

Departement Umweltwissenschaften der Universität Basel
Forschungsgruppe Angewandte und Umweltgeologie

Energetische Potenziale - Thermische Nutzung von Oberflächenwasser zur künstlichen Grundwasseranreicherung

BAFU-Forschungsbericht

Basel, September 2022

Titelbild:
Michel Alain Walde
Praktikant AUG
Januar 2020

«Energetische Potenziale – Thermische Nutzung von Oberflächenwasser zur künstlichen Grundwasseranreicherung»

Berichtsnummer

Baugrundarchiv (BGA), BGA-Region-27

Datum

September 2022

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Hydrologie, CH-3003 Bern. Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Projektverantwortlicher / Projektleitung

PD Dr. Jannis Epting

Projektbearbeitung

PD Dr. Jannis Epting

Dr. Love Råman Vinnå

Dipl. Natw. ETH Annette Affolter

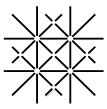
Dipl. Hyd. Stefan Scheidler

Begleitung BAFU

Michael Sinreich

Hinweis

Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.



Zusammenfassung

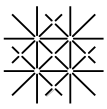
Für verschiedene Grundwasserleiter im Raum Basel wurden im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Umwelt (BAFU) im Rahmen einer Forschungsarbeit der Angewandten und Umweltgeologie (AUG) Konzepte für **MAR (Managed Aquifer Recharge)** und **MSWR (Managed Surface Water Recharge)** entwickelt und das energetische Potenziale der thermischen Nutzung von Oberflächenwasser zur künstlichen Grundwasseranreicherung untersucht (**EnerPot – MAR – MSWR**).

Die Forschungsarbeit umfasst zwei Arbeitspakete (**Abb. 1**). **Arbeitspaket AP1** konzentriert sich auf Untersuchungen zum Prozessverständnis, einschliesslich (A) einer hydrologischen und thermischen Modellierung von Abflüssen und Temperaturen der Oberflächengewässer Rhein, Wiese und Birs sowie (B) der hydrogeologischen Wärmetransportmodellierung der Grundwassersysteme in den Langen Erlen in der Wieseebene, dem Hardwald entlang des Rheins und im Bereich der Anreicherungsanlage Aesch im unteren Birstal. **Arbeitspaket AP2** behandelt die Ausarbeitung von Konzepten für ein **Integriertes Wasser Ressourcen Management (IWRM)** für verschiedene Untersuchungsstandorte im Raum Basel, einschliesslich der thermischen Nutzung des Anreicherungs- und Entnahmewassers und der Regeneration «erwärmter» Oberflächengewässer.

Für die drei Grundwasserentnahme- und Anreicherungssysteme im Raum Basel konnten Modellwerkzeuge erarbeitet werden, welche es ermöglichen die Grundwasserströmung und den Wärmetransport zu simulieren und hydraulische und thermische Veränderungen vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung und unterschiedlichen Strategien zur Wasserversorgungsplanung zu evaluieren.

Die untersuchten Wasservorkommen in der Region Basel, in den Langen Erlen, im Hardwald und im unteren Birstal, weisen Ähnlichkeiten im hydraulischen und thermischen Grundwasserregime auf, unterscheiden sich aber auch deutlich in einzelnen natürlichen und anthropogenen Randbedingungen. Sie haben gemeinsam, dass das Grundwasser an allen drei Standorten künstlich angereichert wird und dass sich die Kälte- (Winter) und Wärmefahnen (Sommer) von den verschiedenen Anreicherungssystemen im Grundwasserabstrom, dem hydraulischen Gradienten folgend, v.a. zu den Trinkwasserbrunnen bewegen.

In den Langen Erlen dominiert v.a. die Infiltration von Wiesewasser, welche eine wichtige Komponente in der Grundwasserbilanz. Dementsprechend werden die Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasservorkommen v.a. auch durch diese Komponente, aber auch durch die künstliche Grundwasseranreicherung, geprägt werden. So nimmt unter Berücksichtigung aller untersuchten Klimaszenarien, im Vergleich zu 2000, der Netto-Wärmeeintrag durch die Infiltration von Wiesewasser bis 2055 um im Mittel 42 % und bis 2085 um im Mittel 62 % zu. Zusammen mit weiteren Wärmeeinträgen, v.a. auch über die künstliche Grundwasseranreicherung, würden die Temperaturen des entnommenen Trinkwassers um 0.4 bis 1.3 °C bis 2055 und 0.7 bis 3.1 °C bis 2085 ansteigen. Im Hardwald findet der bedeutendste Wärmeaustausch über die künstliche Grundwasseranreicherung statt. Als Resultat der erhöhten Wärmeeinträge, v.a. im Sommerhalbjahr, würden die Temperaturen des entnommenen Trinkwassers um 0.2 bis 1.0 °C bis 2055 und 0.6 bis



4.0 °C bis 2085 ansteigen. Im unteren Birstal nimmt der Netto-Wärmeeintrag durch die Infiltration von Birswasser bis 2055 um im Mittel 42 % und bis 2085 um im Mittel 62 % zu. Entsprechend steigen die Temperaturen des entnommenen Trinkwassers um 0.85 bis 3.2 °C bis 2055 und um 0.3 bis 5.4 °C bis 2085 an.

Für eine thermische Nutzung des Entnahmewassers ist die Phasenverschiebung der Temperatur und die Fließzeit zwischen Anreicherung und Entnahme relevant. Da ein Wärmeentzug v.a. in den Wintermonaten (Heizen & Warmwasser) attraktiv ist, ist eine Phasenverschiebung von ca. einem halben Jahr optimal. In den Langen Erlen ist die Anordnung der einzelnen Entnahmeburgen zu den Anreicherungsfeldern sehr unterschiedlich, wodurch auch die Phasenverschiebung sehr variabel ist. Hingegen ist die Brunnenanordnung im Hardwald nahezu ideal, die Phasenverschiebung beträgt zwischen ca. 100 und 150 Tagen.

Die Auswertungen zur thermischen Nutzung des Anreicherungs- und Entnahmewassers zeigen, dass durch die hohen Anreicherungsmengen in den Langen Erlen und dem Hardwald eine vergleichsweise hohe Wärmegewinnung von im Mittel 14 und 20 W theoretisch möglich wäre. Dadurch würde dem Grundwasserleiter Wasser mit Temperaturen, welches potenziell natürlichen Grundwassertemperaturen von 10 °C entspricht, zugeführt. Zudem könnten, v.a. in den Sommermonaten, die Temperaturen des entnommenen Trinkwassers um im Mittel 0.9 bis 4.5 °C (Langen Erlen) und 0.6 bis 2.8 °C (Hardwald) abgekühlt werden. Das Potential einer thermischen Nutzung des Entnahmewassers ist geringer.

Durch einen Wärmeentzug könnten die Temperaturen der Oberflächengewässer während Hitzeperioden unter 25 °C gehalten werden. Hierfür müssten, in Abhängigkeit des betrachteten Klimaszenarios, im Mittel zwischen 3'631 und 6'228 kW (Wiese), 1'289 und 3'090 MW (Rhein) und 2'092 und 10'901 kW (Birs) Wärme entzogen werden. Entsprechend liegen Wassermengen, welche mit 10 °C den Oberflächengewässern hinzugegeben werden müssten, um dieses auf unter 25 °C zu halten, im Mittel bei 4'555 und 7'226 m³ d⁻¹ (Wiese) und bei 2'837 und 13'736 m³ d⁻¹ (Birs); der Rhein wurde nicht betrachtet.

Exemplarisch konnte für einen Flussabschnitt entlang der Birs aufgezeigt werden, wo eine strategische Anreicherung zu lokalisieren wäre um die Exfiltration von vergleichsweise «kühlen» Grundwasser in die Birs im Sommer zu erhöhen. Die Auswertungen zeigen, dass die Temperaturen des Grundwassers in den Uferbereichen und den Exfiltrationszonen um im Mittel 0.7 bis 3.0 °C reduziert werden könnten. Lokale Exfiltrationszonen können dabei eine Rolle bzgl. potenziellen Rückzugsgebieten zum Schutz von Fischen während Hitzeereignissen spielen.

Im Rahmen der Forschungsarbeit konnten die wissenschaftlichen Grundlagen für die spezifischen technischen Herausforderungen beim Betrieb von MAR & MSWR erarbeitet werden, welche es schliesslich erlauben die Übertragbarkeit der entwickelten Werkzeuge und IWRM-Konzepte für ein anwendungsorientiertes Ressourcenmanagement vor dem Hintergrund der Klimaänderungen und Wasserversorgungsplanung zu diskutieren. So konnten Anwendungsmöglichkeiten und -beispiele von MAR als strategische Grundwasseranreicherung zur Regenerierung erwärmter Grundwasserleiter und die thermische Nutzung der künstlichen Grundwasseranreicherung mit vergleichsweise «kaltem» Oberflächenwasser (Wintermonate) erörtert werden.

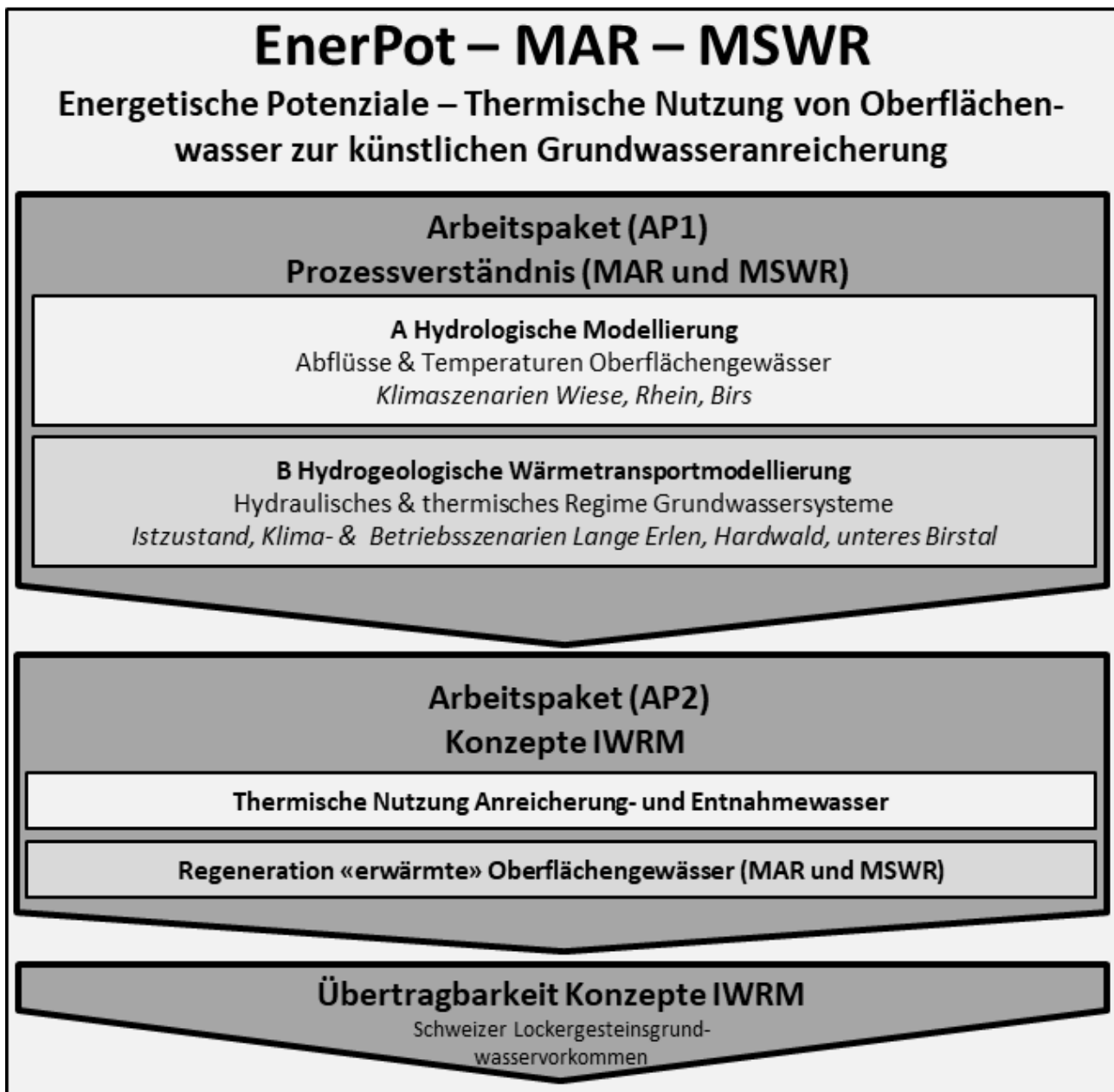
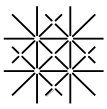
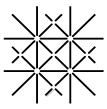
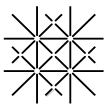


Abb. 1 EnerPot – MAR – MSWR

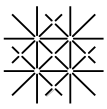
Die erarbeiteten anwendungsorientierten Modellwerkzeuge ermöglichen es die Grössenordnungen der Veränderungen und die Relevanz verschiedener natürlicher und anthropogener Randbedingungen zu quantifizieren. Auch für zukünftige Fragestellungen können die Modellwerkzeuge weiterentwickelt werden.



Zusammenfassung	3
1 Einleitung und Ausgangslage	8
2 Untersuchungsgebiete	11
3 Vorgehen und Methodik	13
3.3 Hydrologische Modellierung AP1-A	13
3.3.1 Grundlage Klimadaten	13
3.3.2 Datengrundlage Fließgewässer	14
3.3.3 Modellbeschreibung und -kalibrierung	14
3.3.4 Auswahl Klimaprojektionen	15
3.4 Hydrogeologische Modellierung AP1-B	16
3.4.1 Modellgeometrien und Aquifereigenschaften	16
3.4.2 Datengrundlagen, hydraulische und thermische Randbedingungen	19
3.4.3 Kalibrierung und Validierung	24
3.4.4 Auswahl Betriebsszenarien	25
3.5 Konzepte IWRM AP2	26
3.5.1 Thermische Nutzung Anreicherungs- und Entnahmewasser	26
3.5.2 Regeneration «erwärmter» Oberflächengewässer	27
4 Resultate	30
4.1 Hydrologische Modellierung AP1-A	30
4.2 Hydrogeologische Modellierung AP1-B	32
4.2.1 Lange Erlen	32
4.2.2 Hardwald	40
4.2.3 Unteres Birstal	48
4.3 IWRM AP2	56
4.3.1 Thermische Nutzung des Anreicherungs- und Entnahmewasser	56
4.3.2 Regeneration «erwärmter» Oberflächengewässer	60
5 Diskussion, Schlussfolgerungen und Ausblick	70
5.1 Istzustand, Klima- und Betriebsszenarien von Wasserressourcen im Raum Basel	70
5.2 Strategien für IWRM im Raum Basel	71
5.3 Synthese	73
5.4 Übertragbarkeit	75
6.1 Empfehlungen & Ausblick	77



Verdankung	79
Referenzen	79
Anhang A: Resultate Klimaszenarien	82
Anhang B: Kalibrierung Wärmetransportmodelle / Grundwasserbilanzen	95
Lange Erlen	95
Hardwald	97
Unteres Birstal	98
Anhang C: Grundwasserbilanzen	99
Lange Erlen	99
Hardwald	100
Unteres Birstal	101
Anhang D: Entwicklung Trinkwassertemperaturen	102
Lange Erlen	102
Hardwald	103
Unteres Birstal	104
Anhang E: IWRM	105
Lange Erlen	105
Hardwald	106
Unteres Birstal	107



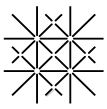
1 Einleitung und Ausgangslage

Nach 2003 (BUWAL et al., 2004; Zappa and Kan, 2007) waren auch 2015 (BAFU, 2016) und 2018 (BAFU, 2019a; Liechti et al., 2019; MeteoSchweiz, 2018; Tratschin et al., 2019) Hitzejahre¹ (Zappa et al., 2019). In diesen Jahren wurden auch hohe Grundwassertemperaturen verzeichnet (Schürch et al., 2018), wobei die Auswirkungen von erwärmtem Grundwasser kaum erforscht sind. Bekannt ist, dass zu stark erwärmtes Grundwasser für die Trinkwassernutzung ungeeignet wird, da sich die mikrobiologische Aktivität im Grundwasser verändert. Erfahrungen der letzten Jahre aus der Praxis haben gezeigt, dass Trinkwassertemperaturen über 25 °C in Wasserversorgungssystemen auftreten und eine hygienisch einwandfreie Grundwasserversorgung gefährden können (Osmancevic et al., 2018); übersteigen die Grundwassertemperaturen 15 °C schmeckt Wasser fade und bringt keine Abkühlung.

Ausgangslage für die Untersuchungen sind die Forschungsarbeiten der AUG im Zusammenhang mit dem Zusatzmodul «Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen» des BAFU-Projektes Hydro-CH2018» (Epting et al., 2021; Epting et al., 2020). Im Rahmen des Forschungsprojektes konnten für ausgewählte Szenarien des Klimawandels die Verschiebung von Hochwasserereignissen und die Auswirkungen auf den Zeitpunkt der Grundwasserneubildung durch die Infiltration von Oberflächenwasser in Grundwasservorkommen und die Temperaturprägung des Grundwassers qualitativ beschrieben werden. Im Rahmen dieser vorangegangenen Studien haben wir jedoch auch erkannt, dass für einen quantitativeren Ansatz die verschiedenen Komponenten der Grundwasserneubildung und die Grundwassertemperaturprägung der Grundwasserleiter genauer untersucht werden müssen. Dies beinhaltet im Wesentlichen die Weiterentwicklung der Strömungs- und Wärmetransportmodellierung von Flüssen und Grundwassersystemen in Kombination mit Simulationen des Klimawandels.

Die Motivation für die Forschungsarbeit lag in den steigenden Temperaturen von Oberflächengewässern (Michel et al., 2019; Michel et al., 2021) und Grundwasserressourcen (Epting et al., 2021; Epting et al., 2020; Hunkeler, 2020), welche in der Folge des Klimawandels aber auch durch lokale anthropogene Aktivitäten zu erwarten sind. Insbesondere in urbanen Gebieten werden zunehmend quantitative und qualitative (Temperatur-) Defizite unterirdischer Ressourcen zu beobachten sein (BAFU, 2021). Eine verstärkte Grundwassernachfrage während Dürreperioden, als Resultat der Auswirkungen des Klimawandels, wird mit erhöhter künstlicher Grundwasseranreicherung mit vergleichsweise «warmem» Oberflächenwasser in den Sommermonaten einhergehen. Dadurch erhöhen sich die Temperaturen des Grundwassers und somit des entnommenen Trinkwassers zusätzlich. Zugleich besteht aber v.a. in urbanen Gebieten, zur Minderung dieser Auswirkungen, die Möglichkeit Anpassungsstrategien zu realisieren und die unerwünschte anthropogene Wärme von Wasserressourcen als erneuerbare Umweltwärme zu nutzen.

¹ In der Schweiz spricht man von einem Hitzesommer oder Hitzejahr, sobald das Thermometer für mehr als fünf aufeinanderfolgende Tage 30 °C übersteigt, was gemäss der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) 3 bis 5 K über dem langjährigen Tageshöchstwert liegt.



Bearbeitungsschwerpunkte des Forschungsprojektes «energetische Potenziale der thermischen Nutzung von Oberflächenwasser zur künstlichen Grundwasseranreicherung» (EnerPot – MAR – MSWR) umfassten einerseits hydrologische Fragestellungen, einschliesslich Fluss- und Temperaturmodellierung sowie Szenarien des Klimawandels. Andererseits lag der Bearbeitungsschwerpunkt auf hydrogeologischen Fragestellungen, welche auf Grundlage von Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodellierung untersucht wurden. Für die untersuchten Grundwassersysteme war es das Ziel das Prozessverständnis betreffend quantitativer (Infiltrationsraten) und qualitativer (Temperaturprägung) Einflussfaktoren zu erweitern.

Die Innovation des Forschungsprojektes lag v.a. in der Verbindung zwischen der Hydrologie der Oberflächenwässer und der Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen sowie Fragestellungen zu «Wasser» und «Energie». Das hierfür erforderliche Prozessverständnis soll es dabei ermöglichen die Komplexität der Systemkomponenten und deren Interaktion zu erfassen.

Grundwasserneubildung

Auf nationaler Ebene zeigen die Grundwasserressourcen in quantitativer Hinsicht über die letzten 20 Jahre keinen Trend für Veränderungen (weniger Niederschläge, höhere Verdunstung, frühere Schneeschmelze) führen aber dazu, dass sich die Grundwasserneubildung saisonal verschiebt (BAFU, 2019b).

Die wesentliche Rückkopplung von atmosphärischen Klimaänderungen auf Grundwasservorkommen (nicht nur für solche in Lockergesteinsablagerungen) ist über die Grundwasserneubildung zu erwarten. Dabei ist nicht nur die flächige Grundwasserneubildung auf das Grundwasservorkommen (perkolierendes Niederschlagswasser, «precipitation-fed aquifers») selbst als auch jene über regionalen Grundwasserkomponenten («importierte Grundwasserregime») und die Hangeinzugsgebiete zu berücksichtigen, sondern auch die linienhafte Grundwasserneubildung durch infiltrierende Oberflächengewässer («river-fed aquifers») und die künstliche Grundwasseranreicherung von Oberflächenwasser. Die letztgenannten Grundwasserneubildungskomponenten werden direkt von atmosphärischen Klimaänderungen über die hydrologischen Abflussbedingungen infolge sich verändernder Niederschläge und Temperaturen beeinflusst.

Die verschiedenen Grundwasserneubildungsprozesse haben dabei keinen linearen Zusammenhang mit Niederschlagsereignissen. Unter anderen hängt die Grundwasserneubildung auch von der Bodensättigung, der Dauer und Intensität einzelner Niederschlagsereignisse oder auch den Vegetationsperioden ab. Die Zeitskala, auf der sich Veränderungen der verschiedenen Grundwasserneubildungsprozesse abspielen ist bisher grösstenteils unbekannt.

Entgegen einer Betrachtung von einem gesamten Flusseinzugsgebiet, für welches eine mehr oder weniger «geschlossene» Wasserbilanz berechnet werden kann, müssen für abgegrenzte Lockergesteins-Grundwasservorkommen weitere Wasserkomponenten (Zu- und Abflüsse) über verschiedene Ränder berücksichtigt werden. In [Abb. 2](#) wird beispielhaft für das Grundwasservorkommen im Bereich der Gemeinden Aesch und Reinach im unteren Birstal des Kantons Basel-Landschaft illustriert ([Abb. 3](#)), welche Wasserkomponenten zu berücksichtigen sind. Zu den natürlichen

Randbedingungen zählt die flächige Grundwasserneubildung aus versickernden Niederschlagswasser sowie der regionale Grundwasserzu- und -abstrom, der Zustrom über die seitlichen Hangeinzugsgebiete, und die Interaktion des Grundwassers mit Oberflächengewässern. Hinzu kommt in den Gebirgsregionen des Juras und der Alpen die Interaktion der Lockergesteins-Grundwasservorkommen mit regionalen Karst- und Kluftsystemen.

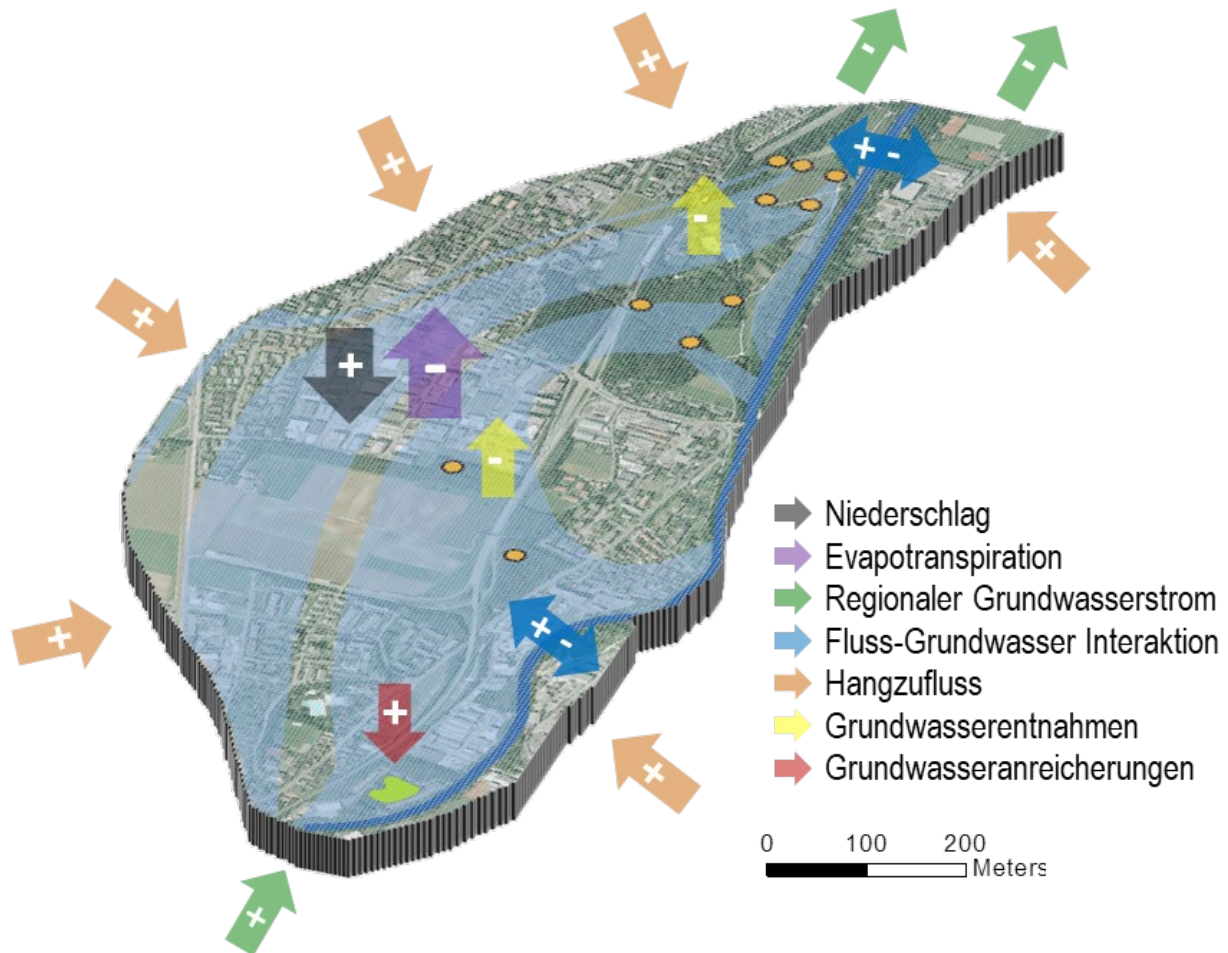


Abb. 2 Wasserbilanz eines Lockergesteins-Grundwasservorkommens, dargestellt am Beispiel des Grundwasserleiters im unteren Birstal.

Zu den anthropogenen Randbedingungen gehören Grundwasserentnahmen und künstliche -anreicherungen sowie für thermische Fragestellungen die Nutzung des Untergrundes und des Grundwassers zu Kühl- und Heizzwecken als auch der thermische Einfluss von Untergrundstrukturen. Bei langanhaltender Trockenheit wird vermehrt Grundwasser entnommen und angereichert. Da solche Situationen v.a. in den Sommermonaten vermehrt eintreten werden, und vergleichsweise warmes Oberflächenwasser angereichert wird, ist zu erwarten, dass die Grundwassertemperaturen entsprechend steigen.

2 Untersuchungsgebiete

Im Raum Basel existieren drei Standorte an welchen Oberflächenwasser für die künstliche Grundwasseranreicherung genutzt wird (Abb. 3). An den Standorten in den Langen Erlen und im Hardwald wird Rheinwasser und am Standort der Anreicherungsanlage Aesch (AAA) im unteren Birstal Birswasser für die künstliche Grundwasseranreicherung verwendet. In den Langen Erlen befindet sich die Trinkwasserbrunnen der IWB und im Hardwald jene der Hardwasser AG, welche jeweils in etwa die Hälfte des Trinkwassers von Basel produzieren. Durch die AAA wird das Grundwasser im unteren Birstal angereichert, welches durch Trinkwasserbrunnen der Gemeinde Aesch und der Wasserversorgung von Reinach und Umgebung (WWR) in der Reinacher Heide genutzt wird.

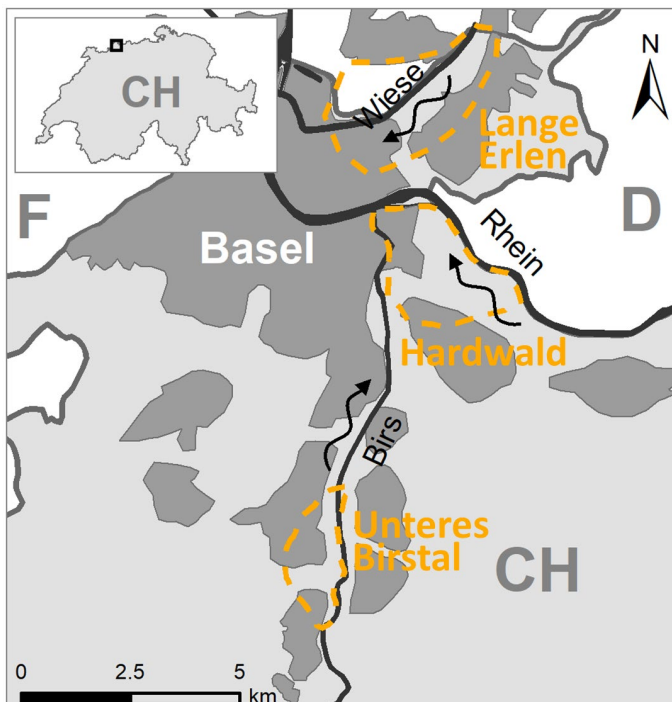


Abb. 3 Untersuchungsgebiete im Raum Basel. Entlang der Wiese in den Langen Erlen, dem Rhein im Hardwald und der Birs im Bereich der AAA im unteren Birstal.

Es sind drei Hauptgründe für die Notwendigkeit der künstlichen Anreicherung der Grundwasserressourcen im Raum Basel: (1) die Grundwasserentnahme übersteigt die natürliche Grundwasserneubildung; (2) durch die Verwendung von zuvor gefiltertem und bis zu einem gewissen Grad aufbereitetem Flusswasser kann die Qualität des entnommenen Wassers verbessert werden; und (3) die Einrichtung künstlicher hydraulischer Barrieren ermöglicht es, den Zufluss von Grundwasser mit schlechter Wasserqualität zu beschränken (v.a. Hardwald).

Gegenwärtig beträgt der Anteil der künstlichen Anreicherung von Flusswasser in der Schweiz lediglich 3.8 % des Trinkwassers (SVGW, 2020). Vor allem im Raum Basel trägt die künstliche Grundwasseranreicherung wesentlich zum Gesamtgrundwasserhaushalt bei. Es werden verschiedene Methoden der künstlichen Anreicherung angewendet (Abb. 4): (1) Versickerungsfelder (Lange Erlen), (2) Versickerungsgräben und -weiher (Hardwald), und (3) Versickerungsanlagen mit Filterschichten (AAA im unteren Birstal).

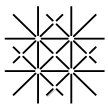
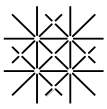


Abb. 4 Künstliche Anreicherungsverfahren. Von links nach rechts: Lange Erlen, Hardwald und AAA im unteren Birs-tal.



3 Vorgehen und Methodik

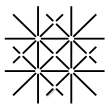
Abb. 1 zeigt das Vorgehen und die Methodik und die Bearbeitung der zwei Arbeitspakete. **Arbeitspaket AP1** konzentriert sich auf Untersuchungen zum Prozessverständnis, einschliesslich (A) der hydrologischen und thermischen Modellierung von Abflüssen und Temperaturen der Oberflächengewässer Rhein, Wiese und Birs sowie (B) der hydrogeologischen Wärmetransportmodellierung der Grundwassersysteme in den Langen Erlen in der Wieseebene, dem Hardwald entlang des Rheins und im Bereich der Anreicherungsanlage Aesch im unteren Birstal. **Arbeitspaket AP2** behandelt die Ausarbeitung von IWRM-Konzepten für die verschiedene Untersuchungsstandorte im Raum Basel, einschliesslich der thermischen Nutzung des Anreicherungs- und Entnahmewasser und der Regeneration von «erwärmten» Oberflächengewässern.

Auf Grundlage der Resultate des Projektes wird die Übertragbarkeit der entwickelten Werkzeuge und IWRM-Konzepte für ein anwendungsorientiertes Ressourcenmanagement diskutiert. Neben Anwendungsmöglichkeiten von MAR als strategische Grundwasseranreicherung in Zeiten des Wasserüberschusses während Mittel- und Hochwassersituationen zur Begegnung von Dürreperioden werden auch Sanierungsmassnahmen zur Regenerierung erwärmter Grundwasserleiter und die thermische Nutzung der künstlichen Grundwasseranreicherung mit vergleichsweise «kaltem» Oberflächenwasser in Wintermonaten erörtert.

3.3 Hydrologische Modellierung AP1-A

3.3.1 Grundlage Klimadaten

Datengrundlage für die hydrologische Modellierung ist der aus den GCM-RCM-Modellen prognostizierte Temperaturanstieg des zukünftigen Klimas (Tabelle A1 im Anhang) aus den EURO-CORDEX Klimaprojektionen (Giorgi et al., 2008), welche im Rahmen der Schweizer Klimaszenarien CH2018 (CH2018, 2018) erarbeitet wurden. Die Klimamodelle wurden durch nicht-parametrisches empirisches Quantil-Mapping statistisch herunterskaliert, um Modellverzerrungen zu beseitigen (CH2018, 2018; Feigenwinter et al., 2018; Ivanov and Kotlarski, 2017; Rajczak et al., 2016a; Rajczak et al., 2016b). Hierfür wurde für die GCM-RCM-Kalibrierungsperiode (1981-2010) eine Korrekturfunktion für einzelne Tage eines Jahres verwendet, um die statistische Verteilung an einer Station (BAS Station des MeteoSchweiz Beobachtungsnetzes) mit der entsprechenden Rasterzelle des Modells in Beziehung zu setzen. Schliesslich wurde die Korrekturfunktion auf den gesamten Simulationszeitraum angewendet, um die Rasterzellen-Skala mit der lokalen Skala zu verknüpfen. Für zukünftige Zeiträume (2011-2099) wurden die verfügbaren Daten der statistisch herunterskalierten Lufttemperaturen (CH2018-Project-Team, 2018) für die lokale Skala der meteorologischen Stationen (Basel BAS, Rünenberg RUE) verwendet und für die drei regionalen Klimaprojektionen (Regional Climate Projections RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5) auf Tagesbasis aufgelöst. Das klimatologische Jahr für Messungen wurde als Tagesmittel (Day of the Year - DoY) aus allen verfügbaren Messungen berechnet und aus den Klimamodellen durch die verfügbaren Messungen zeitlich abgegrenzt.



3.3.2 Datengrundlage Fließgewässer

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zukünftige Projektionen des Abflusses aus dem PREVAH-Modell mit 200 m Auflösung verwendet (Brunner et al., 2019a; Brunner et al., 2019b; Viviroli et al., 2009). Eingangsdaten für die PREVAH-Modelle umfassen Niederschlag, Lufttemperatur, relative Feuchte, kurzweilige Strahlung und Windgeschwindigkeit, wobei dieselben Daten verwendet wurden wie für die GCM-RCM-Modelle. Modellresultate umfassen zukünftige Projektionen des Fließgewässerabflusses, einschliesslich Gletscher- und Schneeschmelze, es fehlten bisher jedoch Projektionen der Entwicklung der Wassertemperatur. Daher wurde für die vorliegenden hydrologischen Modellierungen das hybride physikalisch-statistische Modell air2stream (Piccolroaz et al., 2016; Toffolon and Piccolroaz, 2015) verwendet, um zukünftige Flusstemperaturprojektionen simulieren zu können.

Wobei die Abflussprojektionen der PREVAH-Modelle die gesamte Schweiz umfassen, beschränkt sich die vorliegende Studie auf die Region Basel in der Nordwestschweiz. Die PREVAH-Modelldaten wurden für fünf Stationen simuliert, welche von der Abteilung Hydrologie des BAFU überwacht werden (Tab. 1); Birs (2106), Rhein (2289), Rheinfelden (2091) und Wiese (2199). Für die Kalibrierung der air2stream-Modelle, wurden historische Wassertemperaturmessungen des BAFU verwendet. Da an der Station Rhein (2289) keine Wassertemperaturdaten vorhanden waren, wurden stattdessen Wassertemperaturmessungen der BAFU-Station (2613), welche 6'900 m flussabwärts liegt, verwendet.

Tab. 1 Kalibrierungsergebnisse der air2stream Abflussmodellierung

	Wiese	Rhein	Rheinfelden	Birs	Bereich
BAFU-Stationsnummer	2199	2289	2091	2106	Kalibrations-
Station MeteoSchweiz	BAS	BAS	BAS	BAS	parameter
a ₁	0,679382	0,534506	0,795642	0,941181	-5 - 15
a ₂	0,356451	0,150475	0,241358	0,555564	-5 - 1.5
a ₃	0,378578	0,123144	0,179666	0,578579	-5 - 5
a ₄	-0,082702	-0,634947	-1,20524	-0,416638	-8 - 8
a ₅	2,90003	2,80823	6,562917	10,552315	0 - 20
a ₆	1,226271	1,847245	4,265791	2,988117	0 - 10
a ₇	0,588583	0,594849	0,592312	0,571476	0 - 1
a ₈	0,33522	0,265645	0,616209	1,063423	-1 - 5
RMSE ²	0,81	0,81	0,89	0,58	
Kalibrationsperiode	2006 - 2020	1997 - 2019	1997 - 2019	1997 - 2019	

3.3.3 Modellbeschreibung und -kalibrierung

Das verwendete hybride Flusswassertemperaturmodell air2stream (acht-Parameter-Version (a₁-a₈)³, Tab. 1) kombiniert vergleichsweise einfache stochastische Modelle zur Parameterkalibrierung mit einer physikalisch basierten

²Root Mean Square Error

³<https://github.com/spiccolroaz/air2stream>

Struktur der Modellgleichung, welche die wichtigsten physikalischen Prozesse berücksichtigt, welche die thermische Dynamik von Flüssen steuern. Das Modell benötigt als Input Lufttemperatur und Abfluss, um die Wassertemperatur des Flusses mit einer täglichen Zeitauflösung zu berechnen. Es wurde für den Zeitraum kalibriert, in welchem die Messdaten der Lufttemperatur und des Abflusses verfügbar waren. Da die Kalibrierung der Modellparameter datengetrieben ist, wurde der gesamte Zeitraum für die Modellkalibrierung genutzt. Dieser Ansatz erlaubte keine unabhängige Modellvalidierung, auf die bewusst zugunsten einer robusteren Kalibrierung der Parameter verzichtet wurde. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das airstream-Modell, einschliesslich Anwendungen an Schweizer Fließgewässer, bereits ausgiebig validiert wurde (Piccolroaz et al., 2016; Råman Vinnå et al., 2018; Toffolon and Piccolroaz, 2015).

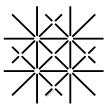
Trotz der hohen Auflösung der hier betrachteten GCM-RCM-Modellierung und der statistischen Herunterskalierung unter Verwendung der meteorologischen Stationen resultieren geringfügige Unterschiede zwischen modellierter und beobachteter Lufttemperatur während des historischen Zeitraums (Tab. A1 bis Tab. A3 und Abb. A1 bis Abb. A6 im Anhang). Ähnliche Abweichungen resultieren auch zwischen modelliertem und gemessenem Abfluss. Da das airstream-Modell auf der Grundlage von Lufttemperatur- und Abflussmessungen kalibriert wurde und aufgrund der datengetriebenen Ableitung der Werte der Modellparameter, können solche Unterschiede (selbst wenn sie gering sind) die Quantifizierung der projizierten Flusswassertemperatur in der Zukunft künstlich verändern. Um dieses Problem zu vermeiden, wurden die zukünftigen Projektionen der Zeitreihen der Lufttemperatur und des Abflusses, die als Input in airstream verwendet werden, mit Hilfe von Änderungsfaktoren statistisch angepasst (Diaz-Nieto and Wilby, 2005; Minville et al., 2008). Klimatologische mittlere Jahreszyklen (auf einer täglichen Zeitskala) für den Kalibrierungszeitraum wurden sowohl für die gemessenen als auch für die aus der RCM-GCM-Modellierung berechneten Lufttemperaturen und Abflüsse erstellt (Abb. A1 bis Abb. A6 im Anhang). Unter Beibehaltung der projizierten Trends in den RCM-GCM-Datensätzen wurde der Klimaantrieb für Lufttemperatur und Abfluss dann jedes Jahr gemäss Gleichung 1 angepasst.

$$Fn_i = (Fo_i - Cs_j) + Cm_j \quad (1)$$

wobei F_n , die angepasste Variable zum Zeitpunkt i ist, F_o , die tägliche Zeitreihe der Variablen ist, die aus den RCM-GCM-Modellkombinationen simuliert wird, und C_m sowie C_s die klimatologischen Jahre für Messungen und GCM-RCM-Output am Tag des Jahres j , der dem Zeitpunkt i entspricht, sind. Die klimatologischen Jahre wurden unter Verwendung eines 60-Tage-Fensters geglättet, um den Effekt möglicher Impulsereignisse (insbesondere für den Abfluss) zu entfernen; der minimalen Fließgewässerabfluss wurde dabei nicht nach unten begrenzt.

3.3.4 Auswahl Klimaprojektionen

Bei der Auswahl der Klimaprojektionen wurde darauf geachtet, dass sowohl für die simulierten Lufttemperaturen als auch für die Abflüsse und Temperaturen der Fließgewässer minimale und maximale Entwicklungen der Klimatrends für den simulierten Zeitraum berücksichtigt werden (Tab. 2 bis Tab. A3 im Anhang).



Tab. 2 Auswahl Klimaprojektionen

Parameter	Min	Max
Lufttemperatur	DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11	KNMI-RACMO_HADGEM_EUR44
Abflussdaten	DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11	SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44
Fluss-Temperaturdaten	DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11	SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44

Die ausgewählten Klimaprojektionen wurden jeweils in Kombination mit den Emissionsszenarien 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) betrachtet.

3.4 Hydrogeologische Modellierung AP1-B

Die Grundwasserströmungsmodelle für die Untersuchungsgebiete existierten bereits und die Hydraulik wurde schon im Rahmen von unterschiedlichen Projekten und Fragestellungen für verschiedene Zeitperioden instationär kalibriert (siehe folgende Kapitel). Für dieses Projekt wurden die Modelle nun auch für den Wärmetransport kalibriert und validiert. Für die Strömungs- und Wärmetransportmodellierung wurde die Software FEFLOW 7.2 (WASY GmbH 2001) verwendet, welche auf Finiten Elementen beruht.

3.4.1 Modellgeometrien und Aquifereigenschaften

Der Schottergrundwasserleiter in der Wiese-, Rhein und Birsebene ist über lange Zeiträume durch den sich dauernd ändernden Verlauf der Oberflächengewässer Wiese, Rhein sowie der Birs und dadurch bedingt durch eine Abfolge von Aufschotterung (Aggradation) und Abtragung (Degradation) geprägt worden. Die hydraulischen Eigenschaften der Schotterkörper sind stark heterogen. Für alle drei Untersuchungsgebiete wurden die hydraulischen Durchlässigkeiten mittels automatischer Parameterabschätzung (PEST: Model-Independent Parameter Estimation and Uncertainty Analysis und der Pilot Points Methode (Doherty, 1994; 2010; Doherty et al., 2011)) invers kalibriert.

Die Stauertopografie der hydrogeologischen Modelle wurden mit dem geologisches 3D-GoCAD-Modell (Dresmann et al., 2015) der Region Basel (AUG) vorbereitet. Es handelt sich dabei nicht um eine einfache Interpolation von Bohrinformationen, sondern um eine modellierte Topografie unter Berücksichtigung aller zur Verfügung stehender Informationen.

Der Modellperimeter in den Langen Erlen berücksichtigt das Trinkwassergewinnungsgebiet der IWB und des Wasserverbundes Markgräflerland (D). Der Grundwasserleiter befindet sich in den quartären Schotterablagerungen der Wie-seebene (

Abb. 5).

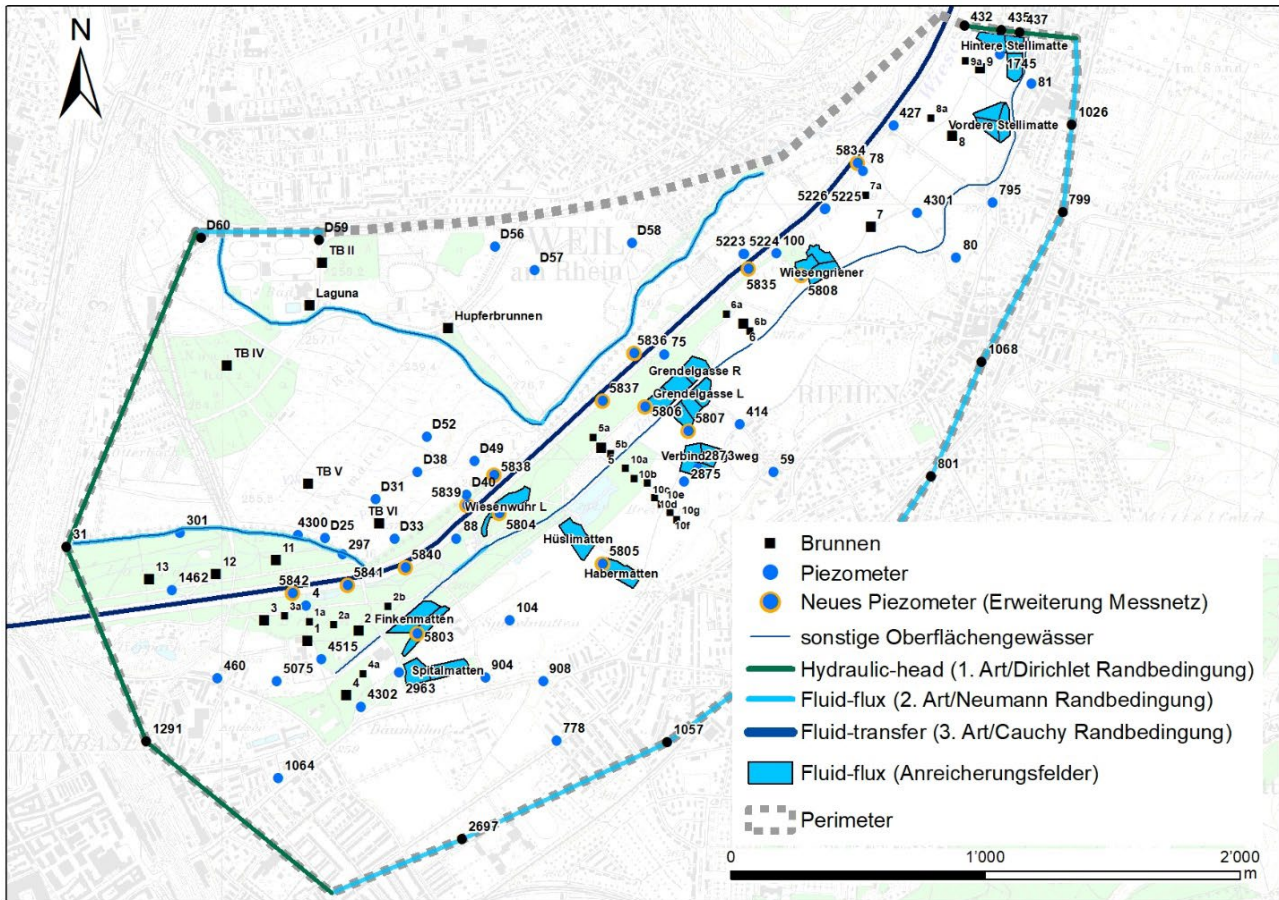


Abb. 5 Modellperimeter «Lange Erlen» mit Oberflächengewässern, Brunnen und Piezometern, sowie Randbedingungen für die Wiese (Fluid-transfer und Temperatur), den Wiesegrundwasserstrom (Hydraulic-head und Temperatur), den Randzustrom aus Riehen und Weil sowie der Grundwasseranreicherung (Fluid-flux und Temperatur) (Landeskarte[©] Bundesamt für Landestopografie).

Der Modellperimeter im Hardwald berücksichtigt das Trinkwassergewinnungsgebiet der Hardwasser AG, Trinkwasserbrunnen der Gemeinden Birsfelden und Muttenz sowie verschiedene industrielle Grundwassernutzer. Der Grundwasserleiter befindet sich in den quartären Schotterablagerungen der Rheiebene und des Birstals (Abb. 6).

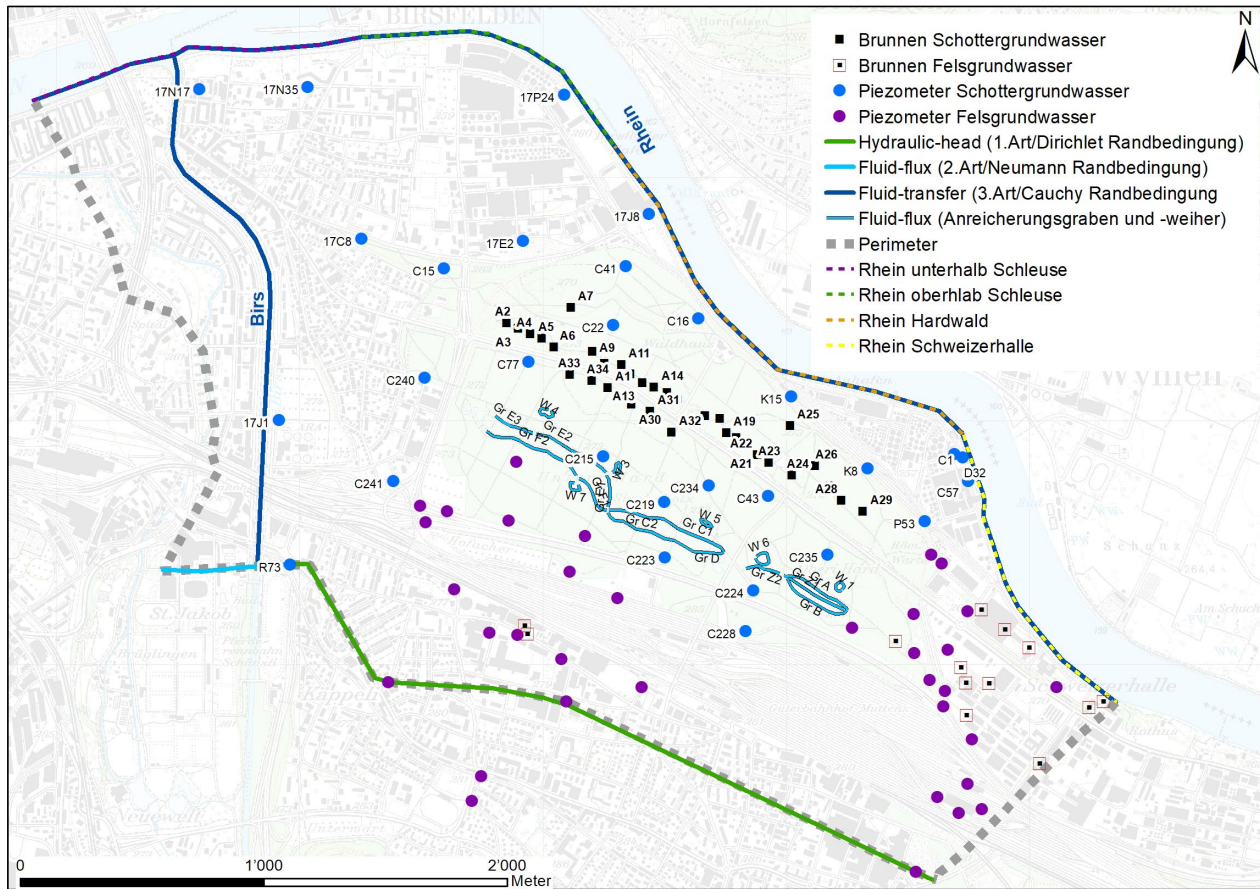


Abb. 6 Modellperimeter «Hardwald» mit Oberflächengewässern, Brunnen und Piezometern, sowie Randbedingungen für den Rhein und die Birs (Fluid-transfer und Temperatur), den regionalen Grundwasserstrom (Hydraulic-head und Temperatur), den Randzustrom aus Muttenz sowie der Grundwasseranreicherung (Fluid-flux und Temperatur; Landeskarte[©] Bundesamt für Landestopografie).

Der Modellperimeter im unteren Birstal berücksichtigt neben der Anreicherungsanlage in Aesch das Trinkwassergewinnungsgebiet der Gemeinden Aesch und Reinach (WWR). Der Grundwasserleiter befindet sich in den quartären Schotterablagerungen des unteren Birstals ([Abb. 7](#))

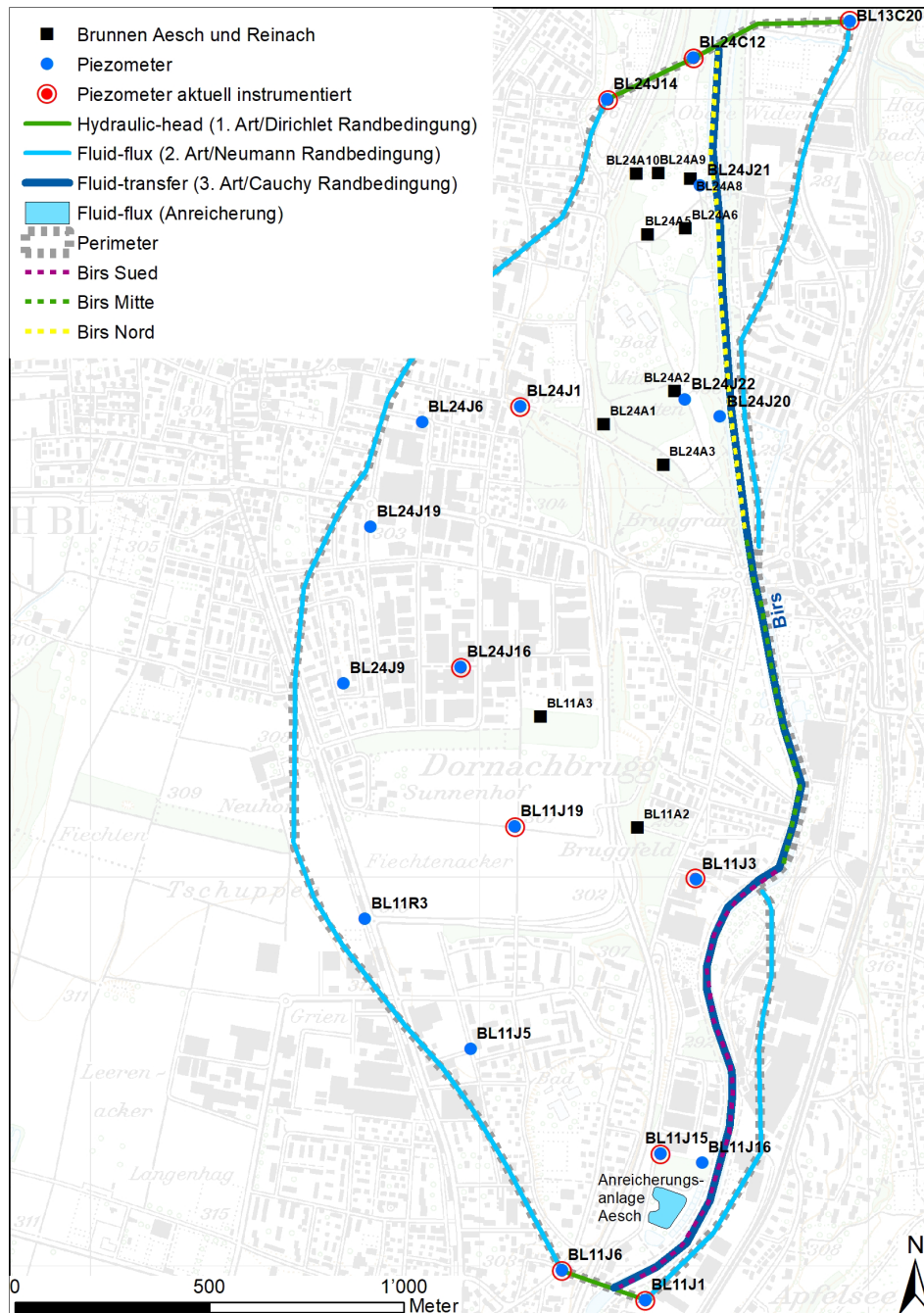
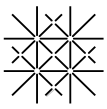


Abb. 7 Modellperimeter «unteres Birstal» mit Oberflächengewässer Birs, Brunnen und Piezometern, sowie Randbedingungen für die Birs (Fluid-transfer und Temperatur), den regionalen Grundwasserstrom (Hydraulic-head und Temperatur), den Randzustrom aus dem westlichen Hangeinzugsgebiet sowie der AAA (Fluid-flux und Temperatur, Landeskarte[©] Bundesamt für Landestopografie).

3.4.2 Datengrundlagen, hydraulische und thermische Randbedingungen

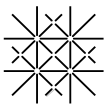
Um die Vergleichbarkeit zwischen den drei untersuchten Modellgebieten zu gewährleisten wurde darauf geachtet, dass die entsprechenden Randbedingungen einheitlich definiert und parametrisiert wurden.



Tab. 3 fasst die wichtigsten natürlichen und anthropogenen Randbedingungen und Komponenten der Grundwasserneubildung von Lockergesteins-Grundwasservorkommen zusammen und zeigt auf, wie diese für die Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodellierung berücksichtigt werden konnten.

Tab. 3 Natürliche und anthropogene Komponenten der Grundwasserneubildung von Lockergesteins-Grundwasservorkommen und Parametrisierung für die Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodellierung.

		Ausgangslage	Hypothese	Untersuchungsansatz
Komponenten Grundwasseranreicherung	Niederschlag	Grundwasserneubildung durch perkolierende Niederschläge	Quantitativ vernachlässigbar im Vergleich zu anderen Komponenten, auch hinsichtlich der Temperatureinprägung	Wasserhaushaltsberechnung; zukünftige Entwicklung von Niederschlag und Temperaturen aus Klimaszenarien Simulationen unter Berücksichtigung von Evapotranspirationsprozessen und Bodenwasserhaushalt (nicht im Rahmen dieser Studie durchgeführt)
	Regionale Zu- und Abflüsse	Bestimmt durch Grundwasserhydraulik und Wechselwirkung mit Systemgrenzen, z.B. Wechselwirkung mit Aquiferen unter- und oberstrom	Anreicherung und Temperaturprägung kontinuierlich und insbesondere während "charakteristischer" Niederschlags- und Hochwasserereignisse (Intensität & Dauer)	Numerische Grundwassermodellierung und Auswertung von regionalen Zu- und Abflussbilanzen
	Zufluss Hangeinzugsgebiet	Lineare Zufluss in Grundwasserleiter; Unterscheidung zwischen unter- und oberirdische Einzugsgebiete (Wechselwirkung mit regionalen Karst- und Klufteingesteinsgrundwassersystemen)	Einfluss auf die Grundwassertemperaturen v.a. in Randbereichen; besonders in Phasen erhöhter Grundwasseranreicherung in den Hangeinzugsgebieten	Wasserbilanzberechnung; zukünftige Entwicklung von Niederschlag und Temperaturen aus Klimaszenarien
	Fluss-Grundwasser-Interaktion	Bestimmt durch Fluss-Grundwasserhydraulik und Leitfähigkeit des Flussbettes; linearer Zu- und Abfluss von Oberflächenwasser in den Grundwasserleiter (Infiltration) bzw. von Grundwasser in Flüsse (Exfiltration; "Vorfluter")	Anreicherung und Temperaturprägung hauptsächlich während "charakteristischer" Niederschlagsereignisse und hoher Abflüsse (Intensität & Dauer)	Numerische Grundwassermodellierung und Bewertung von Infiltrations- und Exfiltrationsraten; Simulation von klimabedingten Änderungen des Oberflächenwasserabflusses und der Temperaturen; quantitative Grundwasserneubildung durch infiltrierende Oberflächenwasser und damit verbundene Temperaturprägung; Quantifizierung von Flussabschnittslängen mit unterschiedlichen Interaktionstypen
	Künstliche Grundwasseranreicherung	Grundwasserneubildung durch perkolierende Anreicherungs-wasser	Betriebsabhängige Anreicherung und Temperaturprägung	Berücksichtigung von Betriebsdaten Anreicherung und Temperatur Oberflächengewässer



Grundwasserneubildung durch versickernden Niederschlag

Die perkolative Grundwasserneubildung durch versickerndes Niederschlagswasser ist im Vergleich zu den Mengen an künstlich angereichertem Wasser, den Brunnenentnahmen und der Fließgewässerinfiltration eine unbedeutende Komponente in der Gesamtwasserbilanz der untersuchten Grundwasserkörper und wirkt sich auf die Modellierung nicht sensitiv aus. Der Wert der Grundwasseranreicherung unter der Berücksichtigung von Evapotranspirationsverlusten wurde mittels durchschnittlicher jährlicher Niederschlagssummen berücksichtigt und konstant über die Zeit im Modellgebiet miteinbezogen.

Für die Berechnung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Grundwasserneubildung durch versickerndes Niederschlagswasser wurden die simulierten Daten für den Niederschlag und die Lufttemperaturen für die ausgewählten Klimaprojektionen herangezogen (Tab. 2).

Hauptgrundwasserstrom & Randzufluss

Der regionale Grundwasserzu- und abstrom der verschiedenen Schottergrundwasserleiter wurde über die in Piezometern gemessene Hydraulik als Dirichlet Randbedingungen 1. Art definiert. Randzuflüsse über die Hangeinzugsgebiete (Lange Erlen: Zustrom Weil am Rhein und Dinkelberg; Hardwald: Zustrom Muttenz und unteres Birstal: Zustrom Westen) wurde als Flux Neumann Randbedingung 2. Art definiert (Abschätzung der Grundwasserneubildung in den Hangeinzugsgebieten).

Für die Berücksichtigung der thermischen Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Hauptgrundwasserstrom und die Randzuflüsse wurde der Trend der Temperaturentwicklung für die ausgewählten Klimaprojektionen verwendet (Tab. 2).

Oberflächengewässer

Die Hydraulik und Temperaturen der Oberflächengewässer werden an verschiedenen BAFU-Stationen kontinuierlich gemessen (Tab. 1). Auf Grundlage von P-Q Beziehungen konnten, die aus den hydrologischen Simulationen resultierenden Abflüsse, auf die für die Grundwassermodelle notwendigen Pegelstände umgerechnet werden (Abb. 8).

Die umgerechneten Pegelstände wurden auf ausgewählte Punkte im Projektperimeter entlang der Wiese, des Rheins und der Birs umgerechnet und interpoliert. Die Auswahl dieser Punkte erfolgte anhand des Längsprofils der Fließgewässer. Für jeden Punkt, an welchem ein grösserer vertikaler Versatz der Flusssohle existiert (z.B. Sohlschwellen oder Schliesse entlang der Wiese, Flusskraftwerk Birsfelden), wurde der Pegelstand entsprechend der Höhenlage der Sohle berechnet und für die Bereiche dazwischen interpoliert.

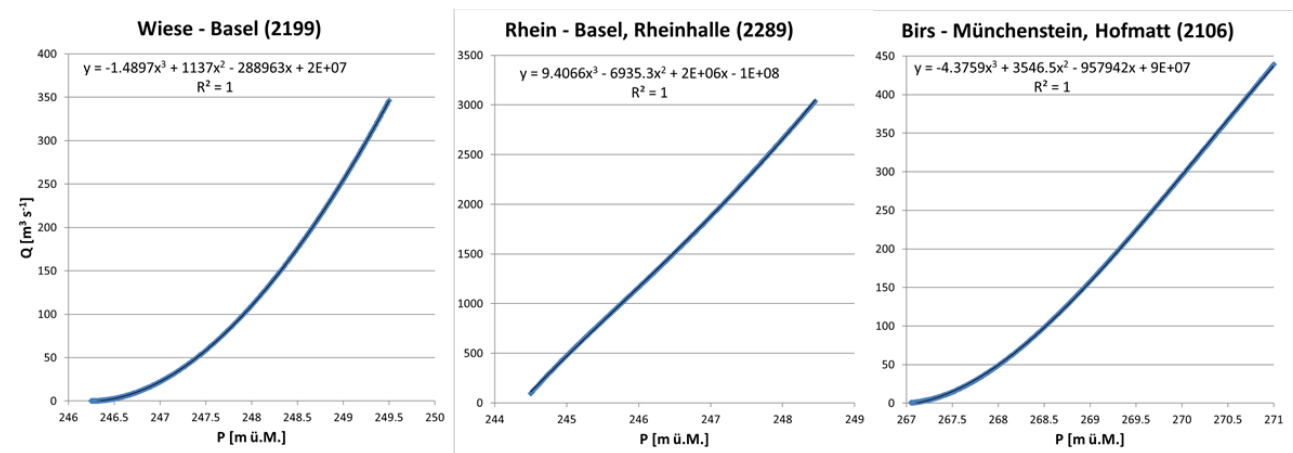


Abb. 8 P-Q Beziehung BAFU-Stationen, einschliesslich Regressionsgleichung (Tab. 1).

Die Infiltration eines Oberflächengewässers wird neben der Hydraulik hauptsächlich durch die Durchlässigkeit der Flusssohle bestimmt (Conductance), welche mit PEST invers kalibriert wurde (siehe oben). Die Durchlässigkeit der Wiese- wurde als zeitlich variabel und mit Hilfe von Kolmations-/Dekolmationsmodellen beschrieben (Affolter et al., 2010). Diese beschreiben die Veränderung der hydraulischen Eigenschaften der Flusssohle: Bei geringem und mittlerem Abfluss verringert sich die Durchlässigkeit der Flusssohle bedingt durch das Absetzen und Eindringen von Feinpartikeln in den Porenraum der Deck- bzw. Filterschicht (Kolmation) und nähert sich einem Minimalwert an. Ab einem bestimmten Abfluss bei Hochwasserereignissen wird die kolmatisierte Flusssohle aufgerissen, die Durchlässigkeit erhöht sich sprunghaft. Nach dem Hochwasser setzt unmittelbar wieder eine Kolmation der Flusssohle ein. Der Basiswert sowie der Maximalwert der Conductance wurden vorgängig mittels inverser Kalibrierung mit PEST für jeden Flussabschnitt ermittelt.

Grundwasserentnahmen und künstliche Grundwasseranreicherung

Grundwasserentnahme- und -anreicherungsdaten wurden von den Wasserversorgungen zur Verfügung gestellt. Die Angaben zur Grundwasseranreicherung sind bereits aus betrieblichen Gründen mit grossen Unsicherheiten behaftet (so liegt der Fehler beispielsweise in den Langen Erlen bei ca. 30 %⁴). Bei der Aufteilung der Gesamtwassermenge auf die einzelnen Anreicherungsfelder in den Lange Erlen sowie in die verschiedenen Gräben und Weiher im Hardwald werden Schieber anhand einer bestimmten Zahl von Umdrehungen geöffnet. Gemessen werden, bzw. wurden, die Durchflussmengen nur sporadisch. Die Wassermenge pro Versickerungssystem werden durch die Leitsysteme der IWB, respektive der Hardwasser AG, reguliert. Durch die Evapotranspiration der bewaldeten Anreicherungsflächen, -gräben und -weiher wird zudem ein Teil der Wassermenge der Infiltrationsmenge entzogen. Diese Differenz trägt zur Unsicherheit der Anreicherungsdaten bei.

⁴ persönlicher Kommunikation IWB

Eine weitere Unsicherheit beim Versickerungssystem in den Langen Erlen geht einher mit der eingestauten Fläche der Anreicherungsfelder. Es ist bekannt, dass bei einigen Feldern nicht die gesamte Fläche während eines Anreicherungszeitraums benetzt wird, sondern oftmals nur Teilflächen. Um diese Unsicherheit zu reduzieren, wurde mit einem GPS-Handgerät die Umrandung der effektiven Anreicherungsfelder eingemessen (

[Abb. 5](#))⁵. Trotz der entsprechend eingemessenen Anreicherungsfelder bleibt eine zusätzliche Unsicherheit bezüglich der Infiltration. Auch wenn die, bei maximalem Wasserstand in den Anreicherungsfeldern benetzte Fläche bekannt ist, infiltriert das Wasser stark heterogen. Es können sogar einzelne «Schluckstellen» vorhanden sein, oder Bereiche welche nur kurzfristig (bei maximalem Wasserstand) benetzt sind und anschliessend nicht mehr zur Infiltration beitragen.

Die Anreicherungsdaten in den Langen Erlen wurden von den IWB in Tageswerten für den simulierten Zeitraum (01.01.2018 bis 01.07.2019) zur Verfügung gestellt. Die Angaben in $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ mussten mit der jeweiligen Fläche des entsprechenden Anreicherungsfeldes (nach den neuen Vermessungen) verrechnet werden. Anschliessend konnten die Werte, welche die Dimension eines Geschwindigkeitswertes (m d^{-1}) besitzen als Randbedingung 2. Art (Neumann Randbedingung) in das Grundwassermodell integriert werden. Im Unterschied zur künstlichen Grundwasseranreicherung werden die Grundwasserentnahmen an allen Brunnen zeitlich hochaufgelöst erfasst und konnten in stündlicher Auflösung für den simulierten Zeitraum in das Grundwassermodell integriert werden.

Die Gesamtsumme der Wassermenge, welche in das Anreicherungssystem der Hardwasser AG eingeleitet wird, wird als Tagessumme erfasst. Diese konnte mittels eines Verteilschlüssels (prozentualen Infiltrationsraten pro Graben und Weiher) der Infiltrationswerte pro Kanalabschnitt und Weiher für mittlere Betriebsbedingungen definiert werden. Grundlage hierfür waren Auswertungen aus früheren Arbeiten (BGA BL-155⁶; BGA Muttenz 194⁷) in welchem Durchflussmessungen in den Kanälen und Zuflüssen zu den Weihern bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen durchgeführt wurden. Die Grundwasserentnahmen werden bei allen Brunnen erfasst und wurden als Tagesmittelwerte im Grundwassermodell berücksichtigt.

Bei der Versickerungsanlage in Aesch wird aufbereitetes Birswasser über neun Schluckbrunnen in das Grundwasser eingeleitet. Bei vollem Betrieb werden etwa 200 l s^{-1} versickert. Aufgezeichnet werden die stündlichen Anreicherungsmengen, welche als Tagessummen ins Modell einfließen.

Zu Projektbeginn war unklar, wie die Temperaturen des Anreicherungswassers in den Wärmetransportmodellen parametrisiert werden soll. Es existieren dazu auch keinerlei Messungen. Deshalb wurde sowohl in einem Anreicherungs-feld in den Langen Erlen (Anreicherungs-feld Verbindungsweg;

⁵ IWB Praktikum Frau Valeria Cortello

⁶ BGA-BL-155: Huggenberger P, Zechner E und Affolter A (2010) Grundwassermodell Unteres Birstal-Rhein-Muttenz

⁷ BGA-Muttenz-194: Nägelin T, Fuchs M (2008) Grundwasserüberwachung Muttenz, Abflussmessungen der Grundwasseranreicherung im Hardwald, CSD Ingenieure und Geologen AG, Amt für Umweltschutz und Energie Basel-Landschaft

Abb. 5) als auch in einem Versickerungsgraben im Hardwald (Versickerungsgraben E; Abb. 6) die Temperatur des Anreicherungswassers gemessen.

Abb. 9 zeigt, dass die Temperaturmessungen im Anreicherungswassers gut mit den Rheinwassertemperaturen (BAFU-Station Rhein - Weil, Rheinfelden 2091) übereinstimmen. Für die Modellierung wurden deshalb direkt die Wassertemperaturen des Rhein bzw. für die AAA der Birs für die Parametrisierung der Temperaturrandbedingung für das Anreicherungswasser berücksichtigt.

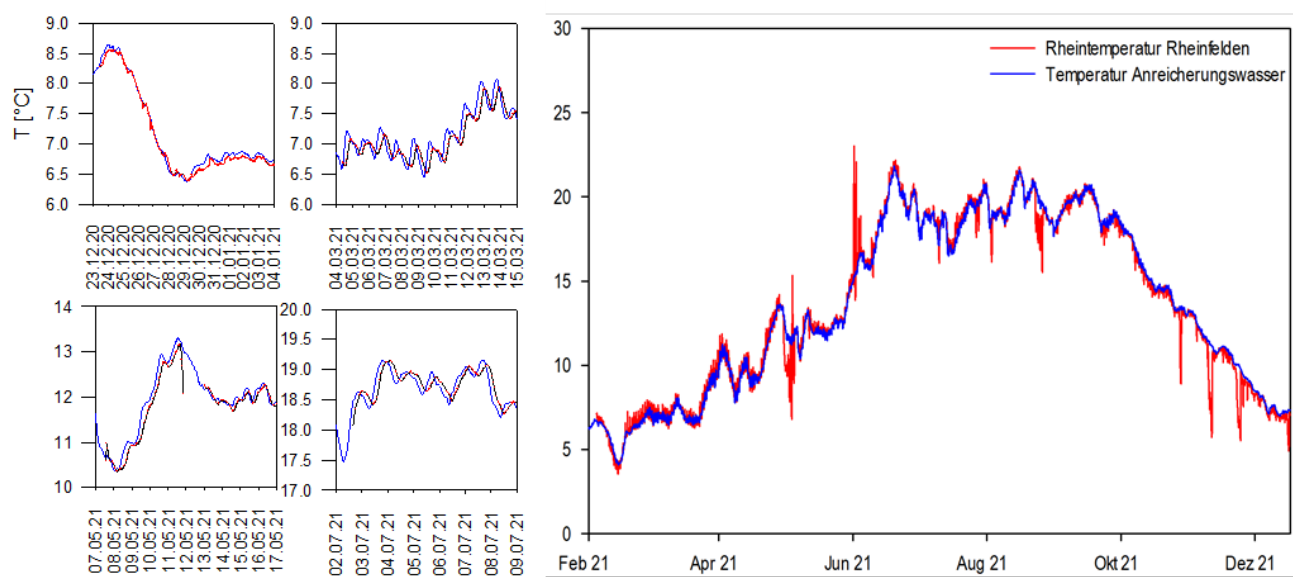


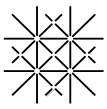
Abb. 9 Temperaturmessungen im Anreicherungswassers in den Langen Erlen (links: Verbindungsweg, episodisch während Wässerung mit leichte Dämpfung der Temperaturtagesamplituden und leichter Phasenverschiebung) und im Hardwald (rechts: +/- kontinuierlich Versickerungsgraben) stimmen gut mit den Rheinwassertemperaturen (BAFU-Station Rhein - Weil, Rheinfelden 2091) überein (Tab. 1).

Aufgrund des geringen Abstandes der Anreicherungsanlage in Aesch zur Birs, wurde angenommen, dass auch hier die Temperatur des Anreicherungswassers derjenigen der Birs entspricht (BAFU-Station Birs - Münchenstein, Hofmatt 2106).

3.4.3 Kalibrierung und Validierung

Die bereits existierenden Grundwasserströmungsmodelle wurden für dieses Projekt für den Wärmetransport kalibriert. Hierzu wurden neben den thermischen Aquifereigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und -kapazität) auch die thermischen Transferraten über die Fließgewässersohlen kalibriert.

Für die Validierung wurde ein besonderes Augenmerk auf den Energieumsatz durch die Entnahmebrunnen gelegt. Hierzu wurde die ausgetauschte Wärmeleistung Q_i berechnet (Gleichung 2):



$$Q_i [J d^{-1}] = C_f [J kg^{-1} K^{-1}] * q_i [m^3 d^{-1}] * \rho_W * \Delta T [K] \quad (2)$$

mit C_f der spezifischen Wärmekapazität von Wasser, q_i den Entnahmemengen der Trinkwasserversorgung ρ_W der Dichte von Wasser bei 10 °C (999.7 kg m⁻³) und ΔT der Temperaturdifferenz von in den Trinkwasserbrunnen gemessener Wassertemperatur zu einem Referenzwert von 10 °C (entsprechend Referenzwert FeFlow und einer potentiell natürlichen Grundwassertemperatur). Die Dichte und die spezifische Wärmekapazität werden für unsere Betrachtung als konstant angenommen.

Diese von der Modellierung unabhängige Berechnung wird anschliessend dem simulierten Energieaustrag gegenübergestellt und beurteilt.

3.4.4 Auswahl Betriebsszenarien

Im Folgenden werden die verschiedenen Betriebsszenarien, welche für die drei Anreicherungssysteme berücksichtigt wurden, vorgestellt. Die ausgewählten Betriebsszenarien wurden sowohl für den Ist-Zustand als auch für die Klimaprojektion mit den maximalen zu erwartenden Veränderungen (Tab. 2) simuliert (Szenario 6 - RCP85_SMHI-RCA_ECE-ARTH_EUR44).

Für die Lange Erlen (Tab. 4) und den Hardwald (Tab. 5) berücksichtigen die ausgewählten Betriebsszenarien der Wasserversorgungen auch Überlegungen zum GWP₂₀₄₀⁸ und Prognosen der Bedarfsentwicklung im Versorgungsgebiet von IWB^{9,10} und Hardwasser AG¹¹. Bei der Auswahl der Betriebsszenarien für die AAA wurde evaluiert, wie gross die Anreicherungsmenge mindestens sein muss, so dass die Wasserversorgungen der Gemeinden Aesch und Reinach auch bei trockenen Bedingungen gewährleistet ist (Tab. 6).

Grundlage waren Simulationen der AUG zur Abschätzung, welche minimale Anreicherungsmenge nötig ist, um während trockenen Sommermonaten ohne Einschränkungen konzessionierte Wassermengen beim Pumpwerk Kägen sowie bei den Pumpwerken von Reinach entnehmen zu können (BGA-Aesch-27)¹². Für die Berechnungen wurden Randbedingungen angenommen, wie sie in einem trockenen Sommer vorkommen könnten. Um Aussagen der Modellberechnungen und der definierten Randbedingungen für trockene Sommermonate zu bestätigen, wurde entschieden, das Modell anhand der Messdaten des trockenen Sommers 2018 zu validieren.

⁸ Generelle Wasserversorgungsplanung (GWP) IWB (Stand März 2019)

⁹ BGA-BS-155: Scheidler S, Epting J, Huggenberger P (2021) Technischer Bericht, Wiese Vital; Grundwassermodellierung und Radonbeprobung

¹⁰ BGA-BS-157: Scheidler S, Epting J (2021) Szenarienberechnungen WieseVital

¹¹ Zusammenstellung Szenarienberechnungen Hardwald: Huggenberger P, Affolter A (2016) im Rahmen Regionale Wasserversorgung Basel-Landschaft 21; TP3Trinkwassermanagement Hardwald

¹² BGA-Aesch-27: Huggenberger P, Affolter A (2019) Validierung Szenarienberechnung VA Aesch mit den Daten des Sommers 2018

Tab. 4 Auswahl Betriebsszenarien «Lange Erlen».

Szenarien	Anreicherung [m ³ d ⁻¹]	Entnahmen [m ³ d ⁻¹]
A) mittlere Betriebsbedingungen	44'023	49'680
B) erhöhter Betrieb 1	60'000	55'000
C) erhöhter Betrieb 2	80'000	83'000

Tab. 5 Auswahl Betriebsszenarien «Hardwald».

Szenarien	Anreicherung [m ³ d ⁻¹]	Entnahmen [m ³ d ⁻¹]
A) mittlere Betriebsbedingungen*	85'000 - 100'000	40'000
B) tiefe Pumpraten*	85'000	30'000
C) erhöhter Betrieb**	130'000	70'000

*A&B decken 94 % der Betriebszustände ab, **C deckt 3 % der Betriebszustände ab (Dauer maximal ca. 5d), die übrigen 3 % der Betriebszustände sind undefiniert (persönliche Kommunikation T. Gabriel, Hardwasser AG)

Tab. 6 Auswahl Betriebsszenarien «unteres Birstal».

Szenarien	Anreicherung [m ³ d ⁻¹]	Entnahmen [m ³ d ⁻¹]
A) Mittlere Betriebsbedingungen	12'960	
B) erhöhter Betrieb 1	15'120	27'648
C) erhöhter Betrieb 2	17'280	
D) erhöhter Betrieb 3	21'600	

3.5 Konzepte IWRM AP₂

Die erarbeiteten Konzepte für MAR und MSWR umfassen die Evaluation von energetischen Potenzialen der thermischen Nutzung von Oberflächenwasser zur künstlichen Grundwasseranreicherung (Abb. 10), einschliesslich der Regeneration erwärmter Grund- und Oberflächenwasserressourcen.

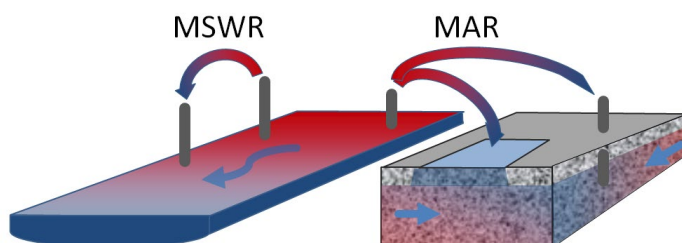
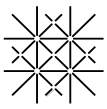


Abb. 10 Beispiele von thermischer Nutzung des Wärmepotenzials von «erwärmten» Oberflächenwasser (Sommermonate) mit anschliessender Infiltration in erwärmte Aquifere (MAR) oder Oberflächengewässer (MSWR).

3.5.1 Thermische Nutzung Anreicherung- und Entnahmewasser

Das thermische Potential des Grundwassers ist v.a. abhängig von den Grundwasserfließgeschwindigkeiten, der Grundwassermächtigkeit, den Wärmeeigenschaften des Untergrundes und der möglichen Nutzung von Temperaturunterschieden.



Zur Berechnung des theoretischen thermischen Potentials im Anreicherungs- und Entnahmewasser der Trinkwasserbrunnen in den Untersuchungsgebieten wurde auf Grundlage von Gleichung 2 und unter der Annahme, dass sowohl das Anreicherungs- als auch das entnommene Trinkwasser immer ≤ 10 °C (dies entspräche einer potentiell natürlichen Grundwassertemperatur) betragen soll, ein potenzieller Wärmeentzug aus dem Anreicherungs- und Entnahmewasser berechnet. Zudem wurde beurteilt wie stark sich die Temperaturen des entnommenen Wassers bei den Trinkwasserbrunnen durch die Infiltration des «kälteren» Anreicherungs- und Entnahmewassers reduzieren.

3.5.2 Regeneration «erwärmter» Oberflächengewässer

Für die Evaluation von Konzepten zur Regeneration «erwärmter» Oberflächengewässer wurden zwei Ansätze verfolgt: (A) umfasst die direkte thermische Nutzung des Oberflächenwassers der Fließgewässer Rhein, Wiese und Birs und (B) umfasst Untersuchungen inwiefern die Exfiltration von vergleichsweise «kühlen» Grundwasser für ausgewählte Abschnitte der Fließgewässer dazu beitragen können die Temperaturen von Fließgewässern «abzukühlen».

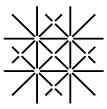
A – Direkte thermische Nutzung Oberflächenwassers

Die thermische Nutzung von Fließgewässern unterliegt gesetzlichen Rahmenbedingungen. Durch Wärmeeinleitung oder Wärmeentzug darf die Temperatur nicht mehr als 3 °C gegenüber dem natürlichen Zustand verändert werden. Zudem darf gemäss der Gewässerschutzverordnung (GSchV, 1998) kein Kühlwasser eingeleitet oder entnommen werden, wenn die Wassertemperatur 25 °C überschreitet.

Im Rahmen der Auswertungen wurden in einem ersten Schritt für die verschiedenen untersuchten Fließgewässer und Klimaszenarien die prognostizierte Entwicklung der Anzahl Tage an welchen die Oberflächenwassertemperaturen über 25 °C betragen ausgewertet.

In einem nächsten Schritt wurde exemplarisch für die Klimaprojektionen mit den geringsten (Szenario 1: RCP26_DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11) und den gravierendsten (Szenario 6: RCP85_SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44) Auswirkungen der Klimaänderungen (Tab. 2) ausgewertet wieviel Energie den verschiedenen Oberflächengewässern entnommen werden müsste um die Oberflächengewässertemperaturen unter 25 °C zu halten.

Um auch abschätzen zu können wieviel Wasser, zum Beispiel über MSWR, mit einer definierten Temperatur hinzugegeben werden müsste um die Oberflächengewässertemperaturen unter 25 °C abzukühlen, wurde eine Mischungsrechnung (End member mixing analysis EMMA) vorgenommen, welche eine Separation mittels einer Frachtgleichung, welche eine Massenbilanz eines n -Komponentensystems beschreibt, erlaubt. Mit n Tracern (in unserem Fall die Temperaturen verschiedener Wasserkomponenten) lassen sich $n+1$ Wasserkomponenten separieren. Voraussetzung ist, dass alle Tracer (in unserem Fall die Temperaturen) der Wasserkomponenten unterschiedlich sind. Es gelten die Gleichungen:



$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (3)$$

und

$$Q \cdot c = Q_1 \cdot c_1 + Q_2 \cdot c_2 \quad (4)$$

mit Q dem Gesamtabfluss (in unserem Fall der Abfluss des jeweiligen Fließgewässers, einschliesslich des Mischwassers oder in unserem Fall das exfiltrierende Grundwasser), c der Konzentration des Tracers im Gesamtabfluss (in unserem Fall die gewünschte Endtemperatur von 25 °C nach der Mischung der Wasserkomponenten), $Q_{1,2}$ den Abflüssen aus den Speicherelementen 1 und 2 (in unserem Fall dem Fließgewässerabfluss und die Menge Mischwasser) und $c_{1,2}$ den Konzentrationen der Tracer in den Speicherelementen 1 und 2 (in unserem Fall die Temperatur des Flusswassers > 25 °C und die Temperatur des Mischwassers, welche mit 10 °C vorgegeben wird). Aufgelöst nach Q_2 , der Mischwassermenge mit einer definierten Temperatur von 10 °C, welche hinzugegeben werden müsste, um die Oberflächengewässertemperaturen unter 25 °C zu halten, ergibt:

$$Q_2 = Q \cdot \frac{c - c_1}{c_2 - c_1} \quad (5)$$

B – Gezielte Steuerung der Grundwasserexfiltration - Unteres Birstal

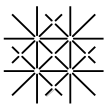
Für diese Untersuchungen wurde ein Fließgewässerabschnitt im unteren Birstal untersucht, in dem die Exfiltration des Grundwassers der dominierende Interaktionsprozess ist. Anschliessend wurden Standorte identifiziert, an denen die Grundwasseranreicherung optimal platziert werden konnte. Ziel war es zu zeigen, dass bei einer Anreicherung von vergleichsweise «kaltem» Wasser in den Wintermonaten, dieses in den Sommermonaten in den ausgewählten Flussabschnitten exfiltriert. Besonderes Augenmerk wurde auf die Retardation der Anreicherung und der Exfiltration in den Fluss gelegt.

Vergleichbare Evaluationen waren nicht möglich im Untersuchungsgebiet Langen Erlen, da die Wiese-Infiltration der dominierende Fluss-Grundwasser Interaktionsprozess ist. Zur Beurteilung der durch die Klimaänderungen einhergehenden Entwicklung Fluss-Grundwasser Interaktion werden aber exemplarisch für einen Abschnitt des Fließgewässers Wiese (

[Abb. 5](#)), in welchen die Grundwasserexfiltration der dominierende Fluss-Grundwasser Interaktionsprozess ist, die Veränderung des Wasser- und Energieaustausches ausgewertet. Aufgrund des hohen Rheinabflusses wurden auch für das Untersuchungsgebiet im Hardwald keine entsprechenden Evaluationen vorgenommen.

Anwendungsbeispiele im Raum Basel

Im Sommer trocknen verschiedene kleine und mittlere Fließgewässer im Kanton Basel-Landschaft aus. Als Folge des Klimawandels ist zu erwarten, dass Trockenperioden länger und häufiger auftreten und vermehrt Starkniederschlagsereignisse stattfinden werden. Eine Möglichkeit, um einerseits das Grundwasserdargebot in Trockenperioden



zu erhöhen und dem Trockenfallen der betroffenen Fliessgewässer entgegenzuwirken ist die künstliche Grundwasseranreicherung der betroffenen Talgrundwasserleiter (Managed Aquifer Recharge MAR). Dabei könnte der Grundwasserspiegel durch die künstliche Infiltration von Oberflächenwasser so angehoben werden, dass dieser hydraulisch höher liegt als das Fliessgewässer, und damit Grundwasser in das Oberflächengewässer exfiltrieren kann (Managed Surface Water Recharge MSWR). Die künstliche Grundwasseranreicherung soll dabei bei Mittel- und Hochwasserabfluss (in den Wintermonaten und den Übergangsjahreszeiten) stattfinden, während sommerlicher Niedrigwasserperioden würde vergleichsweise «kühles» Grundwasser in die Fliessgewässer exfiltrieren.

Am Beispiel des Eibachs im Kanton Basel-Landschaft wird aufgezeigt wie auf Grundlage einer hydrogeologischen Analyse des Grundwasserkörpers die Erarbeitung von Konzepten für die Bewirtschaftung des Grundwasserleiters vor dem Hintergrund zunehmender Trockenperioden ermöglicht wird (BGA-BL-185¹³).

Abschliessend wird mit einer ähnlichen Fragestellung dargestellt. Im Rahmen der Fragestellungen zum Klimawandel und dem Fischschutz am Rhein sollten die vergleichsweise kühleren Grundwasseraustritte an der Rheinsohle, welche potenziell dem Schutz von Fischen während Hitzeereignissen dienen können, lokalisiert werden. Im Kanton Basel-Stadt sind allenfalls Grundwasseraufstösse an der Rheinsohle als Rückzugsgebiete von Bedeutung. Für den Kanton Basel-Stadt konnten hierfür die hydrogeologischen Grundlagen erarbeitet werden, welches es erlauben Grundwasseraufstösse des Rheins zu lokalisieren (BGA-BS-162¹⁴). Auf dieser Grundlage werden gegenwärtig Massnahmen für potenzielle Rückzugsgebiete zum Schutz von Fischen während Hitzeperioden untersucht.

¹³ BGA-BL-185 Epting J (2021) Konzept MAR/MSWR Eibach; Hydrogeologische Analyse von Grundwasserkörpern als Grundlage für die Ausarbeitung von MAR- und MSWR-Konzepten (Auftrag: AUE BL)

¹⁴ BGA-BS-162 Epting J, Scheidler S (2021) "Grundwasseraufstösse Rhein": Erarbeitung hydrogeologischer Grundlagen (Auftrag: AUE & TBA BS)

4 Resultate

4.1 Hydrologische Modellierung AP1-A

Aus der Klimamodellierung (Station BAS) ist ersichtlich, dass der Trend der Lufttemperatur eine saisonale Komponente aufweist, mit einer stärkeren Erwärmung in den Sommermonaten im Vergleich zum Rest des Jahres (Abb. 11). Der Abfluss in den Oberflächengewässern folgt einem ähnlichen Muster mit erhöhten Abflüssen in den Wintermonaten und reduzierten Abflüssen in den Sommermonaten (Abb. 11). Dieses Phänomen ist für den Rhein (Stationen 2289 und 2091) am stärksten ausgeprägt, da die Gletscher schmelzen und die Tage mit Schneedecke abnehmen. Die jahreszeitliche Abhängigkeit des Lufttemperaturanstiegs und des veränderten Abflusses resultiert in einer stärkeren Erwärmung in den Sommermonaten und zu einer geringeren Erwärmung in den Wintermonaten (Abb. 11).

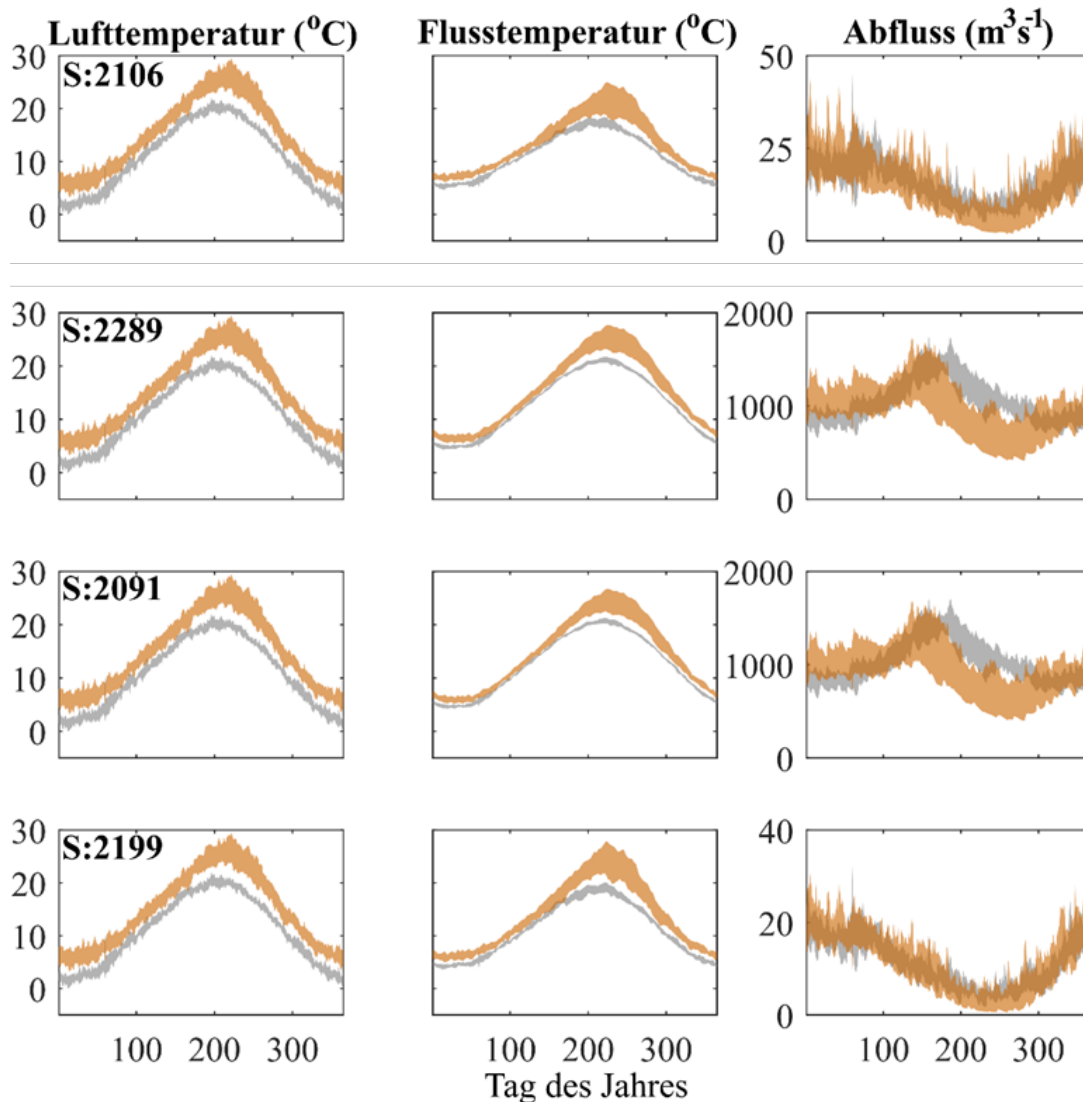


Abb. 11 Modelliertes Maximum und Minimum (aus GCM-RCM-Modellkombinationen) des klimatologischen Jahres (Tagesmittel über 30 Jahre) für den Referenzzeitraum (grau, 1981 bis 2010) und das Szenario RCP8.5 (orange, 2070 bis 2099).

Im Vergleich zur Atmosphäre ist die Wassertemperatur der Flüsse an allen Stationen um bis zu einem Faktor zwei erhöht (Abb. 12). Der Grad der Erwärmung, die aus den Simulationen resultieren sind abhängig von den jeweiligen Klimaszenarien. Für das Klimaszenario RCP8.5 lässt sich erwartungsgemäss die höchste Erwärmung beobachten (Lufttemperatur 0.4 °C und Flusstemperaturen zwischen 0.2 und 0.25 °C). Wie stark sich die Luft- und Wassertemperaturen unterscheiden, hängt von der Fliessgewässergrosse ab, wobei der Rhein (2289, 2091) die grösste Abhängigkeit zwischen dem Rückgang des Abflusses und dem Anstieg der Wassertemperaturen zeigt (Abb. 12).

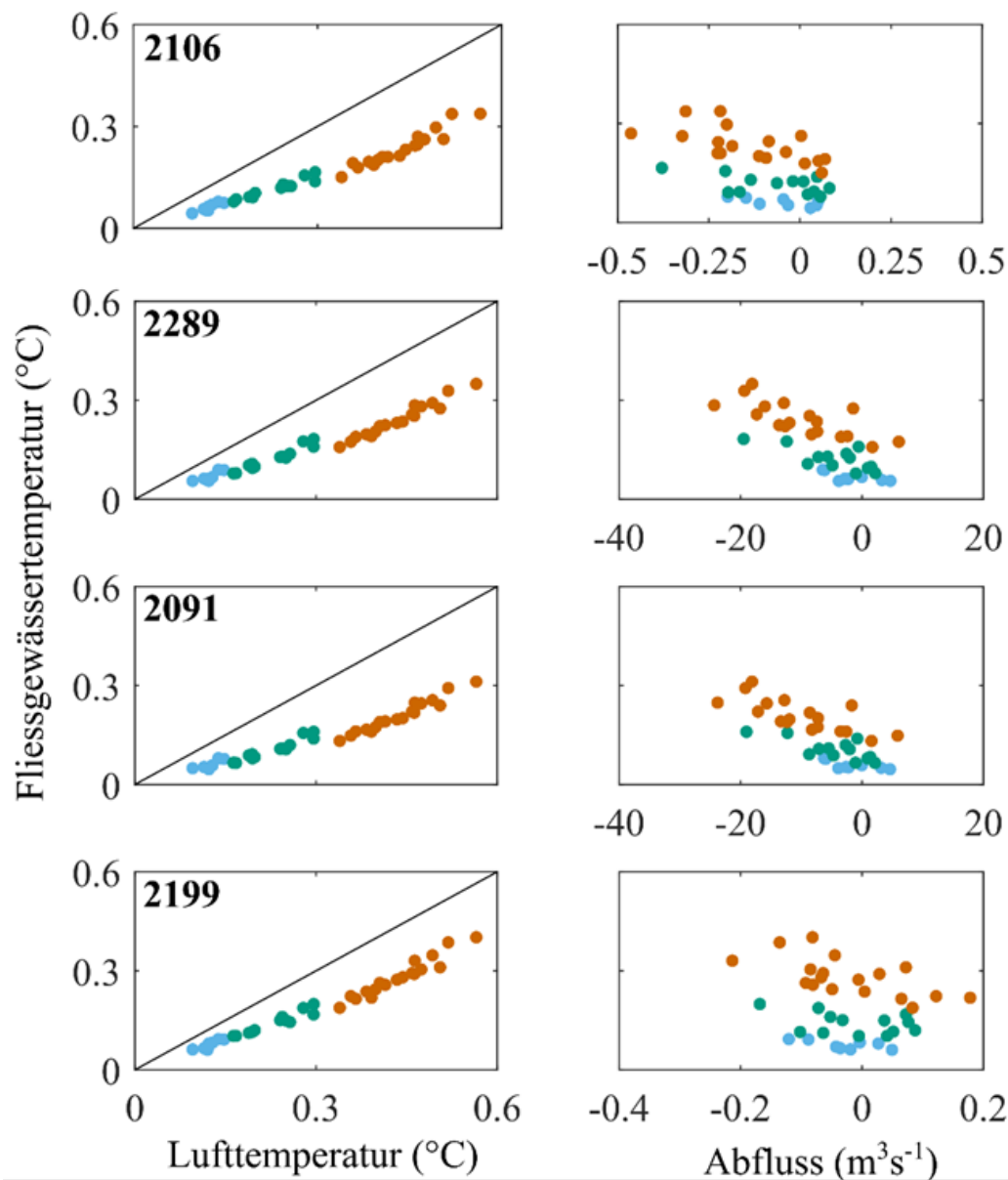
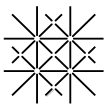


Abb. 12 Modellerte (aus GCM-RCM-Modellkombinationen und *air2stream*) Klimatrends für die Szenarien RCP2.6 (blau), RCP4.5 (grün) und RCP8.5 (orange). Links: Lufttemperatur (x-Achse) gegen Flusswassertemperatur (y-Achse). Rechts: Abfluss (x-Achse) gegen Flusswassertemperatur (y-Achse). Die Trends werden von 1981 bis 2099 berechnet und als Änderung pro Dekade dargestellt.



4.2 Hydrogeologische Modellierung AP1-B

4.2.1 Lange Erlen

Kalibrierung & Validierung

Insgesamt liefert die Kalibrierung meist sehr gute Übereinstimmungen zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen (nicht gezeigt¹⁵) und -temperaturen in den Trinkwasserbrunnen (Abb. B1) im Anhang) und in Piezometern im Grundwasserabstrom der Anreicherungsfelder (Abb. B2 im Anhang).

Für einzelne Brunnen kann der gemessene Temperaturverlauf mit dem Wärmetransportmodell gut nachvollzogen werden (z.B. Brunnen 1, 5 und 10). Es existieren aber auch Brunnen, für welche die Phasenverschiebung des simulierten Temperaturverlaufs von den gemessenen Daten abweichen. Zudem lassen sich Unterschiede in den Kalibrierresultaten für die Haupt- und Nebenbrunnen erkennen.

Auch in den Piezometern im Grundwasserabstrom der Anreicherungsfelder kann der gemessene Temperaturverlauf mit der Simulation sehr gut nachvollzogen werden (z.B. 1745, 5804, 5805, 5806, 5807 und 5808). Dies zeigt, dass der thermische Einfluss der künstlichen Grundwasseranreicherung mit dem Wärmetransportmodell gut erfasst wird. Bei anderen Piezometern existieren vergleichsweise grosse Abweichungen, welche meist auf unzureichende Datengrundlagen für die Definition der Randbedingungen zurückzuführen sind (z.B. 2963 und 5803).

Die von der Modellierung unabhängige Berechnung des Energieaustrags durch die Grundwasserentnahmen zeigt, dass die saisonale Variabilität des Energieaustrags mit dem simulierten Energieaustrag übereinstimmt (Abb. 14). Die Grösse des Energieaustrags ist für die Modellierung höher, da weitere Grundwasserentnahmen auf deutscher Seite aufgrund fehlender Temperaturdaten des Entnahmewasser für die Berechnungen nicht berücksichtigt werden konnten. So wird generell die Anwendbarkeit der Wärmetransportmodelle zur Beurteilung thermischer Veränderungen im Zusammenhang mit der Trinkwasserversorgung in den Langen Erlen bestätigt.

Hydraulisches und thermisches Grundwasserregime (Istzustand)

Abb. 13 zeigt das hydraulische und thermische Grundwasserregime für die verschiedenen Jahreszeiten in den Langen Erlen. Deutlich ist der Einfluss der künstlichen Grundwasseranreicherungen in den Anreicherungsfeldern zu erkennen, einschliesslich des abkühlenden Effekts auf das Grundwasser in den Winter- und Frühlingsmonaten und des Wärmeintrages in den Grundwasserleiter in den Sommer- und Herbstmonaten. Auch zu erkennen sind die jeweiligen Kälte- und Wärmefahnen im Grundwasserabstrom der Anreicherungsfelder. Diese bewegen sich, dem hydraulischen Gradienten folgend, hauptsächlich zu den Trinkwasserbrunnen in den Langen Erlen.

¹⁵ BGA-BS-155: Scheidler S, Epting J, Huggenberger P (2021) Technischer Bericht, Wiese Vital; Grundwassermodellierung und Radonbeprobung

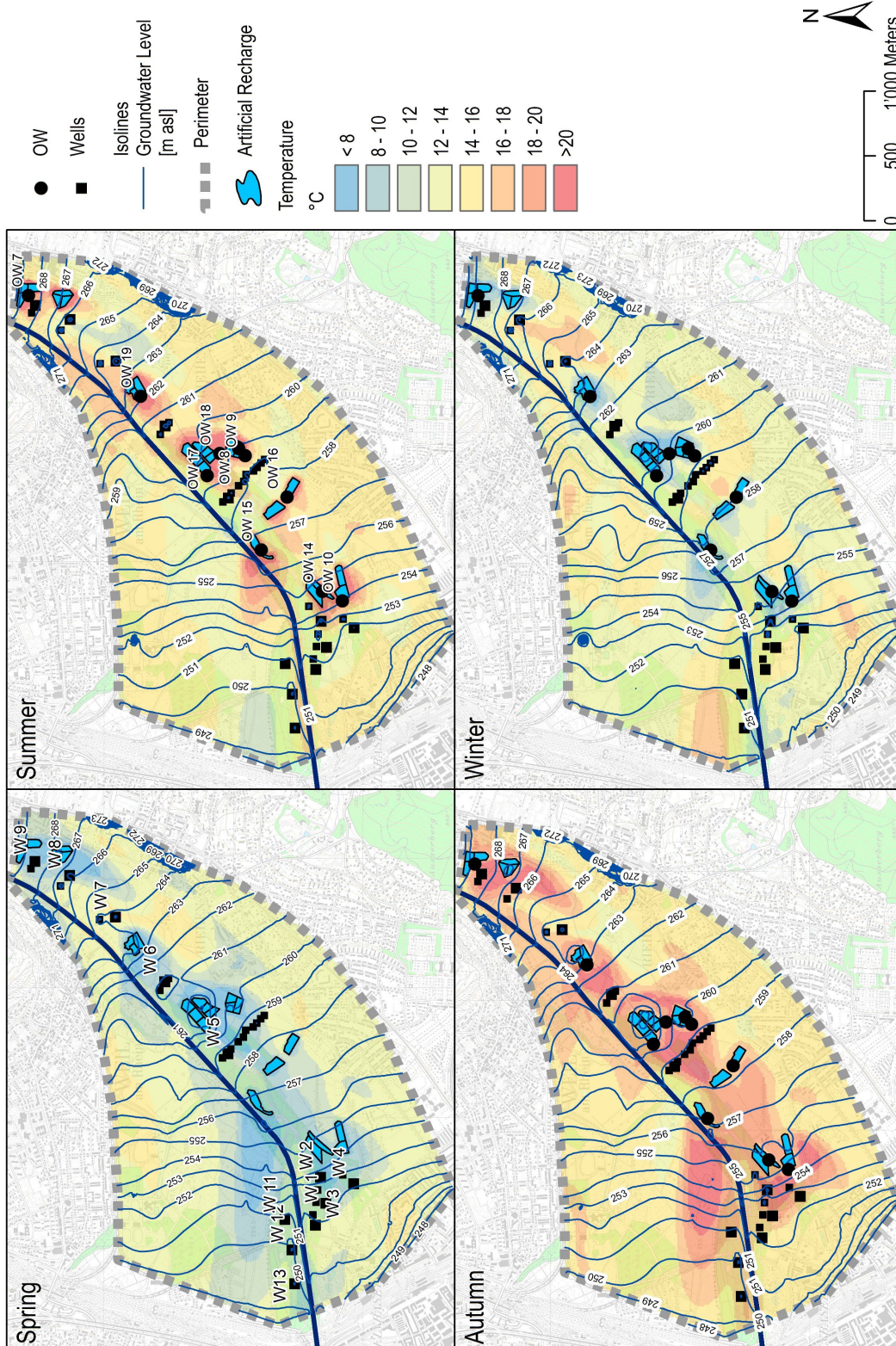
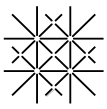


Abb. 13 Hydraulisches und thermisches Grundwasserregime für die verschiedenen Jahreszeiten in den Langen Erlen, im Frühling (1ster April), im Sommer (14ter Juli), Herbst (4ter Oktober) und Winter (3ter Januar) (Landeskarte® Bundesamt für Landestopografie).



Die Haupteinflussgrößen in der Grundwasserbilanz (Abb. C1 im Anhang) sind die Infiltration von Wiesewasser sowie die künstliche Grundwasseranreicherung und die Grundwasserentnahme der Trinkwasserbrunnen. Über den südwestlichen Modellrand verlassen grosse Grundwassermengen den Modellperimeter. Während die Grundwasserentnahme durch die Brunnen über den gesamten Datenzeitraum relativ ausgeglichen und konstant ist, variiert die künstliche Grundwasseranreicherung stark und abrupt (bei zeitweiser Ausserbetriebnahme). Im Vergleich zu Niedrigwassersituationen infiltriert bei höheren Abflüssen Oberflächenwasser aus der Wiese sehr viel stärker in das Grundwasser (Faktor 2).

Abb. 14 und Abb. 15 zeigen die Wärmebilanzen und die Wärmeein- sowie -austräge über die wichtigsten Randbedingungen in den Langen Erlen (Abb. 5). Der Wärmeaustausch über die ungesättigte Zone liegt zwischen +/- $1 \text{ E}+13 \text{ J d}^{-1}$, ist aber über das Jahr mehr oder weniger ausgeglichen. Im Vergleich zu den Untersuchungsgebieten im Hardwald und im unteren Birstal ist der Flurabstand vergleichsweise gering und liegt bei wenigen Metern, weshalb ein saisonaler atmosphärischer Einfluss auf die Grundwassertemperaturen zu erwarten ist.

Der Wärmeeintrag in den Grundwasserleiter über die Wieseinfiltration mit zeitweise über $1 \text{ E}+13 \text{ J d}^{-1}$ im Sommer und Spätsommer ist vergleichsweise hoch und zeigt eine ausgeprägte saisonale Variabilität. Unterschiede sind auch auf die starke Instationarität des Wieseabflusses und den Prozessen der Fluss-Grundwasser Interaktion zurückzuführen. Ein Wärmeaustrag aus dem Grundwasser (Exfiltration) ist vergleichsweise gering und kann v.a. in der ersten Jahreshälfte mit einem Maximum in den Frühlingsmonaten von fast $3 \text{ E}+12 \text{ J d}^{-1}$ beobachtet werden. Der Wärmeaustrag kann dadurch erklärt werden, dass in der ersten Jahreshälfte die Grundwassertemperaturen zeitweise höher sind als jene des Wiesewassers, und somit ein thermischer Gradient vom Grund- zum Oberflächenwasser besteht.

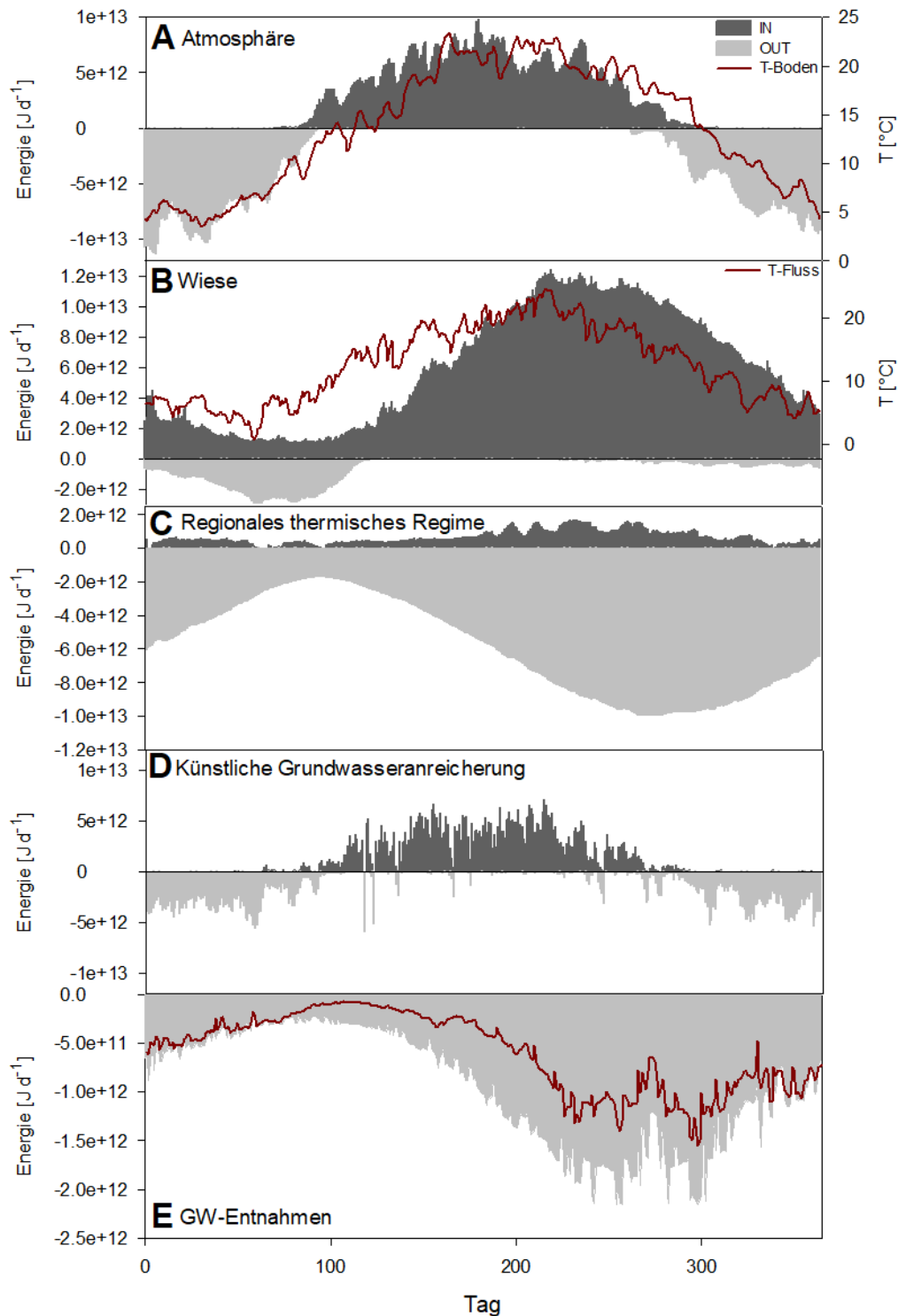


Abb. 14 Wärmebilanzen dargestellt als Wärmeein- und -austrag über die verschiedenen Randbedingungen in den Längen Erlen für 2018 (Abb. 5). A: Wärmeaustausch über die Geländeoberfläche dargestellt zusammen mit der Bodentemperatur in 20 cm Tiefe. B: Wärmeaustausch als Resultat der Interaktion mit dem Oberflächengewässer Wiese. C: Wärmeeintrag über den Wiesetalgrundwasserstrom im Nordosten und unterstromiger Wärmeaustrag gegen Basel. D: Wärmeaustausch durch die künstliche Grundwasseranreicherung. E: Wärmeaustrag über die Grundwasserentnahmen der Trinkwasserversorgung.

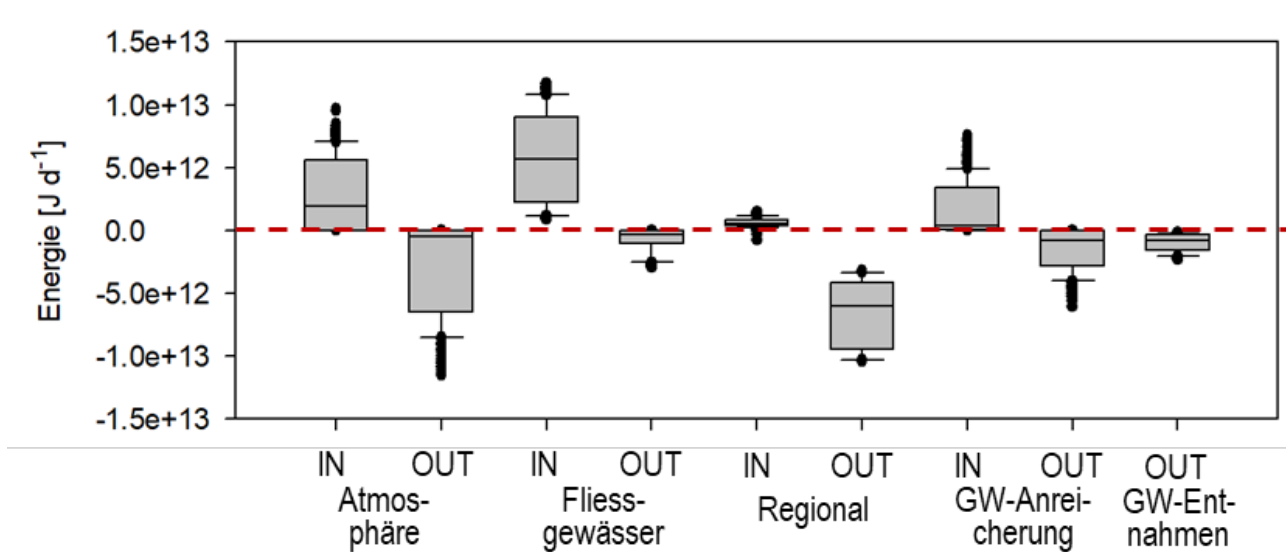


Abb. 15 Boxplots der Wärmebilanzen über die verschiedenen Randbedingungen in den Langen Erlen.

Ein vergleichsweise geringer regionaler Wärmeeintrag in den Grundwasserleiter findet über den Wiesetalgrundwasserstrom im Nordosten statt. Der unterstromige Wärmeaustrag aus dem Grundwasserleiter gegen Basel ist mit über $1 \text{ E}+13 \text{ J d}^{-1}$ vergleichsweise hoch, was darin begründet liegt, dass der Wärmeeintrag in das Grundwasser über die Wie-seinfiltration und teilweise auch über die künstliche Grundwasseranreicherung mit dem regionalen Grundwasserstrom aus dem Untersuchungsgebiet abgeführt wird.

Über die künstliche Grundwasseranreicherung findet eine Abkühlung des Grundwassers in den Herbst- und Wintermonaten, mit einem Maximum von ca. $6 \text{ E}+12 \text{ J d}^{-1}$, und ein Wärmeeintrag in das Grundwasser in den Frühlings- und Sommermonaten, mit einem Maximum von fast $8 \text{ E}+12 \text{ J d}^{-1}$, statt. Der Wärmeaustausch über die künstliche Grundwasseranreicherung ist über das Jahr gesehen vergleichsweise ausgeglichen. Im Winter ist tendenziell eine Verringerung des Wärmeaustrages für 2055 im Vergleich zu 2000 und 2085 zu beobachten.

Durch die Grundwasserentnahmen der Trinkwasserversorgung findet ein Wärmeaustrag aus dem Grundwasser, mit einem Maximum von ca. $2.2 \text{ E}+12 \text{ J d}^{-1}$, v.a. in der zweiten Jahreshälfte statt, welcher durch gemessene erhöhte Temperaturen im gefördertem Wasser bestätigt wird (Abb. B1).

Klimaszenarien

Abb. 16 zeigt den saisonalen Wärmeaustausch für die Referenzjahre 2000, 2055 und 2085 für alle untersuchten Klimaszenarien (Tab. 2) in den Langen Erlen für ausgewählte Randbedingungen.

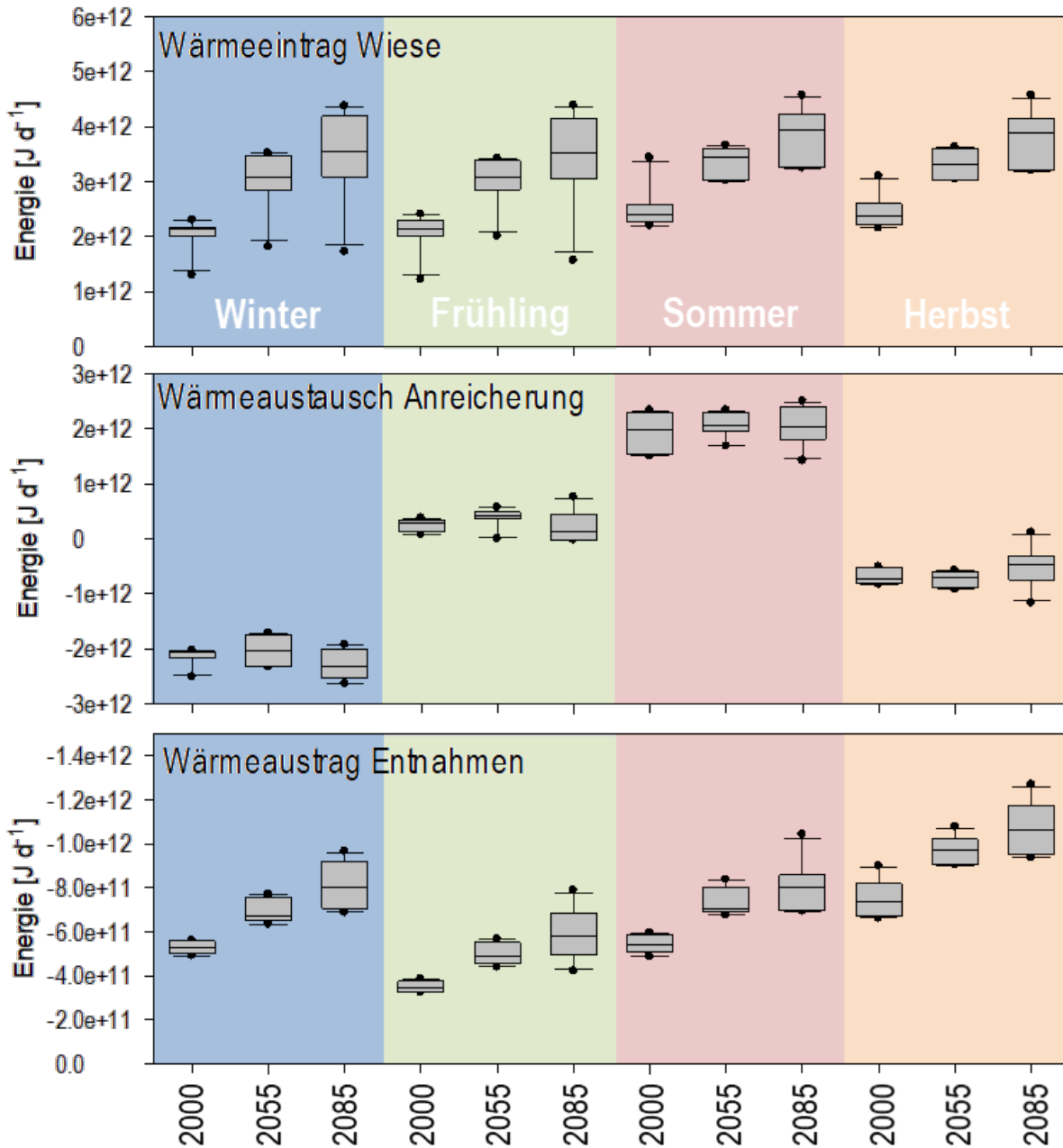
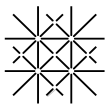


Abb. 16 Zusammenfassende Darstellung des saisonalen Wärmeaustausches ausgewählter Randbedingungen für die Referenzjahre 2000, 2055 und 2085 für alle untersuchten Klimaszenarien in den Langen Erlen. Oben: Wärmeeintrag durch die Infiltration von Wiesewasser; Mitte: Wärmeaustausch über die künstliche Grundwasseranreicherung; Unten: Wärmeartrag durch die Trinkwasserentnahmen.

Da in den Langen Erlen die Fließgewässer-Infiltration der dominierende Interaktionsprozess ist, ergibt sich als Differenz von Wärmeeintrag über die Fließgewässerinfiltration und Wärmeartrag über die Exfiltration von Grundwasser ein Netto-Wärmeeintrag in den Grundwasserkörper. So ist Im Untersuchungsgebiet der Langen Erlen schon heute über



die Wiese in den verschiedenen Jahreszeiten immer ein Wärmeeintrag aus dem Fließgewässer in das Grundwasser zu beobachten. Dieser nimmt, im Vergleich zu 2000 sowie in Abhängigkeit der Jahreszeit und der unterschiedlichen Klimaszenarien, von 2000 bis 2055 um 5 bis 75 % (Mittel 42 %) und von 2000 bis 2085 um 10 bis 119 % (Mittel 62 %) zu.

Der Wärmeaustausch über die künstliche Grundwasseranreicherung zeigt für die verschiedenen Jahreszeiten vergleichsweise geringere thermische Auswirkungen für die untersuchten Klimaszenarien.

Der Wärmeaustag durch die Trinkwasserentnahmen nimmt, im Vergleich zu 2000 sowie in Abhängigkeit der Jahreszeit und der unterschiedlichen Klimaszenarien, von 2000 bis 2055 um 7 bis 72 % (Mittel 36 %) und von 2000 bis 2085 um 16 bis 142 % (Mittel 56 %) zu.

Tab. 7 und Abb. D1 im Anhang zeigen die Temperaturentwicklung in den Trinkwasserbrunnen der Langen Erlen für Klimaprojektionen mit den geringsten (Szenario 1: RCP26_DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11) und den gravierendsten (Szenario 6: RCP85_SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44) Auswirkungen der Klimaänderungen. Für alle Trinkwasserbrunnen ist eine Temperaturerhöhung zu beobachten, welche für das Szenario 1 bei ca. 0.4 bis 0.6 °C bis 2055 und bei ca. 0.7 bis 1.3 °C bis 2085 und für das Szenario 6 bei ca. 1.3 bis 2.2 °C bis 2055 und bei ca. 1.8 bis 3.1 °C bis 2085 betragen.

Tab. 7 Veränderung der Entnahmetemperaturen in den Trinkwasserbrunnen (B) der Langen Erlen in den Jahren 2055 und 2085 im Vergleich zu Jahr 2000.

Klimaprojektion	Veränderung	B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 6	B 7	B 8	B 10	B 11	B 12
RCP26_DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11	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
RCP85_SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44	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

Betriebsszenarien

Abb. 17 zeigt eine zusammenfassende Darstellung der simulierten Betriebsszenarien A (Normalbetrieb), B (erhöhter Betrieb 1) und C (erhöhter Betrieb 2) in den Langen Erlen für den Istzustand (2018) und das Klimaszenario 6 (2085) und den Wärmeaustag durch die Trinkwasserentnahmen sowie den Wärmeaustausch über die künstliche Grundwasseranreicherung.

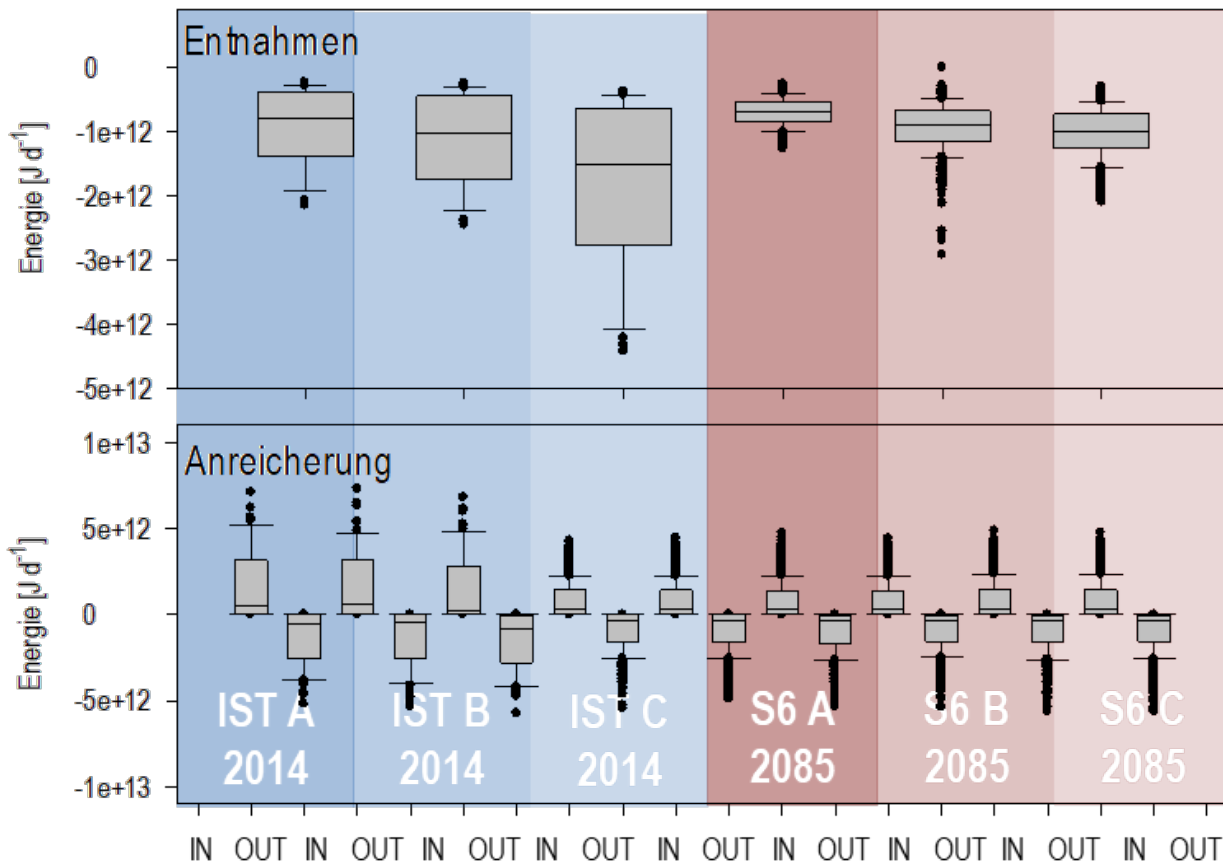
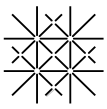


Abb. 17 Zusammenfassende Darstellung der simulierten Betriebsszenarien A (Normalbetrieb), B (erhöhter Betrieb 1) und C (erhöhter Betrieb 2) in den Langen Erlen für den Istzustand (2018) und das Klimaszenario 6 (2085). Oben: Wärmeaustrag (nur Out) durch die Trinkwasserentnahmen; Unten: Wärmeaustausch (In-Out) über die künstliche Grundwasseranreicherung.

Zusammenfassung Istzustand & Entwicklung thermisches Grundwasserregime Langen Erlen

- Im Grundwasserabstrom der Anreicherungsfelder bewegen sich die Kälte- (Winter) und Wärmefahnen (Sommer) dem hydraulischen Gradienten folgend v.a. zu den Trinkwasserbrunnen.
- Da im Untersuchungsgebiet die Wieseinfiltration der dominierende Fluss-Grundwasser Interaktionsprozess ist, überwiegt Netto ein Wärmeeintrag durch die Wieseinfiltration v.a. im Sommer und Spätsommer. Der Wärmeaustausch über die künstliche Grundwasseranreicherung ist, über das Jahr gesehen, vergleichsweise ausgeglichen. Über die Trinkwasserentnahmen findet v.a. im Sommer und Spätsommer ein starker Wärmeaustrag statt, welcher durch gemessene erhöhte Temperaturen im geförderten Wasser bestätigt wird.
- Schon heute findet ein Netto-Wärmeeintrag durch die Infiltration von Wiesewasser statt. Unter Berücksichtigung aller untersuchten Klimaszenarien nimmt, im Vergleich zu 2000, der Netto-Wärmeeintrag durch die Infiltration von Wiesewasser bis 2055 um im Mittel 42 % und bis 2085 um im Mittel 62 % zu, wobei die Bandbreite für die verschiedenen Jahreszeiten und Klimaszenarien gross ist.



- Für die Langen Erlen sind die thermischen Auswirkungen der künstlichen Grundwasseranreicherung für die verschiedenen Jahreszeiten und die untersuchten Klimaszenarien vergleichsweise gering.
- Unter Berücksichtigung aller untersuchten Klimaszenarien nimmt, im Vergleich zu 2000, der Wärmeaustag über die Trinkwasserentnahmen bis 2055 um im Mittel 36 % und bis 2085 um im Mittel 56 % zu, wobei die Bandbreite für die verschiedenen Jahreszeiten und Klimaszenarien gross ist. Entsprechend steigen die simulierten Temperaturen des entnommenen Trinkwassers, in Abhängigkeit des untersuchten Klimaszenarios, um 0.4 bis 1.3 °C bis 2055 und um 0.7 bis 3.1 °C bis 2085 an.
- Betriebsszenarien mit erhöhten Pumpraten und Anreicherungsmengen resultiert erwartungsgemäss in einer Erhöhung des Wärmeaustausches, v.a. der Wärmeaustag nimmt im Vergleich zum Normalbetrieb schon für den Istzustand aber auch unter Berücksichtigung der der Klimaszenarien stark zu.

4.2.2 Hardwald

Kalibrierung & Validierung

Insgesamt liefert die Kalibrierung meist sehr gute Übereinstimmungen zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen (nicht gezeigt^{16,17}) und -temperaturen in den Trinkwasserbrunnen (Abb. B3) und in Piezometern zwischen der Grundwasseranreicherung und den Trinkwasserbrunnen (Abb. B4).

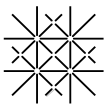
Für einzelne Brunnen kann der gemessene Temperaturverlauf mit der Simulation sehr gut nachvollzogen werden (z.B. Brunnen 1, 12, 13, 14, 19 und 30). Es existieren aber auch Brunnen, in welchen die Phasenverschiebung des simulierten und gemessenen Temperaturverlaufs voneinander abweichen (z.B. Brunnen 4, 6, 9, 11, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 33 und 34).

Auch in den Piezometern im Grundwasserabstrom der künstlichen Grundwasseranreicherung kann der gemessene Temperaturverlauf mit der Simulation gut nachvollzogen werden (z.B. BL21C235). Dies zeigt, dass der thermische Einfluss der künstlichen Grundwasseranreicherung mit dem Wärmetransportmodell gut erfasst wird. Bei anderen Piezometern existieren vergleichsweise grosse Abweichungen, welche auf eine unzureichende Datengrundlage bei Definition der Randbedingungen zurückzuführen sind (z.B. BL21C77).

Die von der Modellierung unabhängige Berechnung des Energieaustags durch die Grundwasserentnahmen zeigt, dass die Grössenordnung des Energieaustags und die saisonale Variabilität mit dem simulierten Energieaustag übereinstimmt (Abb. 19). Dies zeigt die Anwendbarkeit der Wärmetransportmodelle zur Beurteilung thermischer Veränderungen im Zusammenhang mit der Trinkwasserversorgung im Hardwald.

¹⁶ BGA-BL-173 Huggenberger H, Affolter A, Dresmann H (2018) Rheintunnel – Grundwassermodell Hagnau

¹⁷ BGA-Muttenz-225 Affolter A, Epting J (2021) Kurzbericht: Hagnau - Augst, 8-Streifenausbau, Szenarienberechnungen Verschiebung Trinkwasserbrunnen «Obere Hard» der Gemeinde Muttenz



Hydraulisches und thermisches Grundwasserregime (Istzustand)

Abb. 18 zeigt das hydraulische und thermische Grundwasserregime für die verschiedenen Jahreszeiten im Untersuchungsgebiet Hardwald. Deutlich ist der Einfluss der künstlichen Grundwasseranreicherung in den Wassergräben und -weihern zu erkennen, einschliesslich des abkühlenden Effekts v.a. in den Wintermonaten sowie des Wärmeeintrages v.a. in den Sommermonaten. In den Frühlings- und Herbstmonaten erreichen die jeweiligen Kälte- und Wärmefahnen im Grundwasserleiter, dem hydraulischen Gradienten folgend, zu den Trinkwasserbrunnen der Hardwasser AG.

Die Haupteinflussgrösse in der Grundwasserbilanz (Abb. C2 im Anhang) sind die künstliche Grundwasseranreicherung, die Grundwasserentnahmen über die Trinkwasserbrunnen sind nur halb so gross. Die Grössenordnungen der Zu- und Abfluss über die natürlichen Randbedingungen der Fliessgewässer und den südöstlichen und südlichen Modellrand sind vergleichsweise ausgeglichen. Abb. 19 und Abb. 20 zeigen die Wärmebilanzen und die Wärmeein- und -austräge über die verschiedenen Randbedingungen im Untersuchungsgebiet Hardwald (Abb. 5).

Der Wärmeeintrag über die ungesättigte Zone erreicht in den Sommermonaten Werte von bis zu $4.0 \text{ E}+13 \text{ J d}^{-1}$. Der Wärmeaustrag in den Wintermonaten erreicht Werte von über $2.5 \text{ E}+13 \text{ J d}^{-1}$. Der Wärmeaustausch ist im Vergleich mit den anderen Randbedingungen gross, aber über das Jahr hinweg mehr oder weniger ausgeglichen. Da der Flurabstand über weite Bereiche grösser 10 m ist (siehe Flurabstandskarte <https://geoview.bl.ch/>), ist kein grosser saisonaler atmosphärischer Einfluss auf die Grundwassertemperaturen zu erwarten.

Der Wärmeaustausch über den Rhein liegt grösstenteils im Bereich von $\pm 4.0 \text{ E}+12 \text{ J d}^{-1}$ und ist somit eine Grössenordnung kleiner als jener über die ungesättigte Zone. Bedingt durch den Temperaturgradienten in den Herbst- und Wintermonaten, exfiltriert vergleichsweise wärmeres Grundwasser in den vergleichsweise kalten Rhein, somit findet ein Wärmeaustrag aus dem Grundwasserkörper statt. In den Frühlings- und Sommermonaten findet ein Wärmeeintrag vom vergleichsweise wärmeren Rhein in den Grundwasserkörper statt. Die Variabilität der Wärmeein- und -austräge ist, wie bei der Wiese, auf die Instationarität des Oberflächengewässerabflusses und den Prozessen der Fluss-Grundwasser Interaktion zurückzuführen. Der Wärmeaustrag aus dem Grundwasserleiter kann, wenn auch geringer in den Sommermonaten (geringerer thermischer Gradient vom Grund- zum Oberflächenwasser), ganzjährig beobachtet werden, dies liegt darin begründet, dass der Rhein v.a. Vorfluter ist und Prozesse der Grundwasserexfiltration dominieren (vgl. Abb. C2 im Anhang). Während einzelner Hochwasserereignisse resultieren verstärkte Wärmeein- und -austräge. Der Wärmeaustausch über den regionalen Grundwasserstrom gegen Osten und Südosten liegt grösstenteils im Bereich von $\pm 1.0 \text{ E}+12 \text{ J d}^{-1}$ und ist somit um einen Faktor 4 kleiner wie jener über den Rhein.

Über die künstliche Grundwasseranreicherung findet, v.a. im Sommerhalbjahr, ein Wärmeeintrag in das Grundwasser mit Maximalwerten von über $1.0 \text{ E}+13 \text{ J d}^{-1}$ statt. Netto ist der Wärmeeintrag über die künstliche Grundwasseranreicherung um ein Vielfaches höher als der Effekt der Abkühlung des Grundwassers durch vergleichsweise kälteres Anreicherungswasser.

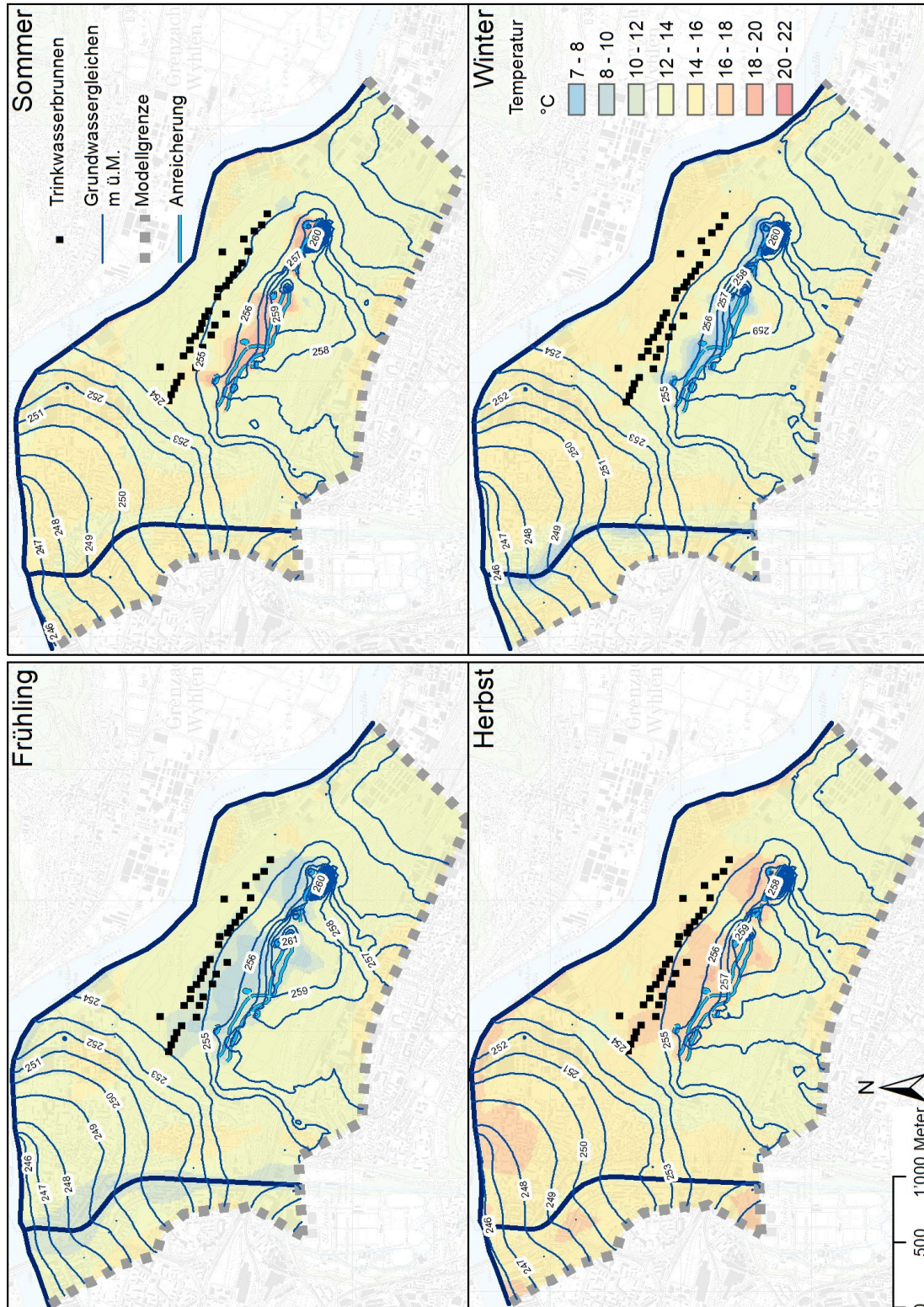


Abb. 18 Hydraulisches und thermisches Grundwasserregime für die verschiedenen Jahreszeiten im Untersuchungsgebiet Hardwald, im Frühling (15ter April), im Sommer (15ter Juli), Herbst (15ter Oktober) und Winter (15ter Januar) (Landeskarte[®] Bundesamt für Landestopografie).

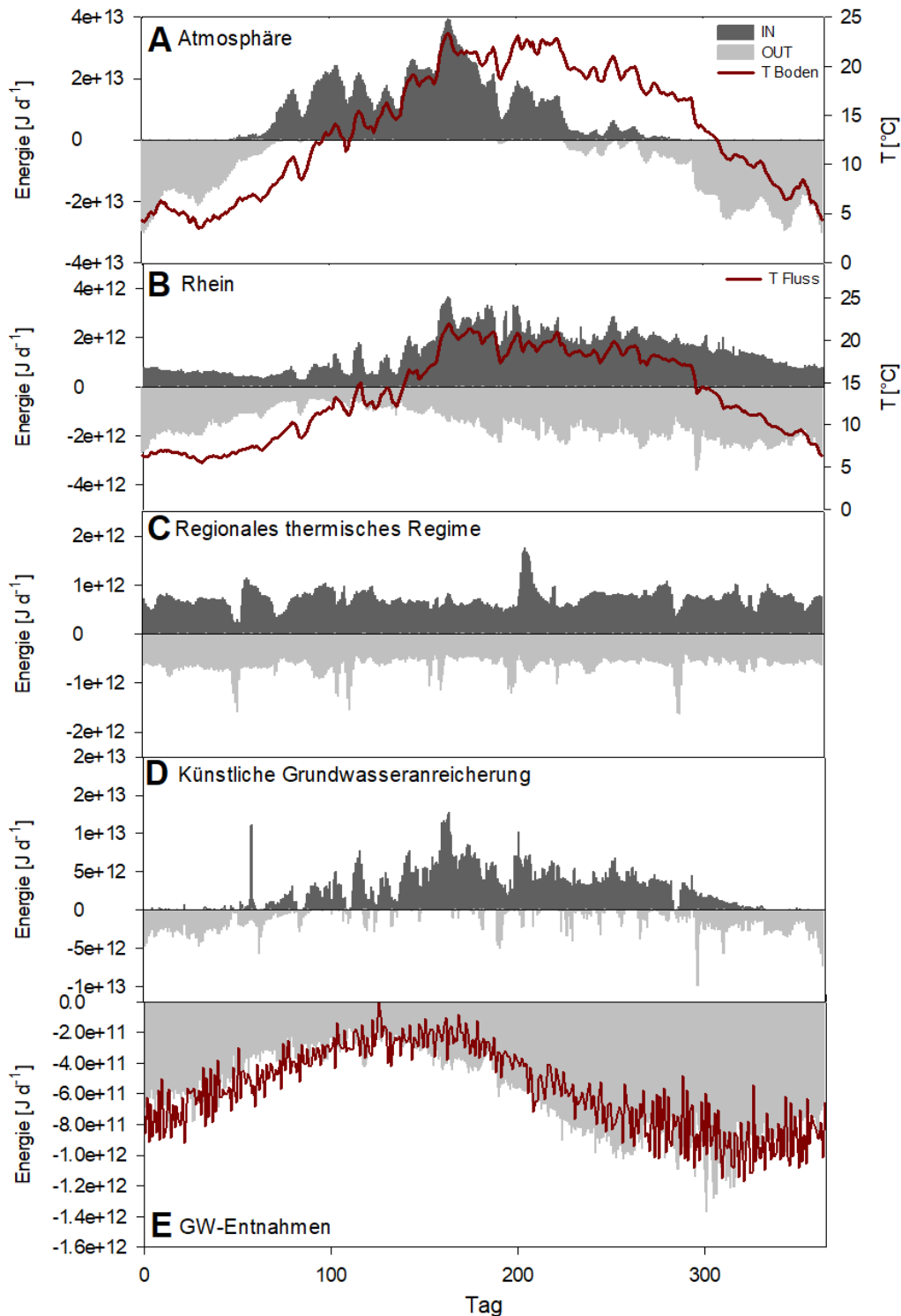


Abb. 19 Wärmebilanzen dargestellt als Wärmeein- und -austrag für die verschiedenen Randbedingungen im Untersuchungsgebiet Hardwald für 2014 (Abb. 6). A: Wärmeaustausch über die ungesättigte Zone dargestellt zusammen mit der Bodentemperatur in 20 cm Tiefe. B: Wärmeaustausch als Resultat der Interaktion mit dem Oberflächengewässer Rhein. C: Wärmeaustausch über den regionalen Grundwasserstrom gegen Osten und Südosten. D: Wärmeaustausch durch die künstliche Grundwasseranreicherung. E: Wärmeaustrag durch die Grundwasserentnahmen der Trinkwasserversorgung sowie berechnete Wärmeleistung der Trinkwasserentnahmen für das Jahr 2014.

Durch die Grundwasserentnahmen der Trinkwasserversorgung findet ein stark saisonal geprägter Wärmeaustrag statt, mit einem Maximum im Spätherbst von über $1.0 \text{ E}+12 \text{ J d}^{-1}$, welcher durch gemessene erhöhte Temperaturen im gefördertem Wasser bestätigt wird (Abb. B3 im Anhang).

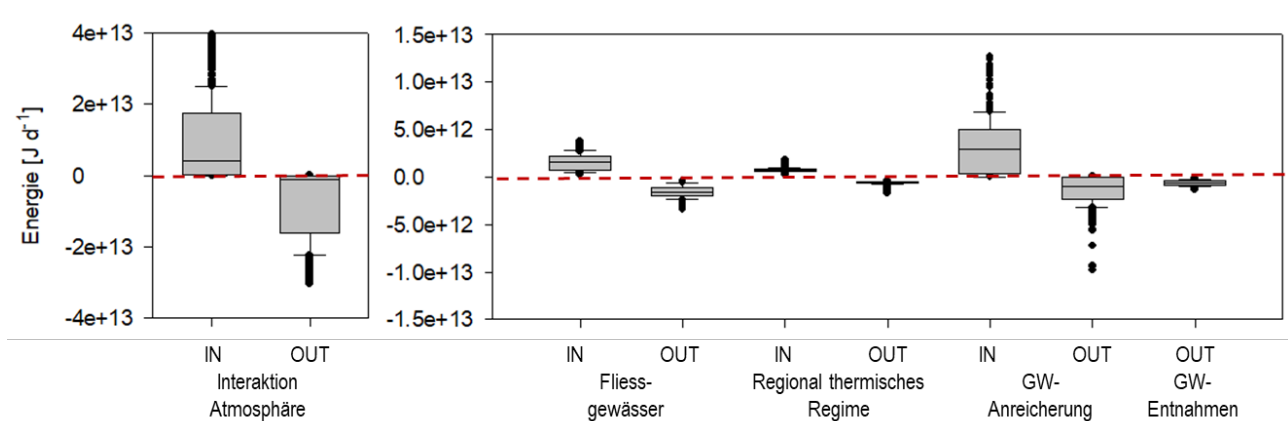


Abb. 20 Boxplots der Wärmebilanzen über die verschiedenen Randbedingungen im Untersuchungsgebiet Hardwald.

Klimaszenarien

Abb. 21 zeigt den saisonalen Wärmeaustausch für die Referenzjahre 2000, 2055 und 2085 für die untersuchten Klimaszenarien im Hardwald für ausgewählte Randbedingungen.

Die Differenz von Wärmeeintrag über die Fließgewässerinfiltration und Wärmeaustrag über die Exfiltration von Grundwasser ergibt den Netto-Wärmeaustausch des Rheins mit dem Grundwasserkörper. Im Untersuchungsgebiet im Hardwald findet heute durch die Exfiltration von vergleichsweise warmen Grundwasser in den Herbst- und v.a. in den Wintermonaten ein Wärmeaustrag aus dem Grundwasserleiter statt, welcher sich für die unterschiedlichen Klimaszenarien in den Herbstmonaten vergleichsweise wenig verändert, in den Wintermonaten aber in den Jahren 2055 um bis zu 59 % (Mittel -2 %) und 2085 um bis zu 102 % (Mittel 38 %) im Vergleich zum Referenzjahr 2000 v.a. ansteigt. Der Wärmeeintrag durch den Rhein in den Frühlings- und v.a. in den Sommer- und Herbstmonaten verändert sich für die unterschiedlichen Klimaszenarien in den Jahren 2055 und 2085 nur wenig.

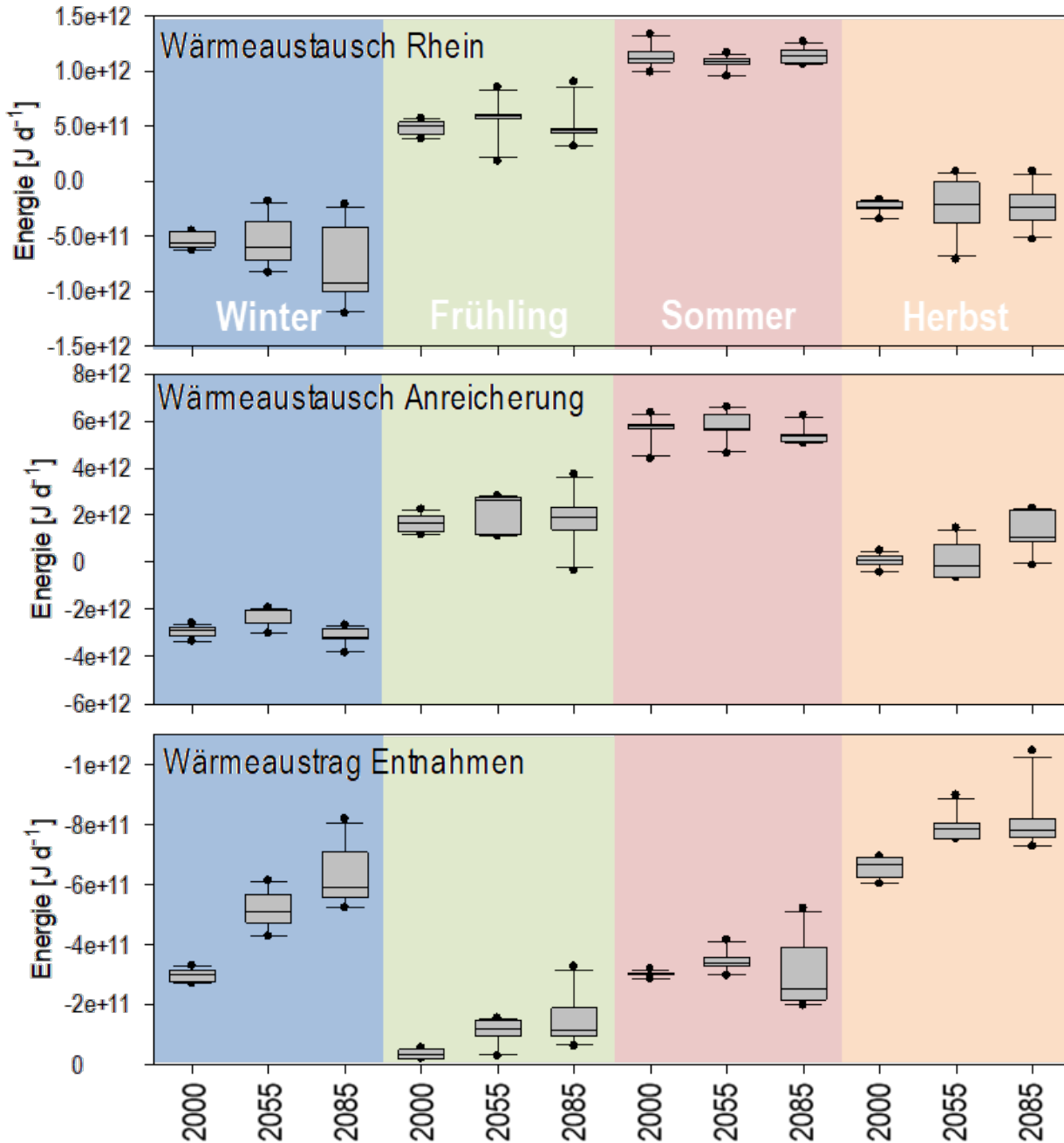
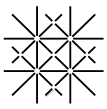
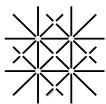


Abb. 21 Zusammenfassende Darstellung des saisonalen Wärmeaustausches ausgewählter Randbedingungen für die Referenzjahre 2000, 2055 und 2085 für alle untersuchten Klimaszenarien im Hardwald. Oben: Wärmeaustausch über die Interaktion des Rheins mit dem Grundwasserleiter; Mitte: Wärmeaustausch über die künstliche Grundwasseranreicherung; Unten: Wärmeaustausch durch die Trinkwasserentnahmen.

Ähnlich ist die Entwicklung für den Wärmeaustausch über die künstliche Grundwasseranreicherung, welcher insgesamt viel höher ist als jener über die Fluss-Grundwasser Interaktion. Für die Winter-, Frühlings- und Sommermonate lassen sich vergleichsweise wenig Veränderungen für die unterschiedlichen Klimaszenarien in den Jahren 2055 und



2085 beobachten. In den Herbstmonaten nimmt der Wärmeintrag in den Grundwasserleiter im Jahr 2085, im Vergleich zum Referenzjahr 2000, um bis 3 Größenordnungen zu. Wie in den Langen Erlen ist tendenziell eine Verringerung des Wärmeaustuges im Winter für 2055 im Vergleich zu 2000 und 2085 zu beobachten.

Der Wärmeaustag über die Trinkwasserentnahmen nimmt über die Jahre 2000 bis 2055 und 2085 stetig zu, wobei er am höchsten in den Winter- und v.a. in den Herbstmonaten ist. Die stärkste Zunahme über die Jahre ist für die Wintermonate zu beobachten. So nimmt in den Sommermonaten der Wärmeaustag, im Vergleich zu 2000 sowie in Abhängigkeit der Jahreszeit und der unterschiedlichen Klimaszenarien, von 2000 bis 2055 um bis zu 128 % (Mittel 75 %) und von 2000 bis 2085 um bis zu 115 % (Mittel 198 %) teilweise stark zu.

Tab. 8 und Abb. D2 bis Abb. D4 im Anhang zeigen die Temperaturentwicklung in den Trinkwasserbrunnen der Langen Erlen für Klimaprojektionen mit den geringsten (Szenario 1: RCP26_DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11) und den gravierendsten (Szenario 6: RCP85_SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44) Auswirkungen der Klimaänderungen. Für alle Trinkwasserbrunnen ist eine Temperaturerhöhung zu beobachten, welche für das Szenario 1 bei ca. 0.2 bis 0.3 °C bis 2055 und bei ca. 0.7 bis 1.0 °C bis 2085 und für das Szenario 6 bei ca. 0.6 bis 1.6 °C bis 2055 und bei ca. 1.5 bis 4.0 °C bis 2085 betragen.

Tab. 8 Veränderung der Entnahmetemperaturen in den Trinkwasserbrunnen im Hardwald in den Jahren 2055 und 2085 im Vergleich zum Jahr 2000.

Klimaprojektion	Veränderung	BL21A4	BL21A5	BL21A6	BL21A7	BL21A9	BL21A10	BL21A11	BL21A12	BL21A13	BL21A14
RCP26_DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11	ΔT (2000-2055)	0.21	0.21	0.20	0.25	0.23	0.26	0.26	0.26	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
RCP85_SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44	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
		BL21A15	BL21A16	BL21A17	BL21A18	BL21A19	BL21A20	BL21A21	BL21A22	BL21A23	BL21A24
RCP26_DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11	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
RCP85_SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44	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
		BL21A25	BL21A26	BL21A27	BL21A28	BL21A29	BL21A30	BL21A31	BL21A32	BL21A33	BL21A34
RCP26_DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11	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
RCP85_SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44	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

Betriebsszenarien

Bei den Entnahmen im Hardwald für das Betriebsszenario A, welcher einem durchschnittlichen Normalbetrieb entspricht (Tab. 5), lässt sich beobachten, dass zwischen dem Istzustand (2014) und für das Klimaszenario 6 im Jahr 2085 für den gegenwärtigen Normalbetrieb der Wärmeaustag aus den Grundwasserleiter um lediglich ca. 14 % erhöht. Auch der Wärmeintrag in den Sommermonaten sowie der Wärmeentzug in den Wintermonaten durch die Grundwasseranreicherung nehmen für das Klimaszenario 6 im Jahr 2085 nur um ca. 6 und ca. 16 % im Vergleich zum Istzustand zu (Abb. 22).

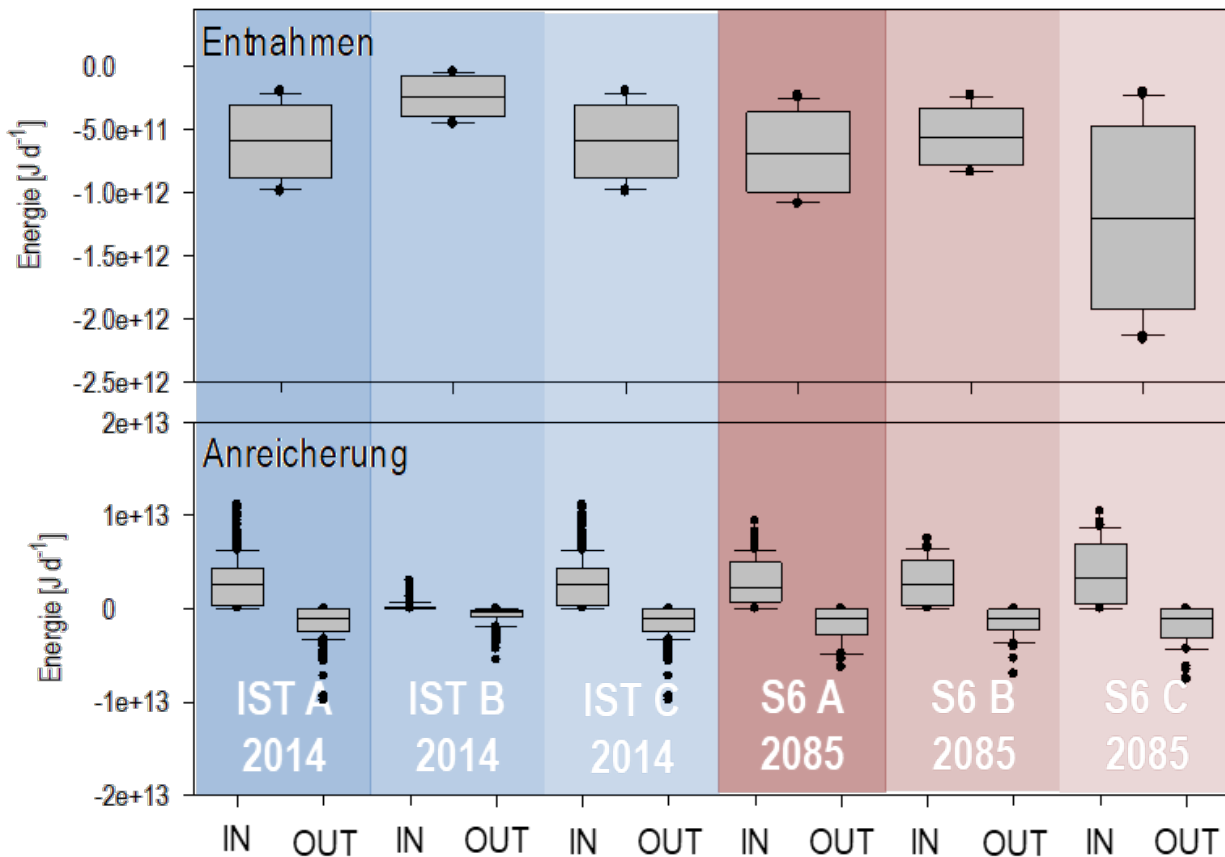
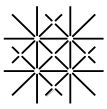


Abb. 22 Zusammenfassende Darstellung der simulierten Betriebsszenarien A (Normalbetrieb), B (reduzierter Betrieb) und C (erhöhter Betrieb) im Hardwald für den Istzustand (2014) und das Klimaszenario S6 (2085). Oben: Wärmeaustrag (nur Out) durch die Trinkwasserentnahmen; Unten: Wärmeaustausch (In-Out) über die künstliche Grundwasseranreicherung.

Für das Betriebsszenario B mit tiefen Pumpraten und verringerten Anreicherungsmengen (Abb. 22) resultiert erwartungsgemäss für den Istzustand auch in eine Reduktion des Wärmeaustausches. So nimmt der Wärmeaustrag der Entnahmen um ca. 60 % und jener für die Anreicherung in den Wintermonaten um ca. 52 % ab. Der Wärmeeintrag durch die künstliche Grundwasseranreicherung in den Sommermonaten nimmt sogar um ca. 92 % ab.

Für das Betriebsszenario C mit erhöhten Pumpraten und Anreicherungsmengen (Abb. 22) resultiert entsprechend für den Istzustand in einer Erhöhung des Wärmeaustausches. So nimmt der Wärmeaustrag der Entnahmen um ca. 76 % und jener für die Anreicherung in den Wintermonaten um ca. 9 % zu. Der Wärmeeintrag durch die künstliche Grundwasseranreicherung in den Sommermonaten nimmt um ca. 52 % zu. Für das Betriebsszenario C nimmt für das Klimaszenario 6 der Wärmeaustrag im Vergleich zum Normalbetrieb durch die Entnahmen um ca. 76 % zu, dies ist die gleiche Zunahme für den entsprechenden Betriebswechsel im Istzustand (siehe oben). Der Wärmeaustausch über die künstliche Grundwasseranreicherung zeigt nur geringfügige Veränderungen für die verschiedenen betrachteten Betriebsszenarien und das Klimaszenario 6 im Jahr 2085.



Zusammenfassung Istzustand & Entwicklung thermisches Grundwasserregime Hardwald

- Im Grundwasserabstrom der Anreicherungsgräben und -weiher bewegen sich die Kälte- (Winter) und Wärmefahnen (Sommer), dem hydraulischen Gradienten folgend, zu den Trinkwasserbrunnen der Hardwasser AG.
- Durch Fluss-Grundwasser Interaktionsprozesse findet ganzjährig ein, durch Hochwasserereignisse geprägter, Wärmeaustausch zwischen dem Rhein und dem Grundwasserleiter statt. Der Wärmeaustausch ist, wie auch jener über das regionale Grundwasserregime, über das Jahr vergleichsweise ausgeglichen. Der Wärmeaustausch über die künstliche Grundwasseranreicherung ist vergleichsweise höher, wobei der Wärmeeintrag in den Grundwasserleiter im Sommerhalbjahr dominiert. Über die Trinkwasserentnahmen findet v.a. im Sommer und Spätsommer ein starker Wärmeaustrag statt, welcher durch die gemessenen erhöhten Temperaturen im gefördertem Wasser bestätigt wird.
- Die Entwicklung des Wärmeaustausches für die unterschiedlichen Klimaszenarien über die Fluss-Grundwasser Interaktion zeigt für die Herbst-, Frühlings- und Sommermonate vergleichsweise wenig Veränderungen in den Jahren 2055 und 2085 im Vergleich zum Referenzjahr 2000. In den Wintermonaten steigt der Wärmeaustrag von 2000 bis 2085 um im Mittel 38 % an.
- Auch bei der Entwicklung des Wärmeaustausches über die künstliche Grundwasseranreicherung, lassen sich in den Winter-, Frühlings- und Sommermonaten vergleichsweise wenig Veränderungen für die unterschiedlichen Klimaszenarien in den Jahren 2055 und 2085 beobachten. In den Herbstmonaten nimmt der Wärmeeintrag in den Grundwasserleiter im Jahr 2085, im Vergleich zum Referenzjahr 2000, um bis 3 Größenordnungen zu.
- Für alle untersuchten Klimaszenarien und v.a. in den Sommermonaten nimmt, im Vergleich zu 2000, der Wärmeaustrag über die Trinkwasserentnahmen bis 2055 stetig zu, wobei die Bandbreite für die verschiedenen Jahreszeiten und Klimaszenarien gross ist. Entsprechend steigen die simulierten Temperaturen des entnommenen Trinkwassers, in Abhängigkeit des untersuchten Klimaszenarios, um 0.2 bis 1.0 °C bis 2055 und um 0.6 bis 4.0 °C bis 2085 an.
- Betriebsszenarien mit erhöhten Pumpraten und Anreicherungsmengen resultieren erwartungsgemäss in einer Erhöhung des Wärmeaustausches, v.a. der Wärmeaustrag nimmt im Vergleich zum Normalbetrieb schon für den Istzustand aber auch unter Berücksichtigung der der Klimaszenarien um bis zu 76 % zu.

4.2.3 Unteres Birstal

Kalibrierung & Validierung

Für das Untersuchungsgebiet existieren nur zwei Piezometer im Grundwasserabstrom der künstlichen Grundwasseranreicherung, für welche aber der gemessene Temperaturverlauf mit der Simulation sehr gut nachvollzogen werden kann (im Anhang [Abb. B5](#)). Dies zeigt, dass der thermische Einfluss der künstlichen Grundwasseranreicherung mit dem Wärmetransportmodell (BL11J15) und die Interaktion mit der Birs (BL11J3) gut erfasst werden.

Die von der Modellierung unabhängige Berechnung des Energieaustrags durch die Grundwasserentnahmen zeigt, dass die Grössenordnung des Energieaustrags und die saisonale Variabilität mit dem simulierten Energieaustrag

übereinstimmt (Abb. 24). Dies zeigt die Anwendbarkeit der Wärmetransportmodelle zur Beurteilung thermischer Veränderungen im Zusammenhang mit der Trinkwasserversorgung im unteren Birstal.

Hydraulisches und thermisches Grundwasserregime (Istzustand)

Abb. 23 zeigt das hydraulische und thermische Grundwasserregime für die verschiedenen Jahreszeiten im Untersuchungsgebiet im unteren Birstal. Deutlich ist der Einfluss der künstlichen Grundwasseranreicherung in der Anreicherungsanlage Aesch zu erkennen, einschliesslich des abkühlenden Effekts v.a. in den Wintermonaten sowie des Wärmeeintrages v.a. in den Sommermonaten. In den Frühlings- und Herbstmonaten bewegen sich die jeweiligen Kälte- und Wärmefahnen im Grundwasserleiter, dem hydraulischen Gradienten folgend, mit dem Grundwasserstrom Richtung Norden. Deutlich ist auch in den Frühlings- und Wintermonaten für einen südlich gelegenen Abschnitt der Birs die Infiltration von vergleichsweise «kalten» Birswasser in den Grundwasserleiter zu beobachten.

Die Haupteinflussgrössen in der Grundwasserbilanz des unteren Birstals (Abb. C3 im Anhang) ist die Interaktion mit der Birs und v.a. die Fliessgewässerinfiltration sowie die Randzuflüsse über den südlichen und die Randabflüsse und v.a. über den nördlichen Modellrand. Da die künstliche Grundwasseranreicherung v.a. im Sommer betrieben wird kann eine höhere Variabilität als bei den Grundwasserentnahme über die Trinkwasserbrunnen beobachtet werden.

Abb. 24 und Abb. 25 zeigen die Wärmebilanzen und die Wärmeein- und -austräge über die verschiedenen Randbedingungen im Untersuchungsgebiet im unteren Birstal (Abb. 7).

Der Wärmeaustausch über die ungesättigte Zone ist mit zeitweisen Werten über $\pm 8.0 \text{ E}+11 \text{ J d}^{-1}$ vergleichsweise gross, aber über das Jahr hinweg mehr oder weniger ausgeglichen. Da der Flurabstand über weite Bereiche grösser 10 m ist (siehe Flurabstandskarte <https://geoview.bl.ch/>), ist kein grosser saisonaler atmosphärische Einfluss auf das Grundwasser zu erwarten.

Der Wärmeeintrag über die Birs liegt mit fast $8.0 \text{ E}+11 \text{ J d}^{-1}$ im Spätsommer in der gleichen Grössenordnung wie jener über die ungesättigte Zone und zeigt eine starke Variabilität. Dies ist, wie bei den zuvor beschriebenen Oberflächengewässern Birs und Rhein, auf die Instationarität des Birsabflusses und den Prozessen der Fluss-Grundwasser Interaktion zurückzuführen. Ein Wärmeeintrag aus dem Grundwasserleiter von über $2.0 \text{ E}+11 \text{ J d}^{-1}$, kann wenn auch geringer in den Sommermonaten (geringerer thermischer Gradient vom Grund- zum Oberflächenwasser) ganzjährig beobachtet werden, dies liegt darin begründet, dass einzelne Abschnitte der Birs v.a. Vorfluter sind und Prozesse der Grundwasserexfiltration dominieren (vgl. Abb. C3 im Anhang, Affolter et al. (2010)).

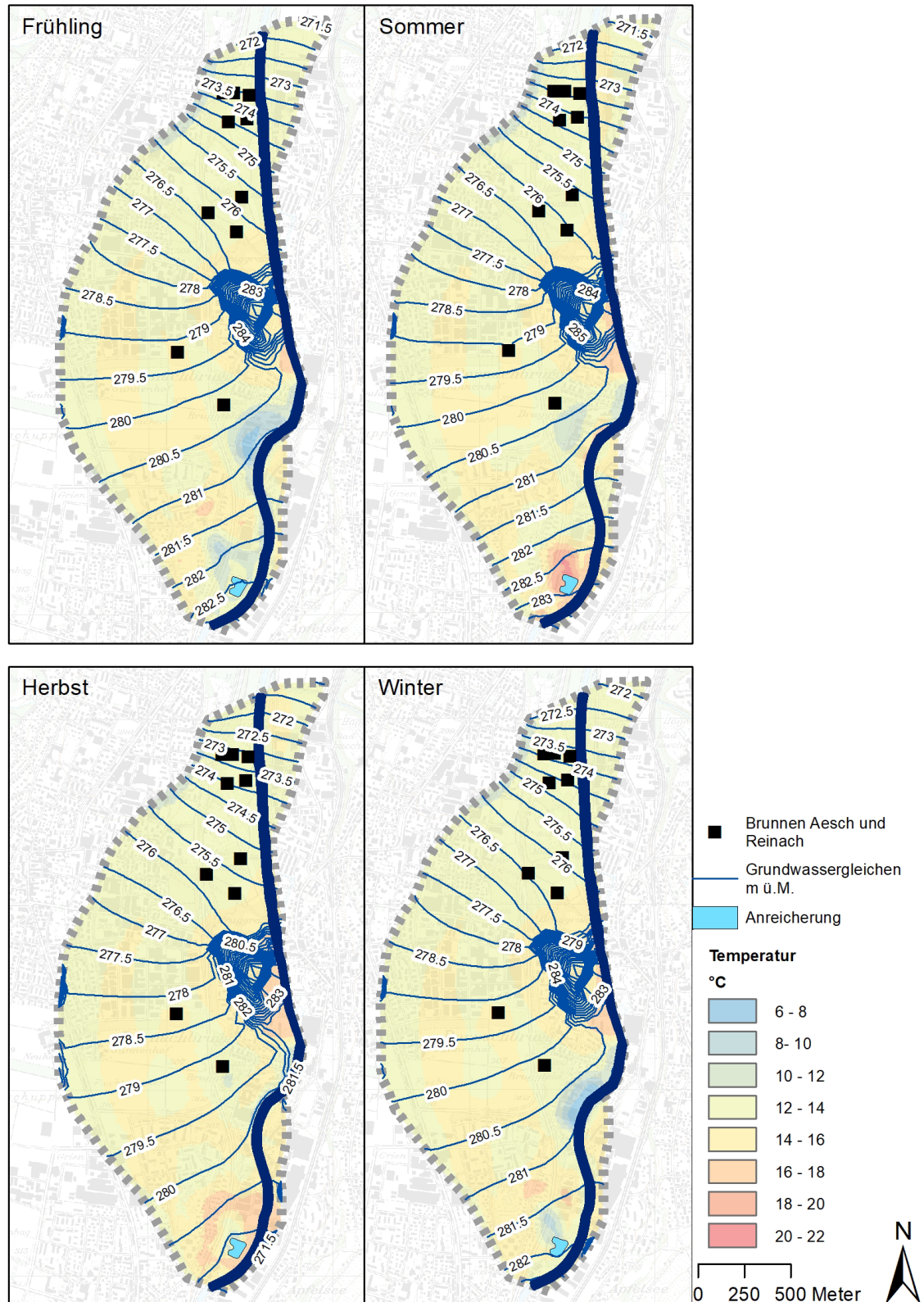
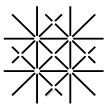


Abb. 23 Hydraulisches und thermisches Grundwasserregime für die verschiedenen Jahreszeiten im Untersuchungsgebiet im unteren Birstal, im Frühling (15ter Mai), im Sommer (15ter August), Herbst (15ter November) und Winter (15ter Februar) (Landeskarte® Bundesamt für Landestopografie).

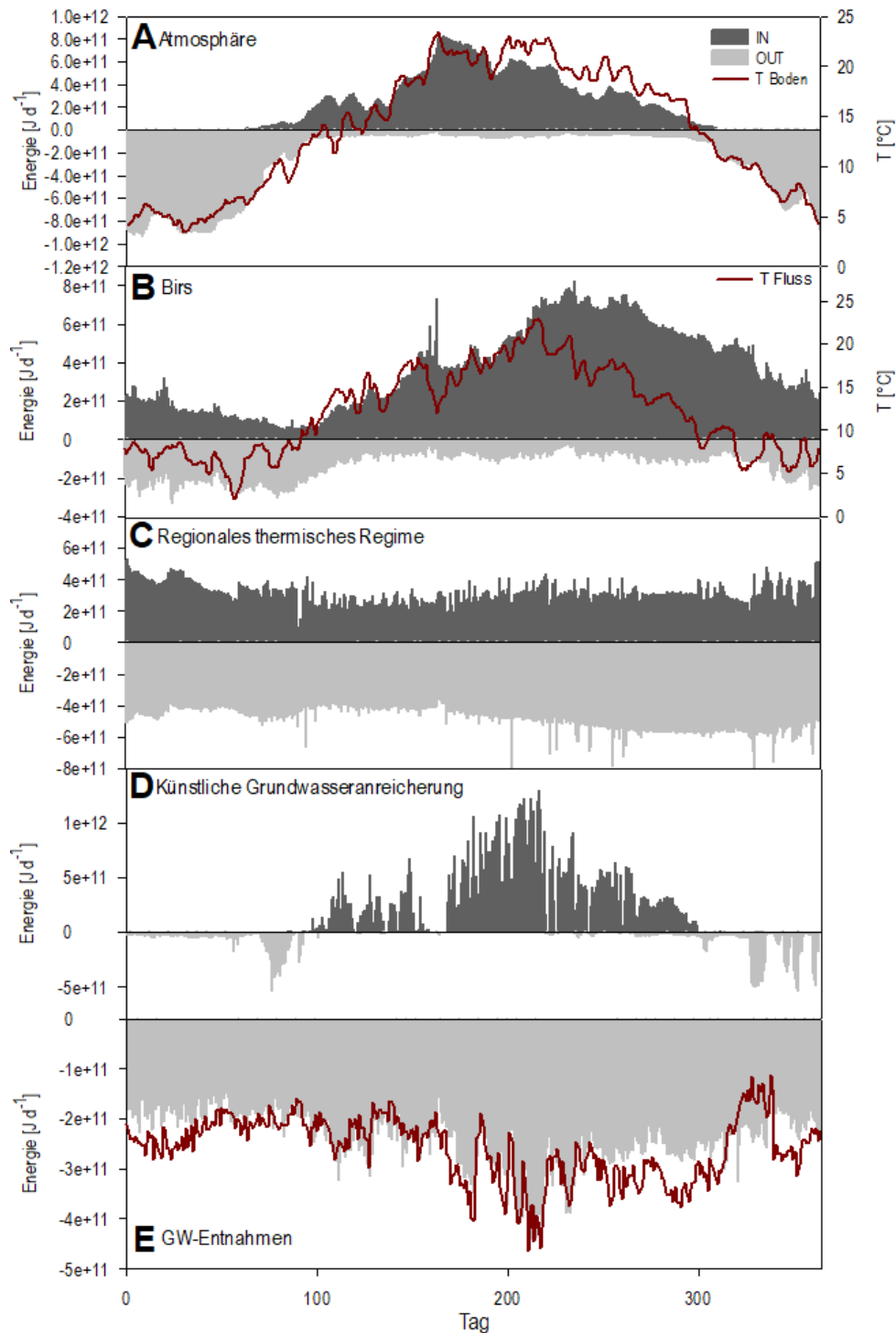


Abb. 24 Wärmebilanzen dargestellt als Wärmeein- und -austrag für die verschiedenen Randbedingungen im Untersuchungsgebiet Aesch für 2018 (Abb. 7). A: Wärmeaustausch über die ungesättigte Zone dargestellt zusammen mit der Bodentemperatur in 20 cm Tiefe. B: Wärmeaustausch als Resultat der Interaktion mit dem Oberflächengewässer Birs. C: Wärmeaustausch über den regionalen Grundwasserstrom; Wärmezustrom aus dem Süden; Wärmeabstrom gegen Norden. D: Abkühlung des Grundwassers in den Winter- und Wärmeintrag in das Grundwasser in den Sommermonaten durch die künstliche Grundwasseranreicherung in Aesch. E: Wärmeausstrag durch die Grundwasserentnahmen der Trinkwasserversorgung.

Ein regionaler Wärmeeintrag in den Grundwasserleiter findet über den Birstalgrundwasserstrom aus dem Süden statt und ist mit ca. $4.0 \text{ E}+11 \text{ J d}^{-1}$ vergleichsweise konstant. Der unterstromige Wärmeaustrag aus dem Grundwasserleiter gegen Norden ist mit meist über $5.0 \text{ E}+11 \text{ J d}^{-1}$ leicht höher aber auch vergleichsweise konstant. Höhere Werte liegen darin begründet, dass das Grundwasser auf dem Weg im Grundwasserleiter des unteren Birstal einen zusätzlichen Wärmeeintrag über die Birsinfiltration (siehe oben), den westlichen Randzufluss und teilweise auch durch die künstliche Grundwasseranreicherung erfährt.

Der Wärmeaustausch über die künstliche Grundwasseranreicherung ist im Vergleich zu den Grundwasseranreicherungssystemen in den Langen Erlen und im Hardwald klein, da viel weniger Wasser künstlich angereichert wird (siehe [Abb. C3](#) im Anhang, Affolter et al. (2010)). Im Winterhalbjahr resultiert durch die künstliche Grundwasseranreicherung sporadisch eine Abkühlung des Grundwassers, mit einem Maximum des Wärmeentzugs von fast $5.0 \text{ E}+11 \text{ J d}^{-1}$. Der Wärmeeintrag mit Maximalwerten von über $1.3 \text{ E}+12 \text{ J d}^{-1}$ in das Grundwasser findet v.a. im Sommerhalbjahr statt.

Durch die Grundwasserentnahmen der Trinkwasserversorgung findet ein stark saisonal geprägter Wärmeaustrag im Spätsommer statt, mit einem Maximum von fast $4.5 \text{ E}+11 \text{ J d}^{-1}$.

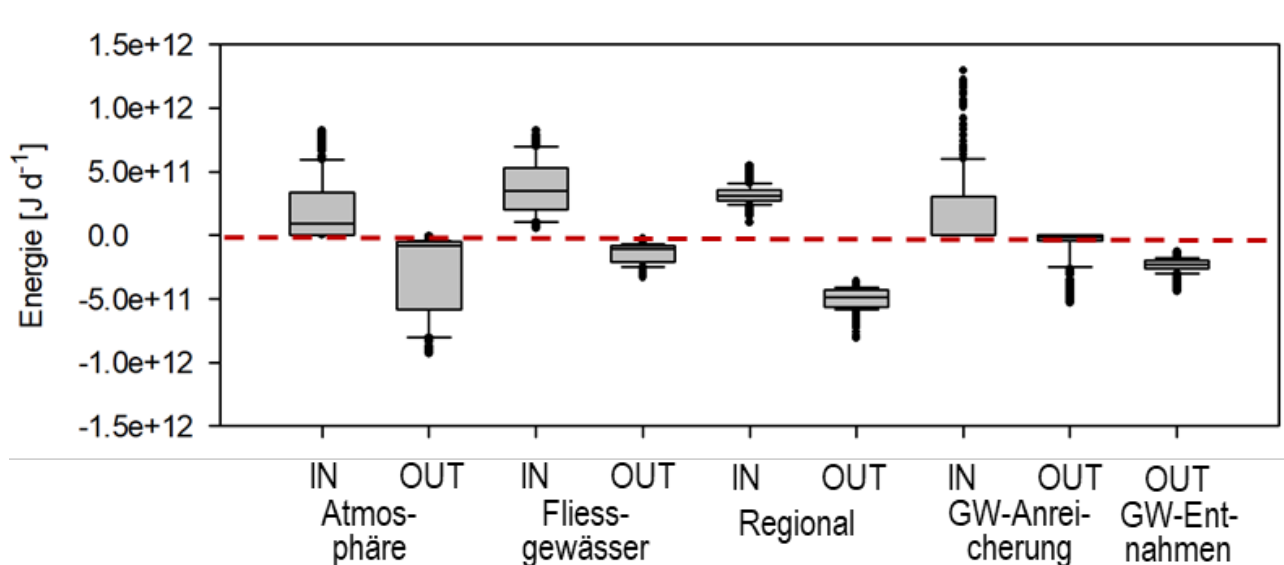


Abb. 25 Boxplots der Wärmebilanzen für die verschiedenen Randbedingungen im Untersuchungsgebiet Anreicherungsanlage Aesch.

Klimaszenarien

[Abb. 26](#) zeigt den saisonalen Wärmeaustausch für die Referenzjahre 2000, 2055 und 2085 für alle untersuchten Klimaszenarien im unteren Birstal für ausgewählte Randbedingungen.

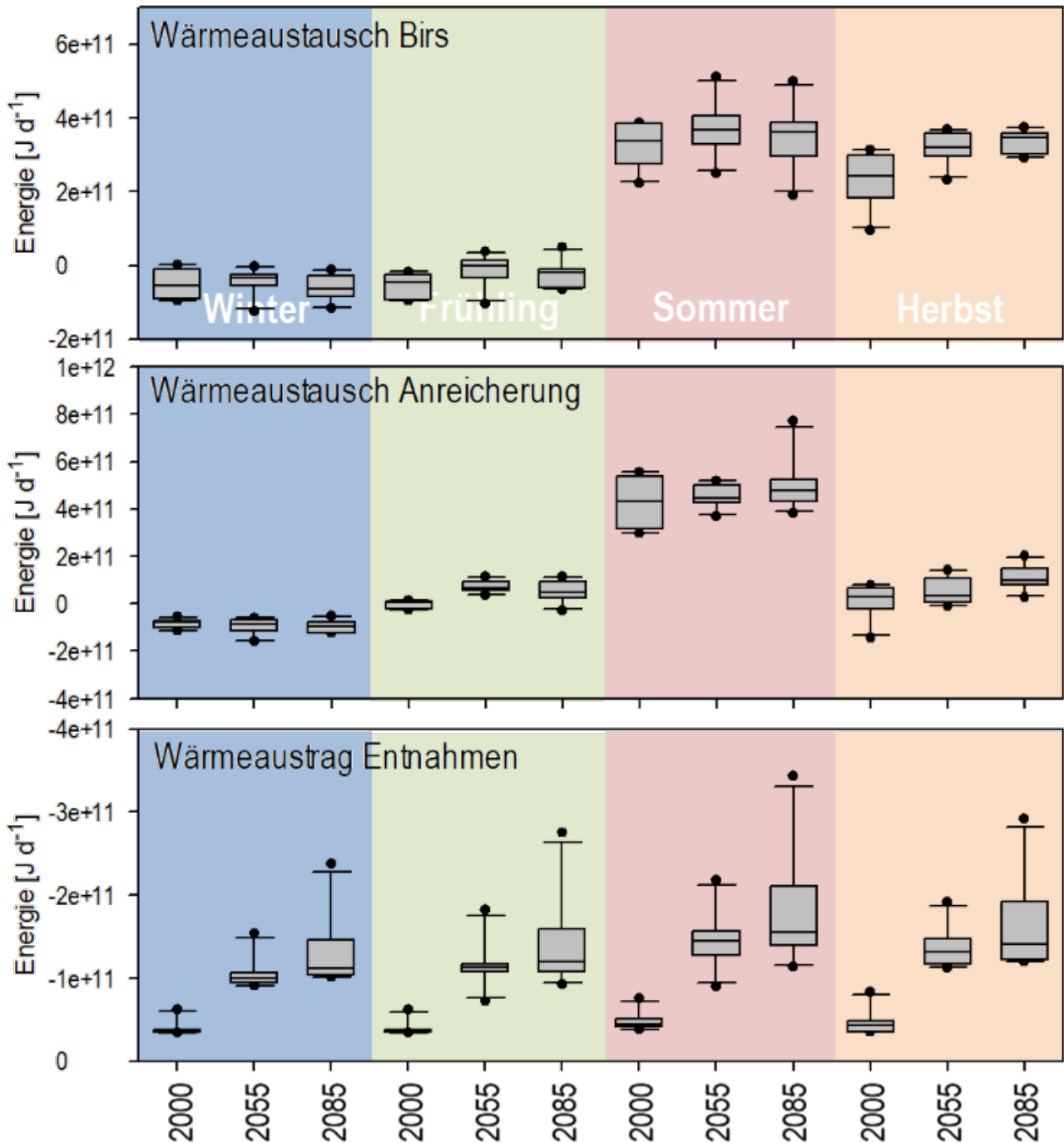
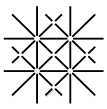
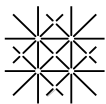


Abb. 26 Zusammenfassende Darstellung des saisonalen Wärmeaustausches für die Referenzjahre 2000, 2055 und 2085 für alle untersuchten Klimaszenarien im unteren Birstal. Oben: Wärmeaustausch über die Interaktion der Birs mit dem Grundwasserleiter; Mitte: Wärmeaustausch über die künstliche Grundwasseranreicherung; Unten: Wärmeaustausch durch die Trinkwasserentnahmen.



Da im unteren Birstal, wie in den Langen Erlen, die Fliessgewässer-Infiltration der dominierende Interaktionsprozess ist, ergibt sich in den Sommer- und Herbstmonaten als Differenz von Wärmeeintrag über die Fliessgewässerinfiltration und Wärmeaustrag über die Exfiltration von Grundwasser ein Netto-Wärmeeintrag in den Grundwasserkörper. Wohingehend die Entwicklung für die Sommermonate unklar ist, nimmt der Wärmeeintrag in den Herbstmonaten, im Vergleich zu 2000 sowie in Abhängigkeit der unterschiedlichen Klimaszenarien, von 2000 bis 2055 um bis zu 144 % (Mittel 55 %) und von 2000 bis 2085 um bis zu 262 % (Mittel 74 %) zu. In den Winter- und Frühlingsmonaten findet ein Wärmeaustrag aus dem Grundwasserleiter statt, welcher aber um mehrere Grössenordnungen kleiner ist als der Wärmeeintrag in den Sommer- und Herbstmonaten.

Der Wärmeaustausch über die künstliche Grundwasseranreicherung zeigt für die verschiedenen Jahreszeiten vergleichsweise geringere thermische Auswirkungen für die untersuchten Klimaszenarien. Ein vergleichsweise hoher Wärmeeintrag, welcher in der Grössenordnung des Wärmeeintrages des Birs ist, findet in den Sommermonaten statt. In den Frühlings- und Herbstmonaten nimmt der Wärmeeintrag, in Abhängigkeit der unterschiedlichen Klimaszenarien, leicht zu.

Der Wärmeaustrag durch die Trinkwasserentnahmen nimmt, im Vergleich zu 2000 sowie in Abhängigkeit der Jahreszeit und der unterschiedlichen Klimaszenarien, von 2000 bis 2055 um 17 bis 380 % (Mittel 207 %) und von 2000 bis 2085 um 43 bis 628 % (Mittel 282 %) zu.

Tab. 9 und Abb. D4 im Anhang zeigen die Temperaturentwicklung in den Trinkwasserbrunnen der Gemeinden Aesch und Reinach für Klimaprojektionen mit den geringsten (S1: RCP26_DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11) und den gravierendsten (S6: RCP85_SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44) Auswirkungen der Klimaänderungen. Für alle Trinkwasserbrunnen ist eine Temperaturerhöhung zu beobachten, welche für das Szenario S1 bis ca. 0.85 °C bis 2055 und bei ca. 0.3 bis 0.7 °C bis 2085 und für das Szenario S6 bei ca. 1.0 bis 3.2 °C bis 2055 und bei ca. 2.6 bis 5.4 °C bis 2085 betragen.

Tab. 9 Veränderung der Entnahmetemperaturen in den Trinkwasserbrunnen in den Gemeinden Aesch (Aeschfeld und Kägen; BL11A2/3) und Reinach (BL24A1-10) im unteren Birstal in den Jahren 2055 und 2085 im Vergleich zu Jahr 2000.

Klimaprojektion	Veränderung	BL11A2	BL11A3	BL24A1	BL24A2	BL24A3
RCP26_DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11	ΔT (2000-2055)	0.0	0.5	0.4	0.5	0.9
	ΔT (2000-2085)	0.5	0.4	0.5	0.6	0.6
RCP85_SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44	ΔT (2000-2055)	1.0	1.7	2.2	2.3	2.3
	ΔT (2000-2085)	2.6	3.6	3.0	3.2	3.7
		BL24A4	BL24A5	BL24A6	BL24A7	BL24A8
RCP26_DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11	ΔT (2000-2055)	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4
	ΔT (2000-2085)	0.3	0.6	0.6	0.6	0.7
RCP85_SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44	ΔT (2000-2055)	2.4	2.2	2.2	2.6	3.2
	ΔT (2000-2085)	4.1	3.5	3.7	4.5	5.4

Betriebsszenarien

Bei den Entnahmen im unteren Birstal reduzieren sich der Wärmeausttrag um bis zu 9 % (Istzustand im Jahr 2018) und 8 % (Klimaszenario 6 im Jahr 2085) für die unterschiedlichen Szenarien eines erhöhten Betriebs der Grundwasseranreicherung (Tab. 6). Die Reduktion lässt sich dadurch erklären, dass für die Betriebsszenarien ein kontinuierlicher Betrieb der Anreicherung über das Jahr berücksichtigt wird. Der aktuelle Betrieb hingegen findet v.a. in den Sommermonaten statt, wo vergleichsweise warmes Birswasser infiltriert wird.

Der Wärmeeintrag über die künstliche Grundwasseranreicherung in den Sommermonaten nimmt um bis zu 68 % (Istzustand im Jahr 2018) und 63 % (Klimaszenario 6 im Jahr 2085) zu. Der des Wärmeaustrages in den Wintermonaten nimmt um bis zu 49 % (Istzustand im Jahr 2018) und 30 % (Klimaszenario 6 im Jahr 2085) zu.

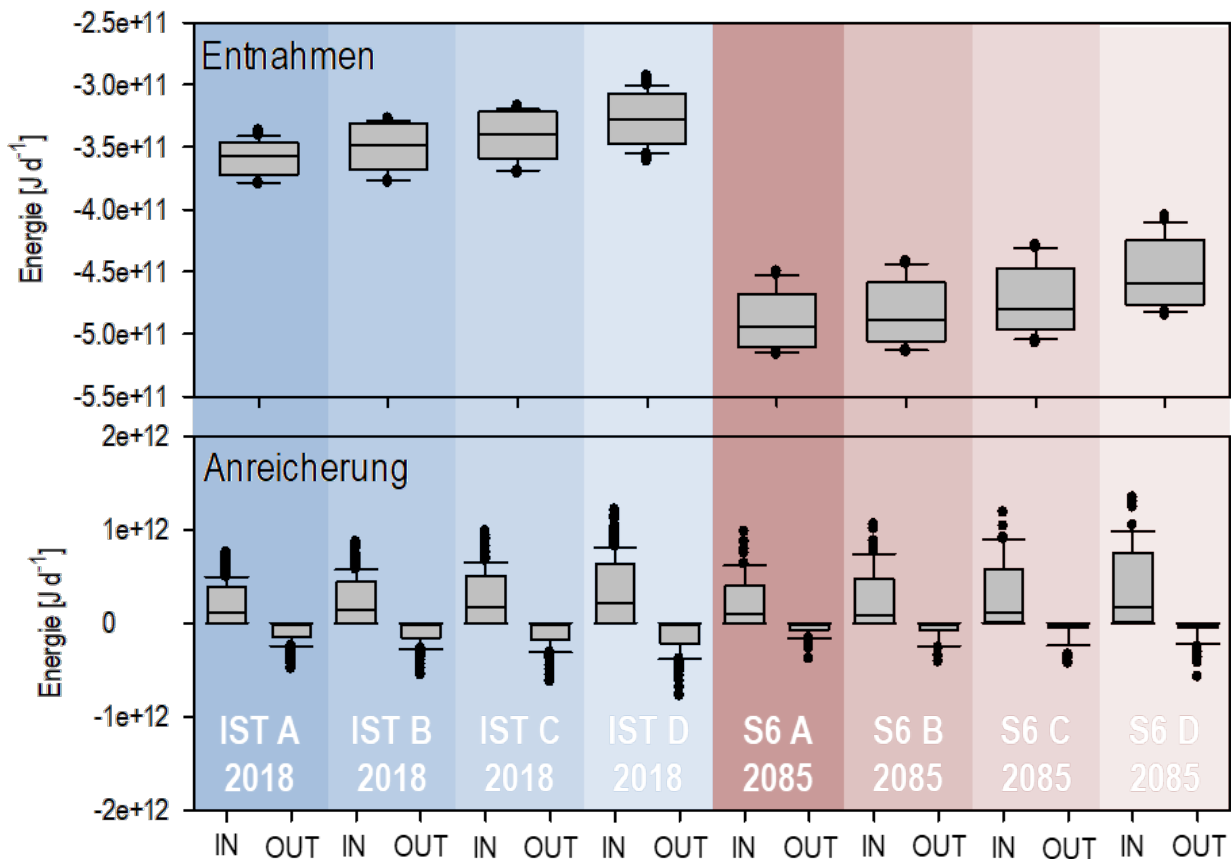
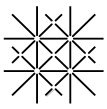


Abb. 27 Zusammenfassende Darstellung der simulierten Betriebsszenarien A (Normalbetrieb), B (erhöhter Betrieb 1), C (erhöhter Betrieb 2) und C (erhöhter Betrieb 3) im unteren Birstal für den Istzustand (2018) und das Klimaszenario S6 (2085). Oben: Wärmeausttrag (nur Out) durch die Trinkwasserentnahmen; Unten: Wärmeaustausch (In-Out) über die künstliche Grundwasseranreicherung der AAA.



Zusammenfassung Istzustand & Entwicklung thermisches Grundwasserregime unteres Birstal

- Von der Anreicherungsanlage Aesch (AAA) bewegen sich die Kälte- (Winter) und Wärmefahnen (Sommer) im regionalen Grundwasserstrom dem hydraulischen Gradienten folgend gegen Norden.
- Neben der Saisonalität ist der Wärmeaustausch zwischen der Birs und dem Grundwasserleiter abhängig vom betrachteten Fliessgewässerabschnitt. Wohingegen für die südlichen Birsabschnitte die Infiltration von Birswasser in den Grundwasserleiter der dominierende Interaktionsprozess ist, ist es für nördliche Birsabschnitte die Exfiltration von Grundwasser. Insgesamt ist der Wärmeeintrag aus der Birs in den Grundwasserleiter vergleichsweise höher als der Wärmeaustrag. Der Wärmeaustausch über das regionale Grundwasserregime ist über das Jahr vergleichsweise ausgeglichen. Über die künstliche Grundwasseranreicherung findet v.a. ein Wärmeeintrag in den Grundwasserleiter statt. Über die Trinkwasserentnahmen findet v.a. im Sommer und Spätsommer ein starker Wärmeaustrag statt.
- In den Sommer- und Herbstmonaten findet über die Birs ein vergleichsweise hoher Wärmeeintrag in den Grundwasserleiter statt, welcher um mehrere Größenordnungen höher ist als der Wärmeaustrag in den Winter- und Frühlingsmonaten. In den Herbstmonaten nimmt, im Vergleich zu 2000, der Netto-Wärmeeintrag durch die Infiltration von Birswasser bis 2055 um im Mittel 42 % und bis 2085 um im Mittel 62 % zu, wobei die Bandbreite für die verschiedenen Jahreszeiten und Klimaszenarien gross ist.
- Der Wärmeaustausch über die künstliche Grundwasseranreicherung zeigt für die verschiedenen Jahreszeiten vergleichsweise geringere thermische Auswirkungen für die untersuchten Klimaszenarien. Ein vergleichsweise hoher Wärmeeintrag, welcher in der Größenordnung des Wärmeeintrages der Birs ist, findet in den Sommermonaten statt. In den Frühlings- und Herbstmonaten nimmt der Wärmeeintrag, in Abhängigkeit der unterschiedlichen Klimaszenarien, leicht zu.
- Der Wärmeaustrag durch die Trinkwasserentnahmen nimmt, von 2000 bis 2055 um im Mittel 36 % und von 2000 bis 2085 um im Mittel 56 % zu. Entsprechend steigen die simulierten Temperaturen des entnommenen Trinkwassers, in Abhängigkeit des untersuchten Klimaszenarios, um 0.85 bis 3.2 °C bis 2055 und um 0.3 bis 5.4 °C bis 2085 an.
- Betriebsszenarien mit erhöhten Anreicherungsmengen resultieren erwartungsgemäss in einer Erhöhung des Wärmeaustausches. Durch einen kontinuierlichen Betrieb der Anreicherung reduziert sich der Wärmeaustrag bei den Entnahmen um bis zu 9 %. Dies würde in tieferen Temperaturen des entnommenen Trinkwassers resultieren.

4.3 IWRM AP2

4.3.1 Thermische Nutzung des Anreicherung- und Entnahmewasser

Theoretisches thermisches Potential Lange Erlen

Abb. 28 zeigt das berechnete (Gleichung 2) theoretische thermische Potential im Anreicherungs- und Entnahmewasser der Trinkwasserbrunnen in den Langen Erlen unter der Annahme, dass sowohl das Anreicherungswasser als auch das entnommene Trinkwasser immer ≤ 10 °C betragen soll.

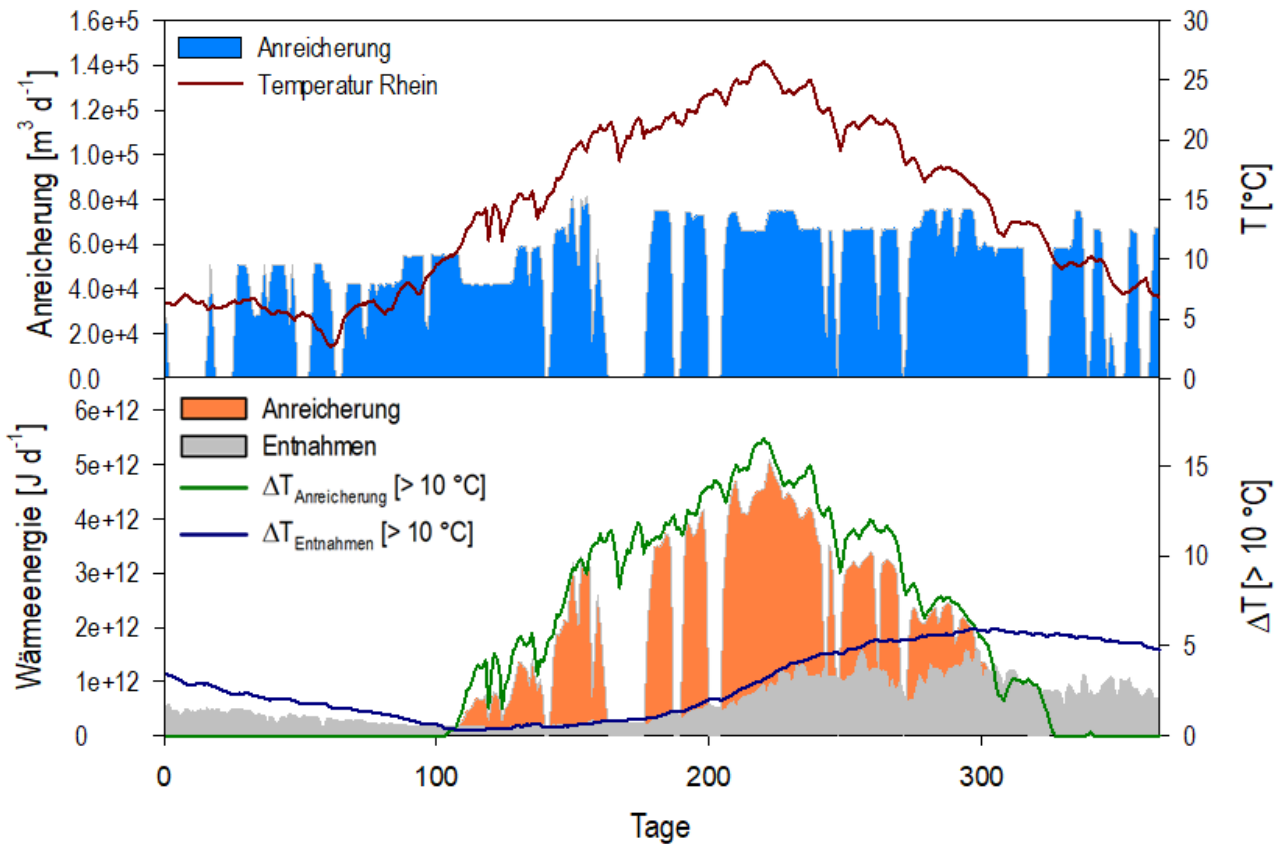


Abb. 28 Ableitung des theoretischen thermischen Potentials aus dem Anreicherungs- und Entnahmewasser der Trinkwasserbrunnen in den Langen Erlen, dargestellt für das Jahr 2018. Oben: Anreicherungsmengen und Temperaturverlauf des Rheins. Unten: Entzug von Wärmeenergie aus dem Anreicherungs- und Entnahmewasser, dargestellt zusammen mit den Temperaturdifferenzen des Anreicherungs- und Entnahmewassers (Mittelwert aller Brunnen) zu 10 °C.

Aus dem Anreicherungswasser könnten demnach im Sommerhalbjahr bis zu $5.1 \text{ E}+12 \text{ J d}^{-1}$ (59 MW) und im Mittel $1.2 \text{ E}+12 \text{ J d}^{-1}$ (14 MW) Wärme entzogen werden. Das berechnete Potential ist in der gleichen Grössenordnung wie jenes mit dem Wärmetransportmodell simulierte (vgl. Abb. 14). Aus dem Entnahmewasser könnten theoretisch v.a. vom Spätsommer und in den Herbstmonaten bis zu $1.5 \text{ E}+12 \text{ J d}^{-1}$ (17 MW) und im Mittel $5.5 \text{ E}+11 \text{ J d}^{-1}$ (6 MW) Wärme entzogen werden.

Die Infiltration des «kälteren» Anreicherungswassers würde dazu führen, dass sich die Temperaturen des entnommenen Wassers der Trinkwasserbrunnen in den Langen Erlen um im Mittel 0.9 und 4.5 °C reduzieren, jene der Brunnen 3 und 12 werden fast gar nicht beeinflusst (Tab. 10 & Abb. E1).

Tab. 10 Veränderung der Entnahmetemperaturen der Trinkwasserbrunnen in den Langen Erlen im Vergleich zum Ist-Zustand durch die Infiltration von Anreicherungswasser welches immer ≤ 10 °C beträgt.

Veränderung	B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 6
ΔT (NEU-IST)	2.1	4.5	0.0	3.5	2.6	2.0
	B 7	B 8	B 10	B 11	B 12	
ΔT (NEU-IST)	1.2	2.9	4.5	0.9	0.1	

Theoretisches thermisches Potential Hardwald

Abb. 29 zeigt das berechnete (Gleichung 2) theoretische thermische Potential im Anreicherungs- und Entnahmewasser der Trinkwasserbrunnen im Hardwald unter der Annahme, dass sowohl das Anreicherungswasser als auch das entnommene Trinkwasser immer ≤ 10 °C betragen soll.

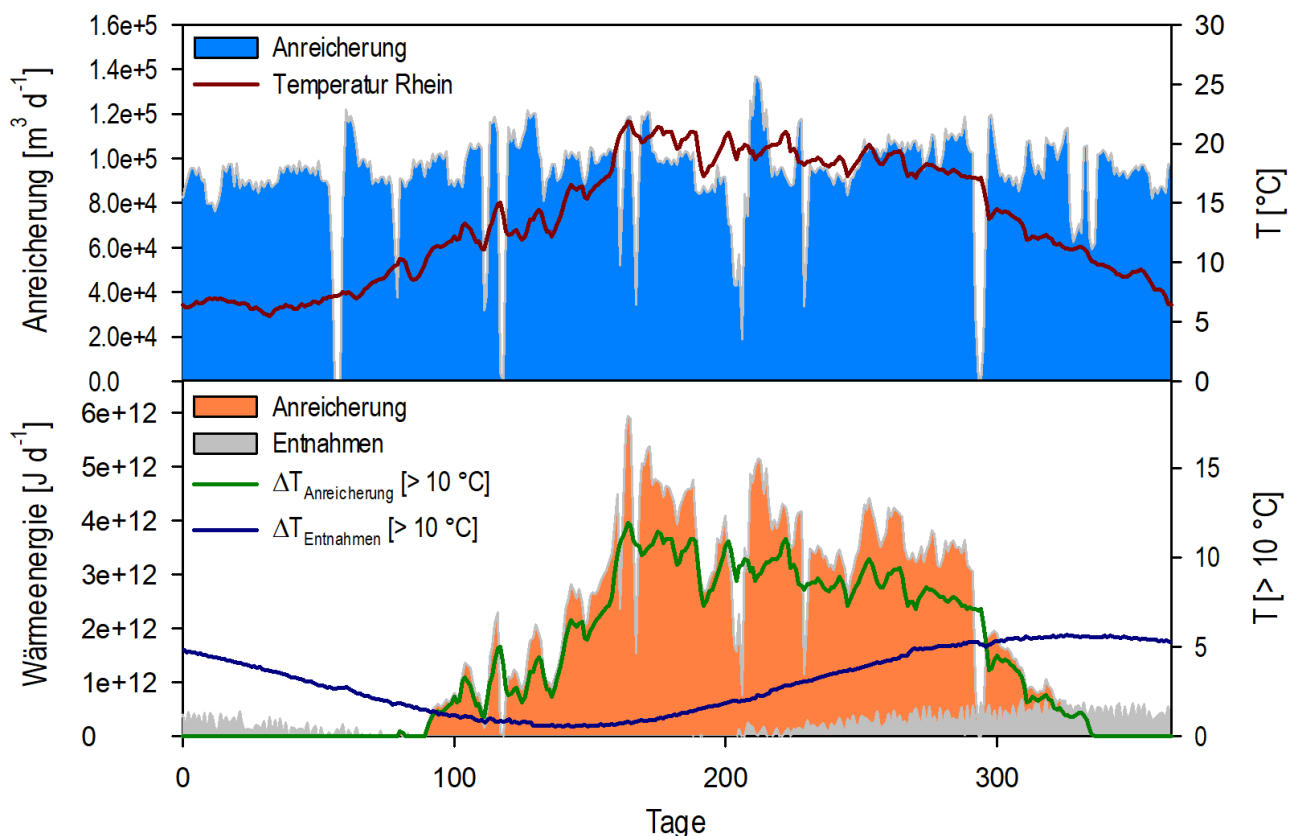
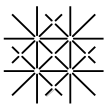


Abb. 29 Ableitung des theoretischen thermischen Potentials aus dem Anreicherungs- und Entnahmewasser der Trinkwasserbrunnen im Hardwald, dargestellt für das Jahr 2014. Oben: Anreicherungsmengen und Temperaturverlauf des Rheins. Unten: Entzug von Wärmeenergie aus dem Anreicherungs- und Entnahmewasser, dargestellt zusammen mit den Temperaturdifferenzen des Anreicherungs- und Entnahmewassers (Mittelwert aller Brunnen) zu 10 °C.



Aus dem Anreicherungswasser könnten im Sommerhalbjahr bis zu $5.9 \text{ E}+12 \text{ J d}^{-1}$ (69 MW) und im Mittel $1.8 \text{ E}+12 \text{ J d}^{-1}$ (20 MW) Wärme entzogen werden. Das berechnete Potential ist in der gleichen Grössenordnung wie jenes mit dem Wärmetransportmodell simulierte (vgl. [Abb. 19](#)). Aus dem Entnahmewasser könnten v.a. vom Spätsommer und in den Herbstmonaten bis zu $7.1 \text{ E}+11 \text{ J d}^{-1}$ (8 MW) und im Mittel $1.1 \text{ E}+11 \text{ J d}^{-1}$ (1 MW) Wärme entzogen werden.

Die Infiltration des «kälteren» Anreicherungswassers würde dazu führen, dass sich die Temperaturen des entnommenen Wassers um im Mittel 0.6 bis 2.8 °C reduzieren ([Tab. 11](#) & [Abb. E2](#) - [Abb. E4](#)).

Tab. 11 Veränderung der Entnahmetemperaturen der Trinkwasserbrunnen der Hardwasser AG im Vergleich zum Ist-Zustand durch die Infiltration von Anreicherungswasser welches immer ≤ 10 °C beträgt.

Veränderung	BL21A1	BL21A4	BL21A5	BL21A6	BL21A7	BL21A9	BL21A10	BL21A11	BL21A12	BL21A13	BL21A14
ΔT (NEU-IST)	-2.5	-1.3	-1.5	-1.8	-0.8	-1.6	-2.1	-2.0	-2.0	-2.0	-1.8
	BL21A15	BL21A16	BL21A17	BL21A18	BL21A19	BL21A20	BL21A21	BL21A22	BL21A23	BL21A24	
ΔT (NEU-IST)	-1.8	-2.0	-2.5	-2.4	-2.4	-2.2	-1.9	-1.4	-1.0	-0.8	
	BL21A25	BL21A26	BL21A27	BL21A28	BL21A29	BL21A30	BL21A31	BL21A32	BL21A33	BL21A34	
ΔT (NEU-IST)	-0.3	-0.6	-0.9	-1.2	-1.7	-2.5	-2.2	-2.8	-2.5	-2.3	

Theoretisches thermisches Potential Unteres Birstal

[Abb. 30](#) zeigt das berechnete (Gleichung 2) theoretische thermische Potential im Anreicherungs- (AAA) und Entnahmewasser des Trinkwasserbrunnens Kägen der Gemeinde Aesch im unteren Birstal unter der Annahme, dass sowohl das Anreicherungswasser als auch das entnommene Trinkwasser immer ≤ 10 °C betragen soll.

Aus dem Anreicherungswasser der AAA könnten im Sommerhalbjahr bis zu $1.2 \text{ E}+12 \text{ J d}^{-1}$ (14 MW) und im Mittel $2.0 \text{ E}+11 \text{ J d}^{-1}$ (2.4 MW) Wärme entzogen werden. Das berechnete Potential ist in der gleichen Grössenordnung wie jenes mit dem Wärmetransportmodell simulierte (vgl. [Abb. 24](#)). Ein Wärmeentzug aus dem Entnahmewasser ist gering und wird nicht weiter behandelt.

Die Infiltration des «kälteren» Anreicherungswassers würde dazu führen, dass sich die Temperaturen des entnommenen Wassers des Trinkwasserbrunnen Aeschfeld und Kägen um im Mittel 0.3 und 1.2 °C reduzieren, jene der Brunnen der Gemeinde Reinach werden teilweise gar nicht beeinflusst oder reduzieren sich um im Mittel 0.3 und 2.3 °C ([Tab. 12](#) & [Abb. E5](#)).

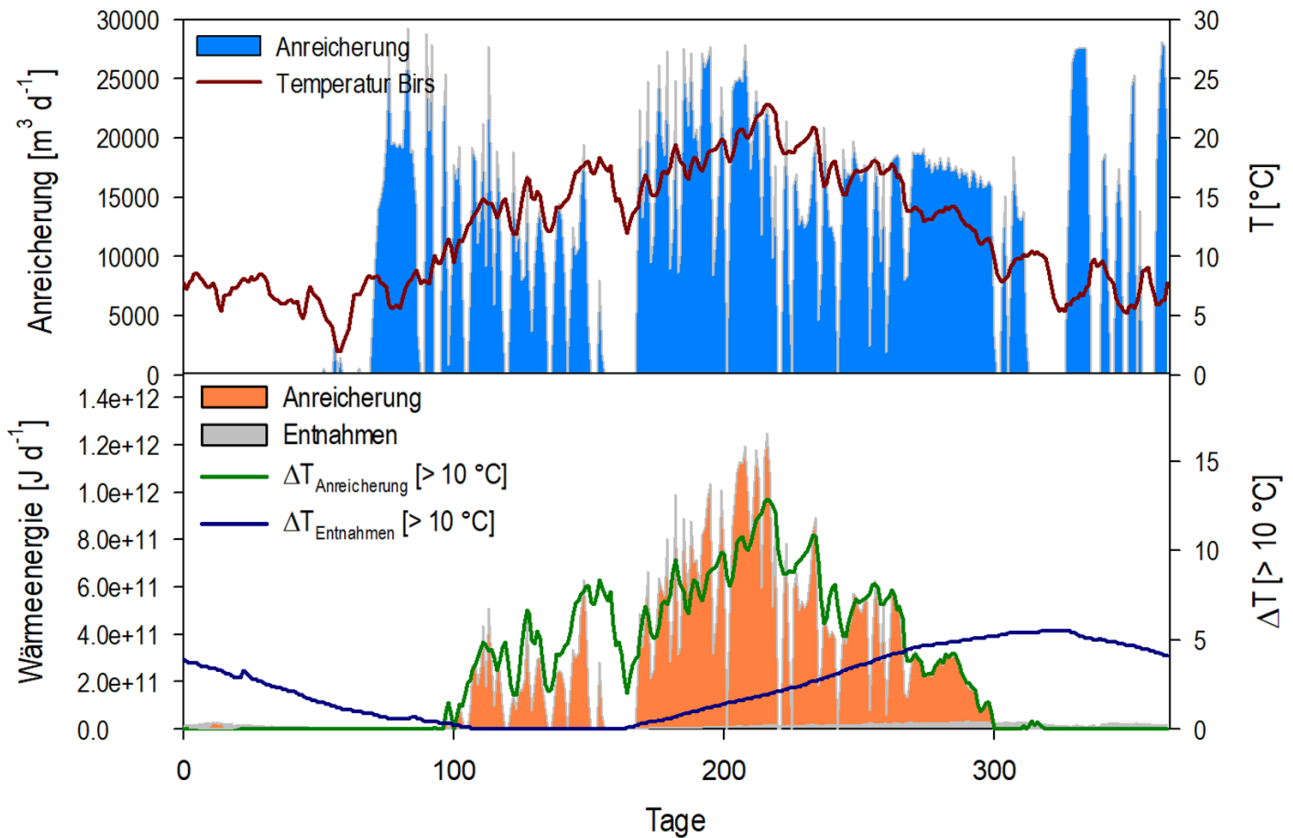


Abb. 30 Ableitung des theoretischen thermischen Potentials aus dem Anreicherungs-(AAA) und Entnahmewasser des Trinkwasserbrunnens Kägen der Gemeinde Aesch im unteren Birstal, dargestellt für das Jahr 2018. Oben: Anreicherungen und Temperaturverlauf der Birs. Unten: Entzug von Wärmeenergie aus dem Anreicherungs- und Entnahmewasser, dargestellt zusammen mit den Temperaturdifferenzen des Anreicherungs- und Entnahmewassers (Mittelwert aller Brunnen) zu 10 °C.

Tab. 12 Veränderung der Entnahmetemperaturen der Trinkwasserbrunnen der Gemeinde Aesch (Aeschfeld und Kägen; BL11A2/3) und Reinach (BL24A1-10) im Vergleich zum Ist-Zustand durch die Infiltration von Anreicherungswasser welches immer ≤ 10 °C beträgt.

Veränderung	BL11A2	BL11A3	BL24A1	BL24A2	BL24A3
ΔT (NEU-IST)	-0.3	-1.2	-2.3	-1.9	-0.4
	BL24A4	BL24A5	BL24A6	BL24A7	BL24A8
ΔT (NEU-IST)	0.0	-0.5	-0.3	0.0	0.0

4.3.2 Regeneration «erwärmter» Oberflächengewässer

Die Klimasensitivität von Flüssen lässt sich anhand von Schwellenwerten darstellen. In der Schweiz ist eine Wassertemperatur von 25 °C gesetzlich festgelegt, oberhalb derer kritische Auswirkungen auf lokale Fischarten zu erwarten sind und die anthropogene Nutzung eingeschränkt wird.

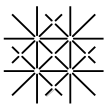
Abbildungen [Abb. A7](#) bis [Abb. A10](#) im Anhang zeigen für die verschiedenen untersuchten Fließgewässer und Klimaszenarien die prognostizierte Entwicklung der Anzahl Tage an welchen die Oberflächenwassertemperaturen über 25 °C betragen ([Tab. 1](#)). Die Auswertungen zeigen, dass für das Klimaszenario RCP8.5 im Durchschnitt an 10 bis 40 Tagen im Jahr die Temperaturen in den Fließgewässern über 25° betragen. Für das Klimaszenario RCP2.6 ist das Überschreiten des Schwellenwerts vergleichbar mit den aktuellen Bedingungen. Die zu erwartenden Auswirkungen hängen stark vom verwendeten Klimamodell ab. Am stärksten betroffen ist der Rhein (Stationen 2289 und 2091), der schon heute den 25 °C-Schwellenwert am häufigsten überschreitet.

[Tab. 13](#) fasst minimale, mittlere und maximale Werte der (1) Energie, welche den verschiedenen Oberflächengewässern entnommen und (2) Wassermengen mit einer Temperatur von 10 °C, welche den Oberflächengewässern hinzugegeben werden müssten, um die Oberflächengewässertemperaturen auf unter 25 °C zu halten. Beides für die Klimaprojektionen mit den geringsten (Szenario 1: RCP26_DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11) und den gravierendsten (Szenario 6: RCP85_SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44) Auswirkungen der Klimaänderungen auf die Oberflächengewässer.

Tab. 13 Minimale, mittlere und maximale Werte der (1) Energie (E), welche den verschiedenen Oberflächengewässern entnommen und (2) Wassermengen (Q_2), welche den Oberflächengewässern hinzugegeben werden müssten, um die Oberflächengewässertemperaturen < 25 °C zu halten. Energie in kW und Wassermengen in $m^3 d^{-1}$ mit Ausnahme des Rheins in MW und $m^3 s^{-1}$.

		Wiese (2199)			Rhein (2289)			Rheinfelden (2091)			Birs (2106)		
		Min	Mit	Max	Min	Mit	Max	Min	Mit	Max	Min	Mit	Max
Szenario 1: RCP26_DMI- HIR- HAM_ECEARTH _EUR11	E [kW]	20	3'631	24'10 8	535 MW	1'289 MW	2'018 MW	-	-	-	341	2'092	3'554
	Q₂ [m ³ d ⁻¹]	28	4'555	29'60 8	8.4 m ³ s ⁻¹	19.7 m ³ s ⁻¹	30.4 m ³ s ⁻¹	-	-	-	467	2'837	4'807
Szenario 6: RCP85_SMHI- RCA_ECEARTH _EUR44	E [kW]	20	6'228	48'91 6	20 MW	3'090 MW	11'03 5 MW	21 MW	2'503 MW	8'847 MW	588	10'90 1	53'34 3
	Q₂ [m ³ d ⁻¹]	28	7'226	56'46 8	0.3 m ³ s ⁻¹	43.0 m ³ s ⁻¹	127.0 m ³ s ⁻¹	0.3 m ³ s ⁻¹	35.7 m ³ s ⁻¹	107.1 m ³ s ⁻¹	804	13'73 6	58'43 2

Dem Fließgewässer Wiese müssten, in Abhängigkeit des betrachteten Klimaszenarios, 20 bis 48'916 kW und im Mittel 3'631 kW (Szenario 1) und 6'228 kW (Szenario 6) Wärme entzogen werden um dieses auf unter 25 °C zu halten. Entsprechend müsste, in Abhängigkeit des betrachteten Klimaszenarios, die Wassermengen, welche mit 10 °C dem Wiesewasser hinzugegeben werden müssten, um dieses auf unter 25 °C zu halten, zwischen minimal 28 und maximal 56'468 $m^3 d^{-1}$ und im Mittel 4'555 $m^3 d^{-1}$ (Szenario 1) und 7'226 $m^3 d^{-1}$ (Szenario 6) liegen. Die Maximalwerte sind in der Größenordnung der Wassermengen, welche bei erhöhtem Betrieb künstlich angereichert werden ([Tab. 4](#)).



Der Vollständigkeit halber werden für die Messstandorte am Rhein (Stationen 2289 und 2091) die Energie- und notwendigen Wassermengen angegeben. Sie zeigen das enorme Wärmepotential, welches dem Rhein entnommen werden könnte und schon in vorausgehenden Studien untersucht wurde (Sres, 2016)¹⁸. Diese liegen, in Abhängigkeit des betrachteten Klimaszenarios, zwischen minimal 20 und maximal 11'025 MW und im Mittel 1'289 MW (Szenario 1) und 2'503 bis 3'090 MW (Szenario 6)¹⁹. Für das betrachtete Klimaszenario 1 mit den geringsten Auswirkungen der Klimaänderungen auf den Rhein bei Rheinfeldern bleiben die Fließgewässertemperaturen unterhalb 25 °C. Aufgrund der erforderlichen enormen Wassermengen, die zur Kühlung des Rheinwassers zugeführt werden müssten, wird dieser Aspekt hier nicht weiter behandelt.

Dem Fließgewässer Birs müssten, in Abhängigkeit des betrachteten Klimaszenarios, 341 bis 53'343 kW und im Mittel 2'092 kW (Szenario 1) und 10'901 kW (Szenario 6) Wärme entzogen werden um dieses auf unter 25 °C zu halten. Entsprechend müsste, in Abhängigkeit des betrachteten Klimaszenarios, die Wassermengen welche mit 10 °C dem Birswasser hinzugegeben werden müssten um dieses auf unter 25 °C zu halten zwischen minimal 467 und maximal 58'432 m³ d⁻¹ und im Mittel 2'837 m³ d⁻¹ (Szenario 1) und 13'736 m³ d⁻¹ (Szenario 6) liegen. Die Maximalwerte sind somit ca. 4- bis 5-mal höher als jene, welche bei mittlerem Betrieb künstlich angereichert werden (Tab. 6).

Gezielte Steuerung der Grundwasserexfiltration - Unteres Birstal

Abb. 31 die Ergebnisse der Untersuchungen für einen Fließgewässerabschnitt im unteren Birstal, in dem die Exfiltration des Grundwassers der dominierende Interaktionsprozess ist. Dargestellt werden Fließlinien, welche ausgehend vom Fließgewässerabschnitt berechnet wurden. Hierfür wurden Partikel sowohl am Anfang (01. Juni) als auch am Ende (31. August) simuliert und «rückwärts» gerechnet. Ziel war es, dass in den Sommermonaten mehr «kühleres» Grundwasser in den betrachteten Flussabschnitt exfiltriert, dass ein halbes Jahr im Grundwasserleiter zurückgelegt hat. Im Vergleich zum Wassertransport muss für die Betrachtung des thermischen Transportes eine Retardation berücksichtigt werden, welche auf Grundlage von Untersuchungen in Basel mit einem Faktor 2 berücksichtigt wurde (Epting et al., 2013). Dies resultierte in einer Rückwärtsrechnung der Partikel von einem viertel Jahr (72 Tage). Als Resultat kann ein Bereich definiert werden in welchem eine künstliche Anreicherung von vergleichsweise «kühlerem» Birswasser in den Wintermonaten optimal stattfinden würde, damit vermehrt «kühleres» Grundwasser in den Sommermonaten im betrachteten Fließgewässerabschnitt exfiltriert (Abb. 31).

¹⁸ «Potenzialstudie Thermische Nutzung Rhein». Der Rhein wird schon seit langem für Kühl- und Heizzwecke genutzt, allen voran für Kühlzwecke durch die Pharmaunternehmen Novartis und Roche als auch durch das Universitätsspital Basel.

¹⁹ Zum Vergleich: Der Wärmeleistungsbedarf der Stadt Basel für Komfortwärme und Warmwasser liegt bei rund 2'300 MW. Das bedeutet, dass ganz Basel mit dem Rhein beheizt werden könnte.

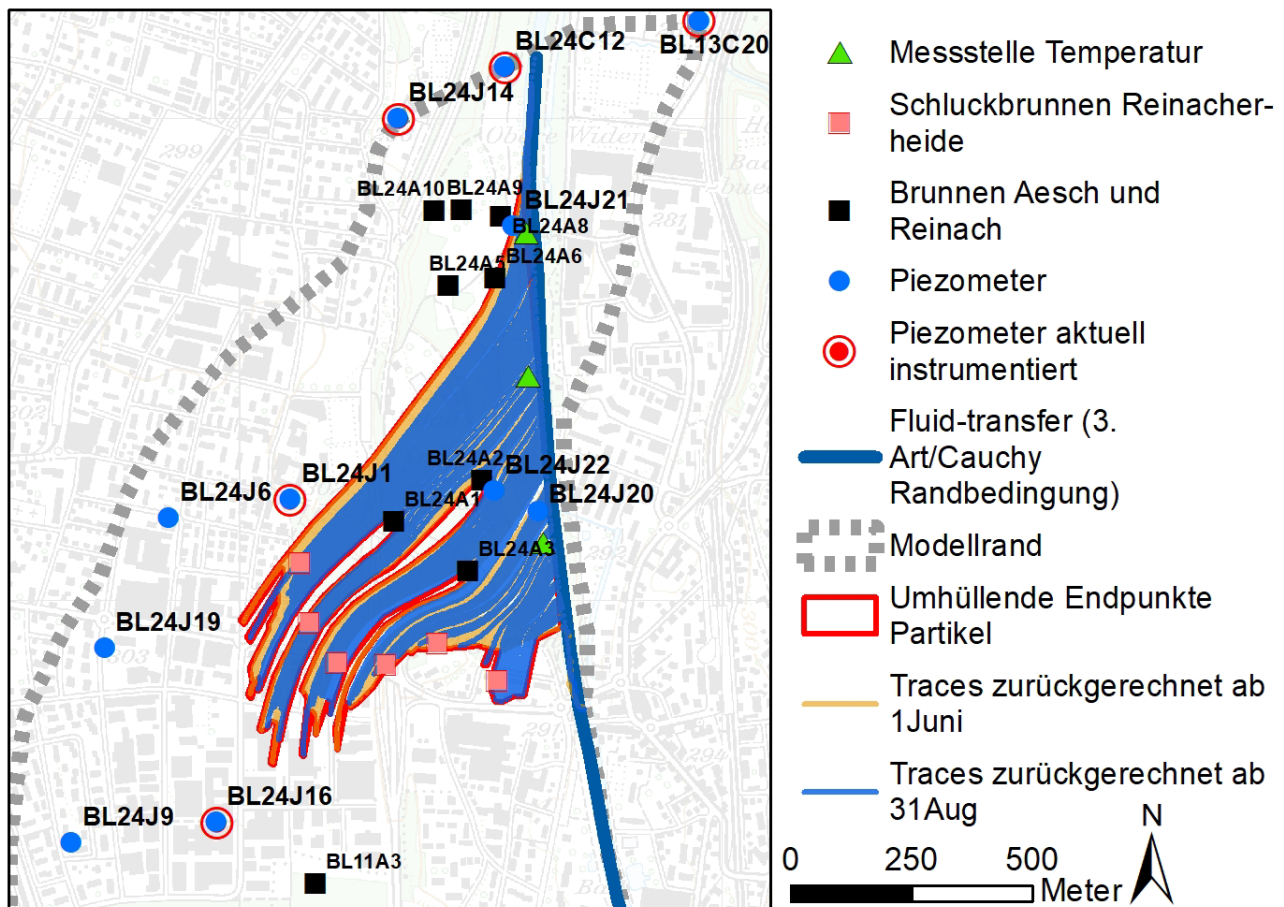


Abb. 31 Simulation von Fließlinien und Schluckbrunnen zur künstlichen Grundwasseranreicherung in Bereich der Reinacher Heide des unteren Birstals.

In einem weiteren Schritt wurde evaluiert wie stark eine künstliche Anreicherung des Grundwassers im definierten Bereich die Temperaturen des exfiltrierten Wassers reduzieren könnten. Hierfür wurde ein Szenario mit 6 Schluckbrunnen in der Reinacherheide berechnet. Vom Tag 0 bis 100 und 300 bis 365, was ungefähr der Zeit entspricht, in dem die Temperatur des Birstwasser unter 10 °C beträgt, werden pro Brunnen $0.025 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (insgesamt $0.15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) Wasser angereichert. Als Eingabetemperatur wurde die gemessene Temperatur des Birstwasser für den betrachteten Zeitraum verwendet (Abb. 32).

Abb. 31 zeigt die Standorte der Messstellen, an welchen die Temperatur abgegriffen wurde. Für den untersuchten Flussabschnittes wird die Temperatur des exfiltrierende Grundwasser um bis zu 2.7 °C und im Mittel um 1.6 °C (nördlicher Bereich), um bis 1.4 °C und im Mittel um 0.7 °C (mittlerer Bereich) und um bis zu 4.3 °C und im Mittel um 3.0 °C (südlicher Bereich) reduziert. V.a. in den Sommermonaten könnten somit die Temperaturen im südlichen und mittleren Bereich des untersuchten Flussabschnittes um mehrere °C reduziert werden.

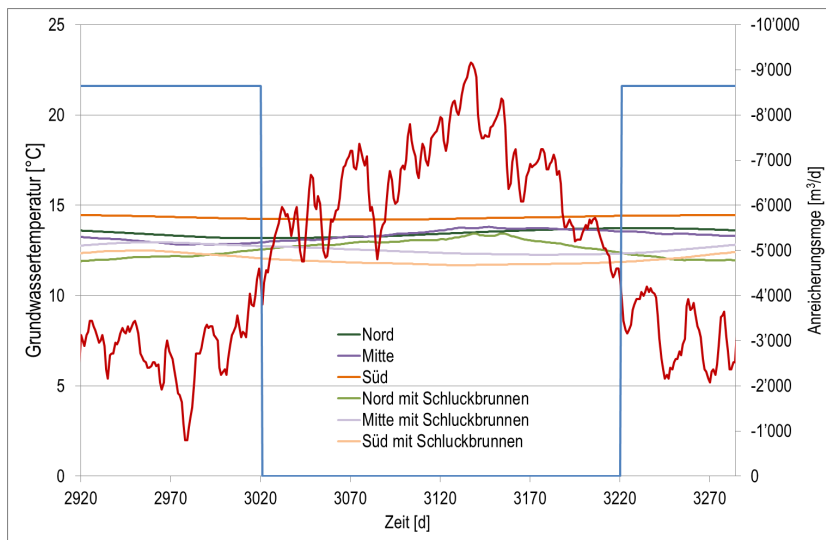


Abb. 32 Temperaturentwicklung in der Reinacherheide mit und ohne Berücksichtigung Schluckbrunnen (blaue Linie: Anreicherungs mengen; rote Linie Temperatur Schluckbrunnen).

Die Exfiltrationsmengen sind verglichen mit dem mittleren Birsabfluss (ca. $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) sehr gering und haben somit auch thermisch keine grosse Bedeutung. Lokale Exfiltrationszonen können aber durchaus eine Rolle bzgl. potenziellen Rückzugsgebieten zum Schutz von Fischen während Hitzeereignissen spielen (siehe Anwendungsbeispiel «Grundwasseraufstösse Rhein»).

Gezielte Steuerung der Grundwasserexfiltration – Lange Erlen

Zur Beurteilung der durch die Klimaänderungen einhergehenden Entwicklung der Fluss-Grundwasser Interaktion wurden exemplarisch für den einzigen Abschnitts des Fließgewässers Wiese (Abb. 5), in welchen die Grundwasserexfiltration kontinuierlich der dominierende Fluss-Grundwasser Interaktionsprozess ist, die Veränderung des Wasser- und Energieaustausches ausgewertet. Dabei wurde der Ist-Zustand mit den unterschiedlichen Klimaprojektionen verglichen (Tab. 2).

Abb. 33 zeigt eine zusammenfassende Darstellung der Exfiltration von Grundwasser im Bereich des Abschnittes 1 entlang der Wiese im Grundwasserabstrom der Anreicherungsfelder Vordere & Hintere Stellmatten (Abb. 5) für die verschiedenen Jahreszeiten der Referenzjahre 2000, 2055 und 2085 und alle untersuchten Klimaszenarien in den Langen Erlen. In den Winter- und Frühlingsmonaten exfiltriert im betrachteten Fließgewässerabschnitt kaum Grundwasser in das Oberflächengewässer. In den Sommer- und v.a. in den Herbstmonaten nimmt die Exfiltration von Grundwasser in die Wiese zu. Die Exfiltrationsmengen sind aber verglichen mit dem mittleren Wieseeabfluss (ca. $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) sehr gering und haben somit auch thermisch keine grosse Bedeutung.

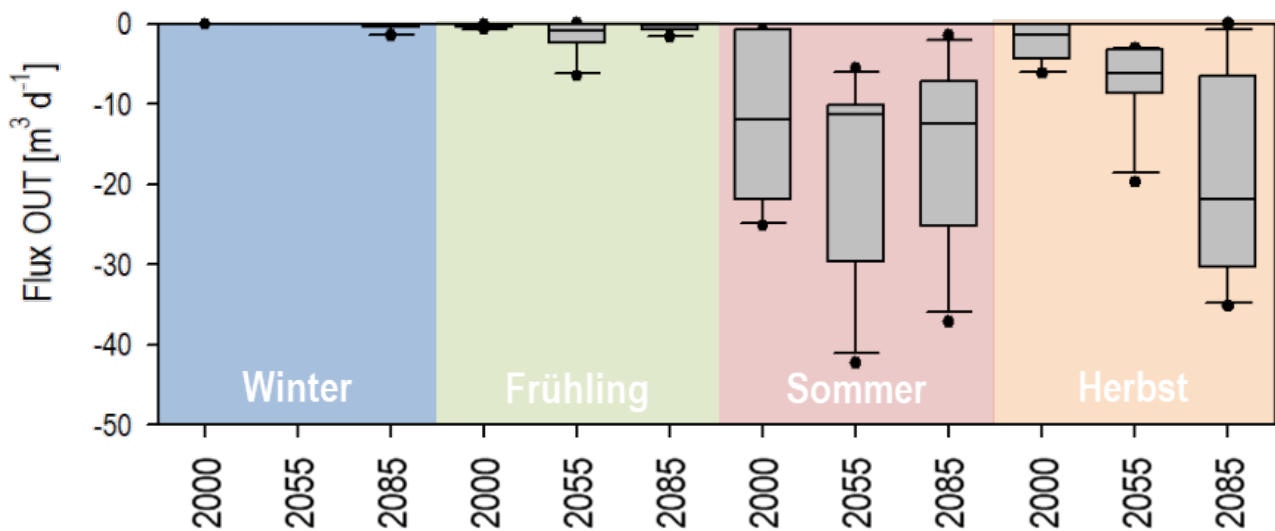


Abb. 33 Zusammenfassende Darstellung der Exfiltration von Grundwasser im Bereich des Wiese-Abschnittes 1 (Abb. 5) für die verschiedenen Jahreszeiten der Referenzjahre 2000, 2055 und 2085 und alle untersuchten Klimaszenarien in den Langen Erlen.

Anwendungsbeispiele im Raum Basel – MAR- und MSWR-Konzepte Grundwasserkörper Eibach

Im Rahmen einer hydrogeologischen Analyse des Grundwasserkörpers entlang des Eibach oberhalb von Gelterkinden (Kanton Basel-Landschaft) konnten Grundlagen für die Ausarbeitung von MAR- und MSWR-Konzepten erarbeitet werden (BGA-BL-185²⁰).

Eine erste Auswertung für den gesamten Grundwasserleiter entlang des Eibachs wurde bereits im Rahmen von Hydro-CH2018 vorgenommen (Epting et al. (2021); Epting et al. (2020)). Im Rahmen der vorgenommenen Untersuchungen wurden einerseits die Aquifergeometrien der Grundwasservorkommen entlang des Eibachs oberhalb von Gelterkinden untersucht und andererseits eine erste Einschätzung bzgl. der Interaktion der Grundwasservorkommen mit dem Oberflächengewässer sowie eine grobe Einschätzung von Grundwasserfließwegen, -geschwindigkeiten und -zeiten vorgenommen.

Abb. 34 zeigt das hydrogeologische Längsprofil entlang des Eibachs und durch den Grundwasserkörper. Deutlich sind, durch Felsstufen voneinander getrennte Bereiche des Grundwasservorkommens zu erkennen. Diese erlauben es das Grundwasservorkommen in 4 Segmente zu unterteilen. Entsprechend dem Konzept von Stanford and Ward (1993)

²⁰ BGA-BL-185 Epting J (2021) Konzept MAR/MSWR Eibach; Hydrogeologische Analyse von Grundwasserkörpern als Grundlage für die Ausarbeitung von MAR- und MSWR-Konzepten (Auftrag: AUE BL)

findet im oberen Bereich (Aufweitung) solcher Beckenstrukturen tendenziell eine Infiltration vom Fluss in das Grundwasser und im unteren Bereich (Verengung) eine Exfiltration von Grundwasser in den Fluss statt.

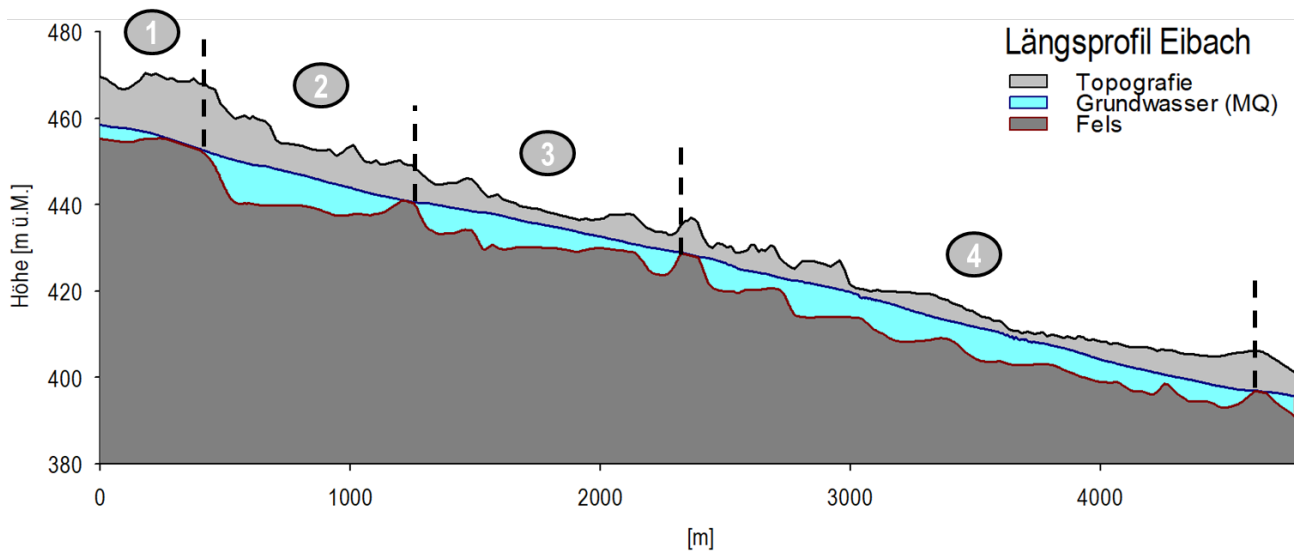


Abb. 34 Hydrogeologisches Längsprofil entlang des Eibachs und vier durch Felsstufen voneinander getrennte Grundwasserbereiche (Lage Segmente 1-4 siehe [Abb. 35](#)).

Die Auswertungen erlauben eine erste Beurteilung im Zusammenhang mit potenziellen Standorten für regionale Speicher ([Abb. 35](#)) und schliessen mit Empfehlungen für weitergehende Untersuchungen. Diese umfassen neben Konzepten für die Erstellung von Monitoringsystemen auch die Erarbeitung von lokalen Grundwasserströmungsmodellen in Kombination mit Oberflächenwasser-Modellen zur Abbildung und Quantifizierung der Fluss-Grundwasser Interaktion sowie Optimierung von verschiedenen MAR & MSWR Szenarien.

Neben einer quantitativen Optimierung, einschliesslich einer Erhöhung des Grundwasserdargebots und der Grundwasserexfiltration während Niedrigwasserperioden, würde auch eine ökologische Aufwertung von Flussabschnitten (Massnahme bzgl. Hitzestress) erzielt.

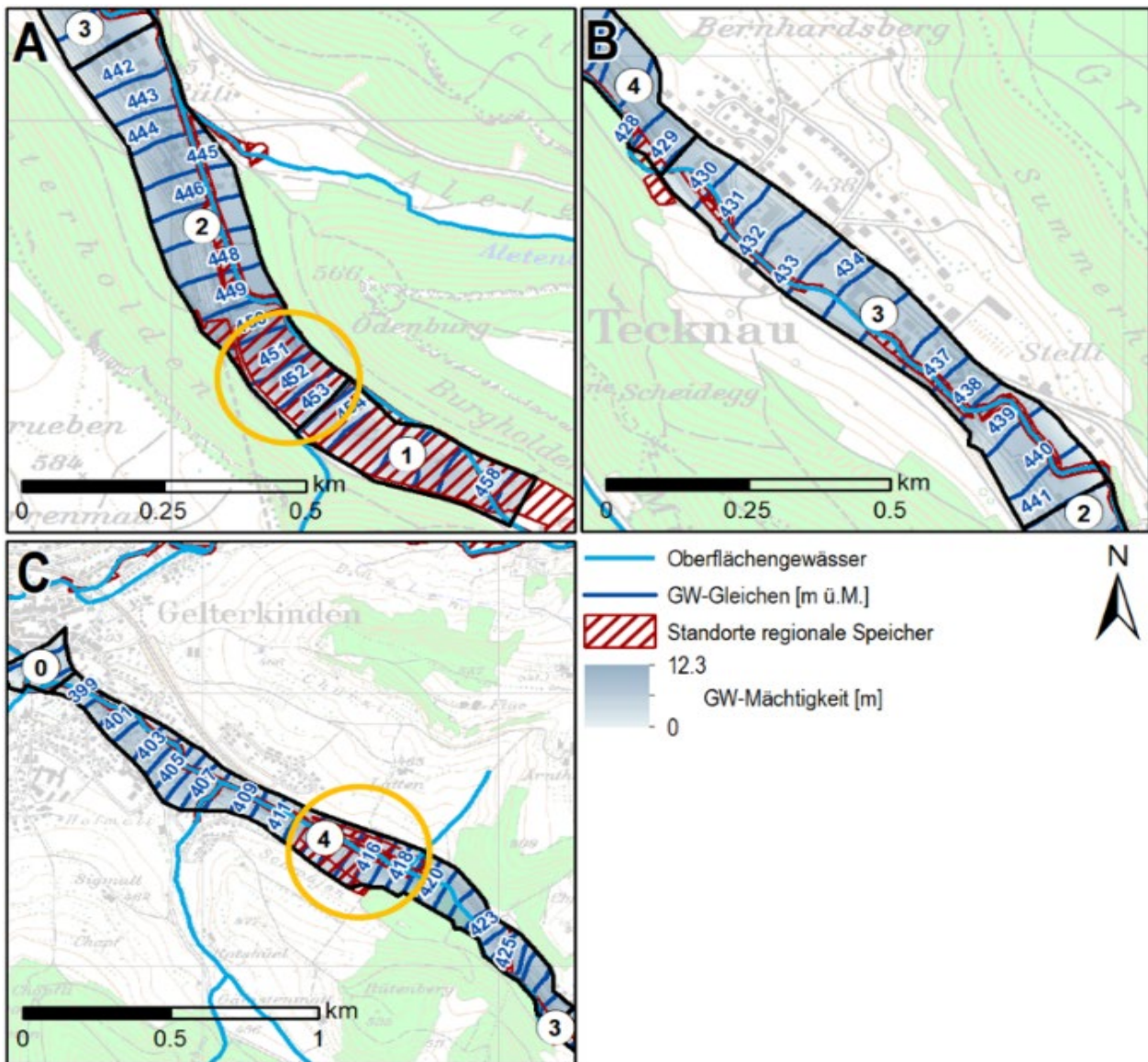


Abb. 35 Grundwasservorkommen (Grundwassergleichen und -mächtigkeiten) entlang des Eibachs für die verschiedenen Segmente: A (Segmente 1 & 2), B (Segment 3) und C (Segment 4). Auch dargestellt sind potenzielle Standorte für regionale Speicher.

Anwendungsbeispiele im Raum Basel – Grundwasseraufstösse Rhein

Ziel der hydrogeologischen Grundlagenerarbeitung «Grundwasseraufstösse Rhein» (BGA-BS-162²¹) war es mögliche Grundwasseraufstosszonen an der Rheinsohle zu lokalisieren.

²¹ BGA-BS-162 Epting J, Scheidler S (2021) "Grundwasseraufstösse Rhein": Erarbeitung hydrogeologischer Grundlagen (Auftrag: AUE & TBA BS)

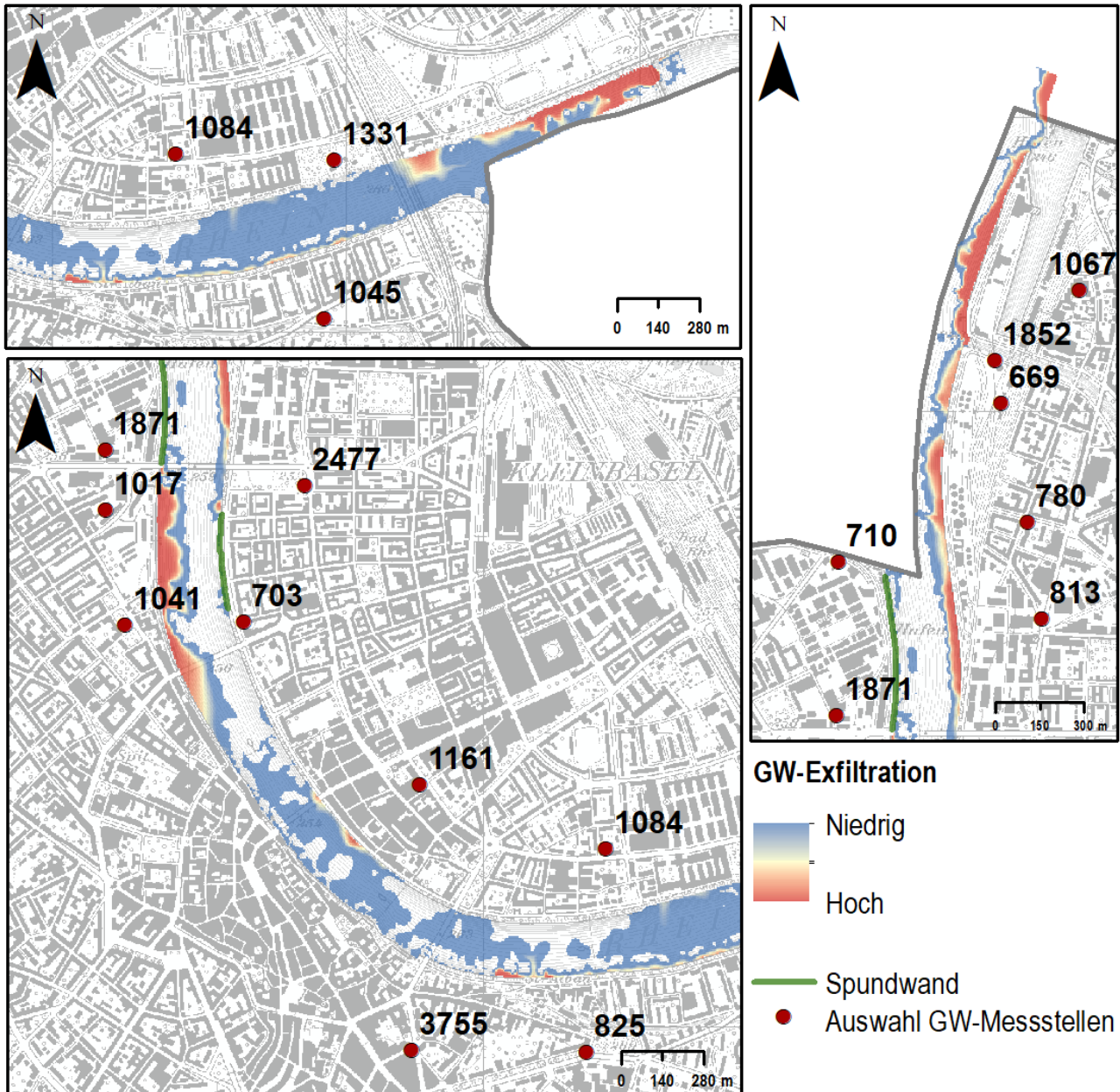
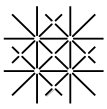


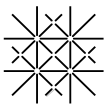
Abb. 36 Grundwasserexfiltration und Austauschraten über die Flusssohle für drei Rheinabschnitte in Basel-Stadt.

Im Rahmen der Auswertungen wurden einerseits die Aquifergeometrien der Grundwasservorkommen unterhalb der Rheinsohle dargestellt und andererseits eine erste Einschätzung bzgl. der Interaktion der Grundwasservorkommen in Basel mit dem Oberflächengewässer Rhein vorgenommen. Die Auswertungen erlauben eine erste Beurteilung potenzieller Standorte der Interaktion der Grundwasservorkommen mit dem Oberflächengewässer (Abb. 36). Mit den erarbeiteten hydrogeologischen Grundlagen «Grundwasseraufstösse Rhein» ist es möglich Grundwasseraufstosszonen an



der Rheinsohle zu lokalisieren, welche es erlauben Massnahmen zum Schutz kühler Bereiche an der Rheinsohle zu definieren und umzusetzen.

Weitergehende Analysen könnten folgende Arbeiten umfassen eine: (1) Beurteilung der Auswirkungen von Klimaänderungen und Weiterentwicklung der existierenden Wärmetransportmodelle; (2) Aktualisierung Grundlagendaten, einschliesslich Felsoberfläche sowie Kartierung existierender Verbauungen, Struktur Fliessgewässersohle (Kolmation) und Sohldaten des Rheins sowie, (3) Erarbeitung eines Messkonzeptes zur Untersuchung der Fluss-Grundwasserinteraktion v.a. in den Uferbereichen. So konnten schon im Rahmen einer Pilotstudie im Dezember, auf Grundlage von Temperaturmessungen im Uferbereich des Rheins, die Exfiltration von Grundwasser bestätigt werden.



5 Diskussion, Schlussfolgerungen und Ausblick

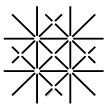
Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserressourcen zeigen sich zunehmend und es können bereits heute quantitative und qualitative Beeinträchtigungen von Fließgewässern und lokalen Trinkwasserversorgungen beobachtet werden. Für Oberflächengewässer und Grundwasservorkommen sollte bekannt sein, welche Auswirkungen auf die Grundwasserquantität und -qualität in Zukunft vermehrt auftreten könnten. Dabei sollten sowohl direkte Einflüsse durch den Klimawandel wie indirekte Einflüsse über veränderte Land- und Wassernutzung berücksichtigt werden. Angesichts der häufiger erwarteten Hitze- und Trockenperioden sollten auch Möglichkeiten zur Regeneration «erwärmter» Oberflächengewässer und die künstliche Anreicherung von Grundwasservorkommen als Teil nachhaltiger Bewirtschaftungsstrategien in Betracht gezogen werden.

Im Rahmen des Projektes EnerPot-MAR-MSWR konnten für drei Grundwasserentnahme- und Anreicherungs-systeme im Raum Basel Modellwerkzeuge erarbeitet werden, welche es ermöglichen das Grundwasserregime, einschliesslich Grundwasserströmung und Wärmetransport zu simulieren. Mit den Modellwerkzeugen wurden hydraulische und thermische Veränderungen vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung und unterschiedlichen Strategien zur Wasserversorgungsplanung evaluiert. Die erarbeiteten anwendungsorientierten Modellwerkzeuge sind flexibel und können auch für zukünftige Fragestellungen weiterentwickelt werden. Modellgestützte Verfahren eröffnen dabei zusätzliche Möglichkeiten für eine nachhaltige Nutzung sowie Grundlagen für eine aktivere Bewirtschaftung von Wasserressourcen.

5.1 Istzustand, Klima- und Betriebsszenarien von Wasserressourcen im Raum Basel

Die untersuchten Wasservorkommen in der Region Basel, in den Langen Erlen, im Hardwald und im unteren Birstal, weisen Ähnlichkeiten im hydraulischen und thermischen Grundwasserregime auf, unterscheiden sich aber auch deutlich in einzelnen natürlichen und anthropogenen Randbedingungen (Abb. 37). Sie haben gemeinsam, dass das Grundwasser an allen drei Standorten künstlich angereichert wird und dass sich die Kälte- (Winter) und Wärmefahnen (Sommer) von den verschiedenen Anreicherungs-systemen im Grundwasserabstrom, dem hydraulischen Gradienten folgend, v.a. zu den Trinkwasserbrunnen bewegen. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse zum Istzustand sowie für die evaluierten Klima- und Betriebsszenarien der Untersuchungsgebiete zusammengefasst.

Im Untersuchungsgebiet der Langen Erlen ist die Wieseinfiltration der dominierende Fluss-Grundwasser Interaktionsprozess (Abb. 37), deshalb findet v.a. im Sommer und Spätsommer ein Wärmeeintrag durch die Wieseinfiltration statt. Durch die Trinkwasserentnahmen findet ein starker Wärmeeintrag statt, welcher durch gemessene erhöhte Temperaturen im geförderten Wasser bestätigt wird. Unter Berücksichtigung aller untersuchten Klimaszenarien nimmt, im Vergleich zu 2000, der Netto-Wärmeeintrag durch die Infiltration von Wiesewasser bis 2055 um im Mittel 42 % und bis 2085 um im Mittel 62 % zu. Entsprechend nimmt auch der Wärmeeintrag über die Trinkwasserentnahmen bis 2055 um im Mittel 36 % und bis 2085 um im Mittel 56 % zu. Als Resultat würden die Temperaturen des entnommenen Trinkwassers um 0.4 bis 1.3 °C bis 2055 und 0.7 bis 3.1 °C bis 2085, im Vergleich zum Referenzjahr 2000, ansteigen.



Im Untersuchungsgebiet Hardwald findet der bedeutendste Wärmeaustausch über die künstliche Grundwasseranreicherung statt (Abb. 37). Über die Trinkwasserentnahmen findet v.a. im Sommer und Spätsommer ein starker Wärmeaustausch statt, welcher durch die gemessenen erhöhten Temperaturen im geförderten Wasser bestätigt wird. Unter Berücksichtigung aller untersuchten Klimaszenarien steigt in den Wintermonaten der Wärmeaustausch durch die Entnahmen von 2000 bis in das Jahr 2085 um im Mittel 38 % an. Als Resultat würden die Temperaturen des entnommenen Trinkwassers um 0.2 bis 1.0 °C bis 2055 und 0.6 bis 4.0 °C bis 2085, im Vergleich zum Referenzjahr 2000, ansteigen. Betriebsszenarien mit erhöhten Pumpraten und Anreicherungsmengen resultieren erwartungsgemäss in einer Erhöhung des Wärmeaustausches, v.a. der Wärmeaustausch nimmt im Vergleich zum Normalbetrieb schon für den Istzustand aber auch unter Berücksichtigung der Klimaszenarien um bis zu 76 % zu.

Im unteren Birstal ist der Wärmeaustausch zwischen der Birs und dem Grundwasserleiter neben der Saisonalität davon abhängig welcher Fliessgewässerabschnitt betrachtet wird. Wohingegen für südliche Fliessgewässerabschnitte die Infiltration von Birswasser in den Grundwasserleiter der dominierende Interaktionsprozess ist, ist es für nördliche Fliessgewässerabschnitte die Exfiltration von Grundwasser in die Birs. Insgesamt ist der Wärmeeintrag in den Grundwasserleiter aus der Birs und über die künstliche Grundwasseranreicherung höher als der Wärmeaustausch (Abb. 37). Über die Trinkwasserentnahmen findet v.a. im Sommer und Spätsommer ein starker Wärmeaustausch statt. Unter Berücksichtigung aller untersuchten Klimaszenarien nimmt v.a. in den Herbstmonaten, im Vergleich zum Referenzjahr 2000, der Netto-Wärmeeintrag durch die Infiltration von Birswasser bis 2055 um im Mittel 42 % und bis 2085 um im Mittel 62 % zu. Der Wärmeaustausch durch die Trinkwasserentnahmen nimmt, von 2000 bis 2055 um im Mittel 36 % und von 2000 bis 2085 um im Mittel 56 % zu. Entsprechend steigen die simulierten Temperaturen des entnommenen Trinkwassers, in Abhängigkeit des untersuchten Klimaszenarios, um 0.85 bis 3.2 °C bis 2055 und um 0.3 bis 5.4 °C bis 2085 an. Betriebsszenarien mit erhöhten Anreicherungsmengen resultieren erwartungsgemäss in einer Erhöhung des Wärmeaustausches. Durch einen kontinuierlichen Betrieb der Anreicherung reduziert sich der Wärmeaustausch bei den Entnahmen um bis zu 9 %. Dies würde in tieferen Temperaturen des entnommenen Trinkwassers resultieren.

5.2 Strategien für IWRM im Raum Basel

Durch einen strategischen Wärmeentzug des Anreicherungswassers in den Langen Erlen von im Mittel 14 MW könnte, in Abhängigkeit des betrachteten Klimaszenarios, die Temperaturen des entnommenen Trinkwassers um im Mittel 0.9 bis 4.5 °C abgekühlt werden. Durch einen Wärmeentzug des Entnahmewassers, um dieses bei ≤ 10 °C zu halten, wäre eine Wärmegewinnung von im Mittel 6 MW theoretisch möglich. Entsprechend könnte durch einen Wärmeentzug des Anreicherungswassers im Hardwald von im Mittel 20 W die Temperaturen des entnommenen Trinkwassers um 0.6 bis 2.8 °C abgekühlt werden. Durch einen Wärmeentzug des Entnahmewassers, um dieses bei ≤ 10 °C zu halten, wäre eine Wärmegewinnung von im Mittel 1 W theoretisch möglich. Durch einen Wärmeentzug des Anreicherungswassers im unteren Birstal von im Mittel 2.4 MW könnten die Temperaturen des entnommenen Trinkwassers um im Mittel 0.3 bis zu 2.3 °C abgekühlt werden. Ein Wärmeentzug des Entnahmewassers im unteren Birstal ist nicht lohnend.

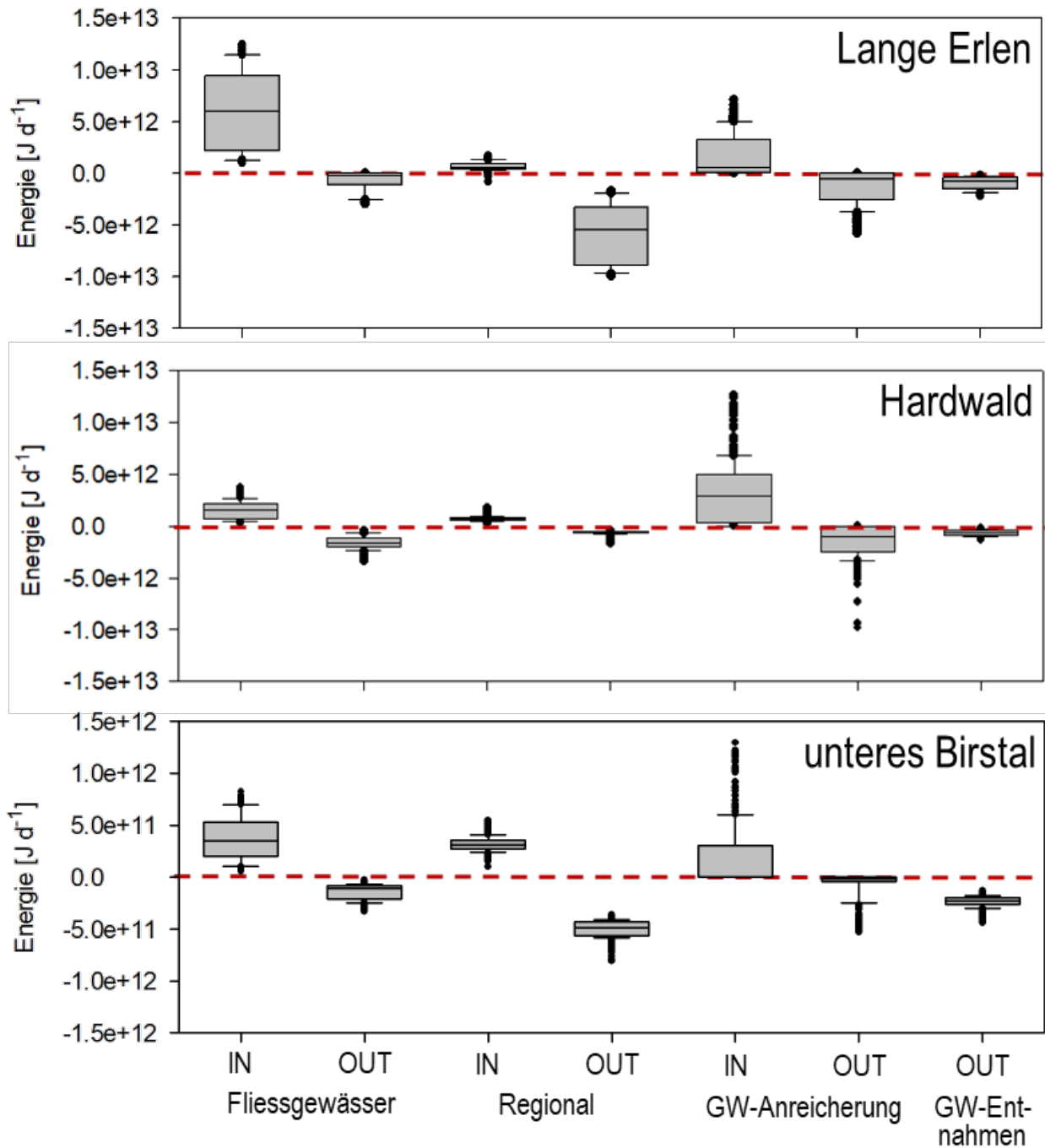
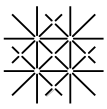
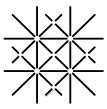


Abb. 37 Boxplots der Wärmebilanzen über ausgewählte Randbedingungen in den Langen Erlen, dem Hardwald und dem unteren Birstal. Für die y-Achse unteres Birstal wurde eine um eine Größenordnung höhere Auflösung gewählt.

Während Hitzeperioden müssten der Wiese, in Abhängigkeit des betrachteten Klimaszenarios, im Mittel zwischen 3'631 und 6'228 kW Wärme entzogen werden um das Wiesewasser unter 25 °C zu halten. Entsprechend liegen Wassermengen, welche mit 10 °C dem Wiesewasser hinzugegeben werden müssten, um dieses auf unter 25 °C zu halten, im



Mittel bei 4'555 und 7'226 m³ d⁻¹. Das Wärmepotential, welches dem Rhein entnommen werden könnte, ist enorm und liegt, in Abhängigkeit des betrachteten Klimaszenarios zwischen 1'289 und 3'090 MW. Der Birs müssten im Mittel zwischen 2'092 und 10'901 kW Wärme entzogen werden um das Birswasser unter 25 °C zu halten. Entsprechend liegen Wassermengen, welche mit 10 °C dem Birswasser hinzugegeben werden müssten, um dieses auf unter 25 °C zu halten, im Mittel bei 2'837 und 13'736 m³ d⁻¹.

Exemplarisch konnte für einen Flussabschnitt entlang der Birs aufgezeigt werden, wo eine strategische Anreicherung zu lokalisieren wäre um die Exfiltration von vergleichsweise «kühlen» Grundwasser in die Birs im Sommer zu erhöhen. Die Auswertungen zeigen, dass die Temperaturen des Grundwassers in den Uferbereichen und den Exfiltrationszonen um im Mittel 0.7 bis 3.0 °C reduziert werden könnten.

5.3 Synthese

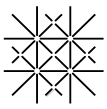
Ein Vergleich zeigt, dass folgende Aspekte und Randbedingungen jeweils für die verschiedenen Untersuchungsgebiete relevant sind:

(A) Fluss-Grundwasser Interaktion

Die Fließgewässer in den Untersuchungsgebieten sind durch unterschiedliche Interaktionen mit den Grundwasserleitern charakterisiert. In den Langen Erlen dominiert v.a. die Infiltration von Wiesewasser, welche eine wichtige Komponente in der Grundwasserbilanz (Abb. 37). Dementsprechend werden die Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasservorkommen v.a. auch durch diese Komponente, aber auch durch die künstliche Grundwasseranreicherung, geprägt werden. Da es im nördlichen Bereich nur einen Abschnitt gibt, in dem vergleichsweise wenig Grundwasser exfiltriert, sind MAR-MSWR-Konzepte zur Regeneration des «erwärmten» Wiesewassers nicht erfolgversprechend.

Im Untersuchungsgebiet Hardwald ist im Bereich der Trinkwasserversorgung der Hardwasser AG der Rhein v.a. Vorfluter, es exfiltriert Grundwasser in das Oberflächengewässer. Aufgrund des hohen Rheinabflusses sind auch hier Überlegungen zu MAR-MSWR-Konzepten nicht zweckmässig.

Im nördlichen Bereich des unteren Birstal hingegen existieren Fließgewässerabschnitte entlang der Birs, wo die Grundwasserexfiltration der dominierende Austauschprozess ist. Exemplarisch konnte für diesen Flussabschnitt aufgezeigt werden, wo eine strategische Anreicherung zu lokalisieren wäre um die Exfiltration von vergleichsweise «kühlen» Grundwasser in die Birs im Sommer zu erhöhen. Lokale Exfiltrationszonen können dabei eine Rolle bzgl. potenziellen Rückzugsgebieten zum Schutz von Fischen während Hitzeereignissen spielen.



(B) Anordnung und Betrieb der Anreicherungs- und Entnahmesysteme

Für eine thermische Nutzung des Entnahmewassers, dessen Potential wegen geringerer Temperaturunterschiede des Grundwassers allerdings nicht so hoch ist wie jenes des Anreicherungswassers, ist die Phasenverschiebung der Temperatur und die Fliesszeit zwischen Anreicherung (Rheintemperatur) und Entnahme (Trinkwassertemperatur) relevant. Da ein Wärmeentzug v.a. in den Wintermonaten (Heizen & Warmwasser) attraktiv ist, ist eine Phasenverschiebung von ca. einem halben Jahr optimal. In den Langen Erlen ist die Anordnung der einzelnen Entnahmebrunnen zu den Anreicherungsfeldern sehr unterschiedlich, wodurch auch die Phasenverschiebung sehr variabel ist (Abb. B₁ im Anhang). Hingegen ist die Brunnenanordnung im Hardwald nahezu ideal, die Phasenverschiebung beträgt zwischen ca. 100 und 150 Tagen (Abb. B₃ im Anhang). Im unteren Birstal standen keine Temperaturdaten der Trinkwasserbrunnen in der Gemeinde Aesch zur Verfügung und jene der Gemeinde Reinach liegen in einer zu grossen Entfernung und zeigen, wie vorausgehende Untersuchungen bereits gezeigt hatten (BGA-Aesch-21²², BGA-Aesch-27²³), keine thermischen Auswirkungen der Anreicherung.

Beim Wärmetransport ist auch zu berücksichtigen, dass im Vergleich zu den Anreicherungssystemen in den Langen Erlen und in der AAA im unteren Birstal, wo das Anreicherungswasser mehr oder weniger direkt in die Grundwasser-gesättigten Lockergesteine infiltriert, im Hardwald das Anreicherungswasser über eine ungesättigte Bodenzone in den Grundwasserleiter versickert.

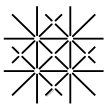
(C) Thermisches Nutzungspotential

Auch relevant ist die Herkunft des Infiltrationswassers. Im Vergleich zu den Anreicherungssystemen in den Langen Erlen und im Hardwald, wo Rheinwasser angereichert wird, wird in der AAA im unteren Birstal Birswasser in den Grundwasserleiter versickert. Das Birswasser ist vergleichsweise "kühler", weshalb ein Wärmeentzug auch nicht das gleiche Potenzial aufweist wie jener aus dem Rheinwasser.

So zeigen die Auswertungen zur thermischen Nutzung des Anreicherung- und Entnahmewassers, dass durch die hohen Anreicherungsmengen in den Langen Erlen und dem Hardwald eine vergleichsweise hohe Wärmeengewinnung von im Mittel 14 und 20 W theoretisch möglich wäre. Dadurch würde dem Grundwasserleiter Wasser mit Temperaturen, welches potenziell natürlichen Grundwassertemperaturen entspricht, zugeführt. Zudem könnten, v.a. in den Sommermonaten, die Temperaturen des entnommenen Trinkwassers um im Mittel 0.9 bis 4.5 °C (Langen Erlen) und 0.6 bis 2.8 °C (Hardwald) abgekühlt werden. Das Potential einer thermischen Nutzung des Entnahmewassers ist geringer.

²² BGA-Aesch-21: Huggenberger P, Affolter A, Scheidler S, Epting J (2007) Anreicherungsanlage Aesch, Hydrogeologischer Bericht

²³ BGA-Aesch-27: Huggenberger P, Affolter A (2019) Validierung Szenarienberechnung VA Aesch mit den Daten des Sommers 2018



(D) Regeneration «erwärmter» Oberflächengewässer

Generell hat die Nutzung von Gewässern zur Kühlung bedeutendere Auswirkungen als der Entzug von Wärme. Je stärker sich die Gewässer in Zukunft erwärmen, desto schwieriger wird es, ihnen zusätzliche Abwärme zuzuführen, ohne ökologische Folgen zu riskieren (Lanz and al., 2021). Deswegen konzentrierten sich die Evaluationen im Rahmen von EnerPot – MAR – MSWR auch auf den Wärmeentzug oder der «Abkühlung» von Oberflächenwasser.

So könnten durch einen Wärmeentzug die Temperaturen der Oberflächengewässer während Hitzeperioden unter 25 °C gehalten werden. Hierfür müssten, in Abhängigkeit des betrachteten Klimaszenarios, im Mittel zwischen 3'631 und 6'228 kW (Wiese), 1'289 und 3'090 MW (Rhein) und 2'092 und 10'901 kW (Birs) Wärme entzogen werden.

Entsprechend liegen Wassermengen, welche mit 10 °C den Oberflächengewässern hinzugegeben werden müssten, um dieses auf unter 25 °C zu halten, im Mittel bei 4'555 und 7'226 m³ d⁻¹ (Wiese) und bei 2'837 und 13'736 m³ d⁻¹ (Birs); der Rhein wurde nicht betrachtet.

5.4 Übertragbarkeit

Im Zusammenhang mit der Entwicklung von MAR-MSWR-Konzepten für verschiedene Standorte in der Schweiz muss berücksichtigt werden, dass der Schwerpunkt oft auf unterschiedlichen Fragestellungen liegt und unterschiedliche hydraulische und thermische Randbedingungen relevant sind.

Im Folgenden wird aufgezeigt inwiefern es möglich ist die für die Region Basel erarbeiteten Konzepte auf andere Standorte zu übertragen. So unterscheiden sich auch für den Raum Basel die Zielsetzung bei der Anwendung von MAR-MSWR-Konzepten. Für das Stadtgebiet von Basel sind es v.a. zunehmende Temperaturen des Grundwassers welche ein Problem darstellen (Epting and Huggenberger, 2013) und wegen der hohen Sommertemperaturen des Rheins werden Lösungen gesucht um erwärmte Oberflächengewässer zu regenerieren (siehe Anwendungsbeispiel Grundwasseraufstösse Rhein). Für die unterschiedlichen untersuchten Grundwasseranreicherungssysteme im Raum Basel sind sowohl quantitative als auch qualitative Aspekte, v.a. auch vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung und bei der Wasserversorgungsplanung relevant. Auch hier werden die über die Klimaerwärmung erwarteten Temperaturerhöhungen die Wasserversorger vor Probleme stellen. Für die Talgrundwasserleiter im Kanton Basel-Landschaft hingegen sind es weniger die steigenden Grundwassertemperaturen, sondern v.a. die mangelnde Ergiebigkeit des Grundwasserspeicher, welche sowohl die Wasserversorger, aber auch die Landwirtschaft und Ökologie vor Probleme stellen wird. Im Kanton Basel-Landschaft sind eher quantitative Einschränkungen relevant, zumal das Grundwasserdargebot für die thermische Nutzung des Grundwassers oft nicht ausreicht.

Für die verschiedenen Problemstellungen werden unterschiedliche Lösungsansätze benötigt, mögliche übertragbare Vorgehensweisen umfassen (A) die thermische Nutzung zur Wärmeerzeugung und Abkühlung von Wasserressourcen und (B) die Erhöhung des Wasserdargebots von Talgrundwasserleitern.

(A) Thermische Nutzung zur Wärmeerzeugung und Abkühlung von Wasserressourcen

Die für die verschiedenen Untersuchungsstandorte im Raum Basel erarbeiteten Modellwerkzeuge und vorgenommenen Auswertungen können auf weitere Standorte mit vergleichbaren Fragestellungen übertragen werden. Hierzu bedarf es einer Charakterisierung der relevanten natürlichen und anthropogenen Randbedingungen um das energetische Potenzial zur thermischen Nutzung von Oberflächenwasser zur künstlichen Grundwasseranreicherung (MAR) und Regeneration «erwärmter» Oberflächenwasser (MSWR) abzuleiten.

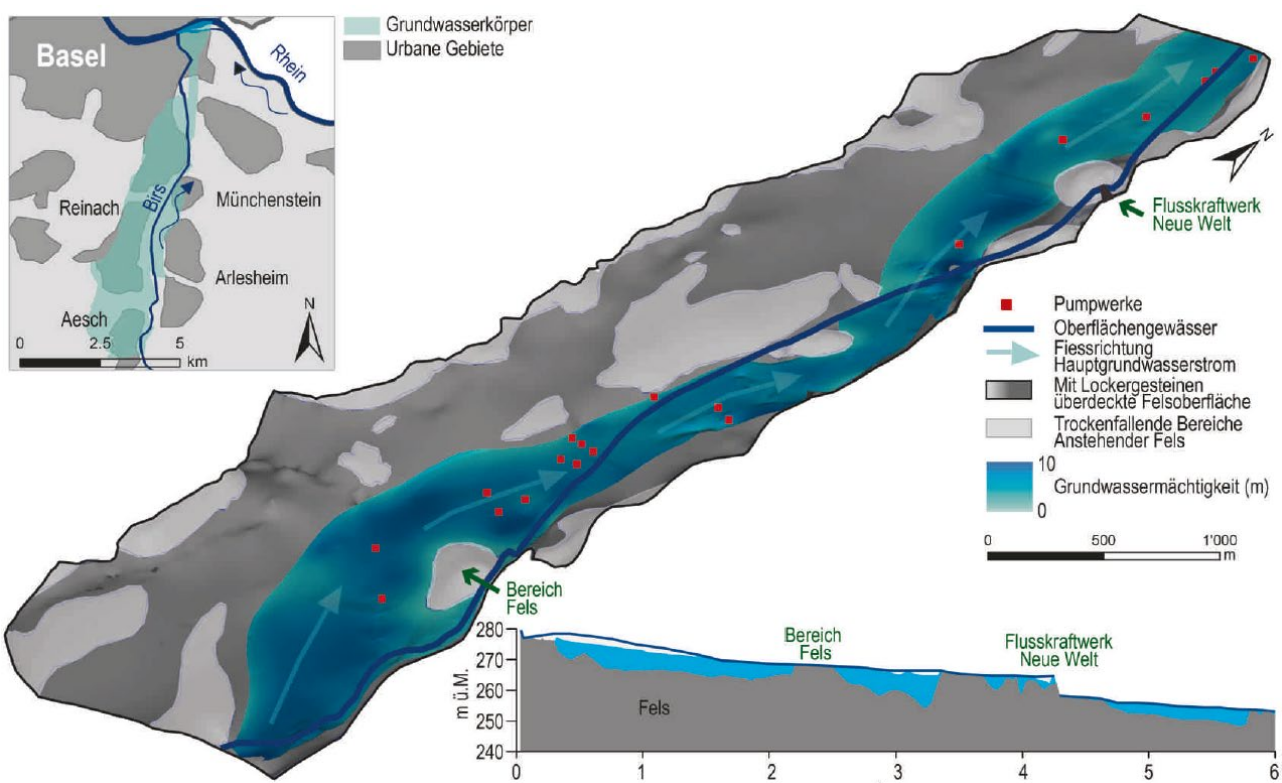
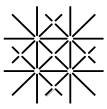


Abb. 38 Oben links: Ausdehnung des Grundwasserkörpers im unteren Birstal und Gemeinden des Kantons Basellandschaft. Mitte: Hauptgrundwasserstrom mit ganzjährig wassergesättigtem Grundwasserkörper im Bereich des Unterlaufs der Birs zwischen Aesch und Münchenstein, dargestellt zusammen mit der mit Lockergesteinen überdeckten Felsoberfläche, trockenfallenden Bereichen oder Bereichen mit anstehendem Felsen sowie den Trinkwasserbrunnen. Rechts unten: Flusslängsprofil entlang der Birs zwischen Angenstein und der Mündung in den Rhein ((Epting et al., 2015)).

Kenntnisse über das hydraulische und thermische Grundwasserregime sowie die Lokalisierung der Fluss-Grundwasser Interaktionsprozesse erlaubt es gezielt Standorte zu definieren, wo Massnahme zur künstlichen Grundwasseranreicherung (MAR) am zielführendsten sind (siehe Anwendungsbeispiel Grundwasserkörper Eibach und [Abb. 38](#)).



Gegenwärtig werden die Grundwasseranreicherungssysteme am intensivsten in den Sommermonaten betrieben. Ein erhöhter Betrieb in den Wintermonaten aber auch in den Übergangsjahreszeiten würde generell in einer Reduktion der Grundwassertemperaturen resultieren. Dadurch würden, in Abhängigkeit der Settings, zum einen die Entnahmetemperaturen bei den Trinkwasserbrunnen und zum anderen das in die Oberflächengewässer exfiltrierende Grundwasser reduziert.

(B) Erhöhung des Wasserdargebots von Talgrundwasserleitern

Auf Grundlage von Informationen über den Verlauf der Felsoberfläche, der Topografie und Informationen zur mittleren Grundwasseroberfläche können die Aquifergeometrien von Lockergesteins-Grundwasservorkommen ausgewertet werden, welche Rückschlüsse auf die Speichereigenschaften der Grundwasserleiter erlauben (Epting et al., 2015).

Für Talgrundwasserleiter können unter der Annahme, dass tendenziell im oberen Bereich (Aufweitung) von Beckenstrukturen eine Infiltration vom Fluss in das Grundwasser und im unteren Bereich (Verengung) eine Exfiltration von Grundwasser in den Fluss stattfindet, potenzielle Standorte für regionale Speicher optimiert werden (siehe Anwendungsbeispiel Grundwasserkörper Eibach und [Abb. 38](#)).

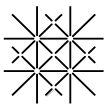
6.1 Empfehlungen & Ausblick

Optimierung von Anpassungsmassnahmen

Weitergehende Untersuchungen könnten eine systematische Auswertung verschiedener Grundwasserleiter umfassen bzgl.: (1) der relevanten Grundwasserneubildungsprozesse, einschliesslich spezieller Berücksichtigung der Fluss-Grundwasser Interaktion und der künstlichen Grundwasseranreicherung; (2) Lokalisierung optimaler Standorte im Grundwasserfliessfeld für die künstliche Grundwasseranreicherung (a) quantitativ, zur präsentativen Grundwasseranreicherung vor Dürreperioden und (b) qualitativ, zur Reduktion der Grundwassertemperaturen (Trinkwasserversorgung und Grundwasserexfiltration).

Optimierung von Anpassungsmassnahmen

Weitergehende Untersuchungen könnten eine systematische Auswertung verschiedener Grundwasserleiter umfassen bzgl.: (1) der relevanten Grundwasserneubildungsprozesse, einschliesslich spezieller Berücksichtigung der Fluss-Grundwasser Interaktion und der künstlichen Grundwasseranreicherung; (2) Lokalisierung optimaler Standorte im Grundwasserfliessfeld für die künstliche Grundwasseranreicherung (a) quantitativ, zur präsentativen Grundwasseranreicherung vor Dürreperioden und (b) qualitativ, zur Reduktion der Grundwassertemperaturen (Trinkwasserversorgung und Grundwasserexfiltration).



Messdaten

Wohingegen die Entnahmemengen und -temperaturen der Trinkwasserversorgungen meist recht gut dokumentiert sind, bestehen Defizite bzgl. der Daten zu den Anreicherungsmengen und -temperaturen in den Langen Erlen aber auch im Hardwald. Bei der Kombination von Haupt- und Nebenbrunnen werden häufig lediglich Gesamtentnahmemenge aufgezeichnet, welche anschliessend auf die einzelnen Brunnen gleichmässig aufgeteilt werden. Auch hier besteht Optimierungsbedarf zur Differenzierung der Entnahmemengen der Einzelbrunnen. Im Rahmen dieses Projektes wurden erste Temperaturmessungen in den Anreicherungssystemen punktuell vorgenommen, eine systematische Aufzeichnung der Anreicherungsmengen und -temperaturen in den verschiedenen Anreicherungsfeldern, -gräben und -weihern wäre wünschenswert.

Kantonale Wasserversorgungsplanung & Energierichtpläne

Im Rahmen von EnerPot – MAR – MSWR konnten einzelne Strategien einer möglichen regionalen Wasserversorgungsplanung auch im Zusammenhang mit Prognosen von Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot sowie Bedarfsänderungen vorgestellt werden.

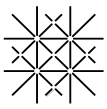
Die kantonalen Energierichtpläne stossen bzgl. Konzepten zur energetischen Nutzung von Oberflächengewässer und Grundwasser schnell an Grenzen, einzelne skizzierte Lösungsansätze dieses Projekts könnten dabei Anknüpfungspunkte bieten. Oft fehlen auch die rechtlichen Grundlagen, um Nutzungskonflikte zwischen Energie und Grundwasserschutz zu lösen.

Anknüpfungspunkt

Mit der nun vorhandenen Kenntnis des thermischen Grundwasserregimes im Hardwald, einschliesslich des Entnahme- und Anreicherungssystems besteht ggf. das Potential zur Optimierung der thermischen Nutzung aus der Trinkwasserleitung in Hagnau Ost, welche für die Wärmeproduktion genutzt wird. Damit die Wärmenutzung im Einklang mit den rechtlichen Vorgaben und für Nutzung von Trinkwasser als Energiequelle möglich ist werden hierfür gegenwärtig die Rahmenbedingungen erarbeitet.

Nutzung von Synergien mit Pilotprojekten in welchen zur Verringerung der Wasserknappheit die Retention von Wasser in lokalen und regionalen Speichern untersucht werden. Im Rahmen solcher Projekte werden gegenwärtig konkrete Vorschläge zur regionalen Wasserspeicherung unter Berücksichtigung der Grundwasseranreicherung ausgearbeitet (NCCS Pilotprogramm zur Anpassung an den Klimawandel; Basel-Landschaft ²⁴). Neben der künstlichen

²⁴ [B.04 Wasserspeicher für die Bewässerung \(admin.ch\)](#)



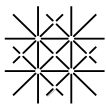
Grundwasseranreicherung sollten auch Auswirkungen von Revitalisierungsprojekten auf die Grundwasserneubildung verstärkt berücksichtigt werden.

Verdankung

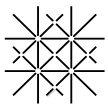
An dieser Stelle möchten sich die Autoren bei der Begleitgruppe bedanken, einschliesslich: (1) dem Amt für Umwelt und Energie Kanton BS, (2) dem Amt für Umweltschutz und Energie Kanton BL und (3) den Industriellen Werken Basel – IWB. Weiterhin wollen wir uns bei Michael Sinreich für die Projektbegleitung durch das BAFU recht herzlich bedanken.

Referenzen

- Affolter, A., Huggenberger, P., Scheidler, S. and Epting, J. 2010. Adaptive Grundwassermanagement in urbanen Gebieten. *Grundwasser* 15(3), 147-161.
- BAFU 2016 Hitze und Trockenheit im Sommer 2015 - Auswirkungen auf Mensch und Umwelt, p. 108 Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BAFU 2019a Hitze und Trockenheit im Sommer 2018 - Auswirkungen auf Mensch und Umwelt, p. 91, Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BAFU 2019b Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz. Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016, Bern.
- BAFU 2021 Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. BAFU, B.f.U. (ed), Bern.
- Brunner, M.I., Farinotti, D., Zekollari, H., Huss, M. and Zappa, M. 2019a. Future shifts in extreme flow regimes in Alpine regions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 23(11), 4471-4489.
- Brunner, M.I., Gurung, A.B., Zappa, M., Zekollari, H., Farinotti, D. and Stahl, M. 2019b. Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. *Science of the Total Environment* 666, 1033-1047.
- BUWAL, BWG and MeteoSchweiz 2004 Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer, p. 174, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- CH2018-Project-Team 2018. CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland. National Centre for Climate Services.
- CH2018 2018 CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. ClimateServices, N.C.f. (ed), p. 271, Zurich.
- Diaz-Nieto, J. and Wilby, R.L. 2005. A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom. *Climatic Change* 69(2), 245-268.
- Doherty, J. 1994 PEST Model-Independent Parameter Estimation, Watermark Computing, Corinda, Australia.
- Doherty, J. 2010 PEST Groundwater Data Utilities. Computing, W.N. (ed), Brisbane, Australia.
- Doherty, J., Brebber, L. and Whyte, P. 2011 PEST: Model-independent parameter estimation, p. 122, Corinda, Australia.



- Dresmann, H., Huggenberger, P., Epring, J. and Wiesmeier, S. 2015. 3D-Modellierung der Felsoberfläche. *Aqua & Gas* 7(8), 80-87.
- Epting, J., Handel, F. and Huggenberger, P. 2013. Thermal management of an unconsolidated shallow urban groundwater body. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(5), 1851-1869.
- Epting, J. and Huggenberger, P. 2013. Unraveling the heat island effect observed in urban groundwater bodies - Definition of a potential natural state. *Journal of Hydrology* 501, 193-204.
- Epting, J., Huggenberger, P., Dresmann, H., Wiesmeier, S., Zea, M. and Auckenthaler, A. 2015. Analyse von Grundwasserkörpern mit GIS. GIS-Tool GSIA - Basis für das Prozessverständnis der Interaktion von Grundwassersystemen. *Aqua & Gas* 7/8, 72-79.
- Epting, J., Michel, A., Affolter, A. and Huggenberger, P. 2021. Climate change effects on groundwater recharge and temperatures in Swiss alluvial aquifers. *Journal of Hydrology X* 11, 100071.
- Epting, J., Michel, A., Huggenberger, P. and Affolter, A. 2020 Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen. *Hydro-CH2018 synthesis report chapters: "future changes in hydrology"*, p. 118, Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN), 3003 Bern, Switzerland.
- Feigenwinter, I., Kotlarski, S., Casanueva, A., Fischer, A.M., Schwierz, C. and Liniger, M.A. 2018 Technical Report MeteoSwiss: Exploring quantile mapping as a tool to produce user-tailored climate scenarios for Switzerland, p. 44.
- Giorgi, F., Jones, C. and Asrar, G. 2008. Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework. *WMO Bull* 53.
- GSchV 1998 Gewässerschutzverordnung (Stand am 1. Januar 2014). Bundesrat, D.S. (ed).
- Hunkeler, D. 2020 Effect of Climate Change on Groundwater Quantity and Quality in Switzerland. *HydroCH2018-Bericht* (ed), p. 79, Bundesamtes für Umwelt BAFU, Bern.
- Ivanov, M.A. and Kotlarski, S. 2017. Assessing distribution-based climate model bias correction methods over an alpine domain: added value and limitations. *International Journal of Climatology* 37(5), 2633-2653.
- Lanz, K. and al., e. 2021 Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserressourcen der Schweiz, Bern.
- Liechti, K., Barben, M. and Zappa, M. 2019. Wasserhaushalt der Schweiz im Jahr 2018 - Einordnung und Besonderheiten. *Wasser, Energie, Luft* 111, 93-94.
- MeteoSchweiz 2018 Hitze und Trockenheit im Sommerhalbjahr 2018 - eine klimatologische Übersicht. *MeteoSchweiz*, F. (ed), p. 38.
- Michel, A., Brauchli, T., Lehning, M., Schaepli, B. and Huwald, H. 2019. Stream temperature evolution in Switzerland over the last 50 years. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 2019, 1-37.
- Michel, A., Råman Vinnå, L., Bouffard, D., Epting, J., Huwald, H., Schaepli, B., Schmid, M. and Wüest, A. 2021 Evolution of stream and lake water temperature under climate change. *Hydro-CH2018 Project*. (FOEN), C.b.t.F.O.f.t.E. (ed), p. 71, Bern, Switzerland.
- Minville, M., Brissette, F. and Leconte, R. 2008. Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. *Journal of Hydrology* 358(1), 70-83.
- Osmancevic, E., Friedmann, R. and Engelfried, M. 2018. Erhöhte Temperaturen in Wasserversorgungssystemen - Ursachen und Gegenmassnahmen. *Aqua & Gas* 12, 26.
- Piccolroaz, S., Calamita, E., Majone, B., Gallice, A., Siviglia, A. and Toffolon, M. 2016. Prediction of river water temperature: a comparison between a new family of hybrid models and statistical approaches. *Hydrological Processes* 30(21), 3901-3917.
- Rajczak, J., Kotlarski, S., Salzmann, N. and Schär, C. 2016a. Robust climate scenarios for sites with sparse observations: a two-step bias correction approach. *International Journal of Climatology* 36(3), 1226-1243.



- Rajczak, J., Kotlarski, S. and Schär, C. 2016b. Does Quantile Mapping of Simulated Precipitation Correct for Biases in Transition Probabilities and Spell Lengths? *Journal of Climate* 29(5), 1605-1615.
- Råman Vinnå, L., Wüest, A., Zappa, M., Fink, G. and Bouffard, D. 2018. Tributaries affect the thermal response of lakes to climate change. *Hydrological Earth System Science* 22(1), 31-51.
- Schürch, M., Bulgheroni, M. and Sinreich, M. 2018. Température des eaux souterraines. Un aperçu de l'état et de l'évolution en Suisse. *Aqua & Gas* 7/8, 40 – 48.
- Sres, A. 2016 Potenzialstudie Thermische Nutzung Rhein. BS, i.A.d.A.f.U.u.E. (ed).
- Stanford, J.A. and Ward, J.V. 1993. An Ecosystem Perspective of Alluvial Rivers - Connectivity and the Hyporheic Corridor. *Journal of the North American Benthological Society* 12(1), 48-60.
- SVGW 2020 Statistische Erhebungen der Wasserversorgungen in der Schweiz, Betriebsjahr 2016 p. 87, Zürich.
- Toffolon, M. and Piccolroaz, S. 2015. A hybrid model for river water temperature as a function of air temperature and discharge. *Environmental Research Letters* 10, 114011.
- Tratschin, R., Dübendorfer, C. and Ritscher, A. 2019 Trockenheit im Sommer und Herbst 2018 – Auswirkungen und deren Bewältigung in der Schweizer Wasserwirtschaft, p. 43, Zollikon.
- Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J. and Weingartner, R. 2009. An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling Software* 24(10), 1209-1222.
- Zappa, M. and Kan, C. 2007. Extreme heat and runoff extremes in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7(3), 375-389.
- Zappa, M., Liechti, K., Winstral, A.H. and Barben, M. 2019. Trockenheit in der Schweiz: Vergleich der Jahre 2003, 2015 und 2018. *Wasser, Energie, Luft* 111(2), 95-100.

Anhang A: Resultate Klimaszenarien

Tab. A1: Simulierte Klimatrends der Lufttemperatur (mit 95 % Konfidenzintervall), berechnet für den Zeitraum von 1981 bis 2099 und dargestellt als Änderung pro Jahrzehnt (°C pro Dekade).

	2106			2189			2091			2199		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CLMCOM-CCLM4_HADGEM_EUR44			0.519 (±0.0215)			0.519 (±0.0215)			0.519 (±0.0215)			0.519 (±0.0215)
CLMCOM-CCLM5_ECEARTH_EUR44			0.415 (±0.0206)			0.415 (±0.0206)			0.415 (±0.0206)			0.415 (±0.0206)
CLMCOM-CCLM5_HADGEM_EUR44			0.493 (±0.0213)			0.493 (±0.0213)			0.493 (±0.0213)			0.493 (±0.0213)
CLMCOM-CCLM5_MIROC_EUR44			0.434 (±0.0206)			0.434 (±0.0206)			0.434 (±0.0206)			0.434 (±0.0206)
CLMCOM-CCLM5_MPIESM_EUR44			0.366 (±0.0203)			0.366 (±0.0203)			0.366 (±0.0203)			0.366 (±0.0203)
DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11	0.0957 (±0.0207)	0.163 (±0.0207)	0.339 (±0.0208)	0.0957 (±0.0207)	0.163 (±0.0207)	0.339 (±0.0208)	0.0957 (±0.0207)	0.163 (±0.0207)	0.339 (±0.0208)	0.0957 (±0.0207)	0.163 (±0.0207)	0.339 (±0.0208)
DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR44		0.167 (±0.0207)	0.358 (±0.021)		0.167 (±0.0207)	0.358 (±0.021)		0.167 (±0.0207)	0.358 (±0.021)		0.167 (±0.0207)	0.358 (±0.021)
KNMI-RACMO_ECEARTH_EUR44		0.194 (±0.02)	0.399 (±0.0203)		0.194 (±0.02)	0.399 (±0.0203)		0.194 (±0.02)	0.399 (±0.0203)		0.194 (±0.02)	0.399 (±0.0203)
KNMI-RACMO_HADGEM_EUR44	0.148 (±0.0207)	0.296 (±0.0205)	0.505 (±0.0205)	0.148 (±0.0207)	0.296 (±0.0205)	0.505 (±0.0205)	0.148 (±0.0207)	0.296 (±0.0205)	0.505 (±0.0205)	0.148 (±0.0207)	0.296 (±0.0205)	0.505 (±0.0205)
SMHI-RCA_CCCMA_EUR44		0.296 (±0.0204)	0.565 (±0.0216)		0.296 (±0.0204)	0.565 (±0.0216)		0.296 (±0.0204)	0.565 (±0.0216)		0.296 (±0.0204)	0.565 (±0.0216)
SMHI-RCA_ECEARTH_EUR11	0.12 (±0.0205)	0.25 (±0.0207)	0.459 (±0.021)	0.12 (±0.0205)	0.25 (±0.0207)	0.459 (±0.021)	0.12 (±0.0205)	0.25 (±0.0207)	0.459 (±0.021)	0.12 (±0.0205)	0.25 (±0.0207)	0.459 (±0.021)
SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44	0.129 (±0.0205)	0.244 (±0.0206)	0.464 (±0.021)	0.129 (±0.0205)	0.244 (±0.0206)	0.464 (±0.021)	0.129 (±0.0205)	0.244 (±0.0206)	0.464 (±0.021)	0.129 (±0.0205)	0.244 (±0.0206)	0.464 (±0.021)
SMHI-RCA_HADGEM_EUR11		0.257 (±0.0203)	0.463 (±0.0204)		0.257 (±0.0203)	0.463 (±0.0204)		0.257 (±0.0203)	0.463 (±0.0204)		0.257 (±0.0203)	0.463 (±0.0204)
SMHI-RCA_HADGEM_EUR44	0.138 (±0.0206)	0.279 (±0.0207)	0.474 (±0.0203)	0.138 (±0.0206)	0.279 (±0.0207)	0.474 (±0.0203)	0.138 (±0.0206)	0.279 (±0.0207)	0.474 (±0.0203)	0.138 (±0.0206)	0.279 (±0.0207)	0.474 (±0.0203)
SMHI-RCA_MIROC_EUR44	0.115 (±0.0202)	0.189 (±0.0197)	0.444 (±0.0197)	0.115 (±0.0202)	0.189 (±0.0197)	0.444 (±0.0197)	0.115 (±0.0202)	0.189 (±0.0197)	0.444 (±0.0197)	0.115 (±0.0202)	0.189 (±0.0197)	0.444 (±0.0197)
SMHI-RCA_MPIESM_EUR11		0.198 (±0.0202)	0.392 (±0.0202)		0.198 (±0.0202)	0.392 (±0.0202)		0.198 (±0.0202)	0.392 (±0.0202)		0.198 (±0.0202)	0.392 (±0.0202)
SMHI-RCA_MPIESM_EUR44	0.122 (±0.0198)	0.195 (±0.0202)	0.406 (±0.0202)	0.122 (±0.0198)	0.195 (±0.0202)	0.406 (±0.0202)	0.122 (±0.0198)	0.195 (±0.0202)	0.406 (±0.0202)	0.122 (±0.0198)	0.195 (±0.0202)	0.406 (±0.0202)
SMHI-RCA_NORESM_EUR44	0.122 (±0.0203)	0.241 (±0.0205)	0.384 (±0.0209)	0.122 (±0.0203)	0.241 (±0.0205)	0.384 (±0.0209)	0.122 (±0.0203)	0.241 (±0.0205)	0.384 (±0.0209)	0.122 (±0.0203)	0.241 (±0.0205)	0.384 (±0.0209)

Tab. A2: Simulierte Klimatrends der Fließgewässerabflüsse (mit 95 % Konfidenzintervall), berechnet für den Zeitraum von 1981 bis 2099 und dargestellt als Änderung pro Jahrzehnt (m³ pro Dekade).

	2106			2289			2091			2199		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CLMCOM-CCLM4_HADGEM_EUR44			-0.31 (±0.051)			-19 (±1.4)			-19 (±1.3)			-0.14 (±0.032)
CLMCOM-CCLM5_ECEARTH_EUR44			-0.22 (±0.044)			-14 (±1.2)			-13 (±1.2)			-0.081 (±0.028)
CLMCOM-CCLM5_HADGEM_EUR44			-0.2 (±0.051)			-13 (±1.4)			-13 (±1.3)			-0.045 (±0.033)
CLMCOM-CCLM5_MIROC_EUR44			-0.038 (±0.043)			-12 (±1.2)			-12 (±1.1)			-0.0058 (±0.028)
CLMCOM-CCLM5_MPIESM_EUR44			0.013 (±0.045)			-3.5 (±1.3)			-3.5 (±1.2)			0.065 (±0.028)
DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11	0.029 (±0.043)	0.056 (±0.043)	0.06 (±0.044)	-3.8 (±1.3)	-1 (±1.3)	1.7 (±1.4)	-3.9 (±1.2)	-1.1 (±1.3)	1.6 (±1.3)	-0.019 (±0.028)	-0.0051 (±0.027)	0.083 (±0.028)
DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR44		0.022 (±0.051)	0.069 (±0.055)		2.2 (±1.4)	6.1 (±1.5)		2.1 (±1.4)	5.9 (±1.5)		0.041 (±0.032)	0.12 (±0.036)
KNMI-RACMO_ECEARTH_EUR44		-0.2 (±0.046)	-0.11 (±0.049)		-9 (±1.3)	-7.4 (±1.4)		-8.7 (±1.3)	-7.3 (±1.4)		-0.1 (±0.031)	-0.049 (±0.032)
KNMI-RACMO_HADGEM_EUR44	-0.15 (±0.048)	0.047 (±0.05)	0.0034 (±0.054)	-6.2 (±1.4)	-0.56 (±1.5)	-1.5 (±1.6)	-6 (±1.4)	-0.79 (±1.4)	-1.7 (±1.5)	-0.088 (±0.031)	0.072 (±0.033)	0.072 (±0.035)
SMHI-RCA_CCCMA_EUR44		-0.38 (±0.042)	-0.22 (±0.046)		-20 (±1.3)	-18 (±1.4)		-19 (±1.3)	-18 (±1.4)		-0.17 (±0.029)	-0.082 (±0.031)
SMHI-RCA_ECEARTH_EUR11	0.045 (±0.042)	-0.019 (±0.041)	-0.22 (±0.042)	3.3 (±1.4)	-2 (±1.3)	-17 (±1.3)	3.1 (±1.3)	-2 (±1.3)	-17 (±1.2)	0.049 (±0.025)	0.037 (±0.026)	-0.064 (±0.027)
SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44	-0.045 (±0.046)	-0.14 (±0.045)	-0.46 (±0.045)	-0.055 (±1.4)	-5.7 (±1.3)	-2.4 (±1.3)	-0.043 (±1.3)	-5.5 (±1.3)	-2.4 (±1.3)	-0.0037 (±0.03)	-0.052 (±0.03)	-0.21 (±0.031)
SMHI-RCA_HADGEM_EUR11		0.0098 (±0.047)	-0.085 (±0.048)		-2.6 (±1.4)	-8.6 (±1.5)		-2.7 (±1.4)	-8.6 (±1.4)		0.076 (±0.029)	0.029 (±0.029)
SMHI-RCA_HADGEM_EUR44	-0.2 (±0.047)	-0.2 (±0.047)	-0.32 (±0.048)	-6.5 (±1.4)	-12 (±1.4)	-16 (±1.5)	-6.3 (±1.4)	-12 (±1.4)	-16 (±1.5)	-0.12 (±0.031)	-0.072 (±0.032)	-0.085 (±0.033)
SMHI-RCA_MIROC_EUR44	-0.11 (±0.043)	-0.17 (±0.044)	-0.19 (±0.046)	-2.8 (±1.4)	-4.9 (±1.4)	-7.4 (±1.5)	-2.6 (±1.3)	-4.7 (±1.4)	-7.3 (±1.4)	-0.036 (±0.029)	-0.064 (±0.03)	-0.067 (±0.032)
SMHI-RCA_MPIESM_EUR11		0.081 (±0.044)	0.051 (±0.044)		1.5 (±1.3)	-2.4 (±1.3)		1.4 (±1.3)	-2.6 (±1.3)		0.087 (±0.027)	0.18 (±0.028)
SMHI-RCA_MPIESM_EUR44	0.05 (±0.047)	0.039 (±0.047)	-0.23 (±0.046)	4.7 (±1.4)	0.95 (±1.4)	-13 (±1.4)	4.6 (±1.4)	0.89 (±1.4)	-12 (±1.3)	0.027 (±0.033)	0.051 (±0.031)	-0.093 (±0.031)
SMHI-RCA_NORESM_EUR44	-0.032 (±0.046)	-0.063 (±0.045)	-0.093 (±0.045)	-2.3 (±1.4)	-7.2 (±1.3)	-8.3 (±1.3)	-2.2 (±1.3)	-7.1 (±1.3)	-8.2 (±1.3)	-0.043 (±0.03)	-0.032 (±0.031)	0.0042 (±0.029)

Tab. A3: Simulierte Klimatrends der Fließgewässertemperatur (mit 95 % Konfidenzintervall), berechnet für den Zeitraum von 1981 bis 2099 und dargestellt als Änderung pro Jahrzehnt (°C pro Dekade).

	2106			2289			2091			2199		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CLMCOM-CCLM4_HADGEM_EUR44		0.337 (±0.0147)	0.329 (±0.018)							0.292 (±0.0176)		0.386 (±0.0177)
CLMCOM-CCLM5_ECEARTH_EUR44		0.21 (±0.0123)	0.225 (±0.0166)							0.191 (±0.0162)		0.258 (±0.0154)
CLMCOM-CCLM5_HADGEM_EUR44		0.297 (±0.0142)	0.292 (±0.0176)							0.256 (±0.0172)		0.347 (±0.0172)
CLMCOM-CCLM5_MIROC_EUR44		0.213 (±0.0124)	0.231 (±0.0166)							0.197 (±0.0162)		0.273 (±0.0162)
CLMCOM-CCLM5_MPIESM_EUR44		0.179 (±0.0124)	0.189 (±0.0164)							0.161 (±0.0161)		0.215 (±0.0154)
DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11	0.044 (±0.0124)	0.0784 (±0.0124)	0.15 (±0.0125)	0.0557 (±0.0163)	0.0783 (±0.0163)	0.158 (±0.0167)	0.0495 (±0.016)	0.0659 (±0.016)	0.0617 (±0.0156)	0.103 (±0.0156)	0.188 (±0.0158)	
DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR44		0.0853 (±0.0128)	0.192 (±0.0135)		0.079 (±0.0163)	0.174 (±0.0168)		0.0655 (±0.016)		0.148 (±0.0164)	0.103 (±0.016)	0.223 (±0.0168)
KNMI-RACMO_ECEARTH_EUR44		0.0913 (±0.0122)	0.201 (±0.0124)		0.107 (±0.016)	0.205 (±0.0163)		0.0917 (±0.0157)		0.174 (±0.016)	0.115 (±0.0154)	0.244 (±0.0157)
KNMI-RACMO_HADGEM_EUR44	0.0748 (±0.0135)	0.138 (±0.0135)	0.262 (±0.0138)	0.0883 (±0.0169)	0.159 (±0.017)	0.275 (±0.0172)	0.0778 (±0.0166)	0.139 (±0.0166)	0.092 (±0.0162)	0.24 (±0.0168)	0.168 (±0.0163)	0.311 (±0.0165)
SMHI-RCA_CCCMA_EUR44		0.165 (±0.0127)	0.337 (±0.0142)		0.183 (±0.0166)	0.35 (±0.018)		0.16 (±0.0163)		0.312 (±0.0176)	0.199 (±0.0156)	0.402 (±0.0174)
SMHI-RCA_ECEARTH_EUR11	0.052 (±0.0123)	0.125 (±0.0126)	0.244 (±0.0129)	0.058 (±0.0162)	0.126 (±0.0166)	0.257 (±0.0169)	0.0505 (±0.0159)	0.107 (±0.0163)	0.0607 (±0.015)	0.221 (±0.0165)	0.15 (±0.0158)	0.293 (±0.0161)
SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44	0.0702 (±0.0122)	0.129 (±0.0126)	0.27 (±0.013)	0.0673 (±0.0162)	0.129 (±0.0166)	0.285 (±0.0171)	0.0584 (±0.0159)	0.11 (±0.0163)	0.0829 (±0.0152)	0.248 (±0.0167)	0.16 (±0.0157)	0.331 (±0.0165)
SMHI-RCA_HADGEM_EUR11		0.124 (±0.013)	0.246 (±0.0132)		0.138 (±0.0165)	0.253 (±0.0168)		0.12 (±0.0162)		0.218 (±0.0164)	0.145 (±0.0161)	0.291 (±0.0165)
SMHI-RCA_HADGEM_EUR44	0.078 (±0.0132)	0.156 (±0.0133)	0.262 (±0.0132)	0.0893 (±0.0166)	0.175 (±0.017)	0.281 (±0.017)	0.0797 (±0.0163)	0.156 (±0.0167)	0.0931 (±0.0159)	0.246 (±0.0166)	0.187 (±0.0165)	0.304 (±0.0159)
SMHI-RCA_MIROC_EUR44	0.0566 (±0.0124)	0.0924 (±0.0125)	0.232 (±0.0127)	0.0625 (±0.0163)	0.103 (±0.0164)	0.236 (±0.0165)	0.053 (±0.016)	0.0883 (±0.016)	0.0655 (±0.0155)	0.201 (±0.0162)	0.112 (±0.0155)	0.28 (±0.0158)
SMHI-RCA_MPIESM_EUR11		0.104 (±0.0123)	0.187 (±0.0126)		0.0986 (±0.0163)	0.191 (±0.0165)		0.0833 (±0.016)		0.161 (±0.0162)	0.12 (±0.015)	0.218 (±0.0153)
SMHI-RCA_MPIESM_EUR44	0.0643 (±0.0122)	0.0938 (±0.0124)	0.21 (±0.0124)	0.0558 (±0.0161)	0.0947 (±0.0164)	0.222 (±0.0166)	0.0464 (±0.0159)	0.0794 (±0.0161)	0.0797 (±0.0152)	0.19 (±0.0163)	0.116 (±0.0154)	0.263 (±0.0156)
SMHI-RCA_NORESM_EUR44	0.0526 (±0.0119)	0.119 (±0.0124)	0.196 (±0.0129)	0.0615 (±0.016)	0.128 (±0.0164)	0.197 (±0.0166)	0.052 (±0.0157)	0.108 (±0.016)	0.0701 (±0.015)	0.166 (±0.0163)	0.151 (±0.0158)	0.237 (±0.0162)

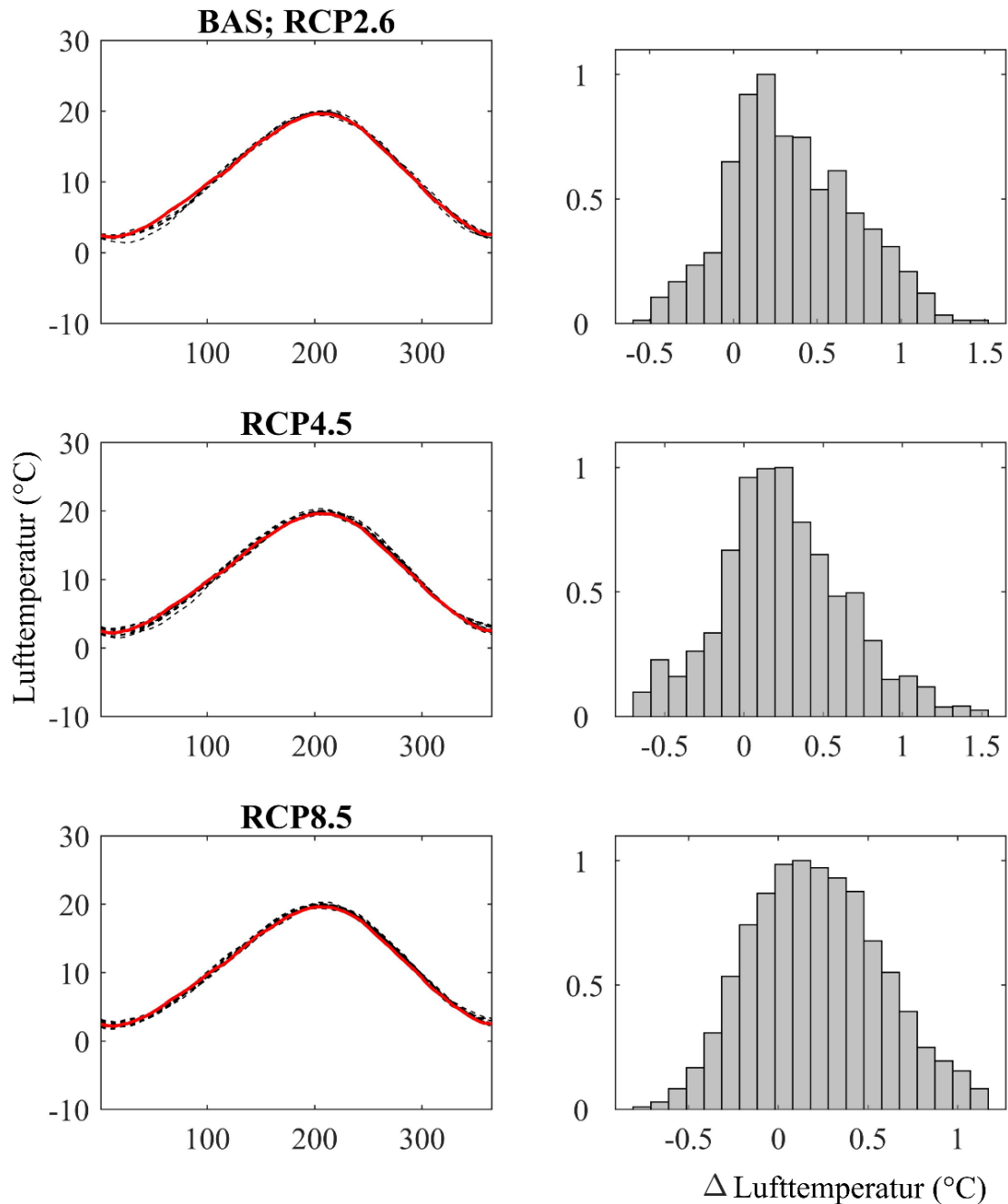


Abb. A1: Modellierte und gemessene Lufttemperatur an der Station BAS für alle Klimaszenarien von 1997 bis 2019. Links: klimatologisches Jahr (pro Tag des Jahres) für Lufttemperaturmessungen (rote Linie) und GCM-RCM-Modellkombinationen (graue gestrichelte Linien). Die Kurven sind mit einem gleitenden 60-Tage-Mittelwert geglättet. Rechts: Differenz zwischen gemessener und modellierter Lufttemperatur für alle Klimamodelle, d.h. die Änderung, die erforderlich ist, um die modellierten Klimadaten im Kalibrierungszeitraum (1997-2019) auf die von den Stationen abgeleiteten Messungen herunterzurechnen (unter Verwendung der Änderungsfaktormethode), normiert auf die Anzahl der Datenpunkte.

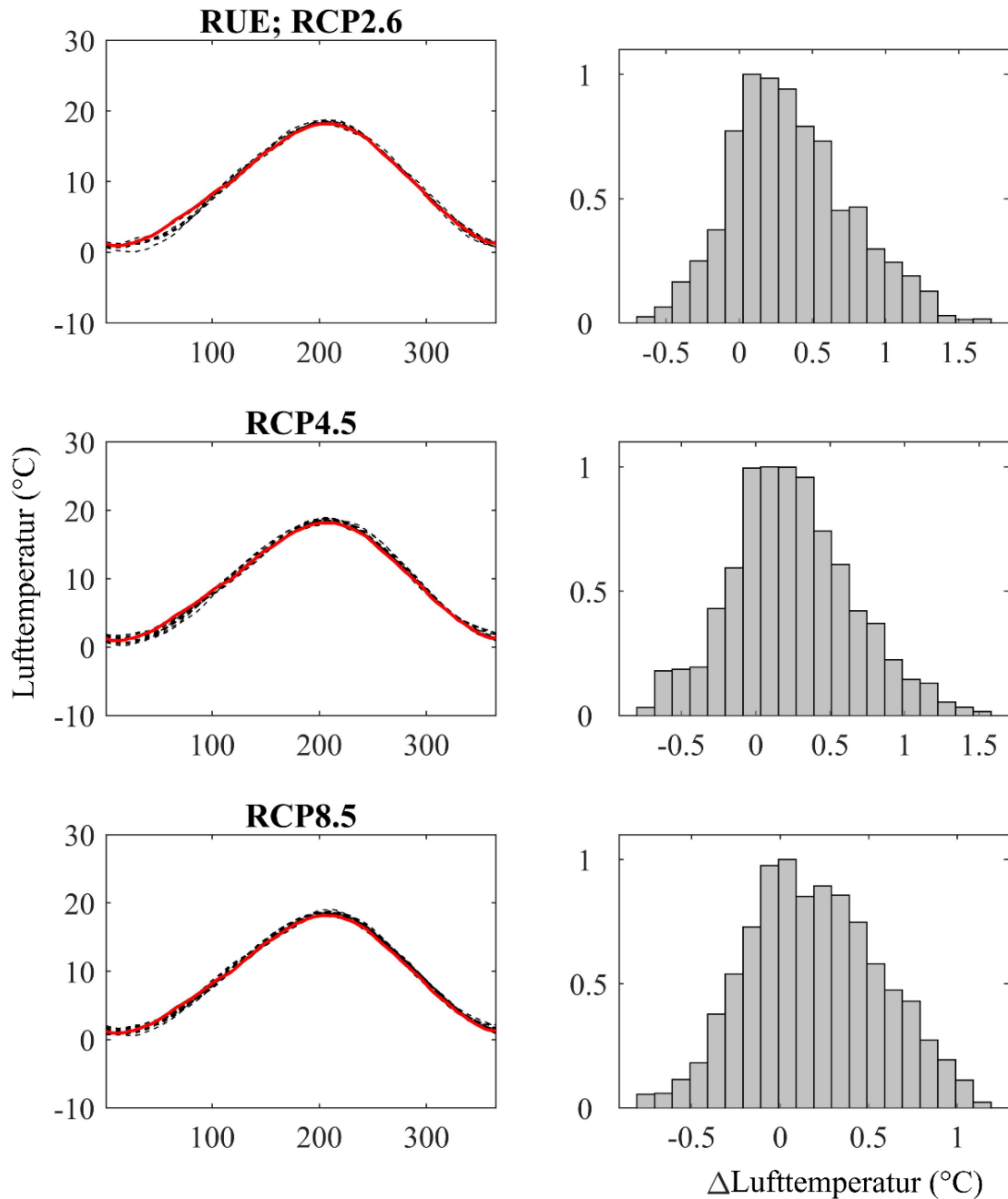


Abb. A2: Modellierter und gemessener Lufttemperatur an der Station RUE für alle Klimaszenarien von 1997 bis 2019. Links: klimatologisches Jahr (pro Tag des Jahres) für Lufttemperaturmessungen (rote Linie) und klimamodellierte Lufttemperatur (graue gestrichelte Linien). Die Kurven sind mit einem gleitenden 60-Tage-Mittelwert geglättet. Rechts: Differenz zwischen gemessener und modellierter Lufttemperatur für alle Klimamodelle, d.h. die Änderung, die erforderlich ist, um die klimamodellierten Daten auf die von den Stationen abgeleiteten Messungen während des Kalibrierungszeitraums herunterzurechnen, normiert über die Anzahl der Datenpunkte.

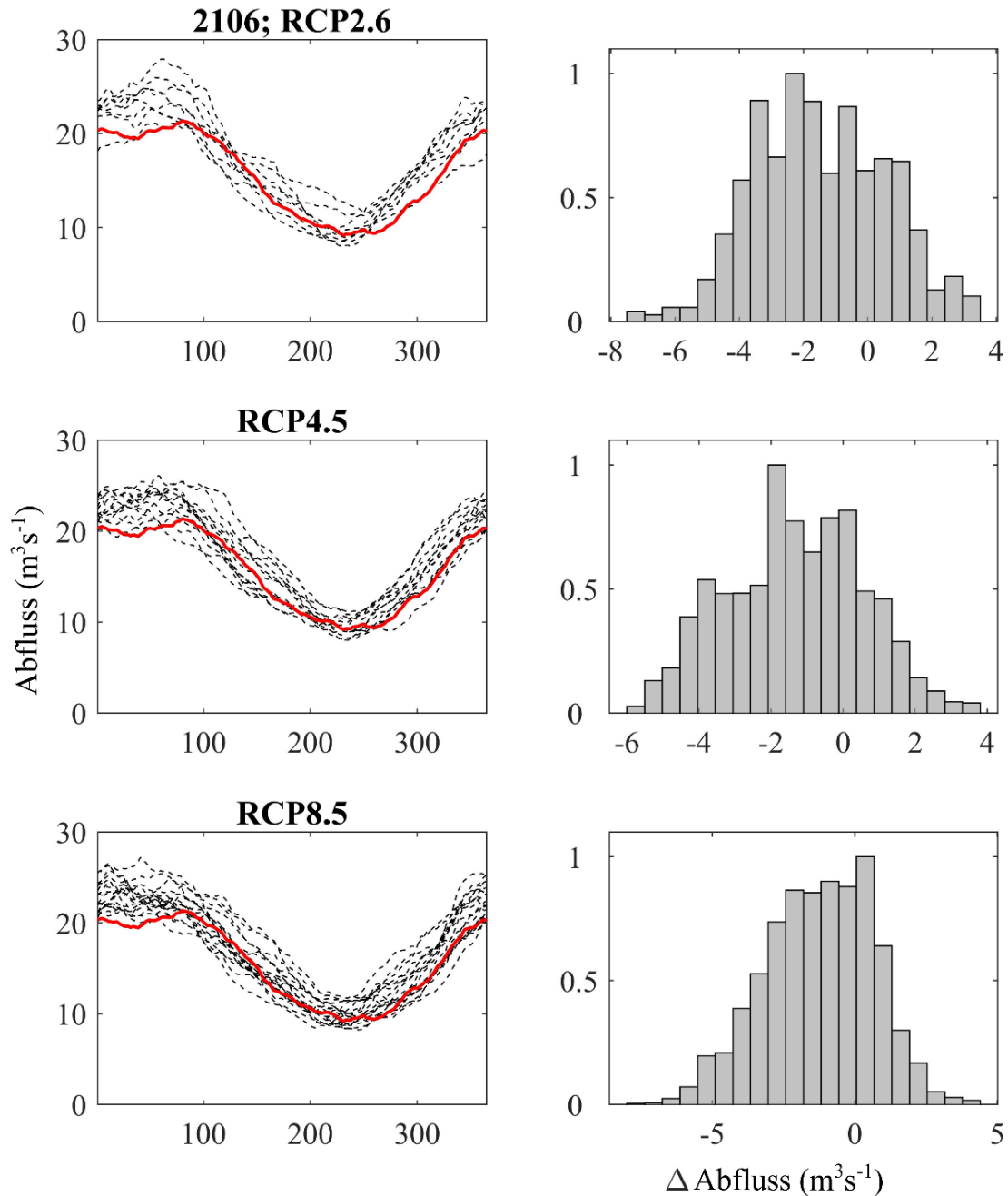


Abb. A3: Modellierter und gemessener Abfluss an der Station 2106 (Birs) für alle Klimaszenarien von 1997 bis 2019. Links: Spalte, klimatologisches Jahr (pro Tag des Jahres) für Abflussmessungen (rote Linie) und mit PREVAH modellierter Abfluss (graue gestrichelte Linien). Die Kurven sind mit einem gleitenden 60-Tage-Mittelwert geglättet. Rechts: Differenz zwischen gemessenem und modelliertem Abfluss für alle Klimamodelle, d.h. die Änderung, die erforderlich ist, um die klimamodellierten Daten auf die von den Stationen abgeleiteten Messungen während des Kalibrierungszeitraums herunterzurechnen, normiert über die Anzahl der Datenpunkte.

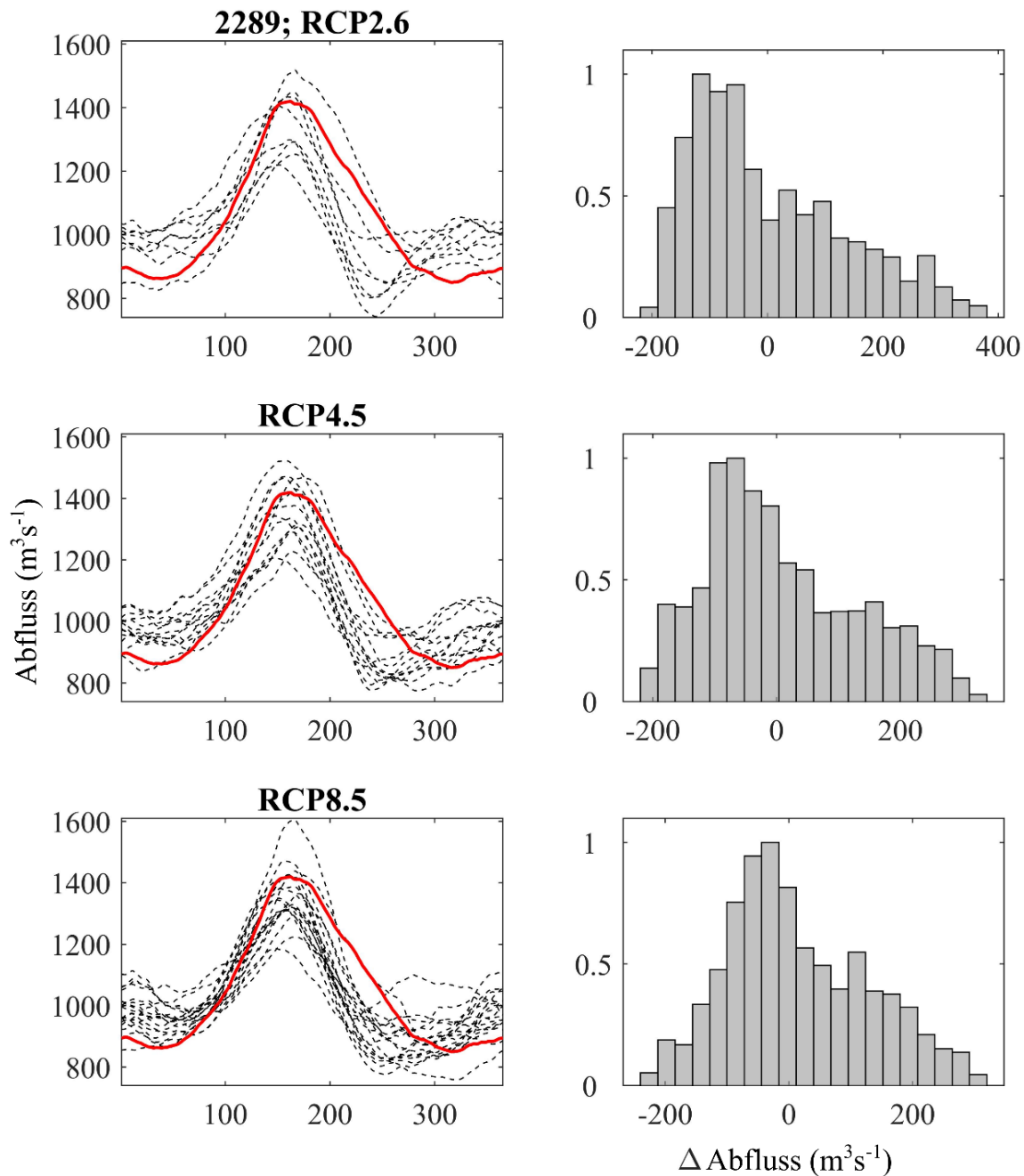


Abb. A4: Modellierter und gemessener Abfluss an der Station 228g (Rhein) für alle Klimaszenarien von 1997 bis 2019. Links: Spalte, klimatologisches Jahr (pro Tag des Jahres) für Abflussmessungen (rote Linie) und mit PREVAH modellierter Abfluss (graue gestrichelte Linien). Die Kurven sind mit einem gleitenden 60-Tage-Mittelwert geglättet. Rechts: Differenz zwischen gemessenem und modelliertem Abfluss für alle Klimamodelle, d.h. die Änderung, die erforderlich ist, um die klimamodellierten Daten auf die von den Stationen abgeleiteten Messungen während des Kalibrierungszeitraums herunterzurechnen, normiert über die Anzahl der Datenpunkte.

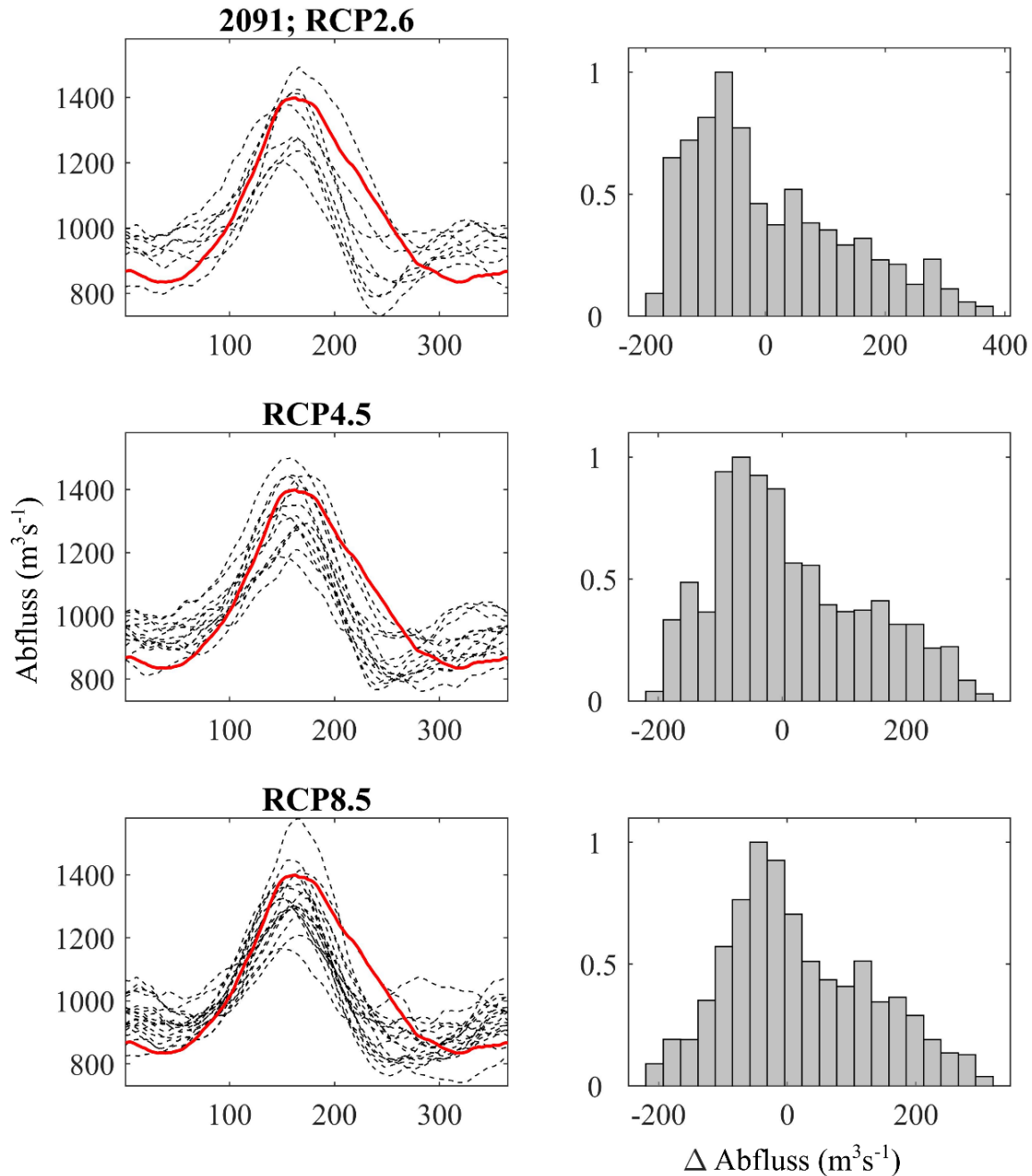


Abb. A5: Modellierter und gemessener Abfluss an der Station 2091 (Rheinfelden) für alle Klimaszenarien von 1997 bis 2019. Links: Spalte, klimatologisches Jahr (pro Tag des Jahres) für Abflussmessungen (rote Linie) und mit PREVAH modellierter Abfluss (graue gestrichelte Linien). Die Kurven sind mit einem gleitenden 60-Tage-Mittelwert geglättet. Rechts: Differenz zwischen gemessenem und modelliertem Abfluss für alle Klimamodelle, d.h. die Änderung, die erforderlich ist, um die klimamodellierten Daten auf die von den Stationen abgeleiteten Messungen während des Kalibrierungszeitraums herunterzurechnen, normiert über die Anzahl der Datenpunkte.

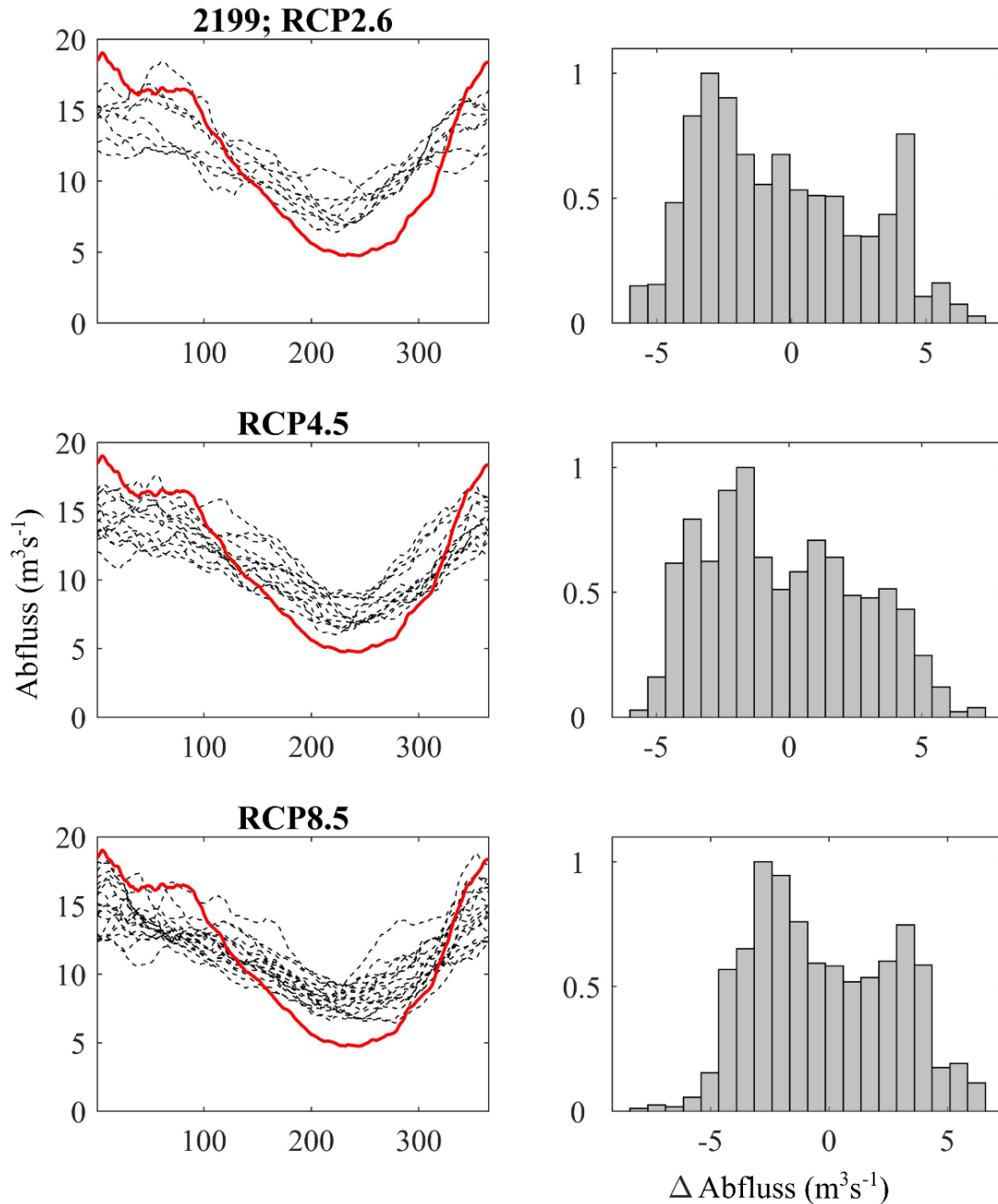


Abb. A6: Modellierter und gemessener Abfluss an der Station 2199 (Wiese) für alle Klimaszenarien von 2006 bis 2019. Links: Spalte, klimatologisches Jahr (pro Tag des Jahres) für Abflussmessungen (rote Linie) und mit PREVAH modellierter Abfluss (graue gestrichelte Linien). Die Kurven sind mit einem gleitenden 60-Tage-Mittelwert geglättet. Rechts: Differenz zwischen gemessenem und modelliertem Abfluss für alle Klimamodelle, d.h. die Änderung, die erforderlich ist, um die klimamodellierten Daten auf die von den Stationen abgeleiteten Messungen während des Kalibrierungszeitraums herunterzurechnen, normiert über die Anzahl der Datenpunkte.

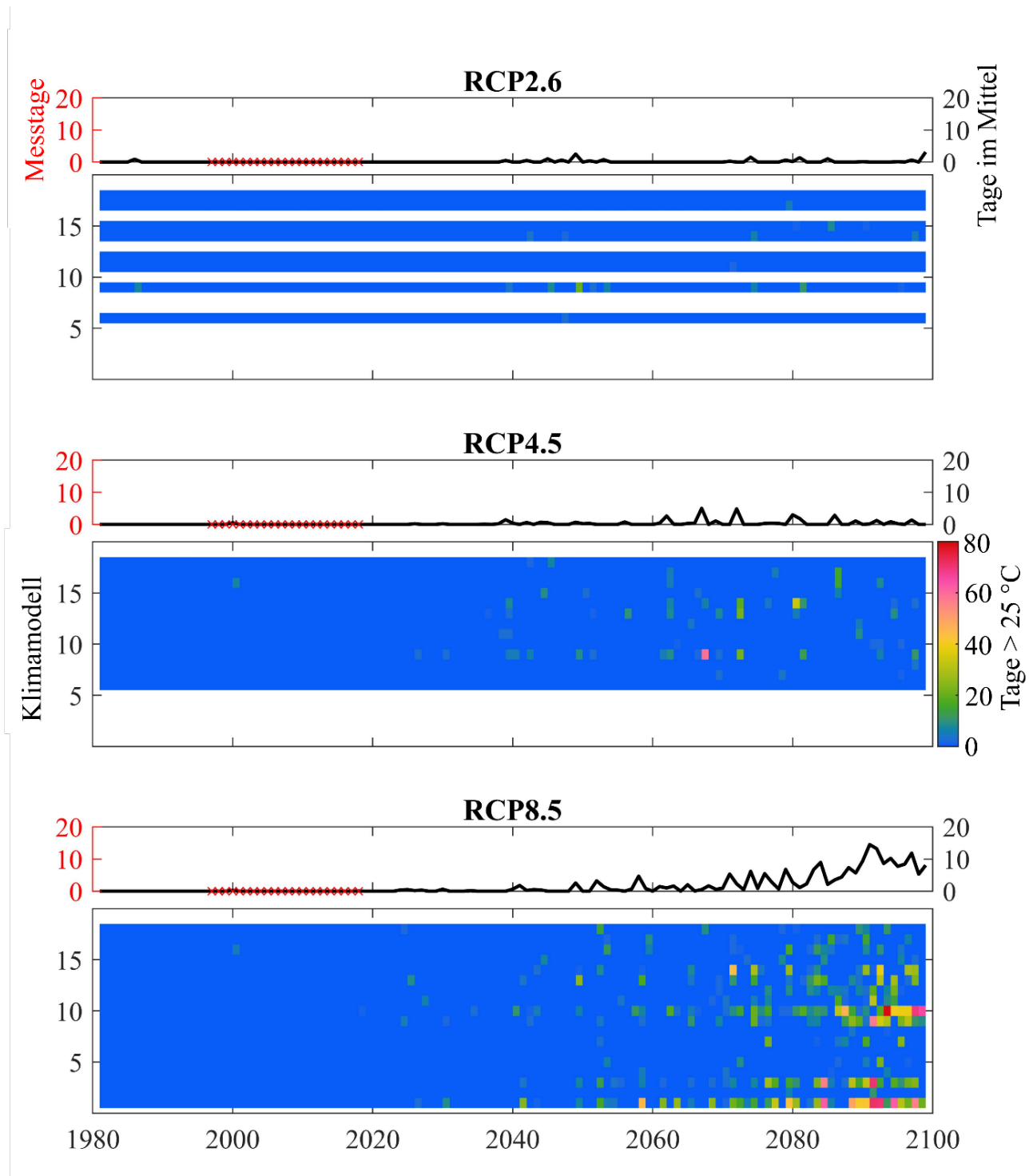
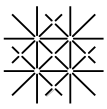


Abb. A7: Prognostizierte Entwicklung der Totalanzahl Tage pro Jahr an welchen die Oberflächenwassertemperaturen > 25 °C betragen an Station 2106 (Birs) für drei Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 (jeweils oben: jährliche Mittelwerte aus allen Klimamodellen - schwarze Linie (Tab. A3); Messungen - rote Kreuze; jeweils unten - Simulationsergebnisse der einzelnen Klimamodelle (Tab. A3).

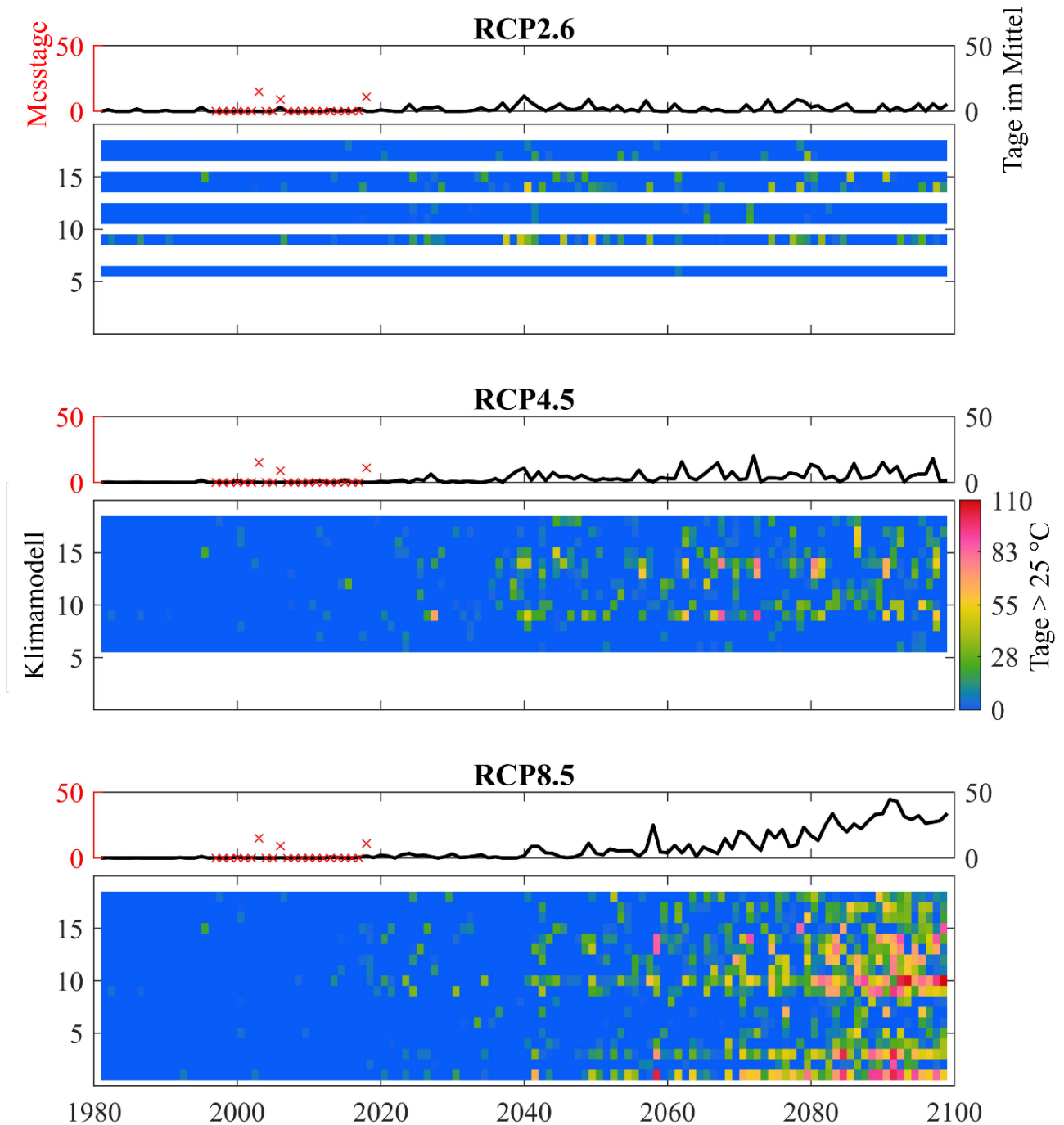
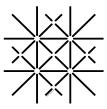


Abb. A8: Prognostizierte Entwicklung der Totalanzahl Tage pro Jahr an welchen die Oberflächenwassertemperaturen > 25 °C betragen an der Station 2289 (Rhein) für drei Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 (jeweils oben: jährliche Mittelwerte aus allen Klimamodellen - schwarze Linie (Tab. A3); Messungen - rote Kreuze; jeweils unten - Simulationsergebnisse der einzelnen Klimamodelle (Tab. A3).

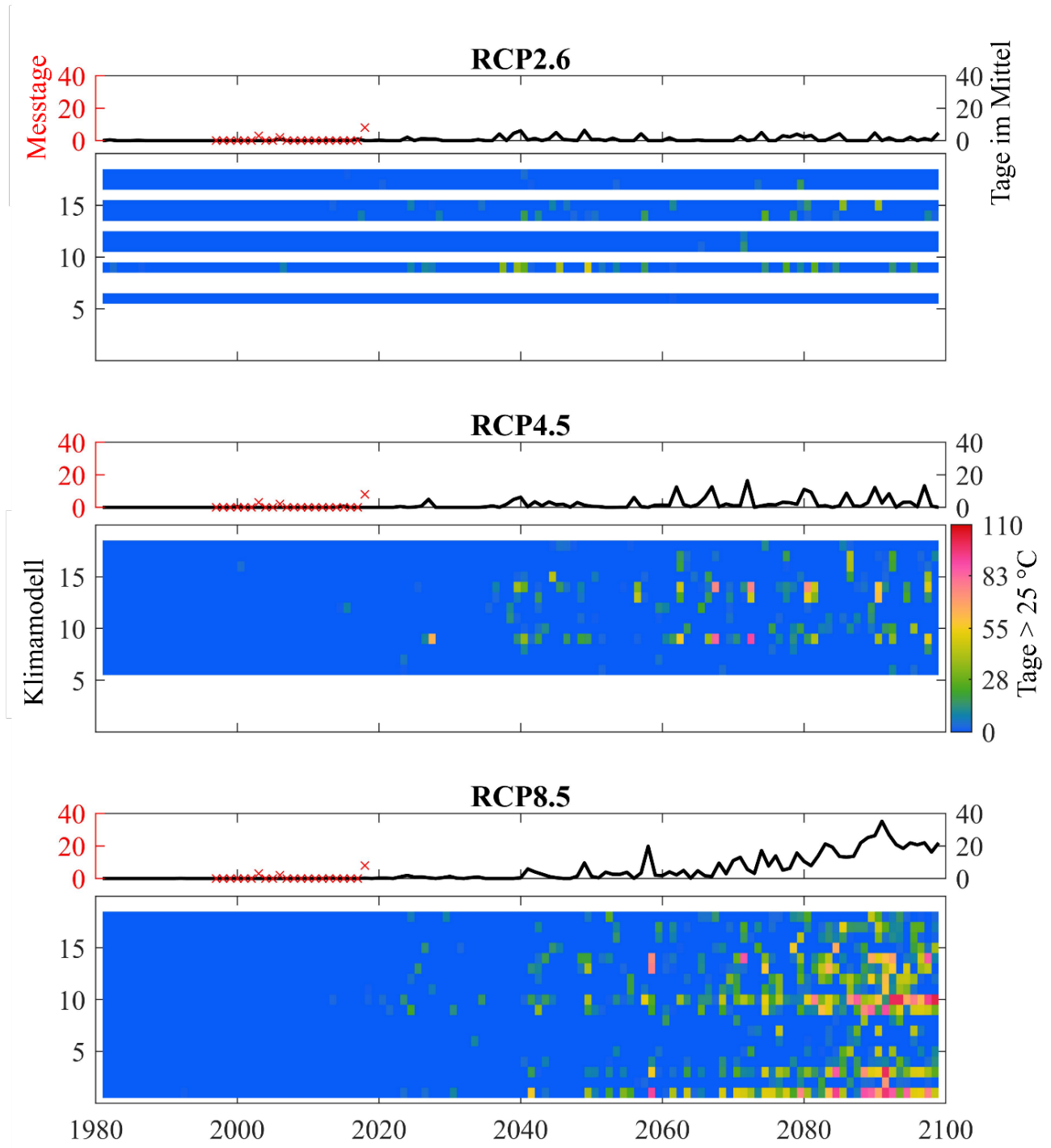
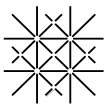


Abb. Ag: Prognostizierte Entwicklung der Totalanzahl Tage pro Jahr an welchen die Oberflächenwassertemperaturen > 25 °C betragen an der Station 2091 (Rheinfelden) für drei Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 (jeweils oben: jährliche Mittelwerte aus allen Klimamodellen - schwarze Linie (Tab. A3); Messungen - rote Kreuze; jeweils unten – Simulationsergebnisse der einzelnen Klimamodelle (Tab. A3).

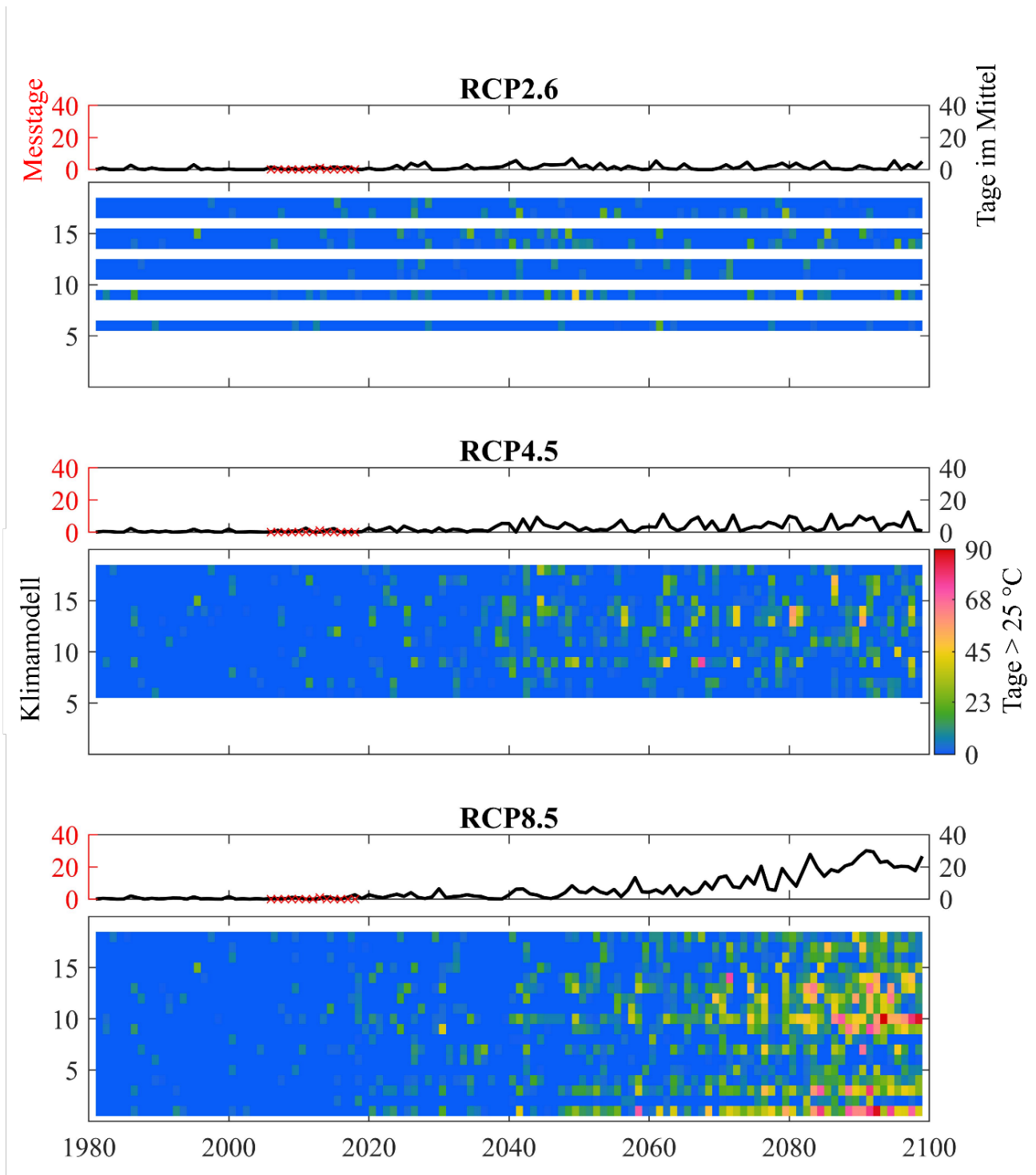
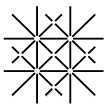
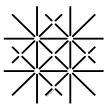


Abb. A10: Prognostizierte Entwicklung der Totalanzahl Tage pro Jahr an welchen die Oberflächenwassertemperaturen > 25 °C betragen an der Station 2199 (Wiese) für drei Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 (jeweils oben: jährliche Mittelwerte aus allen Klimamodellen - schwarze Linie (Tab. A3); Messungen - rote Kreuze; jeweils unten – Simulationsergebnisse der einzelnen Klimamodelle (Tab. A3).



Anhang B: Kalibrierung Wärmetransportmodelle / Grundwasserbilanzen

Lange Erlen

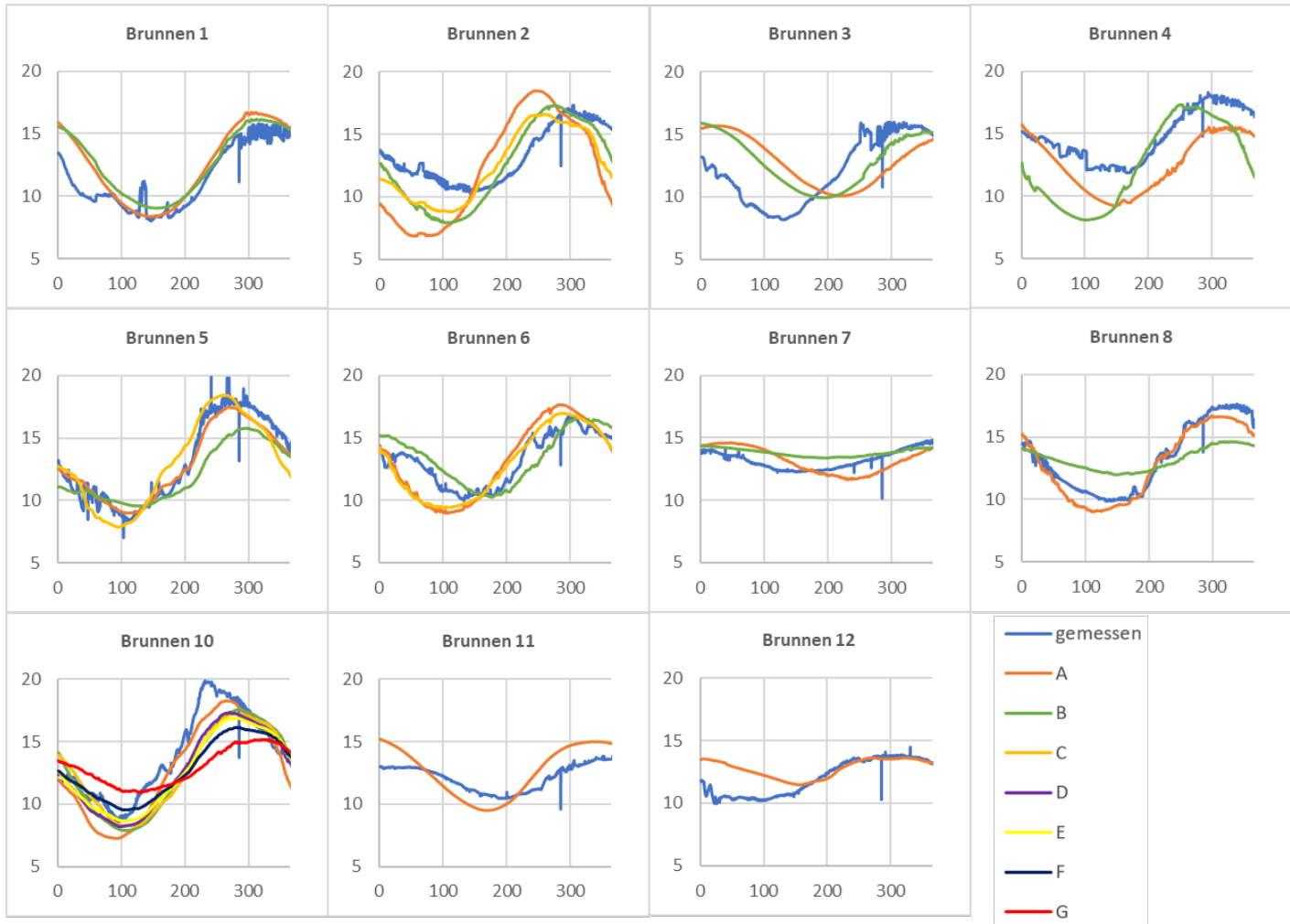


Abb. B1 Kalibrierergebnisse, gemessene und berechnete Grundwassertemperaturen in den Trinkwasserbrunnen der Langen Erlen. A: Hauptbrunnen; B bis G: Nebenbrunnen.

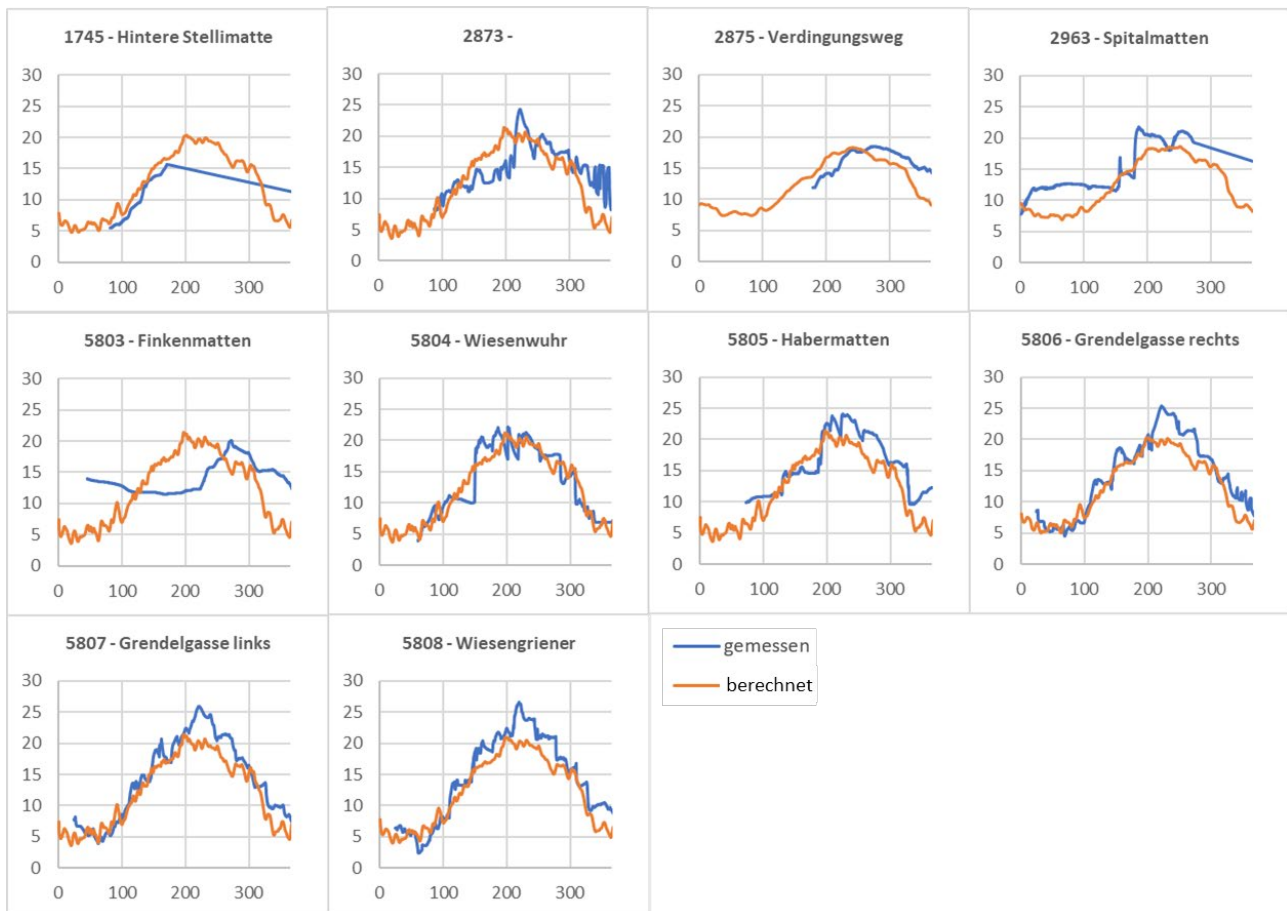
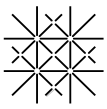
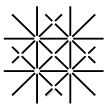


Abb. B2: Kalibrierergebnisse, gemessene und berechnete Grundwassertemperaturen in Piezometern im Grundwasserabstrom der künstlichen Grundwasseranreicherung der Langen Erlen.



Hardwald

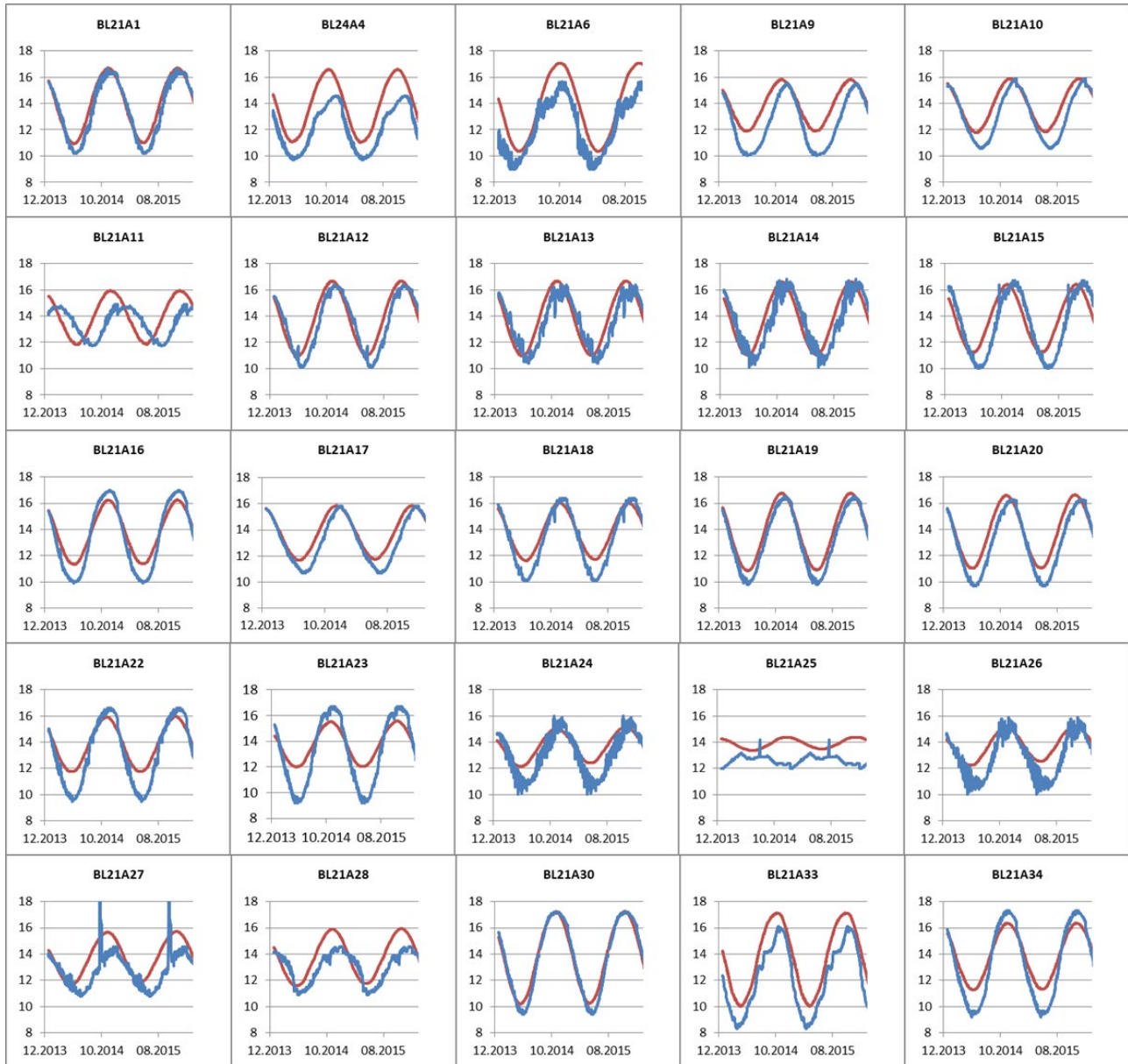


Abb. B3: Kalibrierergebnisse, gemessene und berechnete Grundwassertemperaturen in den Trinkwasserbrunnen der Hardwasser AG.

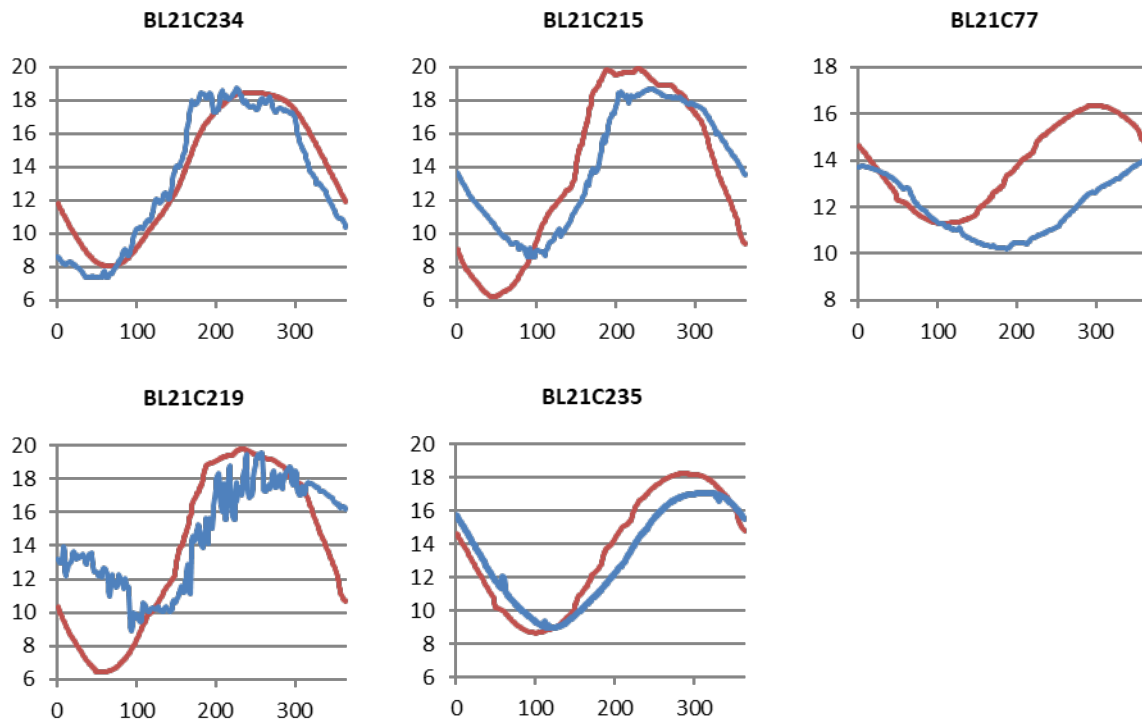
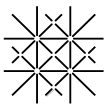


Abb. B4: Kalibrierergebnisse, gemessene und berechnete Grundwassertemperaturen in fünf Piezometern im Grundwasserabstrom der künstlichen Grundwasseranreicherung im Hardwald.

Unteres Birstal

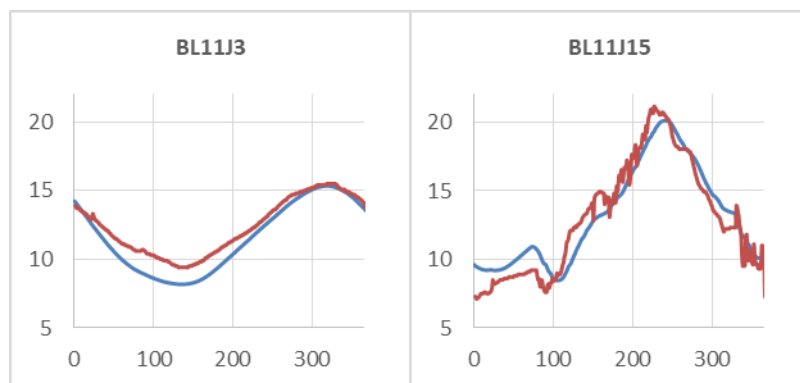


Abb. B5: Kalibrierergebnisse, gemessene und berechnete Grundwassertemperaturen in zwei Piezometern im Grundwasserabstrom der künstlichen Grundwasseranreicherung AAA.

Anhang C: Grundwasserbilanzen

Lange Erlen

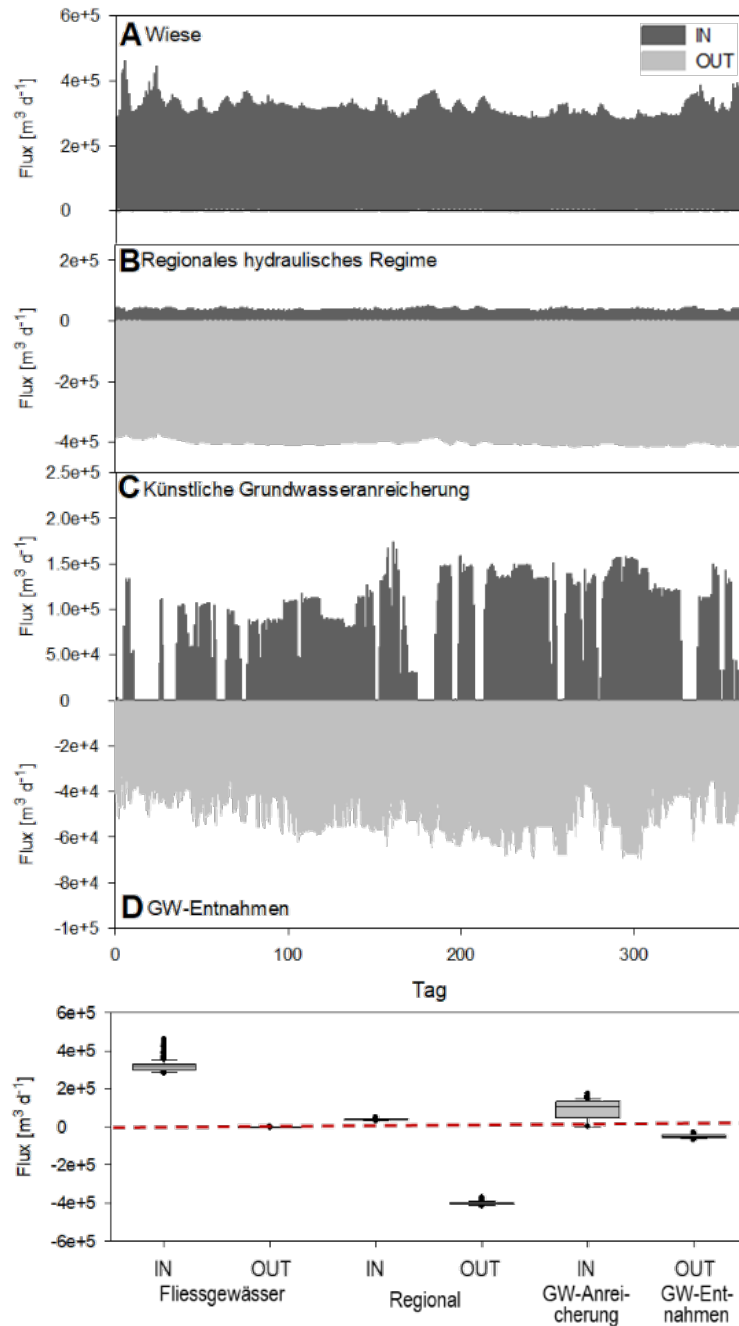


Abb. C1: Oben: Grundwasserbilanzen (In und Out) über die verschiedenen Randbedingungen der Langen Erlen für 2018 (

Abb. 5). Die Grundwasserneubildung über flächig perkolierendes Niederschlagswasser wurde über das Jahr konstant mit $3'489 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ berücksichtigt. A: Fluss-Grundwasser Interaktion. B: Wiesetalgrundwasserzustrom im Nordosten und Grundwasserzustrom gegen Basel. C: Künstliche Grundwasseranreicherung. D:

Grundwasserentnahmen der Trinkwasserversorgung. Unten: Boxplots der Wasserbilanzen über die verschiedenen Randbedingungen.

Hardwald

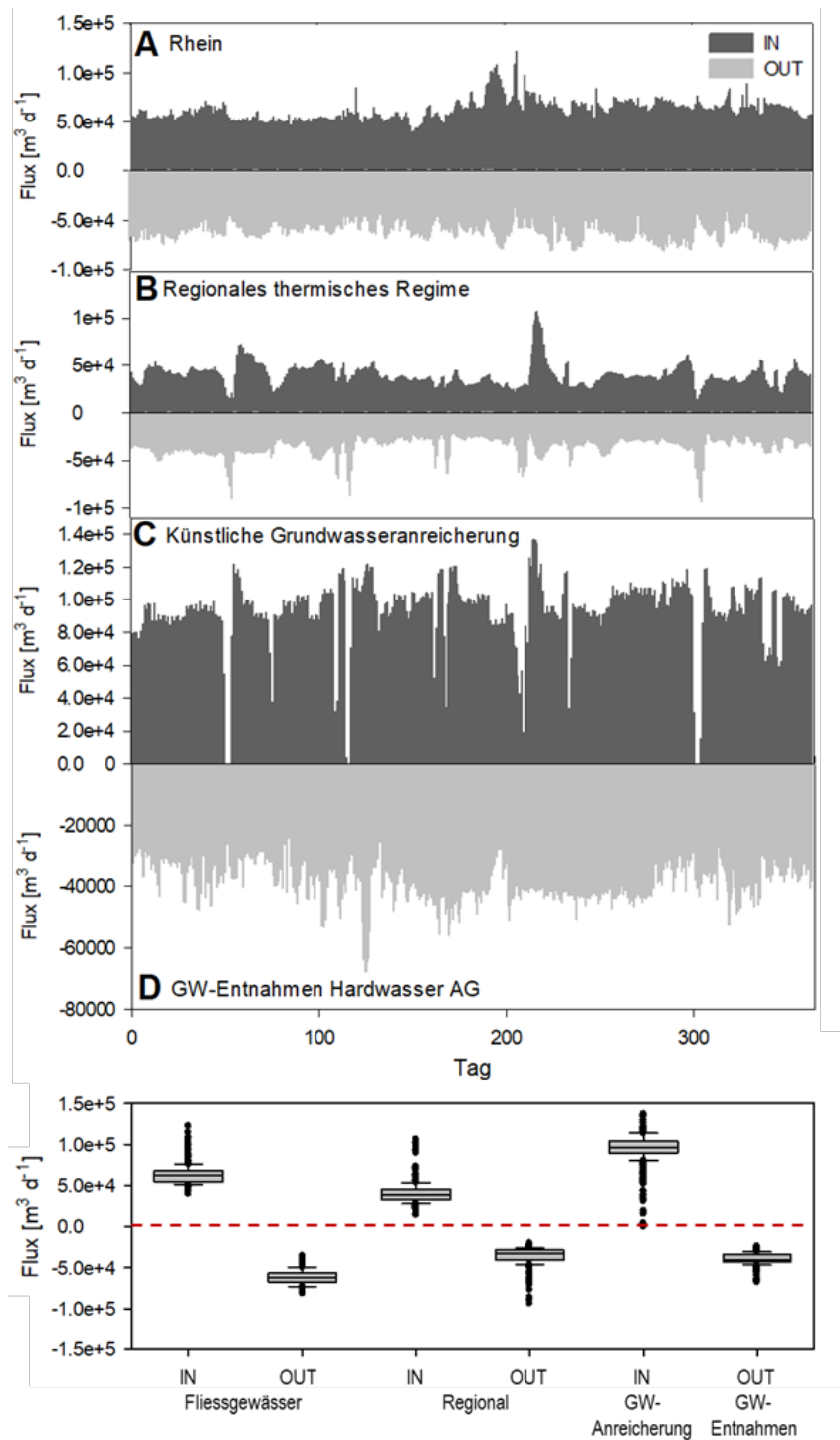
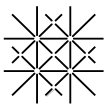


Abb. C2: Grundwasserbilanzen (In und Out) über die verschiedenen Randbedingungen im Untersuchungsgebiet Hardwald für 2014 (Abb. 6). Die Grundwassererneubildung über flächig perkulierendes Niederschlagswasser wurde über das Jahr konstant mit $318 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ berücksichtigt. A: Fluss-Grundwasser Interaktion. B:



Wiesetalgrundwasserzustrom im Nordosten und Grundwasserzustrom gegen Basel. C: Künstliche Grundwasseranreicherung. D: Grundwasserentnahmen der Trinkwasserversorgung. Unten: Boxplots der Wasserbilanzen über die verschiedenen Randbedingungen.

Unteres Birstal

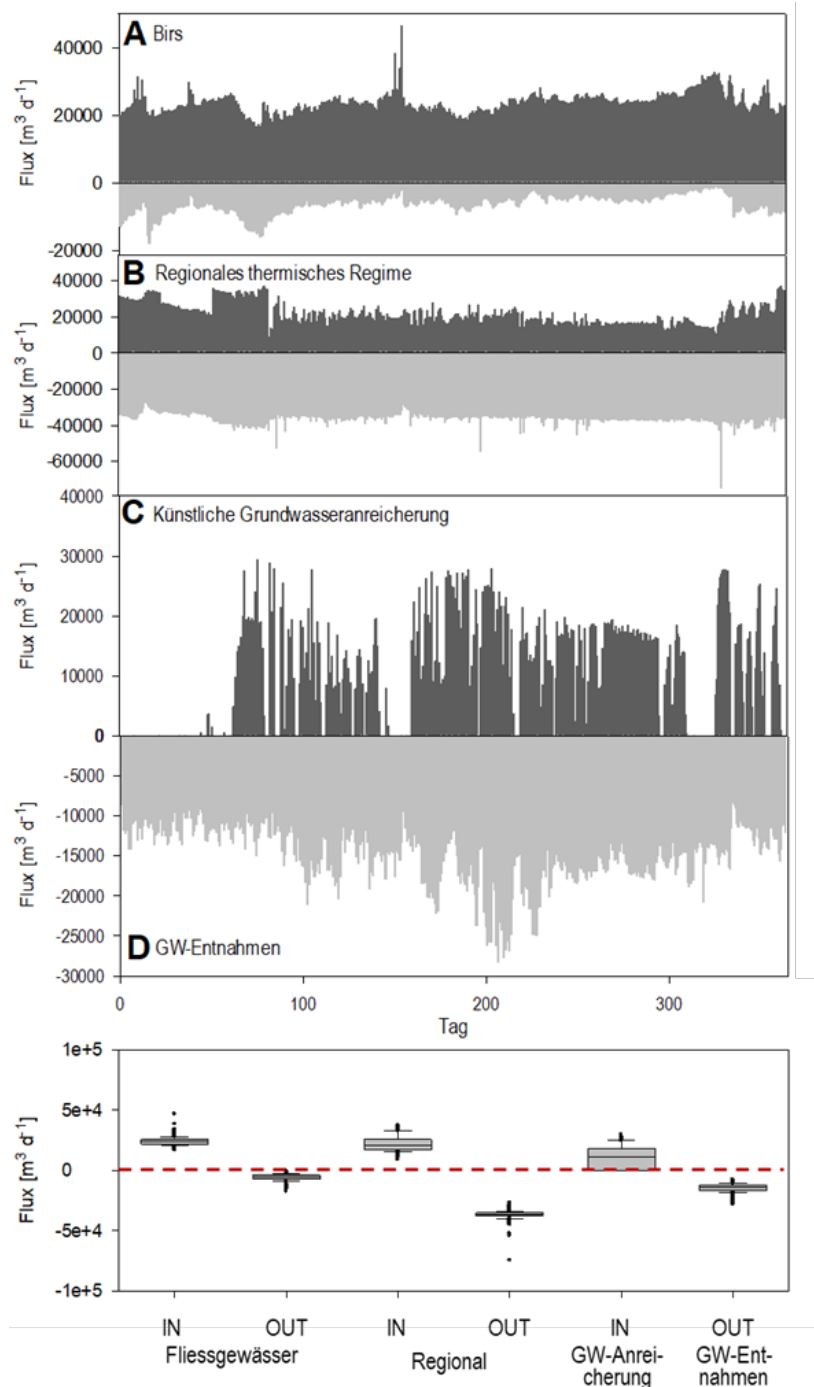


Abb. C3: Grundwasserbilanzen (In und Out) über die verschiedenen Randbedingungen im unteren Birstal für 2018 (Abb. 7). Die Grundwasserneubildung über flächig perkulierendes Niederschlagswasser wurde über das Jahr konstant mit $2'545 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ berücksichtigt. A: Fluss-Grundwasser Interaktion. B: Wiesetalgrundwasserzustrom im Nordosten und Grundwasserzustrom gegen Basel. C: Künstliche Grundwasseranreicherung. D:

Grundwasserentnahmen der Trinkwasserversorgung. Unten: Boxplots der Wasserbilanzen über die verschiedenen Randbedingungen.

Anhang D: Entwicklung Trinkwassertemperaturen

Lange Erlen

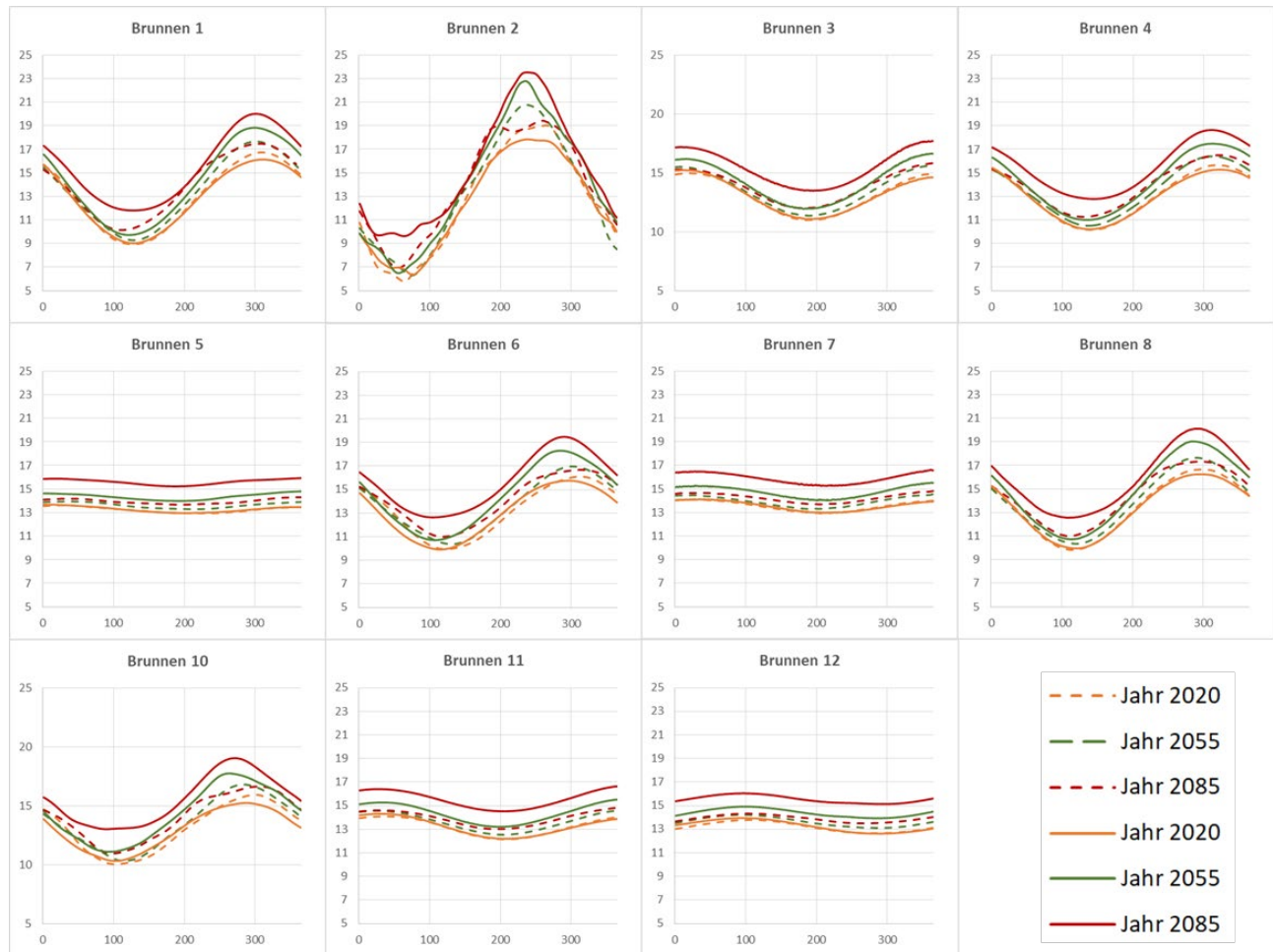


Abb. D1: Entwicklung Trinkwassertemperaturen der Langen Erlen für Klimaprojektionen mit den geringsten (RCP26_DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11: gestrichelte Linie) und gravierendsten (RCP85_SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44: durchgezogene Linie) Auswirkungen der Klimaänderungen.

Hardwald

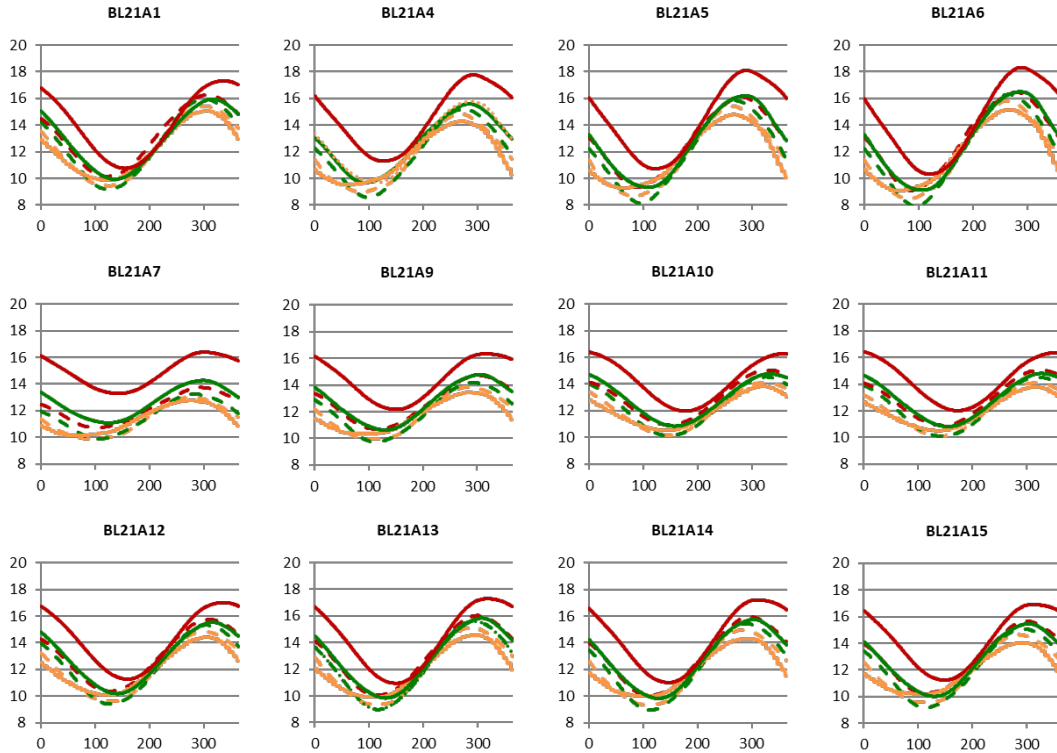


Abb. D2: Entwicklung Trinkwassertemperaturen im Hardwald für Klimaprojektionen mit den geringsten (RCP26_DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11: gestrichelte Linie) und gravierendsten (RCP85_SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44: durchgezogene Linie) Auswirkungen der Klimaänderungen.

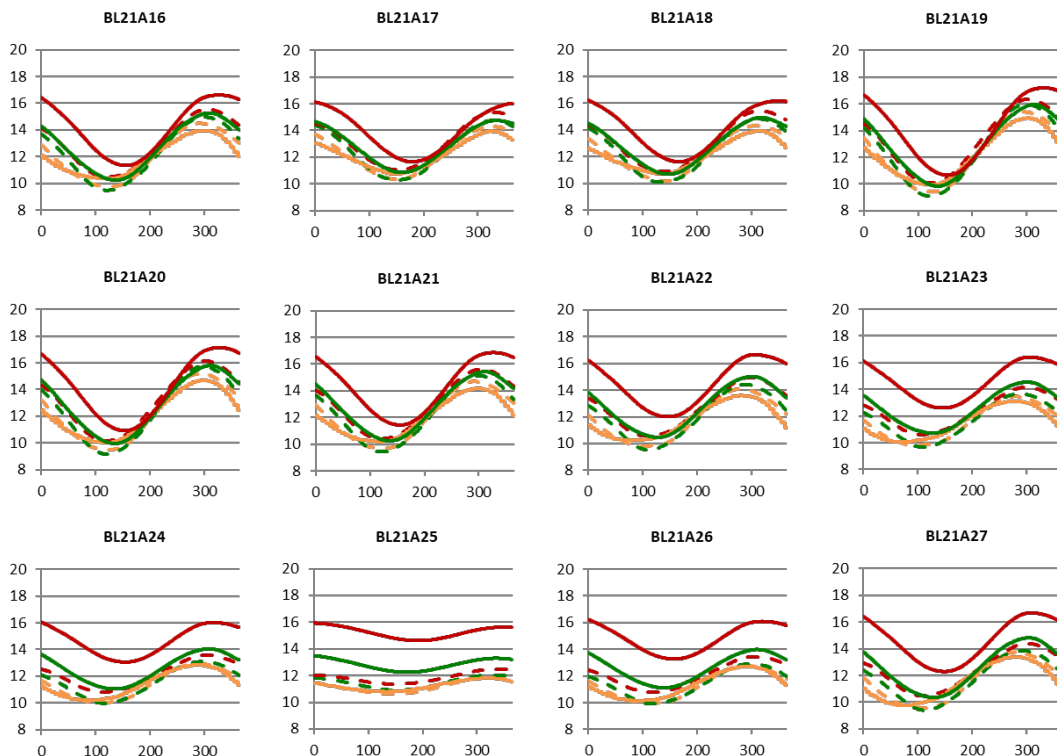


Abb. D3: Entwicklung Trinkwassertemperaturen im Hardwald für Klimaprojektionen mit den geringsten (RCP26_DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11: gestrichelte Linie) und gravierendsten (RCP85_SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44: durchgezogene Linie) Auswirkungen der Klimaänderungen.

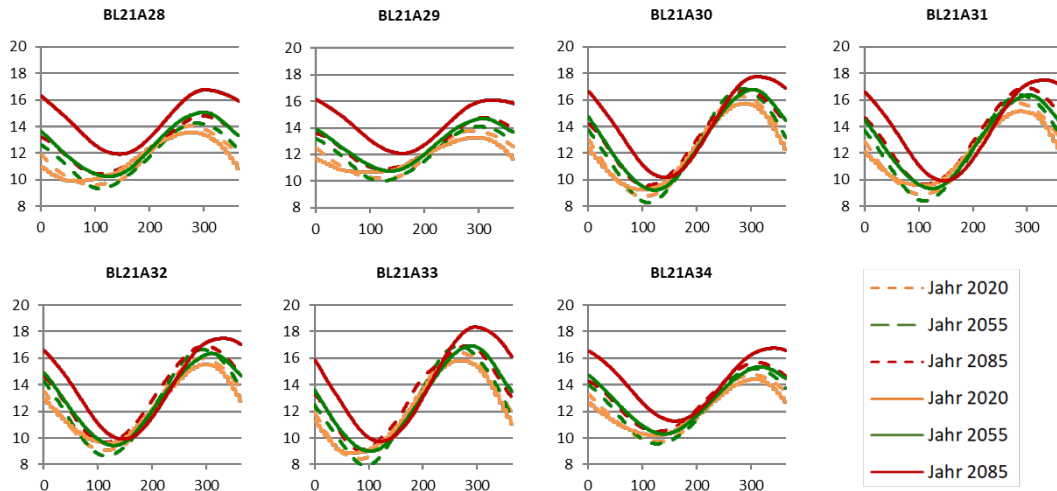
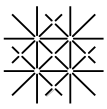


Abb. D₄: Entwicklung Trinkwassertemperaturen im Hardwald für Klimaprojektionen mit den geringsten (RCP₂₆_DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR₁₁: gestrichelte Linie) und gravierendsten (RCP₈₅_SMHI-RCA_ECEARTH_EUR₄₄: durchgezogene Linie) Auswirkungen der Klimaänderungen.

Unteres Birstal

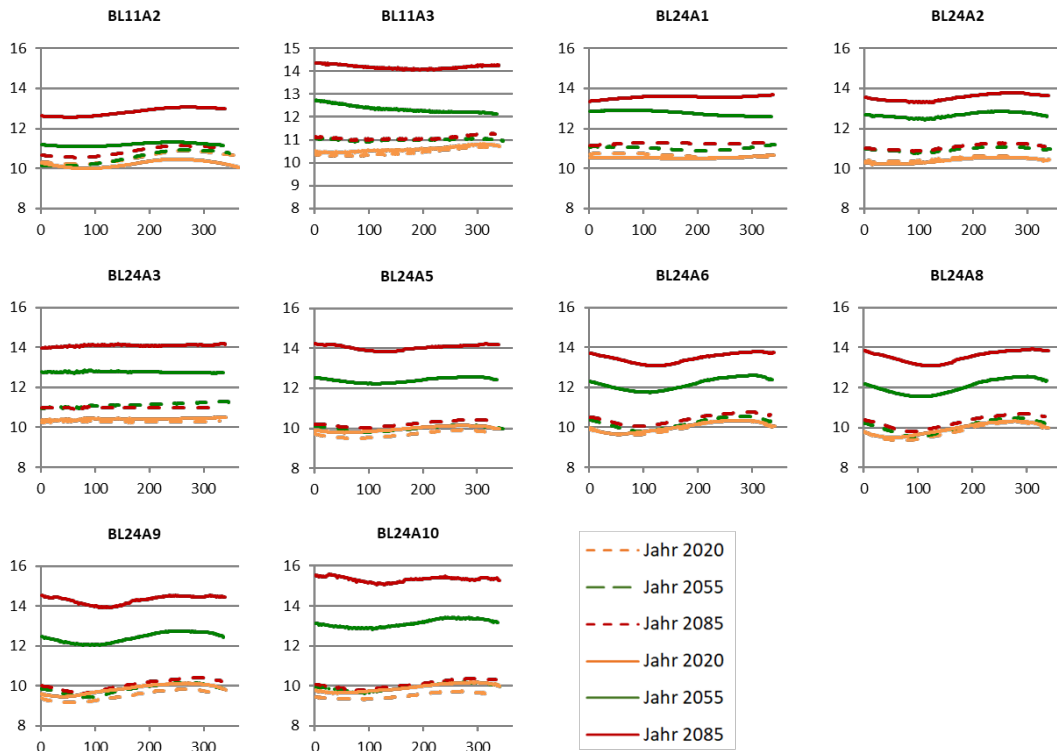
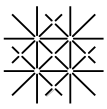


Abb. D₅: Entwicklung Trinkwassertemperaturen in den Gemeinden Aesch (BL₁₁A_{2/3}) und Reinach (BL₂₄A₁₋₁₀) im unteren Birstal für Klimaprojektionen mit den geringsten (RCP₂₆_DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR₁₁: gestrichelte Linie) und gravierendsten (RCP₈₅_SMHI-RCA_ECEARTH_EUR₄₄: durchgezogene Linie) Auswirkungen der Klimaänderungen.



Anhang E: IWRM

Lange Erlen

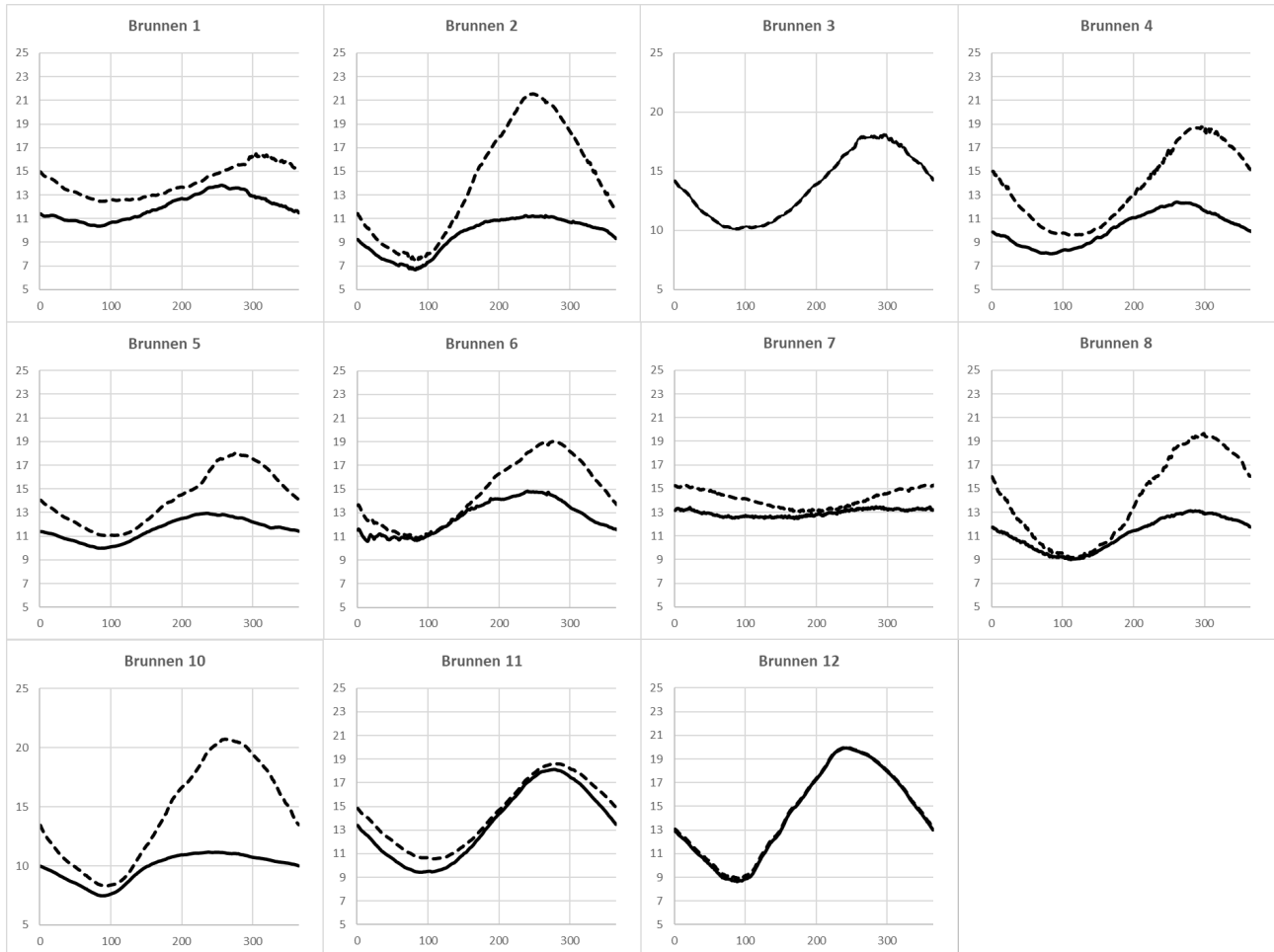
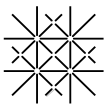


Abb. E1: Veränderung der Entnahmetemperaturen in den Trinkwasserbrunnen der Langen Erlen im Vergleich zum Ist-Zustand durch die Infiltration von Anreicherungswasser welches immer ≤ 10 °C beträgt.



Hardwald

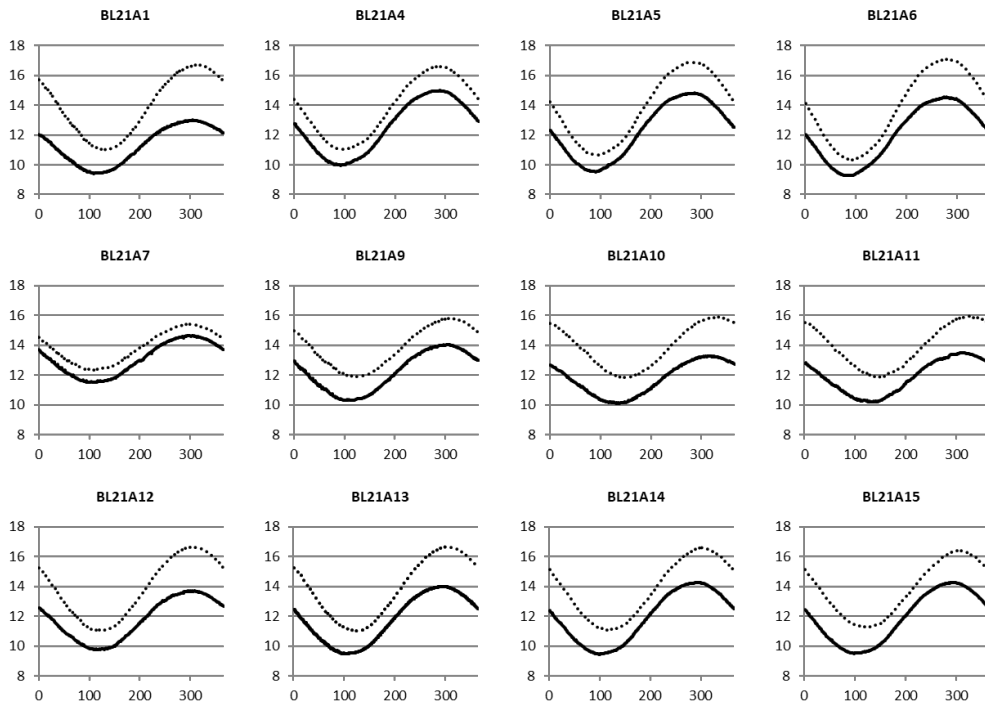


Abb. E2: Veränderung der Entnahmetemperaturen in den Trinkwasserbrunnen im Hardwald im Vergleich zum Ist-Zustand (gestrichelt) durch die Infiltration von Anreicherungswasser welches immer ≤ 10 °C beträgt.

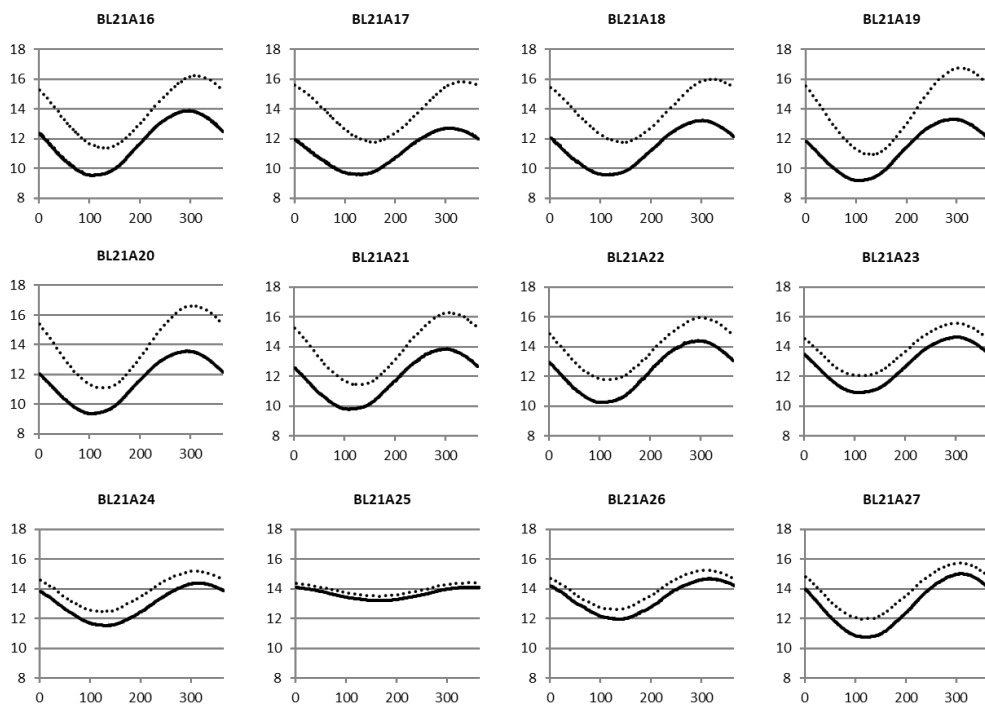


Abb. E3: Veränderung der Entnahmetemperaturen in den Trinkwasserbrunnen im Hardwald im Vergleich zum Ist-Zustand (gestrichelt) durch die Infiltration von Anreicherungswasser welches immer ≤ 10 °C beträgt.

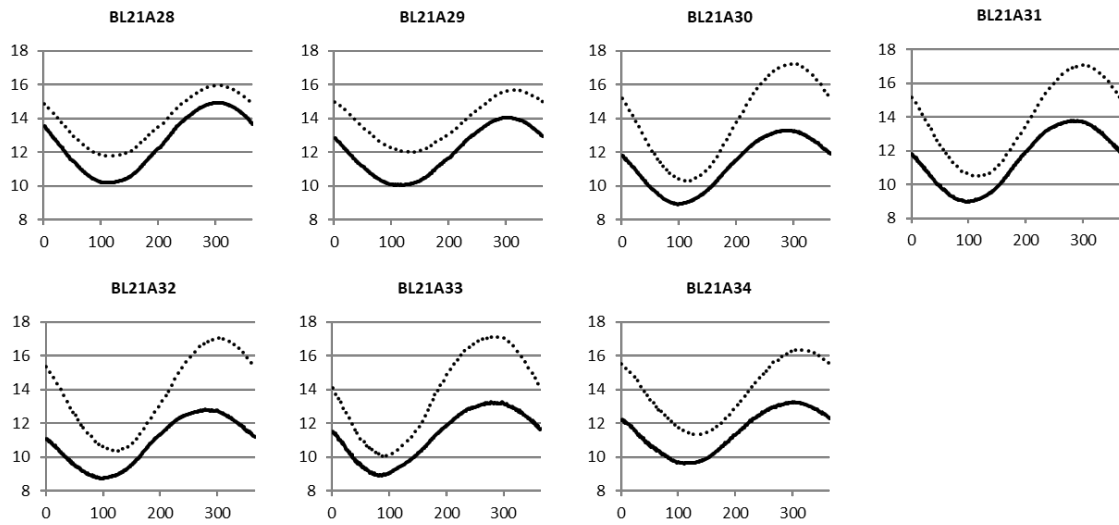
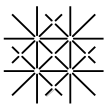


Abb. E4: Veränderung der Entnahmetemperaturen in den Trinkwasserbrunnen im Hardwald im Vergleich zum Ist-Zustand (gestrichelt) durch die Infiltration von Anreicherungs-wasser welches immer ≤ 10 °C beträgt.

Unteres Birstal

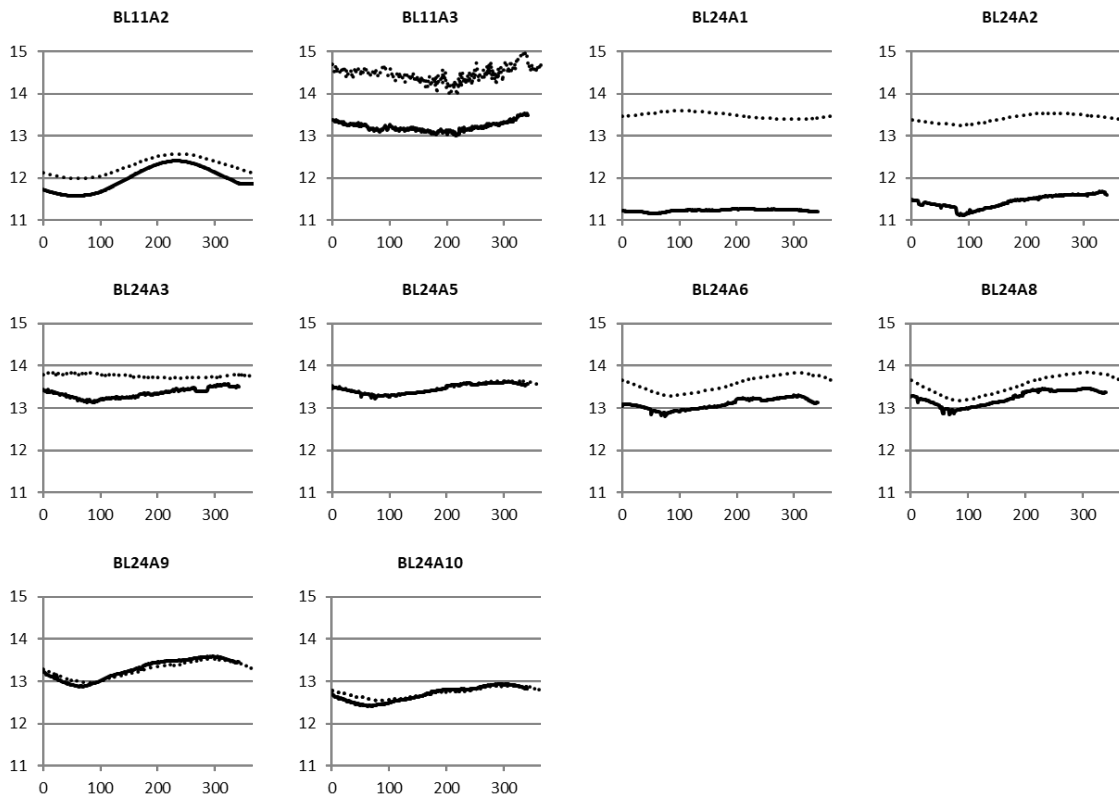


Abb. E5: Veränderung der Entnahmetemperaturen in den Trinkwasserbrunnen der Gemeinden Aesch und Reinach im unteren Birstal im Vergleich zum Ist-Zustand durch die Infiltration von Anreicherungs-wasser welches immer ≤ 10 °C beträgt.