KLIMA UND GRUNDWASSER

RÜCKBLICKE UND VORHERSAGEN VON TEMPERATUR UND SAUERSTOFF MITTELS HISTORISCHER AUFZEICHNUNGEN

Historische Messungen zeigen, dass das Grundwasser in gewissen Aquiferen stark auf Änderungen des grossskaligen Klimas und der Lufttemperatur reagiert und sich deshalb in der Vergangenheit deutlich erwärmt hat. Den grössten Anteil an dieser Erwärmung hatte ein sprunghafter Anstieg Ende der 1980er-Jahre. Eine zukünftige Erhöhung der Grundwassertemperatur, wie sie in dieser Studie prognostiziert wird, könnte unter Umständen zu einem zeitweiligen Rückgang der Sauerstoffkonzentration führen.

Simon Figura, Eawag, ETH Zürich*
David M. Livingstone, Eduard Hoehn, Eawag; Rolf Kipfer, Eawag, ETH Zürich

RÉSUMÉ

LE CLIMAT ET L'EAU SOUTERRAINE – RÉTROSPECTIVE ET PERSPECTIVE À TRAVERS DES DONNÉES HISTORIQUES DE LA NAPPE PHRÉATIQUE

Les études relatives à l'influence du climat et du changement climatique sur le cycle de l'eau sont tributaires de séries de mesures complètes et portant sur une longue période. Étant donné que ces données concernant la nappe phréatique sont souvent manquantes, les connaissances quant à l'influence du climat et du changement climatique sur la nappe phréatique, et notamment sur la qualité de l'eau souterraine, sont toujours insuffisantes. Préalablement à cette étude, il a tout de même été possible de trouver, rassembler et numériser des mesures historiques de différentes variables de la nappe phréatique en Suisse. Les mesures de la température et de la concentration d'oxygène dans la nappe phréatique ont été analysées dans le cadre de cette étude. En analysant les températures de la nappe phréatique, on a constaté que celles-ci avaient fortement augmentées dans les eaux souterraines, notamment les aquifères alimentées par les rivières. Le réchauffement le plus important a eu lieu à la fin des années 80, lorsque la température de la nappe phréatique a augmenté brusquement, tout comme les températures de l'air et de l'eau des rivières. Cette augmentation soudaine est probablement due au comportement de l'oscillation arctique, ce qui montre que la température de la nappe phréatique des aquifères alimentées par des rivières réagit fortement vis-à-vis du climat global.

> S. 33

EINLEITUNG

Während der letzten 20 Jahre zeigte sich immer deutlicher, dass nicht nur der steigende globale Wasserbedarf die zur Verfügung stehenden Wasserressourcen verknappt, sondern dass auch der Klimawandel diese ohnehin beunruhigende Situation wohl noch prekärer machen wird [1, 2, 3]. Das Thema des Einflusses des Klimas und des Klimawandels auf die Binnengewässer gewinnt daher immer stärker an Bedeutung. Empirische, auf historischen Messungen beruhende Forschung über die Auswirkung des Klimawandels auf Oberflächengewässer in vielen Erdteilen hat langfristige Änderungen in Wassertemperatur und Eisphänologie nachgewiesen und deutlich gezeigt, dass beide vom grossskaligen Klima beeinflusst sind [4, 5, 6, 7]. In der Schweiz, wo der Klimawandel sich überdurchschnittlich auswirkt [8], haben sich Seen und Flüsse im Einklang mit dem Klima langfristig erwärmt [9, 10].

Das Wissen über die Bedeutung des Klimas und des Klimawandels für das Grundwasser ist wenig zufriedenstellend. Wie im Fall der Oberflächengewässer wären empirische Untersuchungen über die Auswirkung des Klimawandels auf Grundwasser über einige Jahrzehnte sehr wünschenswert. Solche Untersuchungen sind jedoch selten, weil – wie vom Zwischenstaatlichen Aus-

** Kontakt: simon.figura@eawag.ch*

schuss für Klimaänderung (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) bereits festgestellt – die nötigen langfristigen Grundwasserdaten grösstenteils fehlen [1, 2]. Die verfügbaren langfristigen Grundwasserdaten (z. B. Pegelstand, Quellenertrag) ermöglichen nur Erkenntnisse über den Einfluss des Klimawandels auf die Grundwasserquantität (bzw. über das Fehlen eines solchen Einflusses: siehe z.B. *Scheiwiller et al., S. 14* [*11*]). Die ausgesprochene Seltenheit langfristiger Messungen der Grundwassertemperatur und anderer Grössen, welche die Grundwasserqualität beeinflussen, verunmöglichte hingegen bis anhin empirisch belegbare Aussagen über den Einfluss des Klimawandels auf die Grundwasserqualität.

Mit Unterstützung der Arbeitsgruppe «Grundwasser und Klima» der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie wurden aber lange Datenreihen der Wassertemperatur und teilweise auch der Sauerstoffkonzentration in einigen Aquiferen der Schweiz gefunden, digitalisiert und der Forschung zur Verfügung gestellt [12]. Die hier zusammenfassend präsentierte Auswertung dieser Daten im Rahmen eines Projektes des NFP 61 (siehe Interview [13] in *Aqua & Gas 6/12*) gibt erste, empirisch basierte Hinweise auf mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf eine Grösse, die von wesentlicher Bedeutung für die Grundwasserqualität ist: die Grundwassertemperatur.

Die hier zusammengefassten Ergebnisse wurden im Rahmen einer Doktorarbeit an der Eawag erarbeitet, sie bilden den Hauptteil des Projekts «Einfluss des Klimawandels auf das Grundwasser» von *Livingstone et al.* – eines Projekts des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 *Nachhaltige Wassernutzung* des Schweizerischen Nationalfonds *(www.nfp61.ch)*.

DATEN

Die hier beschriebenen Resultate beruhen mehrheitlich auf Grundwassertemperaturdaten, die seit mehreren Jahrzehnten in den Pumpwerken Seewerben (RhSe), Neuhausen (RhNe), Signau (EmSi), Kiesen (AaKi) und Linsental (TöLi) gemessen wurden. Die ca. 15–30 m mächtigen Aquifere, die sich alle im Schweizer Mittelland befinden *(Fig. 1)*, werden vorwiegend durch Flussinfiltration von Rhein (Rh), Emme (Em), Aare (Aa) oder Töss (Tö) gespeist. In einigen dieser Pumpwerke sind auch die Sauerstoffkonzentrationen aufgezeichnet worden. Die in der Nähe der Pumpwerke gemessenen Flusstemperaturdaten wurden zu Vergleichszwecken herangezogen. Zusätzlich wurden Grundwassertemperaturdaten kurz analysiert, die von drei Aquiferen im Schweizer Mittelland stammen, deren Grundwasser nur durch die direkte Infiltration des Niederschlagswassers entsteht. Die Messungen wurden in einem Pumpwerk (Vorem Haag) und zwei Quellen (Käferberg, Aeschbach) durchgeführt *(Fig. 1)*.

ERGEBNISSE

ANALYSE DER HISTORISCHEN GRUNDWASSERTEMPERATURDATEN

Eine erste Analyse der verfügbaren historischen Daten [14] zeigte, dass die Grundwassertemperatur vor allem in denjenigen Aquiferen, die vorwiegend durch Flussinfiltration gespeist werden, vom regionalen Klima stark beeinflusst wird. In den letzten 30–50 Jahren stieg die Grundwassertemperatur in solchen Aquiferen ähnlich stark an wie Luft- und Flusswassertemperaturen in der Schweiz. Diejenigen Aquifere, die nur durch direkte Infiltration des Niederschlagswassers gespeist werden, zeigten im Gegensatz dazu nur eine sehr kleine oder gar keine Erwärmung. Die weiteren Untersuchungen fokussierten deshalb auf die durch Flussinfiltration gespeisten Aquifere. Solche Aquifere tragen ca. 25% zur Trinkwasserversorgung der Schweiz bei. Eine detaillierte Untersuchung der Grundwassertemperaturdaten, die in den letzten Jahrzehnten in den Pumpwerken RhSe, RhNe, EmSi, AaKi und TöLi gemessen wurden, bestätigt, dass die Grundwassertemperatur in allen fünf Pumpwerken zugenommen hat. Für die Periode 1980–2000 stiegen die Temperaturen um 0,5 bis 0,7° C pro Jahrzehnt – ähnlich wie die Zunahme der Flusstemperaturen und nur geringfügig weniger als die Zunahme der regionalen Lufttemperatur – diese stieg in der gleichen Periode im Mittel um 0,7° C pro Jahrzehnt an *(Tab. 1)*. Die Untersuchung zeigte Unterschiede, aber auch interessante Ähnlichkeiten zwischen den gemessenen Datenreihen *(Fig. 2)*. In allen Pumpwerken fand z. B. ein sprunghafter Anstieg der Grundwassertempe-

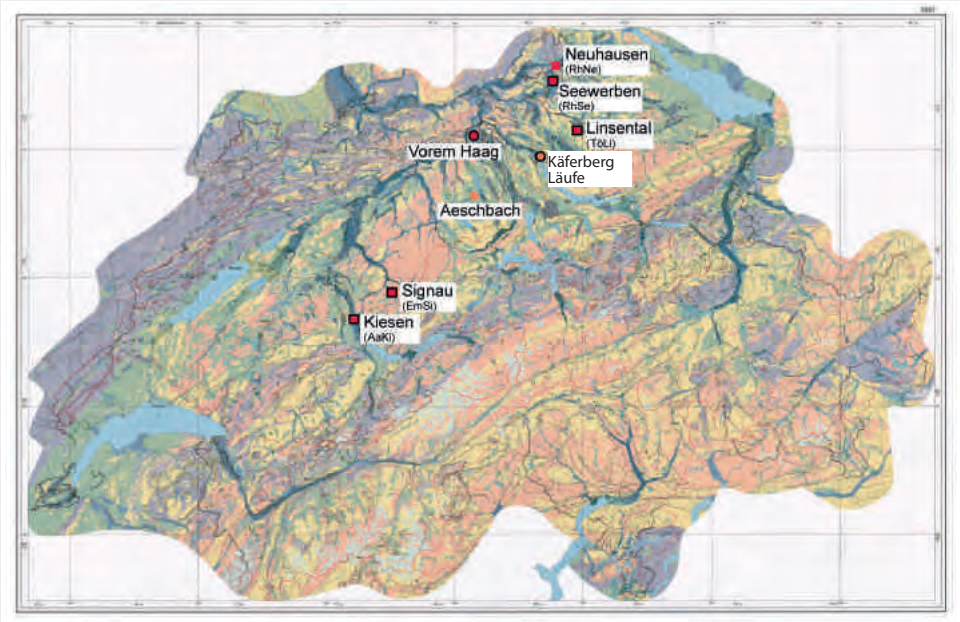

Fig. 1 Standorte der Pumpwerke (rot) und Quellen (orange), deren Temperaturmessungen im Text beschrieben werden. Bei den Quadraten handelt es sich um Pumpwerke in von Flusswasser gespeisten Aquiferen; die Quellen und der Aquifer bei Vorem Haag (Kreise) sind nur von Niederschlag gespeist. Die Messreihen an Standorten mit schwarz umrandeten Markierungen wurden für die Temperaturvorhersagen verwendet. Im Text verwendete Abkürzungen für einige Aquifere sind in Klammern aufgeführt

(Quelle: Bundesamt für Landestopografie)

Positions des stations de pompage (rouge) et des sources (orange) dont les mesures de température sont décrites dans le texte. Pour les carrés, il s'agit de stations de pompage d'aquifères alimentées par des rivières; les sources et l'aquifère près de Vorem Haag (cercles) sont uniquement alimentées par les précipitations. Les séries de mesures des sites présentant des marquages entourées en noir ont été utilisées pour les prévisions des températures

	MK	TS
Lufttemperatur		
Mittelwert von Basel, Bern, Neuenburg, Zürich	**	0,71
Flusstemperatur		
Rhein (Rh)	***	0,65
Emme (Em)	***	0,45
Aare (Aa)	***	0,57
Grundwassertemperatur		
Seewerben (RhSe)	**	0,59
Neuhausen (RhNe)	***	0,61
Signau (EmSi)	***	0,70
Kiesen (AaKi)	***	0,63
Linsental (TöLi)	***	0,52

Tab. 1 Trends in Temperaturjahresmitteln, 1980–2000. Aufgelistet sind die Resultate des nicht parametrischen Mann-Kendall-Trend-Tests (MK) und die nach der nicht parametrischen Theil-Sen-Methode berechneten Trends (TS). Signifikanz des MK-Tests: p < 0,05 (**); p < 0,01 (***)

Tendances avec les moyennes annuelles des températures, 1980–2000. Les résultats du test de tendance non paramétrique de Mann-Kendall (MK) et les tendances calculées selon la méthode non paramétrique de Theil-Sen (TS) sont énumérés. Signification du test MK: p < 0,05 (**); p < 0,01 (***)

ratur in den späteren 1980er-Jahren statt, der auch statistisch belegbar ist [15]. Ein solcher Sprung zwischen ca. 1987 und 1988, der in Flusstemperaturen in der ganzen Schweiz bereits nachgewiesen wurde [10], ist in den Temperaturdatenreihen von Rh, Em, Aa und Tö auch klar vorhanden *(Fig. 2)* und statistisch nachweisbar [15]. Der Grund für den abrupten Temperaturanstieg liegt wohl im Verhalten der Arktischen Oszillation (AO), welche die atmosphärische Zirkulation und somit das grossskalige Klima in den höheren und mittleren Breitengraden der nördlichen Hemisphäre im Winter und Frühjahr wesentlich mitbestimmt. Eine abrupte Zunahme des AO-Indexes (ein Mass der Stärke der AO) von 1987 auf 1988 hatte generell wärmeres Wetter in Nordeuropa und in Teilen von Ostasien zur Folge, gekoppelt mit generell kälterem Wetter im Nordosten von Kanada und in Südgrönland [16]. Obwohl es in einzelnen Jahren Ausreisser gibt, dauert dieser Zustand im Mittel noch an, sodass man von einer Änderung des Klima-Regimes in den genannten Regionen der nördlichen Hemisphäre von einem Regime I (bis und mit 1987) zu einem Regime II (ab 1988) sprechen kann. In der Schweiz nahmen von Regime I zu Regime II die Flusstemperaturen im Mittel um 0,7 bis 1,4° C zu (Rh, Em und Aa; die Datenreihe von Tö ist zu kurz, um eine Aussage zu ermöglichen), während die entsprechenden Grundwassertemperaturen (RhSe, RhNe, EmSi, AaKi, TöLi) um 0,7 bis 1,1 °C stiegen [15]. Die Analyse der historischen Temperaturdatenreihen zeigte, dass die Grundwassertemperatur in denjenigen Schweizer Aquiferen, die durch Flussinfiltration gespeist sind, mit hoher Wahrscheinlichkeit von grossskaligen Klimaphänomenen wie der AO wesentlich mitbestimmt wird.

Es kamen aber auch interessante Unterschiede zwischen den Grundwassertemperaturdatenreihen zum Vorschein. Weder in Regime I noch in Regime II wies die Wassertemperatur in den Flüssen, welche die untersuchten Aquifere speisen, einen statistisch nachweisbaren Trend auf. Dies deutet darauf hin, dass beinahe die gesamte Zunahme der Flusstemperaturen in den letzten Jahrzehnten auf den abrupten Anstieg in den späteren 1980er-Jahren zurückzuführen ist. Diese Aussage stimmt mit den Resultaten anderer Untersuchungen überein [10,17].

Was die Grundwassertemperaturen betrifft, sieht die Situation etwas anders aus. In Regime II gab es Unterschiede im Verhalten der vom Rhein gespeisten Aquifere (RhSe, RhNe) und der anderen Aquifere (EmSi, AaKi, TöLi). Wie die Wassertemperatur des Rheins, zeigte die Grundwassertemperatur von RhSe und RhNe keinen statistisch nachweisbaren Trend. In den anderen Aquiferen (EmSi, AaKi, TöLi) hingegen nahm die Grundwassertemperatur in Regime II um ca. 0,65 °C pro Jahrzehnt zu, obwohl die entsprechenden Flusstemperaturen im Regime II keinen Anstieg aufwiesen (*Fig. 2*; [15]). Bis jetzt konnte keine schlüssige, wissenschaftlich zufriedenstellende Erklärung für das unterschiedliche Verhalten gefunden werden.

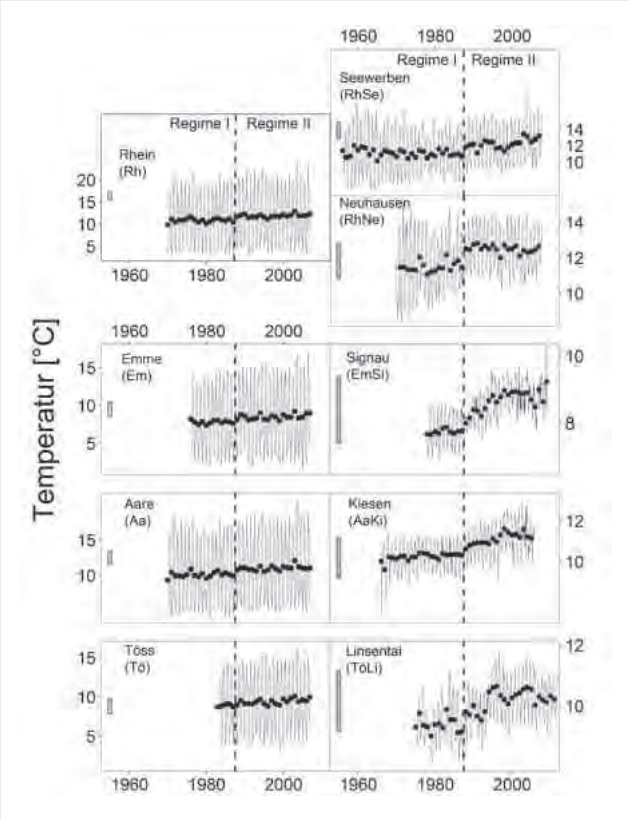

Fig. 2 Von Flusswasser gespeiste Aquifere. Monatsmittel (Linien) und Jahresmittel (Punkte) gemessener Flusswassertemperaturen (links) bzw. Grundwassertemperaturen (rechts). In Klammern stehen die im Text verwendeten Abkürzungen. Regime I (bis und mit 1987) wird von Regime II (nach 1988) jeweils durch eine senkrechte, gestrichelte Linie getrennt. Um den Vergleich der verschiedenen Messreihen zu vereinfachen, zeigt das graue Rechteck auf der linken Seite jeder Abbildung eine Temperaturdifferenz von 2 °C an

Aquifères alimentées par l'eau des rivières. Moyennes mensuelles (lignes) et moyennes annuelles (points) des températures mesurées de l'eau des rivières (à gauche) et de l'eau souterraine (à droite). Les abréviations utilisées dans le texte sont indiquées entre parenthèses. Le régime I (jusqu'en 1987 inclus) est respectivement séparé du régime II (après 1988) par une ligne pointillée verticale. Pour simplifier la comparaison des différentes séries de mesures, le rectangle gris à gauche de chaque illustration montre une différence de température de 2 °C

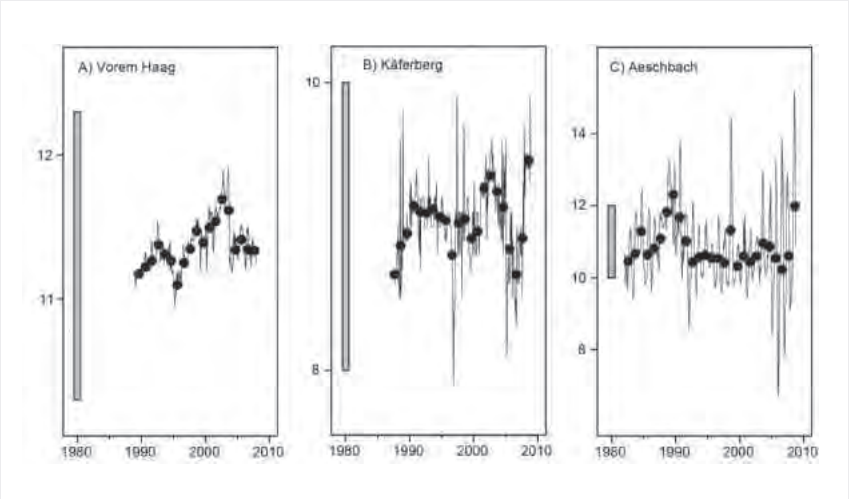

Fig. 3 Nicht von Flusswasser gespeiste Aquifere. Monatsmittel (Linien) und Jahresmittel (Punkte) gemessener Grundwassertemperaturen im Pumpwerk Vorem Haag (A) sowie in den Quellen Käferberg und Aeschbach (B-C). Um den Vergleich der verschiedenen Messreihen zu vereinfachen, zeigt das graue Rechteck auf der linken Seite jeder Abbildung eine Temperaturdifferenz von 2 °C an

Aquifères non alimentées par l'eau des rivières. Moyennes mensuelles (lignes) et moyennes annuelles (points) des températures mesurées de l'eau souterraine à la station de pompage de Vorem Haag (A) ainsi qu'au niveau des sources Käferberg et Aeschbach (B-C). Pour simplifier la comparaison des différentes séries de mesures, le rectangle gris à gauche de chaque illustration montre une différence de température de 2 °C

Obwohl Flusswassertemperaturen stark und fast unmittelbar auf Klimafluktuationen reagieren, trifft dies bei Grundwassertemperaturen häufig nicht zu: Abhängig von der Zeit, die das Flusswasser benötigt, um durch die hyporheische Zone zu infiltrieren und zum jeweiligen Pumpwerk zu gelangen, kann das Klimasignal abgeschwächt und mit Verzögerung ankommen. Eine Kreuzkorrelationsanalyse zeigte, dass die Zeitverzögerung zwischen Flusstemperatur und am Pumpwerk gemessener Grundwassertemperatur zwei bis vier Monate beträgt. Deshalb kann sich die Auswirkung z.B. einer Änderung der Luft- bzw. Flusstemperatur im Frühling erst einige Monate später bei der im Pumpwerk gemessenen Grundwassertemperatur bemerkbar machen. In der Korrelationsanalyse war zudem die maximale Korrelation zwischen Lufttemperatur und Grundwassertemperatur durchwegs wesentlich schwächer als die maximale Korrelation zwischen Lufttemperatur und Flusswassertemperatur. Dies bedeutet, dass das Klimasignal – in diesem Fall das Signal der regionalen Lufttemperatur – sich wie erwartet wesentlich schwächer in der Grundwasser- als in der Flusswassertemperatur bemerkbar macht. Verfügbare Grundwassertemperaturdaten von Aquiferen, die nicht vorwiegend durch Flussinfiltration, sondern durch die direkte Infiltration von Niederschlagswasser gespeist werden, sind nur seit den 1980er-Jahren vorhanden. In diesen Aquiferen variiert die Grundwassertemperatur generell nicht so stark wie in den flussgespeisten Aquiferen, und verglichen mit diesen nimmt sie längerfristig nicht oder nur geringfügig zu *(Fig. 3)*.

WIRKUNGEN EINES TEMPERATURANSTIEGS AUF DIE SAUERSTOFFKONZENTRATION

Bei steigenden Fluss- und Grundwassertemperaturen erwartet man eine Zunahme der mikrobiellen Aktivität in der hyporheischen Zone [18], was eine erhöhte Sauerstoffzehrung zur Folge hätte. Eine vergleichende Untersuchung der in den Aquiferen RhSe, EmSi und TöLi gemessenen Sauerstoffkonzentrationen mit den entsprechenden Grundwassertemperaturen [19] zeigte, dass die Sauerstoffkonzentration und Temperatur des Grundwassers in diesen Aquiferen tatsächlich miteinander negativ korrelieren und dass langfristige Zunahmen der Grundwassertemperatur von abnehmenden Sauerstoffkonzentrationen begleitet werden. Im Aquifer AaKi hingegen führte die starke Zunahme der Grundwassertemperatur *(Fig. 2)* nicht zu einer Abnahme der Sauerstoffkonzentration. Zudem gab es in einigen Aquiferen mehrmals abrupte, starke Zunahmen der Sauerstoffkonzentration, die von keinen nennenswerten Abnahmen der Grundwassertemperatur begleitet wurden. Diese abrupten Zunahmen der Sauerstoffkonzentration traten jedoch in Folge extremer Hochwasserereignisse in den speisenden Flüssen auf. Die Autoren nehmen an, dass die Hochwasserereignisse die Durchlässigkeit der Flusssohle vorübergehend erhöhten, indem sie der Kolmatierung des Flussbetts entgegenwirkten. Die Resultate lassen den Schluss zu, dass die Grundwassertemperatur zwar das langfristige Verhalten der Sauerstoffkonzentration beeinflussen mag, aber nicht der wichtigste bestimmende Faktor ist. Unter der Annahme, dass Hochwasserereignisse immer mit einer gewissen Häufigkeit geschehen werden, wird auch eine langfristige Abnahme der Sauerstoffkonzentration im Grundwasser immer wieder von kurzfristigen Zunahmen unterbrochen werden, die einem langfristigen, abnehmenden Trend entgegenwirken.

VORHERSAGEN ZUR GRUNDWASSERTEMPERATUR

Im Rahmen eines Projektes zur Vorhersage der wahrscheinlichen Auswirkungen des Klimawandels auf Lufttemperatur und Niederschlag in der Schweiz [20] wurden regionale Klimaszenarien für die Schweiz berechnet, die auf den globalen Emissionsszenarien A1B, A2 und RCP3PD basieren. Das Szenario A1B ist wirtschaftsorientiert mit Fokus auf globale Entwicklung und eine ausgewogene Nutzung fossiler und nicht fossiler Energiequellen, das Szenario A2 ist wirtschaftsorientiert mit Fokus auf regionale Entwicklung und das Szenario RCP3PD setzt eine erhebliche Verminderung des globalen Treibhausgasausstosses voraus, sodass eine Stabilisierung der globalen Temperaturänderung auf weniger als 2° C erreicht wird. Unter diesen drei Szenarien wird z.B. für die Nordostschweiz eine wahrscheinliche mittlere Erhöhung der Lufttemperatur im Sommer um ca. 4,4° C (A2), 3,7° C (A1B) oder 1,6 °C (RCP3PD) für die Periode 2020–2049 vorausgesagt [20].

Die regionalen Klimaszenarien für die Schweiz aus [20] wurden verwendet, um statistische Modelle der Grundwassertemperatur, die mithilfe der historischen Daten erstellt wurden, vorherzusagen. Für die statistischen Modelle der Grundwassertemperatur wurden drei relativ

einfache Ansätze gewählt, mit denen die Monatsmittelwerte der Grundwassertemperatur anhand der Luft- oder Flusswassertemperatur modelliert wurden. Es wurden zwei multiple lineare Regressionsmodelle, ein Boxmodell und ein Transferfunktionsmodell entwickelt.

Im ersten Regressionsansatz wurde für die Zeitreihe der Jahresmittelwerte sowie die trendbereinigte Zeitreihe der Monatsmittelwerte jeweils separat ein Regressionsmodell angepasst. Die beiden entstandenen Modelle wurden dann zusammengesetzt. Im zweiten Regressionsansatz wurden zwölf Regressionsmodelle für jede Monatszeitreihe (alle Januarwerte, alle Februarwerte etc.) erstellt, die dann ebenfalls wieder zusammengesetzt wurden. Das Boxmodell beruhte auf der Annahme, dass immer dieselbe Menge Wasser aus dem entsprechenden Aquifer entnommen wird, bzw. abfliesst. Änderungen der Grundwassertemperatur sind also nur bedingt durch Änderungen der Luft- oder Flusswassertemperatur und Änderungen der Infiltrationsmenge. Die Transferfunktion für das Transferfunktionsmodell wurde aus der Kreuzkorrelation zwischen Grundwassertemperatur und Luft- oder Flusswassertemperatur abgeleitet. Die Modelle wurden jeweils an unterschiedlichen Perioden (Trainingsperioden) der gemessenen Grundwassertemperaturen kalibriert. Die verbliebenen Daten wurden verwendet, um die Prognose der Modelle zu evaluieren. Die Auswertung zeigte hauptsächlich zwei Dinge: Erstens schnitten die Regressionsmodelle deutlich besser ab. Zweitens zeigte sich bei den Regressionsmodellen, dass diejenigen mit der Flusstemperatur als erklärende Variable besser passten. Allerdings bedingten diese Modelle für die Vorhersagen der Grundwassertemperatur auch eine Vorhersage der Flusswassertemperatur. Dies führte zu deutlich grösseren Fehlern bei der Vorhersage. Aus diesen Gründen werden hier nur die Vorhersagen der Regressionsmodelle mit der Lufttemperatur als erklärende Variable gezeigt.

Figur 4 zeigt die erstellten Vorhersagen der Grundwassertemperatur für die beiden Szenarien A2 und RCP3PD (die Resultate für Szenario A1B werden hier nicht gezeigt, da die Werte sehr ähnlich wie im Szenario A2 sind). Zur Vereinfachung der Figur wurden die Ergebnisse der von Flusswasser gespeisten Aquifere und der nicht von Flusswasser gespeisten Aquifere sowie der beiden Regressionsmodelle gemittelt. Die Abbildung zeigt, dass bis zum Ende des Jahrhunderts eine Erwärmung des Grundwassers im Vergleich zur Referenzperiode 1980–2009 zu erwarten ist. Allerdings gibt es zwischen den Aquifertypen sowie zwischen den Szenarien deutliche Unterschiede. Unter Szenario A2 erhöht sich die Grundwassertemperatur in den von Flüssen gespeisten Aquiferen bis 2099 um ca. 2,5°C, während die Veränderung in den nicht von Flüssen gespeisten Aquiferen im Mittel nur etwa 0,7°C beträgt. Unter Szenario RCP3PD ist nur mit einer kleinen Erwärmung zu rechnen: Die mittlere Vorhersage der Grundwassertemperatur beträgt hier maximal 1°C. Weiter ist ersichtlich, dass die Vorhersagen mit erheblichen Fehlern behaftet sind. Begründet sind diese Fehler in der Unsicherheit der Klimavorhersagen sowie in der Unsicherheit der erstellten Regressionsmodelle. Die Analyse der Fehler zeigte, dass die Unsicherheit der Klimavorhersagen für ca. 20–30% und die Unsicherheit der Regressionsmodelle für ca. 70–80% der Fehler verantwortlich sind. Die Vorhersagen zur saisonalen Entwicklung der Grundwassertemperatur waren nicht eindeutig. Jedoch lässt sich feststellen, dass in den Sommer- und Herbstmonaten tendenziell mit einer stärkeren Erwärmung zu rechnen ist.

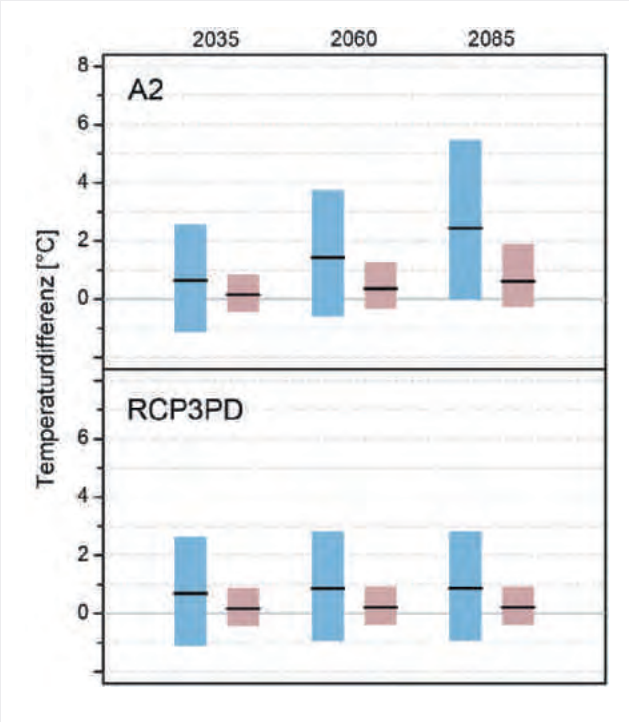

Fig. 4 Änderung der Grundwassertemperatur für die zukünftigen Perioden 2020–2049 (2035), 2045–2074 (2060) und 2070–2099 (2085) im Vergleich zur Referenzperiode 1980–2009 für die beiden CO_2-Emissionszenarien A2 und RCP3PD. Um die Abbildung zu vereinfachen, wurden die Vorhersagen der Temperaturen in von Flusswasser gespeisten Aquiferen (Seewerben, Signau, Kiesen, Linsental; blau) und nicht von Flusswasser gespeisten Aquiferen (Vorem Haag, Käferberg, Läufe; braun) gemittelt

Évolution de la température de la nappe phréatique pour les périodes futures 2020-2049 (2035), 2045-2074 (2060) et 2070-2099) (2085) en comparaison à la période de référence 1980-2009 pour les deux scénarios d'émission CO_2 A2 et RCP3PD. Pour simplifier l'illustration, les prévisions des températures des aquifères alimentées par des rivières (Seewerben, Signau, Kiesen, Linsental; bleu) et des aquifères non alimentées par des rivières (Vorem Haag, Käferberg, Läufe; marron) sont des moyennes

FAZIT

Ein Beispiel für die möglichen Konsequenzen eines Anstiegs der Grundwassertemperatur und einem damit verbundenen Rückgang der Sauerstoffkonzentration im Grundwasser wurde im Sommer 2003 beobachtet. Damals herrschten in Mitteleuropa ausserordentlich heisse und trockene Bedingungen, die als Vorboten von prognostizierten Klimaverhältnissen zu Ende des 21. Jahrhunderts angeschaut werden können [21]. Diese aus heutiger Sicht extremen Bedingungen führten in einem an der Thur gelegenen Pumpwerk zu einem massiven Rückgang der Sauerstoffkonzentration [22]. Unter den somit veränderten Redoxbedingungen wurden Eisen- und Mangan(hydr)oxyde reduziert und im Grundwasser gelöst. Im Pumpwerk kam das gelöste Eisen und Mangan wieder mit Sauerstoff in Kontakt und fiel dort durch Reoxidation wieder aus. In Anbetracht der Resultate der hier vorliegenden Studie lässt sich mit ziemlicher Sicherheit sagen, dass solche Situationen, die unter Umständen eine erhebliche Störung des Pumpwerkbetriebes verursachen könnten, in Zukunft häufiger auftreten werden. Die Resultate dieser Studie zeigten aber

DANK

Für die Bereitstellung der Daten danken wir den Stadtwerken Winterthur, den Städtischen Werken Schaffhausen und Neuhausen am Rheinfall, der Wasserversorgung Zürich, Wasserverbund Region Bern AG, der Wasserversorgung Menziken-Reinach und dem Amt für Umwelt des Kantons Aargau. Weiter danken wir der Arbeitsgruppe «Klima und Grundwasser» der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie für den Anstoss zur Datensuche sowie dem Bafu für die Finanzierung der Datensuche. Für die Finanzierung der Dissertation von *Simon Figura* danken wir dem NFP 61 und der Konferenz der Vorsteher der Umweltämter der Ostschweizer Kantone.

ebenfalls, dass reduzierende Bedingungen in von Flüssen gespeisten Aquiferen auch unter dem Klimawandel wahrscheinlich nicht permanent vorherrschen werden.

Ohne die mit grossem Aufwand zusammengesuchten und digitalisierten Grundwasserdaten wäre es unmöglich gewesen, die oben aufgeführten empirischen Erkenntnisse zu gewinnen. Die Studie unterstreicht damit deutlich, wie wichtig die Erhebung solcher Daten ist. Das Monitoring in von Flüssen gespeisten Aquiferen muss also fortgeführt und wenn möglich ausgebaut werden. Ausserdem muss eine regelmässige Auswertung der gewonnenen Daten erfolgen. So könnten mit relativ geringem Aufwand die hier formulierten Schlussfolgerungen überprüft und allfällige neue Probleme erkannt werden. Zusätzlich zu den langzeitlichen Daten braucht es aber auch unbedingt Feldexperimente, die eine detaillierte Betrachtung der Schlussfolgerungen auf Prozessebene ermöglichen. Nur so können einigermassen gesicherte Aussagen darüber gemacht werden, unter welchen Bedingungen bei Pumpwerken künftig mit negativen Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserqualität zu rechnen sein wird.

BIBLIOGRAPHIE

[1] *Kundzewicz, Z. W. et al. (2007): Freshwater resources and their management. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg. Parry, M. L. et al.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. S. 173–210*

[2] *Bates, B. C. et al. (2008): Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Seketariat., Genf, 210 S.*

[3] *Bundesamt für Umwelt Bafu (Hrsg.) (2012): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217: 76 S.*

[4] *Magnuson, J. J. et al. (2000): Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere. Science, 289: 1743–1746 und Errata 2001, Science, 291: 254*

[5] *Adrian, R. et al. (2009): Lakes as sentinels of climate change. Limnology and Oceanography, 54(6/2): 2283–2297*

[6] *Schneider, P; Hook S. J. (2010): Space observations of inland water bodies show rapid surface warming since 1985. Geophysical Research Letters, 37, L22405, doi:10.1029/2010GL045059*

[7] *Weyhenmeyer, G. A. et al. (2011): Large geographical differences in the sensitivity of ice-covered lakes and rivers in the Northern Hemisphere to temperature changes. Global Change Biology, 17: 268–275*

[8] *Lister, G. S. et al. (1998): Alpine paleoclimatology. In: Views from the Alps: regional perspectives on climate change (Hrsg. Cebon, P.; Dahinden, U.; Davies, H. C.; Imboden, D. M.; Jaeger, C. C.). MIT Press, Cambridge, Mass., USA. S. 73–169*

[9] *Livingstone, D. M. (2003): Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake. Climatic Change, 57(1): 205–225*

[10] *Hari, R. E. et al. (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. Global Change Biology, 12(1): 10–26*

[11] *Scheiwiller, S. et al. (2013): Klimaänderung und Ertrag grosser Karstquellen. Mögliche Auswirkungen der Klimaänderungen auf den Ertrag zweier grosser alpiner Karstquellen, Zeitreihen-Analyse des Ertrags der Pertusio-Quelle/TI und Ursprung-Quelle/NW. Aqua & Gas*

[12] *Schürch, M. et al. (2011): Auswirkung des Klimawandels auf das Grundwasser. gwa 3/11: 177–182*

[13] *Livingstone, D. M. et al. (2012): Jedes Grundwasser hat sein eigenes Charakter. Interview. Aqua & Gas, 6/12: 8–9*

[14] *Figura, S. (2009): Response of Swiss groundwaters to climatic forcing and climate change. Master-Arbeit, ETHZ D-MATH und Eawag, Dübendorf. 37 S. plus Anhang*

[15] *Figura, S. et al. (2011): Regime shift in groundwater temperature triggered by the Arctic Oscillation. Geophys. Res. Lett. 38(23): L23401, DOI: 10.1029/2011GL049749*

[16] *Lo, T.-T.; Hsu, H.-H. (2010): Change in the dominant decadal patterns and the late 1980s abrupt warming in the extratropical Northern Hemisphere. Atmospheric Science Letters, 11: 210–215*

[17] *North, R. P. et al. (im Druck): The physical impact of the late 1980s climate regime shift on Swiss lakes and rivers. Inland Waters*

[18] *von Gunten, H. R. et al. (1998): Seasonal biogeochemical cycles in riverborne groundwater. Geochimica et Cosmochimica Acta, 55: 3597–3609*

[19] *Figura, S. et al. (in review): Competing controls on groundwater oxygen concentrations revealed in multidecadal time-series at riverbank infiltration sites*

[20] *CH2011 (2011): Swiss climate change scenarios CH2011. C2SM, MeteoSchweiz, ETH, NCCR Climate und OcCC. Zürich. 88 S.*

[21] *Schär, C. et al. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. Nature, 427: 332–336*

[22] *Hoehn, E.; Scholtis, A. (2011): Exchange between a river and groundwater, assessed with hydrochemical data. Hydrology and Earth System Sciences, 15: 983–988*

> SUITE DU RÉSUMÉ

Les données sur les températures de la nappe phréatique sont également utilisées pour faire des prévisions de la température de la nappe phréatique à l'aide de modèles statistiques simples. En prenant le scénario climatique le plus pessimiste des scénarios utilisés, la température de l'eau des aquifères alimentées par des rivières va en moyenne augmenter de 2,5 °C d'ici la fin du siècle. L'analyse des mesures d'oxygène dans ces aquifères a montré que parallèlement à la hausse de la température, la concentration d'oxygène a baissé, ce qui peut être due à une augmentation de l'activité microbienne. Il semble toutefois que des évènements d'écoulement extrême peuvent entraîner une forte hausse de la concentration d'oxygène. Il ne faut par conséquent pas prévoir une baisse continuelle des concentrations d'oxygène dans la nappe phréatique. L'étude a ainsi montré que le changement climatique n'entraînera probablement pas une détérioration permanente de la qualité de l'eau souterraine. Néanmoins, les aquifères alimentées par des rivières peuvent présenter plus souvent des situations de conditions anoxiques, comme constaté en été 2003. La poursuite et l'extension de la surveillance de telles aquifères est donc indispensable.