

Zeitschrift:	Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber:	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band:	115 (2023)
Heft:	1
Artikel:	Auswirkungen des Klimawandels auf Schweizer Lockergesteinsgrundwasservorkommen : eine quantitative Prognose mit Fokus auf natürliche und künstliche Grundwasserneubildung durch Oberflächenwasserinfiltration
Autor:	Epting, Jannis / Love, Råman Vinnå / Affolter, Annette
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1043741

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Auswirkungen des Klimawandels auf Schweizer Lockergesteinsgrundwasservorkommen

Eine quantitative Prognose mit Fokus auf natürliche und künstliche Grundwasserneubildung durch Oberflächenwasserinfiltration

Jannis Epting, Råman Vinnå Love, Annette Affolter, Stefan Scheidler, Oliver Schilling

Zusammenfassung

Quantitative Abschätzungen der Auswirkungen des Klimawandels auf Grundwasserressourcen erlauben es, zwischen hydraulischen und thermischen Auswirkungen auf natürliche und künstliche Grundwasserneubildung zu differenzieren. In Zukunft werden vermehrt Auswirkungen von saisonalen Verschiebungen bei der natürlichen Grundwasseranreicherung sowie Anpassungsstrategien der Wasserversorgung zu beobachten sein. Dabei ist zu berücksichtigen, dass einzelne Trinkwasserbrunnen von unterschiedlichen Komponenten der Grundwasserneubildung betroffen sind. Darüber hinaus dürften eine zunehmende künstliche Grundwasseranreicherung in den Sommermonaten und die Interaktion mit Oberflächengewässern während Hochwasserereignissen, die in den Wintermonaten häufiger auftreten werden, die Grundwasseranreicherung und -temperaturen stark beeinflussen.

Résumé

Les évaluations quantitatives des effets du changement climatique sur les ressources en eaux souterraines permettent de différencier les effets hydrauliques et thermiques sur la recharge naturelle et artificielle des nappes phréatiques. A l'avenir, les effets des décalages saisonniers sur la recharge naturelle des eaux souterraines et les stratégies d'adaptation pour l'approvisionnement en eau seront de plus en plus observés. Il faut tenir compte du fait que les puits d'eau potable individuels sont affectés par différentes composantes de la recharge des eaux souterraines. En outre, l'augmentation de la recharge artificielle des nappes phréatiques durant les mois d'été et l'interaction avec les eaux en surface lors des crues, qui se produiront plus fréquemment pendant les mois d'hiver, devraient fortement affecter la recharge et les températures des eaux souterraines.

Ausgangslage

Es wird erwartet, dass die hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels für die Schweiz sehr ausgeprägt sein werden. Klimatologische und hydrologische Studien wie CH2018 (2), Hydro-CH2018 (3), CH2014-Impacts (4), (5) und NRP61 (6) gehen davon aus, dass im Sommer häufiger mit Trockenperioden zu rechnen ist, während leicht höhere Niederschläge und eine höhere Schneefallgrenze im Winter zu erhöhten Abflüssen der Oberflächengewässer und somit erhöhten Grundwasserneubildungen führen dürfen. Während sich die jährlichen Gesamt-wasserbilanzen der Schweizer Wasserres-sourcen, einschliesslich des Grundwas-sers, in Zukunft nur geringfügig verändern sollen, werden die saisonalen Veränderun-

gen voraussichtlich sehr ausgeprägt sein. Nach 2003 (7, 8) waren auch 2006 (9), 2015 (10) und 2018 (11–14) durch sommerliche Hitzewellen gekennzeichnet (15). In diesen Jahren konnte vor allem für die Fliessgewässer im Schweizer Mittelland ein deutlicher Anstieg der Wassertemperatur beobachtet werden (16). Gleichzeitig wurden auch hohe Grundwassertemperaturen gemessen, wobei dieser Anstieg weniger ausgeprägt war als in den Fliessgewässern (17). Erfahrungen der Wasserversorger der letzten Jahre haben gezeigt, dass Trinkwassertemperaturen über 25 °C auftreten können und damit eine hygienisch unbedenkliche Wasserversorgung gefährden (18).

Motivation der hier geschilderten Unter-suchungen waren die steigenden Tem-pe-raturen von Schweizer Oberflächengewäs-

sern (19–21) und Grundwasserressourcen (22–24), die als Folge des Klimawandels, aber auch als Folge lokaler anthropogener Aktivitäten, auftraten und weiterhin zu er-warten sind. Temperaturbeobachtungen der Schweizer Oberflächengewässer seit 1970 offenbaren einen Trend von +0,33 °C pro Jahrzehnt, welcher etwas geringer ist als jener für die Lufttemperatur; diese Er-wärzung ist in den Einzugsgebieten des Mittellandes ausgeprägter als bei den hö-hergelegenen Oberflächengewässern (25, 26). Es wird erwartet, dass sich die beob-achtete Erwärmung in den nächsten zehn Jahren fortsetzt und sich gegen Ende des Jahrhunderts bei Szenarien mit hohen Emissionen beschleunigt; die sommerli-che Erwärmung der Oberflächengewässer könnte dann +4 °C für Flüsse im Schweizer Mittelland und +6 °C in alpinen Flüssen er-reichen (19). Ein signifikanter langfristiger Anstieg der Grundwassertemperaturen, wie er als Folge des Klimawandels zu erwarten wäre und regional zum Beispiel in Öster-reich beobachtet wurde (27), konnte in der Schweiz noch nicht beobachtet werden (17, 28). Generell wird jedoch erwartet, dass sich der Anstieg der Oberflächen-wassertemperaturen auch auf die Grund-wassertemperaturen auswirkt, die durch die Infiltration von Oberflächenwasser ge-speist werden (22). Zudem ist zu erwarten, dass der geschätzte zukünftige Anstieg des Grundwasserbedarfs in Trockenperioden mit einer verstärkten künstlichen Grund-wasseranreicherung mit vergleichsweise «warmem» Oberflächenwasser im Som-mer einhergehen und die Grundwasser-temperaturen und damit das entnommene Trinkwasser zusätzlich erhöhen wird.

Zielsetzung

Die meisten bisherigen Forschungsarbei-ten konzentrierten sich auf die Vorhersage möglicher Auswirkungen des Klimawan-dels auf Oberflächengewässer, während für Grundwassersysteme generell grosse regionale und grob aufgelöste Modelle ver-

wendet wurden, um den Einfluss von Veränderungen kritischer Eingangsparameter wie Niederschlag und Abfluss zu untersuchen. Nur wenige Studien befassen sich mit der Interaktion zwischen Fluss- und Grundwasser wie Veränderungen im Abflussregime der Fliessgewässer und der Grundwasserneubildung im Zusammenhang mit dem Klimawandel (z.B. 22, 29, 30).

Im Rahmen des Forschungsprogramms *Hydro-CH2018* (22, 31) wurde die Temperaturprägung von Lockergesteinsgrundwasservorkommen, deren Grundwasserneubildung in erster Linie durch infiltrierendes Oberflächenwasser bestimmt wird («flussgespeiste Grundwasservorkommen»), qualitativ untersucht. So wird erwartet, dass eine erhöhte Grundwasserneubildung während hoher Abfluspperioden einen starken Einfluss auf die Grundwassertemperaturen solcher Grundwasservorkommen hat. Die hier präsentierte Forschungsarbeit umfasst nun eine quantitative Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Komponenten der Grundwasserneubildung in drei Lockergesteinsgrundwasservorkommen in der urbanen Agglomeration der Stadt Basel. Aufgrund von Hydraulik- und Temperaturmessungen in den Fliessgewässern und Grundwasserressourcen konnte der «Ist-Zustand» der untersuchten Grundwasservorkommen abgeleitet werden. Mit Simulationen zukünftiger Fliessgewässerabflüsse und -temperaturen konnten anschliessend die Auswirkungen auf die untersuchten Lockergesteinsgrundwasservorkommen mit Wärmetransportmodellen evaluiert werden.

Untersuchungsgebiete und Forschungsansatz

In den beiden Untersuchungsgebieten Lange Erlen (Kt. Basel-Stadt) und Hardwald (Kt. Basel-Landschaft) wird Wasser des Rheins zur künstlichen Grundwasseranreicherung genutzt. In der Anreicherungsanlage im Unteren Birstal in Aesch (Kanton Basel-Landschaft) wird Wasser der Birs zur künstlichen Grundwasseranreicherung genutzt. Es werden verschiedene Methoden der Anreicherung eingesetzt (*Bild 1*): (1) Versickerungsfelder (Lange Erlen), (2) Versickerungsgräben und -teiche (Hardwald) und (3) Versickerungsanlagen mit Filterschichten und Injektionsbrunnen (Unteres Birstal).

Auswahl Klimaprojektionen

Um die klimabedingten Veränderungen der verschiedenen Grundwasserneubildungskomponenten bewerten zu können, wur-

den drei Klimaprojektionen ausgewählt, die im Rahmen von CH2018 entwickelt wurden (2, 32, 33). Für jede der Projektionen wurden für die hydrologische Modellierung (Box) die Emissionszenarien RCP2.6 (konsequenter Klimaschutz und Begrenzung der Erwärmung auf 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Zustand), RCP4.5 (mittlere Entwicklung mit begrenztem Klimaschutz) und RCP8.5 (kein Klimaschutz) untersucht. Als Randbedingungen für die Wärmetransportmodelle der Lockergesteinsgrundwasserleiter wurden zwei Klimamodelle (DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11_RCP2.6 & SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44_RCP8.5) ausgewählt, welche die gesamten zu erwartenden Variationen des Abflusses der Fliessgewässer und der Flusstemperaturen aus den hydrologischen Modellen abdecken.

Modellierung Fliessgewässerabfluss und -temperatur

Zur Ableitung klimabedingter Veränderungen der quantitativen Grundwasserneubildung durch infiltrierende Oberflächenwässer und der künstlichen Grundwasserneubildung, sowie der damit verbundenen Temperaturprägung, war es wichtig, veränderte Abflüsse der Fliessgewässer und Temperaturen an ausgewählten Stellen entlang der Fliessgewässer im Bereich der untersuchten Grundwasservorkommen beschreiben zu können.

Modellierung Grundwasserwärmetransport

Für die Strömungs- und Wärmetransportmodellierung der Lockergesteinsgrundwasservorkommen wurde die Software FEFLOW 7.2 (DHI 39) verwendet. Im Gegensatz zur Betrachtung ganzer Flusseinzugsgebiete, für die eine mehr oder weniger «geschlossene» Wasserbilanz berechnet werden kann, müssen für Talgrundwasservorkommen in Lockergesteinen verschiedene Grundwasserzu- und -abflüsse berücksichtigt werden. Einige der Grundwasserneubildungskomponenten, einschliesslich Temperaturprägung, können durch atmosphärische Klimaänderungen über die Niederschlags- und hydrologischen Abflussverhältnisse direkt beeinflusst werden. Zu den natürlichen Randbedingungen gehören versickernde Niederschläge, regionale Grundwasserzuflüsse, Zuflüsse aus den seitlichen Hangeinzugsgebieten sowie die Wechselwirkung von Oberflächengewässern mit dem Grundwasser. Anthropogene Randbedingungen umfassen die Grundwasserentnahme und die künstliche Grundwasseranreicherung. Die hydraulischen und thermischen Randbedingungen an den Modellgrenzen wurden auf Grundlage von meteorologischen sowie Fluss- und Grundwassermessdaten und bereits entwickelten Verfahren zur Modellparametrisierung definiert (40). Um die Vergleichbarkeit zwischen den drei modellierten

Hydrologische Modellierung

Für diese Arbeit wurden zukünftige Abflussprojektionen aus dem PREVAH-Modell mit einer Auflösung von 200m verwendet (34–36) mit den Eingangsdaten Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, kurzwellige Strahlung und Windgeschwindigkeit. Die Modellergebnisse beinhalten zukünftige Projektionen des Abflusses, einschliesslich der Gletscher- und Schneeschmelze.

Projektionen der Wassertemperaturtrends fehlten bisher. Daher wurde für die vorliegende hydrologische Modellierung das hybride physikalisch-statistische Modell air2stream (37, 38), welches bereits umfassend validiert wurde (37, 38), verwendet, um die zukünftigen Fliessgewässertemperaturen zu simulieren. Die air2stream-Modelle wurden mit den Daten der meteorologischen Station (Basel, BAS, Bild 2) für vier BAFU Fliessgewässerstationen simuliert: Birs (2106), Rhein (2289), Rheinfelden (2091) und Wiese (2199). Für die Kalibrierung wurden historische Wassertemperaturmessungen des BAFU verwendet. Da an der Station Rhein (2289) keine Wassertemperaturdaten verfügbar waren, wurden stattdessen Wassertemperaturmessungen der BAFU-Station Rhein (2613) verwendet, die sich 6900 m flussabwärts der Station 2289 befindet.

Das hybride Flusswassertemperaturmodell air2stream (8-Parameter-Version) kombiniert vergleichsweise einfache stochastische Modelle zur Parameterkalibrierung mit einer physikalisch basierten Struktur, welche die wichtigsten physikalischen Prozesse berücksichtigt, die die thermische Dynamik von Fliessgewässern steuern. Das Modell benötigt Lufttemperatur und Abfluss als Eingaben, um die Wassertemperatur der Fliessgewässer mit einer täglichen Zeitauflösung zu berechnen. Für die Modellierung der Flusstemperaturen mit dem Modell air2stream wurden täglich aufgelöste Lufttemperaturdaten der Station Basel (BAS) für den Zeitraum 1981 bis 2099 verwendet.



Bild 1: Künstliche Anreicherungssysteme in den Langen Erlen (A) im Hardwald (B) und im Unteren Birstal (C).

Lockergesteinsgrundwasservorkommen zu gewährleisten, wurden die entsprechenden Randbedingungen einheitlich definiert und parametrisiert.

Resultate & Diskussion

Fliessgewässerabflüsse & -temperaturen

Die Resultate der Klimamodellierung zeigen, dass der Trend der Lufttemperatur eine saisonale Komponente aufweist, mit einer stärkeren Erwärmung in den Sommermonaten im Vergleich zum Rest des Jahres (Bild 2). Der Fliessgewässerabfluss folgt einem ähnlichen saisonalen Muster mit erhöhtem Abfluss in den Wintermonaten und geringerem Abfluss in den Sommermonaten. Dieses Phänomen ist für den Rhein stärker ausgeprägt, da im Gegensatz zur Birs und zur Wiese flussaufwärts Gletscher und Schneefelder schrumpfen und die Anzahl Tage mit Schneedeckung abnehmen werden. Die jahreszeitliche Abhängigkeit des Anstiegs der Lufttemperatur und der Veränderung des Abflusses führt zu einer stärkeren Erwärmung der Fliessgewässer in den Sommermonaten und einer geringeren Erwärmung in den Wintermonaten.

Das Ausmass der Erwärmung, welches sich aus den Klimasimulationen ergibt, hängt von den jeweiligen Klimaszenarien ab. Die stärkste Erwärmung ist erwartungsgemäss für das Klimaszenario RCP8.5 zu beobachten (Lufttemperatur +0,4 °C pro Jahrzehnt und Flusstemperaturen zwischen +0,2 und +0,25 °C pro Jahrzehnt). Das Ausmass, mit dem sich Luft- und Wassertemperaturen unterscheiden, hängt von der Grösse des Fliessgewässers ab, wobei der Rhein die grösste Abhängigkeit zwischen der Abnahme des Abflusses und dem Anstieg der Wassertemperaturen aufweist.

Grundwasserwärmeverport & Klimaszenarien

Mit den kalibrierten und validierten Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodellen konnte der «Ist-Zustand» der un-

tersuchten Lockergesteinsgrundwasserleiter definiert und der Einfluss der hydrologischen und hydrogeologischen sowie anthropogenen Randbedingungen auf den Ist-Zustand quantifiziert werden. Dabei beschreibt der hydraulische und thermische «Ist-Zustand» eine durchschnittliche Situation sowie saisonale, ereignis- und nutzungsbedingte Schwankungen im Abfluss- und Wärmeregime der Fluss-Grundwasser-Systeme Lange Erlen (Bild 3), Hardwald (Bild 4) und Unteres Birstal (Bild 5). Bild 6 fasst die Wärmebilanzen für die wichtigsten Randbedingungen in den Untersu-

chungsgebieten zusammen. Der Einfluss der künstlichen Grundwasseranreicherung ist in allen Untersuchungsgebieten deutlich sichtbar, einschliesslich der kühlenden Wirkung auf das Grundwasser in den Winter- und Frühlingsmonaten sowie des Wärmeeintrags in das Grundwasser in den Sommer- und Herbstmonaten. Die Kälte- und Wärmefahnen bewegen sich, dem hydraulischen Gradienten folgend, von den einzelnen Versickerungsanlagen bis zu den Trinkwasserbrunnen.

Der saisonale Wärmeaustausch für alle untersuchten Klimaszenarien der Referenz-

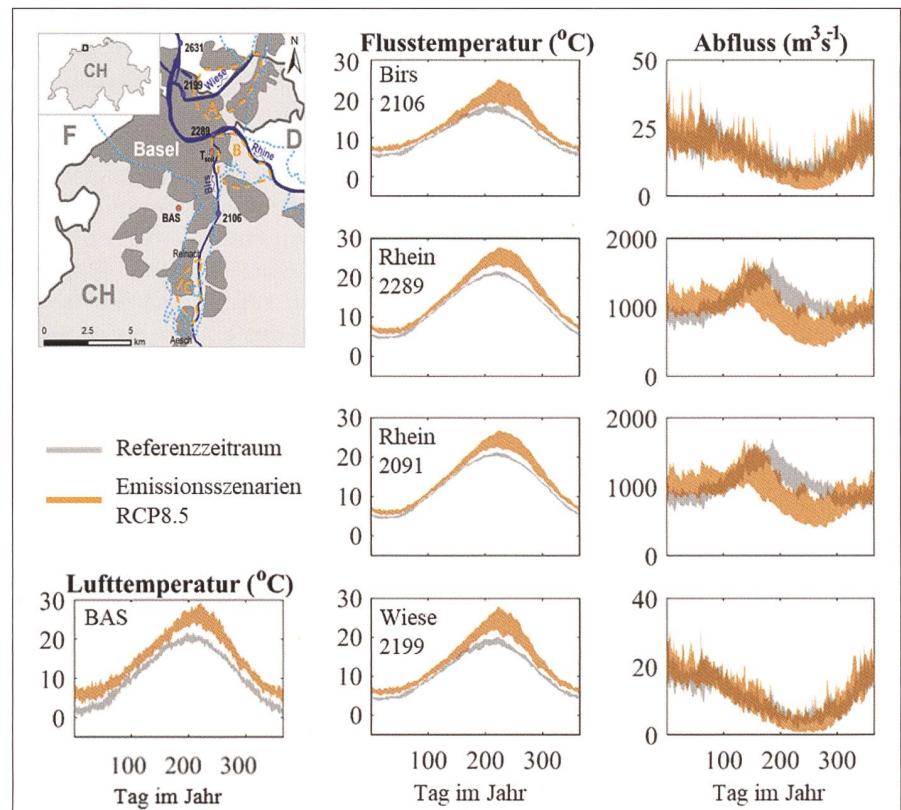


Bild 2: Oben links: Untersuchungsgebiete in der Agglomeration der Stadt Basel, einschliesslich Fliessgewässermessstationen (blaue Punkte), MeteoSchweiz-Station (BAS) sowie Untersuchungsgebiete A-C (gestrichelte orangefarbene Linien) und die Abgrenzung der Lockergesteinsgrundwasservorkommen (gestrichelte hellblaue Linie). Unten links: Modellierte Lufttemperatur. Mitte: Fliessgewässer Temperatur. Rechts: Fliessgewässerabfluss. Dargestellt ist jeweils die Hüllkurve zwischen den minimalen und maximalen Werten des klimatologischen Jahres (Tagesmittel über 30 Jahre) für den Referenzzeitraum (1981 bis 2010) und die Emissionsszenarien RCP8.5 (2070 bis 2099).

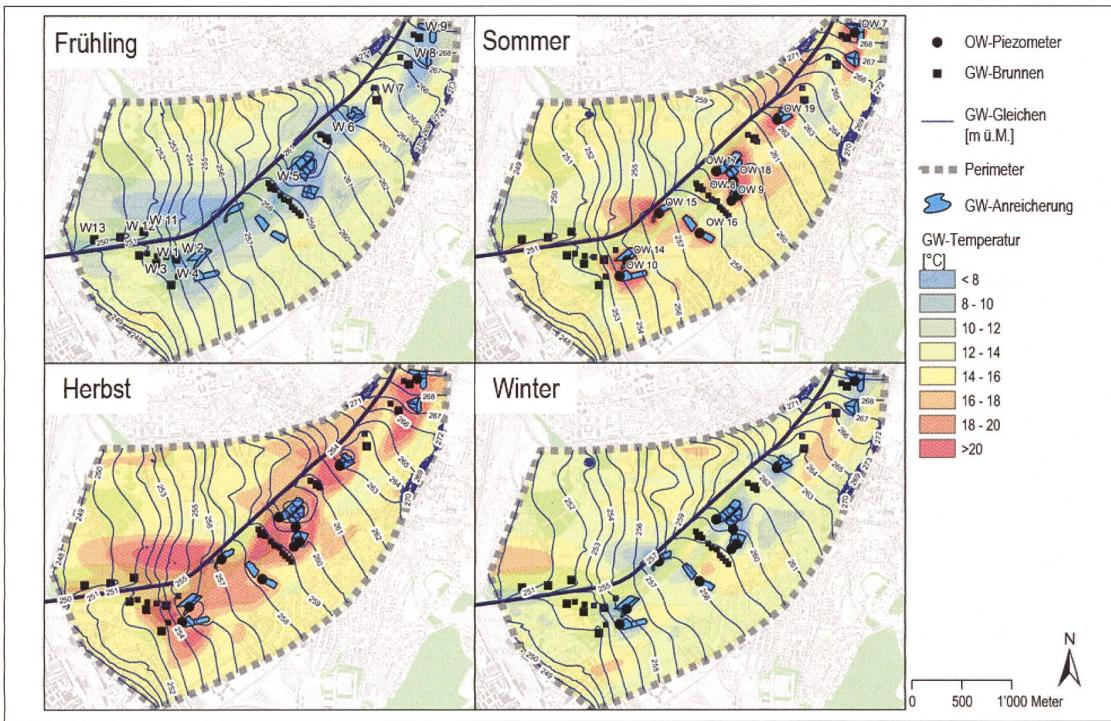


Bild 3: Hydraulisches und thermisches Grundwasserregime für die verschiedenen Jahreszeiten 2018 in den Langen Erlen im Frühjahr (1. April), im Sommer (14. Juli), im Herbst (4. Oktober) und im Winter (3. Januar). OW: Observation Well, GW: Grundwasser. Quelle Landeskarte: swisstopo.

jahre 2000, 2055 und 2085 sind in *Bild 7* dargestellt. Tabelle 1 zeigt die Temperaturänderung in den Trinkwasserbrunnen für die Klimaprojektionen mit den geringsten (Szenario S1) und den stärksten (Szenario S6) Auswirkungen.

In den Langen Erlen ist die Flussinfiltration der dominierende Fluss-Grundwasser-Interaktionsprozess, daher wird Wärme durch die Infiltration von Flusswasser in das Grundwasser hauptsächlich im Sommer und Spätsommer eingetragen (*Bild 6*). Unter Berücksichtigung aller untersuchten Klimaszenarien steigt der Netto-Wärme-

eintrag durch Flusswasserinfiltration bis 2055 für die verschiedenen Jahreszeiten um durchschnittlich 32 bis 48 Prozent und bis 2085 um durchschnittlich 52 bis 70 Prozent im Vergleich zum Referenzjahr 2000 (*Bild 7*). Der Wärmeaustausch über die künstliche Grundwasseranreicherung ist über das Jahr hinweg vergleichsweise ausgeglichen. Der Wärmeentzug durch Grundwasserentnahmen steigt bis 2055 um durchschnittlich 29 bis 42 Prozent und bis 2085 um durchschnittlich 42 bis 69 Prozent (*Bild 7*). Infolgedessen würden die Temperaturen des entnommenen Trink-

wassers bis 2055 um 0,4 bis 1,3 °C und bis 2085 um 0,7 bis 3,1 °C im Vergleich zum Referenzjahr 2000 ansteigen (*Bild 8, Tabelle 1*).

Wohingegen der Wärmeaustausch über die Interaktion mit dem Rhein vergleichsweise gering ist, findet im Hardwald der bedeutendste Wärmeaustausch über die künstliche Grundwasseranreicherung in den Weihern und Gräben statt, welche sich für die untersuchten Klimaszenarien nicht stark ändern (*Bild 6*). Der Wärmeeintrag im Frühling und Sommer ist dabei höher als der Wärmeaustrag im Herbst und Winter.

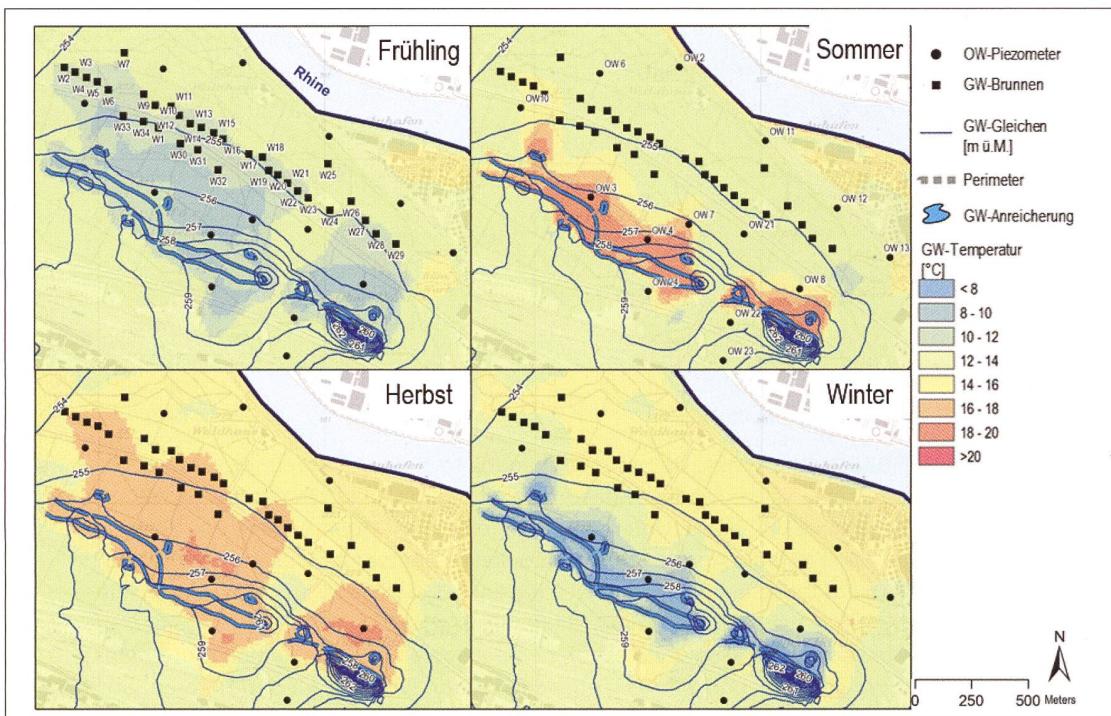


Bild 4: Hydraulisches und thermisches Grundwasserregime für die verschiedenen Jahreszeiten 2014 im Hardwald im Frühjahr (15. April), Sommer (15. Juli), Herbst (15. Oktober) und Winter (15. Januar). OW: Observation Well, GW: Grundwasser. Quelle Landeskarte: swisstopo.

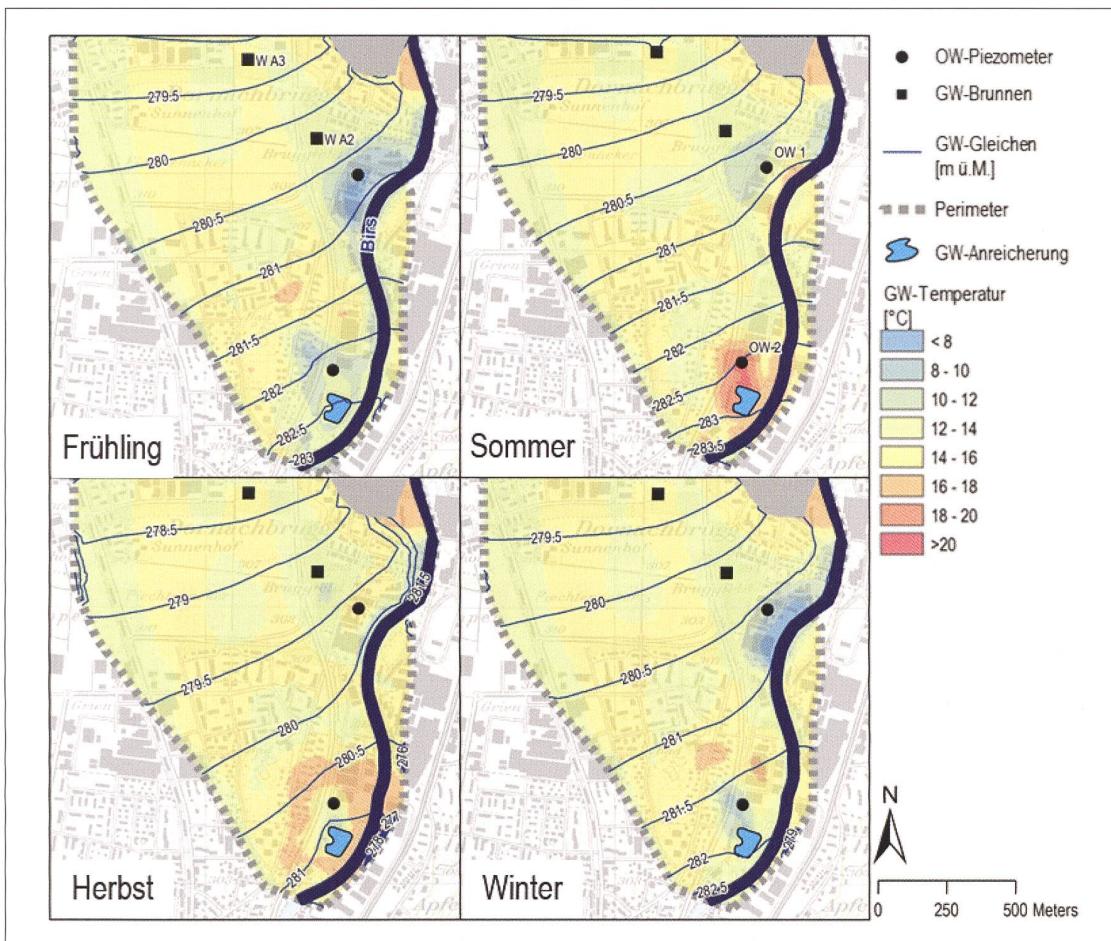


Bild 5: Hydrologisches und thermisches Grundwasserregime für die verschiedenen Jahreszeiten 2018 im Unteren Birstal im Frühling (15. Mai), Sommer (15. August), Herbst (15. November) und Winter (15. Februar). OW: Observation Well, GW: Grundwasser. Quelle Landeskarte: swisstopo.

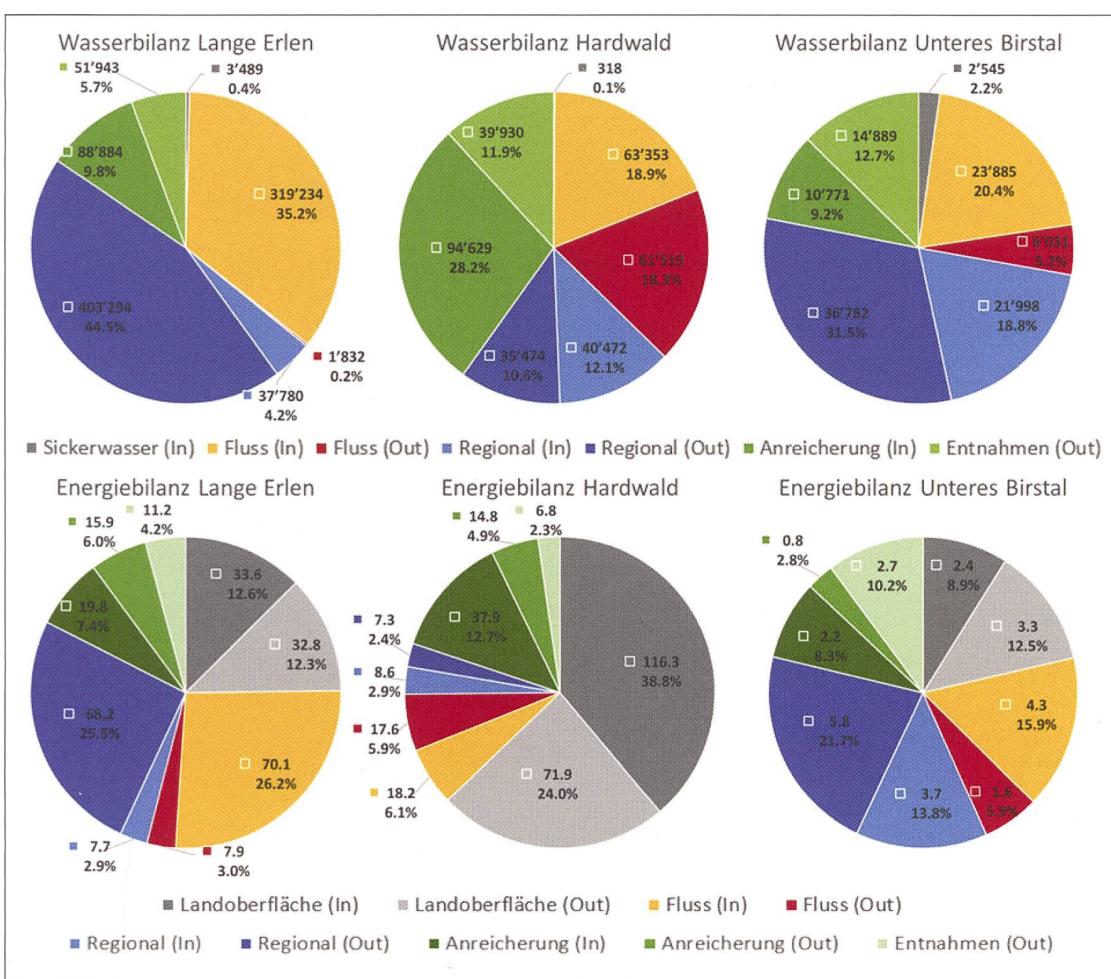


Bild 6: Wasser- und Wärmebilanzen für den «Ist-Zustand» für ausgewählte Modellrandbedingungen in den Langen Erlen (links), dem Hardwald (Mitte) und im Unterer Birstal (rechts).

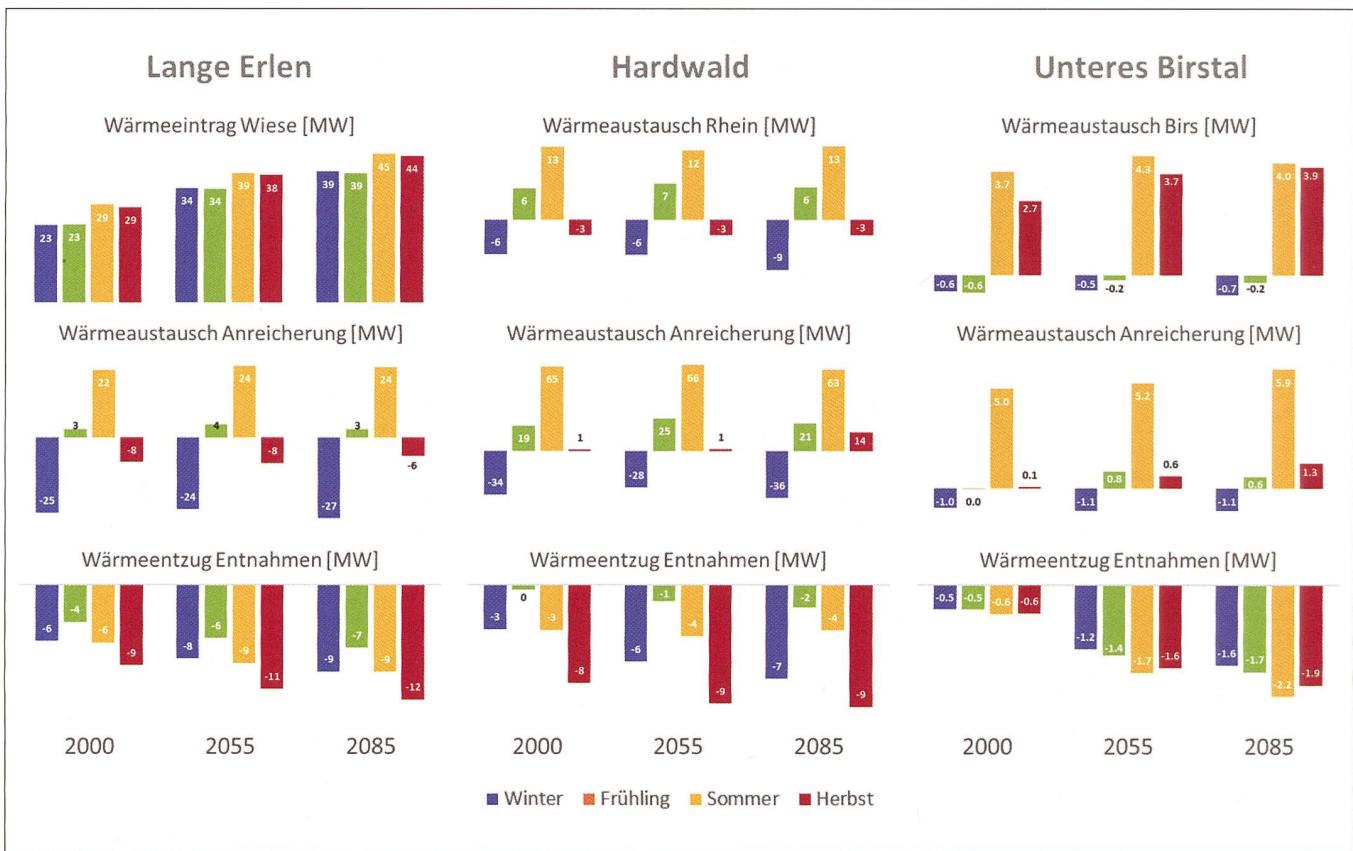


Bild 7: Zusammenfassende Darstellungen des saisonalen Wärmeaustauschs für ausgewählte Modellrandbedingungen (oben: Fließgewässer; Mitte: künstliche Grundwasseranreicherung; unten: Grundwasserentnahmen) für die Referenzjahre 2000, 2055 und 2085. Mittelwerte für alle untersuchten Klimaszenarien in den Langen Erlen (links), dem Hardwald (Mitte) und im Unteren Birstal (rechts).

Lange Erlen	T-Veränderung [K]	W 1	W 2	W 3	W 4	W 5	W 6	W 7	W 8	W 10	W 11	W 12
S1	ΔT (2000-2055)	0.47	0.59	0.44	0.45	0.38	0.43	0.39	0.49	0.47	0.42	0.44
	ΔT (2000-2085)	0.99	1.28	0.80	0.91	0.70	0.88	0.71	0.98	0.96	0.74	0.71
S6	ΔT (2000-2055)	2.19	1.28	1.97	2.04	1.28	1.79	1.54	1.94	1.63	1.59	1.38
	ΔT (2000-2085)	3.12	1.78	3.06	3.05	2.42	2.73	2.57	2.88	2.42	2.71	2.51
Hardwald		W 4	W 5	W 6	W 7	W 9	W 10	W 11	W 12	W 13	W 14	
S1	ΔT (2000-2055)	0.21	0.21	0.20	0.25	0.23	0.26	0.26	0.26	0.24	0.24	0.23
	ΔT (2000-2085)	0.98	0.99	0.99	0.88	0.91	0.85	0.87	0.93	0.96	0.97	
S6	ΔT (2000-2055)	0.97	0.90	0.84	1.29	0.98	0.86	0.87	0.83	0.83	0.85	
	ΔT (2000-2085)	2.84	2.62	2.43	3.54	2.67	2.20	2.27	2.19	2.23	2.32	
		W 15	W 16	W 17	W 18	W 19	W 20	W 21	W 22	W 23	W 24	
S1	ΔT (2000-2055)	0.23	0.23	0.25	0.24	0.24	0.24	0.24	0.21	0.19	0.17	
	ΔT (2000-2085)	0.95	0.92	0.83	0.87	0.91	0.92	0.91	0.90	0.85	0.77	
S6	ΔT (2000-2055)	0.86	0.82	0.68	0.72	0.70	0.77	0.86	0.98	1.11	1.14	
	ΔT (2000-2085)	2.33	2.18	1.70	1.87	1.82	2.01	2.28	2.68	3.09	3.21	
		W 25	W 26	W 27	W 28	W 29	W 30	W 31	W 32	W 33	W 34	
S1	ΔT (2000-2055)	0.30	0.15	0.17	0.19	0.21	0.25	0.23	0.23	0.20	0.25	
	ΔT (2000-2085)	0.68	0.80	0.89	0.92	0.86	0.97	0.97	0.91	0.95	0.90	
S6	ΔT (2000-2055)	1.58	1.26	1.08	0.99	0.93	0.69	0.74	0.59	0.71	0.75	
	ΔT (2000-2085)	3.98	3.48	3.11	2.83	2.44	1.81	1.96	1.45	1.85	1.99	
Unteres Birstal		W A2	W A3									
S1	ΔT (2000-2055)	-0.01	0.49									
	ΔT (2000-2085)	0.53	0.45									
S6	ΔT (2000-2055)	0.97	1.67									
	ΔT (2000-2085)	2.64	3.58									

Tabelle 1: Veränderung der Entnahmetemperaturen der Trinkwasserbrunnen (W) in den Langen Erlen, dem Hardwald und im Unteren Birstal (A – Aesch) in den Jahren 2055 und 2085 im Vergleich zum Referenzjahr 2000 und für die Klimaszenarien (S1 und S6).

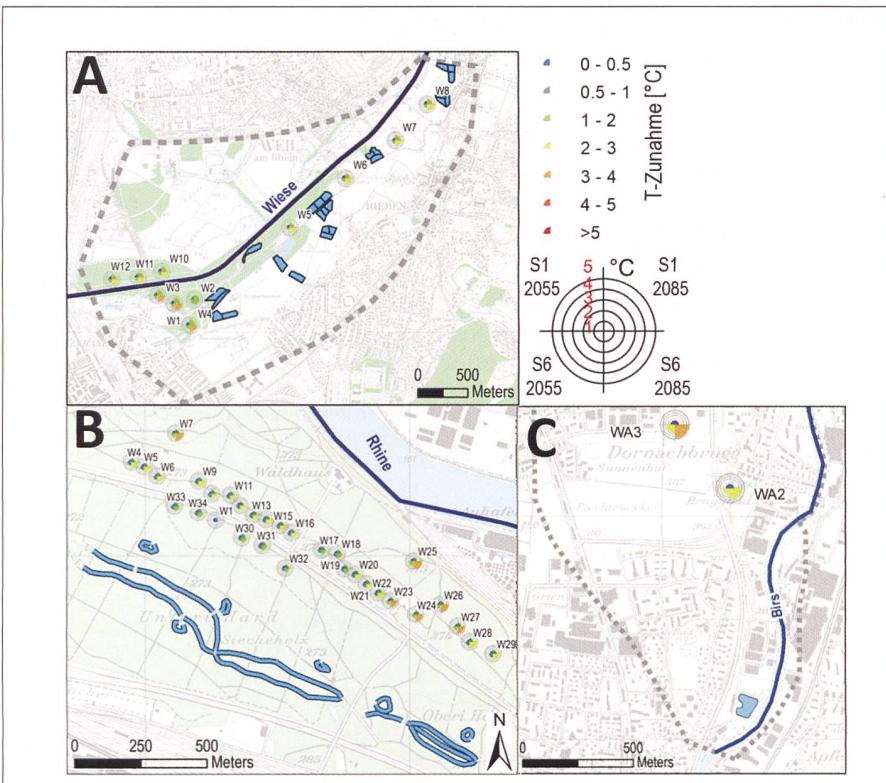


Bild 8: Temperaturänderung für die Klimaszenarien S1 und S6 für die Jahre 2055 und 2085 im Vergleich zum Referenzzustand im Jahr 2000 der Trinkwasserbrunnen in den Langen Erlen (A), dem Hardwald (B) und im Unteren Birstal (C).

Der Wärmeentzug durch Grundwassernetnahmen steigt vor allem in den Winter- und Sommermonaten bis 2055 um durchschnittlich 43 Prozent und bis 2085 um durchschnittlich 56 Prozent (Bild 7). Infolgedessen würden die Temperaturen des entnommenen Trinkwassers bis 2055 um 0,2 bis 1,0°C und bis 2085 um 0,6 bis 4,0°C gegenüber dem Referenzjahr 2000 ansteigen (Bild 8, Tabelle 1).

Mit diesen Beobachtungen werden für die Langen Erlen und den Hardwald, in denen Rheinwasser künstlich angereichert wird, die bereits heute oft beobachteten hohen maximalen Temperaturen des Rheins von über 26°C im Sommer, die Trinkwasserversorgung in der Region Basel beeinträchtigen.

Im Unteren Birstal (Bild 6) hängt der Wärmeaustausch zwischen dem Fluss und dem Grundwasservorkommen neben der Saisonalität auch davon ab, welcher Flussabschnitt betrachtet wird. Während in südlichen Flussabschnitten die Infiltration von Flusswasser in das Grundwasser der dominierende Interaktionsprozess ist, ist es in nördlichen Flussabschnitten die Exfiltration von Grundwasser in den Fluss. Insgesamt ist der Wärmeeintrag aus dem Fluss in das Grundwasser und durch die künstliche Grundwasseranreicherung höher als der Wärmeentzug durch Grundwasserentnahmen. Unter Berücksichtigung

aller untersuchten Klimaszenarien steigt, insbesondere in den Sommer- und Herbstmonaten, der Netto-Wärmeeintrag durch Infiltration von Flusswasser im Vergleich zum Referenzjahr 2000 bis 2055 um durchschnittlich 26 Prozent und bis 2085 um durchschnittlich 27 Prozent an (Bild 7). Der Wärmeentzug durch die Trinkwassernetnahmen steigt von 2000 bis 2055 um durchschnittlich 186 Prozent und von 2000 bis 2085 um durchschnittlich 256 Prozent. Infolgedessen würden die Temperaturen des entnommenen Trinkwassers bis 2055 um 0,85 bis 3,2°C und bis 2085 um 0,3 bis 5,4°C im Vergleich zum Referenzjahr 2000 ansteigen (Bild 8, Tabelle 1).

Schlussfolgerungen

Die quantitativen und qualitativen Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserressourcen und die lokale Trinkwasserversorgung werden immer deutlicher sichtbar. Grundwasservorkommen in Flusstäler sind sehr ergiebig und daher nicht nur für die Wasserversorgung, sondern auch für die Landwirtschaft von grosser Bedeutung. Dementsprechend sind sie Orte, an denen in unmittelbarer Zukunft wichtige Entscheidungen für die Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen und die Entwicklung von Anpassungsstrategien getroffen werden müssen.

Für drei Lockergesteinsgrundwasservorkommen in der Region Basel, welche für die Trinkwasserversorgung genutzt werden, wurden die zukünftigen Auswirkungen auf die Grundwasserquantität und -qualität sowie die direkten und indirekten Auswirkungen des Klimawandels untersucht. Im Rahmen unserer Studien wurde die Rolle der künstlichen Grundwasseranreicherung und der natürlichen Infiltration durch Fließgewässer für die quantitative Grundwasseranreicherung und die zeitliche Entwicklung der Grundwassertemperaturen evaluiert.

Die Wasserressourcen in den Langen Erlen, dem Hardwald und im Unteren Birstal zeigen Ähnlichkeiten im hydraulischen und thermischen Grundwasserregime auf, unterscheiden sich aber dennoch deutlich bezüglich der unterschiedlichen natürlichen und anthropogenen Randbedingungen. Allen drei Gebieten ist gemein, dass künstlich angereichertes Grundwasser eine wichtige Komponente im Gesamtwasserhaushalt darstellen. Für Grundwasservorkommen, bei denen die natürliche Infiltration von Flusswasser eine wichtige Komponente im Grundwasserhaushalt darstellt, werden die Auswirkungen des Klimawandels durch Änderungen des Abfluss- und Wärmeregimes der Fließgewässer sowie durch die künstliche Grundwasseranreicherung von Oberflächenwasser eine wichtige Rolle spielen. In allen Untersuchungsgebieten findet vor allem im Sommer und Spätsommer ein bedeutender Wärmeentzug durch die Trinkwasserentnahmen statt, was durch gemessene erhöhte Temperaturen im geförderten Wasser bestätigt wird.

Anhand von hydrologischen sowie Grundwasserströmungs- und Wärmetransportsimulationen konnte der Einfluss verschiedener Grundwasseranreicherungskomponenten und die Temperaturreichung der Grundwasserentnahmen der Trinkwasserversorgung abgeschätzt werden. Unter Berücksichtigung aller untersuchten Klimaszenarien steigt der Netto-Wärmeeintrag über die Flusswasserinfiltration. Zusammen mit weiteren Wärmeeinträgen, insbesondere durch die künstliche Grundwasseranreicherung, würden die Temperaturen des entnommenen Trinkwassers ansteigen.

Da die derzeitige und absehbare Erwärmung der Oberflächengewässer und des Grundwassers voraussichtlich grosse Auswirkungen auf viele aquatische Ökosysteme und biochemische Prozesse haben wird, ist ein genaues Verständnis der beteiligten Prozesse und Wechselwirkun-

gen und ihrer jeweiligen Auswirkungen dringend erforderlich. Künftige Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels sollten daher darauf abzielen, die quantitativen, qualitativen und ökologischen Auswirkungen auf aquatische Systeme mittels gekoppelter Oberflächen- und Grundwassermodelle abschätzen und die damit verbundenen Unsicherheiten systematisch quantifizieren zu können (41). In diesem Zusammenhang kann die Nutzung von Oberflächen- und Grundwasser eine Grundlage für die Entwicklung nachhaltiger Strategien zur Anpassung an den Klimawandel bilden.

Danksagungen

Wir danken der Sektion Hydrogeologische Grundlagen der Abteilung Hydrologie des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Forschungsprojektes «Energetische Potenziale – Thermische Nutzung von Oberflächenwasser zur künstlichen Grundwasseranreicherung» (EnerPot – MAR – MSWR). Darüber hinaus möchten wir uns bei den folgenden Organisationen und Personen für die Bereitstellung der benötigten Daten bedanken: Dem Amt für Umwelt und Energie Basel-Stadt AUE BS, dem Tiefbauamt

TBA BS, dem Amt für Umweltschutz und Energie Basel-Landschaft AUE BL, dem Tiefbauamt TBA BL, *Sebastiano Piccolroaz* für die Unterstützung bei der air2stream-Modellierung und *Massimiliano Zappa* für die Bereitstellung von Flussabflusssimulationen sowie den Industriellen Werken Basel IWb und der Hardwasser AG. Alle Karten wurden mit der Genehmigung von swisstopo (BA20090) reproduziert.

Eine ausführliche Publikation dieser Forschungsarbeit erschien im November 2022 in «Journal of Hydrology» unter dem Titel «Impact of climate change on Swiss alluvial aquifers – A quantitative forecast focused on natural and artificial groundwater recharge by surface water infiltration» (7).

Quellen:

1. Epting, J., et al., Impacts of climate change on Swiss alluvial aquifers – A quantitative forecast focused on natural and artificial groundwater recharge by surface water infiltration. *Journal of Hydrology X*, 2022: p. 100140.
2. CH2018, CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, N.C.f. Climate Services, Editor. 2018: Zurich. p. 271.
3. BAFU, Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft, in Umwelt-Wissen, B.f.U. BAFU, Editor. 2021: Bern.
4. CH2014-Impacts, Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland, F. OCCR, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope und ProClim, Editor. 2014: Bern, Schweiz. p. 136.
5. CH2011, Swiss Climate Change Scenarios CH2011. 2011. p. 88 pp.
6. NRP61, Sustainable water use in Switzerland. Overall Synthesis of the National Research Programme NRP61 «Sustainable Water Use», 2015: Bern.
7. BUWAL, BWG, and MeteoSchweiz, Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer, in Schriftenreihe Umwelt. 2004, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft: Bern. p. 174.
8. Zappa, M. and Kan, C., Extreme heat and runoff extremes in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2007. 7(3): p. 375–389.
9. Russo, S., Sillmann, J., and Fischer, E.M., Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environmental Research Letters*, 2015. 10(12).
10. BAFU, Hitze und Trockenheit im Sommer 2015 - Auswirkungen auf Mensch und Umwelt, in Umwelt-Zustand. 2016, Bundesamt für Umwelt: Bern. p. 108
11. BAFU, Hitze und Trockenheit im Sommer 2018 - Auswirkungen auf Mensch und Umwelt, in Umwelt-Zustand. 2019, Bundesamt für Umwelt: Bern. p. 91.
12. Tratschin, R., Dübendorfer, C., and Ritscher A., Trockenheit im Sommer und Herbst 2018 – Auswirkungen und deren Bewältigung in der Schweizer Wasserwirtschaft, in Bericht im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU. 2019: Zollikon. p. 43.
13. Liechti, K., Barben M., and Zappa M., Wasserhaushalt der Schweiz im Jahr 2018 – Einordnung und Besonderheiten. Wasser Energie Luft, 2019. 111: p. 93–94.
14. MeteoSchweiz, Hitze und Trockenheit im Sommerhalbjahr 2018 - eine klimatologische Übersicht, MeteoSchweiz, Editor. 2018. p. 38.
15. Zappa, M. et al., Trockenheit in der Schweiz: Vergleich der Jahre 2003, 2015 und 2018. Wasser Energie Luft, 2019. 111(2): p. 95–100.
16. Piccolroaz, S., et al., Exploring and Quantifying River Thermal Response to Heatwaves. *Water*, 2018. 10(8): p. 1098.
17. Schürch, M., Bulgheroni, M., and Sinreich, M., Température des eaux souterraines. Un aperçu de l'état et de l'évolution en Suisse. *Aqua & Gas*, 2018. 7/8: p. 40 – 48.
18. Osmancevic, E., Friedmann, R., and Engelfried M., Erhöhte Temperaturen in Wasserversorgungssystemen – Ursachen und Gegenmassnahmen. *Aqua & Gas*, 2018. 12: p. 26.
19. Michel, A., et al., Evolution of stream and lake water temperature under climate change. *Hydro-CH2018 Project, C.b.t.F.O.f.t.E. (FOEN)*, Editor. 2021: Bern, Switzerland. p. 71.
20. Hari, R.E., et al., Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology*, 2006. 12(1): p. 10–26.
21. Michel, A., et al., Stream temperature evolution in Switzerland over the last 50 years. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2019. 2019: p. 1–37.
22. Epting, J., et al., Climate change effects on groundwater recharge and temperatures in Swiss alluvial aquifers. *Journal of Hydrology X*, 2021. 11: p. 100071.
23. Epting, J., et al., Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen. *Hydro-CH2018 synthesis report chapters: «future changes in hydrology»*, in Hydro-CH2018 Project. 2020, Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN): 3003 Bern, Switzerland. p. 118.
24. Hunkeler, D., Effect of Climate Change on Groundwater Quantity and Quality in Switzerland, *HydroCH2018-Bericht*, Editor. 2020, Bundesamtes für Umwelt BAFU: Bern. p. 79.
25. Michel, A., et al., Stream temperature and discharge evolution in Switzerland over the last 50 years: annual and seasonal behaviour. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020. 24(1): p. 115–142.
26. Vinna, L.R., et al., The vulnerability of lakes to climate change along an altitudinal gradient. *Communications Earth & Environment*, 2021. 2(1).
27. Umweltbundesamt, Trends der Grundwassertemperatur. Untersuchungen von Daten der Überwachung des Gewässerzustandes in Österreich, in Report 0328. 2011: Wien.
28. FOEN, Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz. Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016, B.f.Umwelt, Editor. 2019: Bern. p. 138.
29. Arnoux, M., et al., Low-flow behavior of alpine catchments with varying quaternary cover under current and future climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 2021. p. 592.
30. Cochand, F., et al., Cross-sphere modelling to evaluate impacts of climate and land management changes on groundwater resources. *Science of the Total Environment*, 2021. 798.
31. FOEN, Hydro-CH2018- Impacts of climate change on Swiss waters. Hydrology, water ecology and water management, in Environmental Knowledge No. 2016, F.O.f.t.E. FOEN, Editor. 2020: Bern.
32. Feigenwinter, I., et al., Technical Report MeteoSwiss: Exploring quantile mapping as a tool to produce user-tailored climate scenarios for Switzerland. 2018. p. 44.
33. CH2018-Project-Team, CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland. National Centre for Climate Services. 2018.
34. Brunner, M.I., et al., Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. *Science of the Total Environment*, 2019. 666: p. 1033–1047.
35. Viviroli, D., et al., An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling & Software*, 2009. 24(10): p. 1209–1222.
36. Brunner, M.I., et al., Future shifts in extreme flow regimes in Alpine regions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2019. 23(11): p. 4471–4489.
37. Toffolon, M. and Piccolroaz, S., A hybrid model for river water temperature as a function of air temperature and discharge. *Environmental Research Letters*, 2015. 10: p. 114011.
38. Piccolroaz, S., et al., Prediction of river water temperature: a comparison between a new family of hybrid models and statistical approaches. *Hydrological Processes*, 2016. 30(21): p. 3901–3917.
39. Diersch, H.J., Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media. 2014, Berlin: Springer.
40. Epting, J., Thermal management of urban subsurface resources – Delineation of boundary conditions. *Procedia Engineering*, 2017.
41. Moeck, C., et al., Grundwassermodellierung – Warum auch Modellunsicherheiten quantifiziert werden sollten. *Aqua & Gas*, 2022. 7–8: p. 27–33.

Autoren:

Epting Jannis¹, Love Räman Vinna^{2,3}, Affolter Annette¹, Scheidler Stefan¹, Schilling Oliver^{2,3}

¹ Angewandte und Umweltgeologie, Hydrogeologie, Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel, 4056 Basel, Schweiz

² Hydrogeologie, Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel, 4056 Basel, Schweiz

³ Abteilung Wasserressourcen und Trinkwasser, Eawag: Das Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs, 8600 Dübendorf, Schweiz