel³, Xavier Sanchez-Vila², Christoph Schüth¹*

¹: Technische Universität Darmstadt, Germany

²: Universitat Politècnica Catalunya, Spain

³: Goethe Universität Frankfurt am Main, Germany

Kontakt: edinsson.munoz@tu-darmstadt.de

Contamination of groundwater with pharmaceutical active compounds (PhACs) increased over the last decades. Potential pathways of PhACs to groundwater include techniques such as irrigation, managed aquifer recharge, or bank filtration as well as natural processes such as losing streams of PhACs-loaded source waters. Usually, these systems are characterized by redox-active zones, where microorganisms grow and become immobilized by the formation of biofilms, structures that colonize the pore space and decrease the infiltration capacities, a phenomenon known as bioclogging. The goal of this work is to gain a deeper understanding of the influence of soil biofilms on hydraulic conductivity reduction and the fate of PhACs in the subsurface. For this purpose, we selected three PhACs with different physicochemical properties (carbamazepine, diclofenac, and metoprolol) and performed batch and column experiments using a natural soil, as it is and with the organic matter removed, under different biological conditions. We observed enhanced sorption and biodegradation for all PhACs in the system with higher biological activity. Bioclogging was more prevalent in the absence of organic matter. Our results differ from works using artificial porous media and thus reveal the importance of utilizing natural soils with organic matter in studies designed to assess the role of soil biofilms in bioclogging and the fate of PhACs in soils.

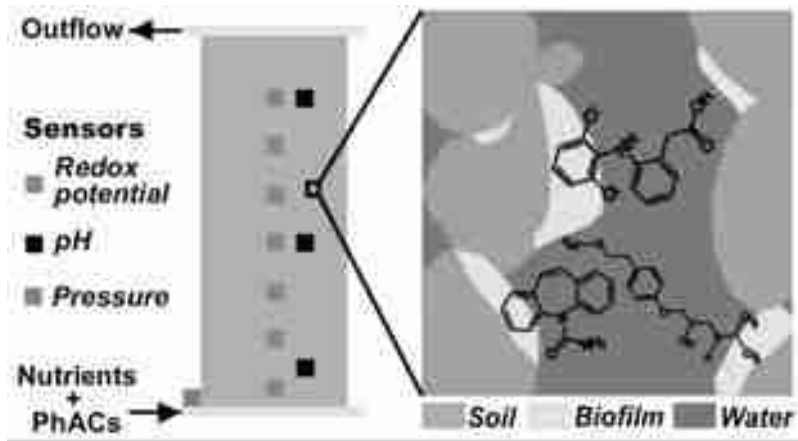


Abb. 1: Laboratory-Scale Column Experiment.

Vortrag 18.6 (ID 314)

Experimental tank facility to study mixing and transformation processes of treated wastewater effluent and groundwater during MAR operations

Marcel Horovitz^{1,2}, Edinsson Muñoz-Vega², Teresa Leitão¹, Christoph Schüth², Stephan Schulz²

¹: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Hydraulics and Environment Department, Water Resources and Hydraulic Structures Unit, Avenida do Brasil 101, 1700-066 Lisbon, Portugal

²: Technical University of Darmstadt, Institute of Applied Geosciences, Hydrogeology Group, Schnittspahnstraße 9, 64287 Darmstadt, Germany

Kontakt: mhorovitz@lnec.pt

Groundwater table depletion and water scarcity are a rising concern worldwide. One of the possibilities to address these concerns is managed aquifer recharge (MAR) using unconventional water sources like treated wastewater (TWW) effluent. Yet, the risk to deteriorate the groundwater quality by compounds still present in TWW should be addressed, namely nutrients (e.g., N and P) and emerging organic compounds (e.g., pharmaceuticals), as well as the risk of mobilizing trace metals from the aquifer materials (e.g., As, U). Many of the associated processes are dependent on the oxidation-reduction potential (ORP) conditions in the aquifer. Due to infiltration of TWW and successive mixing with the groundwater the conditions of the local aquifer are expected to change.

While column studies are widely used in MAR research to describe changes of ORP and associated transformation processes, they have the limitation of being one-dimensional and mostly using only one water source. In contrast, tank experiments make it possible to study processes in two dimensions. However, there are few large-scale tank facilities on MAR focused on water quality which commonly also use only one water source. Therefore, we designed and constructed an experimental sand tank facility to study the associated mixing processes of TWW and groundwater. The tanks have the unique feature of a continuous flowing groundwater in the saturated zone and an unsaturated zone for periodically infiltration of TWW.

The facility consists of three tank replicates to study degradation/transformation and sorption under natural conditions as well as modified regimes, e.g., by incorporating reactive layers. The tanks in shape of an “L” are approx. 3 m long, 0.5 m wide, and 1m in height except for the infiltration zone which is 2.5 m in height. To reduce boundary effects, the wall material of the tanks is HDPE. For water sampling the tanks are equipped with suction cups and small-diameter wells. The ORP is measured continuously in-situ via high-resolution ORP probes to capture the mixing zone and changing conditions along the flow path. Additionally, various sensors (soil moisture content and water pressure) are installed for the purpose of parameter optimization during numerical flow and transport modelling.

As proof of concept, we conducted an experiment in one of the tanks to study the mixing and associated processes for different hydraulic gradients of the groundwater as well as infiltrating volumes of the TWW. The tank is packed with fine-medium sand. To study processes based on natural waters, the infiltrating feed water is a secondary TWW effluent from a Portuguese wastewater treatment plant, while the groundwater flowing continuously in the lower part of the tanks consists of local groundwater. Results will be presented on the mixing processes based on hydrochemistry, ORP and backed by numerical transport modelling as well as nitrate isotope signatures.

EU INTERREG Projekt Blue Transition – How to make my region climate resilient – Teilprojekt GE-2 – Geest Adaptation

*Eva González¹, Jennifer Bals¹, Bárbara Blanco Arrue², Jörg Elbracht¹,
Mike Müller-Petke²*

¹: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Deutschland

²: Leibniz Institut für Angewandte Geophysik

Kontakt: eva.gonzalez@lbeg.niedersachsen.de

Im Rahmen des EU-Interreg Projektes Blue Transition wird ein systemischer Wandel durch ein integriertes Wasser- und Bodenmanagement angestrebt. Dazu werden im Teilprojekt GE-2 am Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) im Bereich der Bederkesaer Geest und des Gnarrenburger Moores die Auswirkungen unterschiedlicher künstlicher (Grund-)Wasseranreicherungs-Maßnahmen getestet. Zusätzlich wird die zukünftige Entwicklung des Grundwasserhaushaltes unter Verwendung unterschiedlicher Klimaszenarien des niedersächsischen Klimaensembles mittels Grundwasserströmungsmodellierung abgebildet. Im Besonderen wird die Entwicklung der Wasserstände im Gnarrenburger Moor untersucht, ergänzend zu den bereits abgeschlossenen Untersuchungen zur Wiedervernässung von Kalinski et al. (2021, 2023).

Durch künstliche Grundwasseranreicherung in den Geestbereichen sollen für eine umweltverträgliche, wasserwirtschaftliche, sowie industrielle Nutzung zusätzliche Grundwasserressourcen geschaffen werden. Zudem soll dadurch eine laterale und vertikale Ausbreitung der tiefliegenden Grundwasserversalzung im Bereich Bremervörde-Minstedt verhindert werden. Durch die teilweise Wiedervernässung des Gnarrenburger Moores können nicht nur die CO₂-Emissionen gesenkt werden, sondern der Moorkörper selbst steht wieder als CO₂-Speicher zur Verfügung.

Für das gesamte Projektgebiet wird ein hydrogeologisches 3D-Modell und ein Modell der Grenzfläche Süß-/Salzwasser (Grenzwert 250 mg/L Chlorid) erstellt. Basis dafür sind Schichtverzeichnisse und geophysikalische Untersuchungen. Dazu gehören u. a. Aeroelektromagnetik-Daten, die durch die BGR zur Verfügung gestellt wurden (Siemon et al., 2022) und durch SkyTEM im Rahmen des Projektes erarbeitet werden. Durch das Leibniz Institut für Angewandte Geophysik werden einzelne Gebiete durch Geoelektrik, Georadar und Drohnen-EM erkundet.

Im Projekt Blue Transition werden in insgesamt 16 Pilotgebieten in Belgien, Frankreich, Dänemark, Deutschland, den Niederlanden und Schweden Strategien für die Land- und Wasserwirtschaft, sowie auch für Behörden entwickelt. Ziel ist eine Änderung der

Landnutzung z. B. von Mooren, um eine qualitative und quantitative Verbesserung der Ressource Grundwasser und des Bodens zu erreichen.

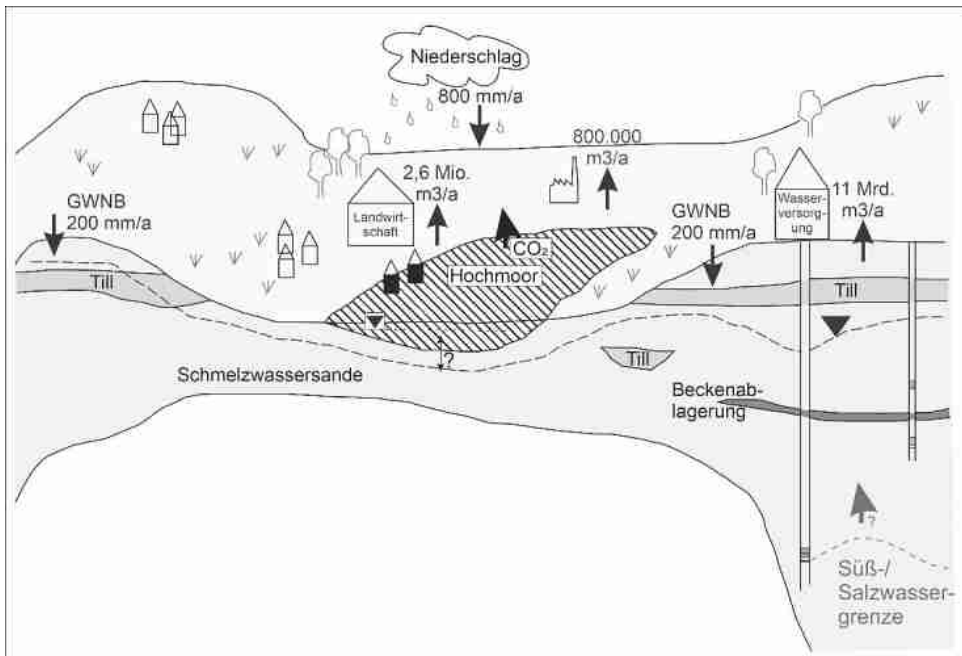


Abb.1: Schematische Darstellung des Wasserhaushaltes im Projektgebiet.

Siemon, B., Ibs- von Seth, M., Pielawa, J.: Gebietsbericht D-AERO-Moore HEM/HRD/HMG-Befliegung 196 Gnarrenburg, Hannover, 2023

Kalinski, K., Höper, H., Kruse-Dörgeloh, H., Lange, C., Schröder, U., Tegge, A., Vogel, I.: Modellprojekt „Gnarrenburger Moor“ – Abschlussbericht, Hannover, 2021

Kalinski, K., Höper, H., Bockelmann, J., Brümmer, C., Dettmann, U., Düvel, D., Kruse-Dörgeloh, H., Lange, G., Lübke, C., Meinardi, D., Offermanns, L., Röttcher, K., Rüffer, J., Schröder, U., Tiemeyer, B.: Abschlussbericht Modellprojekt Gnarrenburger Moor -Gebietskonzept und Wassermanagement & Unterflurbewässerung im Praxisversuch, Hannover, 2023

Bewertung der Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung aus Oberflächenwasserreservoirs in Indien mit hydrochemischen Indikatoren

Schmidt Isabelle¹, Paul Königer², Karthikeyan Brindha¹, Michael Schneider¹

¹: Freie Universität Berlin, Deutschland

²: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Kontakt: isabelle.schmidt@fu-berlin.de

In Indien ist Grundwasser die wichtigste Quelle für die ländliche Trinkwasserversorgung und spielt gleichzeitig eine entscheidende Rolle für die Sicherung der Ernährung von Millionen von Menschen durch die Bewässerung in der Landwirtschaft. Dennoch stellt die zunehmende Grundwasserentnahme in jüngster Zeit eine erhebliche Bedrohung für die nachhaltige Nutzung des Grundwassers dar, sodass Maßnahmen zur Sicherung der Wasserversorgung erforderlich sind. Eine der wichtigsten Strategien, um dem sinkenden Grundwasserspiegel entgegenzuwirken, ist die Ausweitung der Grundwasseranreicherung durch die Nutzung von sogenannten tanks, die als künstliche Oberflächengewässer angelegt wurden, um den Monsunabfluss für die Bewässerung während der Trockenzeit zu speichern. Die Forschung, die deren Einfluss auf die Grundwasserneubildung untersucht, konzentriert sich im Allgemeinen auf die Schwankungen des Grundwasserspiegels. Durch ausschließliche Betrachtung des Grundwasserspiegels könnte der Einfluss der tanks überschätzt werden. Dies liegt daran, dass ein Anstieg des Grundwasserspiegels auch durch eine geringere Grundwasserentnahme verursacht werden kann, da vermehrt das Oberflächenwasser für die Bewässerung eingesetzt wird.

Um die tatsächlichen Auswirkungen von tanks auf die Grundwasserneubildung besser einschätzen zu können, wird in dieser Studie die isotopische und hydrogeochemische Zusammensetzung von Oberflächen- und Grundwasser aus offenen Brunnen und Bohrbrunnen vor und nach dem Monsun in einem Gebiet mit bestehender Bewässerung durch tanks untersucht und mit einem Gebiet ohne tanks verglichen. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die tanks einen Einfluss auf die lokale Grundwasserneubildung haben und die Qualität des Grundwassers beeinträchtigen.

19 Brunnen und Quelfassungen – Anforderungen, Untersuchungsmethoden, Erfahrungen

22.03.2024, 15:30 - 17:00, Konferenzraum 2

Uwe Hekel (HPC AG)

Renard Prevoo (Watermaatschappij Limburg)

Vortrag 19.1 (ID 124)

Die Skin-Schicht in Brunnen - Entstehung, Beschaffenheit und Bedeutung für die Hydraulik

Georg J. Houben

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Deutschland

Kontakt: georg.houben@bgr.de

Die Skin-Schicht ist ein wichtige, aber kaum bekannte und noch weniger untersuchte Größe in der Hydraulik von Brunnen. Es handelt sich dabei um einen geringmächtigen, aber aufgrund seiner Feinkörnigkeit schwach durchlässigen Filterkuchen, der sich beim Bohrprozess an der Bohrlochwand bildet. Er kann aus künstlich zugegebene Spülszusätzen (Bentonit, CMC), aber auch aus aufgenommenen Feinmaterial (z. B. Ton, Silt, Kohle) aus den durchteuften Schichten bestehen (bzw. einer Kombination von beidem).

Beim Bohren ist die Anwesenheit der Skin-Schicht wünschenswert, da sie Verluste der Bohrspülung in das umgebende Gebirge verringert und somit das Bohrloch stabilisiert. Wenn sie bei der Brunnenentwicklung nicht entfernt wird, kann sie im späteren Brunnenbetrieb aufgrund der geringen Durchlässigkeit jedoch größere Eintrittsverluste verursachen, da sie die Bohrlochwand abdeckt und das gesamte eintretende Wasser sie passieren muss. Die zusätzlichen Verluste machen sich als erhöhte Absenkung bemerkbar, was höhere Förderkosten verursacht (verringerte Energieeffizienz).

Zwar wird die Skin-Schicht sehr häufig in der Literatur diskutiert, es fehlt aber an echten Daten zu ihrer Typologie, Mächtigkeit, Zusammensetzung und besonders der hydraulischen Durchlässigkeit, da sie kaum zu erreichen ist. Eine der wenigen, aber bisher nicht

genutzten Möglichkeiten die Skin-Schicht zu beproben ergibt sich in Tagebauen, wo die fortschreitende Abbaufont die Entwässerungsbrunnen im Vorfeld nach einigen Jahren freilegt. Daher wurde die Skin-Schicht solcher Brunnen aus Tagebauen im Rheinischen Braunkohlenrevier und in der Lausitz beprobt und detailliert hinsichtlich der Zusammensetzung und der hydraulischen Wirkung untersucht. Damit stehen erstmals quantitative Daten zur Skin-Schicht zur Verfügung, die für zukünftige Modellierungen der Brunnenhydraulik wichtig sind.

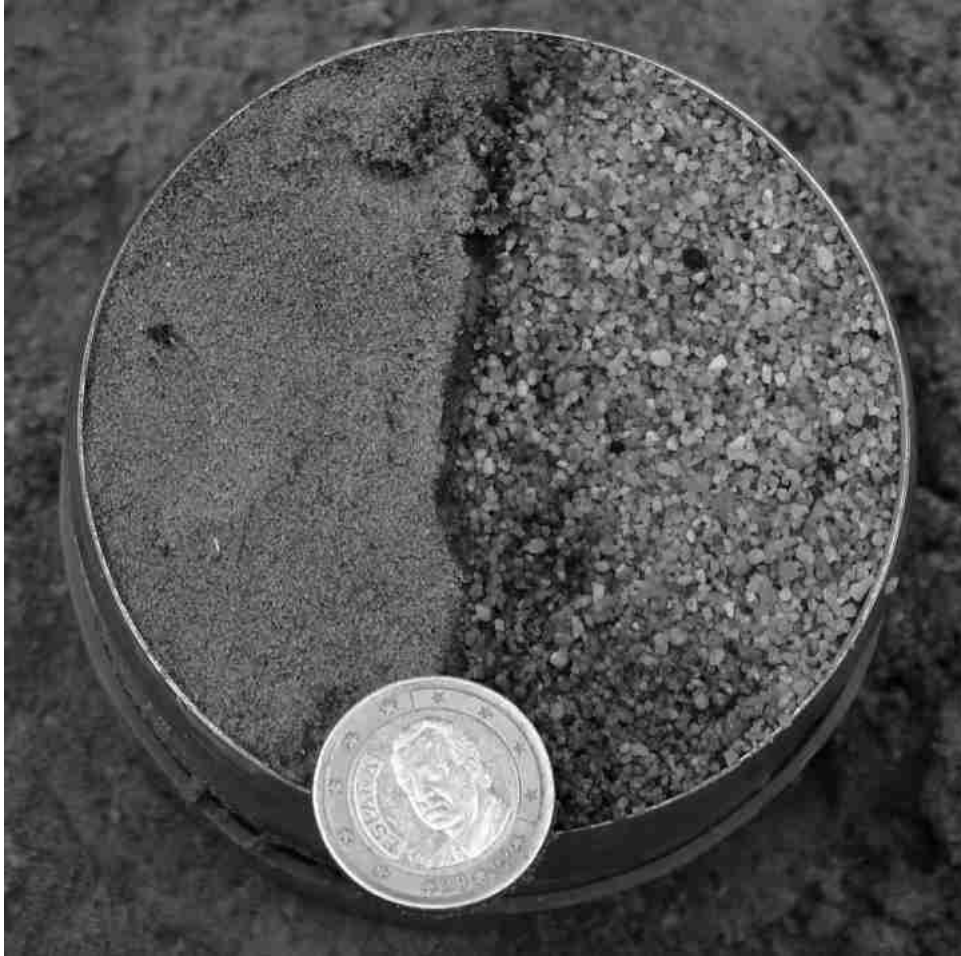


Abb. 1: Probe der Bohrlochwand eines überbagerten Brunnens aus dem Rheinland. Links: Grundwasserleiter, rechts: Filterkies. Die Skin-Schicht ist als dunkles Band dazwischen erkennbar.

Vortrag 19.2 (ID 316)

Detection of faecal contamination sources in groundwater wells with molecular biological techniques: case Roodborn

Martin van der Schans¹, Renard Prevoo²

¹: KWR water research institute

²: Watermaatschappij Limburg

Kontakt: martin.van.der.schans@kwrwater.nl

In recent years, various molecular biological techniques have been developed to identify and characterize faecal pollution sources. The aim of this research was to determine whether two of these techniques, MST-qPCR and MST-NGS, can be used in combination with chemical tracers in groundwater extraction.

Relevance

The monitoring of the microbiological safety of groundwater abstractions is currently based on a limited group of cultivable indicator organisms such as *E. coli*. In order to detect faecal sources of contamination, alternative molecular methods have been developed over the past decade that make use of other faecal indicator organisms that occur in higher concentrations in contamination sources. This increases the chance of being caught. These methods also provide additional information about the source of infection and are therefore referred to as "microbial source tracking" (MST). This research focuses on qPCR and next generation sequencing (NGS). So far, both MST methods have mainly been tested on surface water and dune water extractions.

Methods

For this study, water quality samples were taken from contaminated wells, non-contaminated wells (collectively referred to as "Sinks") and various sources around the extraction including surface water, sewerage, WWTP and observation wells in nature and agricultural areas (referred to as "Sources"). The samples were analyzed for chemical parameters (nutrients, macro-ions, trace metals, organic micropollutants), traditional faecal indicator organisms (such as *E. coli*) and molecular biological parameters (qPCR on humans, dogs, ruminants, birds and pigs DNA markers and with next generation sequencing). Subsequently, the contribution of the Sources to the Sinks was determined by analysis of the mixing ratios.

Results

Natural tracers (bromide/chloride ratio) and an earlier artificial tracer test showed that the minimum travel time from the stream bank to one of the extraction wells was only a few

days, due to the occurrence of preferential flow paths in the limestone. The MST-qPCR and MST-NGS showed that a number of extraction wells contained humanly contaminated water from the neighboring stream (the Eijserbeek). The stream, in turn, is fed by a combination of WWTP effluent, sewage overflows and runoff of animal faeces from the ground level around the stream. The MST-NGS results indicate that more wells in Roodborn sewage contain bacteria than appears on the basis of the traditional indicator organisms that WML (and other water companies) regularly measure. The measurements do not rule out the possibility that contamination also occurs from other sources.

Potentials

The MST methods provided an enrichment compared to the information obtained from the artificial and natural chemical tracers. Together, they can therefore be used to detect faecal contamination sources around groundwater extractions. The natural chemical tracers mainly provided insight into the origin of the total amount of groundwater extracted. The molecular MST methods mainly provided insight into which sources are likely to make a major contribution to the population of microorganisms.

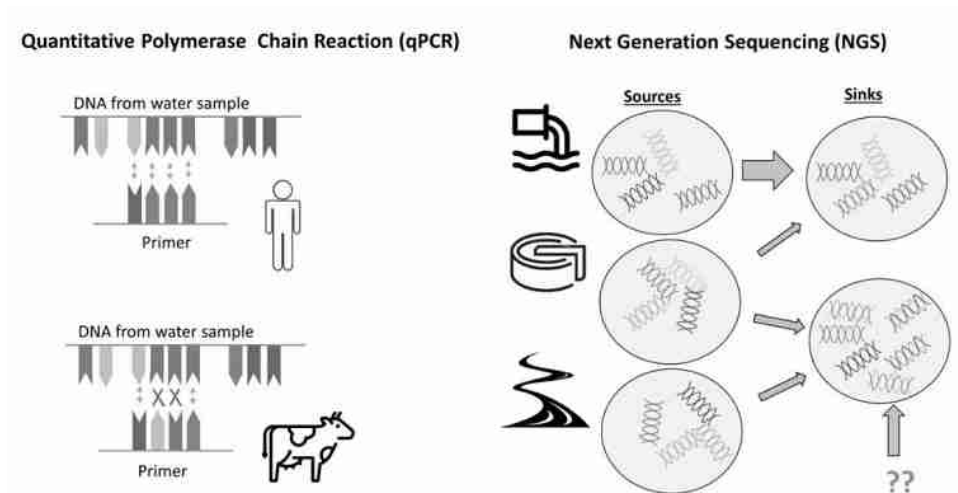


Abb. 1: Microbial Source Tracking (MST).

Vortrag 19.3 (ID 330)

Rückspülung eines Schluckbrunnens in der ungesättigten Zone

Fritz Kalwa^{1,2}

¹: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Deutschland

²: Institut für Grundwasserwirtschaft, Technische Universität Dresden, Deutschland

Kontakt: fritz.kalwa@bgr.de

Schluckbrunnen stellen seit Jahrzehnten eine der hydraulisch effizientesten Lösungen dar, um Regenwasser von der Oberfläche abzuführen und mit möglichst geringem Flächenbedarf in kurzer Zeit in den Untergrund zu verbringen. Insbesondere das Konzept des Aquifer Storage and Recovery (ASR) erfreut sich in weiten Teilen der Welt großer Beliebtheit, weil durch den Wechsel zwischen Infiltrations- und Pumpphase der Kolmation des Brunnens durch eingebrachte Trübstoffe entgegengewirkt wird. In Deutschland allerdings ist die direkte Einspeisung von Regenwasser ins Grundwasser untersagt. DWA-A 138 schreibt einen Abstand der Unterkante jeglicher Infiltrationseinheit von mindestens einem Meter vor. Dementsprechend können Schluckbrunnen für Regenwasser nur in der ungesättigten Zone verfiltert werden, wo eine Rückspülung bisher nicht möglich war, womit auch ein großer Teil anderer Regenerierungsmethoden (Ultraschall, chemische Hilfsstoffe) verunmöglicht wird. Kolmatisiert ein solcher Brunnen, ist er in der Regel nicht mehr regenerierbar.

In diesem Vortrag wird eine Methode zur Rückspülung eines Brunnens in der ungesättigten Zone und ihre Erprobung auf Technikumskala vorgestellt. Hierbei wird ein bestimmter Abschnitt der Filterstrecke isoliert. Oberhalb wird Wasser infiltriert, und nach Aufsättigung des Porenraums in Filternähe wird schlagartig ein Unterdruck aus einem Vorratsbehälter auf den isolierten Filterbereich appliziert. Der Vorgang wird mehrmals wiederholt, wobei das dem Brunnen zufließende Wasser sich im Vorratsbehälter sammelt, welcher vor jedem Durchgang geleert und mit Unterdruck (-0.7 - -0.8 bar) versehen wird.

Das Verfahren wurde an Brunnenmodellen mit und ohne Kiesschüttung und einem Brunnenrohr mit 2“ (50.8 mm) Durchmesser erprobt. Es stellte sich heraus, dass die Methode an Brunnen ohne Filterkiesschüttung keine nachhaltige Regenerierung ermöglichte. Stattdessen nahm die Infiltrationsleistung im Laufe von zehn Verblockung-Rückspülungs-Zyklen kontinuierlich ab. Die Brunnen mit Kiesschüttung hingegen zeigten zwar bereits nach der ersten Rückspülung nur eine Wiederherstellung von 40-50% der initialen Infiltrationsleistung. Diese konnten jedoch auch in den darauffolgenden neun Verblockung-Rückspülungs-Zyklen weitgehend stabil wiederhergestellt werden.

Vortrag 19.4 (ID 283)

Einblicke in die Sanierung von Quelfassungen

Freya Fünfgeld, Uwe Hekel

HPC AG, Niederlassung Rottenburg am Neckar

Kontakt: uwe.hekel@hpc.ag

Neben Brunnen sind Quelfassungen die wichtigsten Bauwerke zur Grundwassererschließung. Da Aufgrabungen von Quellen jedoch eher selten sind, haben selbst erfahrene Hydrogeolog:innen kaum Einblicke in den Aufbau von Quelfassungen.

Anhand eines Praxisbeispiels aus dem Nordschwarzwald werden Untersuchungen zur Feststellung des Sanierungsbedarfes, die Erfordernisse der Genehmigungsplanung sowie der schrittweise Aufbau einer Quelfassung nach der Technischen Regel DVGW W127 vorgestellt.

Feststellung des Sanierungsbedarfes

Bei fachtechnisch korrekter Ausführung und regelmäßigen Unterhaltsmaßnahmen sind Quelfassungen langlebige Bauwerke zur Wassergewinnung. Allerdings lassen viele Quellenbetreiber häufig aus Unkenntnis ihren Quelfassungen nicht das notwendige Maß an Kontrolle und Pflege zukommen. Besonders sichtbar wird dies, wenn das Umfeld einer Quelfassung einen tiefwurzenden Baumbestand aufweist.

Spätestens beim Rückgang der Quellschüttung oder beim Auftreten von Eintrübungen und Keimbelastungen werden ein akuter Untersuchungs- und Handlungsbedarf deutlich. Für ein zielgerichtetes Vorgehen ist ein grundlegendes Verständnis des Aquifersystems und der Quelfassung erforderlich. Dazu gehören u. a. die Kenntnis des Einzugsgebiets und die Differenzierung unterschiedlich schneller Abflusskomponenten anhand von Schüttungsmessungen. Falls keine technischen Zeichnungen der Quelfassung vorhanden sind, müssen die Ablauf- und Fassungsleitungen geortet werden. Untersuchungen wie Kamerabefahrungen oder Tracergasmessungen geben Aufschluss über den Zustand der Leitungen und der Oberflächenabdichtung.

Hieraus ist eine Vorstellung zu möglichen Ursachen für den Rückgang des Wasserdargebots oder den Eintrag von Verunreinigungen zu entwickeln. Abhängig von den Ergebnissen der Voruntersuchungen ergibt sich ein Sanierungsbedarf der Quelfassung, der Rohrleitungen, des Quellsammelbehälters oder der gesamten Anlage.

Genehmigungsplanung

Die Aufgrabung und Fassung eines Quellaustritts sowie die Nutzung des Quellwassers für die Wasserversorgung stellen meist einen gravierenden Eingriff in das Ökosystem und den

Wasserhaushalt dar. Häufig sind geschützte Feuchtbiotope mit entsprechenden Tier- und Pflanzenarten auf das Quellwasser angewiesen. Im Genehmigungsverfahren für den Bau und die Nutzung von Quelfassungen sind daher neben einem hydrogeologischen Gutachten auch eine detaillierte Bauplanung sowie eine Umweltverträglichkeitsprüfung erforderlich.

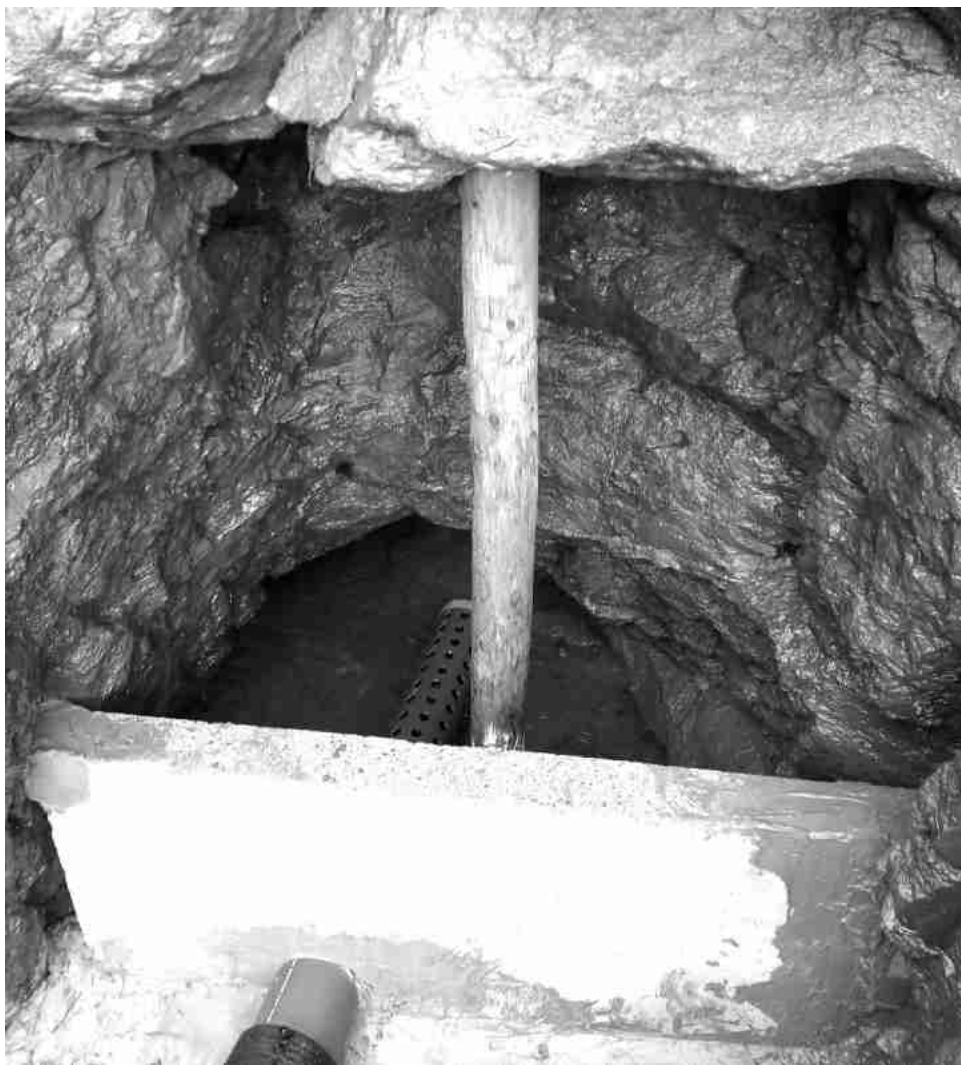


Abb. 1: Fassung einer Kluftquelle im Buntsandstein (Foto: HPC AG)

Sanierung

Nach der Aufgrabung und dem Rückbau der Quelfassung werden die freigelegten Wasserzutritte eingemessen und untersucht. Dabei zeigen sich häufig oberflächennahe Zutritte

mit geringerer Mineralisierung, die in Abwehrfassungen oder Drainagen gefasst und abgeleitet werden. Die Wasserzutritte, die genutzt werden sollen, müssen fachgerecht gefasst werden. Fehler beim Aufbau einer Quelfassung, z. B. bei der Auswahl von Materialien und Körnungen oder bei der Anordnung von Dränagen und Abdichtungen, führen häufig zu Einbußen bei der Standzeit der Fassungsanlage und der Wasserqualität. Die fachgerechte Ausführung der Quellensanierung erfordert daher eine gut abgestimmte Zusammenarbeit einer erfahrenen Wasserbaufirma und eines Fachgutachters für die hydrogeologischen, technischen und ökologischen Belange des Quellenbaus.

Vortrag 19.5 (ID 201)

Erfahrungen eines Wasserversorgers beim Aufbau eines Alterungsmodells für Förderbrunnen basierend auf Methoden des Maschinellen Lernens

Siri Hoppenau¹, Karen Hüske¹, Mathias Riechel²

¹: Oldenburgisch-Ostfriesischer Wasserverband (OOWV), Georgstraße 4, 26919 Brake

²: Fichtner Water & Transportation GmbH, Franklinstr. 26a, 10587 Berlin

Kontakt: hoppenau@oowv.de

Als größter Flächenversorger Deutschlands betreibt der Oldenburgisch-Ostfriesische Wasserverband (OOWV) 15 Wasserwerke mit insgesamt über 260 Förderbrunnen, um die Trinkwasserversorgung von über einer Million Menschen sicherzustellen. Alterungsprozesse innerhalb der Förderbrunnen wie z. B. Eisenverockerung führen mit der Zeit zu einer Verschlechterung der Leistungsfähigkeit und können infolgedessen zu höheren Kosten oder sogar Einschränkungen in der Trinkwasserversorgung führen.

Um diesen Alterungsprozessen mit geeigneten Maßnahmen wie Regenerierungen oder Sanierungen entgegenwirken zu können, ist es wichtig den Zustand einzelner Brunnen möglichst gut zu verstehen und auch prognostizieren zu können. Da keine kontinuierliche Erfassung des Brunnenzustandes stattfinden kann und eine Vielzahl an Einflussfaktoren für die Alterungsprozesse eine Rolle spielen, ist eine Prognose der Entwicklung nur mit Hilfe von Modellen möglich. Im Rahmen des EU-Projektes Digital Water City wurden durch das Kompetenzzentrum Wasser Berlin (KWB) bereits verschiedene Modellansätze des maschinellen Lernens entwickelt und für die Stadt Berlin getestet. In einem gemeinsamen Projekt zwischen dem OOWV, dem KWB und Fichtner IT Consulting GmbH (FIT) wurden diese Ansätze auf die Brunnen des OOWV übertragen und weiterentwickelt.

Im ersten Schritt wurde durch den OOWV eine umfangreiche Datenrecherche und -aufbereitung durchgeführt. Dabei wurde ein Datensatz aus über 3000 Messdaten zur Leistungs-

fähigkeit der Brunnen sowie über 30 verschiedenen baulichen, betrieblichen, chemischen und standortbezogenen Brunneneigenschaften wie z. B. Alter, Filtertiefe oder Eisengehalt der Brunnen erarbeitet. Damit wurde die Möglichkeit geschaffen, Daten z. B. brunnenspezifisch, oder wasserwerksübergreifend systematisch auszuwerten.

Die durch den OOWV aufbereitenden Daten wurden durch FIT hinsichtlich ihres Einflusses auf die Ergiebigkeit der Brunnen untersucht. Dabei wurde deutlich, dass neben dem Brunnenalter sowohl betriebliche Größen wie die tägliche Brunnenlaufzeit, als auch die Wasserqualität einen Einfluss auf die Ergiebigkeit haben.

Für die Prognose der relativen Ergiebigkeiten wurden verschiedene Modellansätze wie multivariate Regressionsmethoden, baumbasierte Ensemble-Modelle und künstliche neuronale Netze untersucht. Als besonders genau wurde ein baumbasiertes-Ensemble-Modell („Gradient Boosting“) identifiziert, das die relative Ergiebigkeit der Brunnen mit einem mittleren Fehler von $\pm 5\%$ vorhersagen und bei knapp 9 von 10 Brunnen einen kritischen Leistungsrückgang von über 20% (DVGW Arbeitsblatt W130) korrekt klassifizieren kann. Mit dem Modell wurden Ergiebigkeitsprognosen bis zum Jahr 2050 für verschiedene Szenarien (keine bzw. regelmäßige Regenerierungen) erstellt.

Im nächsten Schritt sollen die Modellergebnisse beim OOWV verwendet werden, um verschiedene Fragestellungen des operativen Asset-Managements z. B. zur Optimierung der betrieblichen Kosten für die Regenerierung und Vorhersage der Brunnen-Lebenszykluskosten zu beantworten und die vorausschauende Planung von Regenerierungen und Sanierungen zu unterstützen. Auch sollen die Erkenntnisse aus dem Projekt zur Datenerhebung, Neubauplanung und zum Brunnenbetrieb weiter untersucht und in die Praxis übertragen werden. Das trainierte und validierte Modell liegt beim OOWV in der Programmiersprache R vor und kann somit neu trainiert, aber auch hinsichtlich der zu beantwortenden Fragestellungen weiterentwickelt werden.

Vortrag 19.6 (ID 319)

Erschließung ungenutzter Dargebotsreserven im Klimawandel durch Weiterentwicklung der Uferfiltration

Michael Stilling¹, Jörg Bork¹, Natalie Wick¹, Ronald Roepke¹, Christoph Schüth²

¹: Wasserversorgung Rheinhessen-Pfalz GmbH

²: Institut für Angewandte Geowissenschaften Darmstadt

Kontakt: m.stilling@wvr.de

Die Klimawandelfolgen sind bereits heute eine komplexe Herausforderung für die öffentliche Trinkwasserversorgung. Eine der Auswirkungen ist die regional unterschiedlich

starke Abnahme des nutzbaren Wasserdargebots (u. a. bei Niedrigwasser). Parallel wächst der Wasserbedarf durch die sozio-ökonomische und landwirtschaftliche Entwicklung vor allem während extremer Hitzeperioden. Der Handlungsspielraum von Wasserversorgungsunternehmen zur Resilienzsteigerung wird durch die Notwendigkeit einer nachhaltigen Anpassung und durch sich verschärfende Raum- und Nutzungskonflikte weiter eingeengt. In diesem Spannungsfeld rücken bisher wasserwirtschaftlich nicht nutzbare Dargebotsreserven in den Fokus.

Vor diesem Hintergrund wurde bei der Wasserversorgung Rheinhessen-Pfalz GmbH (wvr) das Konzept „Nordgalerie“ entwickelt, das neben der bestehenden Uferfiltratbrunnengalerie in Guntersblum eine zweite Gewinnung am Rhein, jedoch mit Schutzbrunnen- und Infiltrationskonzept vorsieht (Abbildung). Durch die Kombination verschiedener Bewirtschaftungssysteme greift die Nordgalerie die Methodik Sequential Managed Aquifer Recharge Technology (SMART) auf, welche bislang primär eine Verbesserung der Rohwasserqualität anstrebt, und entwickelt diese Gewinnungsform auch aus quantitativer und betrieblicher Sicht weiter.

Durch den Bau einer weiteren Uferfiltratbrunnengalerie wird unter anderem dem erhöhten Ausfallrisiko vulnerabler Gewinnungen (z. B. Quellen) im Klimawandel begegnet. Das Schutzbrunnenkonzept dient in erster Linie dem Schutz der Trinkwasserqualität bei Hochwasser, bei dem möglicherweise schadstoffbelastetes Infiltrat abgepumpt und in den Rhein abgegeben wird, bevor es die tieferen Uferfiltratbrunnen erreicht.

Aquifere in Gewässernähe sind wasserwirtschaftlich besonders ergiebig, werden jedoch unter anderem wegen sensibler Ökosysteme oft untergeordnet genutzt. Das Ziel der Nordgalerie ist daher eine nachhaltige Ressourcenbewirtschaftung zur Schaffung wasserwirtschaftlicher Redundanzen mit synergetischen Effekten (Naturschutz, Landwirtschaft). Hierfür wird neben der Uferfiltratgewinnung die Etablierung einer künstlichen Grundwasseranreicherung nach dem Prinzip Aquifer Storage, Transfer and Recovery (ASTR) sowie eine naturnahe Infiltration von Rheinwasser in einem überwiegend trocken gefallenem Rheinaltarm angestrebt. Dadurch wird eine Art Saisonalspeicher geschaffen, durch den trotz intensiver Förderung in sommerlichen Hitzephasen der Grundwasserspiegel stabilisiert, die Gewinnungskapazitäten aufrecht gehalten und Ökosysteme gestützt werden. Zudem könnte Wasser für landwirtschaftliche Zwecke bereitgestellt werden.

Die Nordgalerie trägt als Bestandteil eines nachhaltigen Gebietswassermanagements zur Lösung von Klimawandel getriebener Wassernutzungskonflikte bei und ist ein Beispiel für die Erschließung bisher wasserwirtschaftlich ungenutzter Dargebotsreserven in sensiblen Räumen. Über die Einbindung in ein angestrebtes, überregionales Verbundsystem wird die Grundlage einer interregionalen Mengenbereitstellung geschaffen. Damit leistet die wvr mit dem Konzept Nordgalerie einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Resilienz der

öffentlichen Trinkwasserversorgung in Rheinhessen, der Nord- und Vorderpfalz sowie zur Zielerreichung der Nationalen Wasserstrategie (2023) der Bundesrepublik Deutschland.

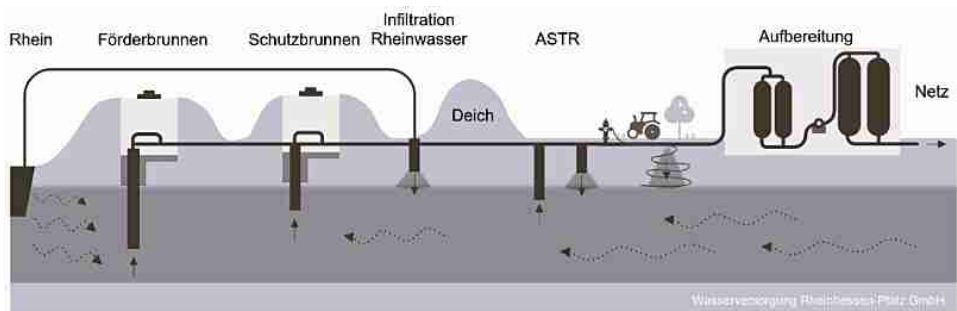


Abb. 1: Das Konzept der Nordgalerie nach dem Prinzip von SMART.

Poster 19.1 (ID 123)

Der Abnahmepumpversuch und die Bestimmung irregulärer Brunneneintrittsverluste

Christian Gillbricht

Kontakt: cagsoft@cagsoft.com

Mit dem Abnahmepumpversuch (Brunnentest) wird die Ergiebigkeit (Leistungscharakteristik) eines neu errichteten Brunnens geprüft. Hierzu ist ein Versuch mit mindestens drei Pumpstufen durchzuführen. Die manuelle Auswertung ist arbeitsaufwendig und daher unüblich. In der Auswertung mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen können lineare und nicht-lineare Brunneneintrittsverluste unterschieden werden. Unter Berücksichtigung der Bauform des Brunnens ist eine Unterscheidung zwischen regulären (erwartbaren) und irregulären (durch Baumängel bewirkten) Brunneneintrittsverlusten möglich. Dies erfordert neben der Analyse der Pumpversuchsdaten auch die davon unabhängige hydraulische Bewertung des Bauwerks.

Anhand eines Beispiels wird der Unterschied zwischen regulären und irregulären Brunneneintrittsverlusten erläutert und die Methodik der Auswertung eines Stufenpumpversuchs vorgestellt.

Außerdem wird auf Mängel im technischen Regelwerk hingewiesen.

Clark, L. (1977): The analysis and planning of step-drawdown tests.- Quarterly journal of engineering geology, 10: 125 - 143; London [DOI: 10.1144/GSL.QJEG.1977.010.02.03]

DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches) (Hrsg.) (2015): Pumpversuche bei der Wassererschließung. 2. Auflage.- DVGW-Arbeitsblatt W, 111: 42 S.; Bonn

Houben, G.J. & Kenrick, M.A.P. (2022): Step-drawdown tests: linear and nonlinear head loss components.- Hydrogeology journal, 30(4): 1315 - 1326; Berlin [DOI: 10.1007/s10040-022-02467-8]

Kruseman, G.P. & de Ridder, N.A. (1990): Analysis and evaluation of pumping test data. 2nd edition.- ILRI Publication, 47: 375 S.; Wageningen [ISBN: 90-70754-20-7]

Poster 19.2 (ID 157)

Bestimmung der Absenkreichweite eines Brunnens mit der Sichardt-Formel – Grenzen und Weiterentwicklung

Annika Desens^{1,2}, Georg Houben²

¹: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)

²: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Kontakt: annika.desens@nlwkn.niedersachsen.de

Die Absenkreichweite eines Brunnens ist eine für viele hydrogeologische Anwendungen wichtige, aber schwierig und oft ungenau zu bestimmender Größe. Daher werden häufig empirische Formeln genutzt, wobei die Formel von Sichardt im deutschen Sprachraum besonders oft angewendet wird.

Aufgrund des Alters der Sichardt-Methode ist wenig über ihre Anwendungsgrenzen bekannt. Mithilfe eines analytischen Modells der Brunnenzuströmung wurde daher zunächst festgestellt, in welchem Wertebereich die Sichardt-Formel die besten Ergebnisse liefert. Da Sichardt seine Methode anhand von zahlreichen Praxisversuchen an norddeutschen Lockergesteinen entwickelte, funktioniert sie vergleichsweise gut bei sandig-kiesigen Grundwasserleitern mit einer Porosität um 30 % und einer Mächtigkeit von ca. 15 m, typischen Werten für den norddeutschen Raum.

Um die Anwendbarkeit der Gleichung zu erweitern, z. B. für andere Porositäten und Mächtigkeiten, wurde ein Korrekturfaktor hergeleitet, der entweder leicht berechnet oder aus einem Nomogramm abgelesen wird. Generell sind aber alle empirischen Verfahren naturgemäß limitiert, daher sollten für komplexere Aufgaben mathematisch anspruchsvollere Modelle herangezogen werden.

20 Wie sicher sind unsere Modellprognosen? – Bewertung von hydrogeologischen Modellen, Wasserbilanzen und Modellkalibrierungen

21.03.2024, 11:00 - 12:30, Konferenzraum 1

Angela Prein (HLNUG)

Bernd Hanauer (HG Büro für Hydrogeologie und Umwelt GmbH)

Vortrag 20.1 (ID 127)

Gütebewertung eines regionalen Grundwasserströmungsmodells im Karst in Nordschwaben, Bayern

Bernd Hanauer

HG Büro für Hydrogeologie und Umwelt GmbH, Deutschland

Kontakt: bernd.hanauer@buero-hg.de

Die Güte und die Prognosefähigkeit eines numerischen Grundwassermodells sind entscheidend für dessen Praxistauglichkeit. Für die entsprechende die Bewertung der Modellgüte wurde Anfang 2023 der FH-DGGV-Leitfaden zur Kalibrierung und Prognosefähigkeit von Grundwassermodellen fertiggestellt, der im Entwurf auf der FH-DGGV-Homepage abrufbar ist.

Am Beispiel des regionalen Grundwasserströmungsmodells für den Weißjura-Karst in Nordschwaben wird die Anwendung des FH-DGGV-Leitfadens zur Kalibrierung und Prognosefähigkeit von Grundwassermodellen dargestellt. Bei diesem Beispiel handelt es sich um ein mehrschichtiges, instationär kalibriertes Grundwasserströmungsmodell, das als Planungsinstrument für die regionale Grundwasserbewirtschaftung dient. Wesentlich für die Aufgabenstellung ist eine möglichst präzise Erfassung der Grundwasserneubildung bzw. des Grundwasserumsatzes im Modellgebiet.

Zunächst erfolgt die Herleitung und Bewertung des Hydrogeologischen Modells (HGM), in dem die grundlegenden Daten zur Hydrogeologie, zu den relevanten geohydraulischen

Kennwerten, zur Grundwasserqualität und -altersstruktur sowie zum Ansatz der Grundwasserneubildung aus Niederschlag ebenso behandelt werden, wie die aktuellen Grundwasserentnahmen und relevante (Quell-)Abflussdaten.

Aus dem HGM werden die Vorgaben für das numerische Grundwassermodell abgeleitet, einschließlich der Strategie für die Modellkalibrierung und der diesbezüglichen Zielgrößen (Kriterien). Die Abgrenzung des Modellgebietes und die Definition der Randbedingungen erfolgt entsprechend der Aufgabenstellung auf Basis des HGM.

Die Ergebnisse der Modellkalibrierung, inkl. Sensitivitäts- und Plausibilitätsanalysen, werden anhand entsprechender Grafiken und Plandarstellungen ebenso erläutert, wie die Vorgaben und Ansätze der Modellanwendung (Szenarienberechnungen). Im Ergebnis liegt ein instationär kalibriertes Grundwasserströmungsmodell vor, wobei für die instationäre Kalibrierung der stationäre Kalibrierungszustand für etwa mittlere Verhältnisse als Anfangsbedingung definiert wurde. Sowohl für die stationäre als auch für instationäre Kalibrierung wurde nach der Bilanzkontrolle anhand von mittleren (Quell-) Abflüssen und Quellschüttungsganglinien aus dem Karst eine Anpassung der Rechenwerte an gemessene Grundwasserstände und -ganglinien durchgeführt.

Abschließend erfolgt die begründete Darstellung der Kalibrierungsgüte und, unter Einbeziehung der HGM-Bewertung, die Bewertung der Gesamtgüte des regionalen Grundwasserströmungsmodells gemäß FH-DGGV-Leitfaden. Demnach resultiert ein Planungsmodell gemäß DVGW-Richtlinie W 107, das im Sinne der Aufgabenstellung prognosefähig ist.

Vortrag 20.2 (ID 190)

Verwendung und Repräsentation von Unsicherheit in Grundwasser-Modellen durch Ensemble-Methoden am Beispiel des Ensemble Kalman Filters

Janek Geiger, Frederick Höckh, Michael Finkel, Olaf Cirpka

Universität Tübingen, Deutschland

Kontakt: janek.geiger@uni-tuebingen.de

Jedes hydrogeologische Modell simplifiziert das zu modellierende System und kann die Wirklichkeit nur begrenzt abbilden. Die Vereinfachungen betreffen die Beschränkung auf bestimmte Prozesse, die Wahl der Modellgleichung, die geometrische Abgrenzung der hydrogeologisch relevanten lithostratigrafischen Einheiten, die Parametrisierung der Materialeigenschaften und Randbedingungen usw. Das Zusammenspiel von Messfehlern, der unterschiedlichen Sensitivität der Modellvorhersagen bezüglich der Messungen und der

konzeptionellen Unzulänglichkeiten der Modelle bewirken, dass Modellparameter nicht eindeutig bestimmt werden können. Vielmehr ist bei einer gegebenen Datenlage und einer gegebenen Modellstruktur eine gemeinsame, auf die Daten konditionierte, statistische Verteilung aller Parameter zu erwarten. Die Unsicherheit der Modellparameter und damit verbundener Modellvorhersagen muss ermittelt und klar kommuniziert werden.

Im Zuge unserer Arbeit wird ein MODFLOW-Modell für ein Gebiet von ca. 330 km² in der südwestdeutschen Trias-Landschaft entwickelt. Es umfasst die Porengrundwasserleiter der lokalen quartären Talfüllungen sowie die Kluft- und Karstgrundwasserleiter des oberen Muschelkalks und der Grabfeld- und Erfurt-Formation des Keupers. Dabei unterscheidet sich die *a priori* Informationslage stark zwischen den einzelnen lithostratografischen Schichten. Schichtabhängig liegen nur vereinzelt bis verhältnismäßig flächendeckend Pumperversuchsdaten vor, die Informationen über die hydrogeologischen Eigenschaften des Modellgebiets liefern. Somit ist es offensichtlich, dass im Zuge der Generierung der benötigten Felder (z. B. hydr. Leitfähigkeit, Speicherkoeffizient) Fehler unvermeidbar sind.

Durch die Verwendung von Ensemble-Methoden werden mehrere Instanzen desselben Modells mit unterschiedlichen Varianten unsicherer Parameter- und/oder Zustands-Felder initialisiert. Die Realisierung der Unsicherheit wird hierbei durch die Verwendung eines Mittelwerts und einer Variabilität für jeden Messwert an jedem Messort realisiert. Im Fall des Ensemble-Kalman-Filters wird eine Gaußsche Verteilung der Variablen angenommen. Somit setzt sich eine Modellinstanz aus einer multi-Gaußschen Verteilung unsicherer Felder zusammen. Dem folgend sind die einzelnen Modellinstanzen und deren Ergebnisse nicht unabhängig voneinander, sondern untereinander korreliert.

Im Ensemble Kalman Filter werden Unterschiede zwischen den (unsicheren) Messdaten und den Modellvorhersagen der Messungen sowie die Korrelation zwischen allen Zustandsgrößen des Modells und den Modellvorhersagen der Messungen verwendet, um die Grundwasserstände im gesamten Modellgebiet in allen Modellinstanzen zu korrigieren. Diese Korrektur erfolgt in regelmäßigen Zeitschritten. Über diesen Prozess der Datenassimilation können nicht nur die gemessenen Modellzustände (z. B. Grundwasserstand), sondern auch Parameter (hydr. Leitfähigkeit) korrigiert werden, wodurch sich das gesamte Ensemble den plausibelsten Gegebenheiten annähert. Dies konnte bereits in einer synthetischen Studie gezeigt werden und wird nun unter Verwendung eines Echtzeit-Messnetzes für das oben genannte Modellgebiet aufgebaut. Analog zur Wettervorhersage lassen sich mittels Datenassimilation Unsicherheiten von Grundwasservorhersagen quantifizieren und kommunizieren.

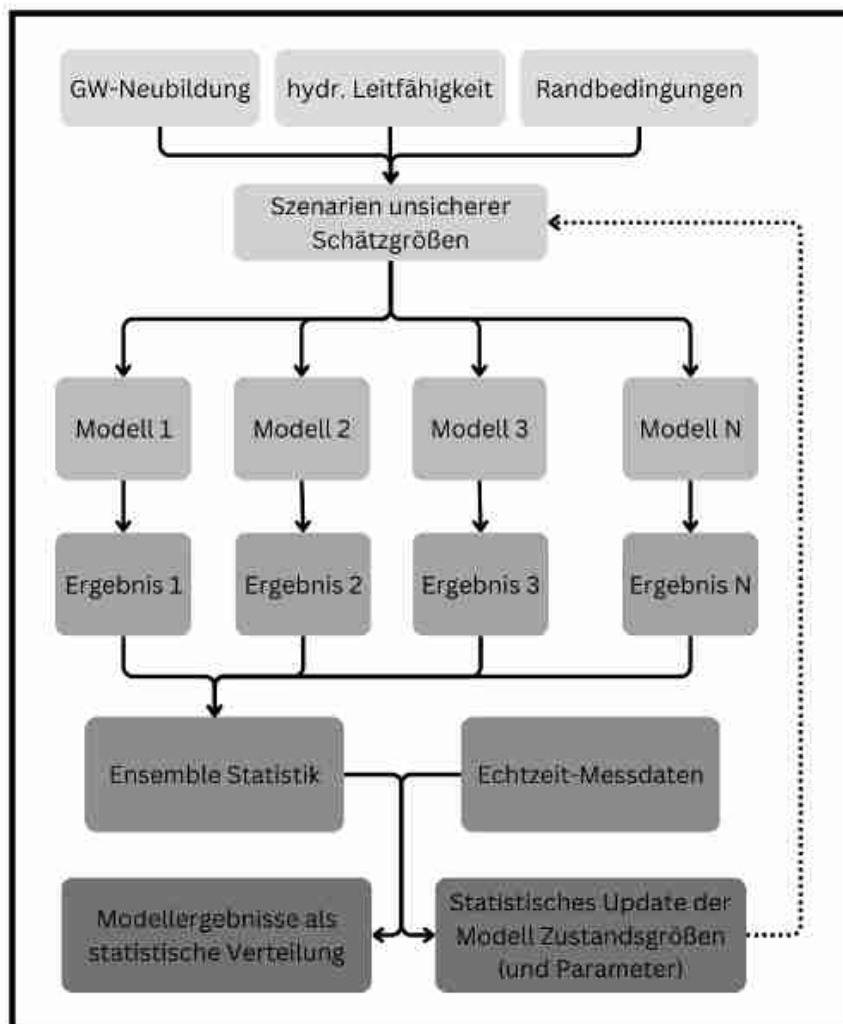


Abb. 1: Schematische Darstellung des Ensemble Kalman Filters.

Reduktion von Modellunsicherheiten mithilfe von Umwelttracern

*Max Gustav Rudolph¹, Thomas Wöhling^{2,3}, Thorsten Wagener⁴,
Andreas Hartmann¹*

¹: Institut für Grundwasserwirtschaft, Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

²: Institut für Hydrologie und Meteorologie, Professur für Hydrologie, Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

³: Lincoln Agritech, Lincoln, Neuseeland

⁴: Institut für Umweltwissenschaften und Geographie, Universität Potsdam, Potsdam, Deutschland

Kontakt: max_gustav.rudolph@tu-dresden.de

Grundwasserressourcen müssen nachhaltig bewirtschaftet werden, speziell unter dem Einfluss von Klimawandel und den damit einhergehenden Herausforderungen und Unsicherheiten. Um damit verbundene Fragestellungen eingehend untersuchen zu können, sind oft räumlich aufgelöste numerische Modelle für Grundwasserströmung und Stofftransport notwendig. Probleme der Parameterschätzung auf Grundlage von Beobachtungsdaten (inverse Probleme, Modellkalibrierung) sind dabei allgegenwärtig, jedoch mathematisch oft schlecht gestellt, woraus Äquifinalität und Nichteindeutigkeit von Lösungen resultieren. Daraus gehen Unsicherheiten von Grundwassermodellen hervor und es ist daher notwendig, diese Unsicherheiten umfassend zu quantifizieren, um sachkundige Entscheidungen zu treffen und Risiken fundiert abschätzen zu können. Wie die Unsicherheiten von Modellaussagen und –prognosen reduziert werden können, ist daher eine praktisch äußerst relevante Fragestellung.

Bereits seit mehreren Jahrzehnten wurden Fragestellungen dieser Art international aufgegriffen; die Reduktion von Modellunsicherheiten mithilfe von Umwelttracern hat dabei einen besonderen Stellenwert. Beobachtungen von Tracerkonzentrationen tragen Informationen zu Strömungsgeschwindigkeiten und sind damit potenziell wertvolle Datentypen, um unsichere Modellparameter besser einzuschränken. Durch den hohen Rechenaufwand von Modellen auf praktisch relevanten Skalen ist die mathematisch rigorose Unsicherheitsquantifizierung (UQ) – und die Quantifizierung der Reduktion von Unsicherheiten durch den Einbezug von Tracerkonzentrationen – jedoch eine große Herausforderung, speziell für Methoden der statistischen Inversion.

Wir präsentieren einen neuartigen Ansatz zur statistischen Inversion, welcher auf der Verwendung von verschiedenen räumlichen Modellauflösungen beruht, was in einer substanziellen Reduktion von Rechenzeiten resultiert. Neben dem Ziel-Modell mit hoher räumlicher Auflösung werden darin Modelle mit sukzessive verringerter räumlicher Auflösung synergetisch verwendet, um Inferenzen für das Ziel-Modell zu erhalten. Für ein

synthetisches Beispiel verwenden wir neben hydraulischen Beobachtungsdaten ebenfalls Beobachtungen von Umwelttracern wie Tritium, um die Modellunsicherheit zu reduzieren. Während Probleme dieser Art bereits vielfach mit vereinfachten Methoden der UQ untersucht wurden, erlaubt unser Ansatz eine rigorosere Analyse mit dennoch reduziertem Rechenaufwand. Die Ergebnisse der statistischen Inversion werden weiterhin verwendet, um Methoden zur optimalen Platzierung von zukünftigen Beobachtungspunkten anzuwenden.

Abschließend möchten wir hervorheben, dass unser Ansatz zur rechnerisch effizienten Quantifizierung von Unsicherheiten für jede Art von zeitlich oder räumlich diskretisierten Modellen anwendbar ist. Damit wird die statistische Inversion von komplexen und rechnerisch aufwändigen Computermodellen für eine Vielzahl praktisch relevanter Fragestellungen ermöglicht.

Vortrag 20.4 (ID 260)

Verbesserte Unsicherheitsabschätzung für (fehlerbehaftete) Grundwassermodelle

Anneli Guthke

Universität Stuttgart, Deutschland

Kontakt: anneli.guthke@simtech.uni-stuttgart.de

Grundwassermodelle bilden eine wichtige Hilfestellung zur Beantwortung hydrogeologischer Fragestellungen und tragen als Informationsgrundlage zur effizienten Bewirtschaftung sowie Dekontamination unserer unterirdischen Wasserressourcen bei. Diese Rolle können sie allerdings nur dann gut ausfüllen, wenn sie belastbare Modellaussagen liefern. Zur Abschätzung der Modellunsicherheiten stehen statistisch-rigorese Methoden bereit. Die Bayes'sche Unsicherheitsanalyse erlaubt es z. B., der Bandbreite an modelltechnisch plausiblen Ergebnissen Wahrscheinlichkeiten zuzuordnen. Die Bayes'sche Wahrscheinlichkeitstheorie bietet einen transparenten, mathematisch eleganten und relativ leicht umsetzbaren Rahmen zur Unsicherheitsabschätzung, hat jedoch ein fundamentales Problem: Sie geht davon aus, dass das betrachtete Modell der Wahrheit entspricht und die wahren Parameterwerte identifiziert werden können, wenn nur genügend Daten als „Beweis“ zur Verfügung stehen. Diese Grundannahme wird in der Praxis immer verletzt: (Grundwasser-)Modelle sind eine abstrakte, rechentechnisch machbare Vereinfachung der Natur und sie leiden typischerweise an begrenzter Informationsdichte und oft auch eingeschränkter Datenqualität in den Modelleingangsgrößen. Grundwassermodelle weisen daher immer strukturelle Fehler auf, die sich mal stärker und mal schwächer bei der Kalibrierung und Validierung bemerkbar machen.

Ich werde in diesem Vortrag zeigen, warum die Bayes'sche Unsicherheitsanalyse bei Modellen mit nicht-vernachlässigbarem Modellfehler unrealistische Ergebnisse liefern und damit in die Irre führen kann. Auf diesem Verständnis aufbauend werde ich verschiedene Ansätze zur Modifizierung der Bayes'schen Unsicherheitsanalyse vorstellen, die Modellfehler berücksichtigen, realistischere Unsicherheitsbänder liefern, und sogar bei der Diagnose von Modellfehlern helfen können. Die Ergebnisse von hydrologischen Fallstudien belegen den Nutzen dieser neuen Ansätze und zeigen neue Forschungsrichtungen sowie Leitlinien für die Grundwassermodellierungs-Praxis auf.

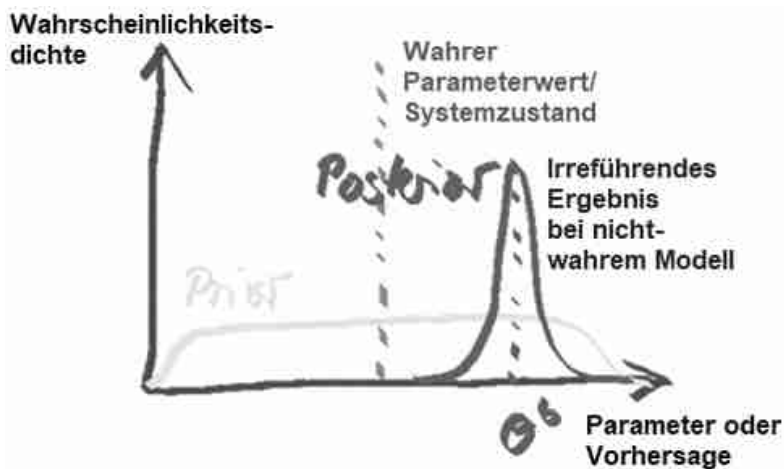


Abb. 1: Beispielhaftes Ergebnis der Bayes'schen Parameterinferenz im Fall von Modellstrukturfehlern: die A-Posteriori-Verteilung hält den wahren Parameterwert irreführenderweise für sehr unwahrscheinlich.

Vortrag 20.5 (ID 273)

Anwendung des Leitfadens zur Kalibrierung und Prognosefähigkeit von Grundwassermodellen der FH-DGGV am Beispiel zweier Grundwassermodelle im selben Untersuchungsraum

Ulrich Lang, Jutta Justiz

Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH, Deutschland

Kontakt: lang@kobus-partner.com

Am Beispiel zweier Grundwassermodelle im gleichen Untersuchungsraum aus dem alpinen Raum wird die Beurteilung der Prognosefähigkeit auf Basis der im FH-DDGV-Arbeitskreis Kalibrierung und Prognose erarbeiteten Kriterien vorgestellt. Beide Modelle weisen eine sehr unterschiedliche Datenlage auf. Während in dem Modell für den quartären

Grundwasserleiter Piezometerhöhen an über 100 Grundwassermessstellen vorliegen, weist das Modell für den Festgesteinsgrundwasserleiter eine geringe Messstellendichte bei gleichzeitig komplexen Gebirgsverhältnissen auf. Auch sind die Fragestellungen für beide Modelle unterschiedlich. Das Quartärmodell dient der Bewirtschaftung des Grundwasserleiters zur Trinkwassergewinnung unter Berücksichtigung naturschutzfachlicher Ansprüche. Das Festgesteinsmodell wird für die Plausibilisierung der geotechnischen Abschätzung des Wasserandrangs und der wasserwirtschaftlichen Auswirkungen durch eine Tunnelbaumaßnahme verwendet. Auf Grund der komplexen Gebirgsstruktur werden unterschiedliche Modellkonzepte zwischen Homogenansatz und Ansatz mit diskreten Klüften betrachtet und damit eine Bandbreitenbetrachtung im Gebirgsmodell initiiert.

Beiden Modellen liegt ein hydrologisches Modell zu Grunde, das die wesentlichen Zuflussgrößen aus Grundwasserneubildung und unterirdischen Randzuflüssen quantifiziert.

Das Quartärmodell wurde instationäre unter Berücksichtigung langjähriger Zeitreihen von Grundwasserständen und Abflüssen und anhand von 14-tägigen Pumpversuchen über 3 Jahre bestmöglich kalibriert. Daraus resultiert eine dreidimensionale Durchlässigkeitsverteilung für den oberen, mittleren und unteren Grundwasserleiter sowie Abschätzungen zur Interaktion mit dem überlagernden Moorgrundwasserleiter.

Mit dem Gebirgsmodell wurde die großräumige Gebirgsdurchlässigkeit anhand von stationären Strömungsbetrachtungen abgeschätzt. Dabei standen Wasserspiegelhöhen entlang der Tunnelachse und Daten zu Quellaustritten am Gebirgsmassiv zur Verfügung. Das Gebirgsmodell liefert eine dreidimensionale Piezometerhöhenverteilung und einen Tunnelwasserandrang passend zum Gebirgswasserhaushalt.

Beide Modelle wurden dem Bewertungsschema zur Beurteilung der Prognosefähigkeit von Grundwassermodellen der FH-DGGV unterzogen. Das HGM des Quartärmodells wird als gute Basis für ein Bewirtschaftungsmodell gesehen, sodass dieses auch eindeutig als Bewirtschaftungsmodell identifiziert wird. Die Kalibrierungsgüte wird als gut bewertet. Es werden dabei keine wesentlichen Unterschiede zwischen dem gesamten Modellraum und dem Aussagegebiet gesehen. Das HGM des Gebirgsmodells weist auf Grund der Heterogenität des Gebirges und der vorwiegend entlang der Tunnelachse vorhandenen Informationen, die Möglichkeit ein Planungsmodell aufzubauen. Allerdings führt die Datenlage dazu, dass das HGM in der unteren Bandbreite für ein Planungsmodell liegt. Unter Berücksichtigung der schwierig zu kalibrierenden hydrogeologischen Verhältnisse ergibt sich für die Gesamtbewertung eine Einstufung als Planungsmodell, das nahe am Prinzipmodell liegt, mit dem aber Prognosen z. B. hinsichtlich der Auswirkungen durch eine geplante Tunnelmaßnahme auf den Gebirgswasserhaushalt möglich sind.

Vortrag 20.6 (ID 325)

Sensitivitätsanalyse am Beispiel eines reaktiven Stofftransportmodells

Matthias Loschko

BoSS Consult GmbH, Deutschland

Kontakt: matthias.loschko@bosscon.de

Das Durchführen einer Sensitivitätsanalyse bedeutet, den Einfluss von Parametern, die in das Modell eingehen, sowohl auf die Kalibrierungsgüte (Übereinstimmung mit gemessenen Wasserständen und Schadstoffkonzentrationen) als auch auf das Vorhersageziel zu untersuchen. Relevant ist letztlich die Variabilität in der gewünschten Vorhersage, die ein bestimmter Parameter verursacht. Gleichzeitig kann die Bandbreite der möglichen Werte dieses Parameters durch die Kalibrierung eingeschränkt werden, da bestimmte Parameterwerte als unplausibel eingestuft werden können, wenn sie zu einem Modellergebnis führen, das den gemessenen Daten deutlich widerspricht. Wenn sich ein Parameter also durch die Kalibrierung sehr stark in seinem Wertebereich einschränken lässt, wird damit auch die Variabilität in der Vorhersagegröße geringer werden. Andererseits ist ein Parameter, der nicht sensitiv auf die vorhandenen Daten reagiert, nicht kalibrierbar und damit potenziell in der Lage, die Vorhersagegröße in nahezu beliebiger Weise zu verändern. Eine Sensitivitätsanalyse führt dadurch auch effektiv zu einem besseren Prozessverständnis

Für einen Altlastenstandort wurde ein numerisches Strömungs- und Transportmodell erstellt. Die instationäre Strömung wurde dabei mit Modflow, der Transport mit MT3DMS berechnet. Das Modellgebiet umfasst etwa 45 Hektar und ist geprägt von tektonischen Verwerfungen und einer daher eingehenden komplexen Hydrogeologie. Auf Basis des validierten Strömungs- und Transportmodells wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Hierbei wurde der Effekt der verbleibenden Unsicherheiten bezüglich der hydraulischen Wirkung von geologischen Verwerfungen im Untersuchungsgebiet, bezüglich der Schadstoffherdgeomtrie und der Schadstofffreisetzung untersucht. Auf Grundlage der Ergebnisse dieser systematischen Sensitivitätsanalyse wurden Ansatzpunkte für weitere Grundwassermessstellen zur Schließung von verbleibenden Kenntnislücken vorgeschlagen. Die neuen Grundwassermessstellen bestätigten die vom Modell vorhergesagten Ergebnisse.

21 Digitale Transformation in der hydrogeologischen Forschung und Praxis

21.03.2024, 15:30 - 16:45 und 22.03.2024, 9:45 - 10:45, Brüssel Saal

Holger Kaiser (BAUER Resources GmbH)

Zhao Chen (TU Dresden)

Vortrag 21.1 (ID 132)

Entwicklung eines datenbasierten Grundwasserinformations- und Vorhersageportals in der Schweiz

Raoul Alexander Collenteur¹, Christian Moeck^{1,2}, Mario Schirmer¹

¹: Eawag (Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology), Schweiz

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

Kontakt: Raoul.Collenteur@eawag.ch

Informationen über den aktuellen und zukünftigen Zustand der Grundwasserressourcen sind von entscheidender Bedeutung für ein effizientes Grundwassermanagement. Diese Informationen können über interaktive Online-Plattformen bereitgestellt werden, die für jeden mit Internetzugang abrufbar sind. In der Schweiz hat das vermehrte Auftreten von Grundwasserdürren und Hochwasserereignissen aufgrund von sich verändernden klimatischen Bedingungen das Interesse an aktuellen Grundwasserdaten, sowie an der Vorhersage des Grundwasserspiegels in naher Zukunft (von Wochen bis Monate) stark zugenommen. An der Eawag arbeiten wir an einem Prototyp eines Grundwasserinformationsportals für die Schweiz, um diese Informationen darzustellen und der Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Dieses interaktive Portal basiert auf Daten, die durch die Modellierung von beobachteten Grundwasserdaten mithilfe von Lumped-Parameter-Modellen und der Open-Source-Software Pastas gewonnen wurden. Die Charakterisierung von Messbrunnen erfolgt auf innovative Weise anhand von Grundwassersignaturen. Informationen zum Zustand des Grundwassers stehen durch Vorhersagen zur Verfügung, die dieselben Lumped-Parameter-Modelle und meteorologische Vorhersagen verwenden. In dieser Präsentation werden wir den ersten Prototyp dieses Portals vorstellen und den Schwerpunkt auf die Entwicklung des Grundwasservorhersagemoduls legen. Die Idee der Prototypentwicklung

besteht darin, aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse in die Praxis zu bringen und mithilfe des Portals Potenziale und Forschungslücken zu identifizieren.

Vortrag 21.2 (ID 234)

Interaktive webbasierte Plattform für effizientes Wassermanagement im Lithiumbergbau auf der Grundlage von FEFLOW und MIKE Operations

Ferdinand Flechtner, Julia Mayer, Katja Eulitz

DHI WASY GmbH, Deutschland

Kontakt: feffl@dhigroup.com

Lithiumbergbaubetriebe, die Lithium direkt aus Solen gewinnen, verwenden häufig Grundwassermodelle wie FEFLOW oder MODFLOW für ihre Ressourcenabschätzung, insbesondere da die Menge des extrahierbaren Lithiums (oder LCE) davon abhängt, wie viel Wasser durch Pumpbrunnen entnommen werden kann. Gleichzeitig müssen die Umweltauswirkungen des Pumpens (z. B. Absenkung) und in einigen Fällen der Injektion (z. B. Verdünnung) ebenfalls mit Hilfe von Grundwassermodellen bewertet werden.

Um die Grundwassermodelle für den Bergbaubetrieb effektiv nutzen zu können, sollten sie direkt mit Messdaten wie Wasserstandsdaten, Pumpraten und Lithiumkonzentrationen verbunden sein, um die Messdaten ständig mit den Vorhersagemodellen abzugleichen. Darüber hinaus sollte das Grundwassermodell keine "Black Box" sein, die nur von Fachleuten genutzt werden kann, sondern interaktiv und für die Minenbetreiber zugänglich sein, damit sie verschiedene Minenplanszenarien selbst durchführen und analysieren können.

Daher wurde eine interaktive webbasierte Plattform auf der Grundlage von FEFLOW und MIKE Operations entwickelt. Mit der Plattform kann der Benutzer auf einfache Weise neue Grundwassermodellszenarien erstellen, indem er die Pumpraten ändert oder zusätzliche Pumpbrunnen hinzufügt, ohne die Benutzeroberfläche der Software öffnen zu müssen. Das Modell wird dann automatisch in der Cloud ausgeführt und die Ergebnisse werden in einer interaktiven Kartenansicht und einem Dashboard angezeigt. Gleichzeitig enthält das System alle relevanten Überwachungs- und Betriebsdaten, um die Modelldaten leicht mit den Überwachungsdaten vergleichen zu können.

Auf diese Weise verfügt der Betreiber eines Lithiumbergwerks über die notwendigen Werkzeuge und Daten an einem Ort, um effektive Entscheidungen zu treffen.

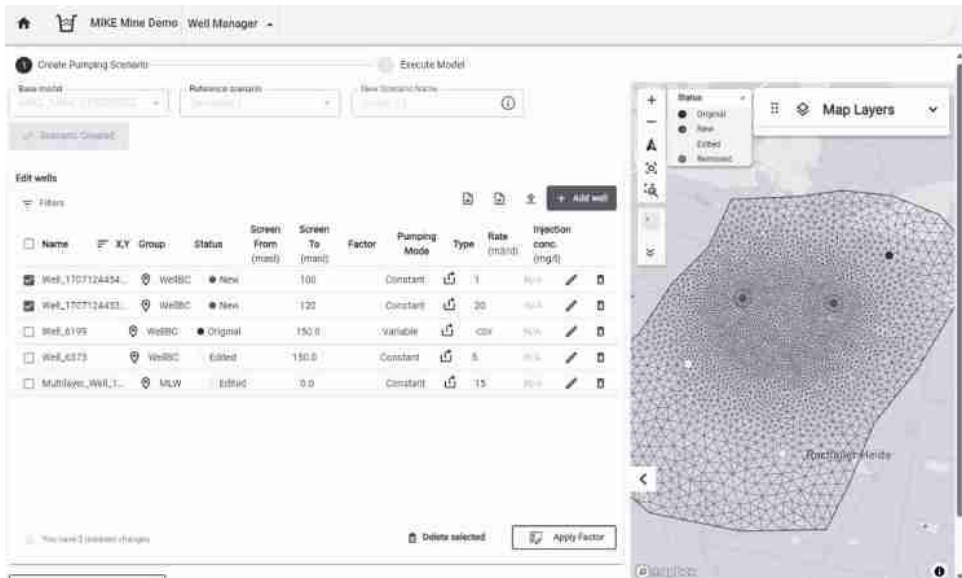


Abb. 1: Dashbord und Kartenansicht der webbasierten Plattform.

Vortrag 21.3 (ID 276)

Entwicklung des Modellierungswerkzeugs zur Planungsoptimierung der geothermischen Nutzung – Integration der Grundwassermodellierung in den BIM-Prozess

Saulo Vieira^{1,2}, Holger Kaiser¹, Zhao Chen²

¹: Bauer Resources GmbH, Germany

²: Technische Universität Dresden

Kontakt: s.vieira@tutamail.com

Die Digitalisierung bietet ein großes Potenzial, die Effizienz und Qualität von geotechnischen und wasserwirtschaftlichen Planungen deutlich zu steigern. In herkömmlichen BIM-Prozessen (Building Information Modeling) werden grundwasserrelevante Informationen kaum berücksichtigt, obwohl das Grundwasser / die Hydrogeologie bei Bautätigkeiten im Untergrund eine sehr wichtige Rolle spielen kann. In der Praxis werden häufig numerische Grundwassermodelle zur Simulation und Prognose von Strömung, Stoff- und Wärmetransport im Untergrund eingesetzt. Diese Modelle können in den BIM-Prozess integriert werden, um die optimale Parametrisierung des Bauvorhabens unter Berücksichtigung der Veränderung der hydrogeologischen Strukturen und Bedingungen während der Bauphase dynamisch abzuschätzen.

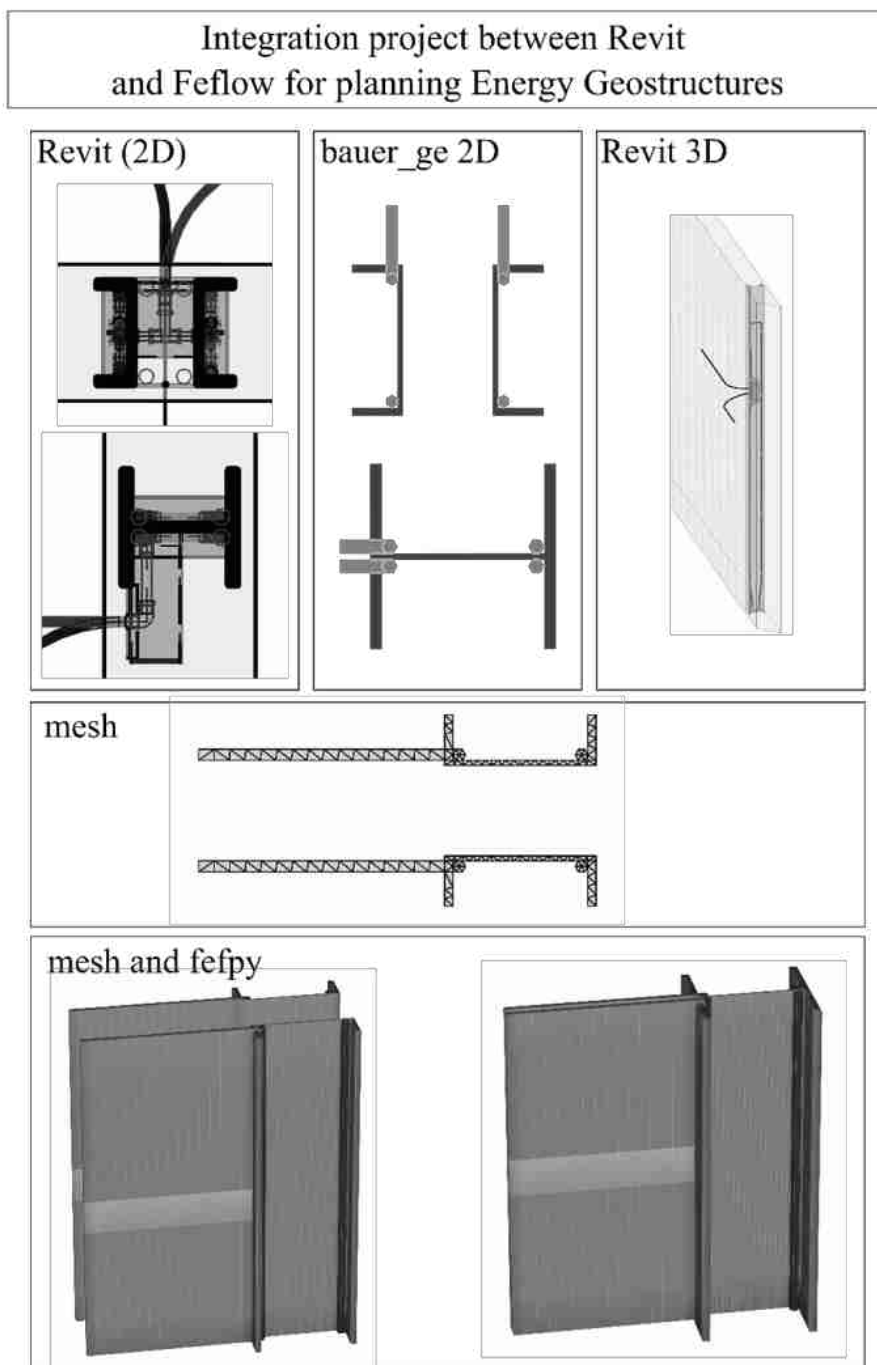


Abb. 1: Integration der Grundwassermodellierung in den BIM-Prozess.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag zum vollautomatischen Preprocessing von FEFLOW-Grundwassermodellen und deren Integration in den BIM-Prozess zu leisten. Ein weiteres Ziel ist die Entwicklung eines allgemeinen Workflows für die Simulation von Energiegeoe Strukturen (EGS) im grundwassergesättigten Untergrund. Unsere aktuelle Arbeit fokussierte sich auf die Entwicklung einer API in der Programmiersprache Python zur Automatisierung der Diskretisierung des Modellgebietes aus Revit-Daten und der Auswertung von FEFLOW-Grundwasser-simulationen. Die technische Implementierung wurde im Rahmen einer Fallstudie getestet, in der ein konzeptionelles Wärmetransportmodell für EGS entwickelt wurde. Für die Verbindung zwischen BIM und FEFLOW wurden verschiedene Python-Pakete und eine Kommandozeilenschnittstelle entwickelt. Das Modell wurde an einem TRT kalibriert und prognostizierte die Zustandsänderung des simulierten geothermischen Systems für die nächsten 25 Jahre. Die aktuelle Entwicklung trägt dazu bei, die numerischen Grundwassermodelle mit geotechnischen Planungswerkzeugen zu integrieren und deren Preprocessing zu automatisieren. Damit wird die Anwendung der verschiedenen Planungswerkzeuge für die geothermische Nutzung unter Berücksichtigung des Grundwassers und der Hydrogeologie wesentlich vereinfacht.

Vortrag 21.4 (ID 322)

Interactive understanding of groundwater hydrology and hydrogeology – Das iNUX Projekt

Thomas Reimann¹, Roland Barthel², Steffen Birk³, Daniel Fernandez-Garcia⁴

¹: TU Dresden, Deutschland

²: Göteborgs Universitet, Schweden

³: Universität Graz, Österreich

⁴: Polytechnic University of Catalonia (UPC), Spanien

Kontakt: Thomas.Reimann@tu-dresden.de

Grundwasser stellt mehr als 97% der weltweit verfügbaren Süßwasserressourcen dar. Grundwasser befindet sich in geologischen Strukturen im Untergrund und ist daher üblicherweise nicht sichtbar und schwer zu bewirtschaften. Folglich entzieht es sich häufig der Aufmerksamkeit der breiten Öffentlichkeit und wird meist in der Ausbildung nicht umfassend berücksichtigt. Die Ausbildung im Bereich Hydrogeologie und Grundwasserbewirtschaftung an Universitäten sowie im Rahmen der beruflichen Weiterbildung von Fachleuten sind jedoch entscheidend, um den aktuellen und zukünftigen Herausforderungen zu begegnen. Aus diesem Grund ist es wichtig, geeignetes Lehrmaterial zu verwenden, um das Verständnis des komplexen Themas Grundwasser bei diesen Zielgruppen zu verbessern. Das laufende Erasmus+ Kooperationsprojekt iNUX (interactive understanding of

groundwater hydrology and hydrogeology, www.gw-inux.org) zielt darauf ab, den Bedarf an digitalen Lehrmaterialien zu decken. Dazu wird eine interaktive und digitale Lernumgebung im Bereich Hydrogeologie und Grundwassermanagement angestrebt, die auf eine europäische und globale Zielgruppe von Lehrenden und Studierenden ausgerichtet ist.

Aufbauende auf dem vorhandenen Lehrportfolio etablierter europäischen Universitäten im Bereich Hydrogeologie und Grundwasserbewirtschaftung wird interaktives und digitales Lehrmaterial entwickelt, dass sowohl grundlegende als auch angewandte Themen umfasst. Die Lehrmaterialien decken die theoretischen Inhalte in Kombination mit Feld- und Laboranwendungen in verschiedenen europäischen Umgebungen ab (Skandinavien, Mitteleuropa sowie den alpinen und mediterranen Bereich). Das Lehrmaterial umfasst dabei (1) verschiedene Arten von Videos (z. B. Feldexperimente, Laborexperimente, Screencasts zu verschiedenen Handrechnungen als auch zur Anwendung von Fachsoftware), (2) interaktive Jupyter-Notebooks, die didaktisch aufbereitete Erklärungen mit Programm-Code kombinieren (z. B. basierend auf der Programmiersprache Python) und (3) einen Pool von digitalen Fragen und Aufgabenstellungen für verschiedene Arten von Assessments, um u. a. das selbstgesteuerte Lernen der Studierenden zu fördern. Alle Materialien sind Open-Source konzipiert und frei verfügbar. Die Aktivitäten von iNIX umfassen ebenso Initiativen zur Bildung von kooperativen Interessen- bzw. Arbeitsgruppen, um die jeweiligen Aktivitäten zu bündeln (z. B. Aufbau und Management von Fragenpools, Sammlungen von interaktiven Dokumenten, Videos, und Datensätzen von Labor- und Feldexperimenten). Die Präsentation gibt einen Überblick zu den jeweiligen digitalen Lehrmaterialien sowie zeigt das Kooperationspotenzial auf; darüber hinaus werden praktische Erfahrungen und erste Ergebnisse von Evaluierungen geteilt.

Vortrag 21.5 (ID 302)

Interaktives Lernen und Forschen am Beispiel des Testfeldes „Grundwasser“ der TU Dresden

Thomas Fichtner, Zhao Chen, Thomas Reimann

TU Dresden, Inst. für Grundwasserwirtschaft

Kontakt: thomas.fichtner@tu-dresden.de

Grundwasser befindet sich in geologischen Strukturen im Untergrund und ist daher oft nicht sichtbar, schwer zu charakterisieren und zu bewirtschaften, wodurch die Wahrnehmung und das Verständnis dieses komplexen Themas oft unzureichend sind. Daher ist es von großer Bedeutung, passende Informations- und Lehrmaterialien zur Verfügung zu stellen, um das Verständnis von Grundwasser zu verbessern.

Im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung stellt die Entwicklung innovativer Werkzeuge und Ansätze daher ein übergeordnetes Ziel dar, um das Verständnis über die Hydrogeologie und das Grundwassermanagement bei einer breiten Zielgruppe zu verbessern und zu verstärken. Insbesondere die Implementierung innovativer Ansätze in Forschung, Praxis und Ausbildung der Hydrogeologie steht dabei im Zusammenhang mit der digitalen Transformation im Fokus. Im Rahmen eines laufenden Erasmus+ Kooperations-Projektes (iNEX - interactive understanding of groundwater hydrology and hydrogeology, www.gw-inex.org) wurde aus diesem Grund am Beispiel des Lehr- und Forschungsfeldes „Grundwasser“ an der TU Dresden eine digitale, interaktive Lern- und Forschungsplattform für ein besseres Verständnis des Themas Hydrogeologie entwickelt. Die aktuelle Arbeit fokussiert darauf, erfasste Monitoringdaten in (quasi) Echtzeit mit verschiedenen digitalen Werkzeugen interaktiv zu visualisieren, auszuwerten und zu modellieren.

Der Einsatz dieser Lern- und Forschungsplattform kann zukünftig dazu beitragen, die digitale Transformation in der Hydrogeologie durch Einbindung in Forschungsvorhaben zu fördern und zu beschleunigen, die Sichtbarkeit in der Öffentlichkeit zu verbessern und das Interesse potenzieller Studierender zu wecken.

Vortrag 21.6 (ID 138)

Digitalisierung im Umwelt-Management: Wünsche, Licht und Schatten – oder „mal eben...“

Folke Diederich, Christian Authmann

GFM envign GmbH, Deutschland

Kontakt: fwdi@gfm-net.com

Der Wunsch, komplexen Zusammenhängen mit modernen Mitteln der Digitalisierung immer besser entsprechen zu können, findet in der fachtechnischen und wissenschaftlichen Gemeinde der Hydrogeologen breite Entsprechung. Gleichzeitig scheinen den Ergebnissen der Umfrage des „AK Digitalisierung im Grundwasser“ zufolge deutliche Hemmnisse zu bestehen, über das bisher erreichte Maß hinausgehend in praxisnahe Entwicklungen zu investieren. Wir lesen die Rückläufe aus der Umfrage des AK so, dass der Grad der Digitalisierung in den Prozessen wissenschaftsnaher Dienstleistungen eng an den kurzfristigen wirtschaftlichen Nutzen gekoppelt ist und darüber hinaus an das persönliche Interesse der Bearbeiter, neue Werkzeuge einzusetzen und zu studieren. Moderne, gerade auch webbasierte Lösungsansätze erweisen sich auf dieser Grundlage zunehmend unzugänglich. Wir beobachten daher im stark KMU-geprägten Anbieterfeld eine gewisse Zögerlichkeit bis hin zur Stagnation in der Annäherung an moderne digitale Werkzeuge.

Im Industrie-Sektor und im Maßstab global tätiger Beratungsgesellschaften wird dagegen der Weg zu autonomen „Cyber Physical Systems“ langfristig verfolgt, wobei deren holistischer Ansatz hohe Aufwendungen mitbringt und damit einer Segmentierung im Markt Vorschub leistet.

Wegen der in der Breite dringenden Anforderungen in der Bereitstellung und ressourcengerechten Nutzung von (Grund-) Wasser, als Trinkwasser, als Grundstoff in der Getränkeindustrie, als Medium in industriellen Prozessen, in der Land- und Energiewirtschaft, wächst auch die Dringlichkeit, über Werkzeuge zu verfügen, die das „Analysieren, Prognostizieren und Gestalten“, aber auch die Beteiligung von Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden und der interessierten Öffentlichkeit auf flexible Weise - nämlich einerseits durchgängig, andererseits niederschwellig (schon einzelfallbezogen) unterstützen.

Als einen wesentlichen praxisrelevanten Baustein der Datenverarbeitung stellen wir Complex Event Processing (CEP) vor. Hierbei wird jeder online erfasste Messwert in Echtzeit ausgewertet, mit anderen Messwerten und externen Daten kombiniert und analysiert, und damit zu (domänenabhängig) relevanten Informationen transformiert.

Für die naturwissenschaftlich orientierte Beratungs- und Planungstätigkeit liegt eine praxisrelevante Hürde jedoch vorgelagert in der Frage, wie geeignete (zeitlich und räumlich hochdichte) Daten auf effiziente Weise für eine höherwertige Analyse integriert werden können – auf so komfortable Weise, dass Normalsterbliche eine verlässliche Datenbasis erreichen, ohne die der erwartete inhaltliche Mehrwert einer digitalen Verarbeitung tatsächlich nicht erreicht – und erst recht nicht marktgerecht angeboten werden kann.

Bisher kennt und scheut man häufig den „mal-eben“-Effekt, nämlich Zeit- und Arbeitsaufwand, der einer Integration von Mess-, Befund-, und Lagedaten entgegensteht und Projekte oft genug auch schon mit Blick auf die Erfassung vom Grundlagen-Daten unvorhersehbar in ökonomische Grenzzonen führen kann.

Nicht alle der genannten Widrigkeiten der Systemintegration können mit geeigneter Software gemindert werden, aber einige schon. Die Anforderungen, die sich aus technischer Sicht ergeben, wollen wir näher beleuchten und Lösungsansätze vorstellen.

Vortrag 21.7 (ID 259)

Erfahrungen aus dem Ingenieurbüro – Digitale Transformation in der Praxis

Daniela Fröhlich, Jörg Reuther

HPC AG, Deutschland

Kontakt: daniela.froehlich@hpc.ag

Die HPC AG geht schon seit mehreren Jahren aktiv den Weg der Digitalen Transformation. Im Rahmen der Strategie 2020 wurde das Ziel formuliert, bis Ende 2025 bisher analog dominierte Bereiche der Datenaufnahme und -verarbeitung zu digitalisieren und bestehende digitale Prozesse zu vereinheitlichen (90%). Neben der fachlichen Projektbearbeitung wurden und werden organisatorische Abläufe wie die Projekt- und Kundendatenführung vereinheitlicht und administrative, kaufmännische Prozesse digitalisiert. Die Innovationsförderung im Hinblick auf bestehende und neue Dienstleistungen ist ein weiteres Element.

Bei der täglichen Arbeit sind digitale Prozesse bei der Datenerfassung, Verarbeitung und Auswertung seit Jahrzehnten etabliert. So werden beispielsweise Pumpversuche seit den 1990er Jahren mit Sonden und Datenloggern aufgezeichnet. Inzwischen werden auch die Möglichkeiten der Fernüberwachung genutzt, sodass Daten laufender Pumpversuche an jedem beliebigen vernetzten Ort in Echtzeit empfangen und ausgewertet werden können. Bei der Verarbeitung sind digitale Tools, z. B. zur Pumpversuchsauswertung oder GIS-gestützte Datenauswertungen selbstverständlich, für komplexere Fragestellungen kommen analytische und numerische Modelle zum Einsatz.

Die Datenerfassung, wie die Schichtenaufnahme von Sondierungen und Bohrungen, Protokolle von Probenahmen oder Stichtagsmessungen, wurden hingegen noch weitgehend analog geführt. Kommunikation mit externen Dienstleistern wie Bohrfirmen und Labors erfolgte – trotz digitaler Kommunikationswege – nicht in weiterbearbeitbaren Formaten.

Die Vorteile digitaler Erfassung und Bearbeitung liegen auf der Hand: Übertragungsfehler werden vermieden, eine Plausibilisierung und Qualitätssicherung ist direkt im Gelände möglich, die Effizienz der Verarbeitung steigt und es kann schneller reagiert werden.

HPC geht den Weg auf unterschiedlichster Weise. Zur Datenerfassung im Feld wird mittlerweile die eigens entwickelte App „Smartwork Geo“ genutzt. So können Schichtenprofile, Wasserstandsmessungen und Probenahmen einheitlich erfasst und in einer globalen Datenbank abgelegt werden. Eine weitere Eigenentwicklung, das interaktive Webportal „WasserPortal“ wird intern und extern durch Kunden für die gesamtheitliche Betreuung von Grundwassergewinnungsanlagen genutzt. Darüber hinaus wurde von HPC die EU-

patentierte Schadstoffdatenbank zur systematischen Erfassung und Verwaltung von Gebäudeschadstoffen entwickelt.

Ein weiterer wichtiger Part ist die Installation von Schnittstellen zwischen einzelnen Prozessen und zu externen Dienstleistern. Die Herausforderungen bei der täglichen Arbeit in einer organisch gewachsenen Firma, mit verschiedenen Fachbereichen, unterschiedlichen Auftraggebern und diverser Messtechnik sind vielfältig. Es ist es nicht immer möglich, Programme zu vereinheitlichen und vorzugeben, was die Anzahl an erforderlichen Schnittstellen anwachsen lässt.

Neben der Schaffung der technischen Voraussetzungen sind Motivation der Mitarbeiter sowie Schulung und Wissenstransfer wichtige Bausteine in der Umsetzung.

Die Digitale Transformation ist ein kontinuierlicher Prozess, Systeme müssen so gestaltet sein, dass wandelnde Anforderungen und Entwicklungen einbezogen werden können.

Vortrag 21.8 (ID 304)

Customizing Groundwater Models with Dynamic Boundary Conditions

Mike Müller¹, Lúcia Pedrosa², Christian Engelmann², Martin Binder^{2,3}

¹: hydrocomputing GmbH & Co. KG, 04158 Leipzig, Deutschland

²: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Hydrogeologie und Hydrochemie, 09599 Freiberg (Sachsen), Deutschland

³: Universität Basel, Hydrogeologie / Angewandte und Umweltgeologie, 4056 Basel, Schweiz

Kontakt: mmueller@hydrocomputing.com

Numerical groundwater models are established and robust tools for the prediction of flow and transport processes in the subsurface. The typical workflow consists of preparing input data, running a simulation program such as MODFLOW, and eventually evaluating model results. An important part of this entire procedure are boundary conditions (BCs). For complex scenarios, these BCs may need to be adaptively adjusted, e.g. based on previous model results, to better reflect real-world conditions. Given complex mutual dependencies between BCs, this workaround may require multiple iterative model runs and can lead to unsolvable optimization strategies.

A solution to this problem can be found in the definition of dynamic BCs, i.e., BCs that can change their value based on pre-defined rules and depending on the values of other BCs and / or process variables. For example: An injection well can only infiltrate the amount of water which was previously pumped from an hydraulically connected extraction well. At the same time, the groundwater level in the extraction well should not fall below a certain level to protect the well and the installed pump from falling dry. This scenario,

although still comparably simple, already requires both an adaptive adjustment of the pumping rate of the extraction well (based on the process variable of hydraulic head) and of injection well's rate (based on the BC value of the coupled extraction well). This scenario can become even more complex if multiple extraction and / or injection wells are involved. From the technical point of view, dynamic behaviors such as the described one could be achieved by modifying the source code of the numerical model. While possible, this would require a considerable effort and understanding of the inner workings of the code (in case of MODFLOW: Fortran).

The latest version of MODFLOW 6 offers a novel approach by exposing a programming interface which can be externally accessed during runtime via scripting languages, e.g., Python. In our contribution, we introduce pymf6, a new open-source Python package that allows a simplified usage of the aforementioned programming interface. Using pymf6, a model user with basic Python knowledge can write a program in Python that can achieve a highly dynamic model, i.e., the implementation of dynamic BC behavior becomes now possible for MODFLOW-based models. Such programs can be short and are much simpler to implement than modifying the source code of the numerical model itself. Even very complex conditions can be represented with comparably short Python programs.

The contribution shows how pymf6 can enable users to solve complex groundwater modeling problems with reasonable effort. Among others, examples for flow and solute transport models involving dynamic BCs will be shown. The examples will demonstrate how pymf6 can be used to define problem-specific groundwater models that can help solve complex interactions between BCs. These examples will, among others, also involve advanced technical BCs such as a hydraulic barrier used for containing subsurface contaminations. In the presented example the hydraulic barrier is formed by multiple wells, each equipped with dynamic pumping rates which are adaptively regulated by defining not-to-be-exceeded threshold for the process variable of solute concentration.

Entwicklung von Algorithmen zur Anomalieerkennung und -korrektur in Grundwasser-Zeitreihen bei einem Wasserversorger – Die Data Challenge 2023

*Karen Hüske¹, Siri Hoppenau¹, Marius Wybrands², Andreas Solsbach²,
Jorge Marx Gómez²*

¹: Oldenburgisch-Ostfriesischer Wasserverband (OOWV), Abteilung Wasserwirtschaftliche Information, Georgstraße 4, 26919 Brake

²: Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Abteilung Wirtschaftsinformatik (VLBA), Ammerländer Heerstr. 114-118, 26129 Oldenburg

Kontakt: hueske@oowv.de

Als größter Flächenversorger Deutschlands betreibt der Oldenburgisch-Ostfriesische Wasserverband (OOWV) 15 Wasserwerke, um die Trinkwasserversorgung von über einer Million Menschen im Nordwesten Deutschlands sicherzustellen. Im Bereich dieser Wasserwerke wird an ca. 2600 Messstellen mindestens monatlich der Grundwasserstand gemessen. In der Regel erfolgt die Messung bisher mit einem Kabellichtlot; nur an etwa 10% der Grundwassermessstellen wird mit einem Datenlogger täglich gemessen. Bei den Messungen treten verschiedene Arten von Fehlertypen auf, z. B. entstehen Messlücken, weil die Messung nicht möglich war, oder es werden falsche Messwerte abgelesen. Für die Beweissicherung der Wasserrechte sowie weiterführende Auswertungen wie Trendanalysen, Machine Learning und KI-Anwendungen werden vollständige und plausible Grundwasserstandsganglinien benötigt, wobei vollständig definiert wird als mindestens ein Messwert pro Monat und plausibel bedeutet, dass keine offensichtlichen Fehler mehr vorhanden sind.

Genau diese Anforderung an die Grundwasserganglinien beschreibt die Aufgabenstellung der Data Challenge 2023 im Rahmen eines Hackathon, der jährlich von der Abteilung Wirtschaftsinformatik der Universität Oldenburg (VLBA) unter der Leitung von Professor Jorge Marx Gómez ausgerichtet wird. Die Teilnehmenden lösen in Teams von zwei oder drei Personen innerhalb von zwei Wochen eine datengetriebene Problemstellung aus der Praxis, die 2023 vom OOWV gestellt wurde. Die Teilnehmenden erhielten Stamm-, Grundwasserstands- und Niederschlagsdaten von ca. 1000 Messstellen von vier der 15 Wasserwerke. Aufgabe war es, einen Algorithmus zu entwickeln, der die oben beschriebene Problemstellung löst. Bewertet wurde die Qualität des Algorithmus mit Hilfe eines strengen Scores, der verschiedene Metriken zur Modellbewertung kombiniert und für 20 vorab manipulierte Ganglinien berechnet wurde.

Dreizehn Teams haben am Ende der zwei Wochen eine Lösung präsentiert. Sie haben jeweils unterschiedliche Herangehensweisen für die automatisierte Zeitreihenkorrektur gewählt, von „einfachen“ Algorithmen über Machine Learning-Ansätze wie Random-Forest Modelle bis hin zu neuronalen Netzen (LSTM-Modelle) oder Kombinationen von verschiedenen Ansätzen für zuvor klassifizierte Typen von Ganglinien. Neun der dreizehn Teams konnten mit Hilfe ihres Algorithmus die Qualität der Daten deutlich verbessern, wobei das beste Team einen Score von 48 von 60 möglichen Punkten erreichen konnte. Der Algorithmus des Siegerteams war in der Lage 98 % der Meterfehler (häufigster Fehlertyp) und über 50 % der Lücken von bis zu 6 Monaten richtig zu erkennen und den Grundwasserstand bis auf 3 cm genau vorherzusagen.

Die Algorithmen können als Prototypen angesehen werden, die nun im nächsten Schritt vom OOWV zu einem Algorithmus vereint werden sollen. Ziel ist es, zukünftig Anomalien in Grundwasserganglinien automatisiert zu erkennen und zu bereinigen und so eine Zeitersparnis gegenüber der bisher durchgeführten visuellen Kontrolle zu erreichen sowie die Datenqualität deutlich zu verbessern. Neben den messbaren Qualitätsverbesserungen konnten die Teams mit ihren Lösungsansätzen auch dazu beitragen, weitere Fragestellungen zu beantworten. So wurden für die Algorithmen z. B. Messstellen mit vergleichbaren Grundwasserganglinien bestimmt oder die Ganglinien wurden in förderbeeinflusste und -unbeeinflusste Ganglinien kategorisiert. Die Data Challenge 2023 war somit für den OOWV ein voller Erfolg.

Poster 21.1 (ID 139)

Wissensmanagement mit GFM-Visu. Visualisierung, Prozessanalyse, Überwachung und Dokumentation.

Folke Diederich, Christian Authmann

GFM envign GmbH, Deutschland

Kontakt: fwdi@gfm-net.com

GFM® Visu hilft, die zeitlichen und räumlichen Einflussgrößen von Umweltentwicklungen zu erfassen und Wirkmechanismen zu analysieren, die aus der Nutzung natürlicher Ressourcen resultieren können.

Kenngrößen können in ihrer Entwicklung dokumentiert und für ein komplexes Event-Management und Alarm-System genutzt werden. Damit profitieren Nutzer unmittelbar bei der Bewältigung von Alltagsaufgaben in der Überwachung und Steuerung.

Die im System gespeicherten und analysierten Beobachtungen tragen zu einem verbesserten Verständnis von natürlichen und technischen Systemzusammenhängen bei.

Mit neu geschaffenen Datengrundlagen und einem verbesserten Systemverständnis bieten sich Grundlagen für die Entwicklung von Modell-konzepten und Simulationswerkzeugen für Vor-hersagen.

Simulationsergebnisse werden so eingebunden, dass in einem ersten Schritt Entscheidungsunterstützung geleistet wird, in Teilen auch eine automatisierte Regelung folgen kann.

Ein Schwerpunkt der aktuellen funktionalen Neuerungen des Systems liegt im Bereich der Daten- und Systemintegration und orientiert sich an folgenden Anforderungen:

Ein Monitoring-System muss Daten verschiedener Quellen automatisch und verzögerungsfrei zusammenführen, manipulationssicher archivieren und integriert analysieren.

Hochflexible, benutzerfreundliche Import-Werkzeuge ermöglichen die manuelle Integration von Daten aus offline-Datenloggern, händisch übermittelten Daten sowie aus heterogenen historischen Datenbeständen. Zusammengehörige Daten werden nach einer Validierung logisch zusammengefasst, und werden gleichberechtigt mit den Daten des Monitoring-Systems archiviert und verarbeitet. Importe lassen sich gezielt bereinigen, ohne die Nachvollziehbarkeit bereits getroffener Entscheidungen zu beeinträchtigen.

Das System unterstützt Fachpersonal effizient im Bereich der „Frist-Level-Analyse“, zusätzlich verfügt es über benutzerfreundliche Export-Funktionen für vor-aggregierte Kenngrößen, oder synchronisierte (Roh-) Daten, die funktionale Zusammenhänge charakterisieren, sodass eine vertiefende Analyse mit Spezial-Software oder Tabellenkalkulation unterstützt wird (WYSIWYG).

Das System unterstützt die Zusammenarbeit im Team mit weitreichenden Möglichkeiten zur Kommentierung, mit einer intuitiven Benutzerführung und einem hochentwickelten Rechte-Management.

Das hohe öffentliche Interesse an gesellschaftlich häufig umstrittenen Plan-Vorhaben verlangt außerdem, neue Formen digitaler Transparenz zu etablieren. Hierbei unterstützt das System: Bereitstellung von Datenpaketen (fälschungssicher und benutzerspezifisch) zum download oder für eine automatisierte Übertragung wissenschaftlich aufbereiteter Information in nachgeordnete Webdienste, die i. d. R. von Dritten betrieben werden.

Mit dem Poster zusammen bietet eine Demo-Version dem Betrachter (mit A2-Format-touch-screen steuerbar) online Zugang auf Test-Daten-Bestände und Analyse-Tools.

Poster 21.3 (ID 150)

HYPAGS: approximation of virtual sieve curves and hydraulic parameter ranges for variably saturated flow from single input values of hydraulic conductivity

Aaron Peche, Georg Houben, Sven Altfelder

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Deutschland

Kontakt: aaron.peche@bgr.de

Models of fully and variably saturated flow require a set of input parameters. However, often only the most basic parameters, such as the saturated hydraulic conductivity, are available. For these cases, we present a software tool called HYPAGS (HYdraulic PARAMeters and Grain Sizes) (Peche & Houben 2023; Peche et al., in print), which enables to estimate characteristic granulometric diameters (d₁₀, d₂₀, d₅₀, d₆₀), effective porosity and van Genuchten parameter ranges, based on single input values of either hydraulic conductivity, d₁₀ or d₂₀.

The mathematical model of HYPAGS combines physically based equations and empirical relationships. It is based on the analysis of >500 grain size analyses (sieve curves) and >1700 experimentally obtained van Genuchten parameter sets. For uniform soils, HYPAGS can estimate the corresponding parameters with high accuracy, as a comparison with measured data from the literature shows. Soils with a coefficient of uniformity greater than 3 and soils with multimodal sieve curves are outside the validity range of the application. A free, open-source, stand-alone GUI of HYPAGS is available for download (<https://github.com/APeche/HYPAGS>).

Peche, A., & Houben, G. J. (2023). Estimating Characteristic Grain Sizes and Effective Porosity from Hydraulic Conductivity Data. *Groundwater*, Wiley, 61(4), 574-585.

Peche, A., Houben, G. J., & Altfelder, S. (in print). Approximation of van Genuchten parameter ranges from hydraulic conductivity data. *Groundwater*, Wiley.

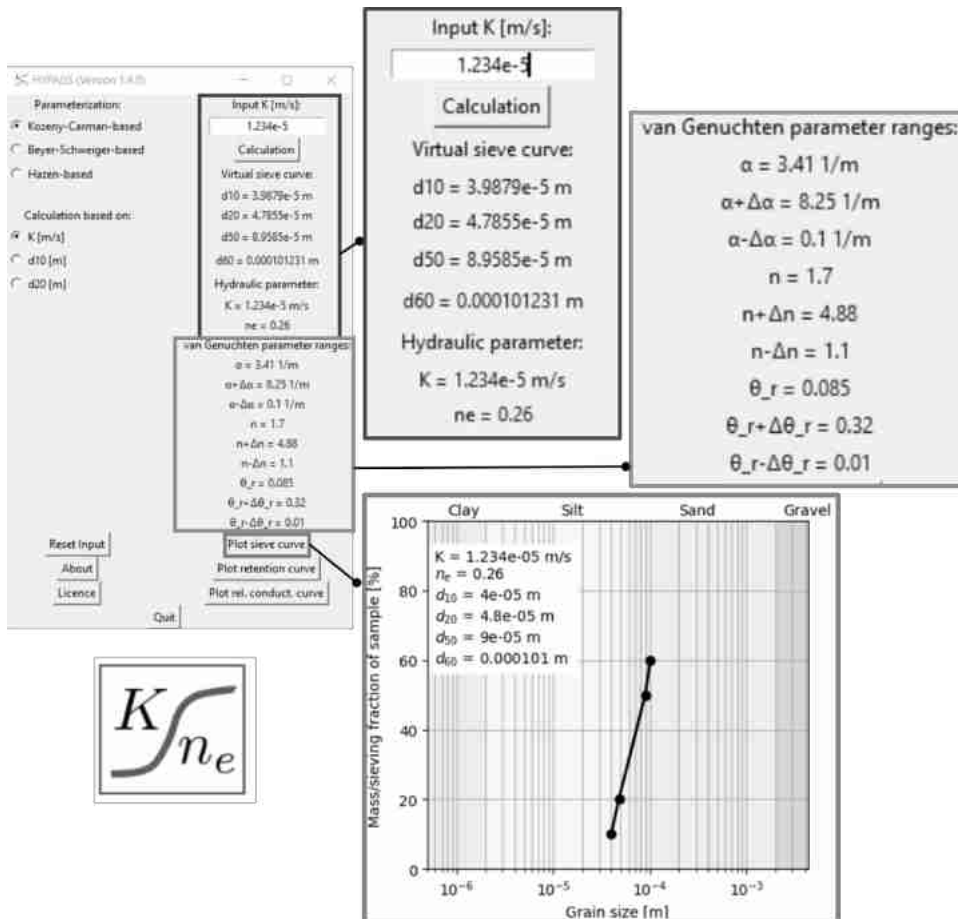


Abb. 1: The mathematical model of HYPAGS.

Poster 21.4 (ID 290)

Echtzeitüberwachung und numerische Modellierung auf der web-basierten Grundwassermanagementplattform INOWAS

Jana Glass, Catalin Stefan, Ralf Junghanns

Technische Universität Dresden, Deutschland

Kontakt: jana.glass@tu-dresden.de

Für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen werden geeignete und innovative Instrumente benötigt, um wasserbezogene Probleme wie Übernutzung, Bodensenkungen, Versalzung und Wasserknappheit einzudämmen. Numerische Werkzeuge

haben sich seit Jahrzehnten als nützlich erwiesen, um die Grundwasserbewirtschaftung zu optimieren und verschiedene Bewirtschaftungs- und Prognoseszenarien zu bewerten. Bestehende Werkzeuge umfassen hauptsächlich desktopbasierte Software wie MODFLOW (Harbaugh, 2005) oder FEFLOW (Diersch and Kolditz, 2002), um die Grundwassersituation zu bewerten.

Dahingehend haben wir einen neuen Ansatz namens INOWAS DSS (www.inowas.com) entwickelt, bei dem das numerische Strömungs- und Transportmodell (MODFLOW, MT3DMS, SEAWAT) komplett in der webbasierten Umgebung erstellt, berechnet und analysiert werden kann. Die INOWAS-Plattform umfasst zudem Werkzeuge für die Echtzeitüberwachung sowie Risikobewertung zur Optimierung der Leistung von Systemen zur künstlichen Grundwasseranreicherung (engl. Managed aquifer recharge, MAR) unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und ökologischer Faktoren. Der Ansatz basiert auf der Ausrüstung konventioneller Überwachungssysteme mit Echtzeit-Umweltsensoren zur hochauflösenden räumlichen und zeitlichen Charakterisierung der an MAR-Standorten ablaufenden Prozesse. Es wurde ein maßgeschneidertes Protokoll entwickelt, um Sensordaten aus verschiedenen Quellen zu nutzen und in die INOWAS-Plattform zu importieren, wo diese automatisch für die weitere Verwendung, zum Beispiel in numerischen Grundwassermodellen, bearbeitet werden können. Die webbasierte Implementierung ermöglicht die optimale Nutzung der Modellierungsergebnisse und hilft Modelle leichter zu aktualisieren und aktuelle Beobachtungsdaten einzufügen. Ein spezielles Tool für das Szenarienmanagement ermöglicht den einfachen Vergleich verschiedener Modellläufe und fördert die wissenschaftlich fundierte Entscheidungsfindung der Beteiligten.

Die webbasierten Werkzeuge überwinden die typischen Beschränkungen desktopbasierter Software, wie z. B. Softwareinstallation, manuelle Aktualisierung, Systemabhängigkeit und begrenzte Datenverfügbarkeit. Die webbasierte Implementierung fördert die internationale Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Benutzern und Benutzergruppen, einschließlich Forschern und Entscheidungsträgern. Der Open-Access-Ansatz reduziert Anwendungsbarrieren, die oft durch hohe Lizenzgebühren entstehen. Tutorials und Online-Dokumentationen ermöglichen es neuen Nutzern, sich leicht mit der INOWAS DSS-Plattform vertraut zu machen. Im Gegensatz zu bestehenden webbasierten Implementierungen, die sich eher auf die Ausbildung oder eine spezifische Fallstudie konzentrieren, ist der Workflow flexibel, kann jederzeit für eine spätere Weiterführung gespeichert werden und auch komplexe Modelle können aufgebaut und simuliert werden, welches vor allem durch die jüngste Umstellung der Berechnung vom Webbrowser auf den Server gewährleistet wird.

KI-basiertes Grundwassermanagement in Brandenburg: Notwendigkeit und bisherige Entwicklungen

Maria Wetzel¹, Lena Katharina Schmidt², Angela Hermsdorf², Stefan Kunz¹, Tanja Liesch³, Benedikt Heudorfer³, Fabienne Doll³, Stefan Broda¹

¹: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Deutschland

²: Landesamt für Umwelt Brandenburg, Deutschland

³: Karlsruher Institut für Technologie, Deutschland

Kontakt: maria.wetzel@bgr.de

Brandenburg gilt aufgrund der mehr als 3000 Seen und hunderten von Flusskilometern als wasserreiches Bundesland, zählt aber dennoch zu den niederschlagsärmsten Regionen Deutschlands. Mit dem Einhergehen des Klimawandels wirken sich diese Verhältnisse insbesondere im Grundwasser aus. Vorliegende Ergebnisse zeigen, dass sich unter dem Ansatz des Emissionsszenarios RCP8.5 der Gesamtabfluss für den Zeitraum 2031-2060 um 10-20 % reduzieren wird. In diesem Zusammenhang ist der Wasserbedarf kritisch zu beobachten. Neben dem Bergbau, der Industrie, der Landwirtschaft betrifft das vor allem die Trinkwasserversorgung, die zu mehr als 90 Prozent aus dem Grundwasser gespeist wird. Für eine gesicherte Grundwasserbewirtschaftung im Land Brandenburg müssen die benötigten Grundwasservorräte vorhanden sein. Hierfür sind grundlegende und zukunftsorientierte Untersuchungen notwendig, wie der Einsatz von KI-Methoden zur Prognose zukünftiger Grundwasserstände.

Um diesen Herausforderungen praktisch gerecht zu werden, ist Brandenburg eine wichtige Pilotregion im BMBF-Vorhaben KIMoDIs. Innerhalb dieses Forschungsprojektes soll ein KI-basiertes Monitoring-, Datenmanagement- und Informationssystem zur gekoppelten Vorhersage und Frühwarnung vor Niedrigstgrundwasserständen und Grundwasserversalzung erarbeitet werden. Prognosen für eine Bandbreite von Klima- und Nutzungsszenarien sollen zudem in einem Entscheidungshilfetooll visualisiert werden und damit standortspezifisch eine intelligente Handlungsplanung von Gegenmaßnahmen für ein nachhaltiges, zukunftsorientiertes Grundwassermanagement ermöglichen.

Datengrundlage auf überregionaler Skala ist das hydrologische Landesmessnetz Brandenburgs, welches etwa 2000 Grundwassermessstellen umfasst und seit Jahrzehnten den mengenmäßigen Zustand des Grundwassers im Bundesland erfasst und überwacht. Eine komplexe Analyse der verfügbaren Grundwasserstandsdaten zeigt ein zunehmendes Auftreten von Niedrigstgrundwasserständen in den letzten vier Dekaden, insbesondere im Zeitraum von 2011-2020. In Brandenburg tritt dieser Effekt vor allem in den kleinteiligen Hochflächegebieten auf. Landesweit überwiegen derzeit jedoch noch Landesmessstellen ohne

beziehungsweise mit geringeren Trends in den Grundwasserständen. Die Bedeutung der sinkenden Grundwasserstände auf den Hochflächen spiegelt sich vor allem im Rückgang der Grundwasserneubildung wider. Eine umfassende statistische Analyse aller verfügbaren Grundwasserstandsdaten der letzten Jahrzehnte sowie vergleichende Trendbetrachtungen wurde durchgeführt und für die charakteristischen Speisungs-, Transit und Entlastungsgebiete visualisiert.

Der Fokus der bisherigen Arbeit lag auf der Recherche und Auswertung der aktuellen Situation der bestehenden Monitoringsysteme in Bezug auf die Anforderungen der KI-basierten Prognosemodelle. Etwa ein Viertel der Grundwassermessstellen sind mit Datenloggern ausgestattet, wovon etwa die Hälfte über Datenfernübertragung verfügt. Gegenwärtig beträgt die Messstellendichte eine Grundwassermessstelle je 15 km². Neben der kurzfristigen (saisonal), mittelfristigen (1 bis 10 Jahre) und langfristigen (bis 2100) Vorhersage von Grundwasserständen soll im Rahmen des Projektes auch eine KI-basierte Optimierung des Messnetzes durchgeführt werden. Dies umfasst ein Ranking von Messstellen hinsichtlich ihres Informationsgehalts, aber auch konzeptionelle Empfehlungen für den optimierten Messnetzbetrieb.

22 Künstliche Intelligenz und Machine Learning in der Grundwasserforschung

23.03.2024, 10:30 - 12:00, Konferenzraum 1

Tanja Liesch (Karlsruher Institut für Technologie KIT)

Stefan Broda (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

Vortrag 22.1 (ID 142)

Globale Entity-Aware Deep Learning Modelle für die Grundwasserstandsvorhersage

Benedikt Heudorfer¹, Tanja Liesch¹, Stefan Broda²

¹: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für angewandte Geowissenschaften, Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe

²: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Wilhelmstr. 25–30, 13593 Berlin

Kontakt: benedikt.heudorfer@kit.edu

Die Anwendung von maschinellem Lernen (ML), insbesondere von Deep Learning Modellen, in der Hydrogeologie zur Modellierung und Vorhersage von Grundwasserständen hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Die vorherrschende Modellklasse sind im Moment sogenannte Single-Well-Modelle, bei denen ein Modell für jede Messstelle separat angepasst wird. Aktuelle Ergebnisse in benachbarten Disziplinen (z. B. Hydrologie) haben jedoch die Vorteile globaler Modelle aufgezeigt, welche Daten aus mehreren Bohrungen einbeziehen können. Diese Modelle werden oft als „Entity Aware“ Modelle bezeichnet, da sie statische Input-Features verwenden, um die einzelnen Messstellen (d. h. die „Entitäten“) zu unterscheiden.

In dieser Studie haben wir zwei Arten von statischen Input-Features getestet, um die Grundwassermessstellen in einem globalen, Entity Aware Deep Learning Modell zu charakterisieren: Umweltcharakteristika (Environmental Features) wie z. B. Informationen über Grundwasserleiter, Boden, Landnutzung usw., welche räumlich kontinuierlich verfügbar sind und somit theoretisch eine räumliche Generalisierung (d. h. Regionalisierung) ermöglichen, und Zeitreihencharakteristika (Timeseries Features), welche aus der Zeitreihe der Messstelle abgeleitet werden. Des Weiteren verwenden wir in einem Vergleichsmodell

Zufallszahlen (Random Features) anstelle der oben genannten physiographisch bzw. informationstheoretisch sinnvollen Charakteristika. Wir testen die Vorhersagegüte dieser unterschiedlichen Modelle anhand eines publizierten Datensatz von 108 Grundwassermessstellen in Deutschland und bewerten die Performance im Hinblick auf die Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE), jeweils in einem In-Sample bzw. einem Out-of-Sample Setup, mit dem Ziel, die räumliche bzw. zeitliche Generalisierbarkeit zu untersuchen.

Unsere Ergebnisse zeigen, dass globale Entity Aware Modelle mit einem durchschnittlichen $NSE > 0,8$ im In-Sample Setup gut funktionieren und mit Single-Well-Modellen vergleichbar sind, bzw. deren Performance sogar leicht übertreffen. Allerdings zeigt die relativ niedrige Performance im Out-of-Sample Setup (mittlerer $NSE < 0,7$, d. h. niedriger als ein globales Modell ohne Entitätsinformationen) dass das Modell räumlich nicht gut generalisieren kann. Der Grund dafür liegt möglicherweise in einer zu geringen Datenmenge. Gleichzeitig liegt die Performance der Zufallszahl-Modelle sowohl In-Sample als auch Out-of-Sample gleichauf mit den Environmental bzw. Timeseries Features Modellen. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass keine echte Entity Awareness vorliegt, sondern die Charakteristika lediglich als eindeutige Identifikatoren fungieren. Es bedarf also noch weiterer Forschung, um aussagekräftigere statische Input-Features zu finden, mit denen Entity Awareness erreicht werden kann.

Vortrag 22.2 (ID 318)

Entwicklung eines globalen Modells für kurzfristige Grundwasserstandsvorhersagen unter Anwendung des Temporal Fusion Transformers

*Alexander Schulz², Stefan Kunz¹, Maximilian Nölscher¹, Maria Wetzel¹,
Stefan Broda¹, Felix Biessmann²*

¹: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Deutschland

²: Berliner Hochschule für Technik (BHT)

Kontakt: Stefan.Kunz@bgr.de

Für die Vorhersage von Grundwasserständen werden zunehmend Ansätze des maschinellen Lernens eingesetzt. Dabei ist die Entwicklung eines Modells für eine einzelne Messstelle derzeit Stand der Technik (lokales Modell). Eine hohe Prognosegüte kann mit lokalen Modellen erreicht werden, jedoch ist die Übertragung auf eine Vielzahl von Messstellen mit diesem Ansatz nicht möglich. Globale Modelle erlauben hingegen das Training und die Vorhersage an mehreren Messstellen gleichzeitig. Mit dieser Modellklasse können dynamische (z. B. meteorologische Eingangsgrößen) und statische (z. B. hydro(geo)logische

Standorteigenschaften) Variablen für die Grundwasserstandsvorhersage berücksichtigt werden. So können globale Modellansätze, insbesondere bei großen Trainingsdatensätzen, verlässliche Vorhersagen an Messstellen liefern, die ähnliche Standorteigenschaften aufweisen wie die im Training verwendeten Messstellen (Generalisierung). Zusätzlich bieten sie rechentechnische Skalierungsvorteile, da nur ein Modell trainiert und für ein größeres Gebiet angewendet werden muss.

In diesem Beitrag wird ein globales Modell für die kurzfristige Vorhersage (bis zu 12 Wochen) von Grundwasserständen vorgestellt. Dazu wurde der Temporal Fusion Transformer (TFT) verwendet, bei dem rekurrente neuronale Netze mit einem sogenannten Attention-Mechanismus kombiniert werden. Modellansätze, die auf dem TFT basieren, bieten zusätzlich die Möglichkeit, die Bedeutung einzelner Eingangsgrößen für die Modellvorhersage zu erfassen.

Der von uns verwendete Datensatz umfasst ca. 9900 Messstellen aus ganz Deutschland mit Grundwasserständen von 1990 bis 2016 (ca. 8 Millionen Messwerte). Neben den Grundwasserständen wurden für jede Messstelle Variablen abgeleitet, die einen relevanten Einfluss auf den Grundwasserstand haben. Als Modelleingangsgrößen dienten meteorologische (z. B. Niederschlag, Temperatur), hydrogeologische (z. B. Grundwasserneubildung), bodenkundliche (z. B. Bodentextur) und räumliche Variablen (z. B. Entfernung zum nächsten Fließgewässer). Mit Hilfe der aus den TFT-Modellen berechneten Variablen Gewichte und dem Eliminieren verschiedener Eingangsgrößen wurde zusätzlich überprüft, welche Eingangsvariablen für die Vorhersage von Grundwasserständen geeignet sind und welche zu keiner Verbesserung der Vorhersagen führen.

Über alle 2500 Testmessstellen hinweg konnte mit dem TFT ein Median NSE von 0.56 für die 12-Wochen-Vorhersage erreicht werden, wobei etwa 30 % der Testmessstellen einen NSE von über 0.7 für die 12-Wochen Vorhersage aufwiesen. Die Analysen haben weiterhin ergeben, dass wichtige Eingangsgrößen für die Prognosegüte des globalen Modells neben den historischen Grundwasserständen und dem Niederschlag auch die Standardabweichung der Grundwasserstände der jeweiligen Messstellen sowie der hydrogeologische Großraum sind.

ML-basierte Ersatzmodelle in der Kalibrierung und Unsicherheitsberechnung aufwändiger Modelle der gesättigt-ungesättigten Untergrundströmung

Olaf Cirpka¹, Jonas Allgeier²

¹: Universität Tübingen, Deutschland

²: BoSS Consult GmbH, Stuttgart, Deutschland

Kontakt: olaf.cirpka@uni-tuebingen.de

Physikalisch basierte Modelle der variable gesättigten Untergrundströmung, beruhend auf der Richards-Gleichung, sind rechnerische sehr aufwändig und erfordern viele Parameter. Dies schränkt die Anwendung traditioneller Ensemble-basierter Methoden für die Konditionierung der Parameter durch Messungen (stochastische Kalibrierung) ein. Wir überwinden die damit verbundenen Probleme durch den Einsatz von Ersatzmodellen, die Methoden des maschinellen Lernens verwenden. Hierbei kommen gegenwärtig Gaußsche Regressionsmodelle (GPR) und eine logistische Parametertransformation zum Einsatz. Mit einer Anfangsprobe von 120 physikalisch-basierten Modellläufen starten wir ein Ersatzmodell-unterstütztes Kalibrierungsverfahren. In jedem Zyklus untergehen das/die Ersatzmodell(e) einer neuen Kalibrierung, werden 10000 Perturbationen existierender Parametersätze des vollständigen Modells vorgeschlagen und hiervon 39 Punkte im Parameterraum mittels des/r Ersatzmodells/e ausgewählt, die mit 11 weiteren Punkten aus einer Halton-Sequenz ergänzt werden, sodass schließlich 50 neue Parameterkombinationen für physikalisch-basierte Modellläufe bestehen, die auf einem Computercluster parallel durchgerechnet werden.

Beim Vorschlag der Perturbationen werden Plausibilitätskriterien (z. B. die Richtung der Grundwasserströmung an Festpotenzialrändern) verwendet, für die ebenfalls GPR-basierte Ersatzmodelle aufgestellt werden. Neue Punkte im Parameterraum werden generiert, in dem die bestehenden Läufe des vollständigen Modells bezüglich Ihrer Fähigkeit, die Messdaten zu reproduzieren, gereiht werden. Je besser die Performance, umso wahrscheinlicher wird dieser Parametersatz als Startpunkt für eine Perturbation ausgewählt. Die Perturbation beinhaltet eine zufällige Schrittweite und eine zufällige Richtung im Parameterraum, wobei die Richtung des stärksten Abfalls der Zielwertfunktion berücksichtigt wird. Die vorgeschlagenen Punkte werden dann bezüglich eines kombinierten Kriteriums sortiert, das die vom Ersatzmodell prognostizierte Verbesserung der Zielwertfunktion und den Abstand zu bestehenden Punkten im Parameterraum berücksichtigt.

Diese Ersatzmodell-unterstützte globale Methode der Parameterschätzung führt zu einem Ensemble von vollständigen Modellläufen, die den gesamten plausiblen Parameterraum erfüllt und in der Nähe der identifizierten Optima eine höhere Dichte aufweist. Dies ist eine gute Grundlage die Abschätzung der konditionierten Parameterverteilung mittels Markov-Chain Monte-Carlo (MCMC) Simulationen unter Verwendung des/r Ersatzmodells/e.

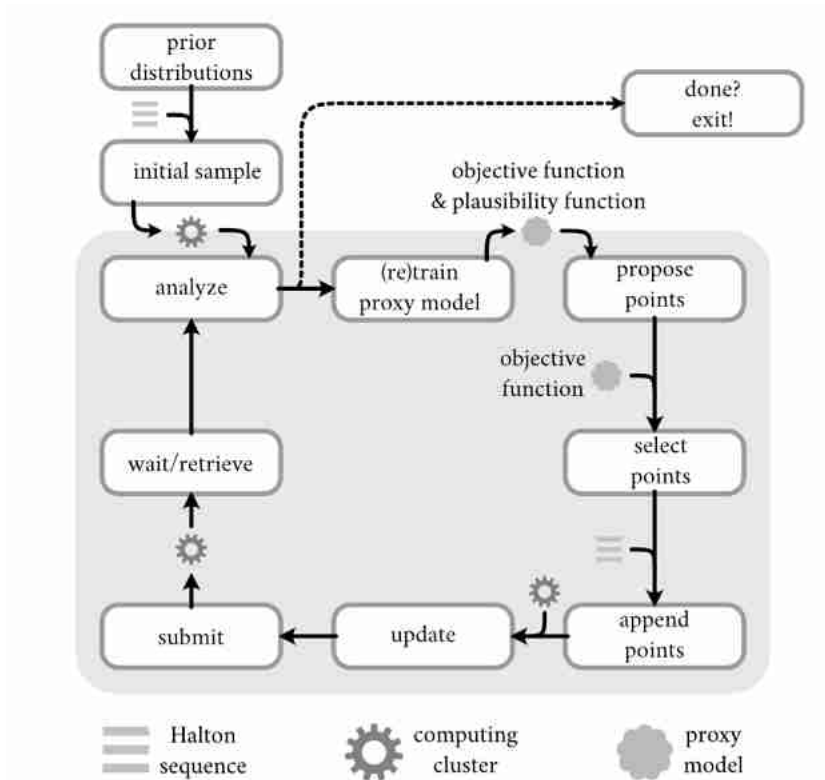


Abb. 1: Flussdiagramm zur effizienten Kalibrierung aufwändiger Modelle mit ML-basierten Ersatzmodellen.

Wir haben verschiedene Varianten dieses Verfahrens (z. B. ein Ersatzmodell je Messung versus ein Ersatzmodell für die Zielwertfunktion der Kalibrierung) anhand eines 3D variable-gesättigten Modells der stationären Untergrundströmung (24 Parameter, 51 Beobachtungen der Grundwasserstände, 5 Plausibilitätskriterien) in einem Untersuchungsgebiet in der Nähe von Tübingen getestet. Das Verfahren wurde auch mit dem Neural Posterior Estimation (NPE) Schema verglichen, in dem Modellläufe mit Parameterrealisationen aus der a-priori Verteilung verwendet werden, um ein neuronales Netzwerk zu trainieren, das die Modellparameter in Bezug zu Koeffizienten der a-posteriori Verteilung setzt. Während die geschätzten konditionierten Parameterverteilungen ähnliche Muster aufwiesen,

reproduzierten Proben aus der NPE-basierten Verteilung die Messdaten schlechter als unser GPR-basierter MCMC-Ansatz.

Vortrag 22.4 (ID 162)

Prognose von Grabenstrukturen mittels Random Forest

Jost Wessels, Mithra-Christin Hajati, Jörg Elbracht

*Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) Niedersachsen, Stilleweg 2, 30655 Hannover
Kontakt: jost.wessels@lbeg.niedersachsen.de*

Die künstliche Entwässerung in Niedersachsen, insbesondere von landwirtschaftlich genutzten Flächen, stellt einen wichtigen Einflussfaktor für den Boden- und Landschaftswasserhaushalt dar (Ertl et al. 2019, Gehrt et al. 2019). Neben den positiven Auswirkungen wie beispielsweise einer besseren Befahrbarkeit im Frühjahr und einer verbesserten Ertragsfähigkeit ansonsten vernässter Böden können Drainagesysteme auch zu veränderten Spitzenabflüssen bzw. Hochwassergefahren führen (Agroscope 2018). Des Weiteren wird die Grundwasserneubildung durch künstliche Entwässerung reduziert. Durch die Anlage von Drainageleitungen und/oder Entwässerungsgräben wird Sickerwasser zum Teil bereits vor dem Erreichen des Grundwassers in die Vorflut abgeführt und steht somit nicht mehr für die Bildung von neuem Grundwasser zur Verfügung (Gehrt et al. 2019). Zudem kann auch bereits vorhandenes Grundwasser durch künstliche Entwässerungsmaßnahmen drainiert werden. Dies ist in Niedersachsen vor allem in Niederungsbereichen der Fall, wenn die Grundwasseroberfläche in den Bereich der Drainageleitungen bzw. Gräben ansteigt. In der Bilanz kann somit teilweise nicht nur im Sommer, sondern ganzjährig eine negative Grundwasserneubildung, d. h. Grundwasserzehrung stattfinden (Ertl et al. 2019).

Im Teilprojekt „KliBoG1“, welches am Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) angesiedelt ist und durch das Niedersächsische Kompetenzzentrum Klimawandel (NIKO) gefördert wird, soll unter anderem die Datenbasis zu künstlich entwässerten Flächen für die Modellierung der Grundwasserneubildung verbessert werden. In einem ersten Schritt werden vorhandene Entwässerungsgräben, welche bislang nicht systematisch erfasst bzw. kartiert wurden, aus dem Digitalen Geländemodell (DGM1) halbautomatisiert abgeleitet. Als Prognosemodell kommt hierbei ein binäres Klassifikationsverfahren auf Basis des Random-Forest-Algorithmus zum Einsatz, welches für die einzelnen Rasterzellen eines betrachteten Gebietes mögliche Grabenstrukturen ausweist.

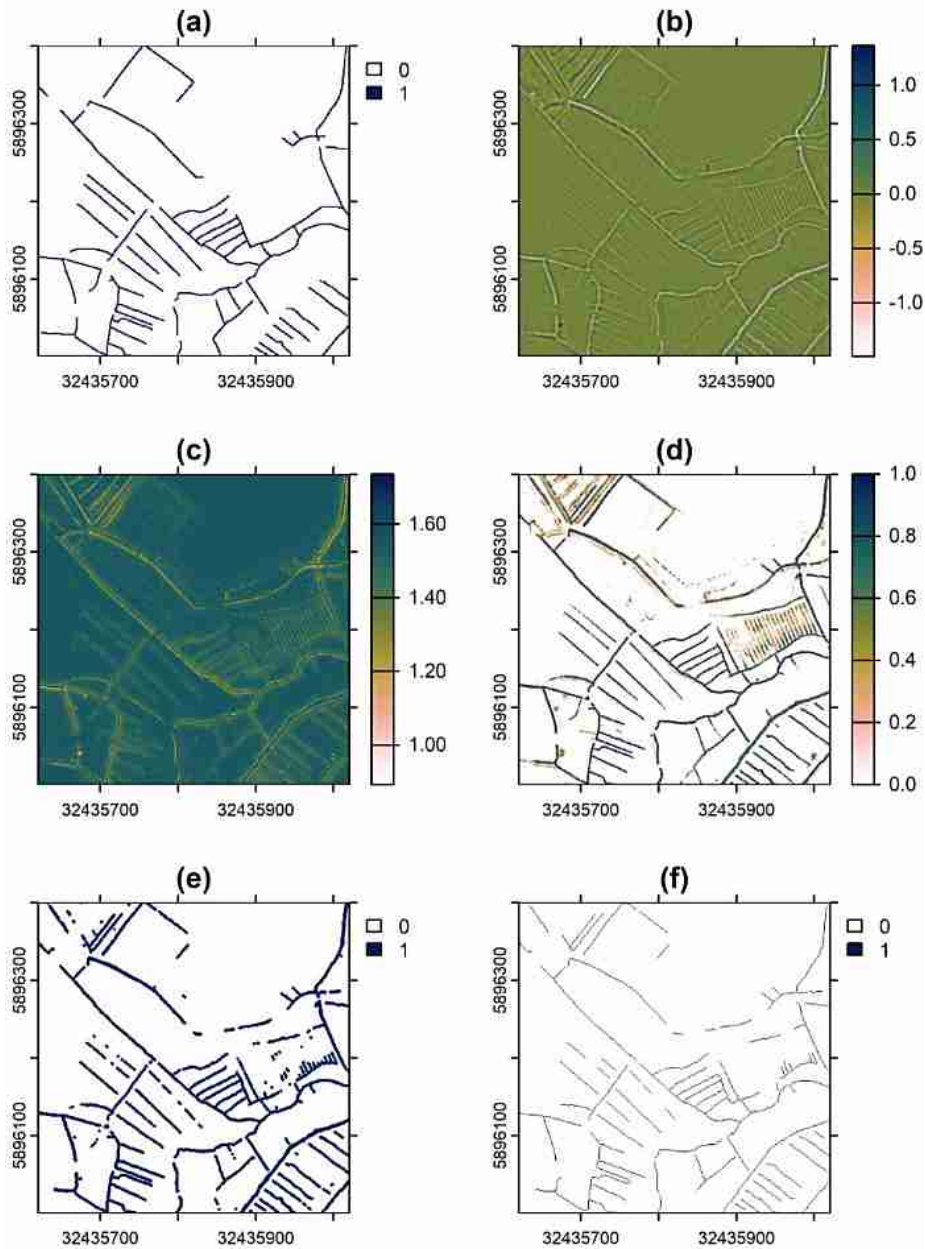


Abb. 1: Zwischenergebnisse des Prognosemodells für Grabenstrukturen. (a) Digitalisierte Gräben im Testgebiet (Trainingsgebiet rot markiert), (b) Terrainindex „Difference from mean elevation“ (DME), (c) Terrainindex „Openness“ (OPN), (d) Modellprognose mit Wahrscheinlichkeitsangabe, dass die jeweiligen Rasterzellen einer Grabenstruktur zuzuordnen sind, (e) Zwischenstand innerhalb des postprocessing nach Anwendung von Schwellenwerten, denoising-Filter u. a., (f) Ergebnis der Grabenprognose nach dem derzeitigen postprocessing.

Im Vorfeld der Modellierung werden zunächst für kleinere Trainings- und Testgebiete die vorhandenen Grabenstrukturen anhand von vorliegenden Gewässernetzen sowie von Luftbildern und dem DGM1 möglichst exakt digitalisiert und an das Raster des DGM1 angepasst (Abb. 1a). Anschließend werden verschiedene Terrain-Indices, z. B. zur Ermittlung lokaler Vertiefungen (difference from mean elevation, DME, Abb. 1b) oder der kleinräumigen „Offenheit“ des Geländes (Openness, OPN, Abb. 1c) berechnet. Anhand der digitalisierten Gräben und der ermittelten Terrainindices werden Trainingsdatensätze für das Prognosemodell erstellt. Bei der Anwendung des Modells auf ein Testgebiet wird zunächst die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu einer Grabenstruktur für jede Rasterzelle ausgewiesen (Abb. 1d). Anschließend werden die Ergebnisse mittels verschiedener Auswahlkriterien und Filter nachprozessiert bzw. bereinigt (Abb. 1e), sodass eine möglichst gute Prognose der tatsächlich vorhandenen Grabenstrukturen im Testgebiet entsteht (Abb. 1f).

Durch die Methodik können bereits bekannte Gräben in ihrer Lage überprüft und Informationen über bislang nicht kartierte Entwässerungsstrukturen gewonnen werden.

Agroscope (Hrsg.) (2018): Einflüsse landwirtschaftlicher Drainage auf den Wasserhaushalt, auf Nährstoffflüsse und Schadstoffaustrag – eine Literaturstudie. Agroscope Science 73, Zürich.

Ertl, G., Bug, J., Elbracht, J., Engel, N. & Hermann, F. (2019): Grundwasserneubildung von Niedersachsen und Bremen – Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA18. Geobericht 36, Hannover, LBEG.

Gehrt, E., Bug, J. & Waldeck, A. (2019): Potentielle Drängebiete in Niedersachsen auf Grundlage der Bodenkarte von Niedersachsen im Maßstab 1 : 50.000 (BK 50). Geofakten 34, Hannover, LBEG.

Vortrag 22.5 (ID 189)

Die Eignung von Modellen des maschinellen Lernens für die gekoppelte Vorhersage von Grundwasserständen und Grundwasserversalzung

Fabienne Doll¹, Stefan Broda², Benedikt Heudorfer¹, Stefan Kunz², Martin Thullner², Maria Wetzel², Tanja Liesch¹

¹: *Karlsruher Institut für Technologie, Deutschland*

²: *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe*

Kontakt: Fabienne.Doll@kit.eu

Besonders in Gebieten, die von geogener Grundwasserversalzung betroffen sind, ist die zukünftige Entwicklung der Grundwasserstände von großer Bedeutung, da ein Absinken der Grundwasserstände zur Verschärfung der Versalzungsproblematik führen kann. Zunehmender Wasserbedarf und verminderte Grundwasserneubildung können in Gebieten mit salinarem Tiefenwasseraufstieg, zur Anhebung der Süß-/Salzwassergrenze führen. In Küstennähe sorgen steigende Meeresspiegel für eine Verschärfung der Versalzungsproblematik durch Meerwasserintrusion. Ein angepasstes Grundwassermanagement wird

angesichts des Klimawandels immer bedeutender werden. Um die nachhaltige Nutzung der Grundwasserressourcen zu gewährleisten, werden Werkzeuge benötigt, welche die entsprechenden Entscheidungsgrundlagen liefern. Eine Möglichkeit hierzu könnten Modelle des maschinellen Lernens sein, welche die zukünftige Entwicklung von Grundwasserständen und Versalzung vorhersagen.

Der Einsatz von maschinellen Lernmodellen für die single-target Vorhersage von Grundwasserständen ist seit einigen Jahren Gegenstand in der Wissenschaft. Nach Kenntnis der Autoren wurden bisher jedoch noch keine maschinellen Lernmodelle für die gekoppelte Vorhersage von Grundwasserständen und Versalzung entwickelt. Unser neuentwickelter konzeptioneller Ansatz für die gekoppelte Grundwasserstands- und Versalzungsvorhersage basiert darauf, dass die Versalzungsproblematik maßgeblich durch die Entwicklung der Grundwasserstände beeinflusst wird.

Mithilfe unserer Modelle wird in Schritt 1 zunächst der Grundwasserstand vorhergesagt. In Schritt 2 dient der vorhergesagte Grundwasserstand als Input zur Vorhersage der elektrischen Leitfähigkeit (als Proxy/Indikator für die Versalzung). Weitere Inputs für die Vorhersagen (in beiden Schritten) sind beispielsweise meteorologische Größen (Niederschlag, Temperatur) oder auch Meeresspiegel und Förderdaten aus nahe gelegenen Förderbrunnen.

Das Ziel unserer Untersuchungen ist es, die Eignung der Modelle für die Vorhersage von Grundwasserständen und Versalzung zu analysieren. Außerdem sollen die Untersuchungen eine Einschätzung zulassen, inwiefern sich die vorhandenen Grundwassermonitoringdaten zur Modellierung mit Methoden des maschinellen Lernens verwenden lassen. Zusätzlich wollen wir überprüfen, ob die Modelle auch für die gekoppelte Vorhersage von anderen hydro(geo)logischen Parametern eingesetzt werden können. Ein weiterer Einsatzbereich wäre beispielsweise die simultane Vorhersage von Flusspegeln und flusssnahen Grundwasserständen.

Vortrag 22.6 (ID 148)

Bestimmung der Anhydrit- und Gipslöslichkeit durch neuronale Netze für die Modellierung gekoppelter Prozesse beim Quellen von Ton-Sulfat-Gestein

Reza Taherdangkoo, Christoph Butscher

*TU Bergakademie Freiberg (TUBAF), Ingenieurgeologie und Umweltgeotechnik, Deutschland
Kontakt: christoph.butscher@ifgt.tu-freiberg.de*

Das Quellen von Ton-Sulfat-Gesteinen ist ein gefürchtetes Phänomen, das den Erfolg geotechnischer Projekte im Tunnel-, Straßen- und Brückenbau sowie bei

Geothermiebohrungen gefährden kann. Die Ursachen für das Quellen sind das physikalische Quellen des Tons in Kombination mit dem chemischen Quellen durch die Umwandlung von Anhydrit (CaSO_4) in Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Letzteres geschieht durch die Auflösung von Anhydrit und die anschließende Ausfällung von Gips, wobei eine Volumenzunahme von rund 60 % stattfindet. In unserer Arbeit verwenden wir Feed-Forward Neural Networks (FFNN) und Cascade-Forward Neural Networks (CFNN), die mit Levenberg-Marquardt (LM) und Bayesian Regularization (BR) Algorithmen trainiert wurden, um die Löslichkeit von Anhydrit und Gips in der wässrigen Phase zu bestimmen. Die Modelle basieren auf experimentellen Daten zur Sulfatlöslichkeit aus der Literatur. Der kompilierte Datensatz enthält die Löslichkeiten von Calciumsulfat aus 25 Publikationen und enthält insgesamt 1.912 experimentelle Datenpunkte. Er deckt einen großen Bereich von Temperatur- und Druckbedingungen sowie verschiedene pH-Werte und Ionenkonzentrationen im Formationswasser ab. Eine zufällige Stichprobe von 1.532 Datenpunkten (80 %) wurde für die Trainingsphase verwendet, die restlichen Daten wurden für die Analyse der Zuverlässigkeit und Robustheit der Netzwerkmodelle verwendet. Unsere Ergebnisse zeigen, dass das FFNN-BR-Modell das genaueste Modell für die Regressionsaufgabe ist ($R^2 = 0,97$ %). Ein Vergleich mit dem Pitzer-Ionen-Interaktionsmodell und anderen publizierten datenbasierten Modellen zeigt, dass das FFNN-BR Modell die Löslichkeit der Sulfate auch in sauren und salzhaltigen Lösungen sehr genau bestimmt und als alternatives Werkzeug zur Bestimmung der Löslichkeit von Anhydrit und Gips verwendet werden kann. In einem nächsten Schritt soll das datenbasierte Modell in eine numerische Modellierung gekoppelter Prozesse integriert werden, um die enormen Rechenzeiten einer komplexen thermo-hydro-mechanisch-chemischen (THMC) Modellierung von Quellprozessen in Ton-Sulfat-Gesteinen für geotechnische Projekte effektiv zu verkürzen.

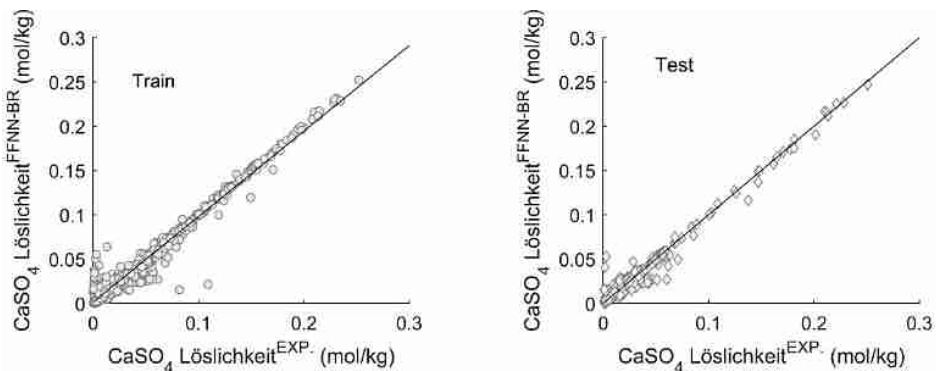


Abb. 1: Experimentell bestimmte versus mit dem FFNN-BR Modell vorhergesagte Sulfatlöslichkeit. Das Bestimmtheitsmaß der Regression (R^2) ist 0,97 %.

Einbeziehung räumlicher Informationen für die Regionalisierung von hydrogeologischen Parametern in maschinellen Lernmodellen

Marc Ohmer, Fabienne Doll, Tanja Liesch

Karlsruhe Institut für Technologie, Deutschland

Kontakt: marc.ohmer@kit.edu

Die Modellierung räumlich kontinuierlicher Daten aus punktuellen Messungen spielt eine entscheidende Rolle, da sie Einblicke in geografische Zusammenhänge bietet und eine solide Grundlage für fundierte Entscheidungen bildet. Dies gilt insbesondere für Grundwasser, das nur an wenigen Stellen wie Brunnen und Quellen zugänglich ist. Diese räumlichen Vorhersagen sind oft von entscheidender Bedeutung für die Risikobewertung und die wasserwirtschaftlichen Entscheidungsprozesse.

Traditionell kommen bei dieser Aufgabe deterministische oder geostatistische Interpolationsverfahren zum Einsatz. Diese basieren hauptsächlich auf den XY-Koordinaten der Messstellen und berücksichtigen die geografische Lage sowie die räumliche Autokorrelation der Zielwerte. Allerdings stoßen klassische Interpolationsverfahren an ihre Grenzen, wenn es darum geht, andere räumlich korrelierte und flächenhaft verfügbare Kovariablen einzubeziehen, um die Vorhersagegenauigkeit zu erhöhen.

Im Gegensatz dazu bieten maschinelle Lernverfahren (ML) viele Möglichkeiten, räumlich kontinuierliche Kovariablen wie Geländemodelle, meteorologische Daten, Landnutzung oder geologische Karten in die Vorhersagen einzubeziehen. Dabei erlernen sie die Zusammenhänge zwischen diesen Kovariablen und dem Zielwert, ohne automatisch die räumliche Autokorrelation der Daten zu erfassen. Die Eingabe der räumlichen Information erfolgt oft, indem die XY-Koordinaten als Kovariablen verwendet werden. Oft führt dies aber zu Artefakten in den Vorhersagen, da die Modelle dadurch die komplexen räumlichen Abhängigkeiten und Muster in den Daten nicht ausreichend erfassen können. Dies kann zu ungenauen Vorhersagen führen, insbesondere bei komplexen räumlichen Strukturen und starker Autokorrelation. Hier ist die Einbeziehung weiterer räumlicher Information in Form von Kovariablen erforderlich, um genauere Vorhersagen zu ermöglichen. Die Integration von Standortinformationen in ML-Modelle ist jedoch keine triviale Aufgabe. Es existieren verschiedene Ansätze, wie die Berechnung von Abständen zu bestimmten räumlichen Punkten, die Verwendung von euklidischen Distanzmatrizen oder die Transformation von Koordinaten, um dem Modell die räumliche Struktur näherzubringen.

Unsere Studie zielt darauf ab, erstmals die am häufigsten angewandten räumlichen Integrationsmethoden sowohl quantitativ als auch qualitativ zu analysieren und systematisch zu

vergleichen. Dies wird anhand eines umfangreichen Datensatzes von Nitratmessungen im Grundwasser für Baden-Württemberg demonstriert. Dabei setzen wir ein Random Forest-Modell ein und führen Vergleiche mithilfe von Kreuzvalidierung, Kriging-Referenzmodellen und visueller Plausibilitätsbewertung durch.

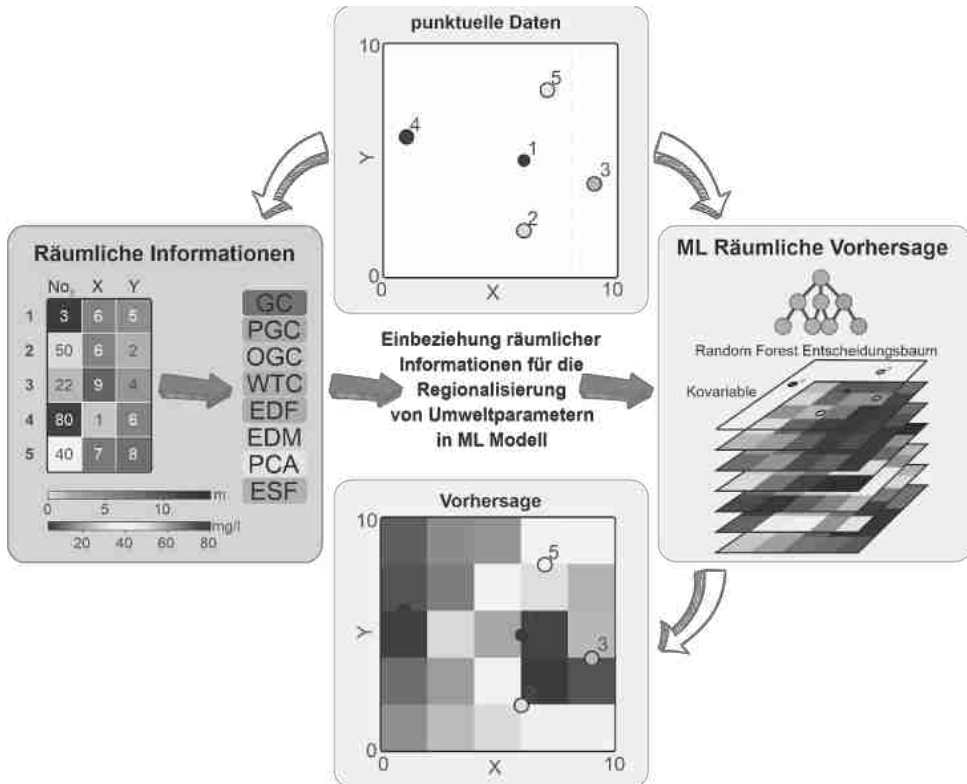


Abb. 1: Prozessvisualisierung der Integration räumlicher Informationen in maschinelle Lernmodelle zur Berücksichtigung der räumlichen Autokorrelation

Deep reinforcement learning: a new avenue to support groundwater management

Philipp Höhn

Linksniederrheinische Entwässerungs-Genossenschaft

Kontakt: hoehn.p@lineg.de

Computational hydrogeology for near-real time groundwater management through flow simulation faces challenges from predictive uncertainties and runtime requirements. Repeated forward simulations easily require distributed compute resources. Groundbreaking successes of other fields in system control using deep reinforcement learning (RL) foreshadow a new avenue for groundwater management at low runtimes using pre-optimized strategies.

Synthetic management tasks were formulated as simulated groundwater flow environments in a RL framework. They are available in the open-source resource FloPyArcade (github.com/philipphoeHN/flopyarcade) alongside reproducible control benchmarks and more tasks. It supports free and easy access to run the environments and to couple arbitrary control mechanisms. The environments expose state observations along with rewards resulting from taken actions.

Benchmarks in control performance were derived for three environments – from repeated operation through (a) random, (b) human-operated and (c) reinforcement-learned control of the systems using deep neural networks as policy models.

In these environments, actions are discrete, and reward is a function of alignment of a travelled particle trajectory with the straightest path towards the eastern domain boundary – i.e., most reward results from the shortest eastwards particle travel. An operator receives reward per time step and accumulates it over the total number of time steps as cumulative total reward. The environments operate with FloPy, an open-source library in the Python programming language to interface with MODFLOW-based groundwater models.

Given the state observations and obtained rewards, a deep neural network was optimized (i.e., trained) for each benchmarked environment in a RL framework to maximize total cumulative reward. Training used an openly available RL implementation (Ray RLlib) of dueling double deep Q-learning (D3QN), an off-policy RL algorithm, along with distributed prioritized experience replay (Ape-X). Fully connected feed-forward neural networks were chosen as policy models, using an openly available implementation (TensorFlow). Their architecture was comparably simple with two consecutive hidden layers of 256

neurons each and architectural additions for the advantage and state value model of another 256 neurons each – generally using the hyperbolic tangent activation function.

In the three tested simulated environments, the optimized policy models consistently outperformed random and human-operated control – while only requiring an average runtime of 2.6 ms to infer a preferred action. They surpassed the superiority of experienced human control over control from random actions in terms of average cumulative reward by 30.8 %, 25.1 % and 18.4 %, respectively (Figure 1).

In conclusion, (a) reformulating management objectives as a reward function and (b) coupling them to optimization based on reinforcement learning using deep neural networks as policy models seems to be a novel pathway for computational hydrogeology well worth exploring further.

Groundwater regulation in the subsidence-impacted former coal-mining district of the Lower Left Rhine region comprises many non-isolated drainage operations. They will provide future inspiration for simulated environments (a) to test performance in more complex non-synthetic tasks, (b) to experiment with continuous action spaces and (c) to benchmark against established rule-based, real-world operation.

Poster 22.3 (ID 221)

KI-basierte Bewertung des Denitrifikationspotenzials im Grundwasser

Julian Xanke¹, Thilo Fischer¹, Marc Ohmer², Tanja Liesch²

¹: TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruher Straße 84, 76139 Karlsruhe

²: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW), Adenauerring 20b, 7613 Karlsruhe

Kontakt: julian.xanke@tzw.de

Die räumliche Vorhersage der Nitratverteilung im Grundwasser ist von entscheidender Bedeutung, um gezielte Maßnahmen zur Reduzierung der Nitratreinträge zu entwickeln und eine effiziente Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen sicherzustellen. Bei der natürlichen Reduzierung der Nitratkonzentration spielen Denitrifikationsprozesse eine zentrale Rolle. Um die Vorhersage der Nitratkonzentration im Grundwasser zu verbessern, werden zunehmend maschinelle Lernverfahren eingesetzt, ergänzend zu deterministischen und geostatistischen Interpolationsverfahren sowie statistischen und numerischen Modellen. In dieser Studie wird die Nitratkonzentration im Grundwasser für die Bundesländer Baden-Württemberg und Niedersachsen mit Hilfe von Random Forest Modellen vorhergesagt, jeweils einmal nur auf Basis von räumlich verfügbaren Daten wie geologischen und hydrogeologischen Einheiten, Landnutzung, Grundwasserneubildung, etc. und einmal mit

zusätzlich gemessenen Wasserqualitätsparametern, die einen möglichen Einfluss auf Denitrifikationsprozesse haben (z. B. Eisen, pH-Wert, DOC und weitere). Gleichzeitig wird eine Gesamtbewertung durchgeführt, in die Aspekte wie geologische und hydrogeologische Bedingungen, Landnutzung, Grundwasserneubildung und Indikatoren für Denitrifikationsprozesse einfließen. Diese Gesamtbewertung wird mit Explainable AI durchgeführt. Dabei werden die Beiträge der gemessenen Grundwasserparameter und der räumlichen Daten zur Nitratverteilung im Grundwasser über sogenannte SHAP-Werte quantifiziert und nachvollziehbar dargestellt. Auf diese Weise können die Haupttreiber für die spezifische Entwicklung der Nitratgehalte identifiziert und der Einfluss einzelner Faktoren wie Denitrifikation, Nitrifikation, Assimilation und anderer Prozesse besser verstanden werden. Die Ergebnisse zeigen, dass für Baden-Württemberg das Modell mit allen gemessenen Wasserqualitätsparametern und verschiedenen Fernerkundungsdaten nicht wesentlich bessere Vorhersagen liefert als das Modell ohne Wasserqualitätsparameter. Im Gegensatz dazu liefert das Modell ohne zusätzliche Wasserqualitätsparameter für Niedersachsen deutlich schlechtere Ergebnisse. Dies lässt darauf schließen, dass Denitrifikationsprozesse und die sie bestimmenden Wasserqualitätsparameter in Baden-Württemberg eine vergleichsweise geringere Bedeutung für den Nitratgehalt im Grundwasser haben, möglicherweise aufgrund bereits ausgeschöpfter Denitrifikationspotenziale. Insgesamt ermöglicht diese Methode eine vertiefte Analyse der Nitratverteilung im Grundwasser, die über die Identifizierung von Denitrifikationspotenzialen hinausgeht und eine datengestützte Entscheidungsfindung in Bezug auf den Grundwasserschutz ermöglicht.

Poster 22.4 (ID 326)

Schätzung der Grundwasservulnerabilität gegenüber Pflanzenschutzmitteleinträgen mittels Random Forest und Künstlicher Neuronaler Netze

Anne-Karin Cooke¹, Sweety Mohanty², Felix Joger¹, Stefan Broda¹

¹: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin

²: GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, Kiel

Kontakt: anne-karin.cooke@bgr.de

In einem vom Umweltbundesamt (UBA) geförderten Forschungsprojekt untersucht die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) die Vulnerabilität des Grundwassers gegenüber aus der Landwirtschaft stammenden Pflanzenschutzmittelwirkstoffen (PSM) und ihren Metaboliten in Deutschland. Hierfür wurden Grundwasserqualitätsdaten der Länder sowie zum Teil der Wasserversorger zusammengeführt und aufbereitet. Der Datensatz beläuft sich auf über 26.000 Grundwassermessstellen, die in der Summe auf über

500 verschiedene Pestizide beprobt werden. In diesem Kontext ist eine solch umfassende nationale Datenbank beispiellos. Angesichts dieses umfangreichen Datensatzes zielt dieses Projekt darauf ab, bisher unbekannte, relevante treibende Faktoren für die PSM-spezifische Vulnerabilität des Grundwassers und deren Wechselwirkungen mittels datengetriebener Verfahren (Maschinelles Lernen) zu identifizieren. Unterirdische (Boden, Hydrogeologie) und oberirdische (Meteorologie, Landnutzung, Anbaufolgen, landwirtschaftliche Praktiken) Standortmerkmale und physikalisch-chemische Eigenschaften (Mobilität, Persistenz) von Pestiziden sollen untersucht werden.

Zuerst werden vorbereitende Auswertungen vorgestellt, welche die Stärken und Schwächen des Datensatzes im Hinblick auf Heterogenität und Repräsentativität beleuchten. Konkrete Herausforderungen sind: 1) Die PSM-Konzentrationen sind stark links-zensiert, da über 90 Prozent der Beobachtungen unter die teilweise multiplen Bestimmungsgrenzen (LOQ) fallen. 2) Bei räumlichen Prädiktoren ergibt sich eine Abwägung zwischen flächendeckenden Daten, z. B. geologischen Karten gegenüber (teilweise höher aufgelösten) Punktdaten am Standort. Der genaue Einflussradius (Grundwassereinzugsgebiet) ist für die meisten Standorte unbekannt. 3) Die zeitliche Datenabdeckung der PSM-Messungen fällt hinter der räumlichen zurück (pro Stoff und Messstelle typischerweise kurze Zeitreihen jährlicher Messungen).

Um diesen Punkten zu begegnen, werden die folgenden Lösungsvorschläge getestet und miteinander verglichen: 1 a) Um die zensierten PSM-Konzentrationen zwischen Standorten und Zeitpunkten vergleichbar zu machen, werden die Konzentrationen als Ränge gemäß den nicht-parametrischen Kaplan-Maier-Perzentilen kodiert und im Random-Forest-Modell (RF) als Zielvariable verwendet. 1 b) Ein weiterer Ansatz ist es, das künstliche neuronale Netz (KNN) als probabilistisches convolutional neural net (CNN) aufzusetzen, sodass die Schätzung der Likelihoodverteilung der PSM-Konzentrationen im Vordergrund steht. Bayes'sche Ansätze sind in der Regel robuster gegen Overfitting, da sie die Unsicherheit der Parameter berücksichtigen, wobei der erhöhte Rechenaufwand abzuwägen ist. 2) Der RF Regressor wird auf den bundesweiten Punktdatensatz (gemittelt innerhalb eines 1km-Radius) sowie das KNN auf Rasterdaten in einem Pilotgebiet trainiert. Letzteres ermöglicht die Einbeziehung größerer räumlicher Zusammenhänge. 3) Neben einem rein räumlichen Modell wird ein Hybridmodell getestet, das sowohl räumliche Merkmale und abgeleitete aggregierte Zeitreihenmerkmale enthält.

Erkenntnisse in Bezug auf diese drei Aspekte sollen anhand von Modellergebnissen ausgewählter Stoffe bundesweit und im Pilotgebiet dargestellt und diskutiert werden. Die Modellansätze werden hinsichtlich der Gewichtung der Kovariate (Feature importance) verglichen, wobei Ansätze zur Interpretierbarkeit (SHAP-values) berücksichtigt werden.

23 Hydrogeologie in der Praxis – Fallbeispiele der Staatlichen Geologischen Dienste

21.03.2024, 13:30 - 15:00, Konferenzraum 1

Tobias Geyer (LGRB, RP Freiburg)

Timo Spörlein (Bayerisches Landesamt für Umwelt)

Vortrag 23.1 (ID 193)

Geodatenermittlung für den Aufbau des hydrogeologischen Strukturmodells für das Grundwassermodell Lausitz - Brandenburgischer Teil

*Birgit Futterer, Marlen Knoblauch-Saßenscheidt, Sophia Rütters,
Sebastian Donke*

*Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR), Deutschland
Kontakt: birgit.futterer@lbgr.brandenburg.de*

Im Zeitraum von 150 Jahren ist im Lausitzer Revier durch den Braunkohlenbergbau eine hydrogeologische Kulturlandschaft entstanden, welche in höchstem Maße menschlicher Steuerung unterliegt. Mit der Verabschiedung des Kohleverstromungsbeendigungsgesetzes hat ein Entschließungsantrag explizit die wasserwirtschaftlichen Belange hierzu aufgegriffen. Ein neu aufzubauendes „Grundwassermodell Lausitz“ (GWM-L) dient als maßgebliche Grundlage und Kernelement für die länderübergreifende Grundwasserbewirtschaftung in Sachsen und Brandenburg.

Neben hydrologischen Frage- und Zielstellungen, die auch die Kopplung von Bodenwasserhaushaltsmodellen mit Grundwasserströmungsmodellen unter Berücksichtigung von Klimaveränderungen mit einbezieht, ist eine wesentliche Grundlage der Neu-Aufbau eines gemeinsamen hydrogeologischen Strukturmodells, welches in der Verantwortung der geologischen Dienste der jeweiligen Länder steht. Mit dem hydrogeologischen Strukturmodell wird die Stratigrafie und Lithologie der Grundwasserstockwerke hinsichtlich ihrer räumlichen Verteilung beschrieben. Es ermöglicht die Ableitung der benötigten Materialparameter (Durchlässigkeitsbeiwerte) im hydrologischen/geohydraulischen Modell. Es

betrachtet das definierte Untersuchungsgebiet bzw. den Modellraum, welches größer als der hydrologische Bilanzraum und das Aussagegebiet sind ([1], [2]).

Auch wenn die Methodik zur Erarbeitung eines solchen grundsätzlich keine neue Arbeitsweise darstellt [3], so erfordert die Komplexität des Modells ein schrittweises Abarbeiten und auch den Einsatz modernster Modellierwerkzeuge. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass durch die aktiven hydrologischen/geohydraulischen Regionalmodelle der Bergbaubetreiber hydrogeologische Strukturmodelle in regionalen Bereichen des zukünftigen GWM-L bereits vorliegen und möglichst integriert werden sollen. Integration heißt in diesem Fall zunächst: Verwenden der vorliegenden Daten. Zu beachten ist, dass alle Regionalmodelle in ihrem Aufbau als grundsätzlich heterogen anzusehen sind, von der Anzahl der Modellschichten bis zur vertikalen Begrenzung sind nur teilweise Schnittmengen vorhanden.

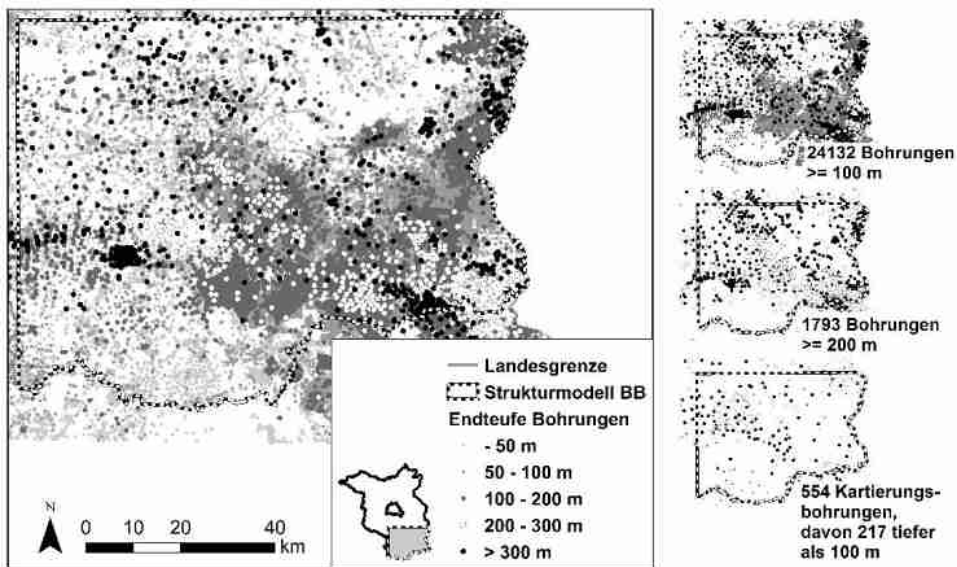


Abb. 1.: Modellgebiet Lausitz - Brandenburgischer Teil.

Das strukturgeologische Modell muss demnach die geologische Situation für ein Gebiet hinreichend genau darstellen. Es sollten die Tiefenbereiche bis 200 m detailliert dargestellt werden. Für ein länderübergreifendes Modell wird es für Brandenburg erforderlich sein, auch in tieferen Bereich zu modellieren. Das LBGR sieht für Brandenburg die Zielstellung bei dem sog. Leithorizont (Basis der Buchhainschichten). Die tieferliegenden stratigraphischen Horizonte, Spremberg- Formation, Cottbus-Formation und Rupel-Formation sind auf Grund der geringen Aufschlussdichte nur sehr grob in ihrer strukturgeologischen Ausprägung zu modellieren.

Mit dem Beitrag wird die Grundlagenermittlung der geologischen Daten vorgestellt, die Heterogenität der Daten dargestellt und Methoden präsentiert, um das Ziel des Aufbaus eines (digitalen, dreidimensionalen) hydrogeologischen Strukturmodells zu erreichen.

[1] FH-DGGV Leitfaden 2010, Hydrogeologische Modelle - Bedeutung des hydrogeologischen a priori – Wissens

[2] Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW W 107 (A) Februar 2016 Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodelle in Wassergewinnungsgebieten

[3] Hydrogeologie – Grundlagen und Methoden; Regionale Hydrogeologie: Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Berlin, Sachsen-Anhalt, Sachsen, Thüringen, Jordan und Weder, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart 1995

Vortrag 23.2 (ID 180)

Aufbau eines Grundwassermodells für die länderübergreifende Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen in der Hauptstadtregion Berlin-Brandenburg

Johannes Birner¹, Kerstin Kernbach¹, Lambertus Monninkhoff²

¹: Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt Berlin

²: Berliner Wasserbetriebe

Kontakt: kerstin.kernbach@senmvku.berlin.de

Mit dem 2020 beschlossenen Strategischen Gesamtrahmen Hauptstadtregion (SGHR) haben die Länder Berlin und Brandenburg ihre Zusammenarbeit im Bereich verschiedener Handlungsfelder intensiviert. Im Handlungsfeld „Natürliche Lebensgrundlagen und Lebensqualität“ wurde 2021 ein gemeinsames Wasserressourcenmanagement verankert. Hierbei sollen Maßnahmen zur Sicherung der Wasserversorgung und zur Verbesserung des Gewässerschutzes besser aufeinander abgestimmt und übergreifende Strategien vereinbart werden.

Neben der vertieften Zusammenarbeit der zuständigen Berliner und Brandenburger Behörden erfolgt in diesem Rahmen ein umfassender fachlicher Austausch mit den 16 Wasserversorgern aus Berlin und Brandenburg (zusammengeschlossen in der „Initiative Trinkwasserversorgung Metropolregion Berlin-Brandenburg“ – ITM). In diesem Kontext entstand die Idee zum Aufbau eines länderübergreifenden Grundwasserströmungsmodells als Grundlage für ein gemeinsames Grundwassermanagementsystem in der Hauptstadtregion.

Dieses Grundwasserströmungsmodell soll zukünftig erstmalig eine ganzheitliche Betrachtung des im Zuge des Klimawandels und des Bevölkerungszuwachses stark unter Druck geratenen Grundwasserhaushalts in der Hauptstadtregion ermöglichen. Zentraler Bestandteil ist die Modellierung der wechselseitigen Auswirkungen der Grundwasserentnahmen der Wasserversorger in der Region im Hinblick auf eine nachhaltige Bewirtschaftung der

gemeinsamen Grundwasserressourcen unter Berücksichtigung naturschutzfachlicher Belange. Auch die fachliche Beurteilung der Auswirkung unterschiedlicher Klimaszenarien auf das Grundwasserdargebot durch eine Variation der Grundwasserneubildung soll betrachtet und mögliche Maßnahmen zur Kompensation geprüft werden. Ferner entsteht eine einheitliche abgestimmte Fachgrundlage für Bewilligungsverfahren und eine Grundlage für zukünftige Detailmodelle zu geothermischen und schadstoffrelevanten Fragestellungen.

Die Erarbeitung dieses Grundwasserströmungsmodell erfolgt unter Federführung des Landes Berlins in Zusammenarbeit mit den Berliner Wasserbetrieben und in Abstimmung mit dem Land Brandenburg und den Mitgliedern der ITM. Zum Einsatz kommt die Modellierungssoftware FEFLOW.

Im ersten Schritt fand 2022 die Abstimmung des 2800 km² großen Modellraums zwischen den genannten Beteiligten statt. Im Fokus stand dabei vor allem die Erfassung von Überschneidungsbereichen Berliner und Brandenburger Entnahmen. Berücksichtigung fanden 34 Wasserwerksstandorte von insgesamt 12 verschiedenen Wasserversorgern. Weiterhin wurde die Erarbeitung eines hydrogeologischen Strukturmodells für den Modellraum weitestgehend auf Basis vorhandener Interpretationen beauftragt. Parallel dazu erfolgt die Akquise und Aufbereitung notwendiger Eingangsdaten und die Erarbeitung des Modellnetzes, welches möglichst umfassend alle wichtigen geometrischen Strukturen in erforderlicher Genauigkeit berücksichtigt. Die nächsten für 2024 geplanten Schritte sind die Parametrisierung, Implementierung der Randbedingungen und Initialisierung für den Beginn des noch nicht final festgelegten Betrachtungszeitraums. Die zunächst stationäre Modellkalibrierung wird für die zweite Jahreshälfte avisiert.

Vortrag 23.3 (ID 239)

Ausweisung tiefer Grundwasserkörper in Nordrhein-Westfalen

Dominik Wesche

Geologischer Dienst NRW

Kontakt: dominik.wesche@gd.nrw.de

Mit der Einführung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie im Jahr 2000 wurden die EU-Mitgliedsstaaten verpflichtet, das Grundwasser in einen guten mengenmäßigen und chemischen Zustand zu überführen. Der Geologische Dienst NRW (GD NRW) unterstützt seitdem das für NRW zuständige Umweltministerium (MUNV NRW) mit den dafür erforderlichen Geoinformationen zur Umsetzung der EG-WRRL.

Bereits im Jahr 2006 wurden vom GD NRW insgesamt 276 Grundwasserkörper in Bezug auf den obersten relevanten Grundwasserleiter abgegrenzt. Vor dem Hintergrund des aktuell stattfindenden Grubenwasseranstieges in den Steinkohlenrevieren an der Ruhr und in Ibbenbüren sind auch tiefe Grundwasserkörper zu bewerten, die hierdurch möglicherweise beeinflusst werden können. Tiefe Grundwasserkörper (tGWK) sind hierbei durch die Überlagerung durch mindestens einen Geringleiter charakterisiert.

Im Jahr 2019 wurde daher der GD NRW beauftragt, tiefe Grundwasserkörper im Ruhrrevier abzugrenzen. Die Lagerstätte zeichnet sich durch nach Norden einfallende Schichten des flözführenden Oberkarbons aus, die diskordant von Schichten des Mesozoikums überlagert werden. Es wurden die vorhandenen (hydro-)geologischen Daten und Untergrundmodelle ausgewertet und insgesamt fünf tiefe Grundwasserstockwerke bis in Tiefen von ca. -1.200 m NHN ermittelt: tGWK Oberkarbon, tGWK Buntsandstein, tGWK Cenoman/Turon, tGWK Haltern-/Recklinghausen-Formation und tGWK Walsum-Subformation (s. Abbildung).

Neben der räumlichen Auswertung wurden die charakterisierenden Eigenschaften der tGWK gemäß EG-WRRL in Steckbriefen erfasst. Die Ergebnisse der Gebietsausweisung für das Ruhrrevier konnten vom GD NRW zeitnah erarbeitet werden und werden seitdem vom LANUV NRW für den 3. Bewirtschaftungsplan zur Umsetzung der EG-WRRL für die Jahre 2022-2027 verwendet.

Neben dem Ruhrrevier als bedeutendstes Steinkohlenrevier in NRW ist es Zielsetzung des Umweltministeriums zukünftig auch die tiefen Grundwasserkörper in den weiteren Steinkohlenrevieren des Landes zu bewerten. Daher wurden als Nachfolgeprojekt im Jahr 2021 die tiefen Grundwasserkörper im Ibbenbürener Revier vom GD NRW erarbeitet.

Das Ibbenbürener Revier zeichnet sich durch eine tektonisch klar abgegrenzte Horststruktur aus, in der Schichten des Oberkarbons um bis zu 2.000 m emporgehoben wurden. Der Karbonhorst ragt als morphologische Erhebung deutlich aus dem mesozoischen Vorland heraus. Neben dem untertägigen Abbau von Anthrazitkohle, der bis in das Mittelalter zurückreicht (erste urkundliche Erwähnung 1492), wurde in der südöstlichen Umrandung des Karbonhorstes intensiver Bergbau nach Buntmetallerzen des Zechsteins betrieben. Der Kohlenabbau fand in Verbindung mit einer Sümpfung zuletzt bis in eine Tiefe von ca. -1.400 m NHN statt. Für die Lagerstätte sowie das hydraulisch mit ihr in Verbund stehende Vorland wurden vier tiefe Grundwasserkörper abgegrenzt: tGWK Oberkarbon, tGWK Zechstein, tGWK Muschelkalk und tGWK Unterer Malm.

Die tiefen Grundwasserkörper werden zukünftig dazu genutzt, die EG-WRRL im Ruhrrevier sowie im Ibbenbürener Revier umzusetzen. Gemeinsam ermöglichen sie es, die Qualität des Grundwassers für zukünftige Generationen zu erhalten und zu verbessern.

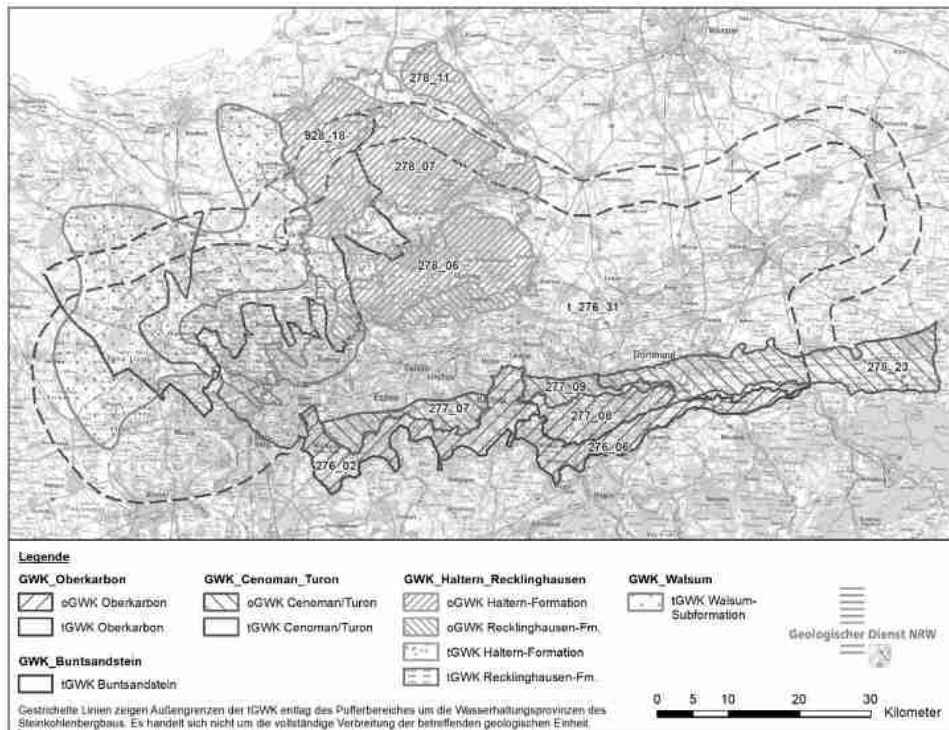


Abb. 1: Verbreitung der tiefen und oberflächennahen Grundwasserkörper (tGWK, oGWK) im Ruhrrevier

Vortrag 23.4 (ID 144)

Klimastress im Grundwasser – Auswirkungen projizierter Trockenphasen auf die Grundwasserneubildung und die Grundwasserstände in Thüringen

Jörn Geletneky¹, Martin Becker², Simon Schröder², Christoph König²

¹: Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz, Jena, Deutschland

²: delta h Ingenieurgesellschaft mbH, Witten, Deutschland

Kontakt: joern.geletneky@tlubn.thueringen.de

Mögliche und projizierte Änderungen im hochkomplexen System des atmosphärischen, oberirdischen und unterirdischen Wasserhaushalts und des Grundwasserflusses stellen die Wasserwirtschaft in Thüringen künftig vor enorme Herausforderungen. Für die öffentliche Wasserversorgung ist es, insbesondere bei länger andauernden Trockenjahren und Trockenperioden, essenziell, ausreichend Rohwasser sicher bereitzustellen. Hierbei spielt das

Vorsorgeprinzip eine entscheidende Rolle. Dieses beinhaltet zum einen eine Risikovor-sorge, die verlangt, „bei unvollständigem oder unsicherem Wissen über Art, Ausmaß, Wahrscheinlichkeit sowie Kausalität von Umweltschäden und -gefahren vorbeugend zu handeln, um diese von vornherein zu vermeiden“ (KLIWA AG Grundwasser, 2023). Zum anderen greift die Ressourcenvorsorge, d. h. der schonende Umgang mit Ressourcen (u. a. Wasser), um diese langfristig zu sichern.

Teil der staatlichen Daseinsvorsorge und zentraler Auftrag der Wasserwirtschaft ist es, die Versorgungssicherheit im Bereich Trinkwasser auch im Falle von für die Wasserversorgung ungünstigen Klimawandelfolgen zu gewährleisten. Unter Berücksichtigung der o. g. Randbedingungen in Thüringen muss die Wasserwirtschaft dabei auch auf Szenarien vorbereitet sein, in denen sich aktuelle Trends wichtiger Wasserhaushaltsgrößen möglicherweise fortsetzen und sich das Wasserdargebot temporär verringern könnte.

Vor diesem Hintergrund wurde exemplarisch untersucht, welche Auswirkungen eine Phase verminderter Grundwasserneubildung auf die Grundwasserstände in Thüringen haben könnte. Ausgehend von den definierten Grundwasserständen wurde zunächst ein sechs Jahre langer Zyklus mit sich wiederholenden Grundwasserneubildungsraten des Jahres 2019 (mittlere Sickerwasser- bzw. Grundwasserneubildungsrate 82 mm/Jahr) prototypisch analysiert. Neben der Auswertung durch einen jährlichen Trockenheitsindex wurden Grundwasserstandsänderungen und –tiefststände lokal und regional analysiert. Daneben konnten Aussagen zu Wasserversorgungsbereichen abgeleitet werden, wo möglicherweise für die Wasserversorgung kritische Wasserstände auftreten könnten.

Die exemplarisch ausgewählten Daten des Jahres 2019 repräsentierten zwar im Mittel stark verminderte Grundwasserneubildungsraten in Thüringen, jedoch zeigten die Berechnungsergebnisse auch, dass die Grundwasserneubildung in einigen Naturräumen (z. B. in Westthüringen) methodisch bedingt nur temporär vermindert war. Somit wurden im Sinne der Risikovor-sorge für bestimmte Regionen mit dieser Methode keine lokalen Trockenphasen mit Grundwassertiefstständen untersucht. Zudem stellte sich die Frage, ob die für Thüringen repräsentativen Klimaprojektionen der Ensembleauswahl (Struve et al., 2020) zukünftig ähnlich lange Trockenphasen beinhalten. Aus diesem Grund wurden die BIAS-adjustiert vorliegenden 21 Modellketten des Mitteldeutschen Kernensembles vollständig und unabhängig von Klimaszenarien hinsichtlich der projizierten Niederschlagsmenge bis zum Jahr 2100 analysiert. Es konnten 12 drei- bis sechsjährige Trockenphasen identifiziert werden, in denen die Jahres- bzw. Quartals-Niederschlagsmengen größtenteils unterhalb lang-jähriger Mittelwerte liegen.

Diese 12 Trockenphasen wurden hinsichtlich bzgl. der Grundwasserneubildungsentwicklung analysiert. Die Auswirkungen auf Oberflächenwasser, auf den ungesättigten Bereich, den Grundwasserhaushalt und das -fließregime werden in unterschiedlichen Skalenbereichen für Gesamtthüringen dargestellt und interpretiert.

Vortrag 23.5 (ID 321)

Aktueller Zustand und Vorhersage der Grundwasserstände – eine neue bundesweite Fachanwendung

*Maximilian Nölscher, Matthias Heber, Patrick Clos, Markus Zaepke,
Wolfgang Stolz, Stefan Broda*

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Deutschland

Kontakt: stefan.broda@bgr.de

Eine bundesweit harmonisierte Bereitstellung von aktuellen und prognostizierten Grundwasserständen hat insbesondere vor dem Hintergrund sich wiederholender Trockenjahre an Bedeutung gewonnen. Mit dem hier vorgestellten Grundwasserstandsvorhersagedienst GRUVO ist es möglich, die relevanten Informationen zielgerichtet für verschiedene Nutzergruppen zur Verfügung zu stellen.

In diesem Beitrag wird die Funktionalität und Funktionsweise der Fachanwendung GRUVO in der aktuellen Version vorgestellt. Diese umfasst neben der Beschreibung der aktuellen Grundwasserstände im Wesentlichen die Darstellung von monatlich aktualisierten Grundwasserstandsvorhersagen und -projektionen für die Vorhersagehorizonte kurzfristig (bis 3 Monate), mittelfristig (bis 10 Jahre) und langfristig (bis 2100) an über 100 bundesweit verteilten sogenannten Referenzmessstellen (RM). Jede dieser RM repräsentiert die Grundwasserstände bzw. Dynamik einer unterschiedlichen Anzahl von sogenannten Clustermessstellen (CM). Diese Zuordnung von RM zu CM wurde zuvor durch ein Clusterverfahren ermittelt. Die Prognose der RM basiert auf künstlichen neuronalen Netzen (KNN), die mit Zeitreihen gemessener Grundwasserstandsdaten der zuständigen Landesämter als Zielgrößen und gemessenen meteorologischen Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) als Prädiktoren trainiert werden. Für die Vorhersage zukünftiger Grundwasserstände werden wiederum prognostizierte bzw. projizierte meteorologische Daten des DWD verwendet.

Neben den verfügbaren Funktionalitäten der aktuellen Version, die von Übersichtsdarstellungen für alle Messstellen bis hin zu messstellenbezogenen Detaildarstellungen reichen, werden auch Aspekte und Schwierigkeiten der Operationalisierung aufgezeigt und mögliche zukünftige Erweiterungen skizziert.

Vortrag 23.6 (ID 166)

Grundwasseranreicherung – GIS-gestützte Berechnung landesweiter, maßnahmenbezogener Eignungskarten mittels Python

Melanie Witthöft, Henning Marinkovic, Jörg Elbracht

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Deutschland

Kontakt: melanie.witthoeft@lbeg.niedersachsen.de

Zur Umsetzung des Wasserversorgungskonzeptes wurden in einer Arbeitsgruppe mit Vertreterinnen und Vertretern des Umweltministeriums, dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz und des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie Maßnahmen zur lokalen Anreicherung von Grundwasser identifiziert. Die Maßnahmen führen indirekt (Retention) oder direkt zur Infiltration von Wasser in den Untergrund, stärken so den Wasserhaushalt und reichern das Grundwasser an.

Vor dem Hintergrund der Auswirkungen des Klimawandels werden Maßnahmen zur Grundwasseranreicherung in Niedersachsen zukünftig eine wichtige Rolle spielen. Zur Unterstützung bei der Auswahl von geeigneten Maßnahmen an potenziellen Standorten oder zur Identifizierung von potenziell geeigneten Standorten für gewünschte Maßnahmen erarbeitet das LBEG z. B. für folgende Maßnahmen jeweils landesweite Eignungskarten: Versickerungsteiche und -gräben, Grabeneinstau, Rigolen, Düneninfiltration, Speicherung im Untergrund über flache oder tiefe Brunnen, Uferfiltration, Hangabfluss und Retentionsdämme.

Je maßnahmenbezogener Eignungskarte werden mittels multikriterieller Bewertung relevante intrinsische Standorteigenschaften wie z. B. Flurabstand, Infiltrationsleistung des Bodens bis 2 m Tiefe, Durchlässigkeit des Untergrundes ab 2 m Tiefe, Entfernung zum Gewässer und Hangneigungsinformationen miteinander kombiniert. Für jede einzelne Karte werden die Standorteigenschaften, deren Gewichtung und die Bewertung separat festgelegt. Im Anschluss werden Ausschlusskriterien wie unversiegelte Flächen oder Hangneigung angewendet. Die Methodik erfordert Rasterdatensätze und wird mit einer Zellgröße von 100 m x 100 m berechnet.

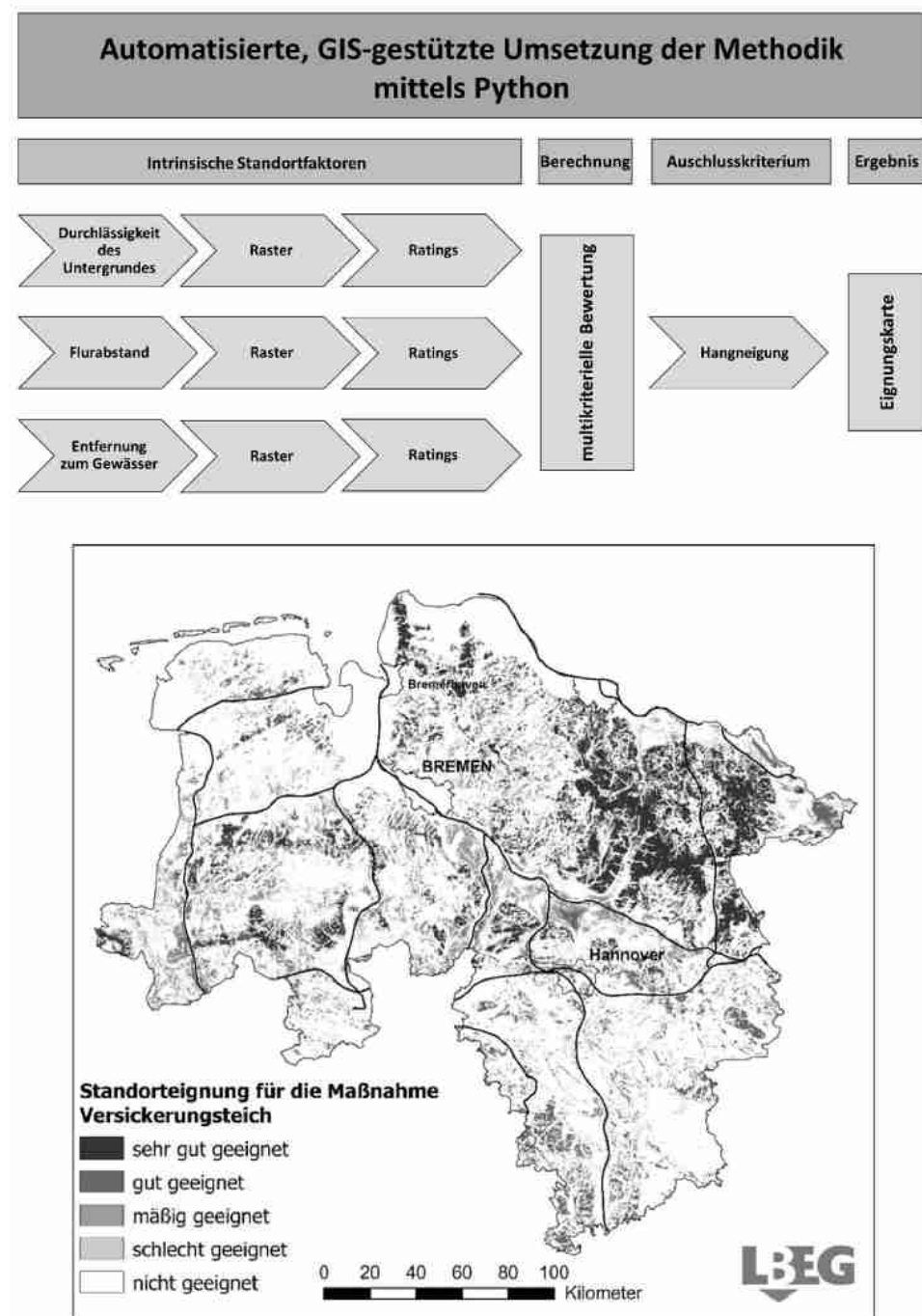


Abb. 1: Maßnahmenbezogene Eignungskarte.

Die Berechnung der Eignungskarten erfolgt automatisiert mittels der Programmiersprache Python in ArcGIS Pro. Sämtliche Berechnungen für die multikriterielle Bewertung werden mit der Programmbibliothek NumPy durchgeführt, wodurch eine hohe Performance gewährleistet wird. Durch die Umsetzung in Python können die unterschiedlichen Anforderungen der jeweiligen Maßnahmen aufgrund der grundsätzlich gleichbleibenden Methodik ohne aufwendiges manuelles Eingreifen berücksichtigt werden. Die einfache Wiederholbarkeit der Berechnungen ermöglicht, die Auswirkungen von Variationen an Parametern (wie z. B. der Gewichtung der Bewertungskriterien) mit geringem Zeit- und Arbeitsaufwand zu vergleichen. Durch die Anwendung eigener Funktionen können spezielle Anforderungen bei der Umsetzung der Berechnungen der Eignungskarten berücksichtigt werden. Anhand der Python Skripte sind die Ergebnisse der Berechnungen sowie das methodische Vorgehen transparent und gut nachvollziehbar.

Poster 23.1 (ID 143)

Die Hydrogeologische Landesaufnahme in Hessen – Von der blattschnittbezogenen Bearbeitung zur systemorientierten Kartierung

Hannah Budde, Christoph Kludt, Bernd Leßmann, Angela Prein, Renate Senner, Sybille Siebert, Dieter Kämmerer

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Deutschland

Kontakt: hannah.budde@hlnug.hessen.de

Die Hydrogeologische Landesaufnahme in Hessen kann auf eine lange Tradition zurückblicken. Analog der Vorgehensweise in der geologischen Kartierung, wurde auch in der Hydrogeologie die Landesaufnahme in blattschnittbezogenen Arbeitseinheiten umgesetzt. Sie ist dokumentiert in umfangreichen hydrogeologischen Kapiteln in den jeweiligen Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:25.000 sowie in thematischen Spezialkarten. Da sich die Blattschnitte nicht an natürlichen Grenzen orientieren, wurden einzelne Einheiten häufig nur angeschnitten und die hydrogeologische Modellvorstellung des Gesamtsystems konnte oft nicht hinreichend beschrieben werden. Unterschiedliche Bearbeiter und Erstellungsjahre benachbarter Kartenblätter trugen zu weiteren Interpretationsunterschieden an der Blattrandgrenze bei.

Seit Mitte der 1990 Jahre wurde in Hessen daher das Prinzip der systemorientierten hydrogeologischen Kartierung etabliert, die sich an der Systematik der hydrogeologischen Raumgliederung in Großräume, Räume und Teilräume orientiert (Ad-hoc-AG Hydrogeologie 2016, Fritsche et al. 2003). Ziel ist die Erarbeitung und die Beschreibung eines umfassenden Systemverständnisses hydrogeologisch ähnlicher Gebiete, wobei hierbei auch mehrere Teilräume zusammen betrachtet werden können. Die verfügbaren Daten, wie

Schichtdaten und Grundwasserstände aus Bohrungen und Grundwassermessstellen, hydrochemische Analysen und Informationen aus der Wasserwirtschaft werden dabei zusammengetragen und ausgewertet, wenn nötig werden weitere Daten erhoben. Die Aufbereitung der Ergebnisse erfolgt in Berichtsform, in der Übersichts- und Detailkarten sowie Beschreibungen der vorhandenen Daten enthalten sind. Das Themenspektrum umfasst neben der rein hydrogeologischen Beschreibung auch die Aspekte des Grundwasserschutzes und der Wasserwirtschaft.

Die hydrogeologische Landesaufnahme bietet der hessischen Landesregierung und ihren nachgeordneten Behörden, aber auch Fachpersonen aus Industrie und Wissenschaft sowie interessierten Bürgerinnen und Bürgern, in dieser Form einen einfachen Zugang zu umfassenden und thematisch gebündelten Informationen zur Hydrogeologie des jeweiligen Betrachtungsraums. Durch das bessere Verständnis der hydrogeologischen Eigenschaften und Zusammenhänge trägt sie zu einem verbesserten Grundwasserschutz, einer effektiveren, umweltschonenden und nachhaltigeren Bewirtschaftung sowie einer breiteren Maßnahmenakzeptanz in der Bevölkerung bei. Dies ist insbesondere im Hinblick auf den zunehmenden Nutzungsdruck und die möglichen Nutzungskonflikte durch Klimawandel, Flächenversiegelung, Ansiedelung von Industrie und Rohstoffabbau eine herausfordernde Zukunftsaufgabe.

In den letzten Jahren wurden bereits die Beschreibungen der Teilräume Vulkanischer Vogelsberg (2001), Odenwald und Sprendlinger Horst (2017) und Taunus mit der Idsteiner Senke (2023) veröffentlicht. Diese Teilräume werden in ihren Eigenheiten, Gemeinsamkeiten und Unterschieden exemplarisch vorgestellt.

AD-HOC-AG HYDROGEOLOGIE (2016): Regionale Hydrogeologie von Deutschland - Die Grundwasserleiter: Verbreitung, Gesteine, Lagerungsverhältnisse, Schutz und Bedeutung. - Geol. Jb., A 163: 456 S., 264 Abb.; Hannover.

Fritsche, H.-G., Hemfler, M., Kämmerer, D., Leßmann, B., Mittelbach, G., Peters, A., Pöschl, W., Rumohr, S., Schlösser-Kluger, I. (2003): Beschreibung der hydrogeologischen Teilräume von Hessen gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL). - Geol. Jb. Hessen 130, 5–19.

Erstellung eines 3D hydrogeologischen Strukturmodells für die Hauptstadtregion Berlin-Brandenburg

*Felix Möhler¹, Malte Kalter¹, Kerstin Kernbach², Ulrike Hörmann²,
Johannes Birner², Bertram Monninkhoff³*

¹: GCI GmbH, Deutschland

²: Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt, Berlin (SenMVKU)

³: Berliner Wasserbetriebe (BWB)

Kontakt: felix.moehler@gci-kw.de

Im Rahmen der „Initiative Trinkwasserversorgung Metropolenregion Berlin-Brandenburg“ (ITM) soll ein länderübergreifendes Grundwasserströmungsmodell als Basis für ein gemeinsames Grundwassermanagementsystem in der Hauptstadtregion aufgebaut werden. Als Grundlage hierfür wurde von der GCI GmbH (GCI) ein ca. 3.000 km² großes 3D hydrogeologisches Strukturmodell (HSM) für Berlin und das angrenzende Brandenburger Umland erarbeitet. Die Berliner Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt (SenMVKU) erstellte vorab das grundlegende Bearbeitungskonzept. Während der Bearbeitung wurden regelmäßig Abstimmungen zur Anpassung und Umsetzung des Konzeptes im Detail in der Arbeitsgruppe unter Beteiligung von GCI, SenMVKU und den Berliner Wasserbetrieben (BWB) vorgenommen.

Für das Bearbeitungsgebiet existieren zahlreiche verschiedene, jedoch nicht flächendeckende Datengrundlagen sowie geologische und hydrogeologische Bearbeitungen und Interpretationen. Hierzu zählen u. a.:

- Geologisches Schnittraster für Berlin (W-E alle 1 km und N-S alle 2,5 km)
- Hydrogeologische Schnitte für Brandenburg (W-E alle 5 km)
- GW-Strömungsmodelle der BWB und zugehörige HSM für alle WW der BWB
- GW-Strömungsmodelle und zugehörige HSM in Brandenburg
- 3D geologisches Landesmodell Berlin
- 3D Geological Model of Berlin (Frick et al. 2020)
- zeHGW-Modell für das Berliner Stadtgebiet (Prof. Dr. Verleger, 2003-2017)
- Geol. / hydrogeol. Kartenwerke

Gemäß dem Bearbeitungskonzept wurde das HSM durch Harmonisierung der oben aufgeführten Datenquellen abgeleitet. Eine grundlegende neue Interpretation auf Basis von tausenden Bohrdaten war für das HSM explizit nicht vorgesehen. Die Konsistenz zu den bestehenden Datenquellen sollte möglichst weitgehend erhalten bleiben. Speziell in einem 2

km Puffer um die Wasserfassungen wurden bevorzugt Informationen aus existierenden GW-Strömungsmodellen übertragen.

Das HSM untergliedert folgende 15 hydrogeologisch relevante Einheiten und beschreibt damit 9 GW-Leiter (GWL) und dazwischen 6 GW-Hemmer (GWH). Die Modellbasis bildet die Oberkante des Rupeltons.

- qwo/qh - Spätglazial bis Holozän – GWH / GWL
- qw1 – weichselstadiale Sande - GWL 1.1 und 1.2 auf Hochflächen und 1.3 im Urstromtal
- qw1/gm – Weichsel Grundmoräne - GWH
- qw1/qsWA – weichsel- und warthestadiale Sande - GWL 2.1
- qsWA/b, qsWA/gm – warthestadiale Geringleiter - GWH
- qsWA/qsD – warthe- und drenthestadiale Sande - GWL 2.2
- qsD/gm – drenthestadiale Geringleiter - GWH
- qsD/qsu – drenthestadiale Sande GWL 2.3
- qhol – Holstein - GWH
- qe – meist sandige Elstersedimente – GWL 3.1
- qe – meist bindige Elstersedimente – GWL 3.2/GWH
- tmi – Miozän – GWL 4.1
- tmi BRo – miozäne zwischengelagerte Braunkohlenschluffe – GWH
- tmi – Miozän – GWL 4.1
- tolCO – Cottbusser Schichten – GWL 4.2

Für die Erarbeitung des hydrogeologischen Strukturmodells war eine Vielzahl verschiedener Arbeitsschritte erforderlich. Dazu gehörten u. a. Plausibilitätsprüfung der Datenquellen, Angleichung verschiedener Datenquellen, Digitalisierung von Informationen, Priorisierung und Dokumentation der Datengrundlagen sowie Interpolation der Höhenlage der Schichtgrenzen in der Fläche. Im Ergebnis der Bearbeitung liegt das 3D-HSM in der Software Leapfrog Works vor, das für die 15 Modellschichten Volumen, Höhenlage der Unterkanten und Verbreitung beschreibt. Die Geometrien können daraus in das aufzubauende GW-Strömungsmodell überführt werden.

Prognose der Niedrigwasserschüttung von Quellen in Baden-Württemberg vor dem Hintergrund des Klimawandels

Volker Armbruster¹, Andreas Morhard²

¹: *RP Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Deutschland*

²: *GIT HydroS Consult GmbH, Freiburg*

Kontakt: volker.armbruster@rpf.bwl.de

Der Klimawandel wirkt sich auf die zeitliche Verteilung der Niederschläge, auf die Lufttemperaturen und die Länge künftiger Trockenperioden aus. Damit wird sich auch die zeitliche Verteilung der Grundwasserneubildung und deren Gesamthöhe verändern. Die Bandbreite der auf Grundlage verschiedener Klimaszenarien berechneten Ergebnisse ist groß und reicht von einer leichten Zunahme bis zu einer deutlichen Abnahme der mittleren Grundwasserneubildung in der Zukunft.

In der vorliegenden Studie wurde ein pessimistisches Klimaszenario aus dem erweiterten KLIWA-Ensemble mit einer deutlichen Abnahme der Grundwasserneubildung verwendet. Modelliert wurde die Grundwasserneubildung mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW, das im süddeutschen Raum breite Anwendung findet.

In Baden-Württemberg basiert die Wasserversorgung zu 70% auf der Nutzung von Grundwasser, gewonnen aus Brunnen und Quellen. Die am stärksten schüttenden, oft auch zur überregionalen Wasserversorgung genutzten Quellen finden sich im ergiebigen Oberjura. In wenig ergiebigen Festgesteinsgebieten wie beispielsweise im kristallinen Schwarzwald oder im Keupergebiet basiert die lokale Wasserversorgung überwiegend auf den gering schüttenden Quellen. Hier kam es in den verstärkt vorkommenden Trockenjahren der jüngsten Vergangenheit teilweise zu Engpässen in der Wasserversorgung.

Um abzuschätzen, wie stark die Quellschüttungen zu Trockenzeiten in Zukunft zurückgehen können, wurden die Quellschüttungen für den Zielhorizont 2050 (2036-2065) modelliert. Dies erfolgte für 80 Quellen in den wichtigsten Festgesteinseinheiten von Baden-Württemberg mit langen, qualitativ hochwertigen Schüttungszeitreihen. Dazu wurden für den Kalibrierungszeitraum aus einem Set verschiedener Speichermodelle das jeweils beste ermittelt und mit den Zeitreihen der künftigen Grundwasserneubildung die Quellschüttungen modelliert.

Die Abnahme der minimalen Quellschüttung ist deutlich stärker ausgeprägt als die Abnahme der mittleren Quellschüttung. Es wurde der Zusammenhang der Abnahme der minimalen Quellschüttung mit verschiedenen Einflussgrößen (z. B. Höhe der Quellschüttung, Ausgeglichenheit der Quellschüttung, hydrogeologische Einheit) untersucht. Mit Hilfe der

gefundenen Zusammenhänge kann auf der Grundlage von Quellschüttungsmessungen der künftige Rückgang der minimalen Quellschüttung abgeschätzt werden. Dies erlaubt, neben einer Wassermengenbilanz (Dargebot und Bedarf) für den Status Quo auch eine Wassermengenbilanzschätzung für die Zukunft zu erstellen und zu beurteilen, ob auch in zukünftigen Trockenzeiten die Wasserversorgung noch gesichert sein wird.

Die Studie ist eingebunden in das Projekt Masterplan Wasserversorgung Baden-Württemberg des Umweltministeriums und des MLR Baden-Württemberg. In dem Projekt wird die Struktur der öffentlichen Wasserversorgung erfasst und einem Klimacheck unterzogen.

Poster 23.4 (ID 186)

Automatisierte Auswertung hydraulischer Durchlässigkeiten aus Korngrößenanalysen

Tim Hartmann, Eva González, Grit Griffel, Jörg Elbracht

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG), Deutschland

Kontakt: tim.hartmann@lbeg.niedersachsen.de

Kenntnisse zur hydraulischen Durchlässigkeit (k_f -Wert) sind, besonders für den Lockergesteinsbereich, ein entscheidender Parameter zu Fragen der Grundwasserströmung im Untergrund. Für die Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit stehen eine Reihe an Labor- und Feldmethoden zur Verfügung. Im Rahmen der hydrogeologischen Landesaufnahme in Niedersachsen ist die laborgestützte Analyse von Korngrößen aus Lockergesteinsproben als Standardverfahren etabliert. Bisher wurden hydraulische Durchlässigkeiten zur Parametrisierung von z. B. Grundwasserströmungsmodellen aus niedersachsenweit gültigen Wertebereichen abgeleitet (Reutter, 2011). Eine regionalisierte oder automatisierte Berechnung von Durchlässigkeitsbeiwerten aus Korngrößenanalysen erfolgte bisher nicht.

Für insgesamt 12.000 Korngrößenanalysen gleicher Laborverfahren wurden Durchlässigkeitsbeiwerte über verschiedene (semi)empirische Formeln berechnet und anhand ihrer Stratigraphie und Genese hydrostratigraphischen Einheiten zugeordnet. Basierend auf der hydrogeologischen Übersichtskarte (LBEG 2023) erfolgte eine vergleichende statistische Auswertung für jeden hydrogeologischen Teilraum und für jede hydrostratigraphische Einheit (Definition der Einheiten nach Reutter, 2011). Insgesamt zeigen sich gute Übereinstimmungen der regionalisierten Auswertungen mit den bereits publizierten Wertebereichen in Reutter (2011), allerdings mit z. T. großen regionalen Unterschieden. Dabei ist die Auswahl der (semi)empirischen Berechnungsverfahren zu jedem Aquifer und seiner lokalen Ausprägung zielgenau auszuwählen, sodass Anwendungsgrenzen der jeweiligen Berechnungsverfahren nicht verletzt werden. So sind für die räumlich oft heterogen aufgebauten

weichselzeitlichen Flussablagerungen andere Berechnungsverfahren anzuwenden als für die in Niedersachsen relativ homogen ausgebildeten pliozänen Delta-Ablagerungen des baltischen Flusssystems.

Die resultierenden Auswertungen werden auf dem NIBIS-Kartenserver veröffentlicht und stehen dort dann zum kostenfreien Download bereit. Diese Auswertungen sollen eine Grundlage für die Parametrisierung von Transport- oder Grundwasserströmungsmodellen bilden und genauere Abschätzungen der physikalischen Eigenschaften der känozoischen Aquifere Niedersachsens geben. Zukünftig sollen die berechneten Durchlässigkeitsbeiwerte mit existierenden Ergebnissen aus Pump- oder Permeameterversuchen validiert werden.

LBEG (2023): Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover NIBIS Kartenserver: Hydrogeologische Übersichtskarte 1:500.000: Hydrogeologische Räume und Teilräume 1:500.000. Hannover (<http://nibis.lbeg.de/cardomap3>)

Reutter E. (2011): Hydrostratigrafische Gliederung Niedersachsens.- Geofakten 21, 11 S., 5 Abb., 2 Tab.: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie - LBEG, Hannover.

Poster 23.5 (ID 194)

Hydrogeologische 3D-Modelle Niedersachsen

*Grit Griffel, Nico Deus, Eva González, Jörg Elbracht, Tim Hartmann,
Melanie Witthöft*

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Deutschland

Kontakt: grit.griffel@lbeg.niedersachsen.de

Die hydrogeologischen 3D-Modelle finden für die unterschiedlichsten Fragestellungen ihre Anwendung: im Rahmen der Erstellung von Baugrundgutachten, im Bereich von Wasserschutz- und Raumordnungskonzepten, als Planungsgrundlage für die Grundwasserbewirtschaftung und den Grundwasserschutz. Für den wasserwirtschaftlich genutzten Untergrund werden vom LBEG hydrogeologische 3D-Modelle erarbeitet und über den NIBIS®-KARTENSERVEN und NIBIS3D-Viewer zur Verfügung gestellt.

Dazu werden alle verfügbaren Eingangsdaten, wie Bohrungen, Profilschnitte, geophysikalische Daten, 2D-Daten wie die Geologische Karte 1: 50 000 (GK50, LBEG 2021a), die Quartärgeologische Übersichtskarte 1: 500 000 (GKTQ500, LBEG 2021b) sowie bestehende hydrogeologische 3D-Modelle z. B. von Wasserversorgern verwendet.

Ziel ist es, ein möglichst getreues dreidimensionales Abbild des geologischen Untergrundes zu erzeugen, wobei sich die Arbeiten der hydrogeologischen Landesaufnahme vor allem auf den ca. 36500 km² großen Lockergesteinsbereich Niedersachsens konzentrieren.

Angrenzende Modellgebiete sind aufeinander abgestimmt. Die 3D-Modelle basieren auf dem zur Zeit des Entstehungsprozesses aktuellsten Datenbestand des LBEG wobei die Informationsdichte der Eingangsdaten regional sehr unterschiedlich ist. Nach der Fertigstellung eines hydrogeologischen 3D-Modells erfolgt die Zuordnung von hydrostratigraphischen Einheiten nach Geofakten21 (2011) mit den entsprechenden Durchlässigkeitsklassen zu den einzelnen Modelleinheiten. Die hydrostratigraphischen 3D-Modelle vermitteln eine räumliche Vorstellung von der Lage, Mächtigkeit und Ausdehnung der Grundwasserleiter (L) und Grundwassergeringleiter (H) im Untergrund. Damit können u. a. Abschätzungen der Verbreitung trennender Schichten und die Beurteilungen der Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung vorgenommen werden.

Auf Grundlage der Regionalmodelle entstehen verschiedene Grundwassermodelle, z. B. zur Lage der Salz-/Süßwassergrenze oder zur Grundwasserströmung. Dazu werden neben hydrogeologischen Daten auch geophysikalische Untersuchungsmethoden wie Aeromagnetik und Geoelektrik ausgewertet.

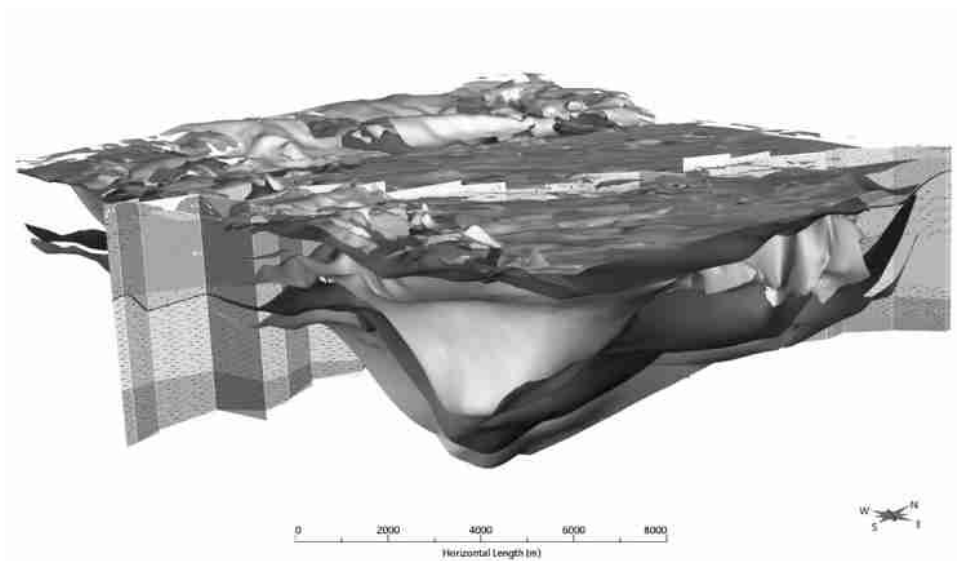


Abb. 1: Ausschnitt aus dem hydrogeologischen 3D-Modell Delmenhorst mit hydrogeologischem Profilschnitt (25-fach überhöht).

Auf der Internetseite des LBEG können Interessierte über den NIBIS® KARTENSERVER (2021c) die geologischen und hydrogeologischen 3D-Modelle ansehen (NIBIS3D-Viewer), herunterladen (3D PDF) und frei nutzen. Neben der Ansicht der 3D-Modelle im NIBIS3D-Viewer, besteht die Möglichkeit virtuelle Bohrungen und 2D-Profilschnitte zu erzeugen. Des Weiteren ist ein Export der erzeugten 1D- und 2D-Daten wahlweise als 3D-Shape, in verschiedenen Bildformaten oder als skalierbare Vektorgrafik möglich. Die Modellflächen können über den offiziellen Vertriebsweg des LBEG unter

Fachdaten@lbeg.niedersachsen.de angefragt werden. Als Ausgabe-Datenformat stehen das SKUA-GOCAD™-Format (.ts) oder ASCII ggf. auf Anfrage auch weitere zur Verfügung.

NIBIS® KARTENSERVEN (2021a): Geologische Karte 1 : 50 000. - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), <<http://nibis.lbeg.de/cardomap3/>>, Hannover.

NIBIS® KARTENSERVEN (2021b): Quartärgeologische Übersichtskarte 1: 500 000. - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), <<http://nibis.lbeg.de/cardomap3/>>, Hannover.

NIBIS® KARTENSERVEN (2021c): 3D-Modelle. – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), <<http://nibis.lbeg.de/cardomap3/>>, Hannover.

Reutter, E. (2011): Hydrostratigrafische Gliederung Niedersachsen. – Geofakten 21: 11 S.; Hannover (LBEG).

Poster 23.6 (ID 211)

3D-Strukturmodell und Studie zur geeigneten Simulationssoftware für die Flutungsprognose im ehemaligen Steinkohlenrevier Lugau/Oelsnitz

Maria Ussath

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Deutschland

Kontakt: maria.ussath@smekul.sachsen.de

Die ungesteuerte Flutung der Grubengebäude des ehemaligen Steinkohlenreviers Lugau/Oelsnitz in Sachsen erfolgt aufgrund der komplexen montanhydrogeologischen Gegebenheiten vergleichsweise langsam. Nach bisherigen Prognosen erreicht das Wasser voraussichtlich im Jahr 2032 die Tagesoberfläche im besiedelten Hegebachtal. Ausgedehnte Vernässungsflächen in Ortslagen aber auch eine qualitative Beeinträchtigung der Grund- und Oberflächengewässer durch hochmineralisierte bergbaulich geprägte Tiefenwässer (ELF $\approx$ 33.400 μ S/cm in ca. 630 m Tiefe) sind zu erwartende Folgen des stetigen Grubenwasseranstiegs.

Als fachliche Entscheidungsgrundlage für eine ggf. erforderliche Gefahrenabwehr (z. B. flutungsregulierende Maßnahmen) durch das Sächsische Oberbergamt soll zukünftig eine differenzierte Flutungsprognose mit Szenarien-Betrachtungen basierend auf einer Strömungs- und Stofftransportmodellierung dienen. Geometrische Grundlage hierfür ist ein aktualisiertes geologisch-hydrogeologisches 3D-Strukturmodell. In dieses Modell wurden flutungsrelevante Sachverhalte wie das bestehende ausgeprägte Störungssystem, hydrogeologisch/hydraulisch relevante Bereiche (Grubengebäude mit Schächten und Strecken), Verbruchbereiche und die oberflächennahe Auflockerungszone implementiert. Anhand dieses Modells erfolgt eine kurze anschauliche Vorstellung der geologischen und montanhydrogeologischen Komplexität des Reviers.

Das montanhydrogeologische Setting mit speziellen Fragestellungen zum weiteren Monitoring des Wiederanstiegs sowie zur ggf. notwendigen Flutungssteuerung aber auch die Brisanz der Flutungsdynamik im Revier begründeten die Durchführung einer in diesem Beitrag vorgestellten Studie zur Auswahl einer geeigneten Simulationssoftware für die Strömungs- und Stofftransportmodellierung. Dabei wurden drei etablierte Software-Produkte in Hinblick auf die speziellen montanhydrogeologischen Fragestellungen auf Grundlage eines Kriterienkatalogs verglichen und anhand einer Entscheidungsmatrix bewertet. Zu den ausgewählten Kriterien zählen beispielsweise die Eigenschaften des hydrogeologischen Strukturmodells, Parametrisierung, Randbedingungen und Modell-Kopplung, aber auch die Abbildbarkeit physikalischer Prozesse. Ergänzend dienten einfache Modellrechnungen typischer Strömungsvorgänge im Rahmen eines Flutungsprozesses dem direkten Vergleich der jeweiligen Software. Die Eckpunkte, Methodik und Ergebnisse der Studie sollen vorgestellt und an ausgesuchten Modellbeispielen veranschaulicht werden. Weiterhin ist die Überführung des in SKUA-GOCAD (und in Leapfrog verfügbaren) konstruierten 3D-Strukturmodells in ein Strömungs- und Stofftransportmodell über einen Workflow dargestellt. Wesentliche Schritte und potenzielle Schwierigkeit werden im Beitrag skizziert.

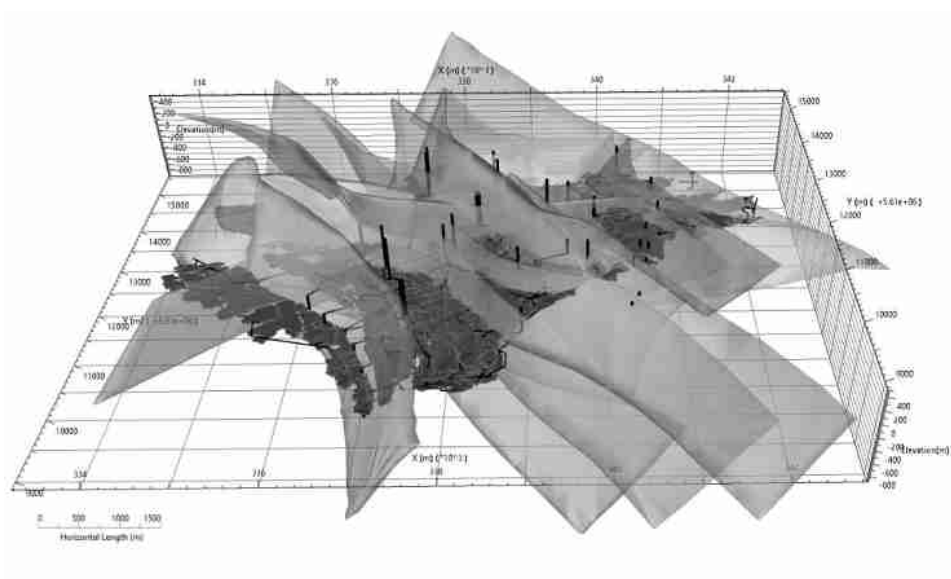


Abb. 1: Ausschnitt des 3D-Strukturmodells mit Störungssystem, Flözlagen und bergbaulichen Aufahrungen (Schächte und Strecken) des ehemaligen Steinkohlenreviers Lugau/Oelsnitz (Sachsen).

Integration von Salzhalden in das dichteabhängige, großräumige Grundwasserströmungsmodell Werra

Christian Zimmermann¹, Jörn Geletneky², Christoph König¹

¹: delta h Ingenieurgesellschaft mbH, Deutschland

²: Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz, Deutschland

Kontakt: cz@delta-h.de

Im Auftrag des Thüringer Landesamtes für Umwelt, Bergbau und Naturschutz und Geologie (TLUBN, ehemals TLUG) wurde durch delta h im Jahr 2019 ein instationäres, dichteabhängiges, dreidimensionales numerisches Grundwasserströmungs- und Transportmodell für das Werra-Kaligebiet erstellt, das unabhängig nutzbar und prognosefähig ist. Künftige hydraulische und hydrochemische (dichteabhängige) Auswirkungen der ehemaligen und derzeitigen Salzabwasserversenkung auf das Grundwassersystem im Thüringer Teil des Werra-Kaligebiets können mit dem Modell nachgebildet und prognostiziert werden.

Zur Berücksichtigung der im Modellgebiet befindlichen Salzhalden wurden zunächst Detailmodelle erstellt, welche die dynamischen Haldengeometrien sowie die Fließwege im Haldenumfeld innerhalb einer standortbezogenen Modellskala abbilden. Das Stofftransport- und Strömungsmodell Werra lieferte für die Detailbetrachtungen die Modellrandbedingungen. Die Ergebnisse dieser Betrachtungen wurden anschließend bilanziell wieder mit dem Großraummodell gekoppelt.

Die Qualität der Stoffausbreitungsberechnung von 1925 bis Ende 2020 konnte somit weiter erhöht werden. Mit dem aktualisierten Modell wurden Prognoseszenarien berechnet, welche Aufschluss über die weitere Entwicklung der Salzausbreitung im Werra-Kaligebiet geben. Wechselwirkungen mit Prozessen, welche im Zusammenhang mit der Salzabwasserversenkung im Plattendolomit stehen, wurden auf diese Weise jedoch nicht vollständig abgebildet. Unterschiedliche Netzdiskretisierungen, insbesondere des vertikalen Elementnetzaufbaus, ließen keine direkte modelltechnische Untersuchung einer möglichen Wechselwirkung zwischen hochmineralisierten Haldenwässern und aufsteigenden Versenkwässern im Untergrund zu.

Aus diesem Grund wurde das Modell der Halde Hattorf vollständig in das Großraummodell Werra integriert. Somit ist es erstmals möglich, eine potenzielle gegenseitige Beeinflussung der Halden- und der Versenkwässer zu untersuchen bzw. darzustellen. Aufgrund der enormen Skalenunterschiede stellt dieser Bearbeitungsschritt große Herausforderungen an die Netz- und Zeitdiskretisierung.

Die numerische Stabilität des Modells konnte gewährleistet werden, da bei der Diskretisierung mit der Einhaltung der Stabilitätskriterien bewusst auf eine gute Kondition der Koeffizientenmatrix des numerischen Gleichungssystems hingearbeitet wurde. Geologisch auslaufende Schichten wurden auch numerisch nicht mitgeführt. Das Grundwassermodell Werra besteht somit aus ca. 1,2 Mio. Modellknoten mit 60 vertikalen Schichten und wird über einen Zeitraum von 95 Jahren mit 72.000 Zeitschritten gerechnet. Die Rechenzeiten betragen auf einem Computer mit Intel Core I7- 4790K-Prozessor 84 Stunden.

Zur detaillierten Abbildung des oberflächennahen Grundwasserleiters und der freien Oberfläche wurden Hangquellen und das Strömen in der ungesättigten Zone (Richardsgleichung) berücksichtigt. Mithilfe der Methode RUBINFLUX wurden instationäre Neubildungsraten berechnet. Auf diese Weise wurde das Großraummodell auch für Fragestellungen, welche die Grundwasserleiter Quartär und den Buntsandstein betreffen, zusätzlich qualifiziert.

Poster 23.8 (ID 222)

Wie steht es um das Grundwasser in Hessen?

Theresa Frommen, Mario Hergesell, Sandra Schäfer

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Deutschland

Kontakt: theresa.frommen@hlnug.hessen.de

Diese Frage stellen sich seit einigen Jahren nicht mehr nur die Expertinnen und Experten der Landesbehörden, Ingenieurbüros oder Universitäten, sondern auch immer mehr Bürgerinnen und Bürger. Ebenso wird seit den Trockenjahren 2018-2020 das Thema vermehrt in der Presse aufgegriffen, die ihre Informationen - im besten Falle - von den erwähnten Fachleuten bekommt. Grundsätzlich ist es zu begrüßen, dass die Ressource Grundwasser auf steigendes Interesse stößt, doch gehen damit auch Probleme einher. Auf der einen Seite ist in der Öffentlichkeit meist wenig Vorwissen zu hydrogeologischen Grundlagen und Grundwasser vorhanden, was zu falschen Annahmen über den Zustand und das Verhalten der Ressource führen kann. Kombiniert mit dem Druck der Presse, Schlagzeilen zu generieren, kann dadurch ein öffentlicher Diskurs entstehen, der kaum hilfreich ist, um die tatsächlich vorhandenen Herausforderungen im Grundwasserbereich anzugehen. Auf der anderen Seite sitzen Fachleute, von denen viele weder für die Kommunikation mit der allgemeinen Öffentlichkeit noch für den Umgang mit der Presse geschult wurden und für die diese Kommunikations- und Pressearbeit eine zusätzliche Aufgabenlast neben den bereits bestehenden Aufgaben ist. Wie kann dem begegnet werden?

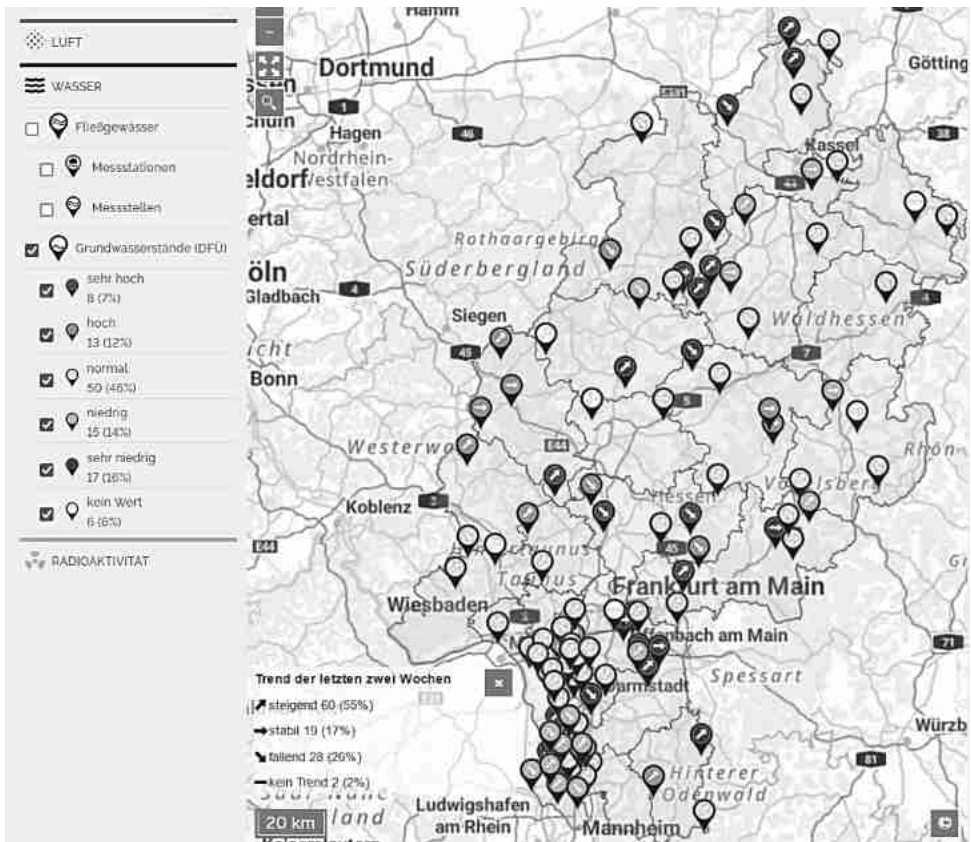


Abb. 1: Grundwasserstände im Messdatenportal des HLNUG.

Der Landesgrundwasserdienst Hessen (LGD), angesiedelt am Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), hat auf diesen neuen Informationsbedarf reagiert und bietet heute mit einer Vielzahl an Informationsangeboten den verschiedenen Zielgruppen anwenderfreundlich aufbereitete, fachlich fundierte Daten, Einordnungen und Hintergrundinformationen. Besonders hervorzuheben ist das seit 2021 bestehende Messdatenportal. Hier werden tagesaktuelle Grundwasserstandsdaten von über 100 repräsentativen Messstellen kartenbasiert dargestellt. Dabei erfolgt eine statistisch-basierte Klassifikation, die durch eine intuitive Farbgebung auf einen Blick eine Einordnung der hessenweit aktuellen Grundwassersituation ermöglicht. Zudem können weiterführende Details in Form von Grafiken und Tabellen eingesehen, sowie der aktuelle Grundwasserstand mit der Entwicklung der letzten Jahre verglichen werden. Das Messdatenportal ergänzt dabei den LGD-Viewer, mit dem für Interessierte die Möglichkeit besteht auf alle Grundwasserstands- und Quellschüttungszeitreihen der rund 900 landesweiten Messstellen zuzugreifen. Neben diesen Kartendarstellungen gibt es verschiedene wiederkehrende Berichte. Zu betonen ist hier der monatlich erscheinende Grundwasserbericht sowie der

Gewässerkundliche Jahresbericht. Zusammen mit regelmäßigen Pressemitteilungen des HLNUGs und ein eigens eingerichtetes Grundwasser-FAQ bieten diese Angebote insbesondere für Medienvertreter eine fachlich fundierte und viel genutzte Informationsgrundlage.

Basierend auf den Erfahrungen der letzten Jahre sehen wir es als notwendig an, dass Fachbehörden proaktiv Informationen und Daten zur Grundwassersituation bereitstellen. Mit anwenderfreundlich aufbereiteten Angeboten, die den Kenntnisstand und die Bedürfnisse einer allgemeinen Öffentlichkeit im Blick hat, ohne dabei die fachliche Grundlage zu verlieren, ist es möglich, den öffentlich-gesellschaftlichen Diskurs um die Ressource Grundwasser sachlich und fachlich mitzugestalten. Tagungen wie die FH-DGGV bieten dabei eine wichtige Möglichkeit, vorhandene Lösungsansätze und Erfahrungen der verschiedenen Bundesländer kennenzulernen und sich darüber auszutauschen.

Poster 23.9 (ID 332)

Leitfaden zur Ausweisung von Wasserschutzgebieten in Schleswig-Holstein – Erfahrungen bei der Kooperation mit Wasserversorgern

Klaas Stoeper, Bernd König

Landesamt für Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, Deutschland

Kontakt: klaas.stoeper@lfu.landsh.de

Zum Schutz der öffentlichen Trinkwasserversorgung werden in Schleswig-Holstein seit den 1990er Jahren Wasserschutzgebiete festgesetzt. Die fachlichen Vorarbeiten wurden in der Vergangenheit durch den Geologischen Dienst (GD) durchgeführt. Mit der Novellierung des Landeswassergesetzes (LWG) erfolgt die Festsetzung nicht mehr ausschließlich von Amts wegen, sondern auch auf Antrag der Wasserversorger (WV). Mit dieser Änderung wird die Eigenverantwortung der WV gestärkt und eine Beschleunigung der Ausweisung erreicht.

Die hydrogeologischen Vorarbeiten sind nun durch die WV selbst oder in ihrem Auftrag durchzuführen. Der GD hat hierzu einen Leitfaden erstellt (LfU 2023), der Leistungsbeschreibungen mit detaillierten Ausschreibungsunterlagen und fachliche Vorgaben für die hydrogeologische 3D- und die Strömungsmodellierung enthält. Mit Zustimmung der obersten Wasserbehörde können Aufwendungen für die fachlichen Vorarbeiten mit der Wasserentnahmeabgabe verrechnet werden. Das beschriebene methodische Vorgehen, die Modellierungssoftware und weitere fachliche Anforderungen sind hierbei zu beachten. Als Anhang ist ein Vergabevermerk zur Beachtung der Grundsätze des Vergabegesetzes

Schleswig-Holstein (VGSH) bezüglich Transparenz, Wirtschaftlichkeit und Verhältnismäßigkeit enthalten.

Die Modellierungen sind in enger Zusammenarbeit mit dem GD durchzuführen. Nach dem Leitfaden erstellte Modelle werden den WV zur Verfügung gestellt. Nach Fertigstellung neuer Modelle werden diese vom GD übernommen und Bestandteil der hydrogeologischen Landesaufnahme.

Derzeit findet die im Leitfaden beschriebene Methodik in wasserrechtlichen Bewilligungsverfahren vermehrt Anwendung. Zwischen den WV und dem GD wird eine fachliche Kooperation vereinbart, wobei das Ziel und die fachliche Methodik in einer Projektskizze verbindlich festgelegt werden. Weiterhin werden Vereinbarungen zur Nutzung und Weitergabe der Modelle festgehalten. Auch diese Modelle werden vom GD übernommen. Seit der Erstellung erster Konzepte zu den Anforderungen an hydrogeologische Modelle (Stoepker & König 2018) werden mehr als zehn solcher Kooperationsprojekte realisiert. Die WV und Fachgutachter begrüßen die einheitliche und systematische Vorgehensweise bei der Modellerstellung sowie die Qualitätssicherung durch den GD bereits während der Bearbeitung (Stoepker & König 2022). Die Antragsprüfung durch den GD vereinfacht und verkürzt sich, da eine fachliche Begleitung der Modellierung im Rahmen der Kooperation erfolgt ist.

LfU (2023): Leitfaden zur Ausweisung von Wasserschutzgebieten in Schleswig-Holstein.- Landesamt für Umwelt des Landes Schleswig-Holstein: 20 S.; Flintbek.- Unter: https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/G/grundwasser/Downloads/leitfadenAusweisungWSG.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

Stoepker, K. & König, B. (2018): Wechselseitige Datenoptimierung zwischen dem Geologischen Dienst und Wasserversorgern - Neue Wege zu digitalen hydrogeologischen Modellen in Schleswig-Holstein.- In: Fachsektion Hydrogeologie in der DGGV [Hrsg.]: Tagungsband, 26. Fachtagung, Bochum, 21.-24. März 2018: Bochumer Geowiss. Arbeiten, 24: S. 221, Bochum.

Stoepker, K. & König, B. (2022): Wechselseitige Datenoptimierung zwischen dem Geologischen Dienst und Wasserversorgern - Erfahrungen bei der hydrogeologischen Modellierung in Schleswig-Holstein.- In: Fachsektion Hydrogeologie in der DGGV [Hrsg.]: Tagungsband, 28. Fachtagung, Jena, Online-Tagung 23.-25. März 2022: Schriftenreihe der FH-DGGV, 3: 75-77, Karlsruhe.

Autorenverzeichnis

A

Abraham, Torsten: P 2.15
Achtziger-Zupančič, Peter: V 5.2
Ahrends, Bernd: V 10.5
Aixala, Gaillard: V 8.5
Albrecht, Anette: V 1.2, V 1.3, P 15.4
Alhyari, Mohammad: V 16.2, V 9.3
Allendorf, Arnd: P 15.5
Allgeier, Jonas: V 22.3
Altfelder, Sven: P 21.3
Amann, Florian: V 5.2
Andreou, Vlassis: V 3.4
Antunovic, Dirk: V 1.2, V 1.3, P 15.4
Arab, Alireza: V 4.5, P 4.4, V 1.12
Aretz, Patrick: V 8.6
Armbruster, Volker: P 23.3
Authmann, Christian: V 21.6, P 21.1
Axel, Schmidt: V 8.5

B

Bahls, Rebecca: V 16.2
Bahr, Carsten: V 9.1
Bakalowicz, Michel: V 13.1
Bakker, Mark: V 10.3
Bals, Jennifer: P 18.1
Banning, Andre: V 9.2
Barberá, Juan Antonio: V 13.1
Baroni, Gabriele: V 10.4
Barth, Johannes: V 11.3, P 2.14, V 8.5,
P 8.2
Barthel, Roland: V 21.4
Basa, Wioleta: V 3.4
Bäßler, Natascha: V 2.2
Bauer, Sebastian: V 4.4
Bauer, Bernd: P 11.3
Bäumle, Roland: V 8.2
Bayer, Peter: V 1.11, V 1.13, V 4.9,
V 14.3, P 4.1
Becher, Julia: V 1.11
Beck, Christian: V 7.3
Becker, Stephan: V 4.11
Becker, Martin: V 11.4, V 23.4
Behrens, Christoph: V 5.1

Beienz, Johannes: V 17.3
Beier, Meike: P 15.5
Bergmann, Axel: V 10.1
Bernsdorf, Bodo: V 3.2
Beyer, Matthias: P 2.15
Biessmann, Felix: V 22.2
Binder, Martin: V 1.12, V 4.5, V 11.5,
V 21.8, P 4.4
Birk, Steffen: V 6.5, V 10.3, V 13.6,
V 21.4
Birner, Johannes: P 23.2, V 23.2
Bischke, Malko: V 17.3
Bjorge, Merle: V 5.1
Blaes, Laura: P 4.3
Blake, Walker: V 8.5
Blanco Arrue, Bárbara: P 18.1
Blesch, Larissa: V 14.4
Bloch, R.: V 7.4
Bloemendal, Martin: V 4.10
Blum, Philipp: V 7.3, V 4.2, V 14.4,
V 15.2
Bochow, Mathias: V 11.1
Bockstiegel, Matthias: V 1.6, V 6.3
Boeddinghaus, Runa S.: V 7.3
Boernecke, Dirk: V 4.6
Boester, Uwe: V 2.2, V 4.3
Bonitz, Marie: P 5.2
Borchardt, D.: P 2.14
Bork, Jörg: V 19.6
Bosch, Kolja: V 10.5
Bott, Christoph: P 4.1
Böttcher, Michael Ernst: V 8.6, P 9.4,
V 8.4, P 8.1, P 11.4
Bozau, Elke: P 9.1
Braun, Anika: V 3.4
Braune, Stephan: V 8.5
Bresinsky, Lysander: P 13.2
Brindha, Karthikeyan: P 18.2
Broda, Stefan: V 13.1, V 22.1, V 22.2,
V 22.5, V 23.5, P 21.5, P 22.4
Brömme, Katrin: V 11.4
Bruns, Michael: V 2.8
Budde, Hannah: P 10.1, P 23.1
Burghardt, Diana: V 8.3, P 11.3

Butscher, Christoph: V 22.6

C

Cacace, Mauro: P 2.4
 Canzler, Wolfram: P 15.3
 Cardona Benavides, Antonio: V 9.2
 Chabab, Elena: V 3.4
 Chałupka, Robert: V 3.4
 Chen, Chaofan: P 4.4
 Chen, Zhao: V 13.1, V 21.3, V 21.5,
 P 11.3
 Cirpka, Olaf: V 2.10, V 20.2, V 22.3
 Clausen, Matthias: P 2.10
 Clos, Patrick: V 23.5
 Collenteur, Raoul Alexander: V 21.1,
 V 10.3
 Cooke, Anne-Karin: P 22.4

D

Dahash, Abdulrahman: P 4.1
 Dahme, Hans Ulrich: V 7.1
 Darmosz, Jaroslaw: V 3.4
 De Vriendt, Kevin: P 16.2
 Degenhardt, Doreen: V 8.3
 Delzig, Laura: V 4.11
 Denneborg, Michael: V 4.3
 Desens, Annika: V 8.1, P 19.2
 Deus, Nico: V 17.2, P 23.5
 Dickmann, Jonas: V 5.2
 Diederich, Folke: V 21.6, P 21.1
 Dimitrova Petrova, Katya: P 10.3, P 10.4
 Dinse, Silvia: V 3.5
 Dirks, Heiko: P 16.1
 Dohmen, Katrin: V 3.4
 Doll, Fabienne: V 22.5, P 21.5, P 22.1
 Dominik, Kremer: V 8.5
 Donke, Sebastian: V 23.1
 Dornbusch, Florence: V 2.12
 Doummar, Joanna: V 13.6, V 18.3
 Droste, Björn: V 1.2, V 1.3, P 15.4
 Drozdowski, Sylwester: V 3.4
 Dürr, H.: P 2.14

E

Ebeling, Pia: V 2.5
 Eck, Laura: P 10.1

Ehlert von Ahn, Cátia Milene: V 8.4, P
 11.4
 Eiche, Elisabeth: V 13.4
 Eisenmann, Heinrich: V 6.4, V 7.2, V 8.5
 Elbracht, Jörg: P 23.4, V 17.2, V 23.6,
 P 2.7, P 18.1, V 22.4, P 2.11, P 23.5
 Emberger, Hanna: V 13.4
 Engel, Michael: V 11.6
 Engelmann, Christian: V 4.5, V 11.5,
 V 21.8, P 4.4
 Englert, Andreas: V 1.13, V 4.9
 Englisch, Constanz: V 15.3
 Enters, Dirk: V 17.3
 Ergh, Martin: V 2.11
 Ernst, Priscilla: V 3.4
 Ertl, Gabriele: P 2.11
 Euler, Christoph: V 2.11
 Eulitz, Katja: V 2.9, V 10.2, V 15.6, V
 21.2
 Eybl, Jutta: V 13.2
 Ezz Al-Dine, Ahmad: V 18.3

F

Fahrenbach, Felix: V 6.2
 Fan, Xinyang: V 2.4
 Felix, Möhler: P 2.10
 Fernandez-Garcia, Daniel: V 21.4
 Fernandez-Steeger, Tomas: V 3.4
 Fichtner, Thomas: V 21.5, P 10.5
 Fieger, Sarah: P 2.2
 Finkel, Michael: V 2.10, V 20.2
 Fischer, Thilo: P 22.3
 Fischer, Anko: V 6.4, V 7.2
 Flechtner, Ferdinand: V 2.9, V 15.6, V
 21.2
 Fleck, Stefan: V 10.5
 Fleckenstein, Jan H.: V 2.5
 Flörke, Martina: P 2.3, P 2.6
 Flügge, Judith: V 5.3
 Formanek, Christina: V 15.3
 Francke, Till: V 10.4
 Franke, Paul: P 11.3
 Frei, Sven: V 11.3
 Freutsmiedl, Julia: P 13.1
 Fröhlich, Daniela: V 21.7
 Frommen, Theresa: P 23.8
 Fuchs, Andreas: V 15.2

Fuchs, Marco: V 14.4
 Fünfgeld, Freya: V 19.4, P 10.2
 Furtmüller, Gert: P 3.1
 Futterer, Birgit: V 23.1

G

Gabler, Leonie: V 1.12
 Gaslikova, Lidia: V 1.5
 Gath, Julian: P 17.1
 Gebhardt, Hannah: V 4.9
 Geiger, Janek: V 2.10, V 20.2
 Geist, Jürgen: V 11.3
 Geletneky, Jörn: V 23.4, P 23.7
 Gelleszun, Marlene: V 5.1
 Genth, Till: P 3.2
 Genzel, Marcus: V 13.6, V 18.3
 Georgi, Anett: V 7.2
 Ghanmi, Mohamed: V 13.1
 Gharaibeh, Muna: V 16.2
 Ghazaryan, Gohar: V 17.4
 Ghergut, Iulia: P 4.5
 Gilfedder, Ben: V 11.3, V 8.4
 Gillbricht, Christian: P 19.1
 Glass, Jana: V 18.4, P 21.4
 Gnodtke, Dirk: V 4.11
 Göbel, Patricia: V 15.1, P 15.2
 Goeppert, Nadine: V 2.4
 Goldscheider, Nico: V 2.4, V 13.1,
 V 13.4, P 13.3
 Gonzalez, Eva: P 23.4, P 23.5, P 2.7,
 P 18.1
 Göppert, Nadine: V 13.4, P 13.3
 Gossel, Wolfgang: V 14.5, P 17.1
 Grab, Thomas: P 4.4
 Greneche, Jean-Marc: V 5.5
 Greskowiak, Janek: V 1.5, V 2.7
 Griebler, Christian: V 1.11, V 6.5,
 V 15.3
 Griffel, Grit: P 23.4, P 23.5
 Grummel, Lea: V 4.11
 Günther, Andreas: V 13.1
 Guthke, Anneli: V 20.4

H

Haas, Johannes: V 6.5
 Hadi, Jebril: V 5.5
 Hahn, Hans Jürgen: V 15.2

Hajati, Mithra-Christin: V 22.4, P 2.11
 Hale, Sina: V 14.4
 Halm, Marcel: V 4.6
 Hamdi, Pooya: V 5.2
 Hammer, Vanessa: V 4.2
 Hanauer, Bernd: V 20.1
 Hanna, Richard: V 4.2
 Hannappel, Stephan: P 2.1
 Hansen, Birgitte: P 9.2
 Hartmann, Clemens: V 9.4
 Hartmann, Tim: P 23.4, P 23.5
 Hartmann, Andreas: V 2.5, V 13.1,
 V 13.6, V 20.3, P 10.5, P 11.3
 Harum, Till: P 9.4
 Hasumi, Togo: V 14.4
 Haubrich, Frank: V 8.3
 Hauser, Dominik: P 3.1
 Heber, Matthias: V 23.5
 Hehn, Vera: V 17.1
 Heidinger, Michael: V 5.4, V 17.1,
 V 8.5, P 8.2
 Hein, Jörg-Helge: V 7.4
 Heinze, Thomas: P 4.3
 Hekel, Uwe: V 19.4, P 10.2
 Hellwig, Jost: V 1.8
 Hellwig, Alexandra: V 1.2, V 1.3, P 15.4
 Hemmens, Erkki: V 10.5
 Hennig, Theresa: V 5.6, P 5.2
 Hensel, T.: V 7.4
 Herber, Alina: V 3.1
 Hergesell, Mario: V 2.1, P 23.8
 Hermsdorf, Angela: P 21.5
 Herrmann, Martina: V 1.11
 Herrmann, Frank: P 2.3, P 2.6
 Herzog, P.: P 2.14
 Heudorfer, Benedikt: V 22.1, V 22.5,
 P 21.5
 Hilberg, Sylke: P 3.1, P 13.1
 Höckh, Frederick: V 2.10, V 20.2
 Hoffmann, David: V 1.13, V 4.9
 Höhn, Philipp: P 22.2
 Hoppenau, Siri: V 19.5, V 21.9
 Hörmann, Ulrike: P 23.2
 Horovitz, Marcel: V 18.6
 Houben, Georg J.: V 14.2, V 19.1, V 8.1,
 P 19.2, P 21.3
 Hu, Linwei: V 14.3
 Hüske, Karen: V 19.5, V 21.9

Huttner, Philipp: V 10.2, V 15.6

I

Ikipinar, Mehmet A.: V 7.3

Ionescu, Danny: V 16.3

J

Jaeggi, David: P 5.2

Jakobsen, Rasmus: P 9.2

Jankovski, Filip: V 5.3

Jansen, Dietmar: V 3.1

Janßen, Sebastian: V 8.4

Jaritz, Renate: V 18.1

Jasnowski-Peters, Henning: V 3.3, P 3.2

Jenn, Florian: V 3.5, V 7.4

Jenner, Anna-Kathrina: V 8.4, P 11.4

Joger, Felix: P 22.4

Jones, Adam: V 4.11

Jourde, Hervé: V 13.1

Jungfer, Christina: P 2.2

Junghanns, Ralf: V 18.4, P 21.4

Jungk, Volker: P 15.3

Jüstel, Alexander: V 4.11

Justiz, Jutta: V 20.5

Jutglar, Karuna: V 1.8

K

Kaiser, Holger: V 21.3, P 4.2

Kallmeyer, Jens: P 9.4

Kaltenbrunn, Alexander: P 13.3

Kalter, Malte: P 23.2

Kalwa, Fritz: V 9.3, V 16.2, V 19.3

Kaminsky, Eva: V 15.3

Kämmerer, Dieter: P 23.1

Kämpf, Markus: V 2.11

Kaplar, Felicitas: V 1.4

Kapusta, Krzysztof: V 3.4

Karavias, Andreas: V 3.4

Kaufhold, Stephan: V 14.2

Kavousi, Alireza: V 18.3

Kempka, Thomas: V 1.1, V 3.4

Kernbach, Kerstin: P 23.2, V 23.2

Kersten, Michael: V 9.1

Kiffer, Christian: V 14.1

Kim, Hyojin: P 9.2

Klotzsche, Anja: V 4.9

Kludt, Christoph: P 23.1

Knoblauch-Saßenscheidt, Marlen:
V 23.1

Knodel, Markus: V 5.3

Knöllner, Kay: V 6.3, V 15.3

Koch, Fabien: V 15.2

Kokimova, Ainur: V 10.3

Kollet, Stefan: P 2.6

Koltzer, Nora: V 4.6

König, Timo: V 11.4

König, Manuela: V 2.8

König, Bernd: P 23.9

König, Christoph: V 23.4, P 23.7

Königer, Paul: V 10.5, P 18.2, V 8.5

Köppen, Karl-Heinz: V 1.9

Kordilla, Jannes: P 13.2

Kostaridis, Petros: V 3.4

Kothe, Erika: P 9.3

Köthe, H.: P 2.14

Koukouzas, Nikolaos: V 3.4

Kowalczyk, Dariusz: V 3.4

Krainer, Karl: V 13.3

Krämer, Dennis: V 9.3

Krassakis, Pavlos: V 3.4

Kretschmer, Daniel: V 17.5

Kreye, Phillip: V 5.1

Kröcher, Jenny: V 2.3, V 17.4

Kruczek, Mariusz: V 3.4

Kruszewski, Michal: V 5.2

Kühn, Michael: V 1.1, V 5.6, P 5.2

Kumar, Rohini: V 2.5

Kümmel, Steffen: V 7.2

Kunkelova, Tereza: V 6.5

Kuntze, Kevin: V 7.2

Kunz, Stefan: V 22.2, V 22.5, P 21.5

L

Landgraf, Jessica: V 11.6, V 8.5

Lang, Ulrich: V 20.5

Lange, Jens: V 1.8

Langmann, Tobias: V 15.5

Lee, Haegyeong: V 4.2

Lehr, Christian: V 2.3

Leis, Albrecht: P 9.4

Leitão, Teresa: V 18.6

Lensing, Hermann-Josef: V 11.1

Leschik, Sebastian: V 15.4

Leßmann, Bernd: P 23.1

Letzelter, Sonja: P 11.2
 Leven, Carsten: V 1.13
 Licha, Tobias: P 4.3, P 9.1
 Liesch, Tanja: V 13.1, V 22.1, V 22.5,
 P 21.5, P 22.1, P 22.3
 Lischeid, Gunnar: V 2.3, V 17.4
 Liu, Quan: V 14.3
 Livshitz, Yakov: P 13.2
 Lorenz, Gesine: V 5.4, V 17.1
 Loschko, Matthias: V 20.6
 Loui, Constantin: V 11.1, V 11.2
 Louloudis, Georgios: V 3.4

M

Maier, Denis: P 11.2
 Maier, Ulrich: P 4.5
 Malik, Christoph: P 11.4
 Mallast, Ulf: V 16.3
 Manthey, Christoph: P 15.3
 Marinkovic, Henning: V 23.6
 Martens, Jörg: V 2.8
 Martus, Peter: V 7.3
 Marx Gómez, Jorge: V 21.9
 Massmann, Gudrun: V 1.5, V 8.1, P 8.1,
 V 2.7, V 6.1
 Maurischat, Philipp: V 6.1
 Mayer, Julia: V 2.9, V 21.2
 Mazurek, Martin: V 5.5
 McNamara, Ian: P 2.3, P 2.6
 Mechler, Melanie: V 7.3
 Meesenburg, Henning: V 10.5
 Mehler, Franziska: V 3.5, P 2.10
 Melchers, Christian: V 3.3, P 3.2
 Menberg, Kathrin: V 7.3, V 4.2, V 14.4,
 V 15.2
 Meneses Rioseco, Ernesto: V 4.7
 Menschner, Karsten: P 15.1
 Merchel, Silke: V 16.3
 Merkel, Broder: V 16.3
 Mertiri, Eleni: V 3.4
 Merz, Christoph: V 18.2
 Meßer, Johannes: P 15.2
 Meyer, Laura: V 1.11
 Meyer, E.: P 2.14
 Meyer, U.: P 2.14
 Michelsen, Nils: V 16.4
 Mirgorodsky, Daniel: P 9.3

Miro, Shorash: V 5.1
 Mischel, Simon: V 11.6
 Moeck, Christian: V 21.1
 Mohanty, Sweetie: P 22.4
 Möhler, Felix: P 2.5, P 23.2
 Möller, Peter: V 16.3
 Monninkhoff, Bertram: P 23.2
 Monninkhoff, Lambertus: V 23.2
 Montcoudiol, Nelly: V 8.2
 Montenegro, Héctor: P 11.2
 Moosdorf, Nils: V 8.4, V 17.5
 Morhard, Andreas: P 23.3
 Moulaeifard, Seyyed'Mohammad: V 5.2
 Mudarra, Matías: V 13.1
 Müller, Frank: V 2.2
 Müller, Paulina: V 5.1
 Müller, Yanina Katharina: V 13.4
 Müller, Mike: V 21.8
 Müller-Petke, Mike: P 18.1
 Muñoz-Vega, Edinsson: V 18.5, V 18.6
 Munz, Matthias: V 11.1, V 10.4, V 11.2
 Musolff, Andreas: V 2.5

N

Naegel, Arne: V 5.3
 Nagel, Thomas: P 4.4
 Najgebauer, Dariusz: V 3.4
 Nantke, Carla: V 8.4, P 11.4
 Nazari, Sara: P 2.8
 Nettemann, Sarah: P 9.3
 Neukum, Christoph: V 10.5
 Niederau, Jan: V 4.6
 Nienstedt, Daniel: V 2.8
 Nils, Moosdorf: P 2.8
 Noethen, Maximilian: P 4.1
 Noffke, Anna: P 9.4
 Nölscher, Maximilian: V 22.2, V 23.5
 Nordbeck, Johannes: V 4.4
 Nordheim, Jan Niklas: V 4.4
 Noseck, Ulrich: V 5.3
 Nyéki, Eszter: V 15.3

O

Ohmer, Marc: P 22.1, P 22.3
 Oppelt, Lukas: P 4.4
 Orkisz, Dorota: V 3.4
 Ortmeyer, Felix: V 2.6, P 9.2

Osenbrück, Karsten: V 8.2
 Oswald, Sascha E.: V 10.4, V 11.1,
 V 11.2, P 10.3, P 10.4
 Oswald, Thomas: V 4.1, V 4.11
 Otto, Christopher: V 3.4
 Oude Essink, Gualbert H. P.: V 2.7
 Oussouss, Abdelouahed: P 17.1

P

Pahnke-May, Katharina: P 8.1
 Panitz, Florian: V 5.1
 Paraskevis, Nikolaos: V 3.4
 Parra-Suarez, Silvia: V 11.3
 Pasek, Benedykt: V 14.5
 Pavetich, Stefan: V 16.3
 Pavlova, Alexandra: P 2.5
 Pawlik, Marcin: V 3.2
 Peche, Aaron: P 21.3
 Pedrosa, Lúcia: V 11.5, V 21.8
 Peiffer, Stefan: V 13.3
 Petitta, Marco: V 13.1
 Pfletschinger-Pfaff, Heike: V 2.11
 Philip, Schuler: V 8.5
 Philipp, Thimo: P 5.1
 Philipp, Sven: V 1.9
 Pinkoss, W.: V 7.4
 Pirrung, Michael: V 1.9
 Pittroff, Marco: V 11.1, V 11.2
 Plewe, Sascha: P 8.1
 Pohl, Thomas: V 16.3
 Pohl, Stefan: V 4.8
 Pohl, Martin: P 2.15
 Post, Vincent: V 8.1
 Postler, Denise: V 11.2
 Prein, Angela: P 10.1, P 23.1
 Prevoo, Renard: V 19.2
 Ptak, Thomas: V 14.3
 Pyrgaki, Konstantina: V 3.4

Q

Quensel, Peter: V 4.8

R

Radny, Dirk: V 11.6, P 2.14
 Raju, Nandimandalam Janardhana:
 P 17.1
 Rath, Maike: P 2.15

Rau, Gabriel C.: V 14.4
 Rausch, Randolph: V 14.1, P 16.1
 Ravbar, Nataša: V 13.1
 Reckhardt, Anja: P 8.1
 Redeker, Jan: V 17.2
 Reimann, Thomas: V 13.6, V 18.3,
 V 21.4, V 21.5
 Reinecke, Robert: V 17.5, P 2.14
 Reinhardt, Katrin: P 2.15
 Reinsch, Thomas: V 4.11
 Remppe, Marieke: V 5.1
 Renard, Philippe: V 13.6
 Renz, Alexander: V 5.1
 Reuther, Jörg: V 21.7
 Rezvani, Matin: V 16.4
 Richard-Cerda, Juan Carlos: V 6.3
 Richter, Erik: V 4.11
 Richter, Marcus: P 2.15
 Rick, Johannes J.: V 8.4
 Riechel, Mathias: V 19.5
 Riedel, Thomas: V 10.1
 Riedel, Ramona: V 8.4
 Ringel, Lisa Maria: V 14.3
 Rivera Armendariz, Cristian Abraham:
 V 9.2
 Rivera Villarreyes, Carlos Andres: V 4.7
 Roberts, Magali: P 8.1
 Rödiger, Tino: V 16.3
 Rodriguez-Escales, Paula: V 18.5
 Roepke, Ronald: V 19.6
 Roeser, Patricia: V 8.4, V 8.6, P 9.4,
 P 11.4
 Rohns, Hans-Peter: V 1.2, V 1.3, P 15.4
 Römhild, Lukas: V 14.3
 Rose, Lisa: P 3.2
 Rotenhagen, Anna-Lena: V 6.1
 Roumpou, Christos: V 3.4
 Rubbert, Till: V 2.12
 Rude, Thomas R.: V 6.2
 Rudolph, Tobias: V 3.2
 Rudolph, Sascha: V 1.9
 Rudolph, Max Gustav: V 13.6, V 20.3
 Rühaak, Wolfram: V 5.1
 Rütters, Sophia: V 13.1

S

Saban, Rhodelyn: P 11.4

- Saile, P.: P 2.14
 Salamon, Martin: V 4.11
 Sánchez González, Rodrigo: V 1.10
 Sanchez-Vila, Xavier: V 18.5
 Sandén, Hans: V 15.3
 Sargsyan, Nikita: P 16.1
 Sauter, Martin: P 13.2, P 4.5
 Schäfer, Sandra: P 23.8
 Schäfer, Thorsten: V 1.9, P 9.3
 Scheck-Wenderoth, Magdalena: P 2.4
 Scheiffele, Lena M.: V 10.4, P 10.3,
 P 10.4
 Schell, Antonia: V 8.4
 Scheytt, Traugott: V 1.2, V 1.3, V 1.12,
 V 4.5, V 9.4, V 11.5, V 13.5, V 14.6,
 P 4.4, P 15.4
 Schiperski, Ferry: V 13.5
 Schirmer, Mario: V 15.1, V 21.1
 Schleicher, Anja: P 5.2
 Schlinsog, Tobias: P 2.12
 Schlömer, Stefan: P 3.2
 Schloo, Mareike: V 6.1
 Schmidt, Axel: V 11.6, V 8.5
 Schmidt, Sarah: P 8.2
 Schmidt, Isabelle: P 18.2
 Schmidt, Lena Katharina: P 21.5
 Schmiedinger, Iris: P 8.1, P 9.4, P 11.4
 Schneider, Michael: P 18.2
 Schneider, Anke: V 5.3
 Schnepfer, Tobias: V 1.1
 Schnepfer, Tobias: V 3.4
 Schöninger, Hans Matthias: V 15.5
 Schramm, Sebastian: V 14.6
 Schröder, Simon: V 11.4, V 23.4
 Schulz, Alexander: V 22.2
 Schulz, Stephan: V 1.6, V 6.3, V 16.4,
 V 18.5, V 18.6
 Schüth, Christoph: V 6.3, V 18.5,
 V 18.6, V 19.6, P 10.1
 Schwalb, Antje: P 9.4
 Schwenzer, Ines: P 2.10
 Scibek, Jacek: V 5.2
 Seelig, Magdalena: V 13.2, V 13.3
 Seelig, Simon: V 13.2, V 13.3
 Seibert, Stephan L.: V 2.7
 Seibert, Simone: V 16.2
 Selfo, Enio: P 9.1
 Senner, Renate: P 23.1
 Serbe, Rebecca: V 13.
 Servou, Aikaterini: V 3.4
 Shakas, Alexis: V 5.2
 Siebert, Sybille: P 23.1
 Siebert, Christian: V 16.3, P 2.14
 Simmons, P.: V 7.4
 Simon, Stefan: V 3.1
 Söhlmann, Reiner: V 7.3
 Solsbach, Andreas: V 21.9
 Spengler, Cornelia: V 15.2
 Sprenger, Christoph: V 18.4
 Stadler, Susanne: V 10.5
 Stammeier, Jessica: P 5.2
 Stang, Anja: V 6.4
 Stange, Claudia: V 13.
 Stautzebach, Jan: V 18.2
 Stecken, Lutz: V 5.1
 Stefan, Catalin: V 18.4, P 21.4
 Steidl, Jörg: V 2.3, V 18.2
 Stein, Heide: V 15.2
 Steinel, Anke: V 8.2
 Steiner, Cornelia: V 15.3
 Steiner, Ulrich: V 4.6
 Stelmaszyk, Lara: V 13.5
 Stemmle, Ruben: V 4.2
 Stephan-Scherb, Christiane: P 5.1
 Stevanović, Zoran: V 13.1
 Stiasny, Jan: V 16.1
 Stiller, Björn: V 2.8
 Stilling, Michael: V 19.6
 Stöckl, Michael: V 6.4
 Stoelzle, Michael: V 1.8
 Stoepker, Klaas: P 23.9
 Stolpe, Harro: P 2.9
 Stolz, Wolfgang: V 23.5
 Stopelli, Emiliano: V 5.4
 Strauss, Harald: P 3.2
 Strom, Alexander: P 2.1
 Strozyk, Frank: V 4.11
 Stumpp, Christine: V 15.3, P 10.3
 Sültenfuß, Jürgen: V 8.1
 Suzuki, Anna: V 14.4

T

- Taherdangkoo, Reza: V 22.6
 Teichert, Barbara: P 3.2
 Theo, Simon: V 14.1

Thissen, Lena: V 1.5
Thullner, Martin: V 22.5
Traber, Daniel: V 5.4
Track, Thomas: P 2.2
Trauth, Nico: V 6.4
Tschaikowski, Jarrid: V 17.5
Tsypin, Michael: P 2.4

U

Ud Dowlah Pahlowan, Ershad: V 3.4
Uschan, Thorben: P 2.3, P 2.6
Ussath, Maria: P 23.6

V

van der Schans, Martin: V 4.10, V 19.2
van Eimeren, Noor: V 4.10
van Geldern, Robert: V 8.5, P 8.2
Vieira, Saulo: V 21.3
Vogel, Alexander L.: V 18.5
Vogt, Clara: V 1.2, V 1.3, P 15.4
von Beusekom, Justus E. E.: V 8.4
Vremec, Matevž: V 13.2

W

Wagener, Thorsten: V 20.3
Wagner, Niklas: P 2.6
Wagner, Frank: V 9.3
Walter, Joshua: V 7.3
Walter, Thomas: V 3.6
Wannous, Manal: P 16.2
Weber, Tobias KD: V 10.1
Węgrzyn, Gabriel: V 3.4
Weiß, Martin: V 5.1
Weißer, Alina: P 10.2
Weitkamp, Axel: V 14.2
Wellmann, Florian: V 4.6
Wengorsch, Tobias: V 5.1
Werisch, Stefan: P 10.5
Wersin, Paul: V 5.5
Wesche, Dominik: V 23.3

Wessels, Jost: V 22.4
Wessels, Martin: P 9.4
Westermann, Sebastian: V 3.3, P 3.2
Wetzel, Maria: V 22.2, V 22.5, P 21.5
Weyand, Torben: P 5.1
Weyers, Justus: V 2.3
Wick, Natalie: V 19.6
Wieber, Georg: V 4.8
Wiegand, Bettina: P 4.5
Wiegand, Laura: V 7.1
Wild, Romy: V 11.3
Winde, Vera: P 6.1, P 9.4
Winderl, Maximilian: V 10.2
Winkler, Gerfried: V 13.2, V 13.3
Witthöft, Melanie: V 23.6, P 2.12, P 23.5
Wittum, Gabriel: V 5.3
Wöhling, Thomas: V 20.3
Wohnlich, S.: P 2.14
Wolf, Thomas: P 9.4
Wolke, Philipp: P 2.1
Woschick, Lydia: V 1.2, V 1.3, P 15.4
Würth, Andreas: V 7.3
Wybrands, Marius: V 21.9

X

Xanke, Julian: V 13.1, P 22.3

Y

Yechieli, Yossi: V 16.3

Z

Zaepke, Markus: V 23.5
Zepp, Harald: V 11.4
Zhao, Hong: V 5.3
Zietzschmann, F.: V 7.4
Zimmermann, Christian: P 23.7
Zingelmann, Markus: V 11.
Zinsou, Didier: P 16.2
Zygouri, Evangelia: V 3.4



- Auswirkungen verstehen
- Anpassungsstrategien entwerfen
- Ressourcen nachhaltig bewirtschaften

Spezialisten für Grundwasser und den Rohrpassivsammler



GCI GmbH

Grundwasser Consulting
Ingenieurgesellschaft

Bahnhofstr. 19 // 15711 Königs Wusterhausen
www.gci-kw.de // Tel.: 03375 29 47 85

Risikomanagement
nach TrinkwEGV
und TrinkwV

GW-Modellierung
GW-Neubildung
Klimaprojektionen

GW-Erkundung
GW-Bewirtschaftung
GW-Schutz

Planung und
Fachbauüberwachung
Brunnen

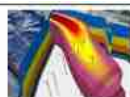
Altlasten- und
GW-Sanierung
GW-Monitoring

Geodatenbanken
Vertrieb GEBAH

Rohrpassivsammler:
Integrale Überwachung
Wasserinhaltsstoffe

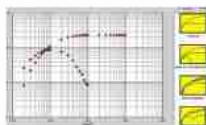


Wir stellen ein! Senden Sie gerne Ihre Bewerbung an mail@gci-kw.de



Software

Visual MODFLOW Flex (Modellierung)
AquaChem (Wasserchemie DB)
AquiferTest (Pumpversuchsauswertung)
Hydro GeoAnalyst (Umweltdaten DB)



Probenahme

Bodenuntersuchungen

MP 1, Schlauchquetsch (GW-Pumpen)
Bohrerzeugnisse und Pegelmaterial
Wasser- / Boden-Probenahme

Monitoring

DIVER (Grundwasser-Datenlogger)
SCUBA (Multiparametersonden)
GDT-S (Datenfernübertragung)
Webportal (Online Monitoring)



Dienstleistungen

Projektberatung
Miete (Grundwasserpegel /-Qualität)
Datenservice / Full Service



BIESKE UND PARTNER

BERATENDE INGENIEURE GMBH

Ingenieurbüro für Wasserversorgung und Umwelttechnik

- Brunnen, Quellen und Wasserwerke
- Brunnenmanagement
- Wasserbehälter, Rohrleitungen
- Hydrogeologie, Grundwasserschutz
- Wasserrechte, Wasserschutzzonen

Beratung
Gutachten
Planung
Bauleitung

Im Pesch 79
53797 Lohmar

Tel. +49 2246 9212 - 0
Fax +49 2246 9212 - 99

www.bieske.de
info@bieske.de



Solinst®

Hochwertige Instrumente zur Überwachung von Grund- und Oberflächenwasser



- Wasserstandmessgeräte
- Datenlogger und Telemetriesysteme
- Grundwasserprobenehmer
- Multilevel-Systeme und Sanierungsgeräte
- Drive-Point-Piezometer

Solinst Canada Ltd., 35 Todd Road, Georgetown, ON L7G 4R8
Tel: +1 (905) 873-2255 F. E-mail: instruments@solinst.com

solinst.com



Für die Umwelt. Für die Menschen.

Die HPC AG ermöglicht seit 1948 die Verwirklichung kühner Pläne: Von der Sanierung schadstoffbelasteter Böden, dem Bau von Mineralwasserbrunnen bis hin zum Erstellen hochqualitativer Baugrundgutachten – das Thema Nachhaltigkeit haben wir immer im Blick.

Was macht HPC in der Hydrogeologie und im Grundwasserschutz?

- Hydrogeologische Untersuchungen und geohydraulische Tests sowie deren Auswertung und Interpretation
- (hydro)geologische und hydrochemische Standortanalysen
- Erschließungs- und Schutzgebietsgutachten
- Aufbau und Anwendung von Grundwasserströmungs- und Transportmodellen (stationär und instationär), konservativer und reaktiver Stofftransport, Wärmetransport
- GIS-gestützte Datenanalyse und Darstellung
- Grund- und Mineralwasserbewirtschaftungskonzepte
- Bewertung von Risiken für eine qualitativ und quantitativ nachhaltige Wasserversorgung

Unser vollständiges Leistungsportfolio finden Sie unter **www.hpc.ag**. Von Lösungen für Kund:innen bis zu spannenden Chancen für Mitarbeitende.



Flächenrecycling



Umweltberatung



Infrastrukturplanung

HPC AG

Nördlinger Straße 16
86655 Harburg

info@hpc.ag
Tel. 09080 999-0



www.hpc.ag



Jeden Morgen trinken drei von vier Menschen in Deutschland Grundwasser. Dass dies wenig bewusst ist, liegt nicht nur an der Maskierung als Kaffee oder Tee, sondern auch am langen Weg über Rohwasser, Wasseraufbereitung und zentraler Wasserverteilung. Wasser ist ein unverzichtbares Lebensmittel und Grundwasser unsere wichtigste Georessource. Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft kennzeichnen die Bewirtschaftung des Grundwassers. Der Erhalt der Ökosystemleistung zur Bereitstellung von Grundwasser in hochwertiger Quantität und Qualität ist eine ständige Aufgabe in Forschung und Berufspraxis.

Auf die Grundwasserbewirtschaftung kommen neue Herausforderungen durch Spurenstoffe und den Klimawandel zu. Die Komplexität dieses Themas zeigt die in einigen Regionen zukünftig erhöhte Grundwasserneubildung, die Zunahme von Dürreperioden, und die offenen Fragen zum Einfluss steigender Temperaturen auf die Grundwasserqualität. Der Nutzungsdruck auf die nachhaltig verfügbare Grundwasserreserve wird steigen.

Die 29. Tagung der Fachsektion Hydrogeologie, als der nationalen Vereinigung für das Grundwasser, bietet neben dem fachlichen Austausch die Chance, neue Ideen zu entwickeln und Partnerschaften für entsprechende Aktivitäten zu bilden. Die verschiedenen Sessions behandeln das „Analysieren“ von Grundwassersystemen hinsichtlich Quantität und Qualität, das „Prognostizieren“ von zeitlichen und räumlichen Entwicklungen sowie das „Gestalten“ der zukünftigen Grundwassernutzung und ihre Anpassung an den Klimawandel.

Der Tagungsband enthält organisatorische Informationen, eine Programmübersicht, die Kurzfassungen aller Vorträge und Poster sowie eine Autorenliste.

ISBN: 978-3-926775-79-5