



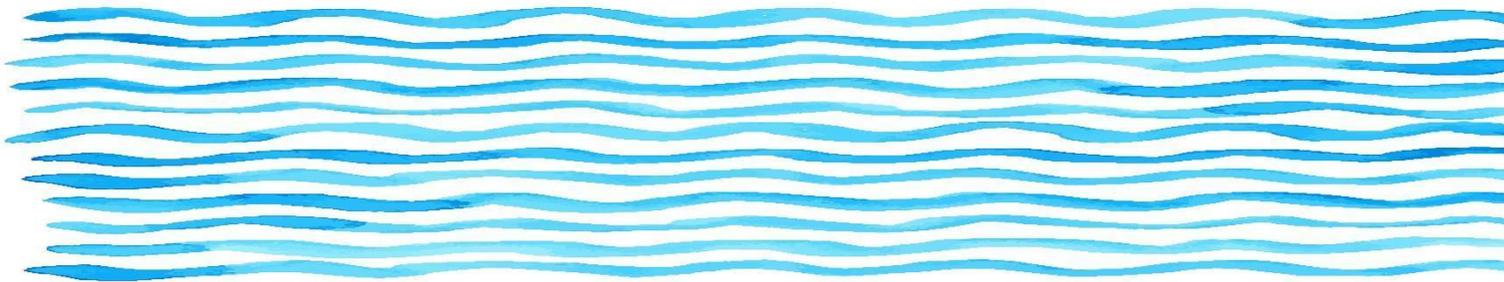
Universität
Basel

Unil
UNIL | Université de Lausanne

Ist-Zustand und Temperatur- Entwicklung Schweizer Locker- gesteins-Grundwasservorkom- men

HYDRO-CH2018 SYNTHESIS REPORT CHAPTERS:
“FUTURE CHANGES IN HYDROLOGY”

J. EPTING, P. HUGGENBERGER, A. AFFOLTER
A. MICHEL



IM AUFTRAG DES BUNDESAMTES FÜR UMWELT BAFU – SEPTEMBER 2020

EINE STUDIE IM RAHMEN DES NCCS THEMENSCHWERPUNKTES “HYDROLOGISCHE
GRUNDLAGEN ZUM KLIMAWANDEL” DES NATIONAL CENTRE FOR CLIMATE SER-
VICES

Impressum

Commissioned by: Federal Office for the Environment (FOEN), Hydrology Division, CH-3003 Bern. The FOEN is an agency of the Federal Department of the Environment, Transport, Energy and Communications (DETEC).

Contractors: Applied and Environmental Geology, Department of Environmental Sciences, University of Basel

Authors: Jannis Epting ⁽¹⁾, Peter Huggenberger ⁽¹⁾, Annette Affolter ⁽¹⁾, Adrien Michel ⁽²⁾

⁽¹⁾ University of Basel (UniBas)

⁽²⁾ Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

FOEN support: Fabia Huesler, Petra Schmockler-Fackel

Note: This study/report was prepared under contract to the Federal Office for the Environment (FOEN). The contractors bear sole responsibility for the content.

Citation: Epting, J., Michel, A., Huggenberger, P. Affolter, A., 2020. Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen. Hydro-CH2018 synthesis report chapters: "future changes in hydrology". Hydro-CH2018 Project. Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN), 3003 Bern, Switzerland. 118 pp, doi: 10.5451/unibas-ep78426

DOI: 10.5451/unibas-ep78426

Summary

Climate change will have both quantitative and qualitative effects on groundwater resources. These impacts differ for groundwater resources in rock and loose rock, urban or rural locations and the predominant processes of groundwater recharge.

To understand the development of future groundwater use and temperatures, it is necessary to take a differentiated view of the geological site conditions and relevant hydrogeological processes, including the processes of groundwater recharge, "positive and negative feedbacks" and direct anthropogenic influences. These fundamentals are essential for understanding the response of groundwater resources to anthropogenic changes and climate change impacts. The project objective of the Hydro-CH2018 add-on module "Current status and temperature development of Swiss unconsolidated groundwater resources" was a differentiated consideration of the influences that determine groundwater temperatures in unconsolidated groundwater resources.

This requires knowledge of the characteristic properties of groundwater resources, including spatial dimensions and groundwater recharge rates. On the other hand, the derivation of representative key parameters (aquifer geometries, storage properties, groundwater renewal rates and residence times, etc.) and knowledge of the essential processes of groundwater recharge and temperature imprinting allow a comparison and prognosis of the sensitivity of individual groundwater resources to climate change. A comparison of the characteristic hydraulic and thermal boundary conditions of the various representative Swiss unconsolidated rock groundwater deposits in the Central Plateau, the Jura and the Alpine region serves as a basis for deriving the transferability to Swiss groundwater resources in general. A selection of the climate projections (CH2018, 2018) developed within the framework of Hydro-CH2018 made it possible to describe the sensitivity of groundwater temperatures in connection with the main groundwater recharge processes.

For non-urban and rural areas, climate change is expected to have a strong overall impact on groundwater temperatures. In urban areas, however, direct anthropogenic influences are likely to continue to dominate (Epting and Huggenberger 2013). Increased thermal subsurface use and waste heat from underground structures as well as adaptation strategies in connection with global warming ("positive feedback") result in an increase in groundwater temperatures. Measurements for Basel show that groundwater temperatures rose by an average of 3.0 ± 0.7 K in the period from 1993 to 2016 alone and can even reach over 18 °C, especially in densely urbanized areas. In shallow groundwater resources with low thickness, such as in Davos, it is to be expected that the groundwater temperatures will be more strongly influenced. In contrast, groundwater temperature changes of thick groundwater resources, e.g. in Biel, or in some cases with large distances to the groundwater surface, e.g. in Winterthur, are only strongly attenuated and can be expected over long observation periods. Effects on groundwater temperatures are mainly related to seasonal shifts in groundwater recharge. Thus, a shift in precipitation and flood events from summer to the winter months is accompanied by an increase in groundwater recharge in comparatively "cool seasons" ("negative feedback"). As in previous studies (e.g. CH2014-Impacts (2014)), it could be shown once again that interaction with surface waters and increased groundwater recharge during high discharge periods will have a strong influence on groundwater temperature.

The results of the research work carried out have provided the basis for the development of new knowledge about the variability of hydraulic and thermal groundwater regimes in selected Swiss unconsolidated groundwater resources. Adequate monitoring concepts and quantitative analysis methods (modelling, GIS) allow for a more targeted and efficient use of local adaptation strategies, such as increased use of "waste heat" from urban aquifers with simultaneous reduction of increased groundwater temperatures.

Zusammenfassung

Der Klimawandel wird sowohl quantitative als auch qualitative Auswirkungen auf Grundwasservorkommen haben. Diese Auswirkungen unterscheiden sich für Grundwasservorkommen im Fels- und Lockergestein, urban oder ländlich geprägten Standorten sowie den vorherrschenden Prozessen der Grundwasserneubildung.

Für ein Verständnis der Entwicklung zukünftiger Grundwassernutzungen und -temperaturen bedarf es einer differenzierten Betrachtung der geologischen Standortbedingungen und relevanten hydrogeologischen Prozesse, einschliesslich der Prozesse der Grundwasserneubildung, „positiver und negativer Rückkoppelungen“ sowie direkter anthropogener Einflüsse. Diese Grundlagen sind wesentlich, um die Reaktion von Grundwasservorkommen auf anthropogene Veränderungen und Einflüsse des Klimawandels zu verstehen. Projektziel des Hydro-CH2018 Zusatzmoduls „Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen“ war eine differenzierte Betrachtung der Einflüsse, welche die Grundwassertemperaturen bestimmen.

Hierzu sind einerseits Kenntnisse charakteristischer Eigenschaften von Grundwasservorkommen notwendig, einschliesslich räumlicher Dimensionen und Grundwassererneuerungsraten. Andererseits ermöglicht die Ableitung repräsentativer Schlüsselparameter (Aquifergeometrien, Speichereigenschaften, Grundwassererneuerungsraten und -verweilzeiten, etc.) sowie eine Kenntnis der Grundwasserneubildungsprozesse und der Temperaturprägung einen Vergleich aber auch Prognosen über die Sensitivität einzelner Grundwasservorkommen auf den Klimawandel. Ein Vergleich der charakteristischen hydraulischen und thermischen Randbedingungen verschiedener repräsentativer Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen im Mittelland, dem Jura und dem Alpenraum ist Grundlage für die Ableitung der Übertragbarkeit auf Schweizer Grundwasservorkommen im Allgemeinen. Eine Auswahl, der im Rahmen von Hydro-CH2018 erarbeiteten Klimaprojektionen (CH2018, 2018), ermöglichte es die Sensitivität von Grundwassertemperaturen in Zusammenhang mit den wesentlichen Grundwasserneubildungsprozessen zu beschreiben.

Für nicht-urbane und ländliche Gebiete wird erwartet, dass der Klimawandel insgesamt einen starken Einfluss auf die Grundwassertemperaturen hat. Hingegen dürften in urbanen Gebieten direkte anthropogene Einflüsse weiterhin dominieren (Epting und Huggenberger 2013). So resultiert die vermehrte thermische Nutzung des Untergrundes und die Abwärme von Untergrundstrukturen als auch Anpassungsstrategien in Zusammenhang mit der Klimaerwärmung („positive Rückkopplung“) in erhöhten Grundwassertemperaturen. Messdaten für Basel zeigen, dass Grundwassertemperaturen, allein für den Zeitraum von 1993 bis 2016, im Mittel um 3.0 ± 0.7 K stiegen und in stark urbanisierten Gebieten sogar über 18 °C erreichen können. Bei flachgründigen Grundwasservorkommen mit geringer Mächtigkeit, wie z.B. in Davos, ist damit zu rechnen, dass die Temperaturen des Grundwassers stark beeinflusst werden. Dagegen sind Temperaturveränderungen bei tiefgründigen Grundwasserressourcen, wie z.B. in Biel, oder teilweise grossen Flurabständen, wie z.B. Winterthur, nur stark gedämpft und über lange Beobachtungszeiträume zu erwarten. Auswirkungen auf die Grundwassertemperaturen hängen vor allem mit saisonalen Verschiebungen der Grundwasserneubildung zusammen. So geht eine Verlagerung von Niederschlags- und Hochwasserereignissen vom Sommer in die Wintermonate einher mit einer Zunahme der Grundwasserneubildung in vergleichsweise „kühlen Jahreszeiten“ („negative Rückkopplung“). Wie schon in vorausgehenden Arbeiten (z.B. CH2014-Impacts (2014)) konnte aufgezeigt werden, dass die Interaktion mit Oberflächengewässern und eine verstärkte Grundwasserneubildung während hoher Wasserführung der Fliessgewässer die Temperaturprägung des Grundwassers stark beeinflussen werden.

Mit den Resultaten der Forschungsarbeit konnten Grundlagen geschaffen und Wissenslücken im Zusammenhang mit der Variabilität hydraulischer und thermischer Grundwasserregime Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen geschlossen werden. Adäquate Monitoring-Konzepte und quantitativer Analysemethoden (Modellierung, GIS), erlauben es dabei den Spielraum für lokale Anpassungsstrategien, wie z.B. vermehrte Nutzung der „Abfallwärme“ aus urbanen Grundwasserleitern mit gleichzeitig Reduktion erhöhter Grundwassertemperaturen, zielgerichteter und effizienter zu nutzen.

Résumé

Le changement climatique aura des effets à la fois quantitatifs et qualitatifs sur les ressources en eaux souterraines. Ces effets diffèrent selon le type d'aquifère d'une roche meuble ou dure, dans une zone urbaine ou rurale et selon les processus dominants de recharge des nappes.

Afin de comprendre l'évolution des changements futurs de l'utilisation et la température des eaux souterraines, il nécessite au préalable une étude différenciée des conditions géologiques des sites, des processus hydrogéologiques et des recharges des nappes, des "rétroactions positives et négatives", ainsi que l'influence anthropique directe. Ces bases sont essentielles afin de comprendre la répercussion des ressources des eaux souterraines aux changements anthropiques et aux effets du changement climatique. L'objectif du projet du module complémentaire Hydro-CH2018 "État actuel et évolution de la température des ressources en eau souterraine des roches meubles" était une prise en compte différenciée des influences déterminant la température des eaux souterraines de la roche meuble.

Pour ce faire, il nécessite une connaissance des propriétés caractéristiques des ressources en eau souterraine, ainsi que les dimensions spatiales et les taux de renouvellement. D'une autre part, la dérivation des paramètres clés représentatifs (géométrie de l'aquifère, propriétés de stockage, taux de renouvellement des eaux souterraines et temps de rétention, etc.), ainsi que les processus essentiels de la recharge des eaux souterraines et de la formation de la température permettent de comparer, mais aussi de pronostiquer sur la sensibilité des différentes ressources des eaux souterraines du changement climatique. Une comparaison des contraintes hydrauliques et thermiques caractéristiques des diverses aquifères en roche meuble représentatifs du Plateau Suisse, Jura et de la région alpine sert de base afin d'estimer la transférabilité des ressources en eaux souterraines suisses.

Pour les zones rurales, le changement climatique dans son ensemble devrait avoir un impact considérable sur la température des eaux souterraines. Concernant les zones urbaines, les influences directes d'origine anthropique continueront de primer (Epting et Huggenberger 2013). L'augmentation de l'utilisation thermique du sous-sol, de la chaleur résiduelle des structures souterraines, ainsi que des stratégies d'adaptation liée au réchauffement climatique (« rétroaction positive ») entraînent une augmentation des températures de la nappe. Durant la période de 1993-2016, des mesures ont été effectuées dans la ville Bâle. Ces derniers montrent que la température des eaux souterraines a augmenté en moyenne de $3,0 \pm 0,7$ K. En particulier dans les zones de haute densité, la température peut atteindre les 18°C.

Dans le cas des eaux souterraines peu profondes et à faible épaisseur, par exemple à Davos, il faut s'attendre à ce que la température soit davantage influencée. Au contraire pour les eaux souterraines profondes, par exemple à Bienne, ou dans certains cas avec des grandes distances par rapport à la surface, par exemple à Winterthur, les changements de température sont atténués et peuvent être observés sur une longue période. Les effets sur les températures des eaux souterraines sont principalement liés aux changements saisonniers de sa recharge.

Ainsi, un déplacement des précipitations et des inondations d'été vers les mois d'hiver est accompagné d'une augmentation de la recharge des eaux souterraines en comparaison des "saisons fraîches" ("rétroaction négative"). Comme dans les études précédentes (par ex. CH2014-Impacts (2014)), il a pu être démontré à nouveau, que l'interaction avec les eaux de surface et l'augmentation de la recharge des eaux souterraines lors des périodes de grandes crues influenceront fortement les caractéristiques des nappes.

Les résultats des travaux de recherche ont permis d'apporter de nouvelles connaissances sur la variabilité des régimes hydrauliques et thermiques des nappes phréatiques de roche en meuble de la Suisse. Des concepts de surveillance adéquats et des méthodes d'analyse quantitative (modélisation, SIG) permettent une utilisation plus ciblée et plus efficace des possibilités de stratégies d'adaptation locales, par exemple une utilisation accrue de la "chaleur résiduelle" des aquifères urbains résultant une réduction des températures élevées des eaux souterraines.

Inhalt

Summary	2
Zusammenfassung.....	3
Résumé	4
Inhalt.....	5
1. Einleitung und Ausgangslage.....	7
1.1 Aktueller Forschungsstand.....	7
1.2 Forschungsarbeiten AUG.....	9
2. Fragestellungen und Ziele.....	10
3. Konzept und Methoden	11
3.1 Untersuchungsgebiete	11
3.2 Hydraulischer und thermischer Istzustand	12
3.3 Aquifergeometrien	12
3.4 Fliesswege, -zeiten und -geschwindigkeiten im Grundwasser	13
3.5 Grundwasserneubildung – Grundwasserbilanz	14
3.6 Auswahl Klimaszenarien	18
4 Resultate	19
4.1 Basel.....	19
4.2 Basel-Landschaft.....	20
4.3 Winterthur	21
4.4 Biel.....	22
4.5 Davos	23
5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	24
5.1 Entwicklung Grundwasserneubildung und Grundwassertemperaturen	26
5.2 Beurteilung der Datengrundlage und Systemkenntnis	28
5.3 Übertragbarkeit.....	28
6 Abschliessende Bemerkungen und Empfehlungen	29
6.1 Forschungslücken und offene Fragen.....	29
7 Referenzen	31
Anhang A1: Lockergesteins-Grundwasservorkommen Kanton Basel-Stadt	33
1 Hydraulischer und thermischer Istzustand	34
2 Aquifergeometrien	39
3 Fliesswege, -zeiten und -geschwindigkeiten im Grundwasser	41
4 Grundwasserneubildung, Temperaturentwicklung und Energiebilanzen.....	44
5 Auswirkungen Klimaänderungen.....	51
Referenzen.....	53
Anhang A2: Lockergesteins-Grundwasservorkommen Kanton Basel-Landschaft.....	54
1 Hydraulischer und thermischer Istzustand	55
2 Aquifergeometrien	56
3 Fliesswege und -zeiten im Grundwasser	61
4 Grundwasserneubildung – Grundwasserbilanz	62
5 Auswirkungen Klimaänderungen.....	65
Referenzen.....	71

Anhang A3: Lockergesteins-Grundwasservorkommen Winterthur (Kanton Zürich)	73
1. Hydraulischer und thermischer Istzustand	74
2. Aquifergeometrien	76
3. Fließwege und -zeiten im Grundwasser	78
4. Grundwasserneubildung – Grundwasserbilanz	80
5. Auswirkungen Klimaänderungen.....	81
Grundlagedaten.....	85
Anhang A4: Lockergesteins-Grundwasservorkommen Biel (Kanton Bern)	88
1. Hydraulischer und thermischer Istzustand	89
2. Aquifergeometrien	92
3. Fließwege und -zeiten im Grundwasser	94
4. Grundwasserneubildung	96
5. Auswirkungen Klimaänderungen.....	97
Referenzen	101
Anhang A5: Lockergesteins-Grundwasservorkommen Davos (Kanton Graubünden)	102
1 Hydraulischer und thermischer Istzustand	103
2 Aquifergeometrien	105
3 Fließwege und -zeiten im Grundwasser	108
4 Grundwasserneubildung – Grundwasserbilanz	110
5 Auswirkungen Klimaänderungen.....	111
Grundlagedaten.....	117

1. Einleitung und Ausgangslage

Der Klimawandel (IPCC, 2007) ist ein wichtiges Thema auf der politischen Agenda, nicht nur auf nationaler und internationaler Ebene, sondern auch im Hinblick auf regionale Anpassungsstrategien. Aktuelle Diskussionen konzentrieren sich auf Fragestellungen, wie Wasserressourcen quantitativ und qualitativ durch erhöhte Lufttemperaturen beeinflusst werden. Obwohl der Klimawandel ein globales Phänomen ist, verändern sich vor allem auch lokale Wasserbilanzen (Oni et al., 2014; Porporato et al., 2004). Um auf lokaler Ebene frühzeitig Regionen spezifische Handlungsstrategien entwickeln zu können, ist es dabei, für die langfristige Sicherung der Versorgung der Schweiz mit Trink- und Nutzwasser (Landwirtschaft), wesentlich die lokalen Auswirkungen zu verstehen.

Schon seit den 1980ern kann zumindest für einige Grundwasserleiter in der Schweiz ein deutlicher Anstieg der Grundwassertemperaturen (in der Grössenordnung von 1 °C) nachgewiesen werden, welcher mit den Klimaänderungen in Zusammenhang gebracht werden kann (Figura et al., 2011). Während des ungewöhnlich heissen und trockenen Sommers 2003 wurde beobachtet, dass der Trinkwasserverbrauch stieg und sich die Grundwassertemperaturen in dem Ausmass erhöhten, dass teilweise anoxische Verhältnisse im Grundwasserleiter resultierten (Hoehn and Scholtis, 2011). Neben Auswirkungen auf die Grundwasserqualität (Sprenger et al., 2011), können auch Problem bezüglich der Trinkwasserproduktion und mögliche Verstopfungen von Pumpbrunnen durch präzipitiertes Mangan und Eisen einhergehen (Hunt et al., 2002).

Die Einflüsse erhöhter Temperaturen auf die Grundwasserqualität, einschliesslich biologischer, chemischer und physikalischer Aspekte, sind wenig bekannt ((CEC), 2000; Bates et al., 2008; Brielmann et al., 2009; Jesušek et al., 2013; Kipfer and Livingstone, 2008; Possemiers et al., 2014). Unter anderem könnten kommunale Trinkwasserversorger und industrielle Grundwassernutzer mit erheblichen Investitionen im Rahmen von Anpassungsstrategien bei der Trinkwasseraufbereitung konfrontiert werden. Speziell in urbanen Gebieten, mit oft zahlreichen verunreinigten Industriestandorten, kann eine Erhöhung der Grundwassertemperaturen in Veränderungen der mikrobiellen Aktivitäten und der Grundwasserchemie resultieren (Brock and Madigan, 1988).

In Bezug auf die Auswirkungen des Klimawandels muss zwischen urbanen und ländlich geprägten Grundwasservorkommen unterschieden werden. Für nicht-urbane und ländliche Gebiete wird erwartet, dass die kumulativen Auswirkungen des Klimawandels einen starken quantitativen und qualitativen Einfluss auf die Grundwasservorkommen haben. Hingegen sind erhöhte Temperaturen, welche in urbanen Grundwasservorkommen beobachtet werden, hauptsächlich auf lokale und regionale anthropogene Faktoren (Untergrundstrukturen und thermische Nutzung) zurückzuführen, während der Klimawandel lediglich eine sekundäre Rolle spielt (Bayer et al., 2016; Epting and Huggenberger, 2013a). Deshalb ist vor allem in urbanisierten Gebieten zu erwarten, dass eine vermehrte thermische Nutzung des Untergrundes sowie Anpassungsstrategien in Zusammenhang mit der Klimaerwärmung (positive Rückkopplungsmechanismen) in einer Erhöhung der Grundwassertemperaturen resultiert. In ländlichen Gebieten ist zudem unklar wie sich weitverbreitete Drainagesysteme in der Landwirtschaft und beschleunigter Oberflächenabfluss, auf die Grundwassereubildung und die Temperaturprägung des Grundwassers auswirken. Dabei ist nicht auszuschliessen, dass der Einfluss von anthropogenen Anpassungsstrategien auf den Klimawandel größer sein kann als der Einfluss des Klimawandels selbst (Sprenger et al., 2011).

1.1 Aktueller Forschungsstand

Im aktuellen Zustandsbericht zur Entwicklung des Grundwassers in der Schweiz wird festgehalten, dass die Auswirkungen des Klimawandels auf Grundwassermenge und -temperatur im Auge zu behalten und zu antizipieren (BAFU, 2019). Der Bericht folgert zudem, dass klimatische Veränderungen, sich auf das Grundwasser auszuwirken beginnen. Insgesamt aber folgert der Bericht, dass die Auswirkungen der Klimaänderung tendenziell gering sind und, dass

mit dem aktuellen Grundwasserüberwachungssystem keine landesweit statistisch belastbare und repräsentative Analyse der Grundwassertemperatur und ihrer Entwicklung möglich sei.

Ein signifikanter, grossräumiger Anstieg der Grundwassertemperatur – wie dies infolge der Klimaänderung erwartet werden könnte und z.B. regional in Österreich beobachtet wird (Umweltbundesamt, 2011) – lässt sich in der Schweiz, aufgrund der Vielfalt an unterschiedlichen Aquifergeometrien und Parameter, bislang nicht erkennen. Dies schliesst nicht aus, dass lokal die Grundwassertemperatur über mehrere Jahre ansteigt. Andererseits kann in Grundwasservorkommen mit nivo-glazialen Grundwasserregime eine klimabedingt verstärkte Gletscherschmelze mittelfristig zu einem Rückgang der Grundwassertemperatur führen, wenn durch das Schmelzwasser die Temperatur der ins Grundwasser infiltrierenden Fließgewässer sinkt. Ende der 1980er-Jahre ist die Grundwassertemperatur zudem vielerorts sprunghaft gestiegen, da sich die arktische Oszillation und damit das Klima in weiten Teilen der nördlichen Hemisphäre abrupt geändert haben (Figura et al., 2011). Solche Phänomene sind bei der Interpretation der Entwicklung der Grundwassertemperatur ebenfalls zu berücksichtigen. Zusätzlich zu den NAQUA-Daten wurden in Zusammenarbeit mit der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie SGH punktuell lange Datenreihen zur Grundwassertemperatur bei Gemeinden und Wasserversorgungen erhoben und digital gesichert (Schürch et al., 2018).

Hydrologische Klimastudien wie CH2014-Impacts (2014) und NFP61 (2015) prognostizieren, dass im Sommer zukünftig häufiger Trockenperioden auftreten werden, während im Winter leicht höhere Niederschlagsmengen und eine steigende Schneefallgrenze zu einer verstärkten Grundwasserneubildung führen dürften. Die Studien gehen zudem tendenziell davon aus, dass infolge der Klimaänderung die Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen langfristig zunehmen werden. Damit dürfte es in schnell reagierenden Karst- und oberflächennahen Lockergesteins-Grundwasserleitern häufiger zu kurzfristig hohen Grundwasserständen und Quellabflüssen kommen. Gemäss CCHydro (BAFU, 2012) werden sich die Wasserressourcen der Schweiz, einschliesslich der Grundwasserressourcen, in Zukunft jedoch insgesamt nur geringfügig verändern. Lokal bis regional könnten aber infolge Verschiebung der saisonalen Verteilung der Niederschläge und Abflüsse, welche oft eine sehr hohe Variabilität aufzeigen, vermehrt Engpässe in der Wasserversorgung auftreten.

Im Rahmen der CH2014-Impacts (2014) Studie konnte, basierend auf den CH2011-Szenarien, eine erste Bewertung der Entwicklung von Grundwassertemperaturen und möglicher Grundwassererwärmungen für sieben ausgewählte Grundwasservorkommen im Schweizer Mittelland vorgenommen werden. Für vier der untersuchten Grundwasservorkommen, welche repräsentativ für 30 % der Schweizer Trinkwasserproduktionsstandorte sind, ist die Infiltration von Flusswasser die wesentliche Komponente der Grundwasserneubildung („**river-fed aquifers**“). Für die übrigen drei Grundwasservorkommen ist die Infiltration von Niederschlagswasser die wesentliche Komponente der Grundwasserneubildung („**precipitation-fed aquifers**“). Die Projektionen basieren dabei auf der empirischen Beziehung zwischen Grundwasser- und Lufttemperatur. Mittels zweier linearer Regressionsmodelle konnten die Korrelationen zwischen den Jahren (jährlichen mittleren Grundwassertemperatur) sowie monatliche Anomalien (monatlichen Durchschnittstemperatur - Saisonalität) abgeschätzt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass es eine klare Tendenz zur Erwärmung der Grundwasservorkommen gibt, welche am stärksten im Sommer und Herbst ist. Der Hauptgrund für diese Grundwassererwärmung ist dabei vor allem die Erwärmung der Flüsse. Deshalb werden insbesondere an Standorten, bei denen das Grundwasser vorwiegend durch infiltrierende Oberflächengewässer gespeist wird, die Grundwassertemperaturen steigen. Diese Erwärmung des Grundwassers kann, vor allem für die Betrachtung von mittel- bis langfristigen Zeiträumen (2060 und 2085), zu einer Verschlechterung der Grundwasserqualität und der Trinkwasserproduktion führen (Figura et al., 2013; Sprenger et al., 2011). Für die stärkste Erwärmung (Szenario A2, Periode 2085) reichen die Projektionen von einer leichten Abkühlung des Grundwassers bis hin zu einer Erwärmung von bis zu 7 °C. Eine Schätzung der mittleren Temperaturänderung des Grundwassers für den Zeitraum bis 2085 und die drei CH2011-Treibhausgas-Szenarien liegt im Bereich von + 1 bis + 3 °C. Die CH2014-Impacts (2014) Studie fasst auch zusammen, dass nur wenige Studien zum Einfluss des Klimas auf quantitative und qualitative Veränderung

von Grundwasservorkommen existieren. In diesen Studien nicht berücksichtigt wurden veränderte Temperaturen der Oberflächengewässer und damit auch erhöhte Temperaturen von infiltrierenden Oberflächengewässern. Die vorgenommenen Auswertungen beschränkten sich ausschliesslich auf statistische Beziehungen zwischen den projizierten Luft- und den Grundwassertemperaturen und unterliegen somit relativ grossen Unsicherheiten. Weitere Studien sollen sich auf geeignete Modelle für das Grundwasser, temperaturbasierenden Feldexperimenten und der Langzeitüberwachung konzentrieren.

1.2 Forschungsarbeiten AUG

In Epting et al. (2013) und Mueller et al. (2018) konnte für die Lockergesteins-Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Stadt und auf Grundlage von Wärmetransportmodellierungen die verschiedenen hydraulischen und thermischen Randbedingungen quantifiziert und der hydraulische und thermische „**Ist-Zustand**“ des Grundwasservorkommens detailliert beschrieben werden. Weiterhin konnten die praktischen Grenzen für die thermische Ressourcennutzung identifiziert werden.

In Epting and Huggenberger (2013a) konnten die notwendigen hydrogeologischen Grundlagen für Kostenschätzungen von Infrastruktur-Anpassungsmassnahmen für den Vollzug erarbeitet werden, welche notwendig sind um die Auswirkungen des Klimawandels zu verringern. Auch konnte gezeigt werden, dass der für urbane Gebiete beobachtete Wärmeinsel-Effekt an der Oberfläche und im Untergrund weniger auf den Klimawandel im Allgemeinen („**indirekte Effekte**“), sondern auf lokale und regionale anthropogene Faktoren („**direkte Effekte**“) zurückzuführen ist. Die Ergebnisse dieser Arbeiten ermöglichten es auch, den hydraulischen und thermischen "Ist-Zustand" mit einem "**potenziell natürlichen Zustand**" zu vergleichen. Für eine Bewertung des Einflusses von Veränderungen (z.B. Klimawandel) müssen die unterschiedlichen urbanen Einflussfaktoren und Wechselwirkungen separat untersucht werden.

In Epting et al. (2017a) wurden Konzepte für die Bewirtschaftung von thermischen Ressourcen in urban Gebieten entwickelt, die es ermöglichen, die Übertragbarkeit für verschiedene Stadtquartiere zu beurteilen. Die Arbeit konzentriert sich dabei vor allem auf solche Stadtquartiere, die sich neu entwickeln und bei welchen noch die Möglichkeit zur Diskussion von thermischen Nutzungskonzepten besteht. Auch konnte aufgezeigt werden, dass eine geeignete Auswahl von Standorten zur Überwachung von hydraulischen und thermischen Randbedingungen eine repräsentative Interpretation von Grundwasserströmung und thermischen Regimen ermöglicht.

Fazit Ausgangslage

- Tendenz zur Erwärmung der Grundwasservorkommen v.a. im Sommer und Herbst.
- Einflüsse erhöhter Temperaturen auf die Grundwasserqualität, einschliesslich biologischer, chemischer und physikalischer Aspekte grösstenteils unbekannt.
- Hauptgrund für Grundwassererwärmung ist die Erwärmung der Flüsse. Relevanz der Infiltration von Flusswasser als wesentliche Komponente der Grundwasserneubildung von Talgrundwasserleitern („river-fed aquifers“).
- Unterschiedliche Auswirkungen urbanen und ländlich geprägten Grundwasservorkommen.
- Differenzierung von Klimawandel („indirekte Effekte“) sowie lokalen und regionale anthropogenen Faktoren („direkte Effekte“).
- Definition hydraulischer und thermischer „Ist-Zustand“ als Grundlage für die Bewertung von Veränderungen und dem Vergleich von Grundwasservorkommen.

2. Fragestellungen und Ziele

Zu den Zielen des Hydro-CH2018 Zusatzmoduls „Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen“ gehören:

- Bereitstellung wissenschaftlich fundierter Vergleichsmöglichkeiten zur Bewertung von Lockergesteins-Grundwasservorkommen, einschliesslich der Abschätzungen von Grundwasserspeichervolumina, Grundwasser-Erneuerungszeiten und -Verweilzeiten sowie der Sensitivität bzgl. Grundwasserneubildungsprozesse und im Zusammenhang mit extremen Ereignissen (Überschwemmungen und Trockenwetter).
- Identifikation relevanter hydraulischer und thermischer Prozesse und Parameter sowie der Variabilität von Randbedingungen. Eine Auswahl geeigneter Schlüsselparameter, die den Klimawandel andeuten, ist Grundlage zielorientierter Massnahmen für eine nachhaltige Bewirtschaftung von Grundwasservorkommen.
- Veranschaulichung der Anwendbarkeit des Konzepts zur Ableitung eines "**Ist-Zustands**" von verschiedenen Grundwasservorkommen als Grundlage für effiziente Anpassungsstrategien und der Begrenzung von Umweltauswirkungen.
- Optimierung von Strategien zur Dokumentation von langfristigen Temperaturveränderungen an Referenzstandorten ermöglicht eine differenzierte Bewertung von anthropogenen und klimabedingten Veränderungen von Grundwasservorkommen, einschliesslich der Entwicklung von Regionalisierungsansätzen.
- Aufzeigen von bestehenden Defiziten in Datengrundlagen und Empfehlungen für kantonale Fachstellen zu Anforderungen und Optimierung an Monitoring-Konzepte.

3. Konzept und Methoden

3.1 Untersuchungsgebiete

Die Begrenzung der untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen ist durch Talbereiche im „Hauptgrundwasserstrom¹“ definiert. Um eine systematische Auswertung zu ermöglichen wurden die Grundwasservorkommen so abgegrenzt, dass es praktikabel ist, hydraulische und thermische Randbedingungen zu untersuchen. Eine Evaluation dieser Randbedingungen für einzelne Grundwasservorkommen ermöglicht dabei eine Beschreibung und ggf. Quantifizierung der hydraulischen (Grundwasserneubildung) und thermischen (Saisonalität) Einflüsse. Dabei werden einzelne Grundwasservorkommen als Bewirtschaftungseinheiten verstanden. Die Gebietsgrenzen eines Grundwasservorkommens sind nicht nur für die Ressourcen-Bewirtschaftung relevant, sondern sie definieren auch Modellränder, die für Berechnungen von Massen- und Wärmebilanzen herangezogen werden können (vgl. Epting et al. (2017b)). Die ausgewählten repräsentativen urbanen und ländlich geprägten Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen umfassen (Abb. 3.1.1):

- (1) Kanton Basel-Stadt (Stadtgebiet und Umgebung)
- (2) Kanton Basel-Landschaft (Haupttäler)
- (3) Kanton Zürich (Stadtgebiet Winterthur und Umgebung)
- (4) Kanton Bern (Stadtgebiet Biel und Umgebung)
- (5) Kanton Graubünden (Stadtgebiet Davos und Umgebung)

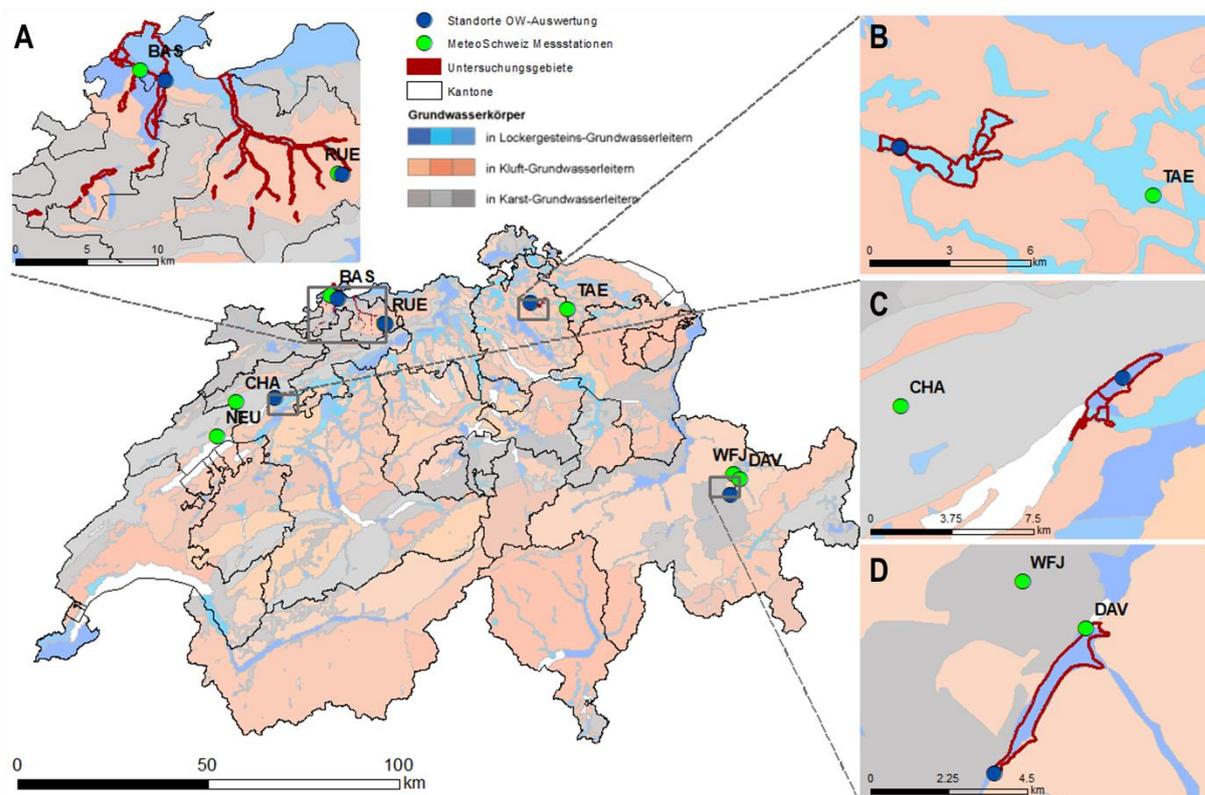


Abb. 3.1.1: Grundwasserkörper der Schweiz (BAFU) und Lage der Lockergesteins-Grundwasservorkommen (A) Basel-Stadt (BS) und Basel-Landschaft (BL), (B) Winterthur (ZH); (C) Biel (BE) und (D) Davos (GR). MeteoSchweiz Stationen (BAS, CHA, DAV, NEU, RUE, TAE, WFJ) sowie ausgewählte Fliessgewässerstandorte für welche die Abfluss- und Temperaturentwicklung simuliert wurden.

¹ Grundwasserbereiche in den Lockergesteinen der Talbereiche entlang der Fliessgewässer

3.2 Hydraulischer und thermischer Istzustand

Der „**hydraulische und thermische Istzustand**“ beschreibt die mittlere aktuelle hydraulische und thermische Situation, einschliesslich saisonaler, aber auch ereignis- und nutzungsbedingter Variation des Grundwasserfließregimes für einen definierten Grundwasserbereich.

Auf der Basis von bereits existierenden Datensätzen und Geographischen Informations Systemen (GIS) zu den Grundwasservorkommen sowie bestehende hydraulischer und Temperatur Messungen im Grund- und Oberflächenwasser in den Kantonen Basel-Stadt (Epting and Huggenberger, 2013a) und Basel-Landschaft (Epting et al., 2015) konnte eine differenzierte Charakterisierung des hydraulischen und thermischen "**Ist-Zustandes**" der Lockergesteins-Grundwasservorkommen vorgenommen werden. Das für die Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft entwickelte Konzept und die methodischen Ansätze wurden anschliessend auf die ausgewählten repräsentativen urbanen und ländlich geprägten Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen angewendet.

Eine Ableitung von „**potenziell natürlichen**“ Grundwassertemperaturen im oberflächennahen Untergrund für urbane Gebiete erlaubt es abzuschätzen, wie stark das thermische Grundwasserregime bereits anthropogen beeinträchtigt ist. Gemäss der Wegleitung über die Grundwassernutzung des Kantons Basel-Stadt (Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt, 2014) liegt die Referenztemperatur derzeit bei 12 °C. Zur Evaluation eines potenziellen natürlichen Zustands wurden gemäss dem Vorgehen nach (Epting and Huggenberger, 2013b) alle anthropogenen Nutzungen und Randbedingungen (z.B. Grundwassernutzer, Untergrundstrukturen) aus dem Wärmetransportmodellen entfernt. Die Differenz des „**thermischen Istzustand**“ und „**potenziell natürlicher**“ Grundwassertemperaturen erlaubt es die bereits stattgefundenen Erwärmung eines Grundwasservorkommens zu beurteilen.

Da zeitlich und räumlich hochaufgelöste Wärmetransportmodelle nur für den Kanton Basel-Stadt existieren, wird für die übrigen Standorte die bereits stattgefundenen Erwärmung der Lockergesteins-Grundwasservorkommen anhand der Temperaturmessungen in den Grundwasserbeobachtungsmessstellen in Relation zu den atmosphärischen Jahresmitteltemperaturen evaluiert.

3.3 Aquifergeometrien

Eine Kenntnis der Aquifergeometrien erlauben es unter anderen die Sensitivität von Grundwasserleitern auf Trockenheit zu untersuchen. So entleeren sich oberflächennahe Grundwasserleiter mit eher kleinem Speichervolumen und kurzen Verweilzeiten des Wassers (Zeit, während der Wasser im Untergrund gespeichert ist, siehe unten) während Trockenheit relativ schnell, können sich aber im Anschluss daran auch rasch wieder füllen. Grundwasservorkommen mit grossem Speichervolumen und langen Verweilzeiten hingegen reagieren gedämpft und verzögert auf einzelne Trockenereignisse. Im Anschluss benötigt es dann aber auch ausreichend Zeit und ergiebigere Niederschläge, um diese Grundwasserleiter wieder zu füllen. So zeigte z.B. der ergiebige Grundwasserleiter entlang der Langete während der grossen Trockenheit von 2003 praktisch keine Reaktion (vergleiche Kapitel 3.4 Synthese).

Auf der Grundlage von Informationen über den Verlauf der Felsoberfläche, der Topografie und Informationen zur mittleren Grundwasseroberfläche können die Aquifergeometrien der Lockergesteins-Grundwasservorkommen ausgewertet werden, welche Rückschlüsse auf die Speichereigenschaften der Grundwasserleiter erlauben. Diese Information ermöglicht eine Auswertung der: (1) Volumina der gesättigten und ungesättigten Lockergesteine, welche in einzelnen Grundwasservorkommen während durchschnittlicher hydrologischer Randbedingungen gespeichert sind, und (2) Grundwassermächtigkeiten und (3) Flurabstände. Für einzelne Standorte konnten auch niedrige und hohe Grundwasserstände in die Evaluation mit einbezogen werden.

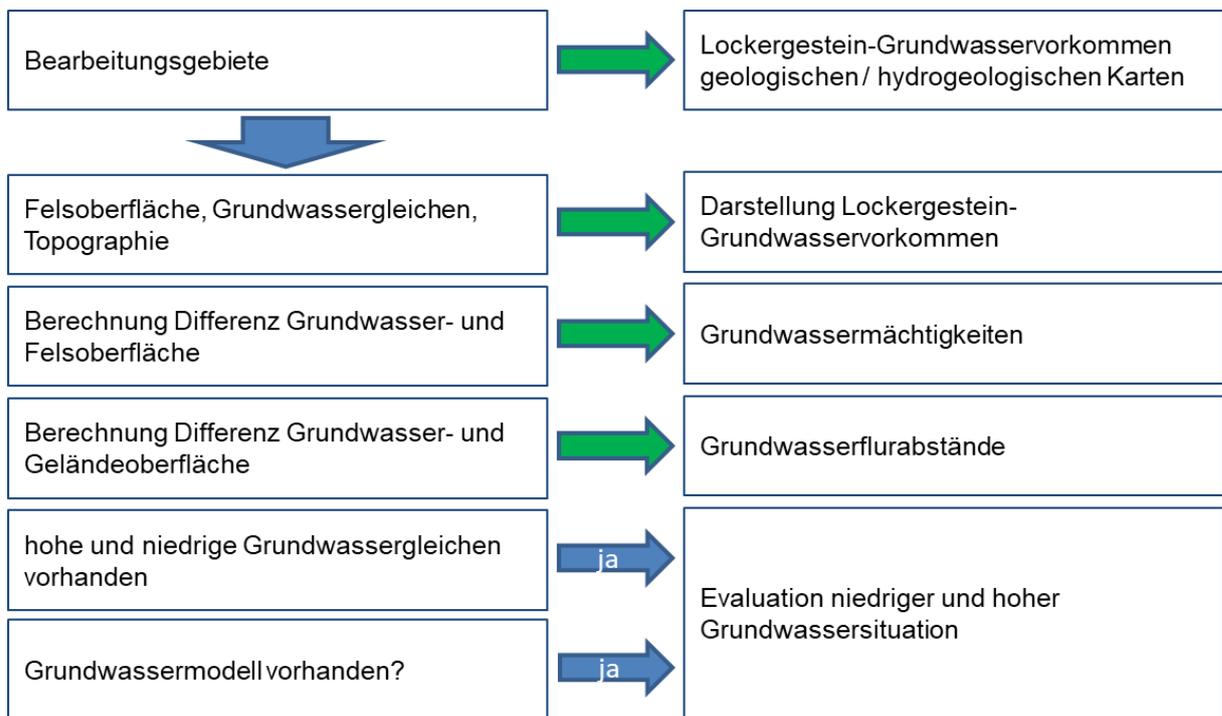


Abb. 3.3.1: Arbeitsschritte zur Evaluation der Lockergesteins-Grundwasservorkommen

Die Auswertungen erlauben es die Sensibilität von Grundwasservorkommen bzgl. Veränderungen des Flurabstandes und / oder der Grundwassermächtigkeit zu beurteilen. So können auf Grundlage der verfügbaren Informationen über die Entfernungen des Grundwasserspiegels zur Geländeoberfläche (Flurabstand) die saisonale Abhängigkeit der Perkolations von Niederschlagswasser zum Grundwasser sowie thermische Einflüsse auf die Grundwasservorkommen, und vor allem auch auf flache Grundwasservorkommen, qualitativ bewertet werden.

3.4 Fließwege, -zeiten und -geschwindigkeiten im Grundwasser

Eine Ableitung der Fließwege, -zeiten und -geschwindigkeiten im Grundwasser erlaubt eine Abschätzung von Erneuerungsraten und Verweilzeiten und ist Grundlage für eine Beurteilung der Sensitivität der Grundwasservorkommen.

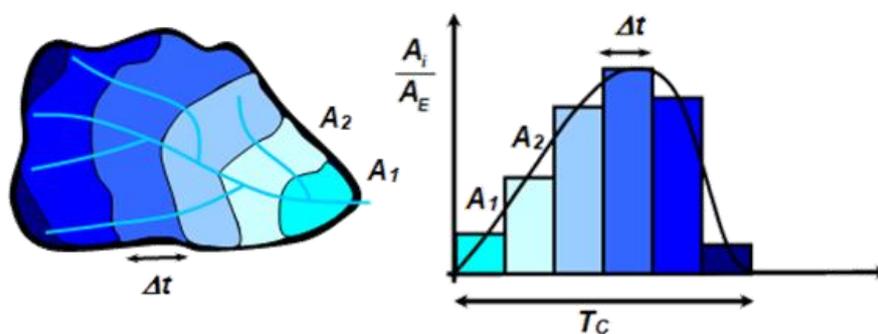


Abb. 3.4.1: Links: Abgrenzung von Bereichen eines Lockergesteins-Grundwasservorkommens für die Evaluation von Fließwegen, -zeiten und -geschwindigkeiten im Grundwasser. Rechts: Histogramm der Fließzeitenverteilung.

Erneuerungsraten und mittlere Verweilzeiten können mit der Kenntnis hydraulischer Randbedingungen (hydraulische Gradienten) und unter Annahme einer Bandbreite realistischer Aquifer-Eigenschaften (hydraulische Durchlässigkeiten und Porositäten) für die untersuchten Grundwasservorkommen abgeleitet werden (Abb. 3.4.1).

3.5 Grundwasserneubildung – Grundwasserbilanz

Wie werden sich die Wasserbilanzen und Temperaturen von Lockergesteins-Grundwasservorkommen durch die Auswirkungen von Klimaänderungen verändern? 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**“). Diese Grundwasserneubildungskomponente wird 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 Lockergesteins-Grundwasservorkommen weitere Wasserkomponenten (Zu- und Abflüsse) über verschiedene Ränder berücksichtigt werden. In Abbildung 3.5.1 wird beispielhaft für das Grundwasservorkommen im Bereich der Gemeinden Aesch und Reinach im Kanton Basel-Landschaft illustriert, 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.

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 eintreten werden, und vergleichsweise warmes Oberflächenwasser angereichert wird, ist zu erwarten, dass die Grundwassertemperaturen entsprechend steigen. Für eine weitergehende Analyse dieser Zusammenhänge bedarf es einer Auswertung von Betriebsdaten der Trink- und Brauchwasserversorger und einer Erstellung von Wasserbilanzen zum heutigen und zukünftigen Wasserangebot im Kanton unter besonderer Berücksichtigung der Fliessgewässertemperaturen. Im Rahmen dieser Arbeit konnten diese Analysen nicht durchgeführt werden. Auch der Einfluss der Bodenfeuchte und des Sättigungsgrads der grundwasserungesättigten Lockergesteine konnte nicht berücksichtigt werden. Einerseits müssen höhere Bodenfeuchtedefizite aufgrund der wärmeren und trockeneren Sommer- und Herbstmonate zuerst kompensiert werden, bevor die Grundwasserneubildung einsetzen kann. Andererseits reichen oft, trotz ausbleibender Grundwasserneubildung, geringfügige Niederschlagsmengen in der Vegetationsperiode für das Pflanzenwachstum aus, ohne dass zusätzlich künstlich bewässert werden muss.

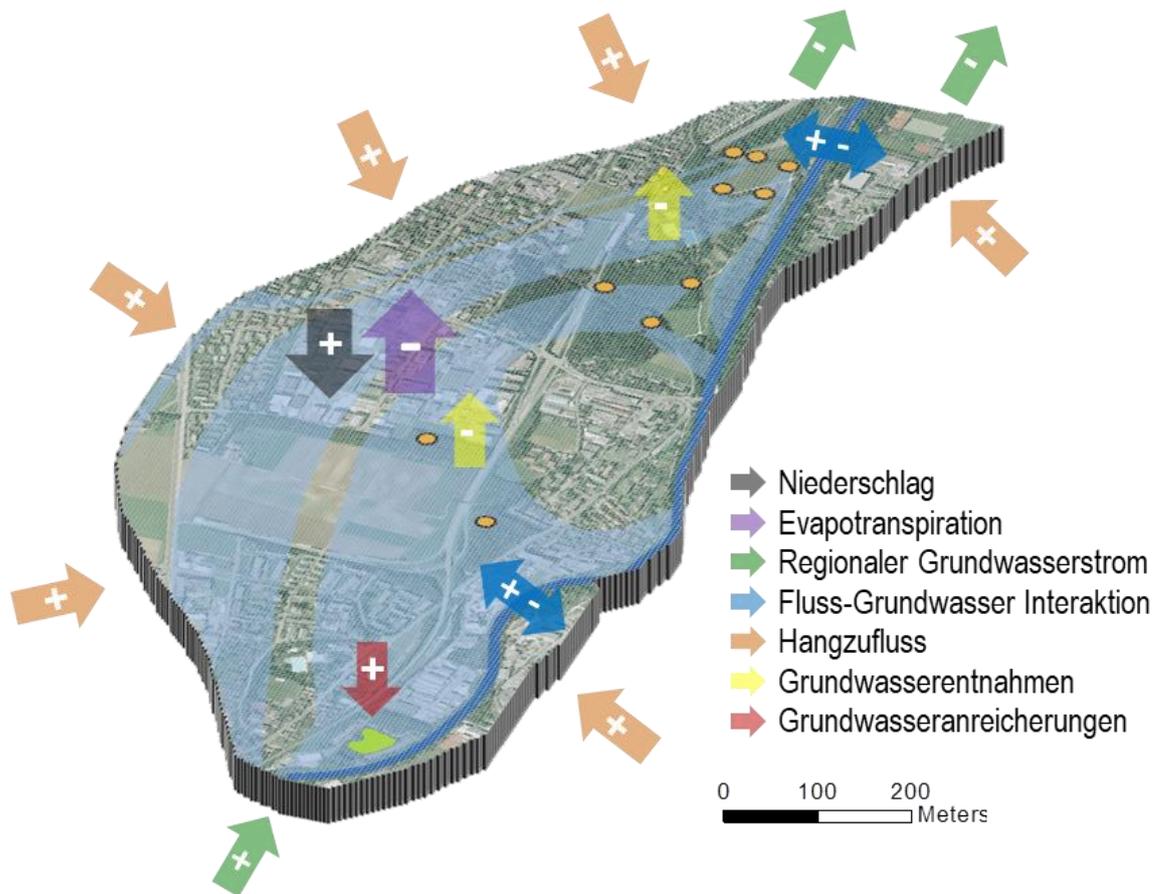


Abb. 3.5.1: Wasserbilanzen eines Lockergesteins-Grundwasservorkommens.

Grundwasserneubildung aus versickerndem Niederschlagswasser

Die Grundwasserneubildung eines Grundwasservorkommens aus flächig versickerndem Niederschlagswasser $GWN_{Oberfläche}$ kann mit vorhandenen Daten des Niederschlags N und der Evapotranspiration ET unter folgender vereinfachter Annahme berechnet werden:

$$GWN_{Oberfläche} = (N - ET) * A_{GW-Vorkommen}$$

Hypothesen

Im Vergleich zu den anderen Komponenten ist diese Grundwasserneubildungskomponente quantitativ vernachlässigbar.

Auch die Temperaturprägung des Grundwassers durch perkolierendes Niederschlagswassers ist vernachlässigbar.

Untersuchungsansatz

Die Entwicklung der Niederschlagsmengen und der Temperaturen kann den Klimaszenarien entnommen werden.

Da für die Entwicklung der Evapotranspiration noch keine belastbaren Angaben für die verschiedenen Klimaszenarien zur Verfügung stehen, werden im Rahmen dieser Arbeit vereinfacht die relativen Veränderungen der Niederschlagsmengen betrachtet.

Anwendbarkeit Grundwasservorkommen

Analyse für alle Untersuchungsstandorte möglich

Regionaler Grundwasserzu- und -abstrom

Die regionale Grundwasserneubildungskomponente $GWNB_{Regional}$ wird durch die Hydraulik im Lockergesteins-Grundwasservorkommen bestimmt und ist das Resultat der Interaktion aller anderen Systemkomponenten und der Interaktion mit den ober- und unterstromigen Grundwasservorkommen („importiertes Grundwasserregime“). Eine Evaluation der Auswirkungen von Klimaänderungen auf diese Grundwasserkomponente ist deshalb schwierig. Langanhaltende Trockenwettersituation, verbunden mit einer Reduktion der anderen Grundwasserneubildungskomponenten, und ggf. vermehrten anthropogenen Grundwasserentnahmen würden in vergleichsweise tiefen Grundwasserspiegeln resultieren und den regionalen Grundwasserstrom verringern.

Hypothesen

Die regionale Grundwasserneubildung findet kontinuierlich und verstärkt während „charakteristischen“ Niederschlagsereignissen und hohen Abflüssen statt (Intensität & Dauer).

Auch die Temperaturprägung des regionalen Grundwasserstroms findet bei diesen Ereignissen statt.

Untersuchungsansatz

Numerische Grundwassermodellierung und Auswertung der Bilanzen des regionalen Grundwasserzu- und -abstroms (vgl. Abb. 3.5.1).

Anwendbarkeit Grundwasservorkommen

Analyse nur mit kalibrierten und validierten Grundwassermodellen möglich (Basel-Stadt und Basel-Landschaft)

Zustrom über die seitlichen Hangeinzugsgebiete

Diese Komponente der Grundwasserneubildung $GWNB_{Hang}$ wird bestimmt über das Hangwasser, welches dem Grundwasservorkommen mehr oder weniger linienhaft zuströmt, und kann entsprechend der Berechnung des flächig auf den Lockergesteins-Grundwasservorkommen versickernden Niederschlagswassers berechnet werden (s.o.). Für die Fläche des Einzugsgebiets (A_{EZG}) ist hierbei zwischen dem unter- und oberirdischen Einzugsgebiet zu unterscheiden. Da das unterirdische Einzugsgebiet meist unbekannt ist muss in einer vereinfachten Annahme oft die Fläche des oberirdischen Einzugsgebiets für die Berechnung von $GWNB_{Hang}$ herangezogen werden. Wie oben bereits erwähnt zählt zu dieser Komponente auch die Interaktion von Lockergesteins-Grundwasservorkommen mit regionalen Karst- und Kluftsystemen (Huggenberger et al., 2013). Eine Evaluation der Auswirkungen von Klimaänderungen auch auf diese Grundwasserkomponente ist deshalb schwierig.

Hypothesen

Die Grundwasserneubildung von dem den Grundwasservorkommen mehr oder weniger linienhaft zuströmenden Hangwasser kann für Standorte an denen keine komplexen Karst- und Kluftsysteme existieren vereinfacht, wie jene aus versickerndem Niederschlagswasser, anhand einer Wasserbilanzberechnung über das oberirdische Einzugsgebiet vorgenommen werden.

Temperatursignale prägen vor allem in Phasen erhöhter Grundwasserneubildung im Hangeinzugsgebiet die Temperaturen des Grundwasservorkommens in den Randbereichen.

Untersuchungsansatz / Anwendbarkeit Grundwasservorkommen

Da auch diese Grundwasserneubildungskomponente im Vergleich zu den anderen Komponenten quantitativ vernachlässigbar ist wird auf die Auswertung der Grundwasserneubildung aus versickerndem Niederschlagswasser verwiesen.

Interaktion Oberflächengewässer mit dem Grundwasser

Die Infiltration von Oberflächengewässer in das Grundwasser $GWNB_{OW}$ stellt eine wichtige Komponente der Grundwasserneubildung dar und ist nicht einfach zu quantifizieren. Andererseits sind Oberflächengewässer auch oft „Vorfluter“, wenn Grundwasser in ein Oberflächengewässer exfiltriert (z.B. der Rhein bei Basel). Abbildung 3.5.2 illustriert die verschiedenen Interaktionstypen.

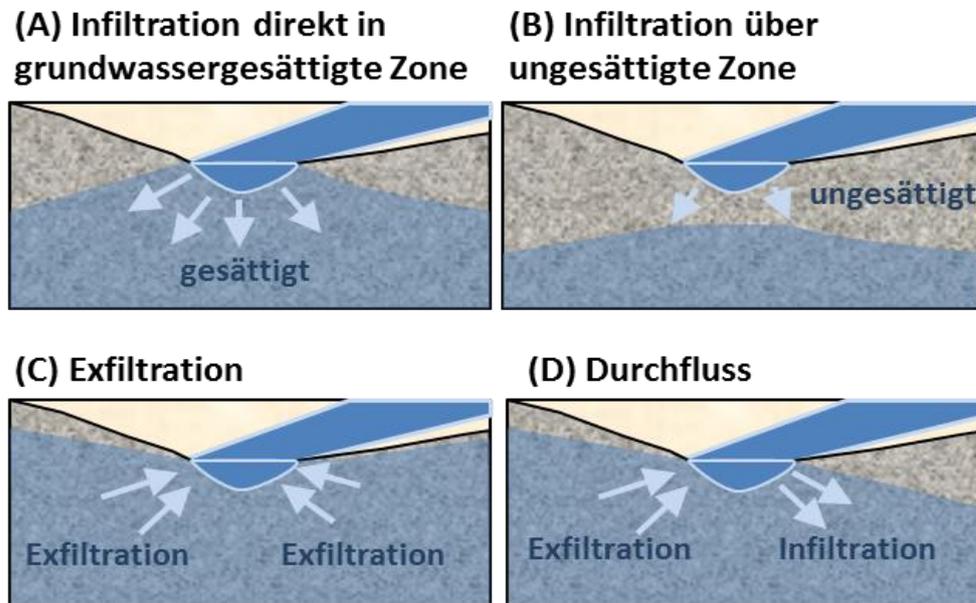


Abb. 3.5.2: Interaktionstypen zwischen Oberflächengewässern und dem Grundwasser (verändert nach Huggenberger et al. (1998)).

(A) „Infiltration“: bei angeschlossenen Oberflächengewässer-Grundwasser-Systemen ist das Flussbett direkt an den grundwassergesättigten Bereich des Grundwasserleiters angeschlossen.

(B) Bei nicht angeschlossenen Systemen ist das Flussbett getrennt vom grundwassergesättigten Bereich des Grundwasserleiters, Oberflächenwasser infiltriert über die ungesättigte Zone in den Grundwasserleiter.

(C) „Exfiltration“: Hydraulischer Gradient vom Grundwasser zum Oberflächengewässer, Grundwasser exfiltriert in das Oberflächengewässer.

(D): „Durchfluss“: Flussabschnitte, welche vom Grundwasser durchflossen werden, erhalten Grundwasser vom Ufer und dem Flussbett mit dem höheren hydraulischen Gradienten und verlieren Wasser an das Ufer und im Flussbett mit dem niedrigeren hydraulischen Gradienten.

Eine Evaluation der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Interaktion von Oberflächengewässern mit dem Grundwasser müssen die folgenden Zusammenhänge betrachtet werden: (a) klimabedingte hydraulische Veränderung: höherer / niedrigerer Grundwasser- und/oder Flusspegel und die damit einhergehenden Veränderungen des Interaktionstyps (Abbildung 4.5.2); (b) klimabedingte Temperaturveränderung des Flusswassers und Grundwasser; sowie (c) Temperaturabhängigkeit der Viskosität und somit der Flussbett- und Aquifer-Durchlässigkeit.

Hypothesen

Die quantitative Grundwasserneubildung durch infiltrierende Oberflächengewässer und die einhergehende Temperaturprägung von Grundwasservorkommen erfolgt hauptsächlich bei

"charakteristischen" Niederschlagsereignissen und hohen Abflüssen (Intensität & Dauer). Dabei wird eine Zunahme der Grundwasseranreicherung bei der Überschreitung eines, für die jeweiligen Grundwasservorkommen, "charakteristischen" hydraulischen Schwellenwertes stattfinden.

Bei langanhaltender Trockenheit fällt sowohl der Flusspegel als auch der Grundwasserspiegel, Flussabschnitte mit Interaktionstypen C und D nehmen ab, Interaktionstypen A und B nehmen zu. Somit nimmt die Exfiltration von Grundwasser in die Oberflächengewässer ab, die Infiltration vom Oberflächengewässer in das Grundwasser zu.

Untersuchungsansatz

Modellierung des Oberflächengewässerabflusses und der -temperaturen und Ableitung von, durch die Klimaänderungen bedingten, Veränderungen der quantitativen Grundwasserneubildung über infiltrierende Oberflächengewässer und die einhergehende Temperaturprägung.

Quantifizierung der Länge von Flussabschnitten für die verschiedenen Interaktionstypen und qualitative Beschreibung der durch die Klimaprojektionen zu erwartenden Veränderungen.

Anwendbarkeit Grundwasservorkommen

Analyse für alle Untersuchungsstandorte ausser der Lockergesteins-Grundwasservorkommen in Basel-Stadt (keine Simulationen der Abfluss- und Temperaturentwicklung unter Berücksichtigung der Klimaentwicklung des Rheins vorhanden) möglich.

3.6 Auswahl Klimaszenarien

Für die Betrachtungen von Lockergesteins-Grundwasservorkommen sind der Niederschlag und die Temperatur sowie Veränderungen der Evapotranspiration die wichtigsten relevanten Klimaveränderungen, welche es erlauben Input-Funktionen zu formulieren. Deswegen wurde für die Evaluation der klimabedingten Veränderung der verschiedenen Grundwasserneubildungskomponenten ein Schwerpunkt auf die Klimaprojektionen der Niederschlagsverteilung und Temperaturen gelegt. Hierfür wurden die im Rahmen von Hydro-CH2018 erarbeitete Klimaprojektion MPI-M-MPI-ESM-LRr1i1p1SMHI-RCA4, einschliesslich der 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) ausgewählt.

Für das Hydro-CH2018 Teilprojekt „Wassertemperatur von Seen und Flüssen“ werden die Auswirkungen des erwarteten Klimawandels auf die Wassertemperatur von Oberflächengewässer abgeleitet. Für die Modellierung des Oberflächengewässerabflusses und der -temperaturen sind stündliche Eingabedaten erforderlich. Für die CH2018-Szenarien werden jedoch nur tägliche Eingabedaten zur Verfügung gestellt. Im Rahmen des Teilprojektes entwickelte (Michel, in prep.) ein Disaggregations-Verfahren welches es ermöglicht Stundenwerte mit einem Tageszyklus zu erzeugen. Die weitergehenden Auswertungen basieren auf diesen angepassten Datensätzen und umfassen die Jahre 2055 und 2085 im Vergleich zum Referenzjahr 2000.

Neben der Entwicklung der Niederschläge und Temperaturen wurde ein weiterer Schwerpunkt auf der Evaluation der veränderten Fliessgewässerabflüsse und -temperaturen gelegt. In Zusammenarbeit mit der EPFL und den überarbeiteten ausgewählten CH2018-Szenarien wurden die Entwicklung der Fliessgewässerabflüsse und -temperaturen für die verschiedenen untersuchten Fliessgewässer untersucht (Abb. 3.1.1). Hierfür wurde die Entwicklung von Abflussdauerkurven (Streamflow Analysis and Assessment Software; Metcalfe and Schmidt (2016)) untersucht und ein Schwerpunkt auf die verschiedenen Klimaänderungen und saisonale Verschiebung der Abflussspitzen gelegt.

4 Resultate

4.1 Basel

Die Grundwassertemperaturen im Kanton Basel-Stadt waren in den letzten Jahren höher als die Jahresmitteltemperatur der Luft, welche als Referenztemperatur für thermisch unbeeinflusstes Grundwasser betrachtet werden kann. Der Anstieg der Grundwassertemperaturen ist vor allem auf die Abwärme von Untergrundstrukturen (Gebäude, Infrastruktur- und Verkehrsbauten), auf die zunehmende Oberflächenversiegelung, sowie eine vermehrte Nutzung des Grundwassers zu Kühlzwecken zurückzuführen. Bei etwa der Hälfte aller Grundwassermessstellen, die im städtischen Gebiet liegen, war die Grundwassertemperatur um 3.0 ± 0.7 K höher als die mittlere Lufttemperatur.

Eine Auswertung des Oberflächengewässers Rhein im Bereich der untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Stadt zeigt, dass ausser während hohen Abflüssen und niedrigen Grundwasserständen, der Rhein vor allem Vorfluter ist und der Prozess der Grundwasserexfiltration dominiert. Dies bedeutet auch, dass die Grundwasserneubildungskomponente und die Temperaturprägung über den Rhein eine untergeordnete Rolle spielt und im Rahmen der vorliegenden Arbeiten nicht weiter untersucht wurde. Zu erwähnen sind die hohen Maximaltemperaturen des Rheins von bis zu 26 °C im Sommer. Vor allem auch deswegen, da Rheinwasser im Hardwald und den Langen Erlen künstlich versickert wird, um das Grundwasserdargebot für die Trinkwasserversorgung zu erhöhen.

Für die vier untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen in Basel-Stadt dominieren, vor allem linksseitig des Rheins, Grundwasserflurabstände von über 10 m. Somit ist zu erwarten, dass Veränderungen des saisonalen Temperaturregimes sich auf ca. die Hälfte des Grundwasservorkommens auswirken werden. Für die übrigen Bereiche würden sich langfristig die veränderten Jahresmitteltemperaturen des Grundwassers anpassen. Die mittleren Grundwassermächtigkeiten liegen für die Lockergesteins-Grundwasservorkommen in Basel-Stadt bei 2.1 bis 7.7 m und geschätzte mittlere Grundwasser-Erneuerungszeiten bei 42 bis 659 Tagen.

Die Ergebnisse der Wärmetransportmodellierung in den vier Lockergesteins-Grundwasservorkommen in Basel-Stadt erlauben eine gesamthafte Betrachtung der Temperaturen sowie Grundwasser- und Energiebilanzen. Für alle Teilgebiete dominiert die Grundwasserexfiltration in den Vorfluter Rhein (siehe oben). Ausnahme bilden die Fliessgewässerinfiltration von Wiesewasser in den Grundwasserleiter im Teilgebiet Kleinhüningen und der Aufstau im Bereich des Flusswasserkraftwerkes Birsfelden. Wesentliche Komponente der Grundwasserneubildung ist der regionale Zustrom, wohingegen flächig versickerndes Niederschlagswasser, im Vergleich zu den übrigen Randbedingungen eine untergeordnete Rolle spielt. Der Wärmefluss über die Erdoberfläche, welcher die thermische Wechselwirkung mit der Atmosphäre darstellt, ist vergleichsweise gross, gleicht sich aber über das Jahr aus. Wesentlich für die Temperaturprägung sind der Wärmefluss über die regionale Grundwasserströmung und über die Oberflächengewässer sowie der Wärmeeintrag von Gebäuden, welche in die grundwassergesättigte Zone reichen.

Für die vier untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen in Basel-Stadt deuten die Klimaprojektionen des MeteoSchweiz Standortes Basel (BAS) darauf hin (Abb. 3.1.1), dass die Grundwasserneubildung vermehrt in vergleichsweise „kälteren“ Monaten stattfindet, was mit einer tendenziellen Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“). Unter Berücksichtigung des hohen Versiegelungsgrades im urbanen Gebiet von Basel als auch höheren Evapotranspirationsverlusten im Sommer sind jedoch nur geringfügige Veränderungen der Grundwasserneubildung zu erwarten. Die Lufttemperaturen nehmen, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios und des Zeitpunktes, um 1 bis maximal 3.5 °C zu. Die Veränderungen der Lufttemperaturen werden mit einer Verzögerung die Grundwassertemperaturen beeinflussen.

4.2 Basel-Landschaft

Die 31 ausgewählten Lockergesteins-Grundwasservorkommen in den Talbereichen entlang der Fliessgewässer für den Kanton Basel-Landschaft liegen grösstenteils in den Niederterrassenschottern. Die Kontinuität des Talgrundwasserstroms wird teilweise durch trockenfallende Bereiche und Felsstufen unterbrochen, dennoch kann eine Verbindung der Grundwasservorkommen über Karst- und/ oder Bruchsysteme bestehen.

Die Grundwassermächtigkeiten der 31 untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen liegen im Mittel zwischen 2.4 und 10.8 m. Für die Birs und Birsig dominieren Flurabstände zwischen 1 und 10 m. Ausnahme bildet das Lockergesteins-Grundwasservorkommen bei Aesch-Reinach, hier dominieren Flurabstände zwischen 10 und 50 m. Mit zunehmender Entfernung von der Quelle nehmen die Flurabstände als auch der Volumenanteil der grundwasserungesättigten Lockergesteine der Grundwasservorkommen entlang der Ergolz tendenziell zu. Fliesszeiten für die verschiedenen Lockergesteins-Grundwasservorkommen liegen bei 0.6 und 34.9 Tagen.

Für diejenigen Lockergesteins-Grundwasservorkommen, für welche Grundwassermodelle existieren konnten Grundwasserbilanzen für unterschiedliche hydrologische und betriebliche Randbedingungen ausgewertet werden. Die Auswertungen zeigen, dass die Infiltration von Oberflächenwasser während Hochwasserereignissen um Grössenordnungen ansteigen kann. Dabei konnte für die verschiedenen modellierten Flussabschnitten (s.o.) ein indirekter Zusammenhang zwischen Grundwasserneubildung durch infiltrierendes Oberflächenwasser in Relation zur Abflusshöhe im Gewässer aufgezeigt werden. Weitere relevante Randbedingungen sind der regionale Grundwasserstrom. Der quantitative Anteil des Zustroms über Hangbereiche sowie, falls vorhanden, künstliche Grundwasseranreicherungen und -entnahmen ist für die verschiedenen modellierten Lockergesteins-Grundwasservorkommen unterschiedlich relevant. Wobei Interaktionen mit regionalen Karstsystem bedeutend sein können spielt die flächige Grundwasserneubildung generell eine untergeordnete Rolle. Diese Aussage konnte auch durch eine einfache Wasserhaushaltsbetrachtung bestätigt werden.

Für die 31 untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen in Basel-Landschaft wurden zwei Meteo-Schweiz Standorte näher betrachtet. Für die stark urbanisierten Haupttäler der Ergolz und Birs wird auf die Auswertungen des MeteoSchweiz Standortes bei Basel (BAS) verwiesen (s.o.), welcher repräsentativ für die dortigen zu erwartenden Klimaänderungen ist. Für die Auswertungen des ländlichen und jurassisch geprägten Teils des Kantons wurde der MeteoSchweiz Standort Rünenberg (RUE) gewählt (Abb. 3.1.1). Die simulierten Klimaprojektionen für diesen Standort zeigen, dass die Niederschläge tendenziell und, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios, bis zum Jahr 2055 um maximal 10 % zunehmen. Bis zum Jahr 2085 nehmen die Niederschläge wieder ab. Die meisten Niederschläge fallen in den Monaten Juli, November und Februar. Wohingegen, für die betrachteten Klimaprojektionen, die Niederschläge im Juli tendenziell abnehmen, nehmen diese im November und Februar tendenziell zu. Dies würde bedeuten, auch unter Berücksichtigung höherer Evapotranspirationsverluste im Sommer, dass die Grundwasserneubildung vermehrt in vergleichsweise „kälteren“ Monaten stattfindet, was mit einer tendenziellen Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“). Die Lufttemperaturen nehmen, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios und des Zeitpunktes, um 0.9 bis maximal 3.8 °C zu. Die Veränderungen der Lufttemperaturen werden mit einer Verzögerung die Grundwassertemperaturen beeinflussen.

Für die Fliessgewässer Birs und Ergolz wurden verschiedene Standorte am Unterlauf und dem Mündungsbereich Nahe der Konfluenz mit dem Rhein sowie für die Birs ein Standort bei Zwingen und die Ergolz ein Standort am Oberlauf ausgewertet (Abb. 3.1.1). Für alle Standorte ist die Grundwasserneubildung in den Sommermonaten über die Fliessgewässerinfiltration reduziert. Dies würde bedeuten, auch unter Berücksichtigung höherer Evapotranspirationsverluste im Sommer, dass vergleichsweise weniger „warmes“ Oberflächenwasser in den Grundwasserleiter infiltriert. Wobei die Entwicklung in den Wintermonaten oft nicht eindeutig ist, sind die Abflussmengen in den Zwischenjahreszeiten erhöht. Zudem zeigt die Auswertung der saiso-

nen Abflussdauerlinien (hydrologisches Jahr), dass vor allem für die Monate Juli bis September und für alle betrachteten Emissionsszenarien weniger Ereignissen mit hohen Abflüssen stattfinden werden. Unter Annahme, dass die quantitative Grundwasserneubildung und die einhergehende Temperaturprägung von Grundwasservorkommen hauptsächlich bei "charakteristischen" Ereignissen mit hohen Abflüssen (Intensität & Dauer) erfolgt, verstärkt dieser Effekt nochmals den „negativen Rückkopplungsmechanismus“ und eine tendenzielle Abkühlung der Grundwasserressourcen. Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass auch lokale Gewitterereignisse im Sommer eine stärkere Rolle bei der Abflussbildung und die Grundwasserneubildung am Ober- und Mittellauf der Birs und Ergolz spielen können. Diese Entwicklung konnte mit der hier vorgenommenen Auswertung nicht berücksichtigt werden.

4.3 Winterthur

Die gemessenen Grundwassertemperaturen in Winterthur waren an den Messstandorten in den letzten Jahren nur geringfügig höher als die Jahresmitteltemperatur der Luft. Einzelne Grundwassermessstellen zeigen starke Reaktionen auf hohe Abflüsse in der Eulach.

Die Mächtigkeit des Grundwasservorkommens kann im Stadtgebiet von Winterthur bis 105 m betragen. Es dominieren Flurabstände von über 10 m, für welche weder tägliche noch saisonale Temperaturschwankungen eine Rolle spielen. Geschätzte mittlere Grundwassererneuerungszeiten liegen bei 17 bis 26 Tagen.

Resultat einer Grundwassermodellierung (Alberich (1997)) zeigen, dass die Grundwasserbilanzen vor allem durch den regionalen Grundwasserzu- und -abstrom charakterisiert werden. Der Einfluss des Zustroms über die seitlichen Hangeinzugsgebiete und eine Abschätzung der Grundwasserneubildung aus versickerndem Niederschlagswasser zeigen hingegen, dass diese Grundwasserneubildungskomponenten spielen generell eine untergeordnete Rolle. Diese Aussage konnte auch durch eine einfache Wasserhaushaltsbetrachtung bestätigt werden.

Die Ergebnisse der simulierten Klimaprojektionen für den MeteoSchweiz Standort Tänikon (TAE) im Kanton Thurgau (Abb. 3.1.1) zeigen, dass die Niederschläge, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios und des Zeitpunktes, sowohl ab- als auch zunehmen können. Die meisten Niederschläge fallen in den Monaten Juli, September und Februar. Wohingegen, für die betrachteten Klimaprojektionen die Niederschläge im Juli und September tendenziell abnehmen, nehmen diese im Februar und vor allem auch im März tendenziell zu. Dies würde bedeuten, auch unter Berücksichtigung höherer Evapotranspirationsverluste im Sommer, dass die Grundwasserneubildung vermehrt in vergleichsweise „kälteren“ Monaten stattfindet, was mit einer tendenziellen Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“). Die Lufttemperaturen nehmen, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios und des Zeitpunktes, um 1.1 bis maximal 3.6 °C zu. Die Veränderungen der Lufttemperaturen werden mit einer Verzögerung die Grundwassertemperaturen beeinflussen.

Die Ergebnisse der Simulationen für das Oberflächengewässer Eulach zeigen, auch unter Berücksichtigung höherer Evapotranspirationsverluste im Sommer, dass sich in den Sommermonaten die Grundwasserneubildung über die Fliessgewässerinfiltration reduziert und weniger vergleichsweise „warmes“ Oberflächenwasser in den Grundwasserleiter infiltriert. Demgegenüber würde vermehrt vergleichsweise „kälteres“ Oberflächenwasser in den Wintermonaten in den Grundwasserleiter infiltrieren, was tendenziell mit einer Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“). Zudem zeigt die Auswertung der saisonalen Abflussdauerlinien (hydrologisches Jahr), dass vor allem für die Monate Juli bis September und für alle betrachteten Emissionsszenarien weniger Ereignisse mit hohen Abflüssen stattfinden werden. Unter Annahme, dass die quantitative Grundwasserneubildung und die einhergehende Temperaturprägung von Grundwasservorkommen hauptsächlich bei "charakteristischen" Ereignissen mit hohen Abflüssen (Intensität & Dauer) erfolgt, verstärkt dieser Effekt nochmals den „negativen Rückkopplungsmechanismus“ und eine tendenzielle Abkühlung von Grundwasserressourcen.

4.4 Biel

Generell zeigen sowohl die Grundwasserpegel- als auch die Temperaturverläufe der meisten Messstellen in Biel eine hohe Instationarität und mehr oder weniger starke Trends hin zu Temperaturerhöhungen. Das Lockergesteins-Grundwasservorkommen bei Biel ist lokal begrenzt und steht nicht im Kontakt mit weiteren, grösseren Lockergesteins-Grundwasservorkommen der Aare. Weiterhin können unterirdische, artesisch gespannte, Zuflüsse zum Lockergesteins-Grundwasservorkommen durch die Verkarstungen der Kalke und Dolomite existieren.

Die Mächtigkeit des Grundwasservorkommens kann in der Nähe des Bieler Sees an der südwestlichen Begrenzung des Lockergestein-Grundwasservorkommens bis 167 m betragen. Es dominieren Flurabstände zwischen 1 und 10 m, für welche tägliche und saisonale Temperaturschwankungen eine Rolle spielen. Geschätzte mittlere Grundwassererneuerungszeiten liegen bei 61.4 Tagen. Der Einfluss des Zustroms über die seitlichen Hangeinzugsgebiete und eine Abschätzung der Grundwasserneubildung aus versickerndem Niederschlagswasser deuten darauf hin, dass diese Grundwasserneubildungskomponenten eine untergeordnete Rolle spielen.

Für das untersuchte Lockergesteins-Grundwasservorkommen in Biel wurden zwei MeteoSchweiz Standorte näher betrachtet (Abb. 3.1.1). Wohingegen der MeteoSchweiz Standort Neuchâtel (NEU) charakteristisch für Situationen im Stadtgebiet von Biel, ist der MeteoSchweiz Standort Chasseral (CHA) eher charakteristisch für das Einzugsgebiet der Suze. Die Ergebnisse der simulierten Klimaprojektionen für den Standort Neuchâtel und Chasseral zeigen, dass die Niederschläge tendenziell und, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios, um maximal 11 % zunehmen. Für den Standort Neuchâtel fallen die meisten Niederschläge in den Monaten Oktober bis Dezember. Für die betrachteten Klimaprojektionen nehmen die Niederschläge in diesen Monaten tendenziell ab. Dies würde bedeuten, dass die Grundwasserneubildung vermehrt in vergleichsweise „kälteren“ Monaten stattfindet, was mit einer tendenziellen Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“). Für den Standort Chasseral fallen die meisten Niederschläge in den Monaten Februar und Mai. In beiden Monaten nehmen, für die betrachteten Klimaprojektionen, die Niederschläge tendenziell zu. Mehr Niederschlag im Februar würde bedeuten, dass die Grundwasserneubildung vermehrt in vergleichsweise „kälteren“ Monaten stattfindet, was mit einer tendenziellen Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“). Hingegen würde mehr Niederschlag im Mai bedeuten, dass die Grundwasserneubildung vermehrt in vergleichsweise „wärmeren“ Monaten stattfindet, was mit einer tendenziellen Erwärmung des Grundwassers einhergehen würde („positiver Rückkopplungsmechanismus“). Die Lufttemperaturen für den Standort Neuchâtel nehmen, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios und des Zeitpunktes, um 1.0 bis maximal 3.5 °C zu. Jene für den Standort Chasseral nehmen um 1.1 bis maximal 3.9 °C zu. Die Veränderungen der Lufttemperaturen werden mit einer Verzögerung die Grundwassertemperaturen beeinflussen.

Die Ergebnisse der Simulationen für das Oberflächengewässer Suze zeigen, dass die Abflussmengen in den Monaten Januar bis März tendenziell zunehmen werden. Hingegen kann für die Monate Juli bis September tendenziell eine Abnahme der Abflussmengen beobachtet werden. Dies würde bedeuten, auch unter Berücksichtigung höherer Evapotranspirationsverluste im Sommer, dass sich in den Sommermonaten die Grundwasserneubildung über die Fließgewässerinfiltration reduziert und weniger vergleichsweise „warmes“ Oberflächenwasser in den Grundwasserleiter infiltriert. Demgegenüber würde vermehrt vergleichsweise „kälteres“ Oberflächenwasser in den Wintermonaten in den Grundwasserleiter infiltrieren, was tendenziell mit einer Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“). Zudem zeigt die Auswertung der saisonalen Abflussdauerlinien (hydrologisches Jahr), dass vor allem für die Monate Juli bis September und für alle betrachteten Emissionsszenarios weniger Ereignisse mit hohen Abflüssen stattfinden werden. Unter Annahme, dass die quantitative Grundwasserneubildung und die einhergehende Temperaturprägung von Grundwasservorkommen hauptsächlich bei "charakteristischen" Ereignissen mit hohen Abflüssen (Intensität & Dauer) erfolgt, verstärkt dieser Effekt nochmals den "negativen Rückkopplungsmechanismus" und eine tendenzielle Abkühlung von Grundwasserressourcen.

4.5 Davos

Die gemessenen Grundwassertemperaturen in Davos werden teilweise stark durch die Interaktion vom Oberflächengewässer Landwasser beeinflusst.

Die Mächtigkeit des Grundwasservorkommens ist über weite Bereiche des Landwassertals vergleichsweise klein und liegt im Mittel unter 2 m. Nahe der Landwasser und deren Zuflüsse dominieren Flurabstände zwischen 1 und 10 m. In den Hangbereichen liegen die Flurabstände über weite Bereiche bei über 10 m. Geschätzte mittlere Grundwassererneuerungszeiten liegen bei lediglich 7.8 Tagen. Resultat einer Grundwassermodellierung (GEOTEST AG) zeigen, dass die Grundwasserbilanzen vor allem durch den regionalen Grundwasser- und Hangzustrom, die Interaktion mit den Oberflächengewässern aber auch durch Grundwassernutzung charakterisiert werden. Eine Abschätzung der Grundwasserneubildung aus versickerndem Niederschlagswasser zeigt, dass diese Grundwasserneubildungskomponente eine untergeordnete Rolle spielt.

Für das untersuchte Lockergesteins-Grundwasservorkommen in Davos wurden zwei Meteo-Schweiz Standorte näher betrachtet. Wohingegen der Standort Davos (DAV) charakteristisch für die Situation Landwassertal ist, ist der Standort Weissfluhjoch (WFJ) charakteristisch für das Einzugsgebiet. Die Ergebnisse der simulierten Klimaprojektionen zeigen, dass die Niederschläge tendenziell und, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios und Zeitpunktes, um maximal 19 % für den Standort Davos und maximal 9 % für den Standort Weissfluhjoch zunehmen. Die meisten Niederschläge fallen in den Sommermonaten Juli und August sowie im November, für den Standort Weissfluhjoch zudem auch im Februar und März. Wohingegen, für die betrachteten Klimaprojektionen die Niederschläge in den Sommermonaten und vor allem im Juli tendenziell abnehmen, nehmen diese im November sowie für den Standort Weissfluhjoch vor allem auch im Februar und März zu. Dies würde bedeuten, dass die Grundwasserneubildung vermehrt in vergleichsweise „kälteren“ Monaten stattfindet, was mit einer tendenziellen Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“). Die Lufttemperaturen für den Standort Davos nehmen, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios und des Zeitpunktes, um 1.2 bis maximal 5.0 °C für den Standort Davos und 4.5 °C für den Standort Weissfluhjoch zu. Die Veränderungen der Lufttemperaturen werden mit einer Verzögerung die Grundwassertemperaturen beeinflussen.

Die Ergebnisse der Simulationen für die Landwasser zeigen sehr unterschiedliche Entwicklungen der Abflussmengen für die verschiedenen Emissionsszenarien und Zeitpunkte. Für alle Emissionsszenarien ist lediglich zu beobachten, dass die Abflussmengen in den Monaten Juli bis September um 6 bis 46 % abnehmen. Dies würde bedeuten, auch unter Berücksichtigung höherer Evapotranspirationsverluste im Sommer, dass sich in den Sommermonaten die Grundwasserneubildung über die Fliessgewässerinfiltration reduziert und weniger vergleichsweise „warmes“ Oberflächenwasser in den Grundwasserleiter infiltriert. Die Auswertung der saisonalen Abflussdauerlinien (hydrologisches Jahr) zeigt für die verschiedenen Emissionsszenarien, tendenziell höhere Abflüsse für die Monate Oktober bis Juni und niedrigere Abflüsse für die Monate Juli bis September. Unter Annahme, dass die quantitative Grundwasserneubildung und die einhergehende Temperaturprägung von Grundwasservorkommen hauptsächlich bei "charakteristischen" Ereignissen mit hohen Abflüssen (Intensität & Dauer) erfolgt, verstärkt dieser Effekt nochmals den "negativen Rückkopplungsmechanismus" und eine tendenzielle Abkühlung der Grundwasserressource.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Projektes konnte aufgezeigt werden, welche Grundlagen notwendig sind, um den hydraulischen und thermischen „Ist-Zustands“ von Lockergesteins-Grundwasservorkommen zu charakterisieren. Zusammen mit der Ableitung von Schlüsselparametern wie Speichereigenschaften, Dynamik von Wasserbilanzen, Erneuerungsraten sowie eine Bewertung der relevanten Grundwasserneubildungsprozesse erlauben die erarbeiteten Werkzeuge eine erste Beurteilung der Sensitivität von Lockergesteins-Grundwasservorkommen auf die Auswirkungen der Klimaveränderungen.

Im Vergleich zu vorausgegangenen Arbeiten konnte nochmals aufgezeigt werden, dass die Interaktion mit Oberflächengewässern und eine verstärkte Grundwasserneubildung während hoher Wasserführung der Fliessgewässer die Temperaturprägung des Grundwassers stark beeinflussen werden. Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten wurde v.a. die Rolle von „regionalen Hochwasserereignissen“ im Zusammenhang mit einer verstärkten Grundwasserneubildung untersucht. Die Rolle von lokalen Gewitterereignissen im Sommer auf die Abflussbildung und die Grundwasserneubildung konnte hingegen nicht weitergehend untersucht werden. Es ist zu erwarten, dass während solcher Extremereignisse, v.a. in den Oberläufen der Fliessgewässer, kurzfristig die Infiltrationsmengen erhöht werden („lokale Hochwasser“).

Bzgl. des Einflusses zukünftiger Grundwasserentnahmen und künstlichen Anreicherungen ist anzunehmen, dass bei langanhaltender Trockenheit vermehrt Grundwasser entnommen und angereichert wird. Da solche Situationen v.a. in den Sommermonaten eintreten werden, und vergleichsweise warmes Oberflächenwasser angereichert wird, ist zu erwarten, dass die Grundwassertemperaturen entsprechend steigen („positiver Rückkopplungsmechanismus“). Auch ist zu berücksichtigen, dass Entnahmen aus Oberflächenwasser und dem Grundwasser für verschiedene Wassernutzungen (siehe Kapitel 4.3 Synthese) Niedrigwassersituation im Fliessgewässer verstärken können.

Charakteristisch Eigenschaften von Grundwasservorkommen

Tabelle 5.1 fasst wesentliche Ergebnisse der Untersuchungen und Eigenschaften der untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen, einschliesslich Aquifergeometrien, Konnektivität der Grundwasserleiter mit den Oberflächengewässern und abgeschätzten Fliesswegen und -zeiten zusammen. Die Zusammenstellung ermöglicht es, für die ausgewählten Grundwasservorkommen Parameter zu identifizieren, welche einen wesentlichen Einfluss auf die Sensitivität der untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen auf die Auswirkungen der Klimaveränderungen haben.

Eine Auswertung der Dimension der untersuchten Grundwasservorkommen, einschliesslich Grundwasser-gesättigter und -ungesättigter Bereiche ermöglicht eine Bewertung der Sensibilität bzgl. Veränderungen des Grundwassermächtigkeit und / oder der Flurabstandes. Für alle untersuchten Grundwasservorkommen existieren nur wenige Bereiche, bei denen der Flurabstand zwischen 0 und 1 m beträgt (Eindringtiefe täglicher atmosphärischer Temperatursignale). Mit Ausnahme einzelner Grundwasservorkommen in denen Bereiche mit Flurabständen über 10 m dominieren, liegen die Flurabstände zwischen 1 bis 10 m (Eindringtiefe saisonaler atmosphärischer Temperatursignale). Einzelne Grundwasservorkommen weisen mittlere Grundwassermächtigkeiten unter 5 m auf. Auch die Fliessgewässerdichte, als Mass für die Interaktion mit Oberflächengewässern, ist sehr unterschiedlich mit sehr geringen Fliessgewässerdichten für Basel-Stadt und teilweise vergleichsweise hohen Fliessgewässerdichten für einzelne Lockergesteins-Grundwasservorkommen in Basel-Landschaft und Davos. Geschätzte Erneuerungsraten des Grundwassers resultieren, in Abhängigkeit des Abstands zum Fliessgewässer oder dem Gebietsauslass, bei einigen Tagen und mehr als einem Jahr.

Tab. 5.1: Zusammenfassung einiger wesentlicher Ergebnisse für die untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen, einschliesslich Aquifergeometrien, Konnektivität der Grundwasserleiter mit den Oberflächengewässern und abgeschätzten Fliesswegen und -zeiten zusammen.

Basel-Stadt	GW-Bereiche	Mittlere GW-Mächtigkeit [m]	Flurabstand Anteil an Gesamtfläche GW-Bereich			Fließgewässerdichte Länge Fließgewässer / Fläche GW-Bereich [km km ⁻²]	Fließweg [m]	Fließzeit [d]
			[0 - 1 m]	[1 - 10 m]	[10 - 50 m]			
Basel-Landschaft	Gesamt	5.3	5.4	41.3	53.3	1.2	1745	359.4
	Kleinhühningen	7.5	7.8	91.5	0.6	4.3	1641	162.7
	Kleinbasel	7.7	9.6	58.9	31.5	1.6	618	41.7
	Grossbasel Süd-Ost	2.1	3.0	36.9	60.1	1.5	1682	658.7
	Grossbasel Nord-West	5.8	2.7	8.9	88.4	0.7	2787	587.2
	Liesberg	3.9	12.2	87.6	0.2	6	191	20.8
	Laufen (Birshollen)	6.3	19.1	80.6	0.3	8.7	168	4.0
	Laufen (Stadt)	5.6	3.4	96.1	0.6	4.4	489	13.5
	Zwingen	5.4	4.3	90.2	5.5	5.6	725	20.4
	Grellingen	7.8	5.2	68.2	26.6	8.3	257	3.7
	Duggingen	7.6	10.8	78.8	10.4	8.3	463	0.6
	Aesch-Reinach	6.6	0.6	20.6	78.8	2.1	2533	6.0
	Arlenheim/Münchenstein	6.5	1.2	81.1	17.7	0.1	769	12.2
	Münchenstein	4.4	2.2	92.4	5.4	3.2	488	17.8
	Therwil/Oberwil	3.3	18.1	81.9	0.0	8.8	339	7.0
Bottmingen/Binningen	5.2	6.5	93.2	0.3	10.4	405	5.9	
Ormalingen	4.5	7.2	92.8	0.0	21.1	851	7.6	
Gelterkinden/Sissach	8.4	1.9	82.0	16.0	6.6	1505	20.0	
Sissach	10.8	0.9	38.9	60.2	4.5	1367	34.9	
Lausen	6.7	1.3	60.8	37.9	11.1	479	9.0	
Liestal	8.5	2.3	47.6	50.1	3.4	738	8.8	
Füllinsdorf/Augst	6.5	1.7	20.2	78.1	3.7	952	16.4	
Tecknau/Gelterkinden (Eibach)	4.9	2.9	90.2	6.9	9.7	2168	18.7	
Rümlingen/Thürnen (Homburgerbach)	6.4	6.6	88.4	5.0	11.2	844	7.3	
Eptingen (Dietgerbach)	7.0	0.7	86.4	13.0	13.1	570	2.9	
Dietgen/Sissach (Dietgerbach)	5.0	13.8	61.7	24.5	7.4	664	4.1	
Waldenburg (Vodere Frenke)	5.3	15.7	76.1	8.2	19.3	510	2.0	
Oberdorf (Vodere Frenke)	9.2	5.4	91.4	3.2	24.8	487	4.5	
Bennwil/Hölstein (Wallbach)	3.8	5.8	92.2	2.0	17.6	2513	10.7	
Niederdorf/Hölstein (Vodere Frenke)	5.6	3.0	89.4	7.6	8.3	939	6.0	
Hölstein/Bubendorf (Vodere Frenke)	4.8	1.0	96.0	3.0	9.1	2683	24.5	
Reigoldswil/Ziefen (Hintere Frenke)	2.4	71.2	28.7	0.1	29.2	220	1.6	
Ziefen/Bubendorf (Hintere Frenke)	4.7	5.7	93.7	0.6	10.9	466	3.2	
Bubendorf (Frenke)	6.8	0.2	85.6	14.2	4.1	807	7.6	
Bubendorf/Liestal (Frenke)	8.8	1.1	63.8	35.1	3.1	1436	7.6	
Nuglar_Liestal (Orisbach)	8.8	43.8	49.9	6.3	12.9	746	7.5	
Winterthur		24.5	34.1	64.7	2.0	6068	25.6	
Eulach		71.7	90.6	7.3	3.3	6293	61.4	
Suze		1.8	58.8	38.9	9.0	6811	7.8	
Landwasser								

Eine Auswertung der Oberflächengewässer in den untersuchten Grundwasservorkommen zeigt, dass der Rhein im Kanton Basel-Stadt, ausser während hoher Abflüsse und niedrigen Grundwasserständen, vornehmlich Vorfluter ist und die Grundwasserexfiltration dominiert.

Dies bedeutet auch, dass in Basel die Grundwasserneubildungskomponente und die Temperaturprägung über den Rhein eine untergeordnete Rolle spielen. Für die verschiedenen Fliessgewässer im Kanton Basel-Landschaft herrschen unterschiedliche Interaktionstypen vor, wobei der Talgrundwasserstroms teilweise durch trockenfallende Bereiche und Felsstufen unterbrochen wird. Dennoch besteht oft eine Verbindung der Grundwasservorkommen über Karst- und/ oder Bruchsysteme. Die Eulach in Winterthur und grösstenteils die Landwasser in Davos sind, auch bei unterschiedlichen hydrologischen Randbedingungen, vom Grundwasser entkoppelt. Auch die Suze in Biel ist grösstenteils vom Grundwasser entkoppelt, lediglich vor der Mündung in den Bieler See besteht eine Verbindung zum Grundwasser. Für diese Standorte dominieren Prozesse der Oberflächengewässerinfiltration, welche eine wichtige Grundwasserneubildungskomponente auch bzgl. der Temperaturprägung darstellen.

5.1 Entwicklung Grundwasserneubildung und Grundwassertemperaturen

Es ist zu erwarten, dass eine Veränderung des flächig versickernden Niederschlagswassers auf den Perimeter der untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen quantitativ eine geringe Rolle in der Gesamtwasserbilanz der Grundwasserneubildung spielt. Eine Veränderung des Randzufluss über den regionalen Grundwasserstrom als Resultat einer veränderten Grundwasserneubildung in den oberstromigen Einzugsgebieten hingegen kann quantitativ eine wichtigere Rolle spielen („importiertes Grundwasserregime“). Eine Reduktion der Fliessgewässerinfiltration, durch häufiger auftretende und länger andauernde Niedrigwasserperioden, kann in grösseren hydraulischen Gradienten vom Grundwasser in die Fliessgewässer resultieren wobei die Grundwasserexfiltration verstärkt würde. In alpinen Regionen wie Davos spielt ein verringerter Randzufluss aufgrund einer reduzierten Grundwasserneubildung in den Hangeinzugsgebieten sowie ein geringerer Anteil an Schneeschmelzwasser quantitativ eine wichtige Rolle.

Für die untersuchten Grundwasservorkommen zeigen die aus den Klimaprojektionen resultierenden Prognosen für die Niederschlagentwicklung, dass im Vergleich zum Referenzjahr 2000, die Niederschläge im hydrologischen Halbjahr Oktober bis März zunehmen und in jenem von April bis September abnehmen (Abbildung 5.1.1). Dies bedeutet, dass die Grundwasserneubildungskomponenten über die regionale Grundwasserströmung aus zuströmendem Hangwasser und aus flächig versickerndem Niederschlagswasser vermehrt in vergleichsweise „kälteren“ Monaten stattfindet, welche mit einer tendenziellen Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“). Zudem nimmt der quantitative Anteil dieser Grundwasserneubildungskomponenten in vergleichsweise „wärmeren“ Monaten ab, ein Prozess, welcher sich durch die erhöhte Verdunstung in der Vegetationsperiode intensiviert. Abbildung 5.1.1 fasst auch nochmals die Resultate der Modellierung des Oberflächenwasserabflusses für die hydrologischen Halbjahre und für die Emissionsszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 und die Jahre 2055 und 2085 im Vergleich zum Referenzjahr 2000 zusammen. Die Darstellung erlaubt es, die durch die Klimaänderungen bedingte, Veränderungen der quantitativen Grundwasserneubildung über infiltrierende Oberflächengewässer und die einhergehende Temperaturprägung zu beurteilen. Für die untersuchten Standorte entlang der Oberflächengewässer in den verschiedenen Grundwasservorkommen nimmt der Abfluss im hydrologischen Halbjahr von Oktober bis März tendenziell zu und im hydrologischen Halbjahr von April bis September tendenziell ab (vergleiche auch Kapitel 3.4 Synthese). Dies bedeutet, dass die Grundwasserneubildungskomponenten über infiltrierende Oberflächengewässer vermehrt in vergleichsweise „kälteren“ Monaten stattfindet, was mit einer tendenziellen Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“). Zudem nimmt der quantitative Anteil dieser Grundwasserneubildungskomponenten in vergleichsweise „wärmeren“ Monaten ab, ein Prozess, welcher sich durch die erhöhte Verdunstung in der Vegetationsperiode intensiviert.

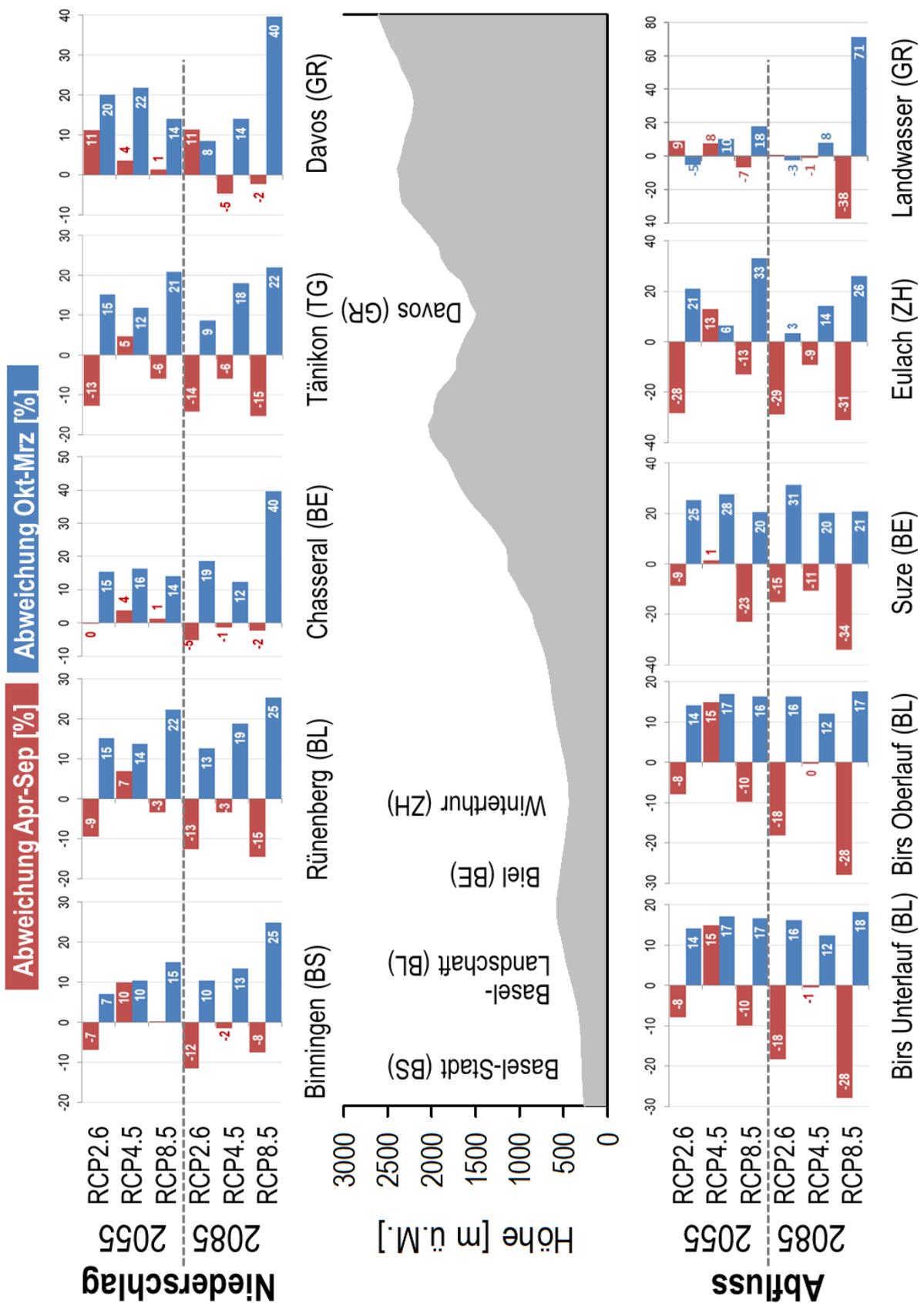


Abb. 5.1.1: Prozentuelle Abweichung der Niederschlags- und Abflusssummen im Verhältnis für repräsentative Standorte der untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen für die hydrologischen Halbjahre und die Emissionsszenarien RCP2.6 RCP4.5 und RCP8.5 sowie die Jahre 2055 und 2085 im Vergleich zum Referenzjahr 2000.

5.2 Beurteilung der Datengrundlage und Systemkenntnis

Die Datengrundlagen, die dem Projekt zur Verfügung standen und die Systemkenntnis der verschiedenen Lockergesteins- Grundwasservorkommen waren sehr unterschiedlich und werden in Tabelle 5.2.1 zusammenfassend beschrieben. Aussagen über Datengüte und Qualität beruhen dabei auf einer einfachen Klassifikation in den Kategorien (++) und (+) bis (- und --). Dabei stellt ++ die beste Einteilung, -- die schlechteste dar; 0 bedeutet nicht vorhanden.

Tab. 5.2.1: Kategorisierungsschema Datengüte

	GW-OW-Messsysteme	Ableitung Aquifergeometrien	Beschreibung Interaktion GW-OW	Kenntnis Interaktion regionale Aquifere	GW-Modelle
Basel-Stadt (BS)	++	++	++	0	++
Basel-Landschaft (BL)	+	++	+ (t.w.)	+ (t.w.)	+ (t.w.)
Winterthur (ZH)	+	++	-	0	-
Biel (BE)	+	++	--	+ (t.w.)	0
Davos (GR)	-	++	+ (t.w.)	+ (t.w.)	+

Wohingegen die Datengrundlage als auch die Systemkenntnis für die untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen in Basel und teilweise auch im Kanton Basel-Landschaft sehr gut bis gut waren, fehlen für andere Standorte die entsprechenden Messsysteme, Modelle und teilweise auch Systemkenntnisse, um die Sensitivität der Lockergesteins-Grundwasservorkommen auf Klimaänderungen angemessen zu evaluieren.

5.3 Übertragbarkeit

Die entwickelten Konzepte und methodischen Ansätze ermöglichen es kantonalen und eidgenössischen Fachstellen für ausgewählte Lockergesteins-Grundwasservorkommen charakteristische hydraulische und thermische Randbedingungen miteinander zu vergleichen und die Sensitivität der relevanten Grundwasserneubildungsprozesse auf den Klimawandel zu bewerten. Der Vergleich der charakteristischen hydraulischen (Aquifereigenschaften, Grundwasserneubildung, Interaktion mit Oberflächengewässer, etc.) und thermischen Randbedingungen (saisonale Temperatursignale, anthropogene Wärmeeinträge, etc.) der verschiedenen Schweizer Grundwasservorkommen kann als Grundlage für die Ableitung der **Übertragbarkeit** auf Schweizer Grundwasservorkommen im Allgemeinen dienen. So ist zu erwarten das Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen, welche ähnlich Eigenschaften wie die untersuchten Standorte aufweisen, entsprechende Sensitivitäten bzgl. erwarteter Auswirkungen von Klimaänderungen haben. Wohingegen einzelne der abgeleiteten Eigenschaften der untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen (Tab. 5.1) auf andere Gebiete übertragbar sind, müssen vor allem für Standorte mit anderen Randbedingungen weitere Parameter analysiert werden.

6 Abschliessende Bemerkungen und Empfehlungen

6.1 Forschungslücken und offene Fragen

Die Ursachen für die räumliche Temperaturverteilung im Grundwasser und deren zeitliche Dynamik lassen sich nicht direkt aus der statistischen Auswertung oder den räumlich interpolierten Temperaturverteilungen zufriedenstellend ableiten. Für ein erweitertes Prozessverständnis bedarf es deshalb Strömungs- und Wärmetransportmodellierungen. Erst diese geben Auskunft über die relevanten hydraulischen und thermischen Prozesse, erst so können Wärmebilanzen und thermische Nutzungspotenziale berechnet und thermische Auswirkungen zukünftiger Nutzungen des oberflächennahen Untergrundes quantifiziert werden.

Vor allem in urbanisierten Gebieten ist zu erwarten, dass eine vermehrte thermische Nutzung des Untergrundes sowie Anpassungsstrategien in Zusammenhang mit der Klimaerwärmung („positive und negative Rückkopplungsmechanismen“) zu einer weiteren Beeinflussung urbaner Grundwassertemperaturen führt. Dieses komplexe Zusammenspiel der unterschiedlichen natürlichen und anthropogenen Einflussfaktoren kann nur mittels Strömungs- und Wärmetransportmodelle angemessen analysiert werden. Zudem erlauben solche Modelle, insbesondere auch die Interaktion von Oberflächengewässern mit dem Grundwasser sowohl räumlich als auch zeitlich zu quantifizieren und mittels Szenarienberechnungen die quantitativen und qualitativen Auswirkungen von Klimaänderungen vertieft zu untersuchen.

Mit vertretbarem Aufwand und weiterführenden Untersuchungen könnten Fließgewässerabschnitte hinsichtlich der Interaktion mit dem Grundwasser bei verschiedenen hydrologischen Randbedingungen auch unter der Berücksichtigung saisonaler Veränderung bzgl. des Auftretens von Extremereignissen evaluiert werden. Die Beziehung von möglichen hydraulischen und thermischen Auswirkungen von Klimaänderungen auf Oberflächengewässern und das Grundwasser könnte so vertieft werden.

Anforderungen Monitoring-Systeme / Pilotstudien für Langzeitmonitoring

Für die untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen konnten bestehende Defizite in der zur Verfügung gestandenen Datengrundlage aufgezeigt werden. Diese Analyse erlaubt es im Fall von unzureichender Datengrundlage, Monitoring-Konzepte für kantonale Fachstellen abzuleiten und zu optimieren.

Im aktuellen Zustandsbericht zur Entwicklung des Grundwassers in der Schweiz wird festgehalten, dass Pilotstudien es erlauben sollen, spezifische Entwicklungen im Grundwasser im Detail zu identifizieren und den Bedarf für den Einbezug von Langzeitmonitoring abzuklären (BAFU, 2019). Die Realisation von Pilotstudien ist zu begrüssen und wäre eine Grundlage für die Dokumentation langfristiger Auswirkungen der Klimaänderung. Temperaturmesssysteme solcher Pilotstudien sollten dabei so ausgelegt werden, dass sie es ermöglichen spezifische thermische Prozesse zu analysieren, einschliesslich des thermischen Einflusses (A) im Abstrom von Untergrundstrukturen, (B) der Erfassung von Randgebieten des regionalen advektiven Wärmetransports, (C) des Abstroms von thermischen Nutzungen, und (D) der Fluss-Grundwasser Interaktion.

Aufgrund der zunehmenden Verfügbarkeit von vergleichsweise kostengünstigen Temperatursensoren werden seit 1980 vermehrt auch Temperaturdaten erhoben. Die Messstellen der kantonalen Grundwasser-Beobachtungsnetze lassen jedoch keine Aussagen über die vertikale Temperaturverteilung im Grundwasser oder in der ungesättigten Zone zu. Auch Auswirkungen von Heterogenitäten auf die Temperaturverteilung im Untergrund können nicht erfasst werden. Kenntnisse über die vertikale Temperaturverteilung in der ungesättigten Zone liefern Informationen über den Wärmestrom von der Oberfläche in den oberflächennahen Untergrund und das Grundwasser und ermöglichen eine Definition von thermischen Randbedingungen. Auf Grundlage von tiefendifferenzierten Temperaturmessungen können die Temperaturentwicklung in der ungesättigten Zone oberhalb des Grundwasserspiegels und die vertikale Tem-

peraturverteilung innerhalb des Grundwassers beschrieben werden. Die Messsysteme können gezielt für Prozessuntersuchungen verwendet werden, um thermische Auswirkungen anthropogener Eingriffe im Untergrund vor dem Hintergrund von Klimaänderungen differenziert zu quantifizieren und langfristig zu dokumentieren. So konnten für den Kanton Basel-Stadt mit vertretbarem Aufwand und an gezielt gewählten Standorten Monitoring-Systeme und Modellwerkzeuge entwickelt werden, die eine Gesamtplanung der thermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes in urbanen Gebieten ermöglichen (Huggenberger and Epting, 2011).

Zudem wird vor allem in urbanisierten Gebieten empfohlen, systematisch Daten der thermischen Grundwassernutzungen (Entnahme- und Rückgabemengen und Temperaturen) und zur räumlichen Verteilung von Gebäudestrukturen im Untergrund zu erheben, um die anthropogenen Einflüsse auf das hydraulische und thermische Regime des Untergrundes quantifizieren zu können.

Nutzungspotentiale / Anpassungsstrategien

Eine Vielzahl von Einzeleingriffen in urbanen Gebieten, wie zum Beispiel thermische Grundwassernutzungen und Energieeinträge über tiefe Gebäude, führt zu einer Veränderung des natürlichen thermischen Grundwasserregimes. Aufgrund der interagierenden Prozesse, die auf urbane Grundwasserbereiche und das thermische Grundwasserregime wirken, ist für eine differenzierte Beurteilung und nachhaltige Nutzung des Grundwassers und der thermischen Energie des oberflächennahen Untergrundes die Entwicklung von Nutzungskonzepten notwendig. Diese sollen es ermöglichen, thermische Nutzungspotentiale des oberflächennahen Untergrundes bei energietechnischen Planungen in einzelnen Quartieren unter Berücksichtigung der Vorgaben zum Grundwasserschutz und qualitativer Aspekte urbaner Grundwasservorkommen mit zu berücksichtigen.

Die Auswirkungen anthropogener Anpassungsstrategien (erhöhte Grundwasserentnahme, künstliche Aufladung von Flusswasser) auf den Klimawandel könnten grösser sein als die Auswirkungen des Klimawandels selbst. Da solche Situationen mit erhöhtem Grundwasserbedarf vor allem in den Sommermonaten auftreten werden und vermehrt vergleichsweise warmes Oberflächenwasser anreicht wird, ist zu erwarten, dass die Grundwassertemperaturen entsprechend ansteigen. In Landwirtschaftsgebieten ist während niederschlagsarmen Perioden zu erwarten, dass Wasserentnahmen aus Fließgewässern zunehmen werden. Eine Reduktion des Niedrigwasserabflusses würde folgend auch mit einer verminderten Grundwasserneubildung durch die Infiltration von Oberflächenwasser einhergehen.

7 Referenzen

- (CEC), C.o.t.E.C., 2000. Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy: Joint text approved by the Conciliation Committee. 1997/0067(COD). C5-0347/00.
- Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt, 2014. Wegleitung über die Grundwassernutzung im Kanton Basel-Stadt, in: Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt (Ed.), Basel, Switzerland.
- BAFU, 2012. Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro), Umwelt-Wissen Nr. 1217, Bern.
- BAFU, 2019. Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz. Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016, in: Umwelt, B.f. (Ed.), Bern, p. 138.
- Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., Palutikof, J.P., 2008. Climate change and water.
- Bayer, P., Rivera, J.A., Schweizer, D., Schärli, U., Blum, P., 2016. Extracting past atmospheric warming and urban heating effects from borehole temperature profiles. *Geothermics* 64, 289-299.
- Briellmann, H., Griebler, C., Schmidt, S.I., Michel, R., Lueders, T., 2009. Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *Fems Microbiology Ecology* 68, 273-286.
- Brock, T.D., Madigan, M.T., 1988. *Biology of microorganisms*, 5th edition ed. Prentice-Hall (Englewood Cliffs, N.J.).
- CH2014-Impacts, 2014. Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland, in: OCCR, F., MeteoSwiss, C2SM, Agroscope und ProClim (Ed.), Bern, Schweiz, p. 136.
- CH2018, 2018. CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, in: ClimateServices, N.C.f. (Ed.), Zurich, p. 271.
- Epting, J., García-Gil, A., Huggenberger, P., Vázquez-Suñe, E., Mueller, M.H., 2017a. Development of Concepts for the Management of Thermal Resources in Urban Areas – Assessment of Transferability from the Basel (Switzerland) and Zaragoza (Spain) Case Studies. *Journal of Hydrology*.
- Epting, J., Handel, F., Huggenberger, P., 2013. Thermal management of an unconsolidated shallow urban groundwater body. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 1851-1869.
- Epting, J., Huggenberger, P., 2013a. 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., 2013b. 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., 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., Huggenberger, P., Page, R., Besmer, A., Hammes, F., Radny, D., Rothardt, J., Hollender, J., Weber, S., Bänninger, D., Auckenthaler, A., Borer, P., 2017b. Variabilität der Grundwasserqualität – Einflussfaktoren für die Grundwasserqualität flussnaher Trinkwasserfassungen. *AQUA & GAS* 2.
- Figura, S., Livingstone, D.M., Hoehn, E., Kipfer, R., 2011. Regime shift in groundwater temperature triggered by the Arctic Oscillation. *Geophysical Research Letters* 38.
- Figura, S., Livingstone, D.M., Kipfer, R., 2013. Competing controls on groundwater oxygen concentrations revealed in multidecadal time series from riverbank filtration sites. *Water Resources Research* 49, 7411-7426.
- Hoehn, E., Scholtis, A., 2011. Exchange between a river and groundwater, assessed with hydrochemical data. *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 983-988.
- Huggenberger, P., Epting, J., 2011. Thermische Grundwassernutzung im Kanton Basel-Stadt - Konzept für die thermische Grundwasserbewirtschaftung Pilotprojektgebiet Nordwest Basel. *Angewandte & Umweltgeologie*, Basel, Schweiz.
- Huggenberger, P., Epting, J., Scheidler, S., 2013. Concepts for the sustainable management of multi-scale flow systems: the groundwater system within the Laufen Basin, Switzerland. *Environmental Earth Sciences* 69, 645-661.
- Huggenberger, P., Hoehn, E., Beschta, R., Woessner, W., 1998. Abiotic aspects of channels and floodplains in riparian ecology. *Freshwater Biology* 40, 407-425.
- Hunt, H., Schubert, J., al., e., 2002. Operation and maintenance considerations, in *Riverbank filtration: Improving source-water quality*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: synthesis report*, IPCC, Genaeva.

- Jesußek, A., Grandel, S., Dahmke, A., 2013. Impacts of subsurface heat storage on aquifer hydrogeochemistry. *Environ. Earth Sci.* 69, 1999-2012.
- Kipfer, R., Livingstone, D.M., 2008. Water resources and climate change, in: News, E. (Ed.).
- Metcalf, R.A., Schmidt, B.J., 2016. Streamflow Analysis and Assessment Software (version 4.1): Reference Manual, in: Forestry, O.M.o.N.R.a. (Ed.).
- Michel, A., in prep. Disaggregation of CH2018 daily data to hourly data.
- Mueller, M.H., Huggenberger, P., Epting, J., 2018. Combining monitoring and modelling tools as a basis for city-scale concepts for a sustainable thermal management of urban groundwater resources. *Science of the Total Environment* 627, 1121–1136.
- NFP61, 2015. Nachhaltige Wassernutzung in der Schweiz. Gesamtsynthese des Nationalen Forschungsprogramms NFP61 «Nachhaltige Wassernutzung», Bern.
- Oni, S.K., Futter, M.N., Molot, L.A., Dillon, P.J., Crossman, J., 2014. Uncertainty assessments and hydrological implications of climate change in two adjacent agricultural catchments of a rapidly urbanizing watershed. *Science of the Total Environment* 473, 326-337.
- Porporato, A., Daly, E., Rodriguez-Iturbe, I., 2004. Soil water balance and ecosystem response to climate change. *Am Nat* 164, 625-632.
- Possemiers, M., Huysmans, M., Batelaan, O., 2014. Influence of Aquifer Thermal Energy Storage on groundwater quality: A review illustrated by seven case studies from Belgium. *Journal of Hydrology Regional Studies* 2, 20-34.
- Schürch, M., Bulgheroni, M., Sinreich, M., 2018. Température des eaux souterraines. Un aperçu de l'état et de l'évolution en Suisse. *Aqua & Gas* 7/8, 40 – 48.
- Sprenger, C., Lorenzen, G., Hulshoff, I., Grutzmacher, G., Ronghang, M., Pekdeger, A., 2011. Vulnerability of bank filtration systems to climate change. *Science of the Total Environment* 409, 655-663.
- Umweltbundesamt, 2011. Trends der Grundwassertemperatur. Untersuchungen von Daten der Überwachung des Gewässerzustandes in Österreich, Report 0328, Wien.

Anhang A1: Lockergesteins-Grundwasservorkommen Kanton Basel-Stadt

Datengrundlage

- *Modelliertes hydraulisches und thermisches Grundwasserregime für den Zeitraum 2010-2015 (BFE-Projekt "Thermische Bewirtschaftungssysteme für den oberflächennahen Untergrund der Region Basel" SI/501044-01)*
- *Topografie: DHM25m (Kanton Basel-Stadt)*
- *Felsoberfläche (fortlaufende Aktualisierung AUG)*
- *Datenreihen Grundwasserspiegelhöhen und -temperaturen, Grundwassernutzungen (kantonales Überwachungsprogramm Amt für Umwelt und Energie Basel-Stadt AUE BS; Ressort Grundwasser und Boden)*
- *Wasserstand und -temperaturen Fliessgewässer (BAFU)*
- *Meteorologische Grundlagedaten (MeteoSwiss)*

1 Hydraulischer und thermischer Istzustand

Der Kanton Basel-Stadt liegt auf einer Höhe von etwa 260 m ü.M. im südlichen Oberrheingraben an den Ausläufern des Falten- und Tafeljuras sowie den Vogesen und dem Schwarzwald. Das Jahresmittel der Lufttemperatur (gemessen in 2 m Höhe über Grund) an der Station Basel-Binningen (MeteoSwiss BAS 1940) lag im Zeitraum 1994 bis 2015 bei 10.9 ± 0.6 °C. Der mittlere Jahresniederschlag an dieser Station betrug in diesem Zeitraum 862 ± 144 mm.

Die grundwasserführenden Schotter im Untersuchungsgebiet bestehen vor allem aus fluvialen Schottern, die durch die Oberflächengewässer Rhein, Wiese, Birs und Birsig abgelagert wurden (Huggenberger and Epting, 2011). Die Lockergesteinsablagerungen weisen mit mittleren Durchlässigkeitsbeiwerten von etwa $k_f = 1.0 \times 10^{-4}$ und $5 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ eine gute hydraulische Durchlässigkeit auf. Der Grundwasserstauer wird von den tertiären Einheiten des Oberrheingrabens gebildet, die als nahezu „wasserundurchlässig“ betrachtet werden können (Huggenberger and Epting, 2011). Die regionale Grundwasserströmung verläuft in nord-östlicher und südwestlicher Richtung zum Vorfluter Rhein. Abbildung A1.1 zeigt den Kanton Basel-Stadt und modellierte Grundwassergleichen und -temperaturen. Das Gefälle der Grundwasseroberfläche variiert zwischen 0 und 4.3 % mit einem Mittelwert von 0.7 %.

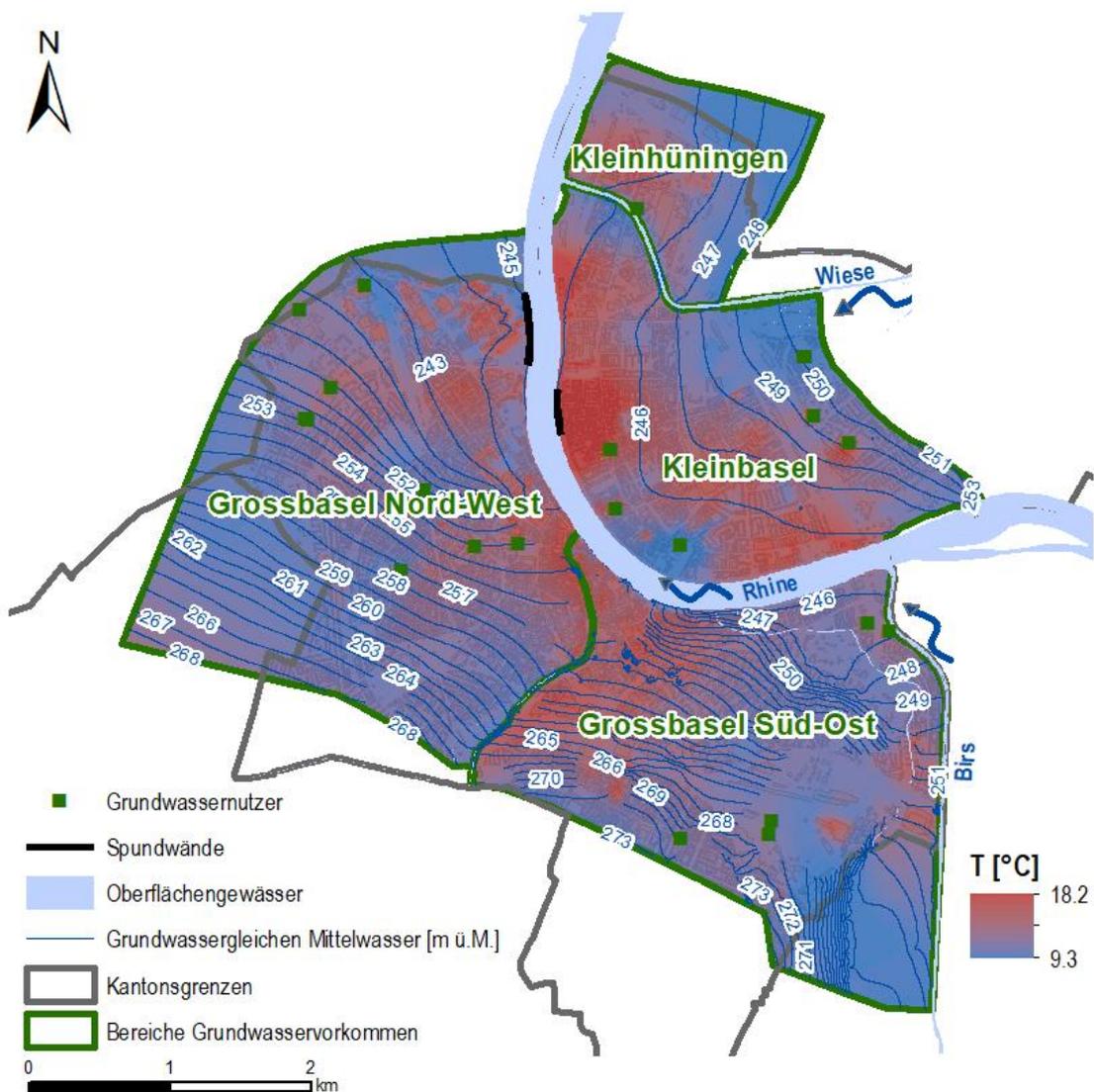


Abb. A1.1: Lockergesteins-Grundwasservorkommen Kanton Basel-Stadt. Modellerte Grundwassergleichen und -temperaturen (Mittelwert der Jahre 2010 bis 2015). Bereiche ohne Grundwassergleichendarstellung deuten auf Gebiete hin, die aufgrund der Topographie des Grundwasserstauers kein oder nur zeitweise Grundwasser führen (verändert nach Huggenberger et al. (2017)).

Grundwassermessdaten

Das kantonale Grundwasser-Überwachungsprogramm des AUE BS umfasste im Bereich der untersuchten Grundwasservorkommen im Jahr 2015 86 Grundwassermessstellen (Abb. A1.2), hinzu kommen 32 Grundwassermessstellen, welche von den Industriellen Werken Basel (IWB) im Trinkwassergewinnungsgebiet „Lange Erlen“ betrieben werden.

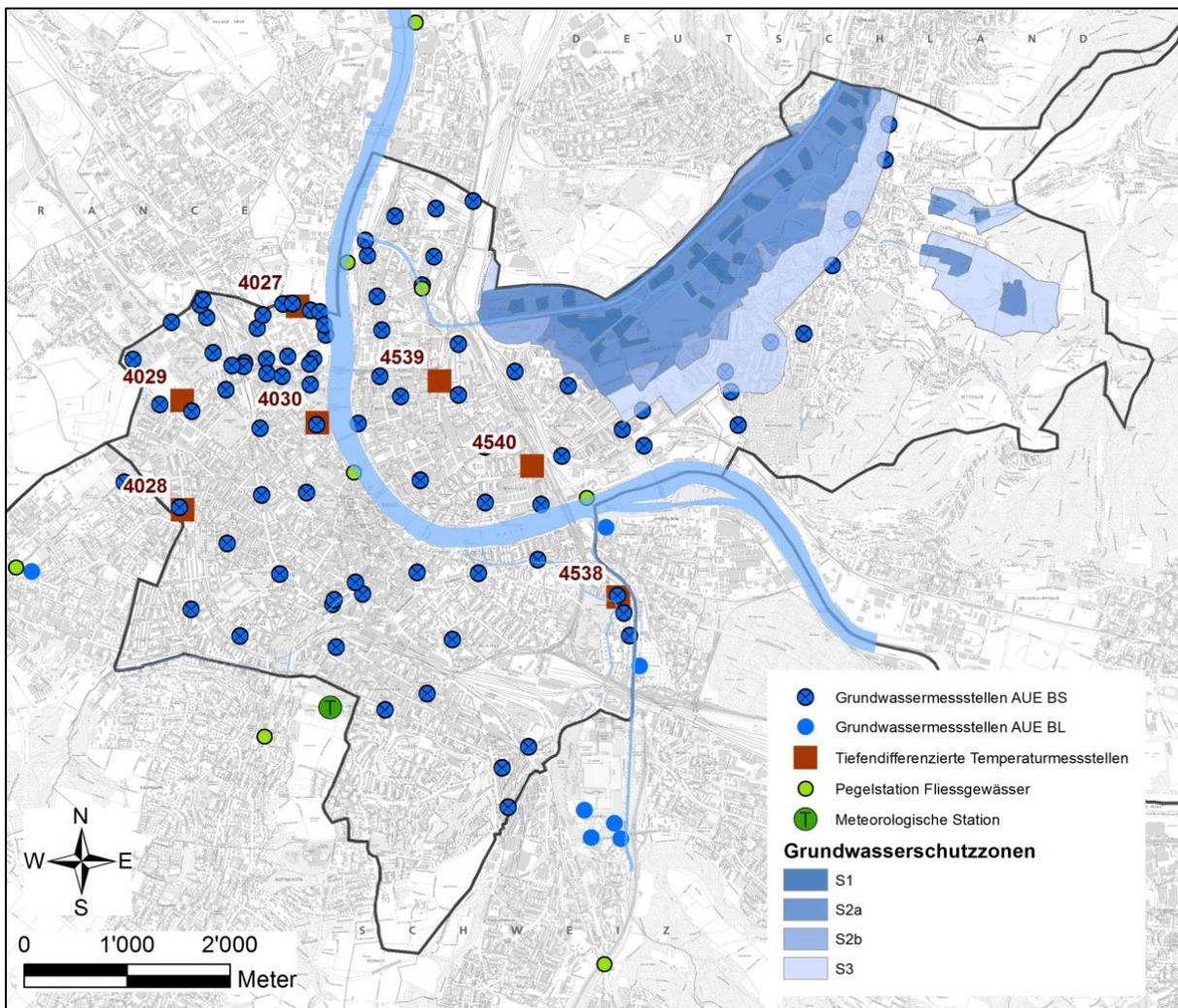


Abb. A1.2: Lage der Grundwassermessstellen, tiefendifferenzierten Temperatursysteme, Messstationen der Fließgewässer, meteorologischen Station Basel-Binningen (MeteoSwiss BAS 1940) und Grundwasserschutz-zonen im Untersuchungsgebiet (Grundwassermessstellen im Bereich der Grundwasserschutz-zonen S1-S2 werden aus Datenschutzgründen nicht gezeigt; verändert nach Huggenberger et al. (2017)).

Weiterhin existieren im Stadtgebiet von Basel sieben tiefendifferenzierte Temperatursysteme (Abb. A1.2), welche die Temperaturen des Untergrundes sowohl in der ungesättigten Zone als auch im grundwassergesättigten Bereich der Lockergesteine kontinuierlich erfassen. Die tiefendifferenzierten Temperatursysteme wurden an Positionen errichtet, welche es ermöglichen, spezifische thermische Prozesse zu untersuchen, einschliesslich (A) thermischer Einfluss im Abstrom von Gebäudestrukturen im Untergrund, (B) Erfassung von Randgebieten des regionalen advektiven Wärmetransports, (C) thermischer Einfluss im Abstrom einer Kühlwassernutzung, und (D) thermischer Einfluss der Fluss-Grundwasser Interaktion. Im Folgenden wird die thermische Entwicklung der Lockergesteins-Grundwasservorkommen in Basel für die Jahre 1994 bis 2015 beschrieben (Abb. A1.3).

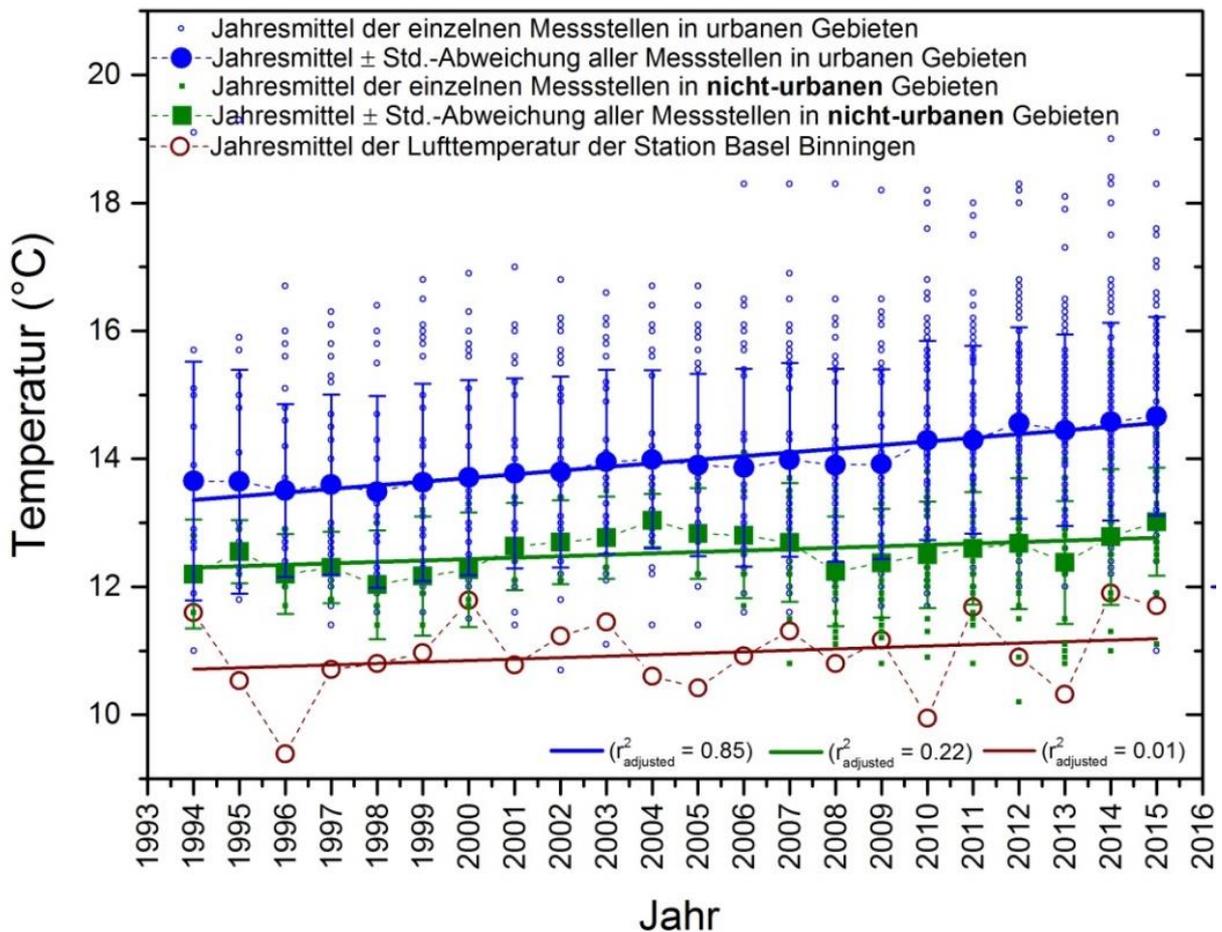


Abb. A1.3: Statistik und Jahresmittelwerte der Grundwassertemperaturen für den Zeitraum 1994 bis 2015 (Datengrundlage: AUE BS und IWB) und der Lufttemperatur (Basel-Binningen, MeteoSwiss BAS 1940, Mueller et al. (2018)).

In stark urbanisierten Bereichen lagen die Grundwassertemperaturen im Jahresmittel zwischen 18 bis 19 °C. Etwa 50 % der Messstellen, die im städtischen Gebiet liegen, wiesen in den Jahren 1994 bis 2015 im Jahresmittel eine Grundwassertemperatur von über 12.9 bis 14.4 °C auf und lagen damit über dem Referenzwert von derzeit 12 °C (gemäss Wegleitung über die Grundwassernutzung im Kanton Basel-Stadt; Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt (2014)). Im Gesamtmittel lagen die Grundwassertemperaturen in stark urbanisierten Bereichen von Basel-Stadt (Gebiete, die ausserhalb der Grundwasserschutzzone liegen) bei 13.5 bis 14.7 °C (Abb. A1.3, blaue Punkte ●). Die mittlere Veränderung der Grundwassertemperatur in den urbanen Gebieten (Abb. A1.3, blaue Punkte ●) betrug im Zeitraum von 1994 bis 2015 etwa + 0.05 K a⁻¹ (statistisch signifikante Veränderung, p < 0.05). Bei 48 % der Messstellen ist die jährliche Temperaturerhöhung statistisch signifikant (p < 0.05) und insgesamt liegt die jährliche Temperaturerhöhung bei etwa 50 % aller Messstellen mit mindestens 8 Jahren Datenerhebung bei mindestens + 0.04 K a⁻¹. Am Stadtrand, in den weniger urban geprägten Gebieten (z.B. Grünflächen der Grundwasserschutzgebiete), lagen die Jahresmitteltemperaturen um etwa 1 bis 1.5 K tiefer als in den urbanen Bereichen (Abb. A1.3, grüne Quadrate ■).

Die Messdaten veranschaulichen die bereits erhöhten Grundwassertemperaturen in urbanen Bereichen von Basel-Stadt. Unter der Annahme, dass „potentiell natürliche“ Grundwassertemperaturen im Bereich der Jahresmittel der Lufttemperaturen liegen sollten, wird deutlich, dass für den untersuchten Zeitraum die Grundwassertemperaturen im Mittel bereits um 3.0 ± 0.7 K erhöht sind und v.a. in stark urban geprägten Gebieten sogar über 18 °C erreichen können.

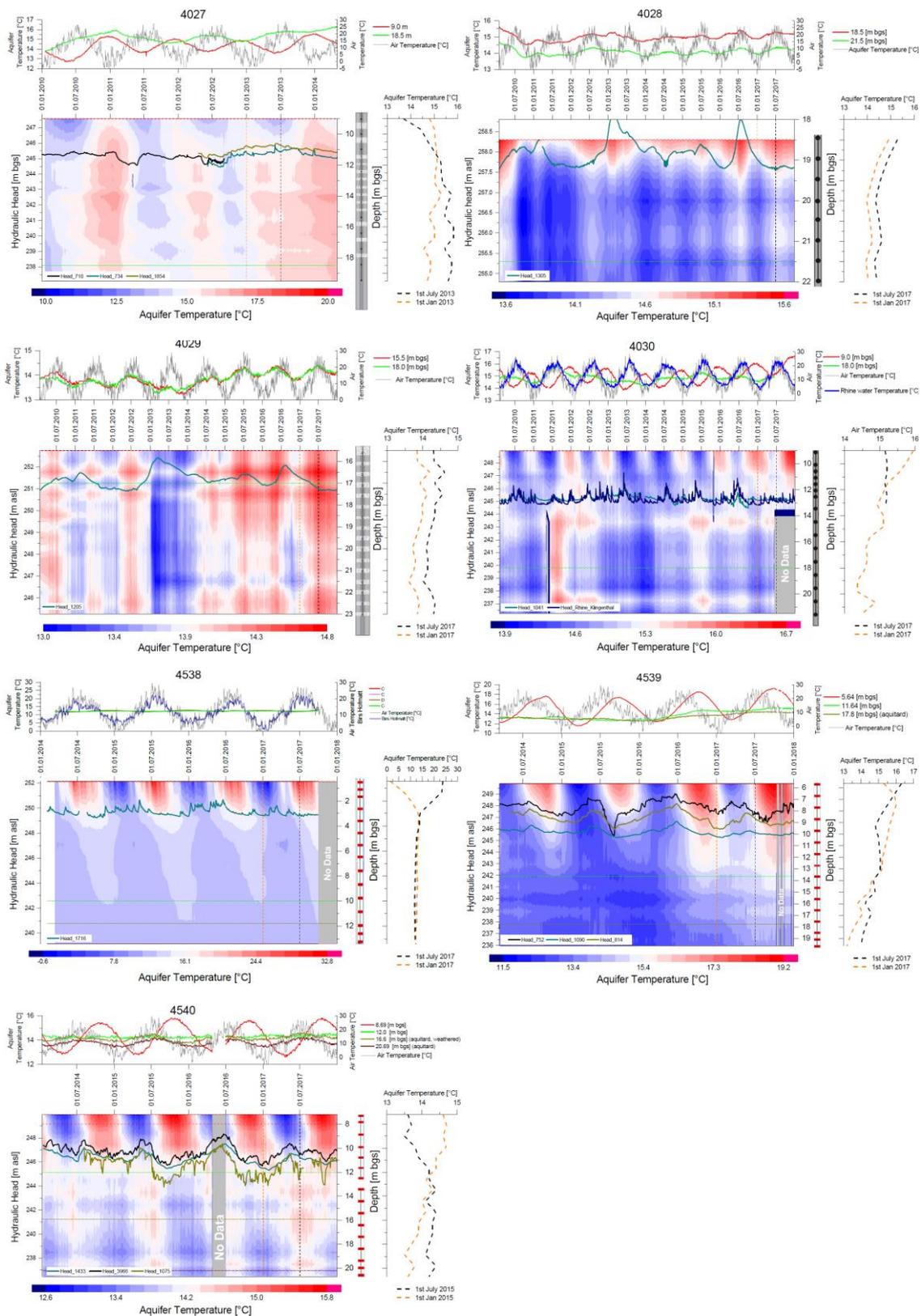


Abb. A1.4: Zeitliche und räumliche Temperaturverteilung der tiefendifferenzierten Grundwassermesssysteme. Die grüne (--) und die rote (--) Profillinie (oben) geben den zeitlichen Verlauf der Temperaturen in der Grundwasser-gesättigten und -ungesättigten Zone in zwei Tiefen wieder. Die orangefarbene (--) und die schwarze (--) Profillinie (rechts) geben die Temperaturverteilung in der Tiefe an zwei verschiedenen Tagen im Sommer und im Winter wieder. Zudem wird der kontinuierlich gemessene Grundwasserspiegel einer nahegelegenen Grundwassermessstelle (GWM) im Konturdiagramm dargestellt (verändert nach Huggenberger et al. (2017)).

Auf Grundlage der tiefendifferenzierten Temperaturmessungen (Abb. A1.4) kann die Temperaturentwicklung in der ungesättigten Zone oberhalb des Grundwasserspiegels und die vertikale Temperaturverteilung innerhalb der grundwassergesättigten Zone beschrieben werden. Die Messsysteme dokumentieren, dass die Temperaturen und die saisonalen Temperaturschwankungen in der ungesättigten Zone in einigen Messstellen grösser sind als es unter natürlichen Bedingungen in diesen Tiefenbereichen zu erwarten wäre. Dabei führen anthropogene Einflüsse, wie asphaltierte Oberflächen und Gebäudestrukturen im Untergrund, zu einem erhöhten Wärmeeintrag in den Untergrund. Darüber hinaus deuten Messresultate der tiefendifferenzierten Messsysteme darauf hin, dass der advektive Wärmetransport im Untergrund eine grosse Rolle spielt und vor allem in den hochdurchlässigen Bereichen der Lockergesteinsablagerungen stattfindet.

Oberflächengewässerdaten

Im Bereich des untersuchten Grundwasservorkommens existieren 5 BAFU-Oberflächengewässer-Messstellen (Abb. A1.2). Drei Messstellen im Rhein umfassen „Basel, Rheinhalle“ (2289, Daten seit 1891), „Klingenthalfähre“ (2615, Daten seit 1998) und „Rhein - Weil, Palmrainbrücke“ (2613, Daten seit 1995, stromabwärts bereits auf deutschem Boden). Der mittlere Abfluss bei Messstelle 2289 betrug im Jahr 2017 ca. $921 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Während Ereignissen kann der Abfluss auf über $5'000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ansteigen (letztmalig 1999 mit einer geschätzten Wiederkehrperiode von > 150 Jahre). Für die Messstelle 2615 existiert keine P-Q-Beziehung, die Temperatur des Rheins zeigt einen ausgeprägten saisonalen Verlauf mit Temperaturminima im Winter von unter $3 \text{ }^\circ\text{C}$ und -maxima im Sommer von nahezu $26 \text{ }^\circ\text{C}$. Für die Messstelle 2613 existieren lediglich Temperaturmessungen des Rheins, welche auch einen ausgeprägten saisonalen Verlauf zeigen, mit Temperaturminima im Winter von unter $3 \text{ }^\circ\text{C}$ und -maxima im Sommer von nahezu $24 \text{ }^\circ\text{C}$. Der mittlere Abfluss der Messstelle „Wiese“ (2199, Daten seit 1933) betrug im Jahr 2017 ca. $9.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Während Ereignissen kann der Abfluss auf über $340 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ansteigen (letztmalig 1944 mit einer geschätzten Wiederkehrperiode von > 150 Jahre). Der mittlere Abfluss der Messstelle „Birs - Münchenstein, Hofmatt“ (2106 Daten seit 1933) betrug im Jahr 2017 ca. $9.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Während Ereignissen kann der Abfluss auf über $380 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ansteigen (letztmalig 2007 mit einer geschätzten Wiederkehrperiode von > 150 Jahre). Die Temperatur der Birs zeigt einen ausgeprägten saisonalen Verlauf sowie den Einfluss von Ereignissen mit hohen Abflüssen mit Temperaturminima im Winter von nahezu $1 \text{ }^\circ\text{C}$ und -maxima im Sommer von über $21 \text{ }^\circ\text{C}$.

2 Aquifergeometrien

Eine Kenntnis der Aquifer-Geometrien erlaubt Rückschlüsse auf die Speichereigenschaften der untersuchten Grundwasserleiter. Die Fläche der untersuchten Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Stadt beträgt ca. 22 km², der Umfang ca. 23 km und das Gesamtvolumen der Lockergesteine ca. 353 ha³. Die urban geprägten Bereiche des Kantons Basel-Stadt wurden für das Erstellen der Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodelle in vier Gebiete unterteilt (Abb. A1.1). Auf Grundlage der modellierten Grundwassergleichen für den Zeitraum von 2010 bis 2015 konnten minimale, mittlere und hohe Grundwasserstände abgeleitet werden. Dabei beziehen sich die Daten auf die absoluten Minima und Maxima für das gesamte Modellgebiet während des modellierten Zeitraumes. Zusammen mit der Fels- und Geländeoberfläche konnten die Geometrien der grundwassergesättigten und -ungesättigten Lockergesteinsablagerungen beschrieben werden (Tab. A1.1). Die Grundwassermächtigkeit in den Lockergesteinen variiert, in Abhängigkeit der hydrologischen Randbedingungen, zwischen 0 und 18.8 m. Das Volumen der grundwassergesättigten Zone liegt bei niedrigen, mittleren und hohen Grundwasserständen bei ca. 100, 120 und 140 ha³. Das Volumen der grundwasserungesättigten Zone ist im Vergleich zum Volumen der gesättigten Zone ca. doppelt so gross, wobei der Flurabstand zwischen 0 und fast 25 m variiert.

Tab. A1.1: Aquifergeometrien der Lockergesteins-Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Stadt.

		Mächtigkeit			Volumen gesättigte Zone		Volumen ungesättigte Zone		Flurabstand		
		Mittel	Minimum	Maximum	[m ³]	[ha ³]	[m ³]	[ha ³]	Anteil an Gesamtfläche GW-Bereich [%]		
		[m]							[0 -1 m]	[1 -10 m]	[10 -50 m]
Gesamt	MW	5.3	0.0	16.4	1.2E+08	1.2E+02	2.4E+08	2.4E+02	5.4	41.3	53.3
	NW	4.6	0.0	15.3	1.0E+08	1.0E+02	2.2E+08	2.2E+02	5.0	30.5	64.5
	HW	6.2	0.0	18.8	1.4E+08	1.4E+02	2.6E+08	2.6E+02	8.7	39.0	52.3
Kleinhüningen	MW	7.5	2.9	13.8	1.4E+07	1.4E+01	1.0E+07	1.0E+01	7.8	91.5	0.6
	NW	7.0	1.8	12.7	1.3E+07	1.3E+01	8.9E+06	8.9E+00	7.6	90.7	1.8
	HW	4.1	8.3	15.0	1.5E+07	1.5E+01	1.1E+07	1.1E+01	9.1	90.7	0.1
Kleinbasel	MW	7.7	0.0	14.7	4.0E+07	4.0E+01	4.2E+07	4.2E+01	9.6	58.9	31.5
	NW	7.0	0.0	14.2	3.6E+07	3.6E+01	3.7E+07	3.7E+01	9.1	48.6	42.3
	HW	8.8	0.0	15.6	4.6E+07	4.6E+01	4.5E+07	4.5E+01	10.7	71.7	17.6
Grossbasel Süd-Ost	MW	2.1	0.0	10.4	1.4E+07	1.4E+01	7.2E+07	7.2E+01	3.0	36.9	60.1
	NW	1.7	0.0	10.0	1.1E+07	1.1E+01	6.2E+07	6.2E+01	2.3	30.8	66.9
	HW	3.5	0.0	18.8	2.3E+07	2.3E+01	7.6E+07	7.6E+01	12.7	32.7	54.6
Grossbasel Nord-West	MW	5.8	0.0	16.4	4.8E+07	4.8E+01	1.2E+08	1.2E+02	2.7	8.9	88.4
	NW	5.0	0.0	15.3	4.1E+07	4.1E+01	1.2E+08	1.2E+02	2.7	6.1	91.2
	HW	6.3	0.0	16.9	5.2E+07	5.2E+01	1.3E+08	1.3E+02	3.3	12.3	84.4

In Abhängigkeit der hydrologischen Randbedingungen liegt für lediglich ca. 5 bis 9 % der Fläche der Lockergesteins-Grundwasservorkommen der Flurabstand zwischen 0 bis 1 m (Tab. A1.1, Abb. A1.5). Für einen Flächenanteil von ca. 30 bis 42 % liegt der Flurabstand zwischen 1 und 10 m und für einen Flächenanteil von ca. 52 bis 65 % ist der Flurabstand grösser 10 m. Somit dominieren, vor allem für Bereiche linksseitig des Rheins, Flurabstände von über 10 m, Tiefen, für welche weder tägliche noch saisonale Temperaturschwankungen der Lufttemperaturen eine Rolle spielen. Zu berücksichtigen ist, dass hier der tägliche und saisonale vertikale thermische Einfluss über die ungesättigte Zone beschrieben werden. Durch den advektiven Grundwassertransport können jedoch auch thermische (tägliche und saisonale) Signale aus anderen Bereichen des Grundwasservorkommens lokale thermische Grundwasserregime beeinflussen.

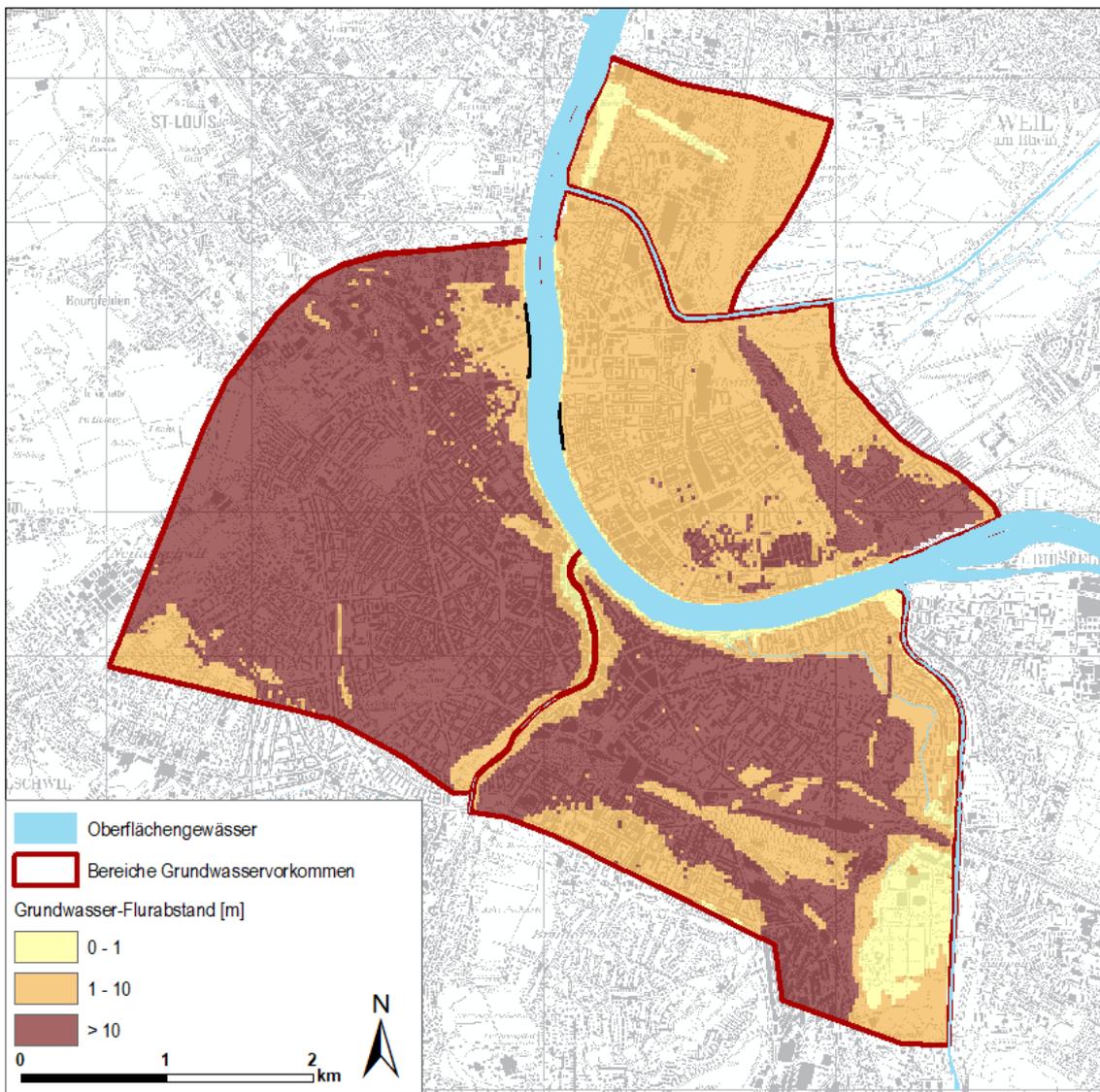


Abb. A1.5: Grundwasser-Flurabstand der Lockergesteins-Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Stadt.

3 Fließwege, -zeiten und -geschwindigkeiten im Grundwasser

Auf Grundlage der Grundwasserströmungsmodelle konnten für den Kanton Basel-Stadt Fließwege und -zeiten, als auch -geschwindigkeiten abgeleitet werden. Die Auswahl der Fließspfade durch die jeweiligen Lockergesteins-Grundwasservorkommen wurde so vorgenommen, dass lediglich Fließspfade welche den vollständigen Fließweg vom regionalen Rand bis zum Vorfluter Rhein (oder für Grossbasel Südost die Birs) zurücklegen, ausgewählt wurden. Nicht eindeutige Fließspfade oder solche, welche bei einem Grundwassernutzer enden wurden für die weitere Auswertung nicht verwendet. Die Retardation von thermischen Signalen, in Relation zum Wassertransport im Untergrund, liegt in Basel bei Werten zwischen 1.3 bis 3.6 (Epting et al., 2017).

Tabelle A1.2 und Abbildung A1.6 stellen die Schwankungsbereiche und die zusammenfassende Statistik der Fließwege, -zeiten und -geschwindigkeiten für die vier untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Stadt dar. Abbildung A1.6 zeigt zudem die Verteilung der abgeleiteten Fließzeiten für die vier verschiedenen Bereiche als Histogramme, einschliesslich Häufigkeiten in den verschiedenen Klassenbereichen und kumulierte Häufigkeiten.

Tab. A1.2: Zusammenfassende Statistik der Fließwege, -zeiten und -geschwindigkeiten für die vier untersuchten Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Stadt.

	Fließweg			Fließzeit			Fließgeschwindigkeit		
	Mittel	Minimum	Maximum	Mittel	Minimum	Maximum	Mittel	Minimum	Maximum
	[m]			[d]			[m d ⁻¹]		
Gesamt	1745	196	4488	359.4	2.2	1844.6	20.1	1.0	110.8
Kleinhüningen	1641	1584	1766	162.7	92.4	361.8	11.5	4.6	17.4
Kleinbasel	618	196	2149	41.7	2.2	306.4	56.8	7.0	110.8
Grossbasel Süd-Ost	1682	751	3035	658.7	48.9	1710.5	4.8	1.0	15.4
Grossbasel Nord-West	2787	2113	4488	587.2	303.0	1844.6	6.0	2.4	8.5

Für das Lockergesteins-Grundwasservorkommen in Kleinhüningen liegen die Fließwege, im Mittel bei 1.6 und maximal bei 1.8 km, Fließzeiten betragen im Mittel 163 und maximal 362 d, Fließgeschwindigkeiten betragen im Mittel 12 und maximal 17 m d⁻¹. Im Vergleich zu den anderen Grundwasservorkommen sind die Schwankungen dieser Parameter klein, was auch darin begründet liegt, dass die Grundwasserdurchströmung dieses Bereichs vergleichsweise homogen ist (Abb. A1.6).

Für das Lockergesteins-Grundwasservorkommen in Kleinbasel liegen die Fließwege, im Mittel bei 0.6 und maximal bei 2.1 km, Fließzeiten betragen im Mittel 42 und maximal 306 d und Fließgeschwindigkeiten betragen im Mittel 57 und maximal 111 m d⁻¹. Im Vergleich zu den anderen Grundwasservorkommen sind die Schwankungen der Fließwege und -zeiten klein, was auch darin begründet liegt, dass die Grundwasserdurchströmung des südöstlichen Bereichs durch vergleichsweise kurze Fließwege charakterisiert ist (Abb. A1.6). Die Fließgeschwindigkeiten für dieses Lockergesteins-Grundwasservorkommen sind vergleichsweise hoch, was auf den Effekt des Rheinaufstaus (hohe hydraulische Gradienten) beim Flusskraftwerk Birsfelden zurückzuführen ist.

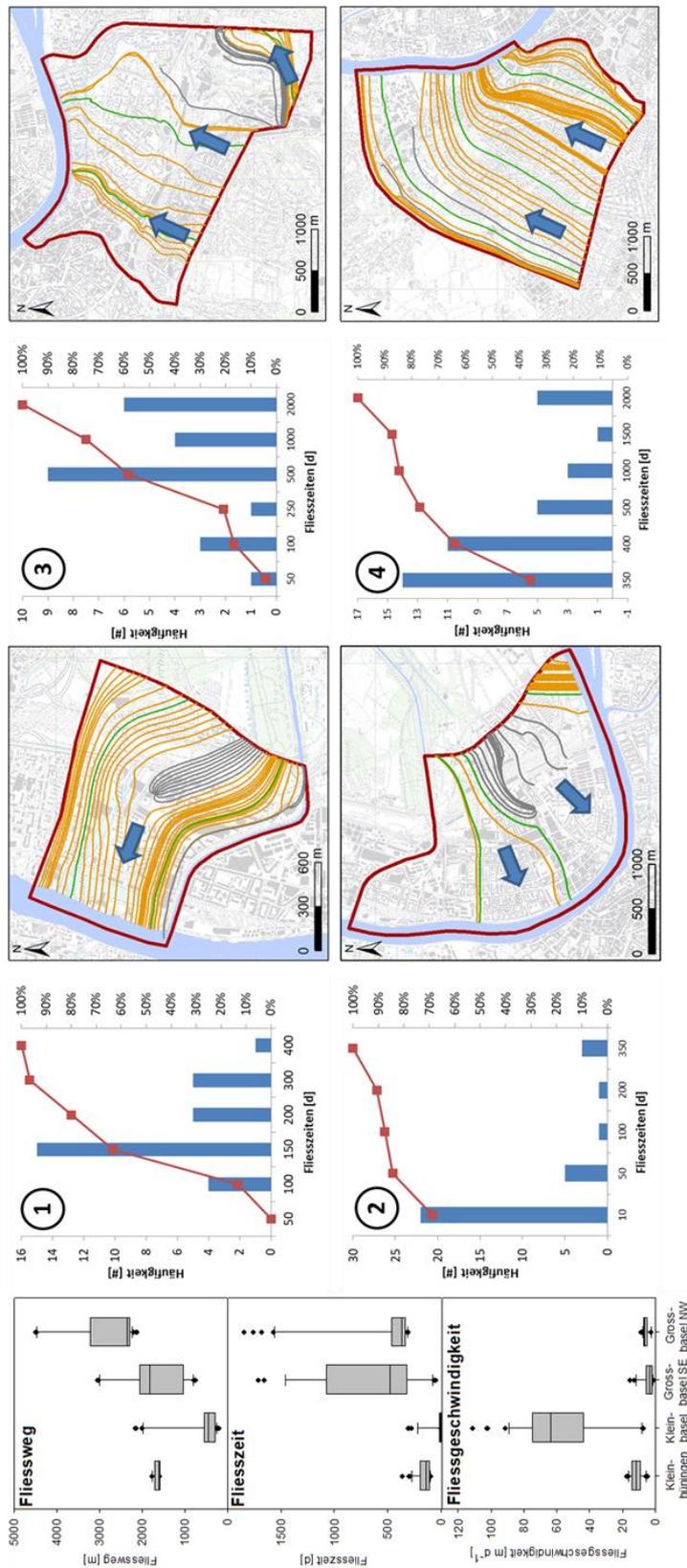


Abb. A1.6: Auswertungen für die vier untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Stadt. Jeweils Links: Schwankungsbereiche der Fließwege, -zeiten sowie -geschwindigkeiten Bereiche (Statistik Fließdistanzen siehe Tab. A1.2). Jeweils Mitte: Histogramme der abgeleiteten Fließzeiten (Häufigkeiten in den Klassenbereichen mit unterschiedlichen y-Achsen) und kumulierte Häufigkeiten beziehen sich alle auf die y-Achse rechts (0-100 %). Jeweils rechts: Fließspfade (grün: Auswahl).

Für das Lockergesteins-Grundwasservorkommen in Grossbasel Süd-Ost liegen die Fliesswege im Mittel bei 1.7 und maximal bei 3 km, Fliesszeiten betragen im Mittel 659 und maximal 1'711 d und Fliessgeschwindigkeiten betragen im Mittel 5 und maximal 15 m d⁻¹. Im Vergleich zu den anderen Lockergesteins-Grundwasservorkommen sind die Schwankungen der Fliesswege und -zeiten gross, was darin begründet liegt, dass die Grundwasserdurchströmung des südöstlichen Bereichs durch vergleichsweise kurze Fliesswege zur Birs charakterisiert ist (Abb. A1.6). Die Fliessgeschwindigkeiten für dieses Grundwasservorkommen sind vergleichsweise klein was auf geringe hydraulische Gradienten (mit teilweise trockenfallenden Bereichen) zurückzuführen ist.

Für das Lockergesteins-Grundwasservorkommen in Grossbasel Nord-West liegen die Fliesswege, im Mittel bei 2.8 und maximal bei 4.5 km, Fliesszeiten betragen im Mittel 587 und maximal 1'845 d und Fliessgeschwindigkeiten betragen im Mittel bei 6 und maximal 8.5 m d⁻¹. Im Vergleich zu den anderen Lockergesteins-Grundwasservorkommen sind die Schwankungen der Fliesswege und -zeiten gross, was darin begründet liegt, dass die Grundwasserdurchströmung von Bereichen hinter der Hafenspundwand im Industrieareal St. Johann vergleichsweise klein ist (Abb. A1.6). Aus demselben Grund sind die Fliessgeschwindigkeiten für dieses Lockergesteins-Grundwasservorkommen auch vergleichsweise klein.

4 Grundwasserneubildung, Temperaturentwicklung und Energiebilanzen

Für den Kanton Basel-Stadt kann für die Evaluation der verschiedenen Grundwasserneubildungskomponenten auf kalibrierte und validierte Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodelle zurückgegriffen werden (Huggenberger et al., 2017). Für die Erstellung der Modelle wurde der urban geprägte Bereich des Kantons in vier Teilgebiete unterteilt (Abb. A1.1). Die Implementierung der Randbedingungen der einzelnen Teilgebiete orientiert sich am Vorgehen, welches in Epting et al. (2013) beschrieben ist. Die gewählten Grenzen der jeweiligen Teilgebiete basieren auf natürlichen hydrologischen Grenzen (den Fliessgewässern Rhein, Wiese, Birs und Birsig), hydrogeologische Begrenzungen der grundwassergesättigten Lockergesteine oder verlaufen parallel bzw. senkrecht zu Grundwassergleichen. Das gewählte Vorgehen ermöglicht eine Definition von hydraulischen und thermischen eindeutigen Randbedingungen, da an diesen Rändern Messdaten zu Grundwasserspiegeln, Wasserständen in den Fliessgewässern und den jeweiligen Temperaturen vorliegen. Die für die Modellierung verwendete Software FEFLOW® (Diersch, 2013) beruht auf der Methode der Finiten Elemente. Die Simulationssoftware ermöglicht eine gekoppelte Simulation der Grundwasserströmung sowie des konduktiven und advektiven Wärmetransports.

Temperaturen, Grundwasser- und Energiebilanzen

Abbildung A1.7 zeigt die Wasserbilanzen, einschliesslich Mittelwert und Variabilität der verschiedenen Randbedingungen in den vier Modellgebieten. Aufgrund der hydrogeologischen Randbedingungen der betrachteten Teilgebiete war es nicht notwendig einen Zustrom über seitliche Hängeinzugsgebiete zu berücksichtigen, somit fällt diese Grundwasserneubildungskomponente für die folgenden Auswertungen weg. Abbildung A1.5 zeigt die Wärmebilanzen, einschliesslich Mittelwert und Variabilität über die verschiedenen Randbedingungen in den vier Modellgebieten.

Teilgebiet Kleinhüningen

Im Teilgebiet Kleinhüningen betragen die mittleren simulierten Grundwassertemperaturen für das Referenzjahr 2014 am 1. Januar 14.1 ± 1.1 °C und am 1. Juli 13.7 ± 1.2 °C. In der ungesättigten Zone betragen die mittleren simulierten Temperaturen für das Referenzjahr 2014 am 1. Januar 14.0 ± 1.6 °C und am 1. Juli 15.8 ± 2.4 °C. Die saisonalen Unterschiede sind im Teilgebiet Kleinhüningen in der ungesättigten Zone erwartungsgemäss grösser als im Grundwasser. Durch die versiegelten Flächen und Bauwerke im Untergrund kommt es im Sommer zu einer relativ starken Temperaturerhöhung in der ungesättigten Zone (siehe auch Abb. A1.4).

Dem Teilgebiet Kleinhüningen strömen pro Tag während den Jahren 2010 bis 2015 etwa 12'000 bis 20'000 m³ Grundwasser zu (Abb. A1.7). Über den Rhein exfiltriert 10'000 bis 15'000 m³ Grundwasser pro Tag aus dem Aquifer in das Oberflächengewässer. Der Fluss Wiese infiltriert mit etwa 2'500 bis 5'000 m³ pro Tag in den Aquifer. Die Grundwasserentnahmen variieren zwischen 5'000 bis fast 10'000 m³ pro Tag, während die Wasserrückgaben in den Aquifer vernachlässigbar sind. Die Grundwasserentnahme beträgt damit zeitweise fast 50 % des aus dem Nord-Osten regional zuströmenden Grundwassers und spielt somit für die Grundwasserbilanz des Teilgebiets Kleinhüningen eine wesentliche Rolle. Die Grundwasserneubildung durch flächig versickerndes Niederschlagswasser ist, im Vergleich zu den anderen Randbedingungen, vernachlässigbar.

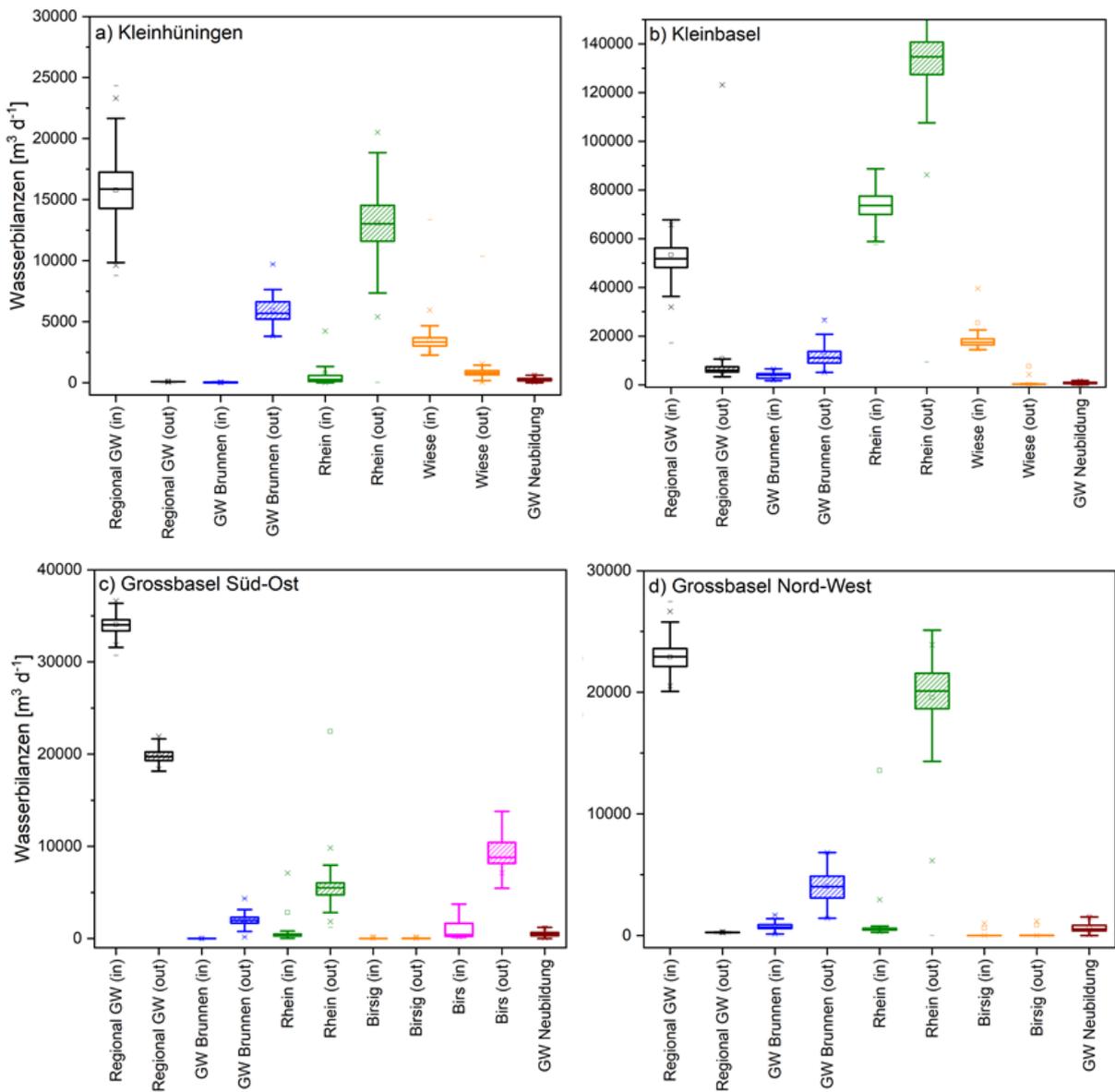


Abb. A1.7: Box Plots der berechneten Wasserbilanzen (Zu- und Abfluss) für die vier untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Stadt.

Der regionale Wärmestrom über die nordöstliche Grenze des Teilgebiets Kleinhüningen schwankt saisonal mit einem Maximum im Spätherbst und beträgt bis zu etwa 5 MW (Abb. A.1.8). Der Austausch über die Fließgewässer Rhein und Wiese variiert saisonal zwischen etwa 0.5 bis 4 MW. Über die Grundwasserentnahmen werden dem Grundwasser zwischen 1 bis 2 MW Wärme entzogen. Über die Gebäude werden dem Untergrund 1 bis 2 MW Wärme zugeführt. Die anthropogenen Wärmeströme sind damit vergleichsweise höher als die natürlichen Wärmeströme. Über die meist versiegelten Oberflächen werden dem Gebiet im Sommer ausserdem bis zu 15 MW Wärme zugeführt, während der Wärmeaustrag im Winter lediglich 5 MW beträgt.

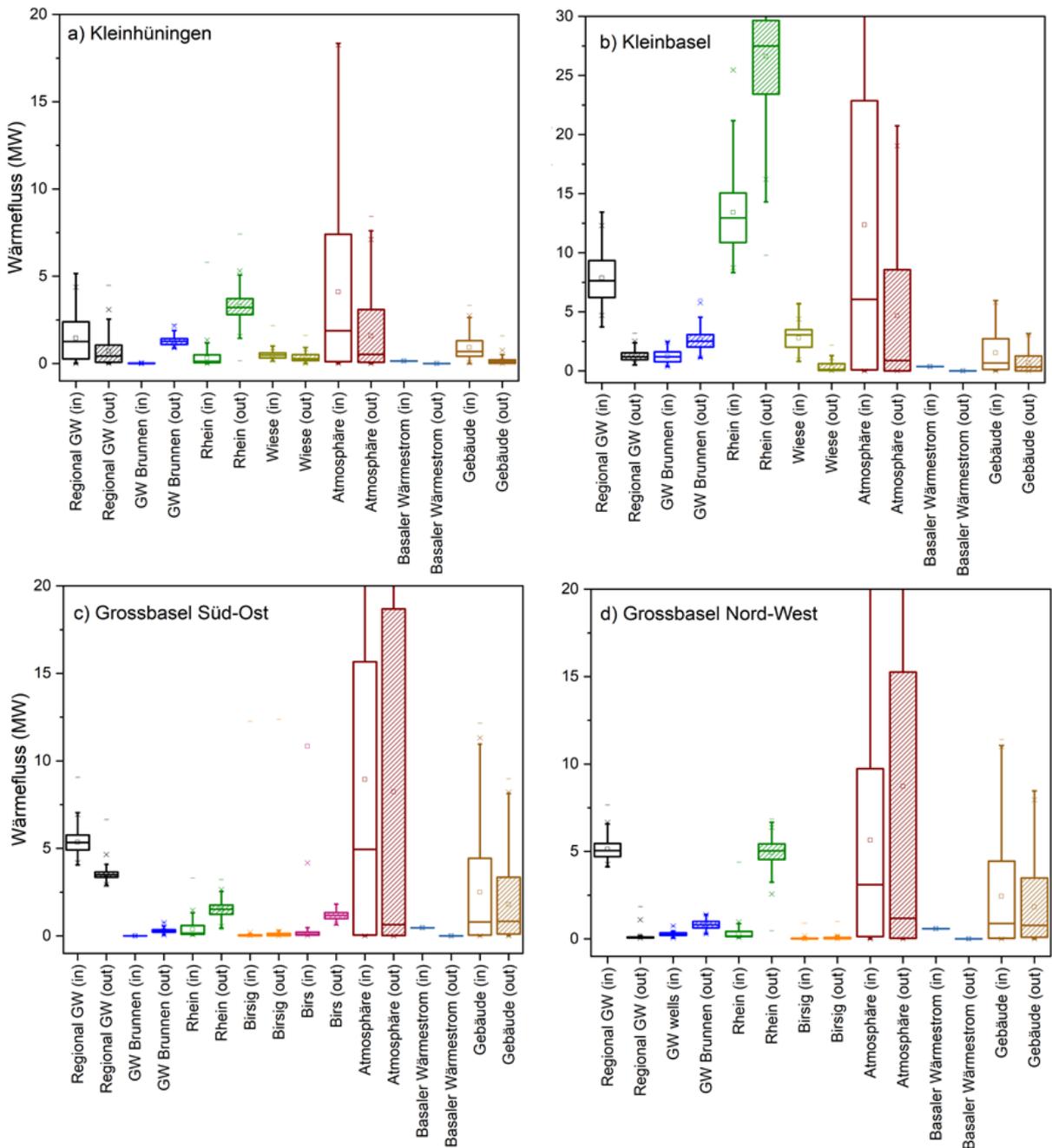


Abb. A1.8: Box Plots der berechneten Wärmeflüsse (Zu- und Abfluss) für die vier untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen (verändert nach Mueller et al. (2018)).

Teilgebiet Kleinbasel

Im Teilgebiet Kleinbasel betragen die mittleren simulierten Grundwassertemperaturen für das Referenzjahr 2014 am 1. Januar 14.4 ± 1.8 °C und am 1. Juli 14.3 ± 1.7 °C. Die höchsten Temperaturen (bis 19.6 °C) können im Westen nahe dem Rhein beobachtet werden. Vergleichsweise niedrige Temperaturen werden im Bereich einer Grundwasserrückgabe und nahe der Wiese simuliert. In der grundwasserungesättigten Zone betragen die mittleren simulierten Temperaturen für das Referenzjahr 2014 am 1. Januar 14.1 ± 1.9 °C und am 1. Juli 16.1 ± 2.4 °C. Die Unterschiede sind somit im Teilgebiet Kleinbasel in der grundwasserungesättigten Zone grösser als im Grundwasser, was bedeutet, dass die saisonalen Temperaturschwankungen erwartungsgemäss mit der Tiefe abnehmen. In der grundwasserungesättigten Zone ist der thermische Einfluss (kühlender Effekt) von Grünflächen im Sommer deutlich zu erkennen (beispielsweise im nord-östlichen Bereich im Tierpark „Lange Erlen“). Auch urbane

Parkanlagen (z.B. Horburgpark) weisen im Vergleich zu versiegelten Flächen etwas geringere Temperaturen auf. Eine Versiegelung von Flächen führt zu einer starken Temperaturerhöhung des oberflächennahen Untergrundes.

Dem Teilgebiet Kleinbasel strömen pro Tag während den Jahren 2010 bis 2015 etwa 50'000 m³ Grundwasser über den regionalen Grundwasserstrom zu (Abb. A1.7). Der Rhein ist Vorfluter des Gebiets und der Grundwasseraustausch beträgt in der Bilanz (Eintrag minus Austrag) etwa 75'000 m³ pro Tag. Im Bereich des Flusskraftwerkes Birsfelden wird der Rhein aufgestaut, wodurch sich ein starker Gradient ergibt und Flusswasser in den Aquifer infiltriert. Stromabwärts exfiltriert Grundwasser in den Rhein. Die Wiese infiltriert mit etwa 15'000 bis 20'000 m³ pro Tag in den Aquifer. Die Grundwasserentnahmen liegen im Bereich von 10'000 bis 20'000 m³ pro Tag, während die Wasserrückgaben in den Aquifer bei lediglich etwa 5'000 m³ pro Tag liegen. Die Grundwasserentnahme beträgt etwa 20 % des regional zuströmenden Grundwassers und spielt somit für die Grundwasserbilanz des Systems eine wichtige Rolle. Die Grundwasserneubildung durch flächig versickerndes Niederschlagswasser ist, im Vergleich zu den anderen Randbedingungen, vernachlässigbar.

Durch den regionalen Grundwasserstrom wird dem Gebiet Kleinbasel etwa 5 bis 15 MW Wärme zugeführt (Abb. A1.8). Der Wärmestrom über die Oberfläche kann im Sommerhalbjahr bis auf 40 MW ansteigen, während im Winterhalbjahr der Wärmeaustrag bei etwa 20 MW liegt. Durch Grundwasserentnahmen werden dem Aquifer zwischen 2.5 bis 5 MW Wärme entzogen, während durch Grundwasserrückgaben dem Aquifer bis maximal 2.5 MW Wärme zugeführt werden. Der Wärmeeintrag durch die im Modell berücksichtigten Gebäude beträgt in den Heizperioden und im Sommer etwa 5 MW, während im Frühjahr und Herbst dem Untergrund bis zu 2.5 MW Wärme entzogen werden.

Teilgebiet Grossbasel Süd-Ost

Im Teilgebiet Grossbasel Süd-Ost betragen die mittleren simulierten Grundwassertemperaturen für das Referenzjahr 2014 am 1. Januar 14.5 ± 1.0 °C und am 1. Juli 14.3 ± 1.0 °C. Die höchsten Temperaturen (bis 16.5 °C) treten im westlichen Bereich auf, in welchem Bauwerke bis in das Grundwasser oder den Grundwasserstauer reichen. In der grundwasserungesättigten Zone betragen die mittleren simulierten Temperaturen für das Referenzjahr 2014 am 1. Januar 13.0 ± 1.5 °C und am 1. Juli 16.4 ± 1.0 °C. Im Bereich der Grünflächen und der Gleisareale betragen die Temperaturen etwa 3 bis 5 K weniger als unter versiegelten Flächen. Die saisonalen Unterschiede sind im Teilgebiet Grossbasel Süd-Ost in der grundwasserungesättigten Zone wie zu erwarten grösser als im Grundwasser.

Dem Teilgebiet Grossbasel Süd-Ost strömen pro Tag während den Jahren 2010 bis 2015 etwa 15'000 m³ Grundwasser über den regionalen Grundwasserstrom zu (Abb. A1.7). Die Fliessgewässer Rhein und Birs sind Vorfluter des Gebiets und der Grundwasseraustausch beträgt jeweils etwa 5'000 bis 10'000 m³ pro Tag. Der Austausch mit dem stark verbauten Birsig ist erwartungsgemäss sehr klein. Die Grundwasserentnahmen erreichen Entnahmeraten von bis zu 4'000 m³ pro Tag (im Mittel etwa 2'000 m³ pro Tag), während keine Wasserrückgabe in den Aquifer stattfindet. Die Grundwasserentnahme beträgt somit im Mittel etwa 13 % des regional zuströmenden Grundwassers. Die Grundwasserneubildung durch flächig versickerndes Niederschlagswasser ist, im Vergleich zu den anderen Randbedingungen, vernachlässigbar.

Durch den regionalen Grundwasserstrom wird dem Gebiet Grossbasel Süd-Ost etwa 2.5 MW Wärme zugeführt (Abb. A1.8). Durch Grundwasserentnahmen werden dem Aquifer etwa 0.25 bis 0.75 MW Wärme entzogen und über die Fliessgewässer etwa 1 bis 2 MW Wärme ausgetauscht. Der Wärmeaustausch über den stark verbauten Birsig (bis etwa 0.25 MW) ist deutlich geringer als derjenige über den Rhein und die Birs mit Werten bis 2 MW. Der Wärmeeintrag über die Oberfläche beträgt 30 MW, der Wärmeaustrag bis zu 30 MW. Der Wärmeeintrag durch die im Modell berücksichtigten Gebäude beträgt in den Heizperioden und im Sommer bis zu 10 MW, während im Frühjahr und Herbst dem Untergrund bis zu 5 MW entzogen wer-

den. Somit sind anthropogen verursachte Wärmeeinträge über die Gebäude und die versiegelten Oberflächen teilweise höher als die natürlichen Wärmeströme (z.B. über die Fließgewässer).

Teilgebiet Grossbasel Nord-West

Im Teilgebiet Grossbasel Nord-West betragen die mittleren simulierten Grundwassertemperaturen für das Referenzjahr 2014 am 1. Januar 14.3 ± 0.8 °C und am 1. Juli 14.2 ± 0.8 °C. Die höchsten Temperaturen (bis 19.6 °C) treten in den östlichen durch Industrie geprägten Bereichen nahe dem Rhein auf, in denen eine Vielzahl von Bauwerken bis in das Grundwasser oder den Grundwasserstauer reichen. Ausserdem werden im Bereich von Kühlwassereinspeisungen vergleichsweise hohe Temperaturen festgestellt. Im nord-westlichen Bereich zum Beispiel ist eine Wärmefahne mit Temperaturen um etwa 15.3 bis 16.7 °C zu erkennen. In der grundwasserungesättigten Zone bis etwa 2 m Tiefe betragen die mittleren simulierten Temperaturen für das Referenzjahr 2014 am 1. Januar 12.8 ± 2.6 °C und am 1. Juli 14.7 ± 2.3 °C. Die saisonalen Unterschiede sind somit im Teilgebiet Grossbasel Nord-West in der grundwasserungesättigten Zone, wie zu erwarten, grösser als im Grundwasser.

Dem Teilgebiet Grossbasel Nord-West strömen pro Tag während den Jahren 2010 bis 2015 etwa 20'000 bis 25'000 m³ Grundwasser über den regionalen Grundwasserstrom zu (Abb. A1.7). Der Rhein ist Vorfluter des Gebiets und der Grundwasseraustausch beträgt etwa 15'000 bis 25'000 m³ pro Tag. Die Grundwasserentnahmen erreichen Entnahmeraten von bis zu etwa 6'000 m³ pro Tag, während die Wasserrückgaben in den Aquifer nur bei etwa 1'000 m³ pro Tag liegen. Die Grundwasserentnahme beträgt damit etwa 20 % des regional zuströmenden Grundwassers und spielt somit für die Grundwasserbilanz des Systems eine wichtige Rolle. Die Grundwasserneubildung durch flächig versickerndes Niederschlagswasser und der Austausch mit dem Birsig, der sehr stark verbaut ist, sind im Vergleich zu den anderen Randbedingungen vernachlässigbar.

Durch den regionalen Grundwasserstrom wird dem Gebiet Grossbasel Nord-West etwa 5 bis 8 MW Wärme zugeführt (Abb. A1.8). Der Wärmeeintrag über die Oberfläche beträgt 20 MW der Wärmeartrag bis zu 40 MW. Durch Grundwasserentnahmen werden etwa 1 MW Wärme entzogen, während etwa 0.25 bis 0.5 MW Wärme in den Aquifer durch Grundwasserrückgaben zugeführt werden. Der Wärmeeintrag durch die im Modell berücksichtigten Gebäude beträgt in den Heizperioden und im Sommer etwa 10 MW, während im Frühjahr und Herbst dem Untergrund bis zu 5 MW Wärme entzogen werden. Insgesamt sind die berechneten Wärmebilanzen im Teilgebiet Grossbasel Nord-West nahezu ausgeglichen.

Vergleich der Teilgebiete

Der Grundwasserzustrom über die regionale Grundwasserströmung der untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen liegt bei etwa 16'000 bis 53'000 m³ d⁻¹. Ein relevanter regionaler Grundwasserabstrom findet lediglich für Grossbasel Süd-Ost mit ca. 20'000 m³ d⁻¹ statt.

Die Wasserbilanzen (Abb. A1.7), die durch Entnahme von Grundwasser resultieren liegen bei ca. 2'000 bis 12'000 m³ d⁻¹, jene, die durch Rückgabe von genutztem Grundwasser bei 0 bis ca. 4'000 m³ d⁻¹. Der Austausch über das Oberflächengewässer Rhein, welches für alle vier untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen eine Modellgrenze bildet, liegt bei 270 bis 135'000 m³ d⁻¹, wobei die Grundwasserexfiltration in den Vorfluter Rhein dominiert. In Kleinbasel und Kleinhüningen dominiert die Fließgewässerinfiltration von Wiesewasser in den Grundwasserleiter mit bis zu 25'000 m³ d⁻¹. In Grossbasel Süd-Ost ist der Austausch über das Oberflächengewässer Birs relevant als über den Rhein und liegt bei 400 bis 8'000 m³ d⁻¹. Der Austausch über das stark verbaute Oberflächengewässer Birsig und die Grundwasserneubildung sind mit lediglich 260 bis 730 m³ d⁻¹ für die Gesamtwasserbilanz vernachlässigbar.

Eine Normalisierung der Wasserbilanzen erlaubt es den relativen Beitrag der verschiedenen Wasserbilanzen in den vier untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen zu vergleichen (Tab. A1.3). Die Normierung erfolgte über die Länge der Oberflächengewässer und regionalen Randbedingungen sowie der Erdoberfläche. Der normierte Zustrom über die regionale Grundwasserströmung liegt für alle vier Teilgebiete in der gleichen Grössenordnung, für Kleinbasel ist dieser jedoch mehr als doppelt so gross (Effekt des Rheinaufstaus beim Flusskraftwerk Birsfelden). Der regionale normierte Abstrom ist lediglich für Kleinbasel und vor allem Grossbasel Süd-Ost relevant. Der Austausch mit dem Rhein ist am grössten für Kleinbasel. Wie bereits oben beschrieben ist für Grossbasel Süd-Ost der Austausch über das Oberflächengewässer Birs relevanter als über den Rhein. Der normierte Austausch über das stark verbaute Oberflächengewässer Birsig und die Grundwasserneubildung sind für die Gesamtwasserbilanz vernachlässigbar.

Tab. A1.3: Simulierte normierte Wasserbilanzen über die Modellgrenzen der untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Stadt für den Zeitraum 2010 bis 2015.

	Kleinhüningen	Kleinbasel	Grossbasel Süd-Ost	Grossbasel Nord-West
Regionales GW (in) [m ³ d ⁻¹]	15782	53347	34049	22907
Regional GW (out) [m ³ d ⁻¹]	88	10710	19930	255
Rhein (in) [m ³ d ⁻¹]	752	3735600	2800	13573
Rhein (out) [m ³ d ⁻¹]	13086	609344	22456	19567
Birs (in) [m ³ d ⁻¹]	-	-	1026860	-
Birs (out) [m ³ d ⁻¹]	-	-	1051170	-
Wiese (in) [m ³ d ⁻¹]	3440	25402	-	-
Wiese (out) [m ³ d ⁻¹]	831	7588	-	-
Birsig (in) [m ³ d ⁻¹]	-	-	93	605
Birsig (out) [m ³ d ⁻¹]	-	-	102	869
GW-Neubildung (in) [m ³ d ⁻¹]	261	733	485	598

Der Wärmeaustausch über die Erdoberfläche, welcher die thermische Wechselwirkung mit der Atmosphäre darstellt, ist vergleichsweise gross, gleicht sich aber über das Jahr aus. Der Wärmeeintrag über die regionale Grundwasserströmung der untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen liegt bei etwa 2 bis 5 MW. Der Wärmeaustausch über das Oberflächengewässer Rhein, ist am grössten für das Teilgebiet Kleinbasel (ca. 8 bis 25 MW). Die Wärmeflüsse, die durch Entnahme und Rückgabe von thermisch genutzten, Grundwasser resultieren können bis zu 5 MW betragen. Wärmeeinträge von Gebäuden erreichen bis zu 10 MW. Der Wärmefluss durch den geothermischen Tiefengradient ist im Untersuchungsgebiet vernachlässigbar.

Wie schon aus den Wasserbilanzen ersichtlich spielt quantitativ die Fluss-Grundwasser Interaktion und vor allem die Exfiltration von Grundwasser in das Oberflächengewässer Rhein eine wichtige Rolle. Am grössten ist dieser für Kleinbasel, für das Grundwasservorkommen Grossbasel Süd-Ost ist der Austausch über das Oberflächengewässer Birs relevanter als jener über den Rhein. Der Wärmeaustausch über das Oberflächengewässer Rhein ist am grössten für das Teilgebiet Kleinbasel.

Eine Normalisierung der Wärmeströme erlaubt es den relativen Beitrag der verschiedenen Wärmeströme zu vergleichen (Tab. A1.4). Die Normierung erfolgte über die Länge der Oberflächengewässer und regionalen Randbedingungen sowie der Erdoberfläche und Flächen der Untergrundstrukturen. Der Vergleich zeigt, dass in Kleinbasel der regionale Wärmefluss und derjenige über den Rhein im Vergleich zu den anderen Grundwasservorkommen höher ist.

Tab. A1.4: Simulierte normierte Wärmeströme über die Modellgrenzen der untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Stadt für den Zeitraum 2010 bis 2015.

	Kleinhüningen	Kleinbasel	Grossbasel Süd-Ost	Grossbasel Nord-West
Regionales Grundwasser (in) ($W m^{-1}$)	1.1×10^3	4.0×10^3	1.7×10^3	2.3×10^3
Regional GW (out) ($W m^{-1}$)	5.5×10^2	7.4×10^2	1.1×10^3	6.8×10^1
Rhein (in) ($W m^{-1}$)	4.0×10^2	2.7×10^3	1.7×10^2	1.6×10^2
Rhein (out) ($W m^{-1}$)	4.0×10^3	5.6×10^3	7.6×10^2	2.7×10^3
Birs (in) ($W m^{-1}$)	-	-	1.1×10^3	-
Birs (out) ($W m^{-1}$)	-	-	9.7×10^3	-
Wiese (in) ($W m^{-1}$)	3.4×10^2	1.4×10^3	-	-
Wiese (out) ($W m^{-1}$)	2.3×10^2	1.8×10^2	-	-
Birsig (in) ($W m^{-1}$)	-	-	2.3×10^1	1.6×10^1
Birsig (out) ($W m^{-1}$)	-	-	4.4×10^1	2.6×10^1
Atmosphäre (in) ($W m^{-2}$)	2.6	2.4	1.6	0.8
Atmosphäre (out) ($W m^{-2}$)	0.9	1.2	1.5	1.2
Geothermischer flux (in) ($W m^{-2}$)	0.1	0.1	0.1	0.1
Geothermischer flux (out) ($W m^{-2}$)	0.0	0.0	0.0	0.0
Untergrundstrukturen (in) ($W m^{-2}$)	8.0	7.3	6.0	6.0
Untergrundstrukturen (out) ($W m^{-2}$)	1.3	3.6	4.5	4.5

5 Auswirkungen Klimaänderungen

Für die Evaluation der klimabedingten Veränderung der verschiedenen Grundwasserneubildungskomponenten wurde ein Schwerpunkt auf die im Rahmen von Hydro-CH2018 erarbeitete Klimaprojektion MPI-M-MPI-ESM-LRr1i1p1SMHI-RCA4, einschliesslich der 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), gelegt.

Für das Hydro-CH2018 Teilprojekt „Wassertemperatur von Seen und Flüssen“ werden die Auswirkungen des erwarteten Klimawandels auf die Wassertemperatur abgeleitet. Für die Modellierung sind stündliche Eingabedaten erforderlich, für die CH2018-Szenarien werden jedoch nur tägliche Eingabedaten zur Verfügung gestellt. Im Rahmen des Teilprojektes entwickelte (Michel in prep.) ein Disaggregations-Verfahren welches es ermöglicht Stundenwerte mit einem Tageszyklus zu erzeugen. Die weitergehenden Auswertungen basieren auf diesen angepassten Datensätzen und umfassen die Jahre 2055 und 2085 im Vergleich zum Referenzjahr 2000.

Grundwasserneubildung - Entwicklung der Niederschläge und Temperaturprägung

Abbildung A1.8 zeigt die saisonale Verteilung der Niederschläge und Temperaturen als auch jährlich kumulierte Niederschläge für die Jahre 2000, 2055 und 2085 für den Standort Basel-Binningen (MeteoSwiss BAS 1940) im Kanton Basel-Landschaft (Abb. 4.1.1), welcher auch repräsentativ für das Stadtgebiet von Basel ist. Tabelle A1.5 beschreibt die Saisonalität (gewöhnliches Kalenderjahr) der Niederschlagssummen und Temperaturen.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen für den Standort Basel-Binningen, dass die Niederschläge, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios und des Zeitpunktes, um maximal 3 % abnehmen (RCP26, Jahr 2085) oder 6 % zunehmen (RCP45, Jahr 2055). Somit sind, unter Berücksichtigung des hohen Versiegelungsgrades im urbanen Gebiet von Basel als auch Evapotranspirationsverlusten, nur geringfügige Veränderungen der quantitativen Grundwasserneubildung zu erwarten. Die meisten Niederschläge fallen in den Sommermonaten Juli und August sowie im November. Wohingegen, für die betrachteten Klimaprojektionen die Niederschläge in den Sommermonaten und vor allem im Juli tendenziell abnehmen, nehmen diese im Herbst bis Frühling zu. Dies würde bedeuten, dass die Grundwasserneubildung vermehrt in vergleichsweise „kälteren“ Monaten stattfindet, welche mit einer tendenziellen Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“).

Die Lufttemperaturen nehmen, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios und des Zeitpunktes, um 1 °C (RCP26, Jahr 2085 und RCP45, Jahr 2055) bis maximal 3.5 °C (RCP85, Jahr 2055) zu. Die Veränderungen der Lufttemperaturen werden mit einer Verzögerung die Grundwassertemperaturen beeinflussen.

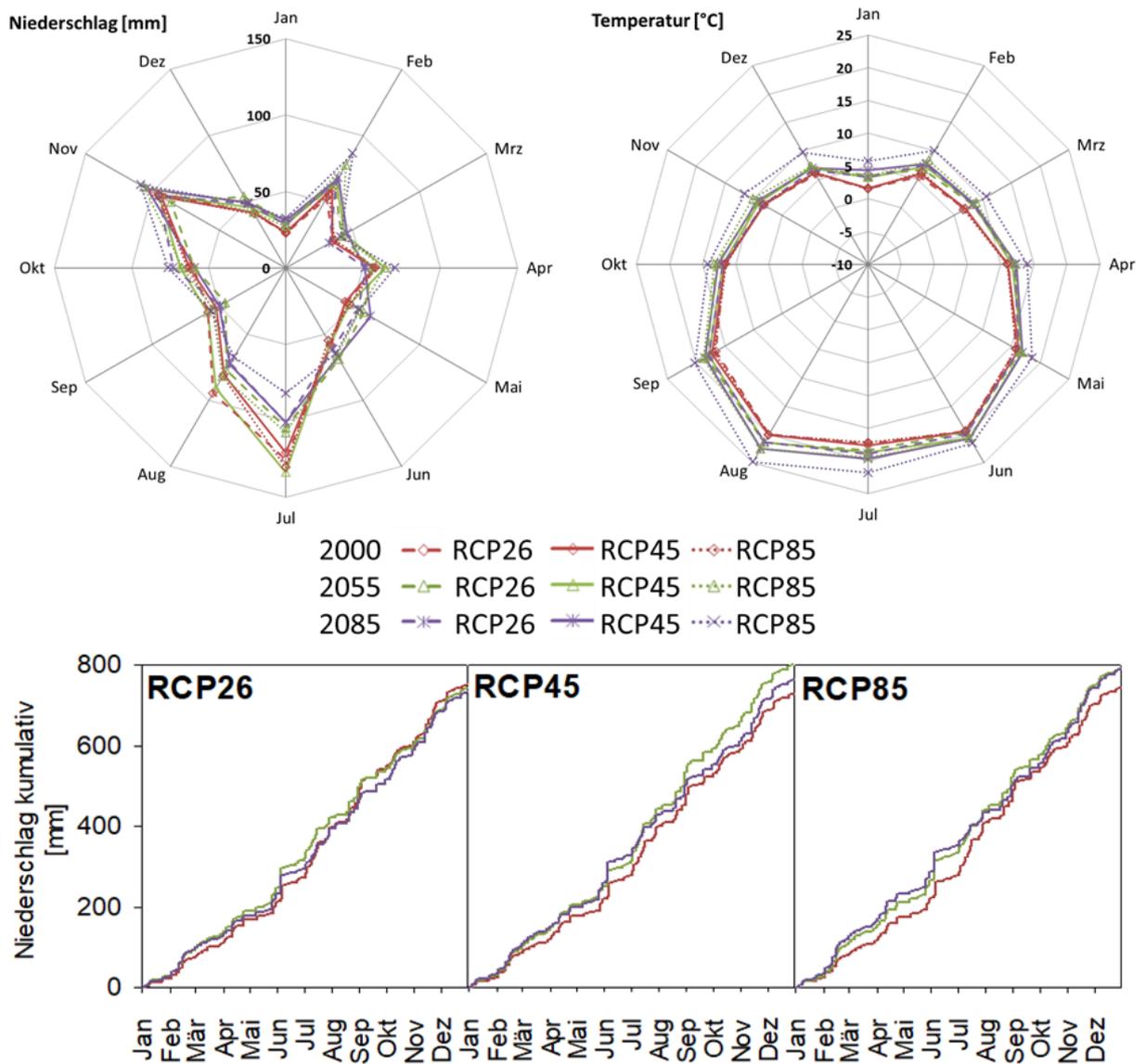


Abb. A1.8: MeteoSchweiz Standort BAS. Oben: Polardarstellung der simulierten monatlichen Niederschlags- und Temperaturverteilung. Unten: kumulierte Niederschlagssummen.

Entwicklung Fließgewässerabfluss und -temperaturen

Wie oben für die Wasserbilanzen beschrieben ist der Rhein im Kantonsgebiet Basel-Stadt vor allem Vorfluter und der dominierende Prozess der Fluss-Grundwasser Interaktion ist die Exfiltration von Grundwasser in das Oberflächengewässer. Nur während Ereignissen mit hohen Abflüssen infiltriert lokal Oberflächenwasser in den Grundwasserleiter.

Bzgl. des Einflusses der Birs sei auf die Auswertungen in Anhang 2 verwiesen. Es ist anzunehmen, dass für die Wiese ähnliche Entwicklungen für den Fließgewässerabfluss und Temperaturen zu erwarten sind wie für die Birs. Der Einfluss der Birsig ist, wie heute schon, vernachlässigbar.

Tab. A1.5: Saisonalität (gewöhnliches Kalenderjahr) der Niederschlagssummen und Temperaturen für den MeteoSchweiz Standort BAS.

		Niederschlagssumme [mm]			Temperaturen [°C]		
		2000	2055	2085	2000	2055	2085
RCP26	MAM	139	156	138	11.3	12.3	12.2
	JJA	278	251	234	18.9	19.8	20.0
	SON	218	191	218	12.2	13.4	12.7
	DJF	117	146	142	4.3	5.8	5.7
	Summe	752	743	733	-	-	-
	Mittel	-	-	-	11.7	12.9	12.7
	Veränderung [%; °C]	-	-1	-3	-	1.2	1.0
RCP45	MAM	137	156	160	11.4	12.3	12.6
	JJA	259	282	241	19.1	20.2	21.0
	SON	208	222	213	12.3	12.9	13.5
	DJF	117	140	148	4.5	5.8	6.3
	Summe	752	800	763	-	-	-
	Mittel	-	-	-	11.8	12.8	13.4
	Veränderung [%; °C]	-	6	1	-	1.0	1.5
RCP85	MAM	143	161	167	11.1	12.6	14.4
	JJA	267	256	214	18.9	20.9	22.7
	SON	213	227	241	12.2	14.1	15.3
	DJF	120	147	168	4.6	6.3	8.4
	Summe	743	791	789	-	-	-
	Mittel	-	-	-	11.7	13.5	15.3
	Veränderung [%; °C]	-	5	5	-	1.7	3.5

Frühling (MAM: März, April und Mai), Sommer (JJA: Juni, Juli und August), Herbst (SON: September, Oktober und November) und Winter (DJF: Dezember, Januar und Februar)

Referenzen

- Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt, 2014. Wegleitung über die Grundwassernutzung im Kanton Basel-Stadt, in: Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt (Ed.), Basel, Switzerland.
- Diersch, H.J., 2013. FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer Berlin Heidelberg.
- Epting, J., García-Gil, A., Huguenberger, P., Vázquez-Suñe, E., Mueller, M.H., 2017. Development of Concepts for the Management of Thermal Resources in Urban Areas – Assessment of Transferability from the Basel (Switzerland) and Zaragoza (Spain) Case Studies. Journal of Hydrology.
- Epting, J., Händel, F., Huguenberger, P., 2013. Thermal management of an unconsolidated shallow urban groundwater body. Hydrology and Earth System Sciences 17, 1851-1869.
- Huguenberger, P., Epting, J., 2011. Urban Geology: Process-Oriented Concepts for Adaptive and Integrated Resource Management. Springer Basel, Basel, Switzerland.
- Huguenberger, P., Epting, J., Mueller, H.M., 2017. Thermische Bewirtschaftungssysteme für den oberflächennahen Untergrund der Region Basel. BFE-Projekt.
- Mueller, M.H., Huguenberger, P., Epting, J., 2018. Combining monitoring and modelling tools as a basis for city-scale concepts for a sustainable thermal management of urban groundwater resources. Science of the Total Environment 627, 1121–1136.

Anhang A2: Lockergesteins-Grundwasservorkommen Kanton Basel-Landschaft

Datengrundlage

- *Datenreihen Grundwasserspiegelhöhen und -temperaturen, Grundwassernutzungen (kantonales Überwachungsprogramm Amt für Umweltschutz und Energie Basel-Landschaft AUE BL)*
- *Wasserstand und -temperaturen Fliessgewässer (BAFU, AUE BL und Tiefbauamt Basel-Landschaft AUE BL TBA BL)*
- *Topografie: DHM25m Bundesamt für Landestopografie swisstopo)*
- *Felsoberfläche (fortlaufende Aktualisierung AUG)*

1 Hydraulischer und thermischer Istzustand

Abbildung A2.1 zeigt die 31 ausgewählten Lockergesteins-Grundwasservorkommen in den Talbereichen entlang der Fließgewässer für den Kanton Basel-Landschaft. Die Grundwasservorkommen liegen in den Niederterrassenschottern und die Kontinuität des Talgrundwasserstroms wird teilweise durch trockenfallende Bereiche und Felsstufen unterbrochen. Dennoch kann eine Verbindung der Grundwasservorkommen über Karst- und/ oder Bruchsysteme bestehen.

Alle Grundlegendaten zu Grundwasser- und Oberflächengewässerdaten können den kantonalen Überwachungsprogrammen des Amtes für Umweltschutz und Energie AUE BL und des Tiefbauamtes BL entnommen werden. Aufgrund der Vielzahl der Grundwasser- und Oberflächengewässerdaten wird hier nicht weiter auf eine Auswertung der Pegel- und Temperaturzeitreihen eingegangen und auf bestehende Arbeiten verwiesen (AUG-BGA-BL-159, AUG-BGA-BL-167, Hydrologische Jahrbücher, etc.).

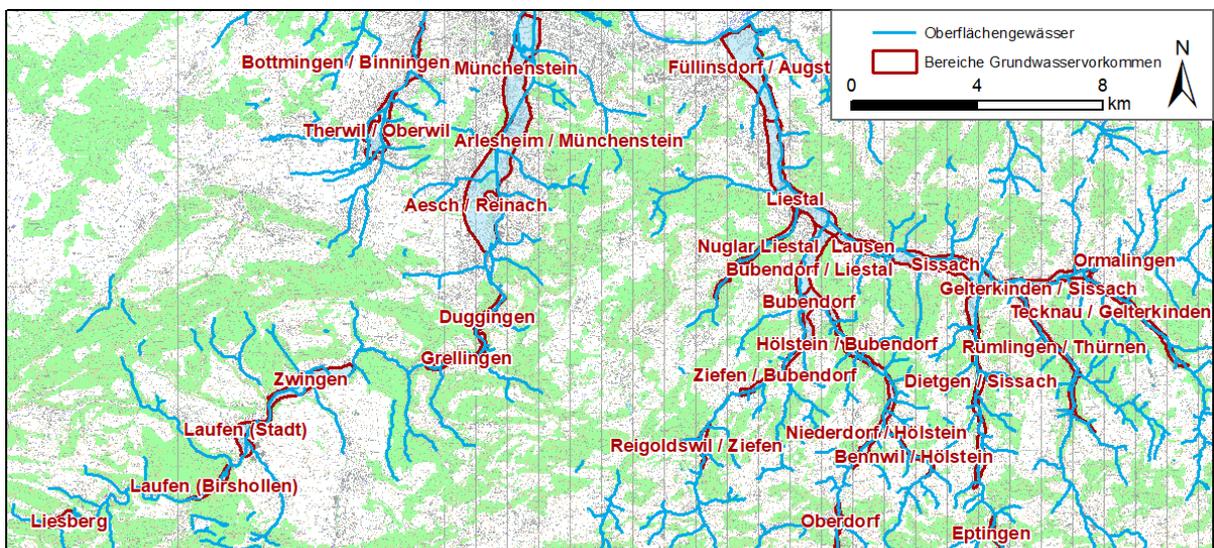


Abb. A2.1: Begrenzung der 31 untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Landschaft.

2 Aquifergeometrien

Eine Kenntnis der Aquifergeometrien erlaubt Rückschlüsse auf die Speichereigenschaften der untersuchten Grundwasserleiter. Auf Grundlage der Grundwassergleichendaten des Kantons für mittlere hydrologische Randbedingungen (AUG-BGA-BL-159, AUG-BGA-BL-167) sowie der Fels- und Geländeoberfläche konnten die Geometrien der gesättigten und ungesättigten Lockergesteinsablagerungen abgeleitet werden (Tab. A2.1).

Die Flächen der 31 untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen betragen zwischen 0.1 und 2.5 km², der Umfang (Begrenzung Lockergesteins-Grundwasservorkommen zu den Talrändern) zwischen 2.3 und 15.4 km und das Gesamtvolumen der Lockergesteine zwischen 0.3 und 63.9 ha³. Die grundwassergesättigten Volumina der Lockergesteine variieren zwischen 0.4 und 17.8 ha³. Die grundwasserungesättigten Volumina der Lockergesteine variiert zwischen 0.2 und 47.7 ha³. Die Grundwassermächtigkeiten liegen im Mittel zwischen 2.4 und 10.8 m.

Abbildung A2.2 zeigt eine Zusammenstellung der Verteilung der Flurabstandsklassen sowie der grundwassergesättigten und -ungesättigten Volumina. Abbildung A2.3 zeigt die räumliche Verteilung der verschiedenen Flurabstandsklassen. Für die Lockergesteins-Grundwasservorkommen entlang der Birs und Birsig dominieren Flurabstände zwischen 1 und 10 m. Ausnahme bildet das Lockergesteins-Grundwasservorkommen bei Aesch-Reinach, hier dominieren Flurabstände zwischen 10 und 50 m, anteilmässig ist, wie auch für das Lockergesteins-Grundwasservorkommen bei Münchenstein, das Volumen der grundwasserungesättigten Lockergesteine vergleichsweise gross. Mit zunehmender Entfernung von der Quelle nehmen die Flurabstände als auch der Volumenanteil der grundwasserungesättigten Lockergesteine der Grundwasservorkommen entlang der Ergolz tendenziell zu. Bei den Zuflüssen der Ergolz fallen mit vergleichsweise geringen Flurabständen die Lockergesteins-Grundwasservorkommen bei Reigoldswil-Ziefen entlang der Hinteren Frenke und Nuglar-Liestal entlang des Orisbachs auf.

Tabelle A2.2 fasst die Länge aller Oberflächengewässer und jene der Hauptgewässer für die 31 untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen zusammen. Zudem wird die Dichte aller Oberflächengewässer im Verhältnis zur Gesamtfläche der Grundwasservorkommen dargestellt. Unter Berücksichtigung aller Oberflächengewässer liegen 0.2 bis 9.9 km und unter Berücksichtigung nur der Hauptgewässer liegen 0.2 bis 8 km Oberflächengewässer in den verschiedenen Grundwasservorkommen. Die Dichte der Oberflächengewässer liegt zwischen 0.1 und 29.2 km pro km².

Tab. A2.1: Aquifergeometrien der 31 untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Landschaft.

GW-Bereiche	Umfang GW-Bereich [km]	Fläche GW-Bereich [km ²]	Volumen gesättigte Zone [ha ³]	Volumen ungesättigte Zone [ha ³]	Flurabstand Anteil an Gesamtfläche GW-Bereich				GW-Mächtigkeit		
					[0 - 1 m]	[1 - 10 m]	[10 - 50 m]	Mittel [m]	Min [m]	Max [m]	
Birs	Liesberg	3.4	0.3	1.3	0.7	12.2	87.6	0.2	3.9	0.0	8.0
	Laufen (Birshollen)	4.2	0.3	1.7	0.7	19.1	80.6	0.3	6.3	0.0	13.5
	Laufen (Stadt)	4.5	0.5	3.0	2.8	3.4	96.1	0.6	5.6	0.0	10.9
	Zwingen	7.2	1.1	6.1	5.2	4.3	90.2	5.5	5.4	0.0	9.7
	Grellingen	5.8	0.4	3.1	2.6	5.2	68.2	26.6	7.8	0.0	17.2
	Duggingen	3.3	0.3	2.2	1.4	10.8	78.8	10.4	7.6	0.0	22.1
	Aesch-Reinach	9.2	2.5	16.2	47.7	0.6	20.6	78.8	6.6	0.0	11.2
	Arlenheim/Münchenstein	6.8	1.4	8.5	1.3	1.2	81.1	17.7	6.5	0.0	12.3
	Münchenstein	10.0	2.2	9.3	21.2	2.2	92.4	5.4	4.4	0.0	13.1
	Therwil/Oberwil	6.0	0.9	2.9	1.7	18.1	81.9	0.0	3.3	0.0	9.9
Birsig	Bottmingen/Binningen	4.8	0.4	1.9	1.3	6.5	93.2	0.3	5.2	0.0	13.3
	Ormalingen	5.8	0.4	1.7	1.2	7.2	92.8	0.0	4.5	0.0	11.2
Ergolz	Gelterkinden/Sissach	6.8	0.7	6.1	4.9	1.9	82.0	16.0	8.4	0.0	24.4
	Sissach	7.9	1.6	17.8	19.6	0.9	38.9	60.2	10.8	0.0	26.3
	Lausen	4.5	0.5	3.2	4.4	1.3	60.8	37.9	6.7	0.0	15.9
	Liestal	10.3	2.0	17.3	24	2.3	47.6	50.1	8.5	0.0	32.1
	Föllinsdorf/Augst	8.6	2.0	13.3	32.8	1.7	20.2	78.1	6.5	0.0	18.7
	Tecknau/Gelterkinden (Eibach)	9.6	0.6	3.2	3.9	2.9	90.2	6.9	4.9	0.0	12.3
	Rümlingen/Thürnen (Homburgerbach)	12.3	0.7	4.5	3.1	6.6	88.4	5.0	6.4	0.0	23.3
	Eptingen (Dietgerbach)	2.6	0.1	1.0	1	0.7	86.4	13.0	7.0	0.0	16.9
	Dietgen/Sissach (Dietgerbach)	15.4	1.3	6.7	8.7	13.8	61.7	24.5	5.0	0.0	17.0
	Waldenburg (Vodere Frenke)	2.8	0.1	0.7	0.6	15.7	76.1	8.2	5.3	0.0	14.2
Ergolz Zuflüsse	Oberdorf (Vodere Frenke)	2.3	0.1	1.3	0.8	5.4	91.4	3.2	9.2	0.0	22.4
	Bennwil/Hölstein (Walibach)	5.4	0.2	0.8	0.9	5.8	92.2	2.0	3.8	0.0	10.7
	Niederdorf/Hölstein (Vodere Frenke)	7.2	0.6	3.2	3	3.0	89.4	7.6	5.6	0.0	15.7
	Hölstein/Bubendorf (Vodere Frenke)	6.7	0.6	2.9	3.8	1.0	96.0	3.0	4.8	0.0	16.2
	Reigoldswil/Ziefen (Hintere Frenke)	3.8	0.2	0.4	0.2	71.2	28.7	0.1	2.4	0.0	14.7
	Ziefen/Bubendorf (Hintere Frenke)	5.6	0.4	1.7	1.5	5.7	93.7	0.6	4.7	0.0	12.8
	Bubendorf (Frenke)	4.8	0.6	3.9	4.5	0.2	85.6	14.2	6.8	0.0	15.5
	Bubendorf/Liestal (Frenke)	6.0	0.9	14.9	8.1	1.1	63.8	35.1	8.8	0.0	16.7
Nuglar_Liestal (Orisbach)	9.0	0.5	4.4	1.4	43.8	49.9	6.3	8.8	0.0	20.0	

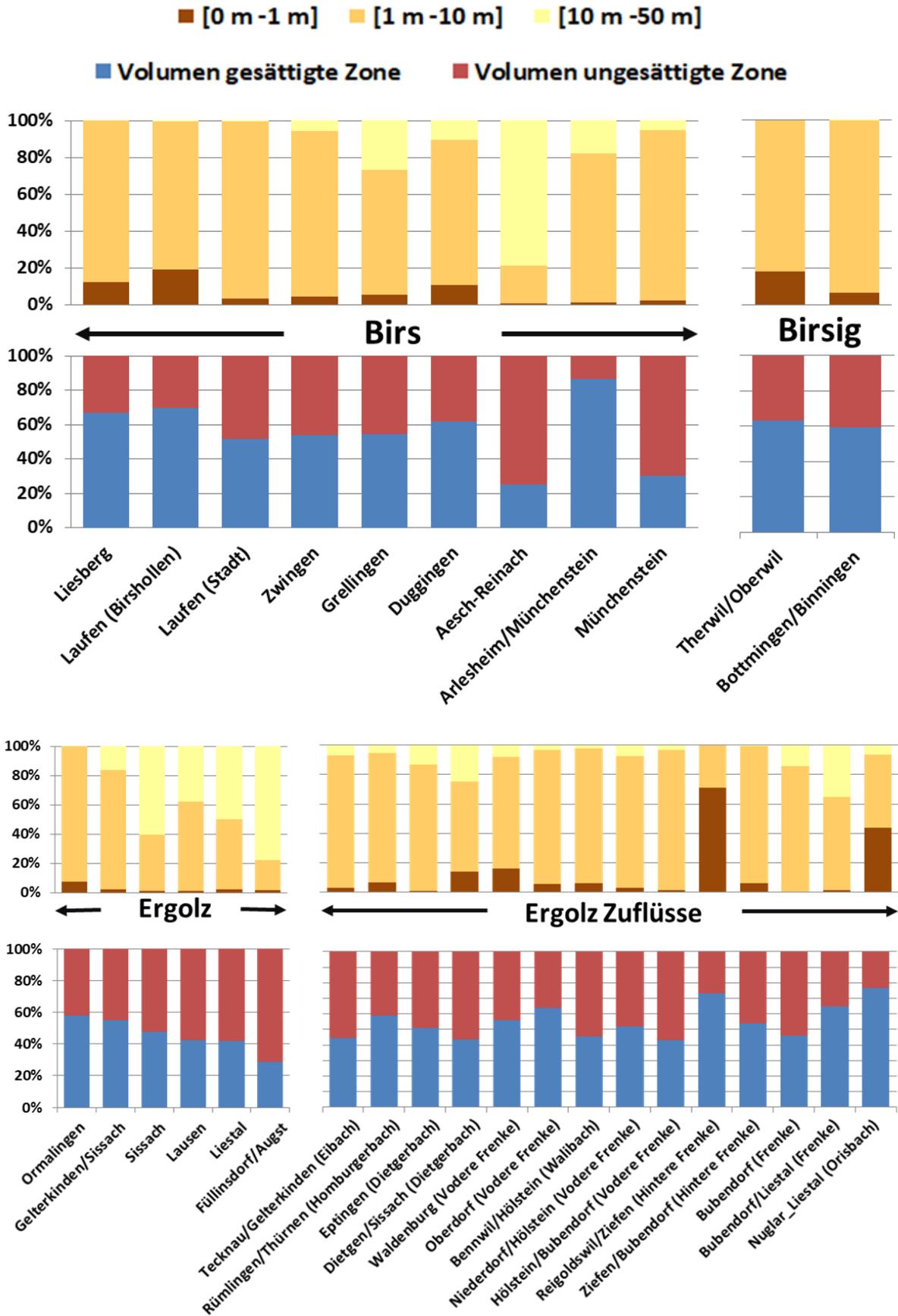


Abb. A2.2: Verteilung der Grundwasser-Flurabstandsklassen und der grundwassergesättigten und -ungesättigten Volumina der 31 untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Landschaft.

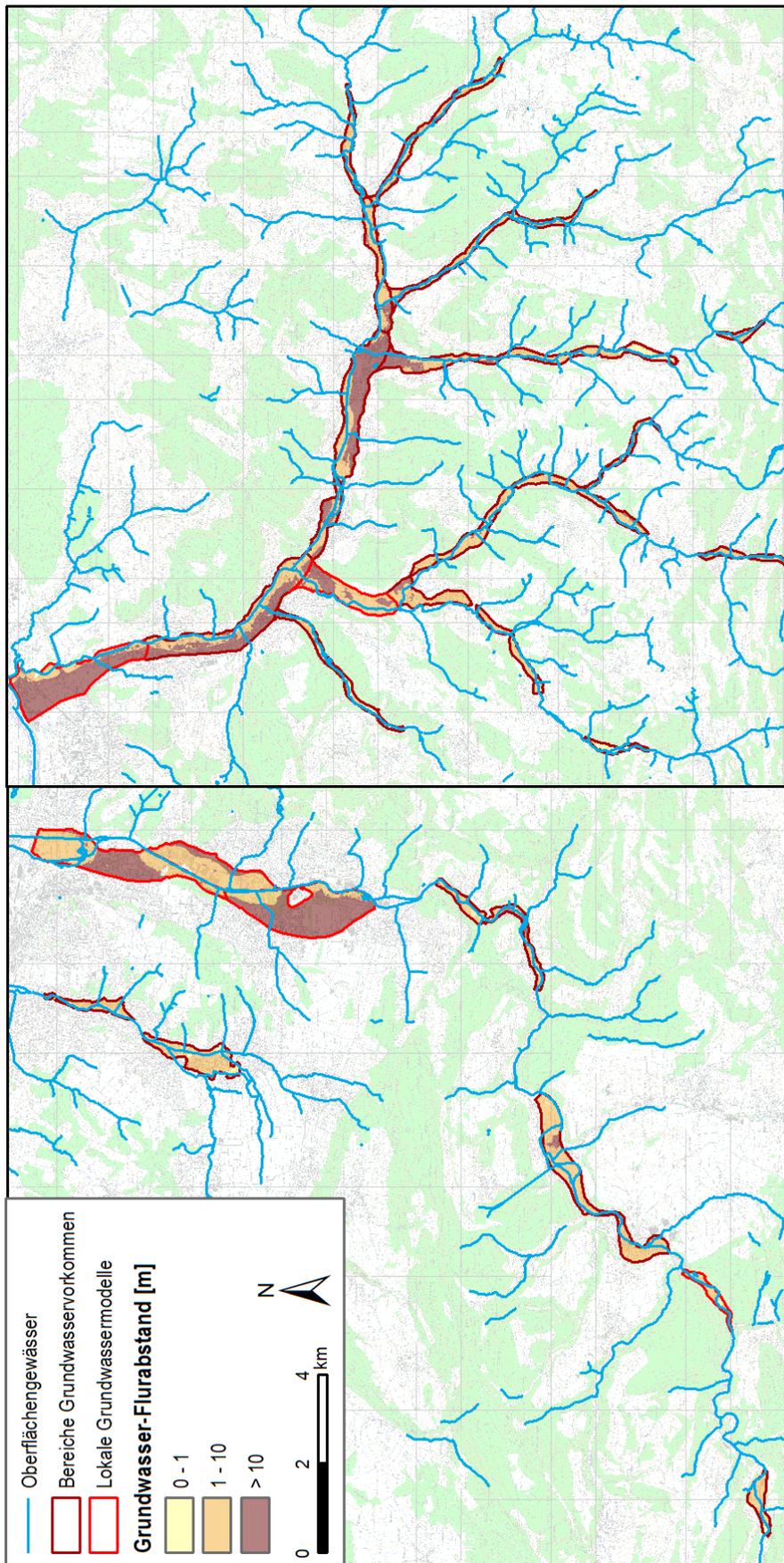


Abb. A2.3: Grundwasser-Flurabstand der 31 untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Landschaft und Standorte lokaler Grundwassermodelle.

Tab. A2.2: Dichte der Oberflächengewässer in den 31 untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Landschaft.

		Oberflächengewässer im GW-Bereich		Oberflächengewässerdichte
		alle [km]	Hauptgewässer [km]	Länge Fließgewässer / Fläche GW-Bereich [km km ⁻²]
	GW-Bereiche			
Birs	Liesberg	2.1	1.7	6.0
	Laufen (Birshollen)	2.3	2.0	8.7
	Laufen (Stadt)	2.4	1.9	4.4
	Zwingen	6.3	4.5	5.6
	Grellingen	3.3	2.7	8.3
	Duggingen	2.4	2.1	8.3
	Aesch-Reinach	5.1	3.6	2.1
	Arlesheim/Münchenstein	0.2	0.2	0.1
	Münchenstein	6.8	3.5	3.2
Birsig	Therwil/Oberwil	7.8	7.7	8.8
	Bottmingen/Binningen	3.9	3.9	10.4
Ergolz	Ormalingen	7.9	3.9	21.1
	Gelterkinden/Sissach	4.8	3.6	6.6
	Sissach	7.5	3.9	4.5
	Lausen	5.4	2.8	11.1
	Liestal	6.9	3.1	3.4
	Füllinsdorf/Augst	7.5	4.8	3.7
Ergolz Zuflüsse	Tecknau/Gelterkinden (Eibach)	6.2	5.2	9.7
	Rümlingen/Thürnen (Homburgerbach)	7.8	6.6	11.2
	Eptingen (Dietgerbach)	1.9	1.3	13.1
	Dietgen/Sissach (Dietgerbach)	9.9	8.0	7.4
	Waldenburg (Vodere Frenke)	2.6	2.0	19.3
	Oberdorf (Vodere Frenke)	3.6	2.1	24.8
	Bennwil/Hölstein (Walibach)	3.7	2.9	17.6
	Niederdorf/Hölstein (Vodere Frenke)	4.8	3.8	8.3
	Hölstein/Bubendorf (Vodere Frenke)	5.4	2.9	9.1
	Reigoldswil/Ziefen (Hintere Frenke)	5.3	2.5	29.2
	Ziefen/Bubendorf (Hintere Frenke)	4.0	3.6	10.9
	Bubendorf (Frenke)	2.3	2.3	4.1
	Bubendorf/Liestal (Frenke)	2.9	2.9	3.1
	Nuglar Liestal (Orisbach)	6.5	5.5	12.9

3 Fließwege und -zeiten im Grundwasser

Eine Ableitung der Fließwege und -zeiten im Grundwasser erlaubt eine Abschätzung von Erneuerungsraten und Verweilzeiten und ist Grundlage für eine Beurteilung der Sensitivität der Grundwasservorkommen. Tabelle A2.3 fasst die abgeleiteten Fließwege und -zeiten für die verschiedenen Lockergesteins-Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Landschaft zusammen. Fließwege liegen im Mittel bei 168 bis 2'683 m und maximal bei 314 bis 3'821 m. Für die Fließzeitenberechnungen wurde für die Filtergeschwindigkeiten nach Darcy eine homogene Verteilung der K_f -Werte von $1E-03 \text{ m s}^{-1}$ und für die, für den Wassertransport relevante, Abstandsgeschwindigkeit eine effektive Porosität (n_{eff}) von 0.1 angenommen. Fließzeiten für die verschiedenen Lockergesteins-Grundwasservorkommen liegen demnach bei 0.6 und 34.9 Tagen.

Tab. A2.3: Zusammenfassende Statistik der Fließwege und -zeiten für der 31 untersuchten Grundwasservorkommen im Kanton Basel-Landschaft.

		Fließweg			Fließdauer		
GW-Bereiche		Mittel [m]	Max [m]	SD [m]	Mittel [d]	Max [d]	SD [d]
Birs	Liesberg	191	980	203	20.8	6.1E+03	108.8
	Laufen (Birshollen)	168	574	121	4.0	1.4E+02	5.4
	Laufen (Stadt)	489	2004	272	13.5	3.4E+03	28.8
	Zwingen	725	1859	492	20.4	7.3E+02	22.3
	Grellingen	257	1201	256	3.7	1.9E+02	4.6
	Duggingen	463	1286	388	0.6	7.2E+00	0.6
	Aesch-Reinach	2533	4821	1240	6.0	2.1E+02	788.0
	Arlenheim/Münchenstein	769	2149	569	12.2	8.1E+02	176.9
	Münchenstein	488	1941	438	17.8	1.3E+04	70.4
Birsig	Therwil/Oberwil	339	314	1713	7.0	5.3E+01	7.8
	Bottmingen/Binningen	405	1392	430	5.9	5.7E+02	10.9
Ergolz	Ormalingen	851	2280	515	7.6	5.6E+01	5.9
	Gelterkinden/Sissach	1505	3513	995	20.0	5.0E+02	19.7
	Sissach	1367	3627	986	34.9	3.7E+04	163.7
	Lausen	479	1595	405	9.0	1.6E+02	21.1
	Liestal	738	3253	687	8.8	1.9E+03	21.8
	Füllinsdorf/Augst	952	2479	632	16.4	7.5E+03	33.5
Ergolz Zufüsse	Tecknau/Gelterkinden (Eibach)	2168	5525	1610	18.7	3.9E+02	16.3
	Rümlingen/Thürnen (Homburgerbach)	844	3226	736	7.3	9.1E+03	59.4
	Eptingen (Dietgerbach)	570	1255	291	2.9	4.9E+01	3.2
	Dietgen/Sissach (Dietgerbach)	664	3934	954	4.1	3.3E+02	9.4
	Waldenburg (Vodere Frenke)	510	1366	362	2.0	1.6E+01	1.6
	Oberdorf (Vodere Frenke)	487	1045	267	4.5	2.0E+01	3.2
	Bennwil/Hölstein (Walibach)	2513	3954	1096	10.7	9.7E+01	5.2
	Niederdorf/Hölstein (Vodere Frenke)	939	4461	635	6.0	2.4E+02	7.3
	Hölstein/Bubendorf (Vodere Frenke)	2683	4358	966	24.5	2.1E+02	21.4
	Reigoldswil/Ziefen (Hintere Frenke)	220	1021	214	1.6	2.8E+01	2.3
	Ziefen/Bubendorf (Hintere Frenke)	466	1214	321	3.2	3.8E+01	2.9
	Bubendorf (Frenke)	807	1572	372	7.6	1.1E+02	6.1
	Bubendorf/Liestal (Frenke)	1436	3033	828	7.6	1.1E+02	6.1
	Nuglar Liestal (Orisbach)	746	3125	972	7.5	2.8E+03	33.2

4 Grundwasserneubildung – Grundwasserbilanz

Regionaler Grundwasserzu- und -abstrom / Zustrom über die seitlichen Hangeinzugsgebiete

Abbildung A2.2 zeigt diejenigen Gebiete, für die Grundwassermodelle existieren und Grundwasserbilanzen für unterschiedliche hydrologische und betriebliche Randbedingungen ausgewertet werden konnten.

Abbildung A2.4 zeigt berechnete Wasserbilanzen für ein Grundwassermodell, welches von der AUG bei Laufen erstellt wurde (AUG-BGA-Laufen-31). Während die Birs bei Niedrigwasser vor allem Vorfluter ist, kann die Infiltration von Oberflächenwasser während Hochwasserereignissen um Größenordnungen ansteigen (70 l s^{-1}). Für den untersuchten Grundwasserbereich ist die geschätzte Interaktion mit dem regionalen Karstsystem bedeutend ($64 \text{ bis } 103 \text{ l s}^{-1}$). Die flächige Grundwasserneubildung spielt eine untergeordnete Rolle.

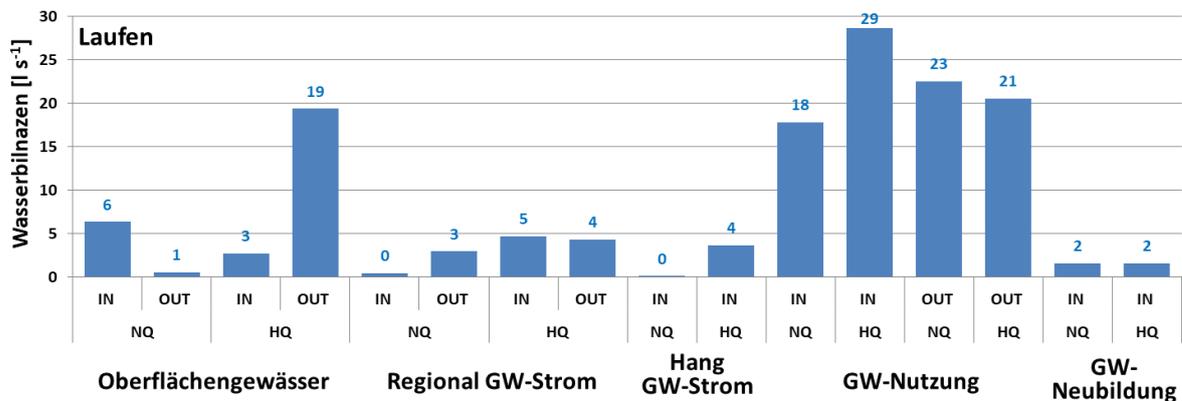


Abb. A2.4: Simulierte Wasserbilanzen für ein Grundwassermodell bei Laufen entlang der Birs.

Abbildung A2.5 zeigt berechnete Wasserbilanzen für ein Grundwassermodell, welches von der AUG zwischen Aesch und Reinach erstellt wurde (Affolter et al. (2010), AUG-BGA-Reinach-42, AUG-BGA-Aesch-21). Während Hochwasserereignissen nimmt sowohl die Infiltration von Oberflächenwasser (652 l s^{-1}) als auch die Exfiltration von Grundwasser in das Fließgewässer (237 l s^{-1}) stark zu. Weitere relevante Randbedingungen sind der regionale Grundwasserstrom, der Zustrom über die Hangbereiche sowie die künstliche Grundwasseranreicherung und Grundwasserentnahmen. Die flächige Grundwasserneubildung spielt eine untergeordnete Rolle.

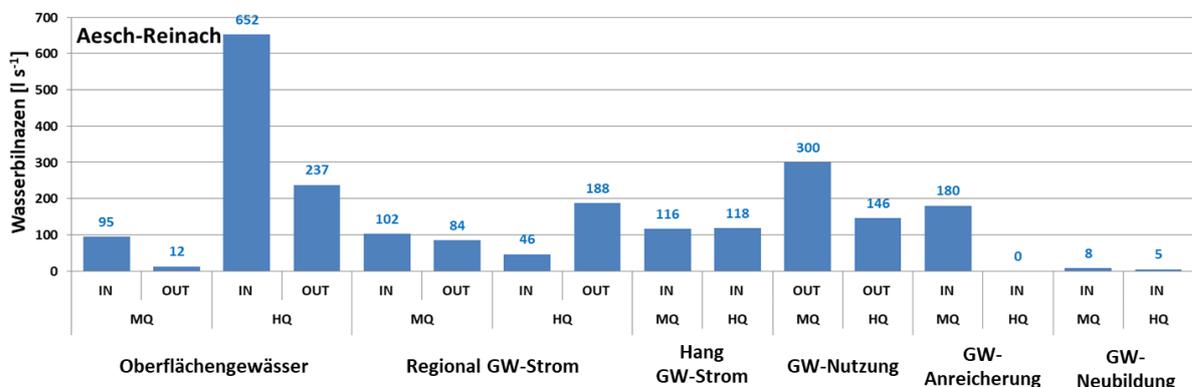


Abb. A2.5: Simulierte Wasserbilanzen für ein Grundwassermodell bei Aesch entlang der Birs.

Abbildung A2.6 zeigt berechnete Wasserbilanzen für ein Grundwassermodell, welches von der AUG zwischen Münchenstein und Birsfelden erstellt wurde (AUG-BGA-BL-126C, AUG-

BGA-BL-126D). Während Hochwasserereignissen nimmt sowohl die Infiltration von Oberflächenwasser (60 l s^{-1}) als auch die Exfiltration von Grundwasser in das Fließgewässer (100 l s^{-1}) stark zu. Relevante Randbedingungen sind jedoch der regionale Grundwasserstrom und der Zustrom über die Hangbereiche. Die flächige Grundwasserneubildung spielt eine untergeordnete Rolle.

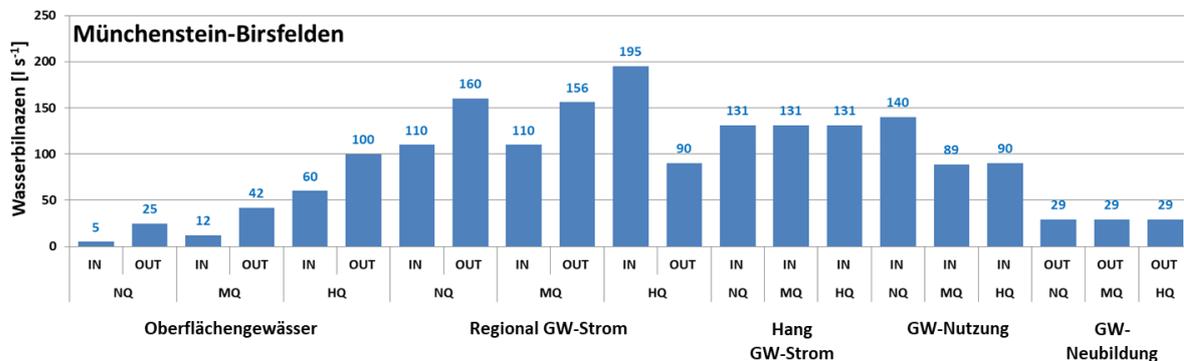


Abb. A2.6: Simulierte Wasserbilanzen für ein Grundwassermodell bei Münchenstein und Birsfelden entlang der Birs.

Abbildung A2.7 zeigt berechnete Wasserbilanzen für ein Grundwassermodell, welches von der AUG zwischen Füllinsdorf und Augst erstellt wurde (Regionale Wasserversorgung Basel-Landschaft 21). Während Hochwasserereignissen nimmt sowohl die Infiltration von Oberflächenwasser (126 l s^{-1}) und der regionale Grundwasserstrom (158 und 165 l s^{-1}) stark zu. Die flächige Grundwasserneubildung (nicht dargestellt) und der Zustrom über die Hangbereiche spielen eine untergeordnete Rolle.

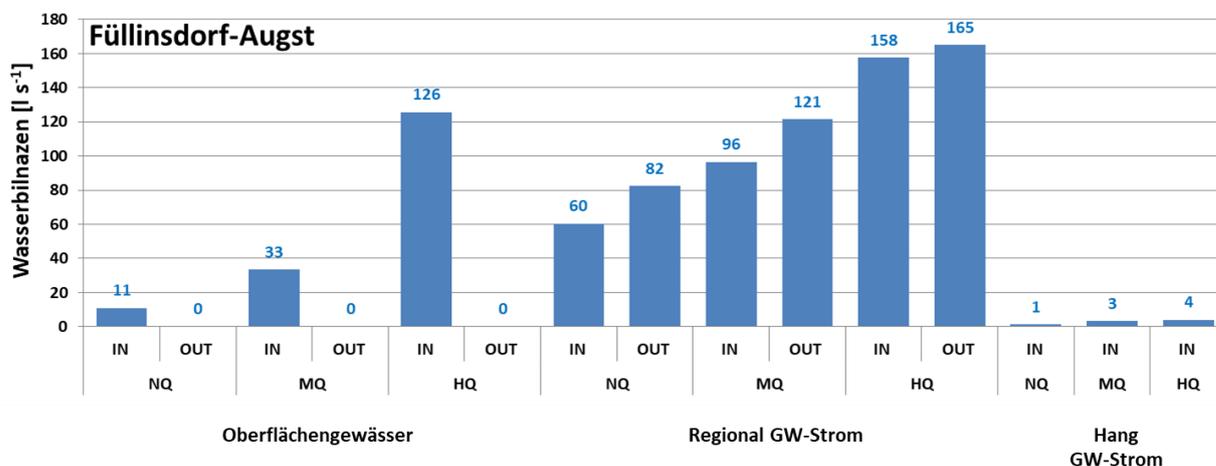


Abb. A2.7: Simulierte Wasserbilanzen für ein Grundwassermodell zwischen Füllinsdorf und Augst entlang der Ergolz.

Abbildung A2.8 zeigt berechnete Wasserbilanzen für ein Grundwassermodell, welches von der AUG bei Bubendorf erstellt wurde (Regionale Wasserversorgung Basel-Landschaft 21). Während Hochwasserereignissen nimmt sowohl die Infiltration von Oberflächenwasser (64 l s^{-1}) und der regionale Grundwasserstrom (117 und 136 l s^{-1}) stark zu. Die flächige Grundwasserneubildung (nicht dargestellt) und der Zustrom über die Hangbereiche spielen eine untergeordnete Rolle.

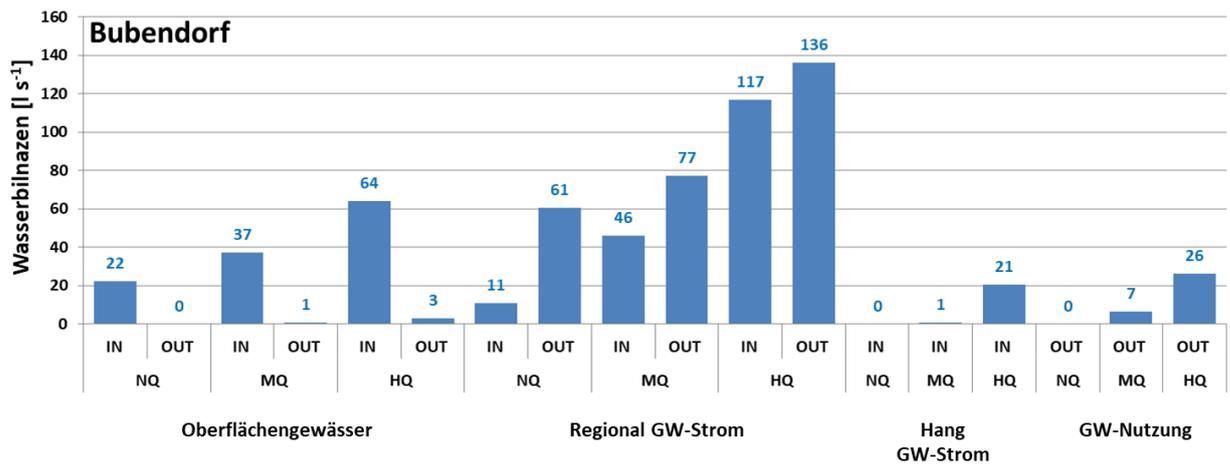


Abb. A2.8: Simulierte Wasserbilanzen für ein Grundwassermodell bei Bubendorf entlang der Frenke.

Grundwasserneubildung aus versickerndem Niederschlagswasser

Unter Annahme jährlicher Niederschlagssummen (Normperiode 1981 - 2010; <https://hydro-maps.ch>) von 1'296 (Einzugsgebiet Birs) und 1'111 mm (Einzugsgebiet Ergolz) und Verdunstungshöhen von 503 (Einzugsgebiet Birs) und 557 mm (Einzugsgebiet Ergolz) sowie den Flächen der untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen ergeben sich geringe geschätzte flächige Grundwasserneubildung von 4.2 und 39 l s⁻¹ (Grundwasservorkommen Birs) und 2.1 und 33 l s⁻¹ (Grundwasservorkommen Ergolz).

Interaktion Oberflächengewässer mit dem Grundwasser

Für die grösseren Fließgewässer im Kanton Basel-Landschaft wurden Längsprofile (Verlauf Flussbett, mittlerer Grundwasserstand, Felsoberfläche) erstellt (AUG-BGA-BL-159), welche einen generellen Überblick über die Interaktion der Oberflächengewässer mit dem Grundwasser geben.

5 Auswirkungen Klimaänderungen

Für die Evaluation der klimabedingten Veränderung der verschiedenen Grundwasserneubildungskomponenten wurde ein Schwerpunkt auf die im Rahmen von Hydro-CH2018 erarbeitete Klimaprojektion MPI-M-MPI-ESM-LRr1i1p1SMHI-RCA4, einschliesslich der 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) gelegt.

Grundwasserneubildung aus versickerndem Niederschlagswasser - Entwicklung der Niederschläge und Temperaturprägung

Abbildung A2.9 zeigt die saisonale Verteilung der Niederschläge und Temperaturen als auch jährlich kumulierte Niederschläge für die Referenzjahre 2000, 2055 und 2085 für den Standort Rünenberg im Kanton Basel-Landschaft (Abb. 4.1.1). Tabelle A2.4 beschreibt die Saisonalität (gewöhnliches Kalenderjahr) der Niederschlagssummen und Temperaturen. Für die Situation in den stark urbanisierten Haupttälern der Ergolz und Birs wird auf die Auswertungen des Standortes bei Basel-Binningen verwiesen, welcher repräsentativ für die zu erwartenden Klimaänderungen an diesen Standorten ist (Anhang A1).

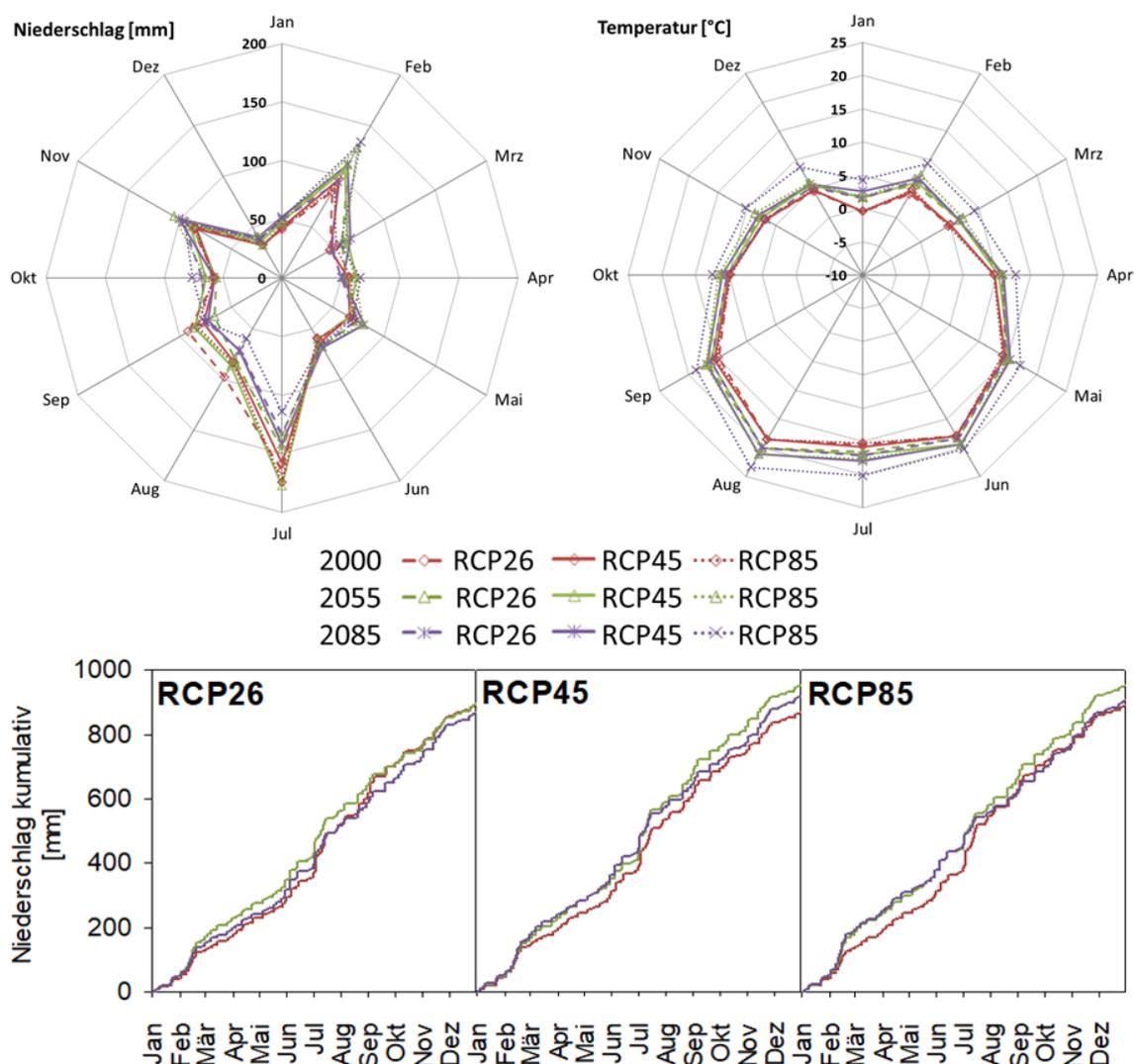


Abb. A2.9: MeteoSchweiz Standort RUE. Oben: Polardarstellung der simulierten monatlichen Niederschlags- und Temperaturverteilung. Unten: kumulierte Niederschlagssummen.

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass die Niederschläge tendenziell und, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios, vorerst um maximal 10 % zunehmen (RCP45 und RCP85, Jahr 2055), um dann bis zum Jahr 2085 wieder abzunehmen.

Die meisten Niederschläge fallen in den Monaten Juli, November und Februar. Wohingegen, für die betrachteten Klimaprojektionen die Niederschläge im Juli tendenziell abnehmen, nehmen diese im November und Februar tendenziell zu. Dies würde bedeuten, auch unter Berücksichtigung höherer Evapotranspirationsverluste im Sommer, dass die Grundwasserneubildung vermehrt in vergleichsweise „kälteren“ Monaten stattfindet, welche mit einer tendenziellen Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde (negativer Rückkopplungsmechanismus).

Die Lufttemperaturen nehmen, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios und des Zeitpunktes, um 0.9 °C (RCP85, Jahr 2055) bis maximal 3.8 °C (RCP85, Jahr 2085) zu. Die Veränderungen der Lufttemperaturen werden mit einer zeitlichen Verzögerung die Grundwassertemperaturen beeinflussen.

Tab. A2.4: Saisonalität (gewöhnliches Kalenderjahr) der Niederschlagssummen und Temperaturen für den MeteoSchweiz Standort RUE

		Niederschlagssumme [mm]			Temperaturen [°C]		
		2000	2055	2085	2000	2055	2085
RCP26	MAM	170	187	172	9.6	10.7	10.7
	JJA	323	294	272	17.3	18.3	18.5
	SON	238	210	240	10.5	11.8	11.0
	DJF	159	202	183	2.7	4.4	4.4
	Summe	890	893	866	-	-	-
	Mittel	-	-	-	10.1	11.3	11.2
	Veränderung [%; °C]	-	3	0	-	1.2	1.1
RCP45	MAM	170	193	199	9.8	10.7	11.0
	JJA	304	324	282	17.5	18.8	19.5
	SON	218	241	231	10.7	11.3	11.9
	DJF	173	191	203	2.9	4.5	5.0
	Summe	865	949	916	-	-	-
	Mittel	-	-	-	10.2	11.3	11.9
	Veränderung [%; °C]	-	10	6	-	1.1	1.7
RCP85	MAM	181	203	193	9.5	11.1	13.1
	JJA	317	284	240	17.3	19.4	21.3
	SON	226	256	247	10.6	12.4	13.7
	DJF	164	208	222	3.1	5.0	7.4
	Summe	888	950	903	-	-	-
	Mittel	-	-	-	10.1	11.0	13.9
	Veränderung [%; °C]	-	10	4	-	0.9	3.8

Frühling (MAM: März, April und Mai), Sommer (JJA: Juni, Juli und August), Herbst (SON: September, Oktober und November) und Winter (DJF: Dezember, Januar und Februar)

Entwicklung Fließgewässerabfluss und -temperaturen

Abbildung A2.10 und A2.11 sowie A2.12 und A2.13 zeigen zusammenfassend die Ergebnisse der von der EPFL durchgeführten hydrologischen Modellierung (Abflussmengen und Fließgewässertemperaturen) für die Emissionsszenarios RCP26, RCP45 und RCP85 sowie jeweils zwei Standorten entlang der Birs und der Ergolz. Für beide Fließgewässer wurden verschiedene Standorte am Unterlauf und dem Mündungsbereich Nahe der Konfluenz mit dem Rhein sowie für die Birs ein Standort bei Zwingen und die Ergolz ein Standort am Oberlauf ausgewählt (Abb. 4.1.1).

Für alle Standorte ist die Grundwasserneubildung in den Sommermonaten über die Fließgewässerinfiltration reduziert. Dies würde bedeuten, auch unter Berücksichtigung höherer Evapotranspirationsverluste im Sommer, weniger vergleichsweise „warmes“ Oberflächenwasser

in den Grundwasserleiter infiltriert. Wobei die Entwicklung in den Wintermonaten oft nicht eindeutig ist, sind die Abflussmengen in den Zwischenjahreszeiten erhöht. Zudem zeigt die Auswertung der saisonalen Abflussdauerlinien (hydrologisches Jahr), dass vor allem für die Monate Juli bis September und für alle betrachteten Emissionsszenarien weniger Ereignissen mit hohen Abflüssen stattfinden werden. Unter Annahme, dass die quantitative Grundwasserneubildung und die einhergehende Temperaturprägung von Grundwasservorkommen hauptsächlich bei "charakteristischen" Ereignissen mit hohen Abflüssen (Intensität & Dauer) erfolgt, verstärkt dieser Effekt nochmals den negativen Rückkopplungsmechanismus und eine tendenzielle Abkühlung von Grundwasserressourcen.

Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass auch lokale Gewitterereignisse im Sommer eine stärkere Rolle bei der Abflussbildung und die Grundwasserneubildung am Ober- und Mittelauf der Birs und Ergolz spielen können. Diese Entwicklung konnte mit der hier vorgenommenen Auswertung nicht berücksichtigt werden.

(A) Unterlauf Birs (2'613'740 / 1'264'470)

Die Ergebnisse der Simulationen für den Unterlauf der Birs zeigen, dass die Abflussmengen in den Monaten Januar bis März tendenziell um 11 bis 22 % zunehmen werden. Auch in den Monaten April bis Juni nehmen die Abflussmengen um 7 bis 37 % tendenziell zu. Hingegen kann für die Monate Juli bis September tendenziell eine Abnahme der Abflussmengen von 19 bis 51 %, beobachtet werden. In den Monaten Oktober bis Dezember nehmen die Abflussmengen um 3 bis 18 % wieder tendenziell zu.

(B) Birs bei Zwingen (2'606'650 / 1'253'950)

Die Ergebnisse der Simulationen für den Standort der Birs bei Zwingen für die Monate Januar bis März tendenziell um 10 bis 22 % zunehmen werden. Auch in den Monaten April bis Juni nehmen die Abflussmengen um 8 bis 37 % tendenziell zu. Hingegen kann für die Monate Juli bis September (Ausnahme RCP45, Jahr 2055) tendenziell eine Abnahme der Abflussmengen von 24 bis 51 %, beobachtet werden. In den Monaten Oktober bis Dezember nehmen die Abflussmengen um 2 bis 18 % wieder tendenziell zu.

(C) Unterlauf Ergolz (2'621'750 / 1'262'750)

Die Ergebnisse der Simulationen für den Unterlauf der Ergolz zeigen, dass die Abflussmengen in den Monaten Januar bis März (Ausnahme RCP26, Jahr 2085) tendenziell um 2 bis 26 % zunehmen werden. Auch in den Monaten April bis Juni (Ausnahme RCP45, Jahr 2055) nehmen die Abflussmengen um 16 bis 29 % tendenziell zu. Hingegen kann für die Monate Juli bis September (Ausnahme RCP45, Jahr 2055) tendenziell eine Abnahme der Abflussmengen von 23 bis 56 %, beobachtet werden. In den Monaten Oktober bis Dezember (Ausnahme RCP26, Jahr 2055) nehmen die Abflussmengen um 17 bis 34 % wieder tendenziell zu.

(D) Oberlauf Ergolz (2'633'750 / 1'253'750)

Die Ergebnisse der Simulationen für den Oberlauf der Ergolz für die Monate Januar bis März (Ausnahme RCP26, Jahr 2085) tendenziell um 2 bis 22 % zunehmen werden. In den Monaten April bis Juni (Ausnahme RCP45, Jahr 2055) nehmen die Abflussmengen um 17 bis 32 % tendenziell zu. Hingegen kann für die Monate Juli bis September (Ausnahme RCP45, Jahr 2055) tendenziell eine Abnahme der Abflussmengen von 23 bis 58 %, beobachtet werden. In den Monaten Oktober bis Dezember (Ausnahme RCP26, Jahr 2055) nehmen die Abflussmengen um 18 bis 39 % wieder tendenziell zu.

Birs nahe Mündung (X:2613750 Y:1264450)					
	Veränderung Q [%] zu 2000			Veränderung T [°C] zu 2000	
	2055	2085		2055	2085
RCP26					
Jan-Mrz	↑ 22%	↑ 17%	↑ 1.1	↑ 1.1	
Apr-Jun	↑ 24%	↑ 19%	↑ 0.7	↑ 0.7	
Jul-Sep	↓ -25%	↓ -38%	↑ 1.1	↑ 1.1	
Okt-Dez	→ 3%	↑ 15%	↑ 1.0	↑ 0.5	
RCP45					
Jan-Mrz	↑ 17%	↑ 11%	↑ 1.0	↑ 1.5	
Apr-Jun	→ 7%	↑ 37%	↑ 0.7	↑ 1.0	
Jul-Sep	↑ 19%	↓ -24%	↑ 0.9	↑ 1.6	
Okt-Dez	↑ 18%	↑ 15%	↑ 0.7	↑ 1.1	
RCP85					
Jan-Mrz	↑ 17%	↑ 20%	↑ 1.6	↑ 3.3	
Apr-Jun	↑ 16%	↑ 11%	↑ 1.1	↑ 2.6	
Jul-Sep	↓ -25%	↓ -51%	↑ 1.8	↑ 3.5	
Okt-Dez	↑ 10%	↑ 15%	↑ 1.5	↑ 2.9	

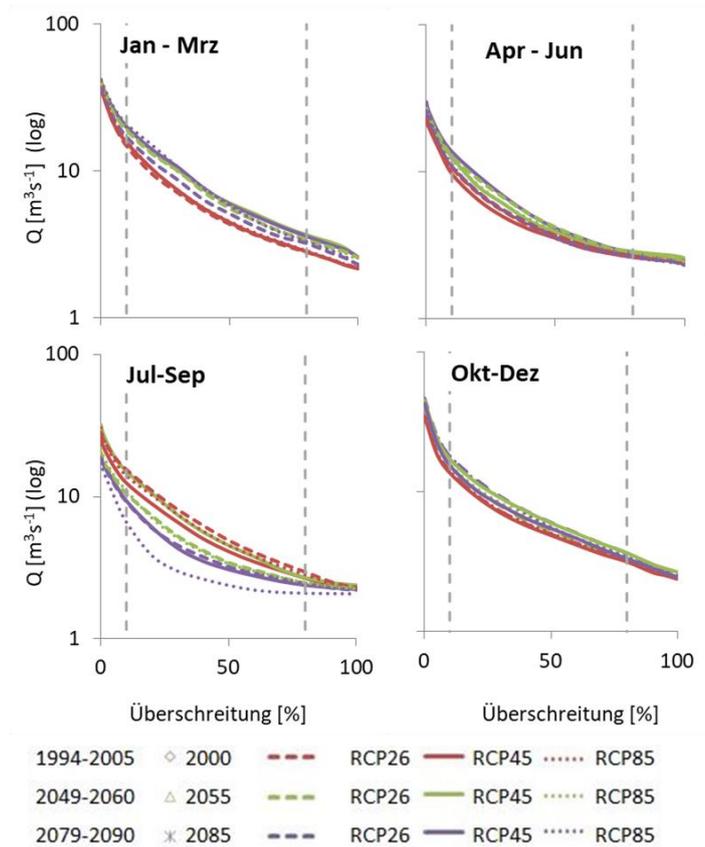
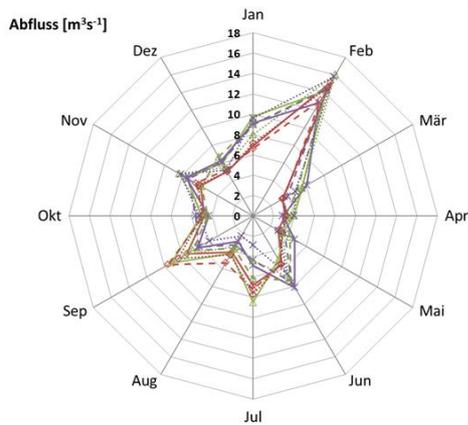


Abb. A2.10: Ergebnisse der hydrologischen Modellierung und der Abflussmengen und Fließgewässertemperaturen für den Unterlauf der Birs. Oben links: Relative Veränderung der modellierten Abflussmengen und Fließgewässertemperaturen für die Jahre 2055 und 2085 im Verhältnis zum Jahr 2000. Unten links: Polardarstellung der monatlichen Abflussmengen. Rechts: Saisonale (hydrologisches Jahr) Abflussdauerlinien (grau gestrichelt: 10 und 80 % Überschreitung).

Birs Bereich Zwingen (X:2'606'650 Y:1'253'950)				
	Veränderung Q [%] zu 2000		Veränderung T [°C] zu 2000	
	2055	2085	2055	2085
RCP26				
Jan-Mrz	↑ 22%	↑ 17%	↑ 1.1	↑ 1.1
Apr-Jun	↑ 25%	↑ 19%	↑ 0.7	↑ 0.7
Jul-Sep	↓ -25%	↓ -38%	↑ 1.1	↑ 1.1
Okt-Dez	→ 2%	↑ 15%	↑ 1.0	↑ 0.5
RCP45				
Jan-Mrz	↑ 16%	→ 10%	↑ 1.0	↑ 1.5
Apr-Jun	→ 8%	↑ 37%	↑ 0.7	↑ 1.0
Jul-Sep	↑ 19%	↓ -24%	↑ 0.9	↑ 1.6
Okt-Dez	↑ 18%	↑ 15%	↑ 0.7	↑ 1.1
RCP85				
Jan-Mrz	↑ 17%	↑ 19%	↑ 1.4	↑ 3.3
Apr-Jun	↑ 16%	↑ 12%	↑ 1.1	↑ 2.6
Jul-Sep	↓ -25%	↓ -51%	↑ 1.8	↑ 3.5
Okt-Dez	↑ 11%	↑ 16%	↑ 1.5	↑ 2.9

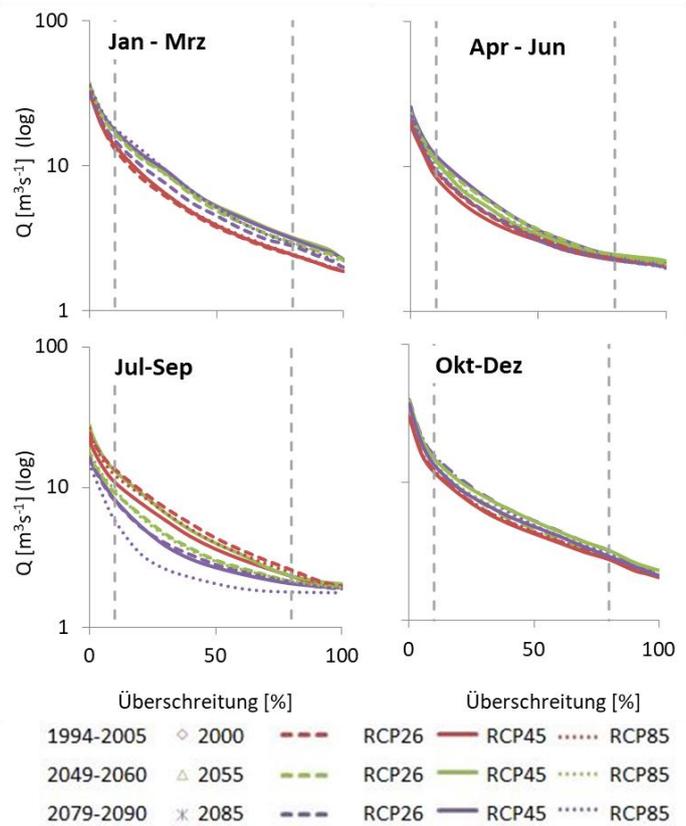
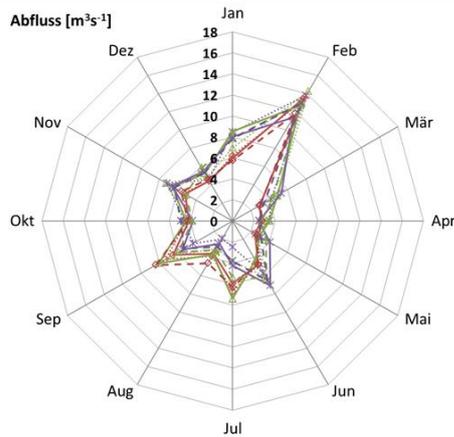


Abb. A2.11: Ergebnisse der hydrologischen Modellierung und der Abflussmengen und Fließgewässertemperaturen für die Birs bei Zwingen. Oben links: Relative Veränderung der modellierten Abflussmengen und Fließgewässertemperaturen für die Jahre 2055 und 2085 im Verhältnis zum Jahr 2000. Unten links: Polardarstellung der monatlichen Abflussmengen. Rechts: Saisonale (hydrologisches Jahr) Abflussdauerlinien (grau gestrichelt: 10 und 80 % Überschreitung).

Ergolz Unterlauf (X:2'621'750 Y:1'262'750)				
	Veränderung Q [%] zu 2000		Veränderung T [°C] zu 2000	
	2055	2085	2055	2085
RCP26				
Jan-Mrz	↑ 14%	↓ -7%	↑ 1.1	↑ 1.1
Apr-Jun	↑ 19%	↑ 16%	↑ 0.7	↑ 0.7
Jul-Sep	↓ -38%	↓ -43%	↑ 1.1	↑ 1.1
Okt-Dez	↓ -4%	↑ 17%	↑ 1.0	↑ 0.5
RCP45				
Jan-Mrz	→ 2%	↑ 10%	↑ 1.0	↑ 1.5
Apr-Jun	→ -3%	↑ 22%	↑ 0.7	↑ 1.0
Jul-Sep	↑ 20%	↓ -25%	↑ 0.9	↑ 1.6
Okt-Dez	↑ 18%	↑ 24%	↑ 0.7	↑ 1.1
RCP85				
Jan-Mrz	↑ 21%	↑ 26%	↑ 1.5	↑ 3.3
Apr-Jun	↑ 29%	↑ 21%	↑ 1.1	↑ 2.6
Jul-Sep	↓ -23%	↓ -56%	↑ 1.8	↑ 3.5
Okt-Dez	↑ 25%	↑ 34%	↑ 1.5	↑ 2.9

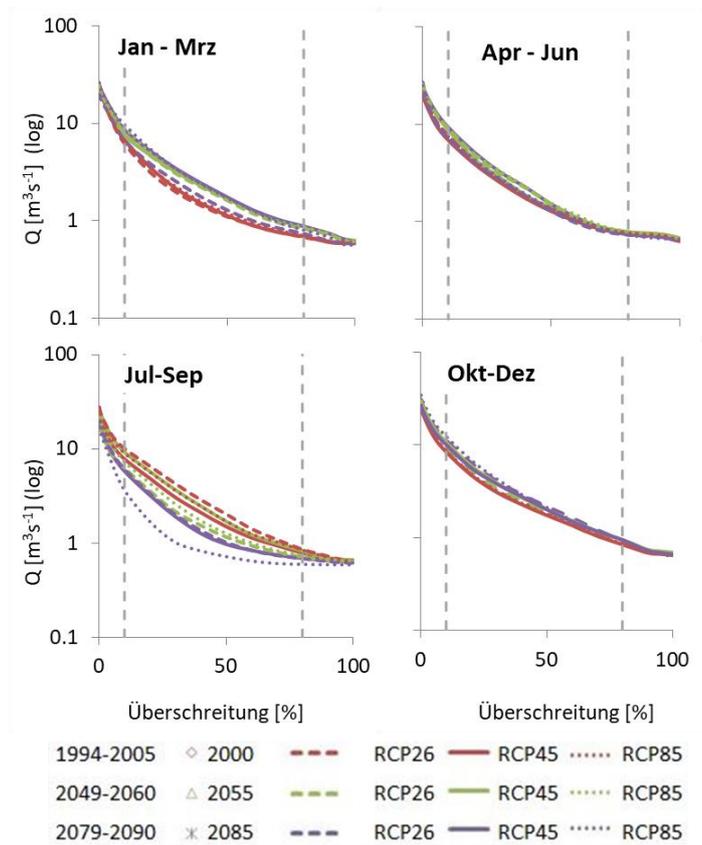
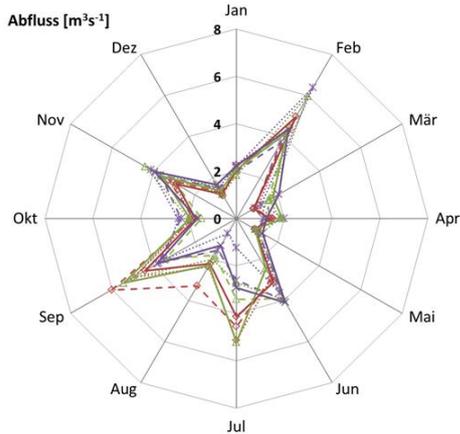


Abb. A2.12: Ergebnisse der hydrologischen Modellierung und der Abflussmengen und Fließgewässertemperaturen für den Unterlauf der Ergolz. Oben links: Relative Veränderung der modellierten Abflussmengen und Fließgewässertemperaturen für die Jahre 2055 und 2085 im Verhältnis zum Jahr 2000. Unten links: Polardarstellung der monatlichen Abflussmengen. Rechts: Saisonale (hydrologisches Jahr) Abflussdauerlinien (grau gestrichelt: 10 und 80 % Überschreitung).

Ergolz Bereich Quelle (X:2633750 Y:1253750)				
	Veränderung Q [%] zu 2000		Veränderung T [°C] zu 2000	
	2055	2085	2055	2085
RCP26				
Jan-Mrz	➔ 6%	⬇ -13%	⬆ 1.1	⬆ 1.1
Apr-Jun	⬆ 21%	⬆ 17%	⬆ 0.7	⬆ 0.7
Jul-Sep	⬇ -39%	⬇ -44%	⬆ 1.1	⬆ 1.1
Okt-Dez	➔ -6%	⬆ 18%	⬆ 1.0	⬆ 0.5
RCP45				
Jan-Mrz	➔ -2%	➔ 6%	⬆ 1.0	⬆ 1.5
Apr-Jun	➔ -3%	⬆ 25%	⬆ 0.7	⬆ 1.0
Jul-Sep	⬆ 21%	⬇ -26%	⬆ 0.9	⬆ 1.6
Okt-Dez	⬆ 20%	⬆ 28%	⬆ 0.7	⬆ 1.1
RCP85				
Jan-Mrz	⬆ 16%	⬆ 24%	⬆ 1.6	⬆ 3.3
Apr-Jun	⬆ 32%	⬆ 23%	⬆ 1.1	⬆ 2.6
Jul-Sep	⬇ -23%	⬇ -58%	⬆ 1.8	⬆ 3.5
Okt-Dez	⬆ 30%	⬆ 39%	⬆ 1.7	⬆ 2.9

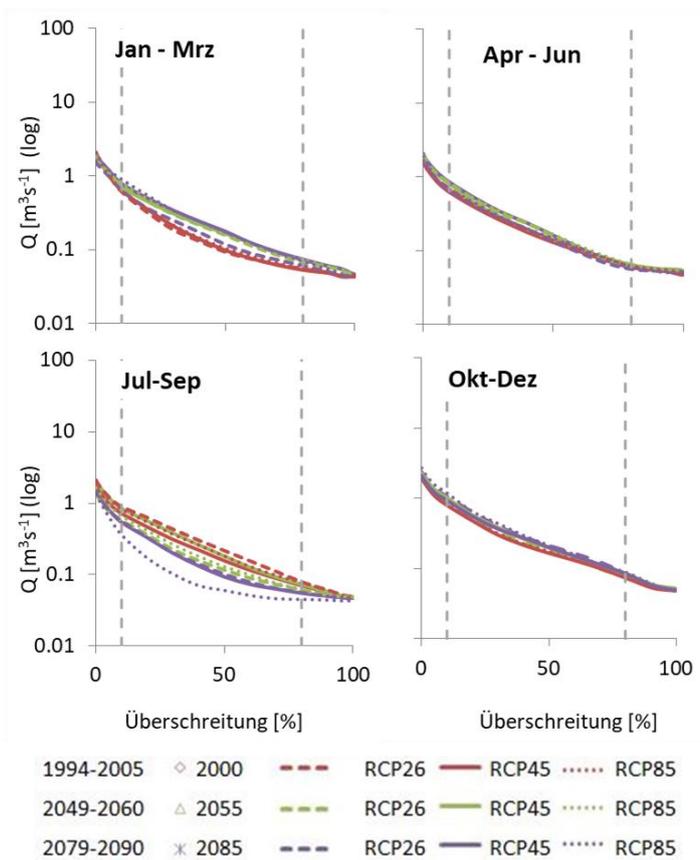
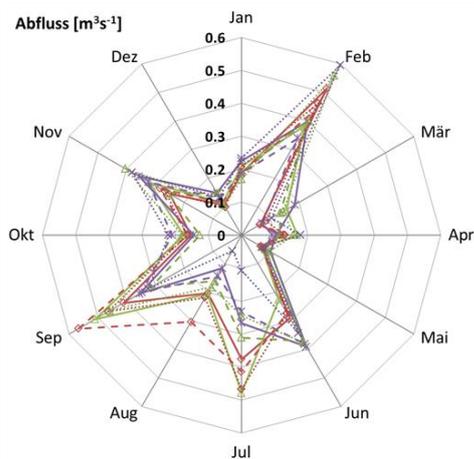


Abb. A2.13: Ergebnisse der hydrologischen Modellierung und der Abflussmengen und Fließgewässertemperaturen für den Oberlauf der Ergolz. Oben links: Relative Veränderung der modellierten Abflussmengen und Fließgewässertemperaturen für die Jahre 2055 und 2085 im Verhältnis zum Jahr 2000. Unten links: Polardarstellung der monatlichen Abflussmengen. Rechts: Saisonale (hydrologisches Jahr) Abflussdauerlinien (grau gestrichelt: 10 und 80 % Überschreitung).

Referenzen

- Affolter, A., Huggenberger, P., Scheidler, S., Epting, J., 2010. Adaptives Grundwassermanagement in urbanen Gebieten. Grundwasser 15, 147-161.
- AUG-BGA-Aesch-21 (Huggenberger, P., Affolter, A., Scheidler, S., Epting, J. 2007) Anreicherungsanlage Aesch, Hydrogeologischer Bericht
- AUG-BGA-Reinach-42 (Spotcke, I., 2007) Beurteilungsinstrumente für die nachhaltige Nutzung des Grundwassers im Birstalabschnitt Aesch-Reinach - Technischer Bericht
- AUG-BGA-Laufen-31 (Huggenberger, P., Scheidler, S., Epting, J. 2009) Überprüfung der Gewässerschutzzone "Birshalden" Phase II, Hydrogeologischer / Technischer Bericht
- AUG-BGA-BL-126C (Huggenberger, P., Butscher, C. 2007) Unteres Birstal Abschnitt; Münchenstein - Birsfelden, Instationäres Grundwassermodell, Technischer Bericht
- AUG-BGA-BL-126D (Huggenberger, P., Butscher, C. 2007) Hydrogeologische Grundlagen zur Ausscheidung von Zuströmbereichen Zu im unteren Birstal, Abschnitt Münchenstein - Birsfelden, Hydrogeologischer Bericht
- AUG-BGA-BL-159 (Huggenberger, P., Epting, J., Wiesmeier, S. 2014) Dokumentation Grundwassergleichenkarte Kanton Basel-Landschaft - Phase 2: Datenmodell, Methodik Entwicklung und Datenbearbeitung

AUG-BGA-BL-167 (Huggenberger, P., Epting, J., Dresmann, H., Wiesmeier, S. 2017) Kurzbericht & Dokumentation; Gesamtüberarbeitung 2017, Grundwassergleichenkarte Kanton Basel-Landschaft

Regionale Wasserversorgung Basel-Landschaft 21 (Epting, J., Huggenberger, P., 2016) Teilprojekt 2: Flussnahe Trinkwasserfassungen

Anhang A3: Lockergesteins-Grundwasservorkommen Winterthur (Kanton Zürich)

Datengrundlage

- *Datenreihen Grundwasserspiegelhöhen und -temperaturen, Wasserstand, Abfluss und Temperaturen Fließgewässer, Grundwassernutzungen (kantonales Überwachungsprogramm Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft Kanton Zürich AWEL ZH)*
- *Topographie: DHM25m (Bundesamt für Landestopografie swisstopo)*
- *Felsoberfläche 25 m Raster (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, GeoMol CH)*
- *Grundwassergleichen für mittlere und hohe Grundwasserstände 1 m Auflösung (Amt für Raumentwicklung, Geodatenshop GIS-ZH)*
- *Grundwasserbilanzen durch definierte Querschnitte und kalibrierte hydraulische Durchlässigkeitswerte K_f (Alberich 1997)*

1. Hydraulischer und thermischer Istzustand

Die Fläche des untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommens bei Winterthur (Kanton Zürich, Abb. A3.1) beträgt 9.3 km², der Umfang 28 km (Begrenzung Lockergesteins-Grundwasservorkommen zu den Talrändern) und das Gesamtvolumen der Lockergesteine 350 ha³. Nach unten wird das Grundwasservorkommen begrenzt durch die um 2 bis 3 Größenordnungen weniger durchlässigen Pfungener Lehme und Grundmoräne.

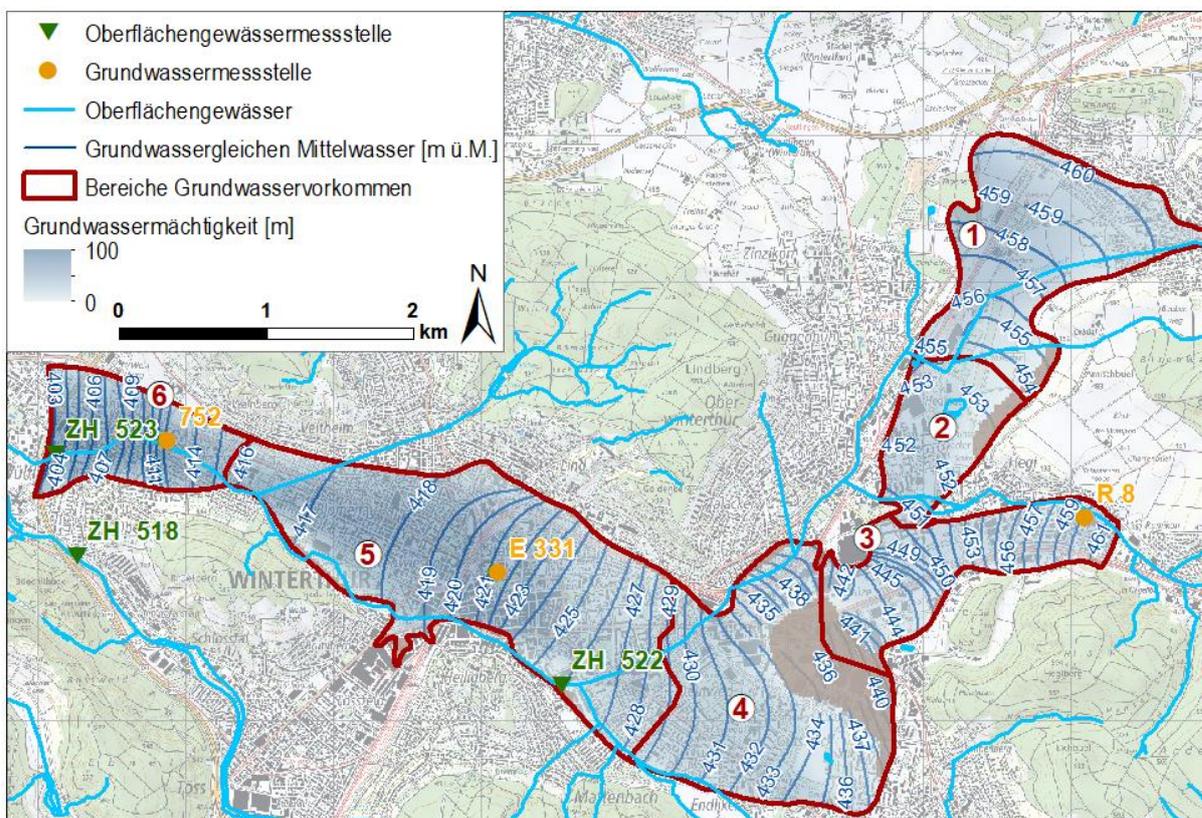


Abb. A3.1: Begrenzung des Lockergesteins-Grundwasservorkommens bei Winterthur (Kanton Zürich). Grundwassergleichen- und -mächtigkeitsdarstellung sowie Grundwasser- und Oberflächengewässermessstationen.

Grundwassermessdaten

Das kantonale Grundwasserüberwachungsprogramm des AWEL ZH umfasst im Bereich des untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommens drei Messstellen mit langjährigen Messungen des Grundwasserspiegels (Daten seit 1983) und der -temperatur (Daten seit 2016; Abb. A3.1).

In den Grundwassermessstellen 331 (Abb. A3.5) als auch 752 (Abb. A3.6) kann ein ausgeprägter saisonaler Verlauf des Grundwasserpegels beobachtet werden, wobei die jährlichen Minima und Maxima nicht eindeutig einer Jahreszeit zugeordnet werden können. Im Beobachtungszeitraum liegt der Maximalpegel in der Grundwassermessstelle 331 bei über 423 m ü.M., der Minimalpegel bei 419.2 m ü.M., die Temperatur des Grundwassers liegt ganzjährig zwischen 13.15 und 13.2 °C und schwankt lediglich im Messauflösungsbereich. Im Beobachtungszeitraum liegt der Maximalpegel in der Grundwassermessstelle 752 bei über 415.5 m ü.M., der Minimalpegel bei 412 m ü.M. Die Temperaturdaten des Grundwassers zeigen einen ausgeprägten saisonalen Verlauf seit Messbeginn im Mai 2016, mit Maxima von bis zu 13.1 °C im November / Dezember und Minima von bis zu 12.5 °C im Mai / Juni.

In der Grundwassermessstelle R8 (Abb. A3.7) ist eine deutliche Reaktion auf Ereignisse mit hohen Abflüssen im Oberflächengewässer Eulach zu beobachten, wobei der Pegel um bis zu

2 m ansteigen kann. Die Temperaturdaten des Grundwassers zeigen einen ausgeprägten saisonalen Verlauf seit Messbeginn im Mai 2016, mit Maxima von bis zu 14.5 °C im Oktober und Minima von bis zu 11.5 °C im April. In Abhängigkeit der Jahreszeit führen Ereignisse mit hohen Abflüssen zeitverzögert zu einer Erhöhung oder Reduktion der Grundwassertemperaturen.

Oberflächengewässerdaten

Das kantonale Überwachungsprogramm des AWEL ZH umfasst im Bereich des untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommens zwei Messstellen in der Eulach (ZH 522 & 523; Abb. A3.1) mit langjährigen Daten des Oberflächengewässerabflusses (Daten seit 1983) und der -temperatur (Daten ZH 522 seit 1992 und ZH 523 seit 2001). Hinzu kommt eine Oberflächengewässermessstelle mit Abflussdaten seit 1983 an der Eulach ca. 1.3 km oberstromig des untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommens (ZH 521; Abb. A3.1)

Der Abfluss an der Oberflächengewässermessstelle ZH 521 (Abb. A3.8) liegt im Mittel bei ca. $0.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ und kann während Ereignissen mit hohen Abflüssen auf fast $25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ansteigen. Der Abfluss an der Oberflächengewässermessstelle ZH 522 (Abb. A3.9) in der Stadt Winterthur unterhalb der Konfluenz der Eulach mit dem Mattenbach liegt im Mittel bei ca. $0.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ und kann während Ereignissen mit hohen Abflüssen auf fast $48 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ansteigen. Die Temperaturen der Oberflächengewässer zeigen einen ausgeprägten saisonalen Verlauf mit Minima im Winter von unter 1 °C und Maxima im Sommer von bis zu 20 °C. Der Abfluss an der Oberflächengewässermessstelle ZH 523 (Abb. A3.10) vor der Konfluenz der Eulach mit der Töss liegt im Mittel bei ca. $0.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ und kann während Ereignissen mit hohen Abflüssen auf über $57 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ansteigen. Die Temperaturen des Oberflächengewässers zeigen einen ausgeprägten saisonalen Verlauf mit Minima im Winter von knapp über 0 °C und Maxima im Sommer von über 23 °C.

2. Aquifergeometrien

Auf Grundlage der Daten zu den Grundwasserhöhen des Kantons für unterschiedliche hydrologische Randbedingungen (mittlere und hohe Grundwasserstände) sowie der Fels- und Geländeoberfläche konnten die Geometrien der grundwassergesättigten und -ungesättigten Lockergesteinsablagerungen abgeleitet werden, welche Rückschlüsse auf die Speichereigenschaften der Grundwasserleiter erlauben. Die Grundwassermächtigkeit in den Lockergesteinen variiert, in Abhängigkeit der hydrologischen Randbedingungen, zwischen 0 und 105 m (Tab. A3.1). Das Volumen der grundwassergesättigten Zone beträgt bei Mittelwasser 228 ha³ und bei hohen Abflüssen 252 ha³. Das Volumen der grundwasserungesättigten Zone ist im Vergleich zum Volumen der grundwassergesättigten Zone nur halb so gross, wobei der Flurabstand zwischen 0 und 30 m variiert.

Tab. A3.1: Aquifergeometrien des Lockergesteins-Grundwasservorkommens bei Winterthur (Kanton Zürich).

Grundwasser		Mächtigkeit			Volumen gesättigte Zone		Volumen ungesättigte Zone		Flurabstand		
		Mittel	Minimum	Maximum	[m ³]	[ha ³]	[m ³]	[ha ³]	Anteil an Gesamtfläche GW-Bereich [%]		
		[m]							[0 - 1 m]	[1 - 10 m]	[10 - 50 m]
Grundwasser	MW	24.5	0.0	100.7	2.3E+08	2.3E+02	1.2E+08	1.2E+02	1.2	34.1	64.7
	HW	27.0	0.0	104.7	2.5E+08	2.5E+02	9.8E+07	9.8E+01	2.7	41.2	56.2

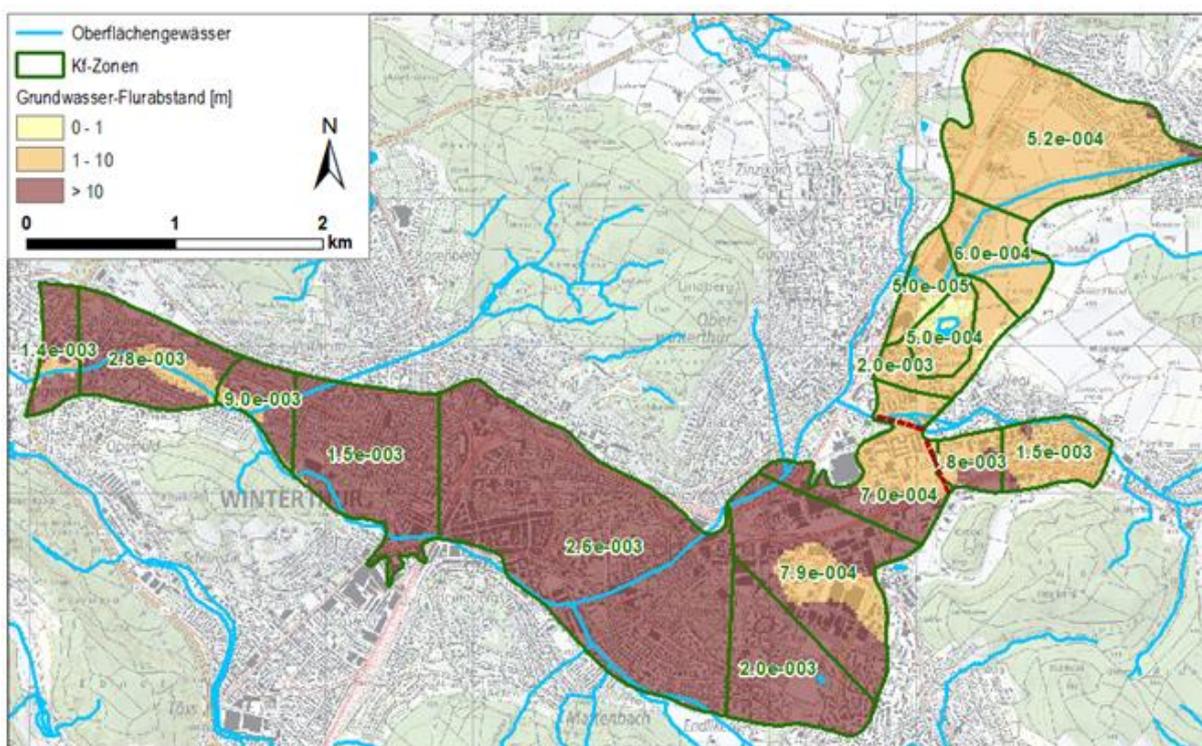


Abb. A3.2: Grundwasserflurabstand des Lockergesteins-Grundwasservorkommens bei Winterthur, einschliesslich Zonierung der Durchlässigkeit der Lockergesteinsablagerungen (K_f -Werte nach Alberich 1997). Rote gestrichelte Linien beschreiben die Bilanzierungsprofile für die Teilströme aus dem Einzugsgebiet des Wiesenbachs (von Norden kommend) und der Eulach (von Osten kommend).

In Abhängigkeit der hydrologischen Randbedingungen liegt für lediglich 1.2 bis 2.7 % der Fläche des Lockergesteins-Grundwasservorkommens der Flurabstand zwischen 0 bis 1 m, für einen Flächenanteil von 34.1 bis 41.2 % zwischen 1 und 10 m und für einen Flächenanteil von 56.2 bis 64.7 % ist dieser grösser 10 m (Tab. A3.1, Abb. A3.2). Somit dominieren, vor allem

für den gesamten südlichen Bereich des Lockergesteins-Grundwasservorkommens, mit Ausnahme der Einzugsgebiete des Wiesenbachs und der Eulach, Flurabstände von über 10 m, für welche weder tägliche noch saisonale Temperaturschwankungen eine Rolle spielen.

Interaktion Oberflächengewässer mit dem Grundwasser

Abbildung A3.3 zeigt einen Querschnitt durch den Grundwasserleiter entlang des Oberflächengewässers Eulach im Bereich des Lockergesteins-Grundwasservorkommens bei Winterthur. Das Grundwasser ist über weite Bereiche vom Fließgewässer durch eine grundwasserunge-sättigte Zone getrennt. Jedoch existieren zwischen Flusslänge 4.8 bis 5.2 km Bereiche, in denen das Grundwasser im Kontakt mit dem Oberflächenwasser stehen kann.

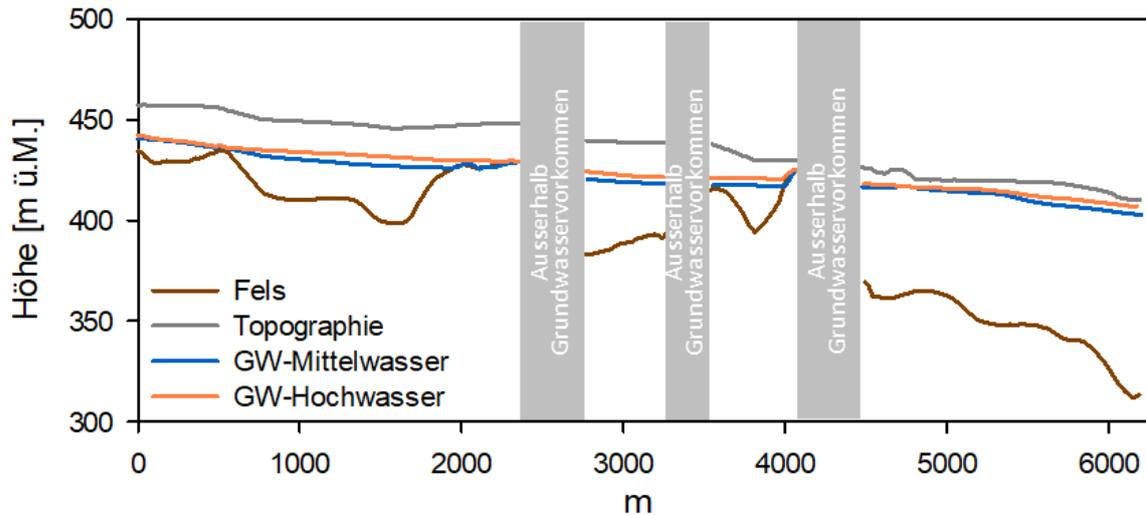


Abb. A3.3: Profil entlang des Oberflächengewässers Eulach im Bereich des Lockergesteins-Grundwasservorkommens bei Winterthur, einschliesslich Topographie, mittlerem und hohem Grundwasserstand sowie der Felsoberfläche.

3. Fliesswege und -zeiten im Grundwasser

Eine Ableitung der Fliesswege und -zeiten im Grundwasser erlaubt eine Abschätzung von Erneuerungsraten und Verweilzeiten und ist Grundlage für eine Beurteilung der Sensitivität der Grundwasservorkommen. Tabelle A3.2 fasst die abgeleiteten Fliesswege und -zeiten für die verschiedenen Bereiche des Lockergesteins-Grundwasservorkommens in Winterthur zusammen. Fliesswege liegen, in Abhängigkeit des betrachteten Bereichs, im Mittel bei 532 bis 1'925 m und maximal bei 1'541 bis 3'732 m. Für einen Vergleich der Fliesszeitenberechnungen, und die für die Filtergeschwindigkeiten nach Darcy, wurde sowohl eine homogene Verteilung der K_f -Werte von $1E-03 \text{ m s}^{-1}$ und $1E-04 \text{ m s}^{-1}$ als auch eine heterogene Verteilung der K_f -Werte (geometrisches Mittel aus 64 Kleinpumpversuchen, Alberich 1997; Abb. A3.2) herangezogen. Für die, für den Wassertransport relevante, Abstandsgeschwindigkeit wurden unterschiedliche effektive Porositäten ($n_{\text{eff}} = 0.1$ und 0.2) berücksichtigt.

Tab. A3.2: Zusammenfassende Statistik der Fliesswege und -zeiten für die verschiedenen Bereiche des Lockergesteins-Grundwasservorkommens bei Winterthur unter Berücksichtigung verschiedener hydraulischer Eigenschaften (k_f , n_{eff}) der Lockergesteine.

		1	2	3	4	5	6
Fläche Bereiche	[m ²]	1.6E+06	6.9E+05	1.1E+06	2.1E+06	3.0E+06	8.1E+05
	[ha]	163.1	68.7	109.9	208.6	299.5	81.5
Anteil Gesamtfläche	[-]	0.18	0.07	0.12	0.22	0.32	0.09
Fliesswege							
Maximum	[m]	1897	1584	2903	3507	3732	1541
Mittel	[m]	881	600	532	1425	1925	705
Standardabweichung	[m]	423	279	339	703	936	353
Fliesszeiten (Filtergeschwindigkeit)							
Mittel (homogen $K_f = 1.0E-03$)	[d]	62.7	18.2	6.6	18.5	51.4	11.1
Mittel (homogen $K_f = 1.0E-04$)	[d]	627.2	181.6	66.3	184.9	513.6	110.8
Mittel (heterogen)	[d]	135.3	73.5	6.9	12.0	24.3	4.2
Fliesszeiten (Abstandsgeschwindigkeit; $n_{\text{eff}} = 0.1$)							
Mittel (homogen $K_f = 1.0E-03$)	[d]	6.3	1.8	0.7	1.8	5.1	1.1
	[h]	150.5	43.6	15.9	44.4	123.3	26.6
Mittel (heterogen)	[d]	13.5	7.4	0.7	1.2	2.4	0.4
	[h]	324.7	176.5	16.5	28.9	58.4	10.2
Fliesszeiten (Abstandsgeschwindigkeit; $n_{\text{eff}} = 0.2$)							
Mittel (homogen $K_f = 1.0E-03$)	[d]	12.5	3.6	1.3	3.7	10.3	2.2
Mittel (heterogen)	[d]	27.1	14.7	1.4	2.4	4.9	0.8

Der grosse Wertebereich der hydraulischen Eigenschaften (siehe oben) resultiert in einer grossen Spannweite der ermittelten Fliesszeiten unter Berücksichtigung von Filter- und Abstandsgeschwindigkeiten. Als ein „realistisches“ Szenario für die mittlere Geschwindigkeit des Wassertransports wird im Folgenden jenes mit einer homogenen Verteilung der hydraulische Durchlässigkeitswerte von $1E-03 \text{ m s}^{-1}$ als auch die heterogene Verteilung der Durchlässigkeitswerte sowie einer Porosität $n_{\text{eff}} = 0.1$ betrachtet. Für den mittleren Durchsatz durch das gesamte Grundwasservorkommen (Bereiche 1 bis 6) ergeben sich somit 17 Tage (homogene Verteilung hydraulische Durchlässigkeitswerte) und 26 Tage (heterogene Verteilung Durchlässigkeitswerte).

Abbildung A3.4 zeigt die Verteilung der abgeleiteten Fliesszeiten für die verschiedenen Bereiche des Lockergesteins-Grundwasservorkommens als Histogramme, einschliesslich Häufigkeiten in verschiedenen Klassenbereichen und kumulierte Häufigkeiten.

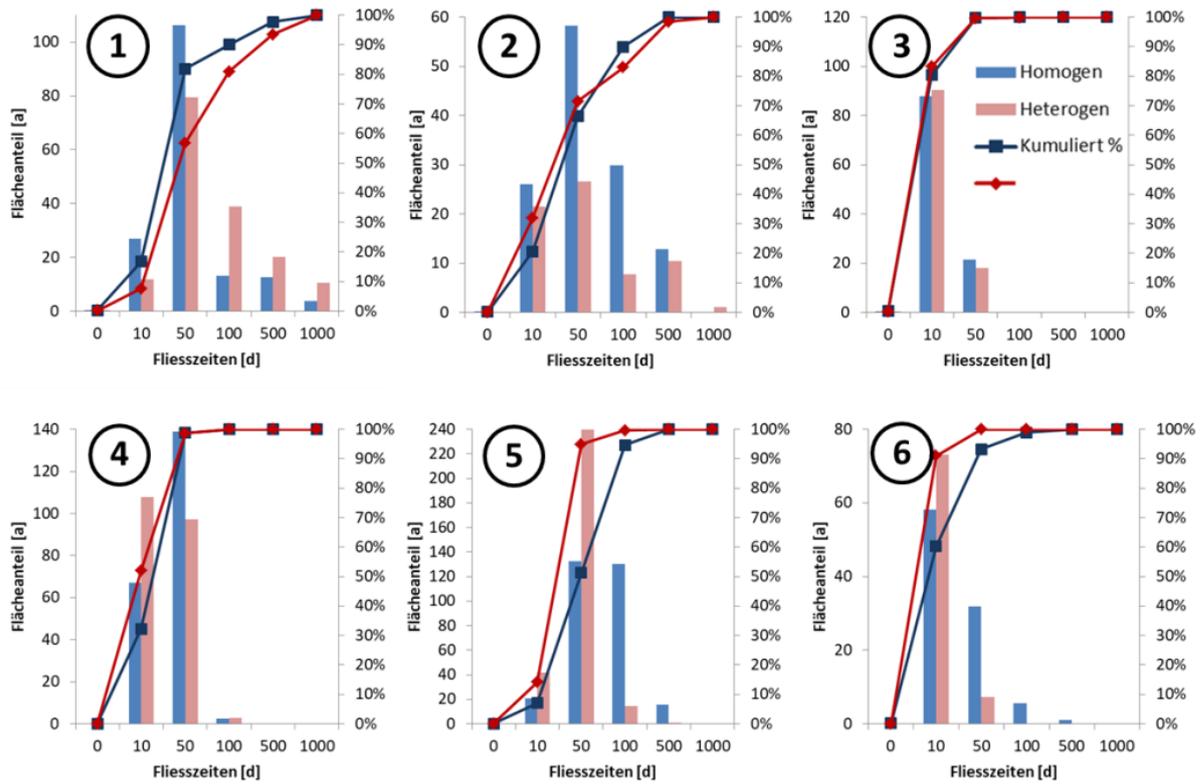


Abb. A3.4: Histogramme der abgeleiteten Fliehszeiten (Statistik Fliehsdistanzen siehe Tab. A3.2) unter Berücksichtigung homogener und heterogener Durchlässigkeiten der Lockergesteine und für die verschiedenen Bereiche (1-6) des Lockergesteins-Grundwasservorkommens in Winterthur (Abb. A3.1). Häufigkeiten in den Klassenbereichen mit unterschiedlichen y-Achsen; Kumulierte Häufigkeiten beziehen sich alle auf die y-Achse ganz rechts (0-100%).

4. Grundwasserneubildung – Grundwasserbilanz

Regionaler Grundwasserzu- und -abstrom

Als Resultat der Grundwassermodellierung von Alberich (1997) konnten Wasserbilanzen durch definierte Querschnitte berechnet werden (Abb. A3.2), so beträgt der Grundwasserzu- und abstrom, in Abhängigkeit verschiedener Modellvarianten, aus dem Einzugsgebiet des Wiesenbachs 640 bis 1'150 l s⁻¹ (Basismodel 920 l s⁻¹) und aus dem Einzugsgebiet der Eulach 170 bis 2'580 l s⁻¹ (Basismodel 2'500 l s⁻¹). Der Verlauf und die Höhenverteilung der Grundwasser- und abstromen aus der Arbeit von Alberich (1997) entsprechen, mehr oder weniger, der Grundwasser- und abstromvergleichendarstellung des Kantons.

Zustrom über die seitlichen Hangeinzugsgebiete

Da die Hänge um das Winterthurer Tal zum grössten Teil bebaut sind, sind die meisten Hang- und abflüsse gefasst und ca. 57 l s⁻¹ in die Kanalisation geleitet. Lediglich ca. 22 l s⁻¹ speisen noch das Grundwasser (Alberich 1997). Diese Mengen sind in der Gesamtwasserbilanz vernachlässigbar.

Grundwasserneubildung aus versickerndem Niederschlagswasser

Unter Annahme einer jährlichen Niederschlagssumme von 1'178 mm, einer Verdunstungshöhe von 554 mm (Einzugsgebiet der Eulach bis Winterthur CHZH-009, Normperiode 1981 – 2010; <https://hydromaps.ch>) sowie der Fläche des untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommens von ca. 9.3 km² ergeben sich eine grob geschätzte flächige Grundwasserneubildung von 180 l s⁻¹. Hinzu kommt eine weitere Verringerung der flächigen Grundwasserneubildung in urbanisierten Bereichen mit starker Oberflächenversiegelung. Im Vergleich zum regionalen Grundwasserzu- und abstrom (siehe oben), und wahrscheinlich auch zur noch nicht quantifizierten Interaktion mit Oberflächengewässern, ist die flächige Grundwasserneubildung aus versickerndem Niederschlagswasser vergleichsweise gering.

5. Auswirkungen Klimaänderungen

Für die Evaluation der klimabedingten Veränderung der verschiedenen Grundwasserneubildungskomponenten wurde ein Schwerpunkt auf die im Rahmen von Hydro-CH2018 erarbeitete Klimaprojektion MPI-M-MPI-ESM-LRr1i1p1SMHI-RCA4, einschliesslich der 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), gelegt.

Grundwasserneubildung aus versickerndem Niederschlagswasser - Entwicklung der Niederschläge und Temperaturprägung

Abbildung A3.5 zeigt die saisonale Verteilung der Niederschläge und Temperaturen als auch jährlich kumulierte Niederschläge für die Referenzjahre 2000, 2055 und 2085 für den Meteo-Schweiz Standort Tänikon im Kanton Thurgau (Abb. 4.1.1). Tabelle A3.5 beschreibt die Saisonalität (gewöhnliches Kalenderjahr) der Niederschlagssummen und Temperaturen.

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass die Niederschläge, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios und des Zeitpunktes, um maximal 3 % abnehmen (RCP26, Jahr 2085) oder 7 % zunehmen (RCP45, Jahr 2055). Die meisten Niederschläge fallen in den Monaten Juli, September und Februar. Wohingegen, für die betrachteten Klimaprojektionen die Niederschläge im Juli und September tendenziell abnehmen, nehmen diese im Februar und vor allem auch im März tendenziell zu. Dies würde bedeuten, auch unter Berücksichtigung höherer Evapotranspirationsverluste im Sommer, dass die Grundwasserneubildung vermehrt in vergleichsweise „kälteren“ Monaten stattfindet, welche mit einer tendenziellen Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“).

Die Lufttemperaturen nehmen, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios und des Zeitpunktes, um 1.1 °C (RCP26, Jahr 2085 und RCP45, Jahr 2055) bis maximal 3.6 °C (RCP85, Jahr 2085) zu. Die Veränderungen der Lufttemperaturen werden mit einer Verzögerung die Grundwassertemperaturen beeinflussen.

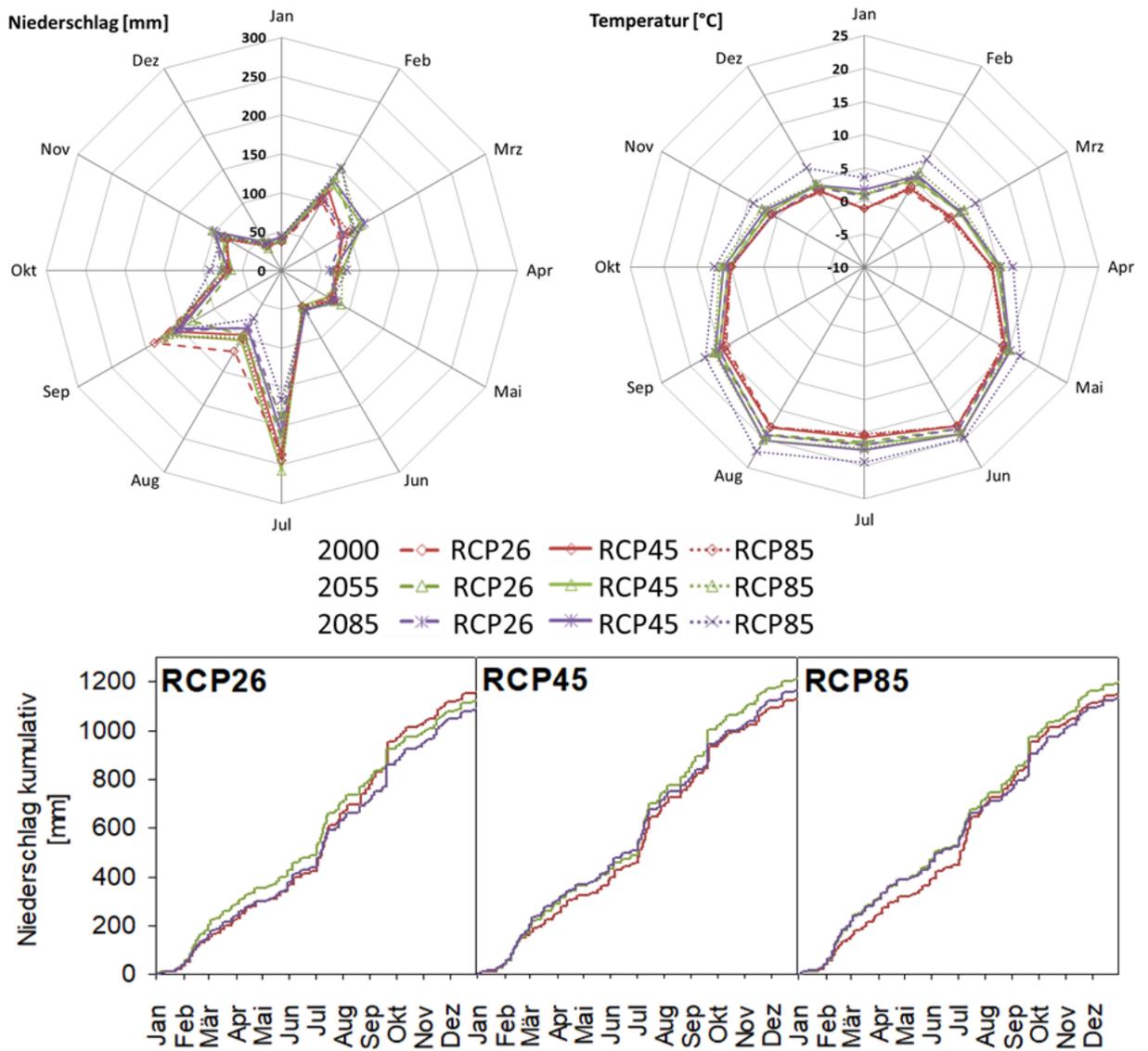


Abb. A3.5: MeteoSchweiz Standort TAE. Oben: Polardarstellung der simulierten monatlichen Niederschlags- und Temperaturverteilung. Unten: kumulierte Niederschlagssummen.

Tab. A3.3: Saisonalität (gewöhnliches Kalenderjahr) der Niederschlagssummen und Temperaturen für den MeteoSchweiz Standort TAE.

		Niederschlagssumme [mm]			Temperaturen [°C]		
		2000	2055	2085	2000	2055	2085
RCP26	MAM	230	250	231	9.3	10.5	10.5
	JJA	412	371	339	17.0	17.9	18.1
	SON	340	279	329	9.9	11.1	10.4
	DJF	175	224	187	1.7	3.4	3.4
	Summe	1157	1124	1086	-	-	-
	Mittel	-	-	-	9.5	10.8	10.6
	Veränderung [%; °C]	-	0	-3	-	1.3	1.1
RCP45	MAM	235	263	268	9.5	10.5	10.7
	JJA	391	415	356	17.1	18.4	19.0
	SON	305	326	318	10.1	10.7	11.3
	DJF	194	204	219	1.9	3.5	4.0
	Summe	1125	1208	1162	-	-	-
	Mittel	-	-	-	9.7	10.8	11.3
	Veränderung [%; °C]	-	7	3	-	1.1	1.6
RCP85	MAM	249	279	264	9.2	10.9	12.8
	JJA	399	339	299	17.0	18.8	20.5
	SON	321	350	333	10.0	11.8	13.0
	DJF	179	226	235	2.1	4.0	6.5
	Summe	1148	1194	1132	-	-	-
	Mittel	-	-	-	9.6	11.4	13.2
	Veränderung [%; °C]	-	6	1	-	1.8	3.6

Frühling (MAM: März, April und Mai), Sommer (JJA: Juni, Juli und August), Herbst (SON: September, Oktober und November) und Winter (DJF: Dezember, Januar und Februar)

Entwicklung Abflussregime und Temperaturprägung

Abbildung A3.6 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse der von der EPFL durchgeführten hydrologischen Modellierung (Abflussmengen und Fliessgewässertemperaturen) für die Emissionsszenarien RCP26, RCP45 und RCP85 für einen Standort an der Eulach (Abb. 4.1.1).

(E) Eulach (2'695'050 / 1'262'760)

Die Ergebnisse der Simulationen für die Eulach zeigen, dass die Abflussmengen in den Monaten Januar bis März (Ausnahme RCP26, Jahr 2085) tendenziell und, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios, um 17 bis 41 % zunehmen werden. In den Monaten April bis Juni werden für die Emissionsszenarien RCP26 und RCP45 nur geringfügige Veränderungen der Abflussmengen erwartet. Für das Emissionsszenarien RCP85 hingegen nehmen die prognostizierten Abflussmengen um 14 bis 17 % zu. Hingegen kann für die Monate Juli bis September (Ausnahme RCP45, Jahr 2055) tendenziell eine Abnahme der Abflussmengen von 18 bis 43 %, beobachtet werden. In den Monaten Oktober bis Dezember (Ausnahme RCP26, Jahr 2055) nehmen die Abflussmengen um 11 bis 28 % wieder tendenziell zu. Dies würde bedeuten, auch unter Berücksichtigung höherer Evapotranspirationsverluste im Sommer, dass sich in den Sommermonaten die Grundwasserneubildung über die Fliessgewässerinfiltration reduziert und weniger vergleichsweise „warmes“ Oberflächenwasser in den Grundwasserleiter infiltriert. Demgegenüber würde vermehrt vergleichsweise „kälteres“ Oberflächenwasser in den Wintermonaten in den Grundwasserleiter infiltrieren, was tendenziell mit einer Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“). Zudem zeigt die Auswertung der saisonalen Abflussdauerlinien (hydrologisches Jahr), dass vor allem für die Monate Juli bis September und für alle betrachteten Emissionsszenarien weniger Ereignisse mit hohen Abflüssen stattfinden werden. Unter Annahme, dass die quantitative Grundwasserneubildung und die einhergehende Temperaturprägung von Grundwasservorkommen hauptsächlich bei "charakteristischen" Ereignissen mit hohen Abflüssen (Intensität &

Dauer) erfolgt, verstärkt dieser Effekt nochmals den „negativen Rückkopplungsmechanismus“ und eine tendenzielle Abkühlung von Grundwasserressourcen.

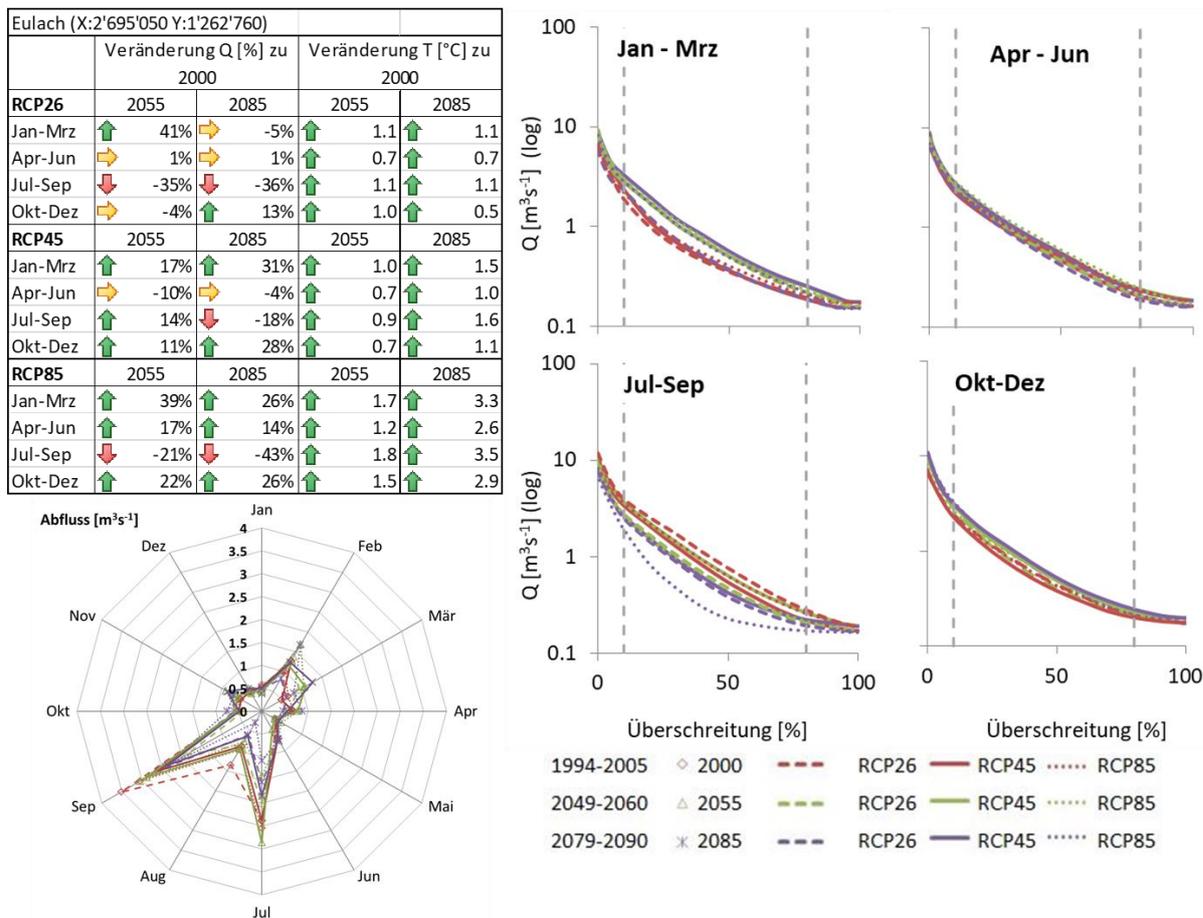


Abb. A3.6: Ergebnisse der hydrologischen Modellierung und der Abflussmengen und Fließgewässertemperaturen der Eulach. Oben links: Relative Veränderung der modellierten Abflussmengen und Fließgewässertemperaturen für die Jahre 2055 und 2085 im Verhältnis zum Jahr 2000. Unten links: Polardarstellung der monatlichen Abflussmengen. Rechts: Saisonale (hydrologisches Jahr) Abflussdauerlinien (grau gestrichelt: 10 und 80 % Überschreitung).

Grundlagedaten

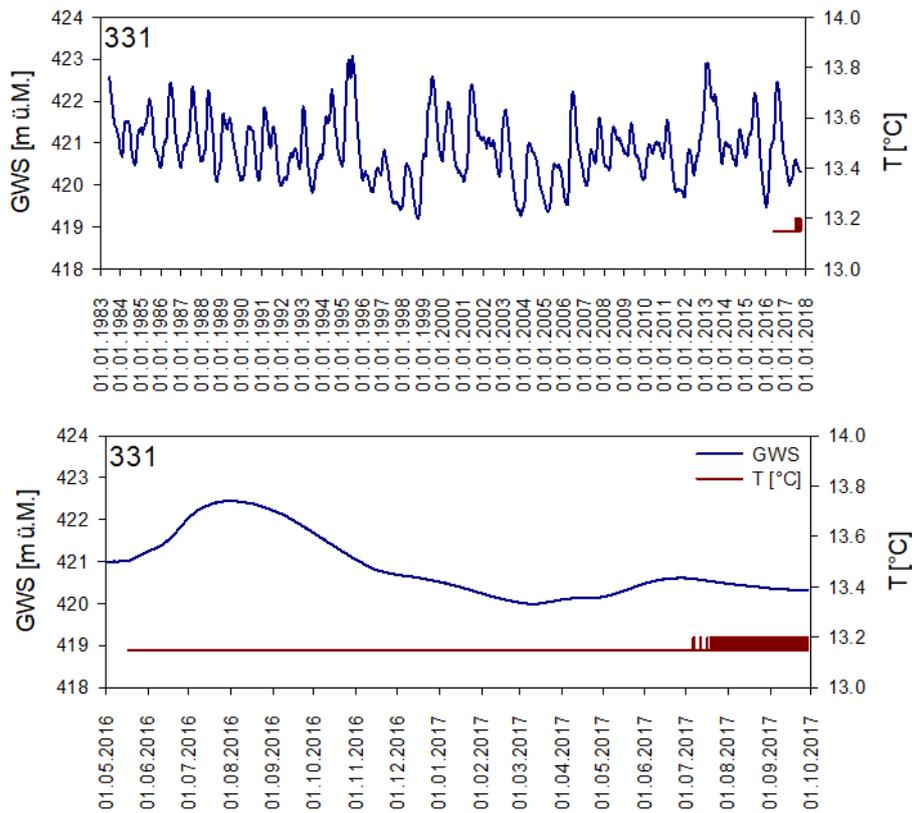


Abb. A3.5: Pegel und Temperaturmessung Grundwassermessstelle 331 (Abb. A3.1)

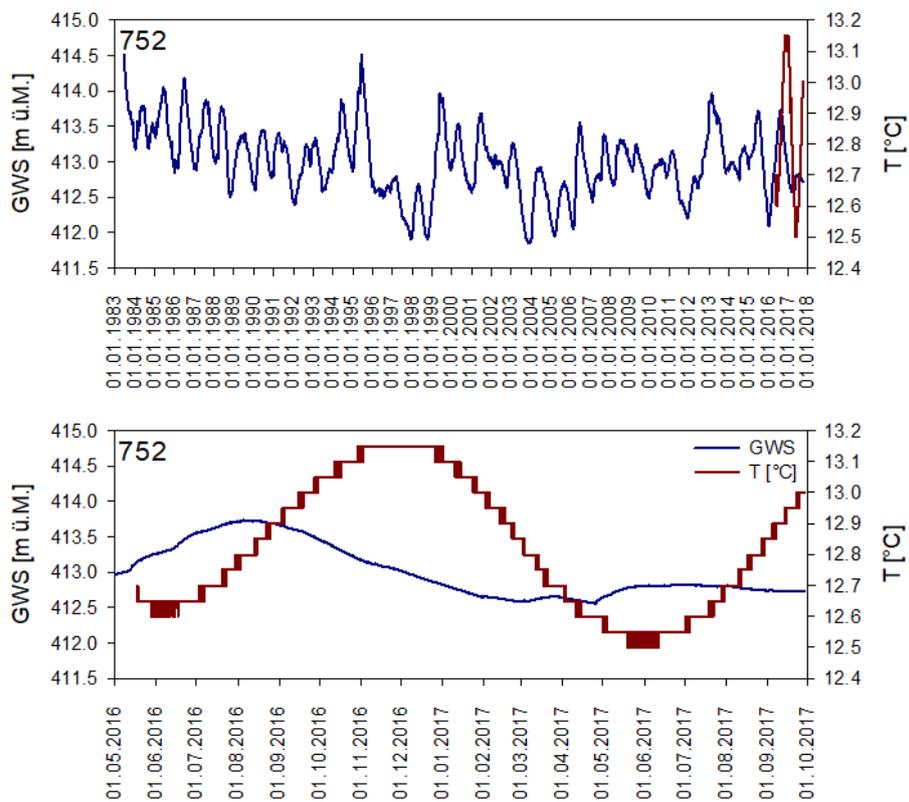


Abb. A3.6: Pegel und Temperaturmessung Grundwassermessstelle 752 (Abb. A3.1)

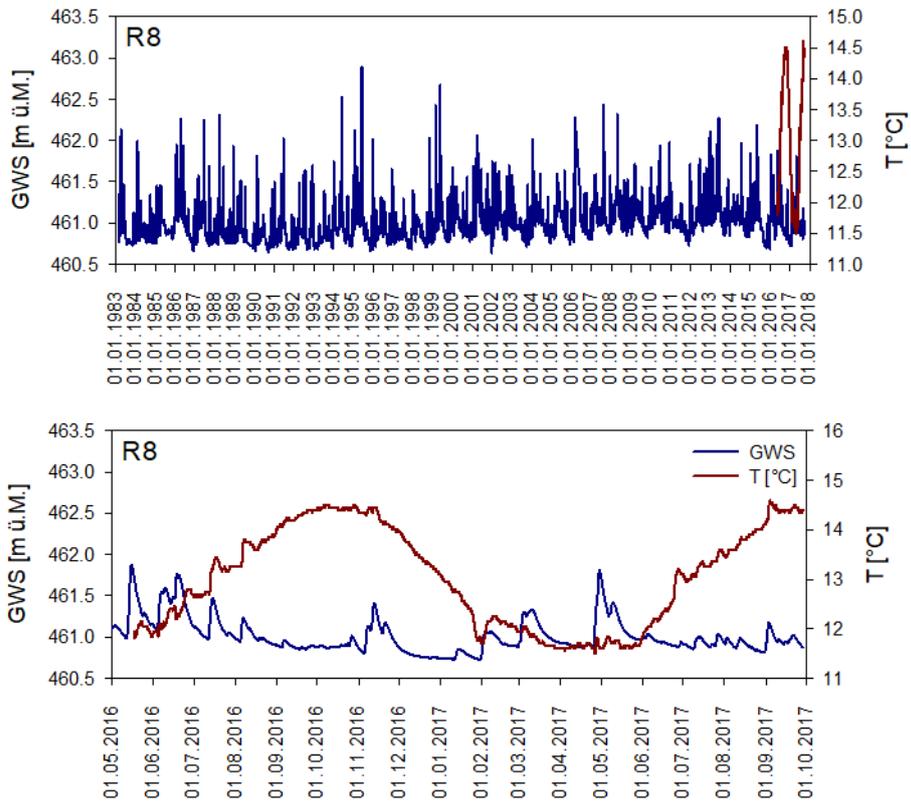


Abb. A3.7: Pegel und Temperaturmessung Grundwassermessstelle R8 (Abb. A3.1)

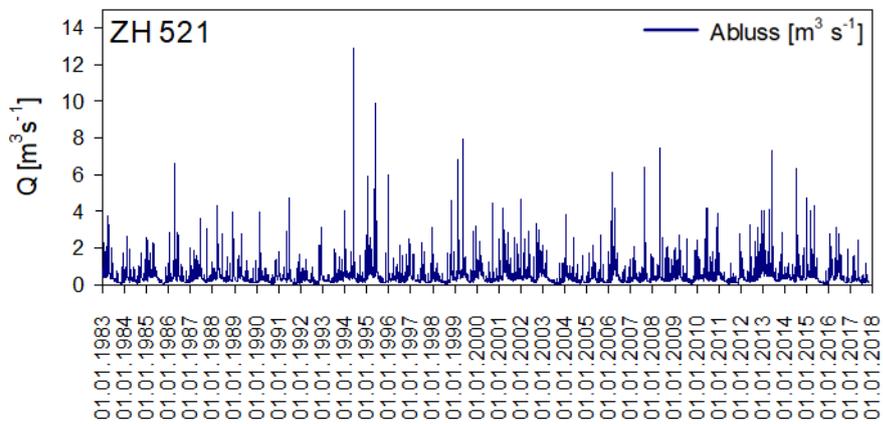


Abb. A3.8: Abfluss- und Temperaturmessung Oberflächengewässermessstelle ZH 522 (Abb. A3.1)

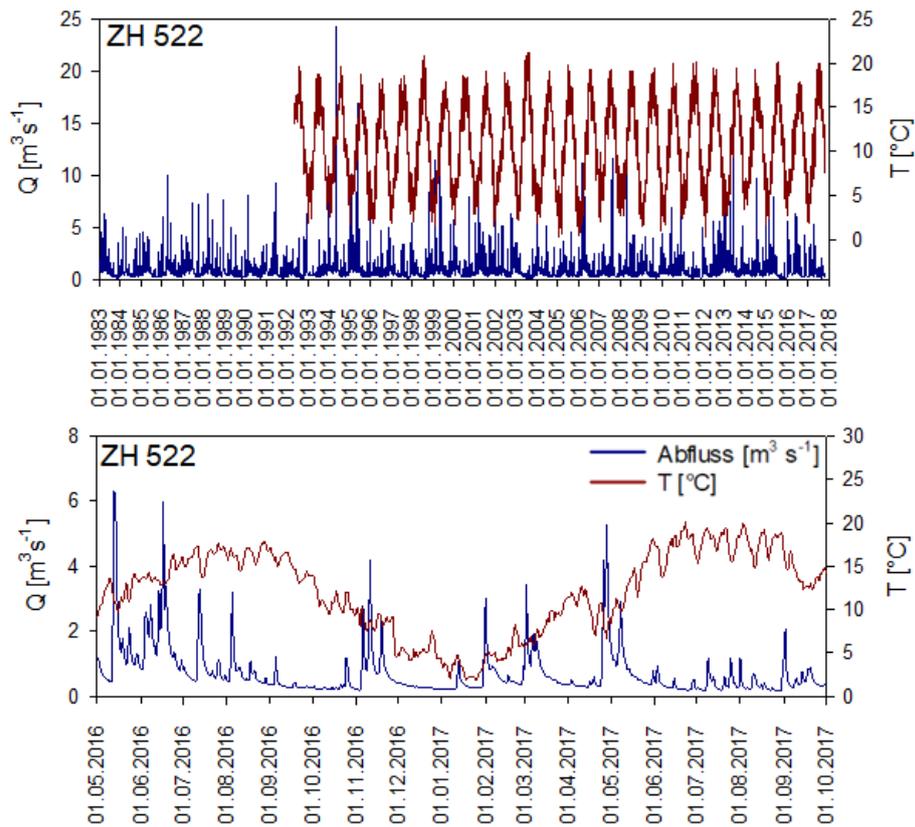


Abb. A3.9: Abfluss- und Temperaturmessung Oberflächengewässermessstelle ZH 522 (Abb. A3.1)

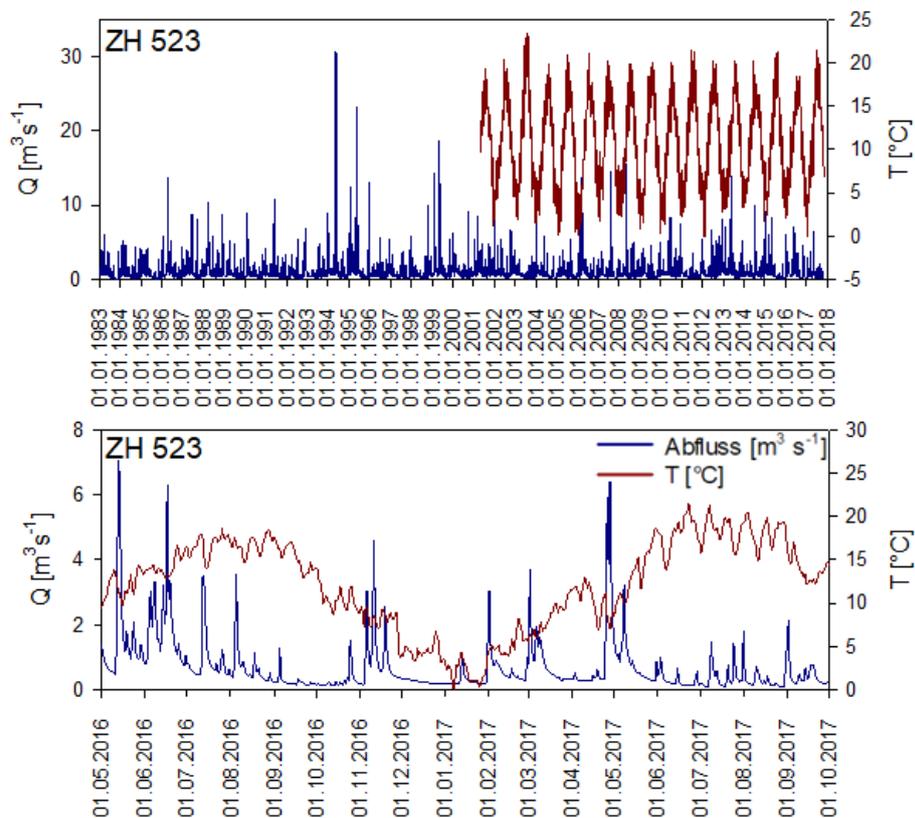


Abb. A3.10: Abflussmessungen Oberflächengewässermessstelle ZH 523 (Abb. A3.1)

Anhang A4: Lockergesteins-Grundwasservorkommen Biel (Kanton Bern)

Datengrundlage

- *Topografie: LST-Daten 0.5 m Auflösung (GeoPortal des Kantons Bern)*
- *Felsoberfläche (Geoportal des Kantons Bern)*
- *Grundwassergleichen für Mittelwasser 0.5 – 1 m Auflösung (Bau- Verkehrs- und Energiedirektion Amt für Geoinformation, Geoportal des Kantons Bern)*
- *Datenreihen Grundwasserspiegelhöhen und -temperaturen, Wasserstand, Abfluss und Temperaturen Fliessgewässer (kantonales Überwachungsprogramm Amt für Wasser und Abfall AWA)*
- *Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:100000. Blatt 4, Biel/Bienne, Erläuterungen. Hrsg. Schweizer Geotechnische Kommission, Bern (Hauber and Pfirter 1992)*

1. Hydraulischer und thermischer Istzustand

Die Fläche des untersuchten Grundwasservorkommens bei Biel (Kanton Bern, Abb. A4.1) beträgt 8.2 km², der Umfang (Begrenzung Lockergesteins-Grundwasservorkommen zu den Talrändern) 24 km und das Gesamtvolumen der Lockergesteine 610 ha³. Nach unten wird das teilweise gespannte Grundwasservorkommen begrenzt durch die im Vergleich zu den Lockergesteinsablagerungen um mehrere Grössenordnungen weniger durchlässige Untere und Obere Süsswassermolasse (USM und OSM) und gegen Norden durch die Kalke und Dolomite des Juras. Durch in den Lockergesteinen zwischengeschaltete oft tonige Seeablagerungen können gespannte Grundwasserverhältnisse vorliegen.

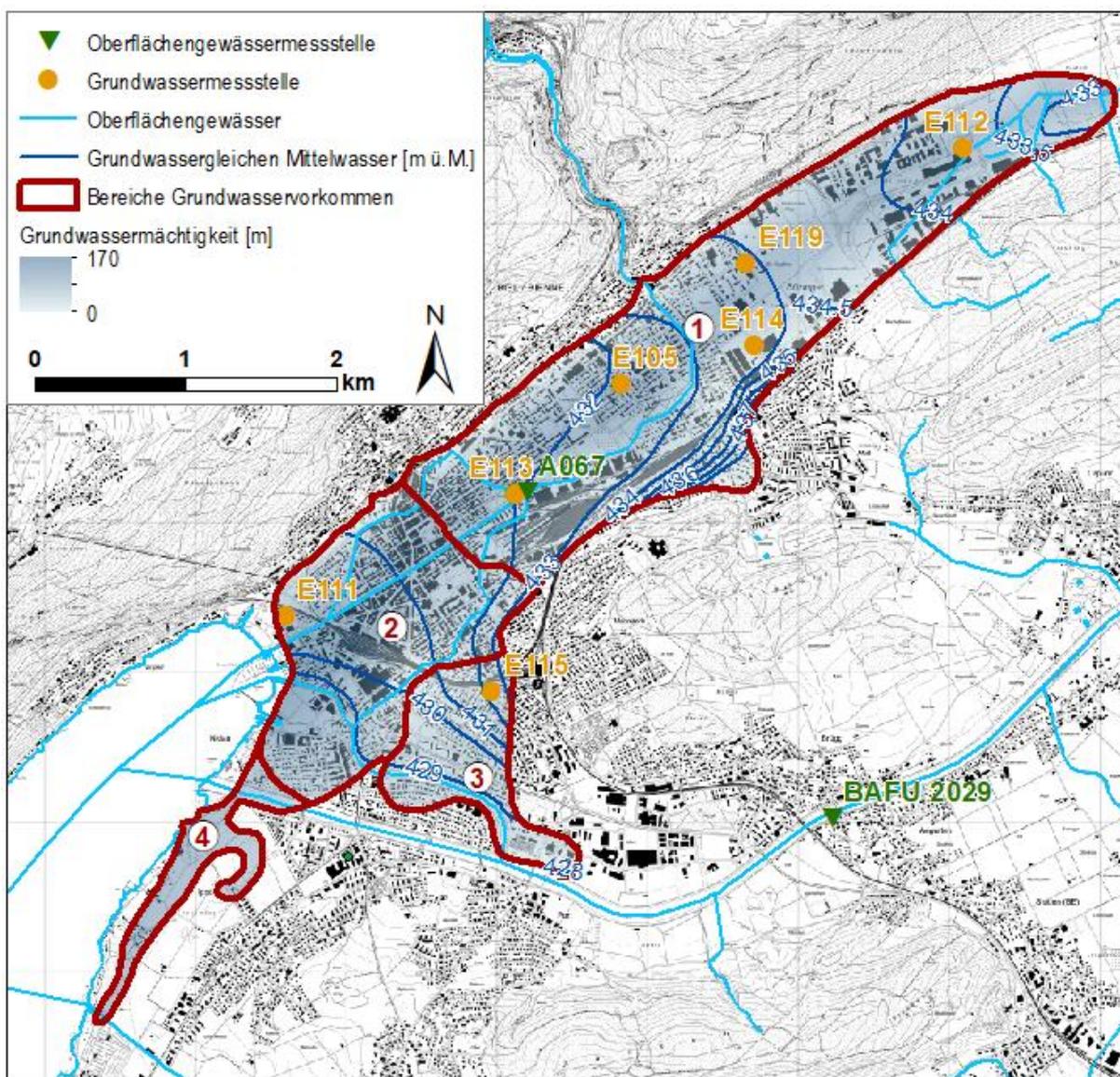


Abb. A4.1: Begrenzung des Lockergesteins-Grundwasservorkommens bei Biel (Kanton Bern). Grundwassergleichen- und -mächtigkeitsdarstellung sowie Grundwasser- und Oberflächengewässermessstationen.

Grundwassermessdaten

Das kantonale Überwachungsprogramm des Amtes für Wasser und Abfall AWA BE umfasst im Bereich des untersuchten Grundwasservorkommens sechs aktive und eine inaktive Messstelle mit langjährigen Messungen des Grundwasserspiegels und der -temperaturen (Abb. A4.1). Generell zeigen sowohl die Grundwasserpegel- als auch die Temperaturverläufe der meisten

Messstellen eine hohe Instationarität und mehr oder weniger starke Trends hin zu Temperaturerhöhungen. Die Grundwassermessdaten, einschliesslich Statistik, können direkt über <https://www.map.apps.be.ch> abgerufen werden.

In der Grundwassermessstelle E105 kann ein ausgeprägter saisonaler Verlauf des Grundwasserpegels (Daten seit 2001) beobachtet werden, wobei die jährlichen Maxima meist im März / April und die Minima im Sommer und Herbst auftreten. Die Grundwasserspiegelschwankungen können mehr als 2 m betragen und deuten auf gespannte Grundwasserverhältnisse hin. Auch die Temperaturdaten des Grundwassers zeigen einem ausgeprägten saisonalen Verlauf seit Messbeginn im 2006. Von 2008 bis 2012 lagen die Temperaturschwankungen des Grundwassers zwischen 11.3 und 12.8 °C mit Maxima im Januar / Februar und Minima im Juli / August. Seit 2013 sind die Temperaturschwankungen des Grundwassers grösser und liegen zwischen 12.8 und über 18 °C, mit Temperaturmaxima im Sommer / Herbst und -minima im Winter / Frühling. Der abrupte Wechsel des Temperaturregimes liegt wahrscheinlich in einer betrieblichen Veränderung einer 200 m oberstromig liegenden Grundwassernutzung begründet. Die betriebliche Änderung kann somit auch zu einer Veränderung der Grundwasserkomponenten (Oberflächengewässerinfiltrat, Karstwasser) geführt haben.

In den Grundwassermessstellen E111 kann ein saisonaler Verlauf des Grundwasserpegels (Daten seit 2002) beobachtet werden, wobei die jährlichen Maxima zwischen März und August und zwei Minima im November und Februar auftreten. Die Grundwasserspiegelschwankungen sind vergleichsweise klein und liegen meist unter 0.5 m. Weiterhin konnte ein signifikanter negativer Trend hin zu fallenden Grundwasserpegeln (ca. 0.005 m a⁻¹) abgeleitet werden. Auch die Temperaturdaten des Grundwassers zeigen einem ausgeprägten saisonalen Verlauf seit Messbeginn im 2006. Im ersten Jahr nach Messbeginn stiegen die Temperaturen im September 2006 auf bis zu 14 °C an und fielen im März 2007 auf fast 10.6 °C ab. Von 2008 bis 2018 lagen die Temperaturen des Grundwassers zwischen 11.4 und fast 13 °C mit Maxima im Dezember / Januar und Minima im März / April. Weiterhin kann seit 2011 ein signifikanter positiver Trend hin zu steigenden Grundwassertemperaturen (ca. 0.2 °C a⁻¹) abgeleitet werden.

Auch in der Grundwassermessstelle E112 kann ein saisonaler Verlauf des Grundwasserpegels (Daten seit 2002) beobachtet werden, wobei die jährlichen Maxima oft im Januar und Minima im Oktober auftreten (Retardation des atmosphärischen thermischen Signals über die ungesättigte Zone). Für einzelne Jahre kann dieses Regime jedoch abweichen. Die Grundwasserspiegelschwankungen können grösser 2 m betragen und deuten auf gespannten Grundwasserverhältnisse hin. Weiterhin konnte ein signifikanter negativer Trend der Grundwasserpegel (ca. 0.03 m a⁻¹) beobachtet werden. Im ersten Jahr nach Messbeginn stiegen die Temperaturen des Grundwassers im Oktober 2006 auf über 16 °C an und fielen im März 2007 auf fast 11.7 °C ab. In den Folgejahren ist kein saisonaler Verlauf der Grundwassertemperaturen zu erkennen, hingegen können kurzfristige Temperaturschwankungen beobachtet werden. Von 2007 bis 2018 kann ein signifikanter positiver Trend der Grundwassertemperaturen (ca. 0.3 °C a⁻¹) beobachtet werden.

In der Grundwassermessstelle E113 ist kein eindeutiger saisonaler Verlauf des Grundwasserpegels (Daten seit 2008) zu beobachten, wobei die jährlichen Maxima oft im Januar und Minima im Oktober / November auftreten. Für einzelne Jahre kann dieses Regime jedoch abweichen. Die Grundwasserspiegelschwankungen können grösser 1.5 m betragen. Die Temperaturdaten des Grundwassers hingegen zeigen einem ausgeprägten saisonalen Verlauf seit Messbeginn mit Maxima im Herbst und Minima im Frühling und Sommer. Temperaturen des Grundwassers schwanken im Jahr 2010 zwischen 6.5 und über 14 °C und in den Folgejahren zwischen nur 9.2 und 14.5 °C. Es kann ein leichter positiver Trend der Grundwassertemperaturen beobachtet werden.

In der Grundwassermessstelle E115 ist kein eindeutiger saisonaler Verlauf des Grundwasserpegels (Daten seit 2005) zu beobachten, wobei die jährlichen Maxima oft im April / Mai und Minima im Oktober auftreten. Für einzelne Jahre kann dieses Regime jedoch abweichen. Die Grundwasserspiegelschwankungen liegen unter 1 m. Die Temperaturdaten des Grundwassers hingegen zeigen einem ausgeprägten gleichmässigen saisonalen Verlauf mit Maxima im

November und Minima im April. Temperaturen liegen zwischen 10 und 14 °C. Ab 2010 kann ein signifikanter positiver Trend (ca. 0.2 °C a⁻¹) abgeleitet werden.

In der Grundwassermessstelle E119 ist kein eindeutiger saisonaler Verlauf des Grundwasserspiegels (Daten seit 2014) zu beobachten. Die Grundwasserspiegelschwankungen können mehr als 3 m betragen und deuten auf gespannte Grundwasserverhältnisse hin. Die Temperaturdaten zeigen einem leichten saisonalen Verlauf mit Temperaturmaxima im Februar bis April und Minima im Spätsommer / Herbst und deuten auf die Interaktion verschiedener Zuflussbereiche hin. Die Temperaturen des Grundwassers schwanken lediglich zwischen 11.7 und 12.4 °C.

Oberflächengewässerdaten

Die AWA-Messstelle Suze – Biel-Bienne, Hauserwehr (A067, Daten seit 2000) befindet sich im Zentrum des untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommens. Der mittlere Abfluss im Jahr 2017 lag bei 4.43 m³ s⁻¹. Der Abfluss kann bei Hochwasserereignissen auf über 80 m³ s⁻¹ ansteigen (letztmalig 2007). Temperaturdaten des Oberflächenwassers am Standort dieser Messstelle liegen leider nicht vor.

2. Aquifergeometrien

Auf Grundlage der Daten zu den Grundwasserhöhen des Kantons für mittlere hydrologische Randbedingungen sowie der Fels- und Geländeoberfläche konnten die Geometrien der grundwassergesättigten und -ungesättigten Lockergesteinsablagerungen abgeleitet werden, welche Rückschlüsse auf die Speichereigenschaften der Grundwasserleiter erlauben. Die Grundwassermächtigkeit in den Lockergesteinen variiert zwischen 0 m in den Randbereichen des gespannten Lockergestein-Grundwasservorkommens und bis zu 167 m in der Nähe des Bieler Sees an der südwestlichen Begrenzung des Lockergestein-Grundwasservorkommens, hier fällt auch die Felsoberfläche stark ab (Tab. A4.1). Das Volumen der grundwassergesättigten Zone liegt bei 577 ha³. Das Volumen der grundwasserungesättigten Zone ist im Vergleich zum Volumen der grundwassergesättigten Zone nur ein Viertel so gross, wobei der Flurabstand zwischen 0 und fast 16 m variiert.

Für lediglich etwa 2 % der Fläche des Lockergestein-Grundwasservorkommens liegt der Flurabstand zwischen 0 bis 1 m (Tab. A4.1, Abb. A4.2). Für einen Flächenanteil von etwa 91 % liegt der Flurabstand zwischen 1 und 10 m und für einen Flächenanteil von etwa 7 % ist der Flurabstand grösser 10 m.

Tab. A4.1: Aquifergeometrien des Lockergesteins-Grundwasservorkommens bei Biel (Kanton Bern).

		Mächtigkeit			Volumen gesättigte Zone		Volumen ungesättigte Zone		Flurabstand		
		Mittel	Minimum	Maximum	[m ³]	[ha ³]	[m ³]	[ha ³]	Anteil an Gesamtfläche GW-Bereich [%]		
		[m]							[0 -1 m]	[1 -10 m]	[10 -50 m]
Grundwasser	MW	71.7	0.0	166.8	5.8E+08	5.8E+02	1.3E+08	1.3E+02	2.1	90.6	7.3

Interaktion Oberflächengewässer mit dem Grundwasser

Abbildung A4.3 zeigt einen Querschnitt durch den Grundwasserleiter entlang des Oberflächengewässers Suze im Bereich des Lockergesteins-Grundwasservorkommens bei Biel. Die Mächtigkeit der ungesättigten Zone unterhalb des Fliessgewässers nimmt vom Zufluss in das Lockergesteins-Grundwasservorkommen bis zur Mündung in den Bieler See von etwa 10 auf nahezu 0 m ab. Somit existieren, vor allem während hohen Abflüssen, Bereiche, in denen das Grundwasser im Kontakt mit dem Oberflächenwasser stehen kann.

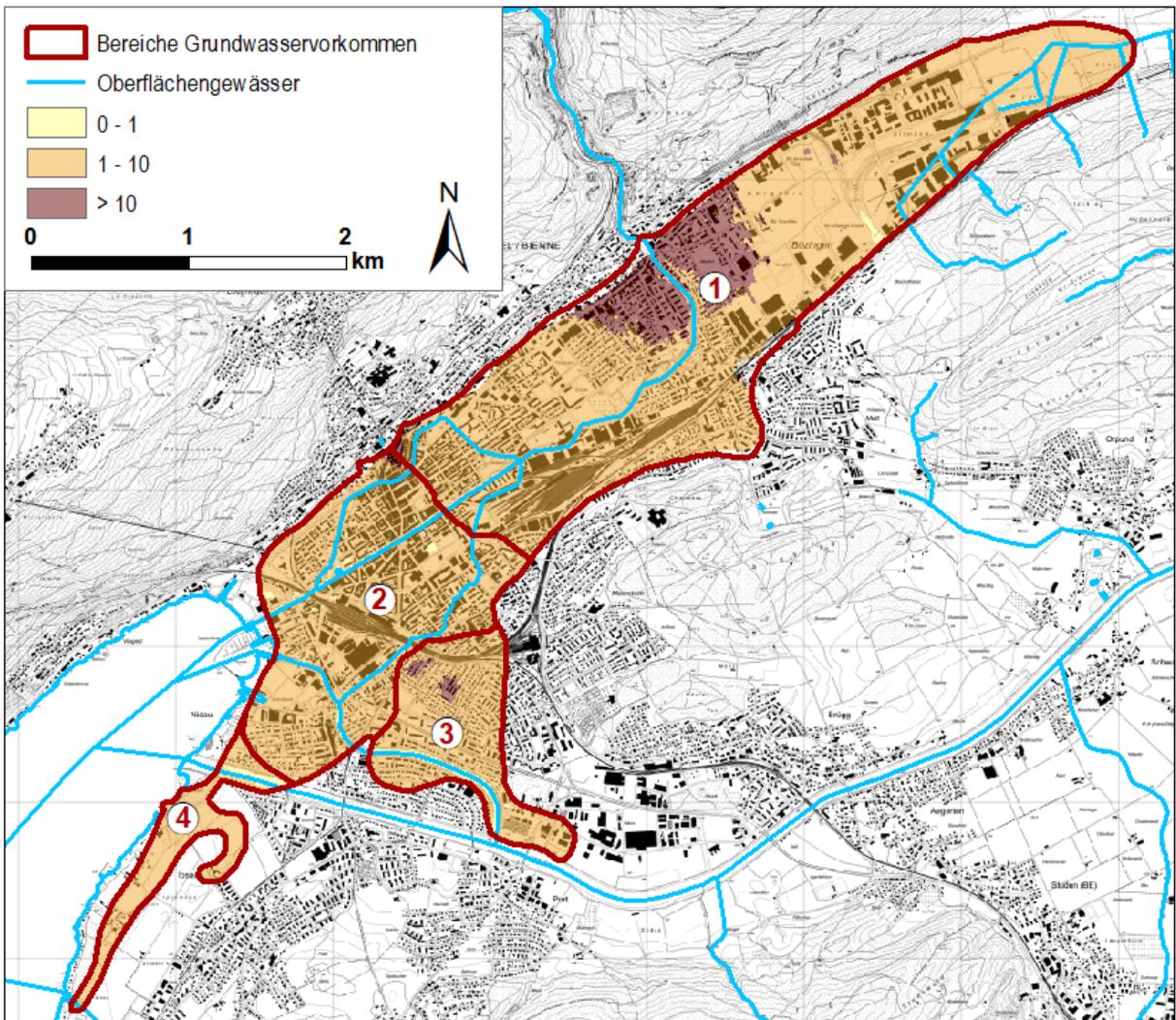


Abb. A4.2: Grundwasserflurabstand des Lockergesteins-Grundwasservorkommens bei Biel.

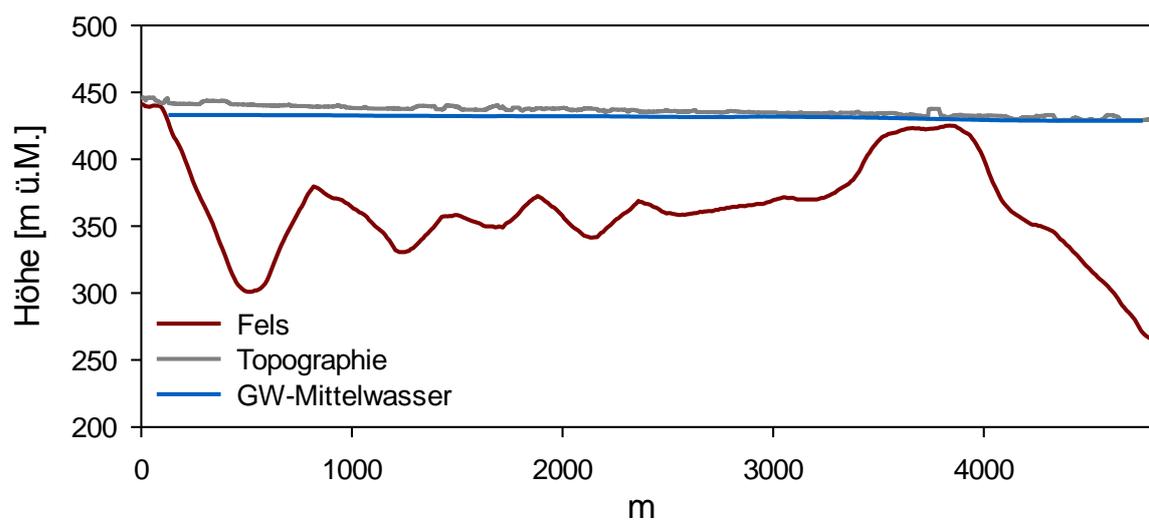


Abb. A4.3: Profil entlang des Oberflächengewässers Suze im Bereich des Lockergesteins-Grundwasservorkommens bei Biel, einschliesslich Topographie, mittlerem Grundwasserstand und Felsoberfläche.

3. Fließwege und -zeiten im Grundwasser

Eine Ableitung der Fließwege und -zeiten erlaubt eine Abschätzung von Erneuerungsraten und Verweilzeiten und ist Grundlage für eine Beurteilung der Sensitivität der Grundwasservorkommen. Tabelle A4.2 fasst die abgeleiteten Fließwege und -zeiten für die verschiedenen Bereiche des Lockergestein-Grundwasservorkommens in Biel zusammen. Fließwege liegen, in Abhängigkeit des betrachteten Bereichs im Mittel bei ca. 823 bis 2'837 m und maximal bei ca. 2'424 bis 5'365 m. Zur Evaluation der Fließzeiten wurden sowohl unterschiedliche hydraulische Durchlässigkeitswerte (zwischen $1\text{E-}03\text{ ms}^{-1}$ und $1\text{E-}04\text{ ms}^{-1}$) und die Filtergeschwindigkeiten nach Darcy als auch die, für den Wassertransport relevante, Abstandsgeschwindigkeit unter Berücksichtigung unterschiedlicher effektiver Porositäten ($n_{\text{eff}} = 0.1$ und 0.2) berücksichtigt.

Der grosse Wertebereich der hydraulischen Eigenschaften resultiert in einer grossen Spannweite der ermittelten Fließzeiten unter Berücksichtigung von Filter- und Abstandsgeschwindigkeiten. Als ein „realistisches“ Szenario für die mittlere Geschwindigkeit des Wassertransports wird im Folgenden jenes mit einer homogenen Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeitswerte von $1\text{E-}03\text{ m s}^{-1}$ sowie einer Porosität $n_{\text{eff}} = 0.1$ betrachtet. Für den mittleren Durchsatz durch das gesamte Grundwasservorkommen ergeben sich somit ca. 61.4 Tage.

Tab. A4.2: Zusammenfassende Statistik der Fließwege und -zeiten für die verschiedenen Bereiche des Lockergesteins-Grundwasservorkommens bei Biel unter Berücksichtigung verschiedener hydraulischer Eigenschaften (k_f , n_{eff}) der Lockergesteine.

		1	2	3	4
Fläche Bereiche	[m ²]	4.9E+06	2.0E+06	8.5E+05	4.4E+05
	[ha]	489.6	204.4	85.3	44.0
Anteil Gesamtfläche	[-]	0.59	0.25	0.10	0.05
Fließwege					
Maximum	[m]	5365	4820	4213	2424
Mittel	[m]	1656	2837	823	977
Standardabweichung	[m]	950	1388	959	669
Fließzeiten (Filtergeschwindigkeit)					
Mittel (homogen $K_f = 1.0\text{E-}03$)	[d]	439.8	142.4	17.1	15.1
Mittel (homogen $K_f = 1.0\text{E-}04$)	[d]	4397.8	4397.8	4397.8	4397.8
Mittel (Zonierung)	[d]	135.3	73.5	6.9	12.0
Fließzeiten (Abstandsgeschwindigkeit; $n_{\text{eff}} = 0.1$)					
Mittel (homogen $K_f = 1.0\text{E-}03$)	[d]	44.0	14.2	1.7	1.5
	[h]	1055	342	41	36
Fließzeiten (Abstandsgeschwindigkeit; $n_{\text{eff}} = 0.2$)					
Mittel (homogen $K_f = 1.0\text{E-}03$)	[d]	22.0	7.1	0.9	0.8
Mittel (Zonierung)	[d]	26	9	1	1

Abbildung A4.4 zeigt die Verteilung der abgeleiteten Fließzeiten für die verschiedenen Bereiche des Lockergesteins-Grundwasservorkommens als Histogramme, einschliesslich Häufigkeiten in verschiedenen Klassenbereichen und kumulierte Häufigkeiten.

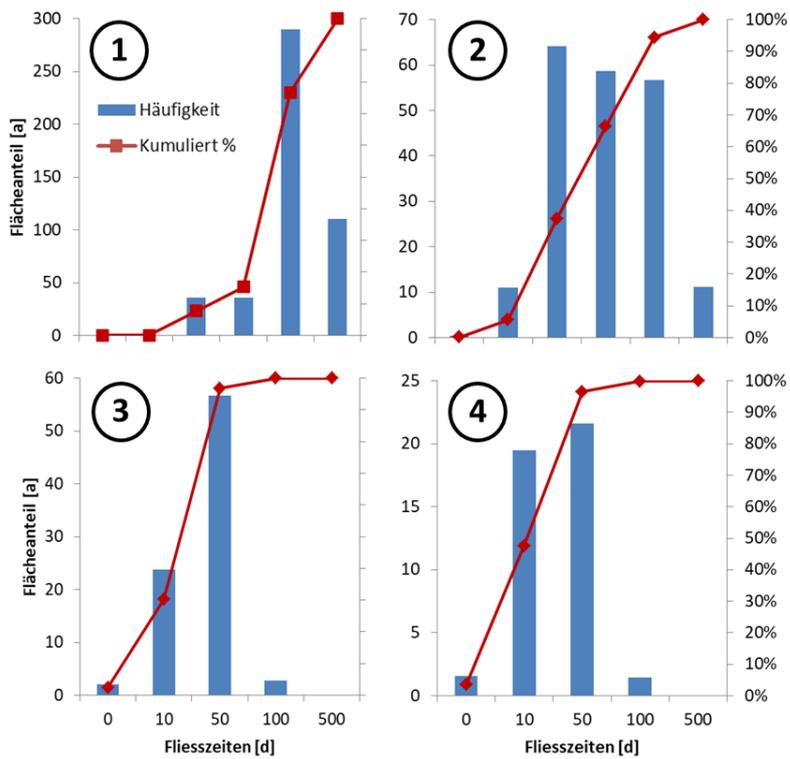


Abb. A4.4: Histogramme der abgeleiteten Fließzeiten (Statistik Fließsdistanzen siehe Tab. A4.2) unter Berücksichtigung homogener hydraulischer Durchlässigkeit der Lockergesteine und für die verschiedenen Bereiche (1-4) des Lockergesteins-Grundwasservorkommens bei Biel (Abb. A4.1). Häufigkeiten in den Klassenbereichen mit unterschiedlichen y-Achsen; Kumulierte Häufigkeiten beziehen sich alle auf die y-Achse ganz rechts (0-100%).

4. Grundwasserneubildung

Regionaler Grundwasserzu- und -abstrom / Zustrom über die seitlichen Hangeinzugsgebiete

Das Lockergesteins-Grundwasservorkommen bei Biel ist lokal begrenzt und steht nicht im Kontakt mit weiteren, grösseren Lockergesteins-Grundwasservorkommen der Aare.

Da die Hänge um das Lockergesteins-Grundwasservorkommen bei Biel zum grössten Teil bebaut sind, sind die meisten Hangzuflüsse gefasst und ein Zustrom über die seitlichen Hangeinzugsgebiete in der Gesamtwasserbilanz vernachlässigbar.

Weiterhin können unterirdische, artesisch gespannte, Zuflüsse zum Lockergesteins-Grundwasservorkommen durch die Verkarstungen der Kalke und Dolomite existieren.

Grundwasserneubildung aus versickerndem Niederschlagswasser

Unter Annahme einer jährlichen Niederschlagssumme von 1411 mm, einer Verdunstungshöhe von 497 mm (Einzugsgebiet der Suze bei Biel 137897, Normperiode 1981 – 2010; <https://hydromaps.ch>) sowie der Fläche des untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommens von ca. 8.2 km² ergeben sich eine geschätzte flächige Grundwasserneubildung von 240 l s⁻¹.

5. Auswirkungen Klimaänderungen

Für die Evaluation der klimabedingten Veränderung der verschiedenen Grundwasserneubildungskomponenten wurde ein Schwerpunkt auf die im Rahmen von Hydro-CH2018 erarbeitete Klimaprojektion MPI-M-MPI-ESM-LRr1i1p1SMHI-RCA4, einschliesslich der 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), gelegt.

Grundwasserneubildung - Entwicklung der Niederschläge und Temperaturprägung

Abbildung A4.5 und A4.6 zeigen die saisonale Verteilung der Niederschläge und Temperaturen als auch jährlich kumulierte Niederschläge für die Jahre 2000, 2055 und 2085 für die MeteSchweiz Standorte Neuchâtel und Chasseral im Kanton Bern. Tabellen A4.3 und A4.4 beschreibt die Saisonalität (gewöhnliches Kalenderjahr) der Niederschlagssummen und Temperaturen. Wohingegen der Standort Neuchâtel charakteristisch auch für die Situation im Stadtgebiet von Biel ist, ist der Standort Chasseral eher charakteristisch für das Einzugsgebiet der Suze.

Die Ergebnisse der Simulation für den Standort Neuchâtel zeigen, dass die Niederschläge tendenziell und, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios, um maximal 11 % zunehmen (RCP45, Jahr 2055). Die meisten Niederschläge fallen in den Monaten Oktober bis Dezember. Für die betrachteten Klimaprojektionen nehmen die Niederschläge in diesen Monaten tendenziell ab. Dies würde bedeuten, dass die Grundwasserneubildung vermehrt in vergleichsweise „kälteren“ Monaten stattfindet, welche mit einer tendenziellen Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“).

Die Lufttemperaturen für den Standort Neuchâtel nehmen, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios und des Zeitpunktes, um 1.0 °C (RCP26, Jahr 2085) bis maximal 3.5 °C (RCP85, Jahr 2085) zu. Die Veränderungen der Lufttemperaturen werden mit einer zeitlichen Verzögerung die Grundwassertemperaturen beeinflussen.

Die Ergebnisse der Simulation für den Standort Chasseral zeigen, dass die Niederschläge tendenziell und, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios, um maximal 11 % zunehmen (RCP45, Jahr 2055). Die meisten Niederschläge fallen in den Monaten Februar und Mai. In beiden Monaten nehmen, für die betrachteten Klimaprojektionen, die Niederschläge tendenziell zu. Mehr Niederschlag im Februar würde bedeuten, dass die Grundwasserneubildung vermehrt in vergleichsweise „kälteren“ Monaten stattfindet, welche mit einer tendenziellen Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“). Hingegen würde mehr Niederschlag im Mai bedeuten, dass die Grundwasserneubildung vermehrt in vergleichsweise „wärmeren“ Monaten stattfindet, welche mit einer tendenziellen Erwärmung des Grundwassers einhergehen würde („positiver Rückkopplungsmechanismus“).

Die Lufttemperaturen für den Standort Chasseral nehmen, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios und des Zeitpunktes, um 1.1 °C (RCP26, Jahr 2085 und RCP45, Jahr 2055) bis maximal 3.9 °C (RCP85, Jahr 2085) zu. Die Veränderungen der Lufttemperaturen werden mit einer Verzögerung die Grundwassertemperaturen beeinflussen.

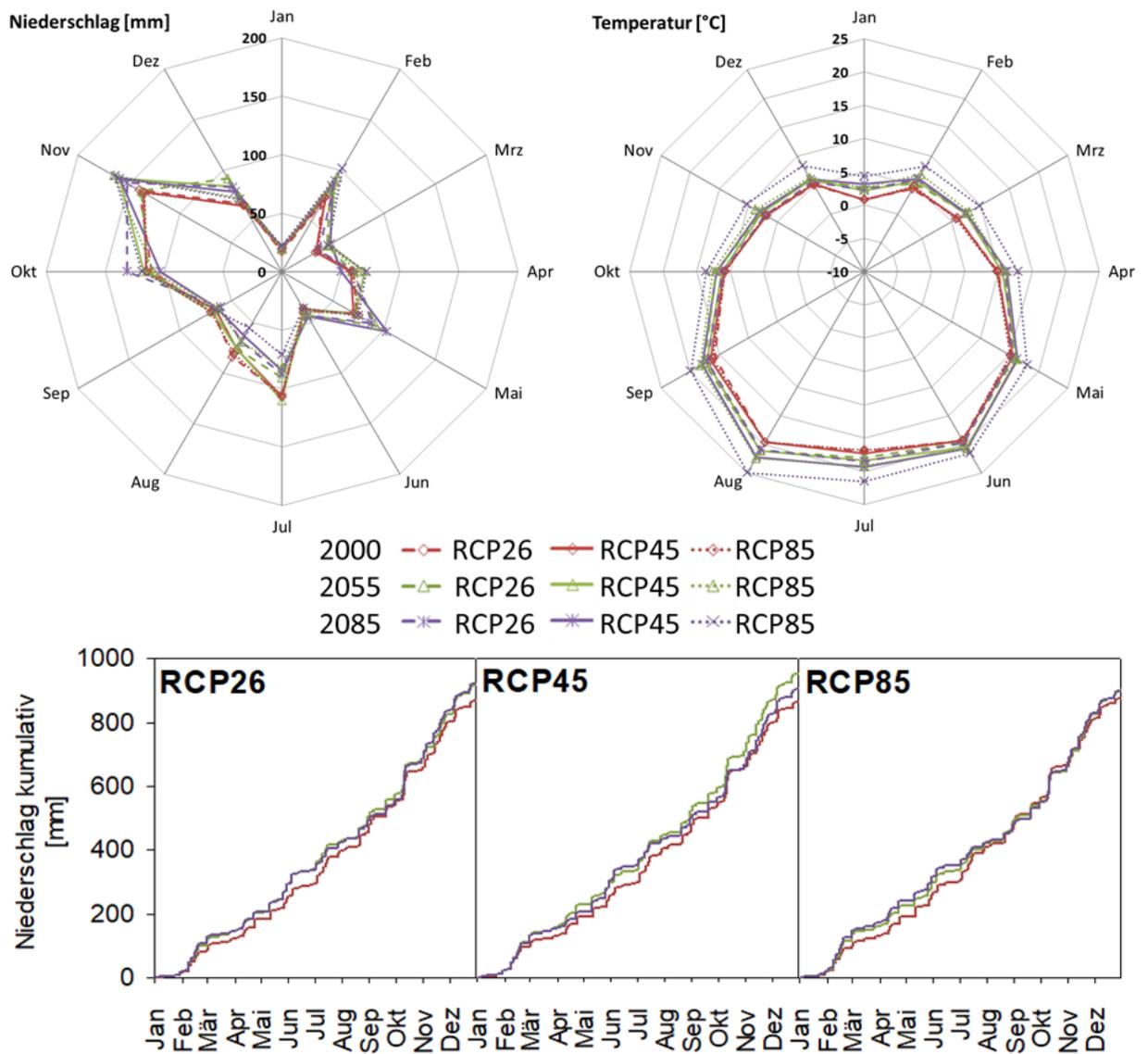


Abb. A4.5: MeteoSchweiz Standort NEU. Polardarstellung der simulierten monatlichen Niederschlags- und Temperaturverteilung. Unten: kumulierte Niederschlagssummen.

Tab. A4.3: Saisonalität (gewöhnliches Kalenderjahr) der Niederschlagssummen und Temperaturen für den MeteoSchweiz Standort NEU.

		Niederschlagssumme [mm]			Temperaturen [°C]		
		2000	2055	2085	2000	2055	2085
RCP26	MAM	168	196	185	10.4	11.5	11.3
	JJA	228	210	199	18.6	19.5	19.7
	SON	318	318	343	11.2	12.5	11.8
	DJF	151	193	193	3.4	4.6	4.6
	Summe	865	916	921	-	-	-
	Mittel	-	-	-	10.9	12.1	11.9
	Veränderung [%; °C]	-	7	7	-	1.2	1.0
RCP45	MAM	161	189	200	10.5	11.4	11.7
	JJA	221	223	192	18.7	20.0	20.7
	SON	317	345	326	11.4	12.0	12.7
	DJF	158	193	184	3.5	4.6	5.1
	Summe	858	951	902	-	-	-
	Mittel	-	-	-	11.0	12.1	12.6
	Veränderung [%; °C]	-	11	5	-	1.1	1.6
RCP85	MAM	170	183	192	10.2	11.7	13.6
	JJA	225	191	163	18.6	20.8	22.6
	SON	319	336	348	11.3	13.2	14.6
	DJF	158	186	196	3.6	5.2	7.0
	Summe	872	896	898	-	-	-
	Mittel	-	-	-	11.0	12.8	14.5
	Veränderung [%; °C]	-	4	5	-	1.8	3.5

Frühling (MAM: März, April und Mai), Sommer (JJA: Juni, Juli und August), Herbst (SON: September, Oktober und November) und Winter (DJF: Dezember, Januar und Februar)

Suze (X:2587255 Y:1222236)						
	Veränderung Q [%] zu				Veränderung T [°C] zu	
	2000		2000		2000	
	2055	2085	2055	2085	2055	2085
RCP26						
Jan-Mrz	↑ 43%	↑ 48%	↑ 1.1	↑ 1.1		
Apr-Jun	↓ 3%	↓ 2%	↑ 0.7	↑ 0.7		
Jul-Sep	↓ -18%	↓ -29%	↑ 1.1	↑ 1.1		
Okt-Dez	↑ 9%	↑ 16%	↑ 1.0	↑ 0.5		
RCP45						
Jan-Mrz	↑ 38%	↑ 32%	↑ 1.0	↑ 1.5		
Apr-Jun	↑ 0%	↑ 16%	↑ 0.7	↑ 1.0		
Jul-Sep	↓ 2%	↓ -32%	↑ 0.9	↑ 1.6		
Okt-Dez	↑ 16%	↑ 9%	↑ 0.7	↑ 1.1		
RCP85						
Jan-Mrz	↑ 33%	↑ 30%	↑ 1.3	↑ 3.3		
Apr-Jun	↓ -7%	↓ -6%	↑ 1.3	↑ 2.6		
Jul-Sep	↓ -35%	↓ -56%	↑ 2.0	↑ 3.5		
Okt-Dez	↓ -1%	↑ 11%	↑ 1.6	↑ 2.9		

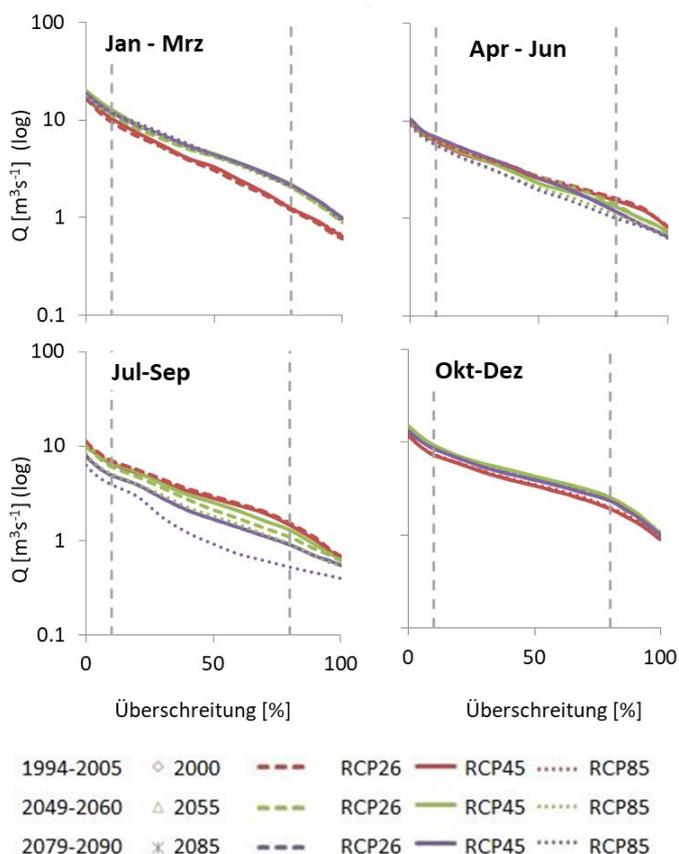
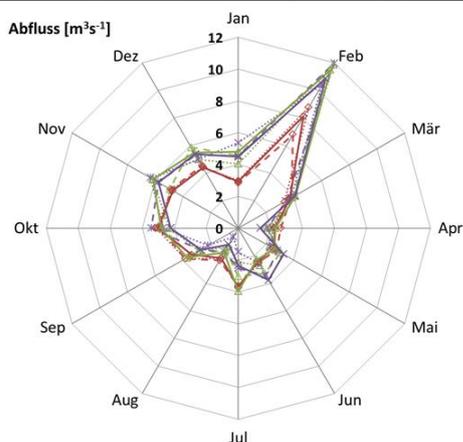


Abb. A4.6: MeteoSchweiz Standort CHA. Polardarstellung der simulierten monatlichen Niederschlags- und Temperaturverteilung. Unten: kumulierte Niederschlagssummen.

Tab. A4.4: Saisonalität (gewöhnliches Kalenderjahr) der Niederschlagssummen und Temperaturen für den MeteoSchweiz Standort CHA.

		Niederschlagssumme [mm]			Temperaturen [°C]		
		2000	2055	2085	2000	2055	2085
RCP26	MAM	234	276	258	2.7	3.8	3.7
	JJA	278	254	239	11.1	12.2	12.4
	SON	301	302	314	4.8	6.1	5.4
	DJF	305	375	387	-1.8	-0.3	-0.4
	Summe	1118	1208	1199	-	-	-
	Mittel	-	-	-	4.2	5.5	5.3
	Veränderung [%; °C]	-	7	7	-	1.3	1.1
RCP45	MAM	225	260	290	2.8	3.8	4.1
	JJA	270	271	226	11.3	12.7	13.6
	SON	298	320	302	5.0	5.7	6.4
	DJF	331	391	374	-1.6	-0.3	0.2
	Summe	1124	1242	1192	-	-	-
	Mittel	-	-	-	4.4	5.5	6.1
	Veränderung [%; °C]	-	11	6	-	1.1	1.7
RCP85	MAM	236	253	260	2.5	4.1	6.2
	JJA	273	228	193	11.1	13.7	15.8
	SON	304	308	316	4.9	6.9	8.4
	DJF	326	382	413	-1.5	0.4	2.4
	Summe	1138	1171	1182	-	-	-
	Mittel	-	-	-	4.3	6.3	8.2
	Veränderung [%; °C]	-	4	5	-	2.0	3.9

Frühling (MAM: März, April und Mai), Sommer (JJA: Juni, Juli und August), Herbst (SON: September, Oktober und November) und Winter (DJF: Dezember, Januar und Februar)

Entwicklung Abflussregime und Temperaturprägung

Abbildung A3.6 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse der von der EPFL durchgeführten hydrologischen Modellierung (Abflussmengen und Fliessgewässertemperaturen) für die Emissionsszenarien RCP26, RCP45 und RCP85 für einen Standort an der Suze (Abb. 4.1.1).

(F) Suze (2'587'255 / 1'222'236)

Die Ergebnisse der Simulationen für die Suze zeigen, dass die Abflussmengen in den Monaten Januar bis März tendenziell um 30 bis 48 % zunehmen werden. In den Monaten April bis Juni (Ausnahme RCP45, Jahr 2085) werden nur geringfügige Veränderungen der Abflussmengen erwartet. Hingegen kann für die Monate Juli bis September (Ausnahme RCP45, Jahr 2055) tendenziell eine Abnahme der Abflussmengen von 18 bis 56 %, beobachtet werden. In den Monaten Oktober bis Dezember sind, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios und des Zeitpunktes, entweder nur geringfügige Veränderungen oder tendenziell zunehmende Abflussmengen von bis zu 11 bis 16 % zu erwarten. Dies würde bedeuten, auch unter Berücksichtigung höherer Evapotranspirationsverluste im Sommer, dass sich in den Sommermonaten die Grundwasserneubildung über die Fliessgewässerinfiltration reduziert und weniger vergleichsweise „warmes“ Oberflächenwasser in den Grundwasserleiter infiltriert. Demgegenüber würde vermehrt vergleichsweise „kälteres“ Oberflächenwasser in den Wintermonaten in den Grundwasserleiter infiltrieren, was tendenziell mit einer Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“). Zudem zeigt die Auswertung der saisonalen Abflussdauerlinien (hydrologisches Jahr), dass vor allem für die Monate Juli bis September und für alle betrachteten Emissionsszenarien weniger Ereignisse mit hohen Abflüssen stattfinden werden. Unter Annahme, dass die quantitative Grundwasserneubildung und die einhergehende Temperaturprägung von Grundwasservorkommen hauptsächlich bei "charakteristischen" Ereignissen mit hohen Abflüssen (Intensität & Dauer) erfolgt, verstärkt dieser Effekt nochmals den „negativen Rückkopplungsmechanismus“ und eine tendenzielle Abkühlung von Grundwasserressourcen.

Suze (X:2'587'255 Y:1'222'236)				
	Veränderung Q [%] zu 2000		Veränderung T [°C] zu 2000	
	2055	2085	2055	2085
RCP26				
Jan-Mrz	↑ 43%	↑ 48%	↑ 1.1	↑ 1.1
Apr-Jun	→ 3%	→ 2%	↑ 0.7	↑ 0.7
Jul-Sep	↓ -18%	↓ -29%	↑ 1.1	↑ 1.1
Okt-Dez	→ 9%	↑ 16%	↑ 1.0	↑ 0.5
RCP45				
Jan-Mrz	↑ 38%	↑ 32%	↑ 1.0	↑ 1.5
Apr-Jun	→ 0%	↑ 16%	↑ 0.7	↑ 1.0
Jul-Sep	→ 2%	↓ -32%	↑ 0.9	↑ 1.6
Okt-Dez	↑ 16%	→ 9%	↑ 0.7	↑ 1.1
RCP85				
Jan-Mrz	↑ 33%	↑ 30%	↑ 1.3	↑ 3.3
Apr-Jun	→ -7%	→ -6%	↑ 1.3	↑ 2.6
Jul-Sep	↓ -35%	↓ -56%	↑ 2.0	↑ 3.5
Okt-Dez	→ -1%	↑ 11%	↑ 1.6	↑ 2.9

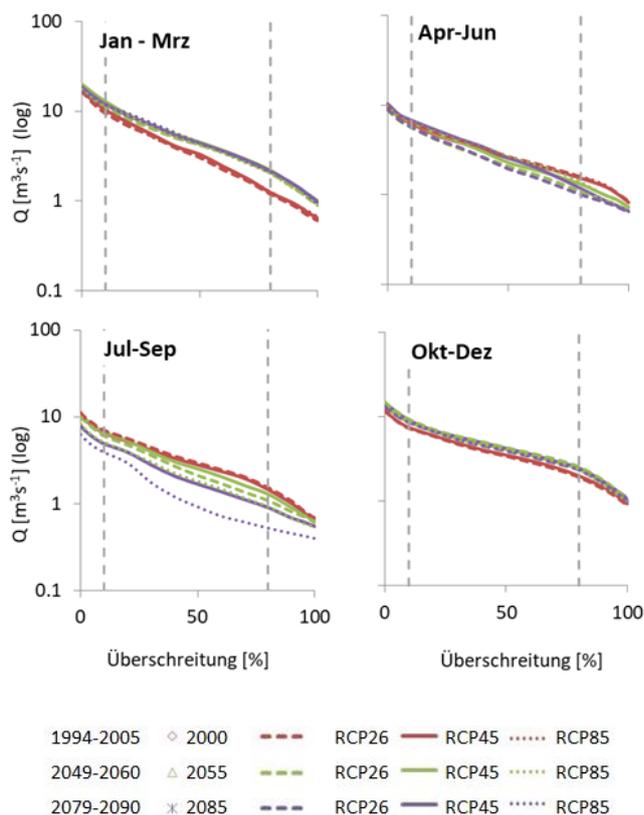
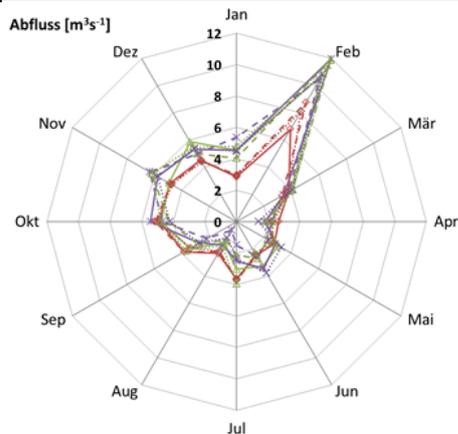


Abb. A4.7: Ergebnisse der hydrologischen Modellierung und der Abflussmengen und Fließgewässertemperaturen der Suze. Oben links: Relative Veränderung der modellierten Abflussmengen und Fließgewässertemperaturen für die Jahre 2055 und 2085 im Verhältnis zum Jahr 2000. Unten links: Polardarstellung der monatlichen Abflussmengen. Rechts: Saisonale (hydrologisches Jahr) Abflussdauerlinien (grau gestrichelt: 10 und 80 % Überschreitung).

Referenzen

Hauber, L. and Pfirter, U. (1992) Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:100000. Blatt 4, Biel/Bienne, Erläuterungen. Hrsg. Schweizer Geotechnische Kommission, Bern.

Anhang A5: Lockergesteins-Grundwasservorkommen Davos (Kanton Graubünden)

Datengrundlage

- *Topografie: DHM25m (Bundesamt für Landestopografie swisstopo)*
- *Felsoberfläche (überarbeitet auf Grundlage Felsmodel GoCAD; Interreg – Alpine Space, Greta)*
- *Modellierte Grundwasserhöhen (niedrig, mittel und hoch, Grundwasserbilanzen durch definierte Querschnitte und kalibrierte Durchlässigkeitswerte k_f (überarbeitet auf Grundlage GEOTEST AG))*
- *Datenreihen Grundwasserspiegelhöhen und -temperaturen, Wasserstand, Abfluss und Temperaturen Fließgewässer, Grundwassernutzungen (kantonales Überwachungsprogramm Amt für Natur und Umwelt Kanton Graubünden ANU GR)*

1 Hydraulischer und thermischer Istzustand

Die Fläche des untersuchten Lockergestein-Grundwasservorkommens entlang des Fließgewässers Landwasser in Davos (Kanton Graubünden, Abb. A5.1) beträgt ca. 5.4 km², der Umfang (Begrenzung Lockergesteins-Grundwasservorkommen zu den Talrändern) ca. 21 km und das Gesamtvolumen der Lockergesteine ca. 73 ha³. Die das Grundwasservorkommen nach unten begrenzende Felsoberfläche besteht aus den unter der Bezeichnung Aroserdolomit zusammengefassten Lithologien (2 bis 3 Größenordnungen weniger durchlässigen im Vergleich zu den Lockergesteinsablagerungen) und den vergleichsweise undurchlässigen Lithologien des Kristallins der Silvretta Decke.

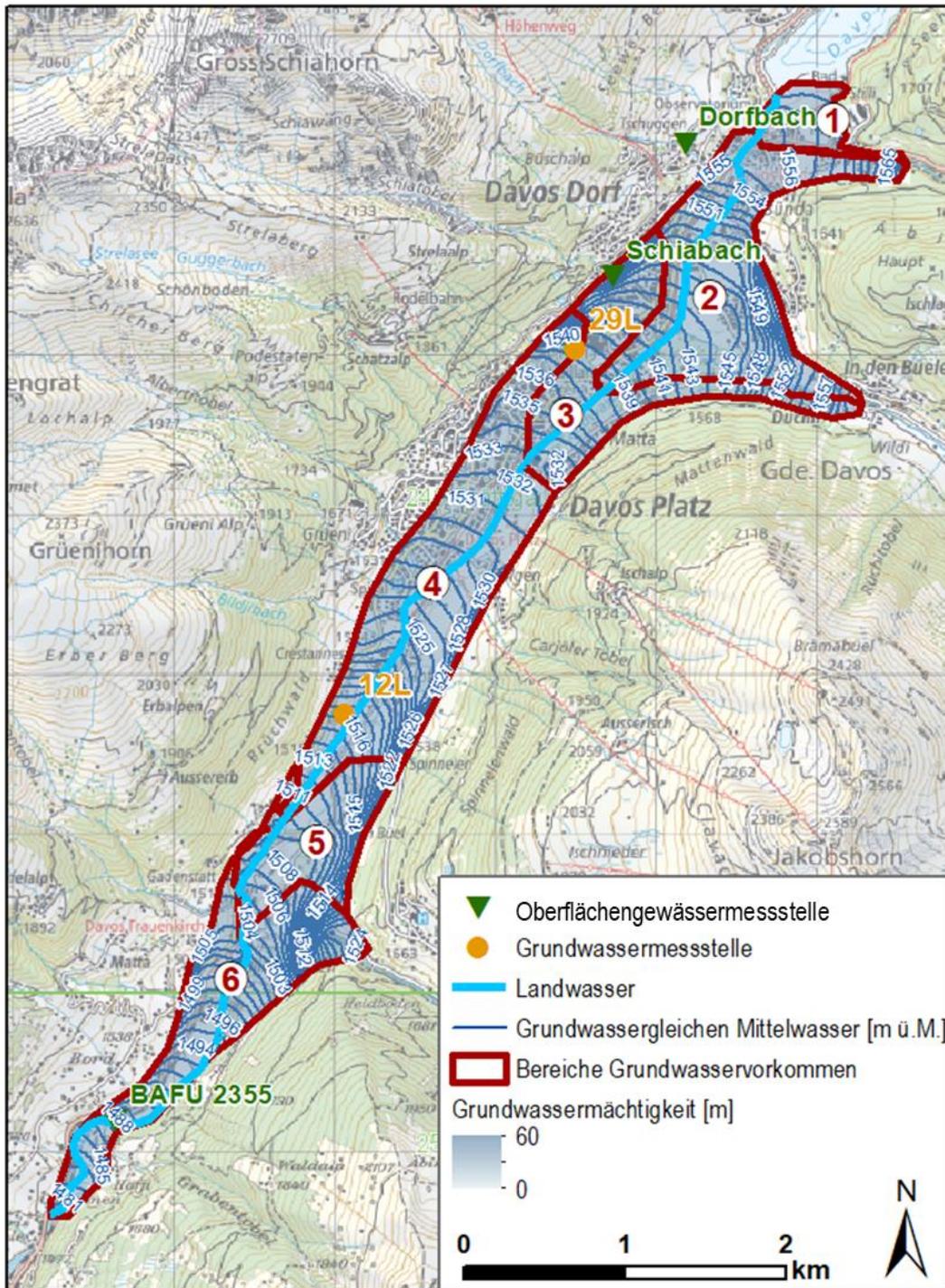


Abb. A5.1: Begrenzung des Lockergesteins-Grundwasservorkommens bei Davos (Kanton Graubünden). Grundwassergleichen- und -mächtigkeitsdarstellung sowie Grundwasser- und Oberflächengewässermessstationen.

Die mittleren, mit einem Grundwasserströmungsmodell (GEOTEST AG) kalibrierten hydraulischen Durchlässigkeitswerte (k_f), liegen im Bereich von ca. $1E-04 \text{ m s}^{-1}$, im oberen Bereich des Grundwasservorkommens auch bei $1E-03 \text{ m s}^{-1}$. Im Bereich 4 des Lockergestein-Grundwasservorkommens (Abb. A5.1) wurden bei mehreren Sondierbohrungen Seetone angetroffen (GEOTEST AG), die Modellkalibrierung resultierte hier auch in vergleichsweise geringen hydraulischen Durchlässigkeitswerten von ca. $1E-08 \text{ m s}^{-1}$.

Grundwassermessdaten

Das kantonale Überwachungsprogramm der ANU GR umfasst zwei Messstellen mit langjährigen Messungen des Grundwasserspiegels (Daten seit 1986) und der -temperatur (Daten seit 2009; Abb. A5.1).

In der Grundwassermessstelle 29L (Abb. A5.8, Daten seit 1986) kann ein ausgeprägter Jahresgang der Grundwasserstände beobachtet werden mit Maxima im Frühling und Sommer und Minima im Herbst und Winter. Seit 2012 konnte ein signifikanter negativer Trend hin zu fallenden Grundwasserpegeln (ca. 0.005 m a^{-1}) abgeleitet werden. Temperaturmaxima des Grundwassers von bis zu 8.5 °C sind in September / Oktober, Minima von bis zu 6 °C im März / April zu beobachten.

In der Grundwassermessstelle 12L (Abb. A5.9, Daten seit 1988) ist eine deutliche Reaktion auf hohe Abflüsse im Oberflächengewässer Landwasser zu beobachten. Zudem befindet sich die Grundwassermessstelle im unmittelbaren Bereich eines ca. 50 m parallel zur Landwasser verlaufenden Baches. Der Pegel kann während hohen Abflüssen um bis zu 2 m ansteigen. Temperaturmaxima des Grundwassers von bis zu 10 °C sind in August / September, Minima von unter 2.5 °C im März / April zu beobachten. Das zeitlich frühere Temperaturmaximum und der grössere Temperaturbereich, welcher in dieser Messstelle beobachtet werden kann, sind auf die Interaktion mit dem Oberflächengewässer zurückzuführen.

Oberflächengewässerdaten

Die BAFU-Messstelle Landwasser – Davos Frauenkirch (2355, Daten seit 1967) befindet sich am unteren Ende des untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommens. Der mittlere Abfluss im Jahr 2017 lag bei $4.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Während Ereignissen kann der Abfluss auf über $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ansteigen (letztmalig 1987). Die Temperatur der Landwasser (GEOTEST AG, Daten seit 2015) zeigt einen ausgeprägten saisonalen Verlauf mit Temperaturminima im Winter von nahezu 0 °C und Maxima im Sommer von bis zu 12.5 °C .

Die Temperatur des der Landwasser zufließenden Schiabaches (GEOTEST AG, Daten seit 2015) zeigt einen ausgeprägten saisonalen Verlauf mit Temperaturminima im Winter von unter 1 °C und Maxima im Sommer von über 11 °C . Die Temperatur des, der Landwasser zufließenden, Dorfbaches (GEOTEST AG, Daten seit 2016) zeigt ebenfalls einen ausgeprägten saisonalen Verlauf mit Temperaturminima im Winter von unter 2 °C und Maxima im Sommer von über 12 °C .

2 Aquifergeometrien

Als Resultat einer Grundwassermodellierung (GEOTEST AG) konnte für unterschiedliche hydrologische Randbedingungen das Grundwasserregime des Lockergesteins-Grundwasservorkommens abgeleitet. Diese Berechnungen erlauben Rückschlüsse auf die Speichereigenschaften der Grundwasserleiter erlauben. Demnach betragen die Grundwassermächtigkeiten in den Lockergesteinen, in Abhängigkeit der hydrologischen Randbedingungen, zwischen 0 und 58.6 m (Tab. A5.1). Das Volumen der grundwassergesättigten Zone liegt bei Hoch- und Mittelwasser bei 9.5 und 9.6 ha³ und bei Niedrigwasser bei lediglich 3.9 ha³. Das Volumen der grundwasserungesättigten Zone ist im Vergleich zum Volumen der grundwassergesättigten Zone um eine Grössenordnung höher und variiert entsprechend weniger.

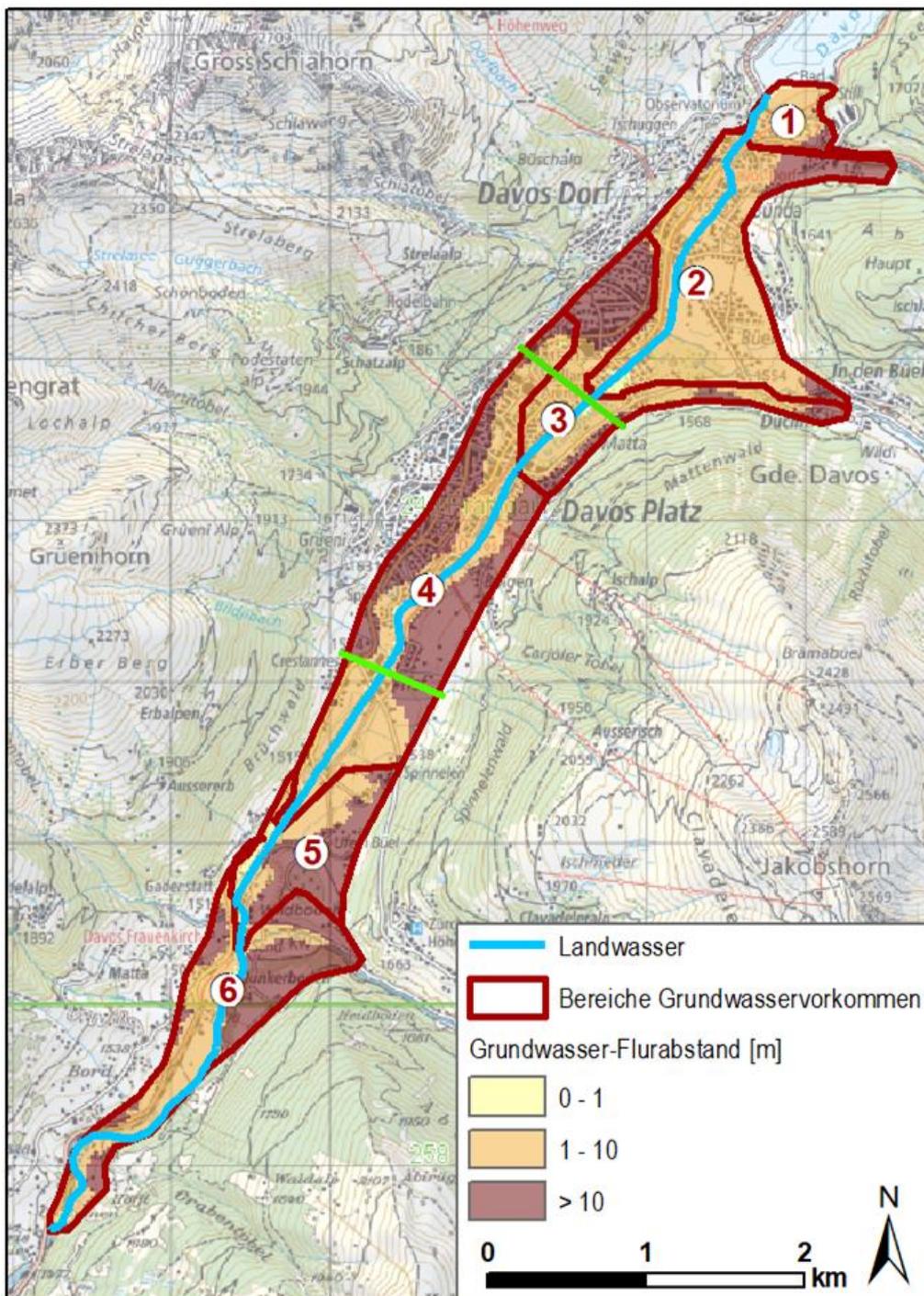


Abb. A5.2: Grundwasserflurabstand des Lockergesteins-Grundwasservorkommens bei Davos. Grüne Linien beschreiben die Bilanzierungsprofile für den Bereich auf Höhe von Davos (oben) und auf Höhe von Hof (unten).

In Abhängigkeit der hydrologischen Randbedingungen liegt für lediglich 1.7 bis 2.6 % der Fläche des Lockergesteins-Grundwasservorkommens der Flurabstand zwischen 0 bis 1 m, für einen Flächenanteil von 52.7 bis 59 % zwischen 1 und 10 m und für einen Flächenanteil von 38.8 bis 46.1 % ist dieser grösser 10 m (Tab. A5.1, Abb. A5.2). Vor allem im Bereich der Landwasser und deren Zuflüsse dominieren Flurabstände zwischen 1 und 10 m. In den Hangbereichen liegen die Flurabstände über weite Bereiche bei über 10 m.

Tab. A5.1: Aquifergeometrien des Lockergestein-Grundwasservorkommens bei Davos (Kanton Graubünden).

		Mächtigkeit			Volumen gesättigte Zone		Volumen ungesättigte Zone		Flurabstand		
		Mittel	Minimum	Maximum	[m ³]	[ha ³]	[m ³]	[ha ³]	Anteil an Gesamtfläche GW-Bereich [%]		
		[m]							[0 -1 m]	[1 -10 m]	[10 -50 m]
Grundwasser	MW	1.82	0.01	58.63	9.5E+06	9.5E+00	6.5E+07	6.5E+01	2.3	58.8	38.9
	HW	1.79	0.21	58.23	9.6E+06	9.6E+00	6.5E+07	6.5E+01	2.6	59.0	38.8
	NW	0.73	0	58.22	3.9E+06	3.9E+00	7.1E+07	7.1E+01	1.7	52.7	46.1

Interaktion Oberflächengewässer mit dem Grundwasser

Die quantitativ bedeutendste Randbedingung ist der Austausch mit dem Oberflächengewässer und vor allem die Exfiltration von Grundwasser in das Oberflächengewässer Landwasser (Tab A5.3).

Abb. A5.3 zeigt einen Querschnitt durch das Lockergesteins-Grundwasservorkommen entlang der Landwasser. Das Grundwasser ist über weite Bereiche vom Fliessgewässer durch eine ungesättigte Zone getrennt. Jedoch existieren zwischen Flusslänge 5.5 bis 6 km Bereiche, in denen das Grundwasser im Kontakt mit dem Oberflächenwasser ist und verstärkt Grundwasser in das Fliessgewässer exfiltrieren kann.

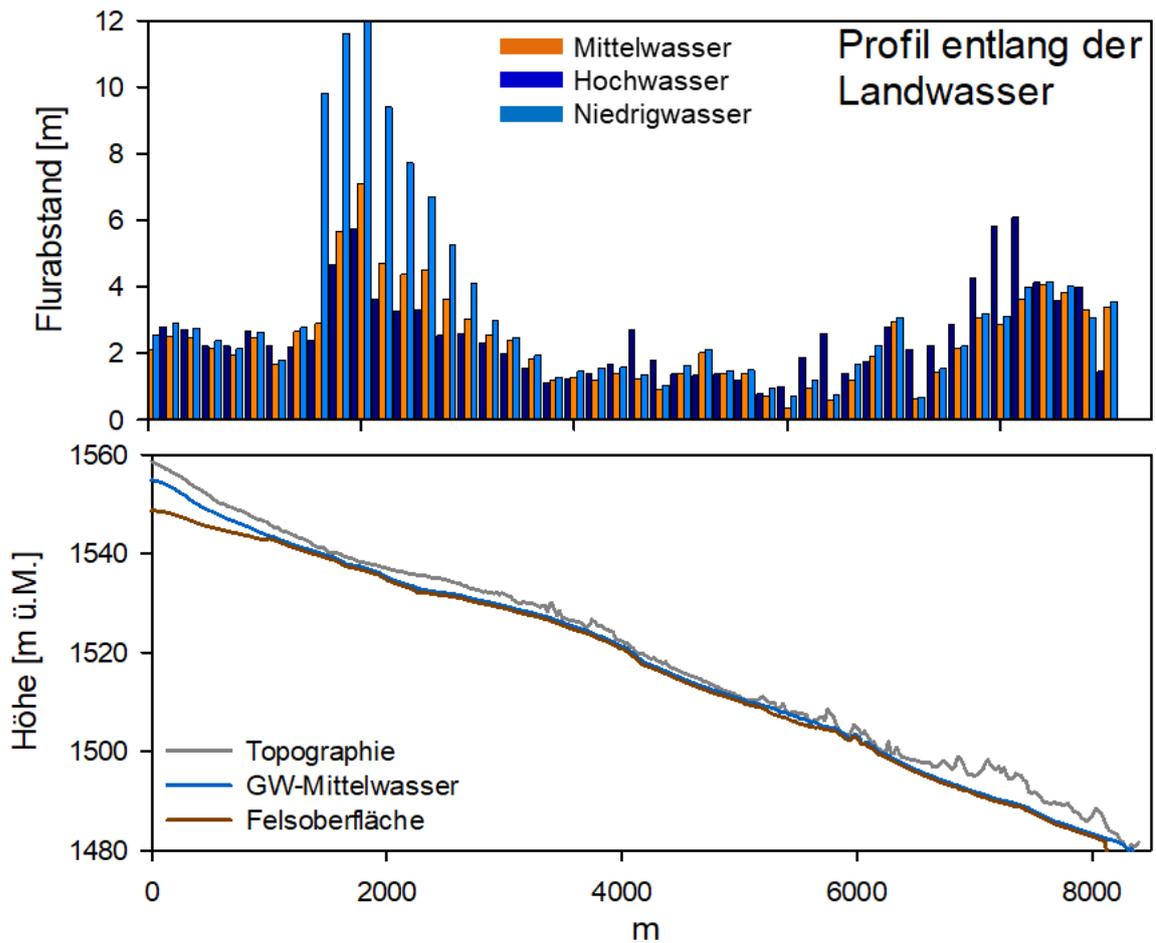


Abb. A5.3: Oben: Flurabstand entlang des Fließgewässers Landwasser bei unterschiedlichen hydrologischen Randbedingungen. Unten: Profil entlang der Landwasser, einschliesslich Topografie, mittlerem Grundwasserstand und Felsoberfläche.

3 Fließwege und -zeiten im Grundwasser

Eine Ableitung der Fließwege und -zeiten erlaubt eine Abschätzung von Erneuerungsraten und Verweilzeiten und ist Grundlage für eine Beurteilung der Sensitivität der Grundwasservorkommen. Tabelle A5.2 fasst die abgeleiteten Fließwege und -zeiten für die verschiedenen Bereiche des Lockergestein-Grundwasservorkommens zusammen. Fließwege liegen, in Abhängigkeit des betrachteten Bereichs im Mittel bei ca. 316 bis 1'880 m und maximal bei ca. 1'413 bis 3'962 m.

Zur Evaluation der Fließzeiten wurden sowohl unterschiedliche hydraulischen Durchlässigkeitswerte (zwischen $1\text{E-}03 \text{ m s}^{-1}$ und $1\text{E-}04 \text{ m s}^{-1}$) und die Filtergeschwindigkeiten nach Darcy als auch die, für den Wassertransport relevante, Abstandsgeschwindigkeit unter Berücksichtigung unterschiedlicher effektiver Porositäten ($n_{\text{eff}} = 0.1$ und 0.2) berücksichtigt.

Der grosse Wertebereich der hydraulischen Eigenschaften resultiert in einer grossen Spannweite der ermittelten Fließzeiten unter Berücksichtigung von Filter- und Abstandsgeschwindigkeiten. Als ein „realistisches“ Szenario für die mittlere Geschwindigkeit des Wassertransport wird jenes mit einer homogenen Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeitswerte von $1\text{E-}03 \text{ m s}^{-1}$ sowie einer Porosität $n_{\text{eff}} = 0.1$ betrachtet. Für den mittleren Durchsatz durch das gesamte Grundwasservorkommen ergeben sich somit etwa 7.8 Tage.

Tab. A5.2: Zusammenfassende Statistik der Fließwege und -zeiten für die verschiedenen Bereiche des Lockergesteins-Grundwasservorkommens bei Davos unter Berücksichtigung verschiedener hydraulischer Eigenschaften (k_f , n_{eff}) der Lockergesteine.

		1	2	3	4	5	6
Fläche Bereiche	[m ²]	2.03E+05	1.27E+06	7.69E+05	1.63E+06	5.52E+05	9.69E+05
	[ha]	20.3	127.3	76.9	162.5	55.2	96.9
Anteil Gesamtfläche	[-]	0.04	0.24	0.14	0.30	0.10	0.18
Fließwege							
Maximum	[m]	1413	2777	2149	3962	1524	3244
Mittel	[m]	316	1196	956	1880	693	1770
Standardabweichung	[m]	188	558	556	887	384	794
Fließzeiten (Filtergeschwindigkeit)							
Mittel (homogen $K_f = 1.0\text{E-}03$)	[d]	5.4	14.9	8.8	30.2	5.4	13.7
Mittel (homogen $K_f = 1.0\text{E-}04$)	[d]	54.0	148.9	87.5	301.7	53.9	137.4
Fließzeiten (Abstandsgeschwindigkeit; $n_{\text{eff}} = 0.1$)							
Mittel (homogen $K_f = 1.0\text{E-}03$)	[d]	0.5	1.5	0.9	3.0	0.5	1.4
	[h]	13	36	21	72	13	33
Fließzeiten (Abstandsgeschwindigkeit; $n_{\text{eff}} = 0.2$)							
Mittel (homogen $K_f = 1.0\text{E-}03$)	[d]	0.3	0.7	0.4	1.5	0.3	0.7
	[h]	6.5	17.9	10.5	36.2	6.5	16.5

Abb. A5.4 zeigt die Verteilung der abgeleiteten Fließzeiten für die verschiedenen Bereiche des Grundwasservorkommens als Histogramme, einschliesslich Häufigkeiten in verschiedenen Klassenbereichen und kumulierte Häufigkeiten.

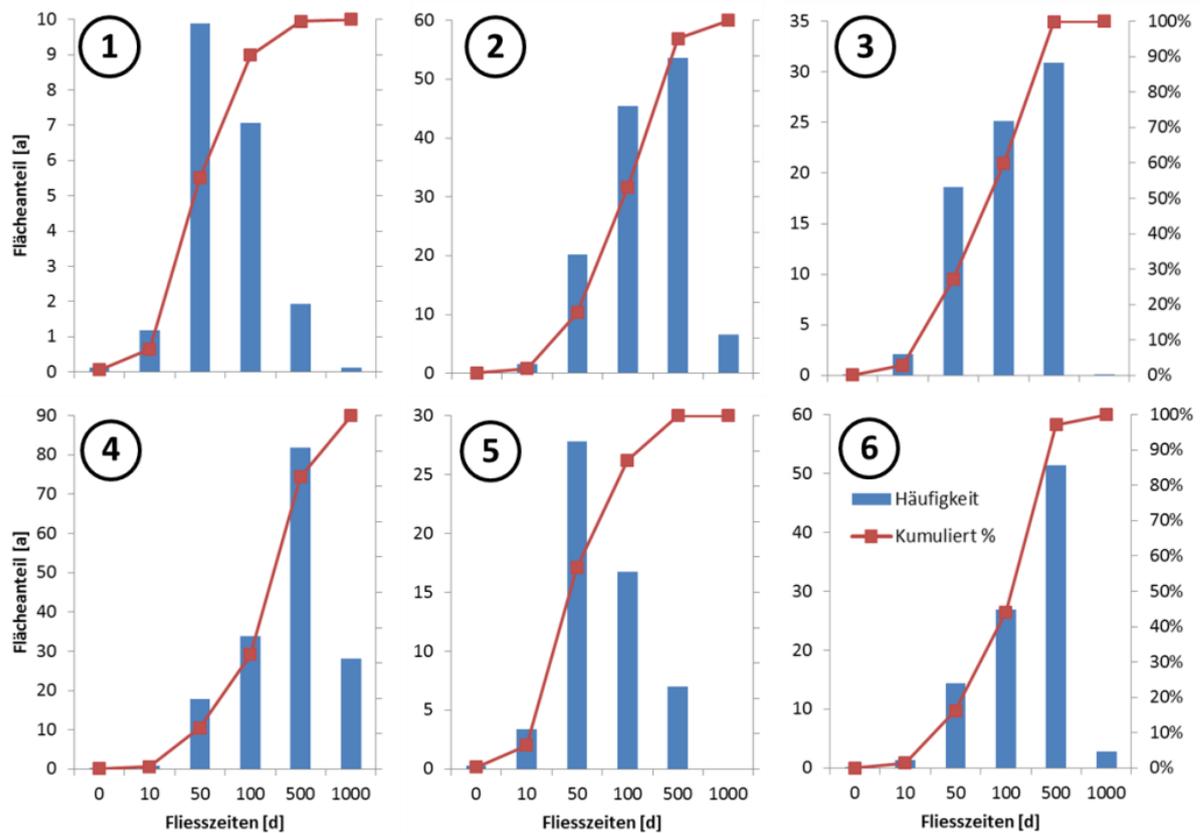


Abb. A5.4: Histogramme der abgeleiteten Fließzeiten (Statistik Fließsdistanzen siehe Tab. A5.2) unter Berücksichtigung homogener hydraulischer Durchlässigkeiten der Lockergesteine und für die verschiedenen Bereiche (1-6) des Grundwasservorkommens bei Davos (Abb. A5.1). Häufigkeiten in den Klassenbereichen mit unterschiedlichen y-Achsen; Kumulierte Häufigkeiten beziehen sich alle auf die y-Achse ganz rechts (0-100%).

4 Grundwasserneubildung – Grundwasserbilanz

Tabelle A5.3 fasst die Wasserbilanzen für das Lockergesteins-Grundwasservorkommen bei Mittelwasser zusammen (GEOTEST AG).

Tab. A5.3: Wasserbilanzen für das Lockergestein-Grundwasservorkommen während einer Mittelwassersituation (GEOTEST AG)

Randbedingung	IN [l s^{-1}]	OUT [l s^{-1}]
Davosersee	11.5	-
Grundwasserentnahmen	-	60
Offene Wasserhaltungen	-	52.5
Randzustrom	132	-
Austausch OW* – GW	180	279

* OW: Oberflächenwasser (Fließgewässer), GW: Grundwasser

Regionaler Grundwasserzu- und -abstrom / Zustrom über die seitlichen Hangeinzugsgebiete / Grundwasserentnahmen und künstliche -anreicherungen

Durch definierte Querschnitte wurden Wasserbilanzen berechnet (Abb. A5.2; GEOTEST AG), so beträgt der Grundwasserdurchfluss durch das Lockergestein-Grundwasservorkommen, in Abhängigkeit der hydrologischen Randbedingungen, auf Höhe von Davos ca. 63 bis 65 l s^{-1} und auf Höhe von Hof ca. 30 bis 33 l s^{-1} . Der Zustrom über die seitlichen Hangeinzugsgebiete liegt bei 132 l s^{-1} . Grundwasserentnahmen liegen im Bereich von 113 l s^{-1} .

Grundwasserneubildung aus versickerndem Niederschlagswasser

Unter Annahme einer jährlichen Niederschlagssumme von 1'032 mm, einer Verdunstungshöhe von 328 mm (Einzugsgebiet der Landwasser Davos, Frauenkirch CH-0169, Normperiode 1981 – 2010; <https://hydromaps.ch>) sowie der Fläche des untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommens von ca. 5.4 km^2 ergeben sich eine grob geschätzte flächige Grundwasserneubildung von 120 l s^{-1} .

Interaktion Fließgewässer

Eine Reduktion der Fließgewässerinfiltration, durch häufiger auftretende und länger andauernde Niedrigwasserperioden, führt zu einer verringerten Grundwasserneubildung im Bereich der Fließgewässer. Abschwächend könnte eine reduzierte Exfiltration von Grundwasser in das Oberflächengewässer wirken, hier ist zu berücksichtigen, dass dadurch, v.a. während Niedrigwasserperioden, die Situation bzgl. Wasserführung im Fließgewässer Landwasser kritischer wird.

5 Auswirkungen Klimaänderungen

Für die Evaluation der klimabedingten Veränderung der verschiedenen Grundwasserneubildungskomponenten wurde ein Schwerpunkt auf die im Rahmen von Hydro-CH2018 erarbeitete Klimaprojektion MPI-M-MPI-ESM-LRr1i1p1SMHI-RCA4, einschliesslich der 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) gelegt.

Grundwasserneubildung aus versickerndem Niederschlagswasser - Entwicklung der Niederschläge und Temperaturprägung

Abbildung A5.5 und A5.6 zeigen die saisonale Verteilung der Niederschläge und Temperaturen als auch jährlich kumulierte Niederschläge für die Jahre 2000, 2055 und 2085 für die MeteoSchweiz Standorte Davos und Weissfluhjoch im Kanton Graubünden. Tabellen A5.4 und A5.5 beschreiben die Saisonalität (gewöhnliches Kalenderjahr) der Niederschlagssummen und Temperaturen. Wohingegen der Standort Davos charakteristisch für die Situation im Landwassertal ist, ist der Standort Weissfluhjoch eher charakteristisch für das Einzugsgebiet.

Die Ergebnisse der Simulationen für den Standort Davos zeigen, dass die Niederschläge tendenziell und, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios, um maximal 19 % zunehmen (RCP85, Jahr 2085). Die meisten Niederschläge fallen in den Sommermonaten Juli und August sowie im November. Wohingegen, für die betrachteten Klimaprojektionen die Niederschläge in den Sommermonaten und vor allem im Juli tendenziell abnehmen, nehmen diese im November zu. Dies würde bedeuten, dass die Grundwasserneubildung vermehrt in vergleichsweise „kälteren“ Monaten stattfindet, welche mit einer tendenziellen Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“).

Die Lufttemperaturen für den Standort Davos nehmen, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios und des Zeitpunktes, um 1.2 °C (RCP26, Jahr 2085) bis maximal 5.0 °C (RCP85, Jahr 2085) zu. Die Veränderungen der Lufttemperaturen werden mit einer zeitlichen Verzögerung die Grundwassertemperaturen beeinflussen.

Die Ergebnisse der Simulationen für den Standort Weissfluhjoch zeigen, dass die Niederschläge tendenziell, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios, um maximal 9 % zunehmen (RCP45 und RCP85, Jahr 2055). Die meisten Niederschläge fallen in den Sommermonaten Juli und August sowie im November, Februar und März. Wohingegen, für die betrachteten Klimaprojektionen die Niederschläge in den Sommermonaten und vor allem im Juli tendenziell abnehmen, nehmen diese im November und vor allem auch im Februar und März zu. Dies würde bedeuten, dass die Grundwasserneubildung vermehrt in vergleichsweise „kälteren“ Monaten stattfindet, welche mit einer tendenziellen Abkühlung des Grundwassers einhergehen würde („negativer Rückkopplungsmechanismus“).

Die Lufttemperaturen für den Standort Weissfluhjoch nehmen, in Abhängigkeit des betrachteten Emissionsszenarios und des Zeitpunktes, um 1.2 °C (RCP26, Jahr 2085) bis maximal 4.5 °C (RCP85, Jahr 2085) zu. Die Veränderungen der Lufttemperaturen werden mit einer Verzögerung die Grundwassertemperaturen beeinflussen.

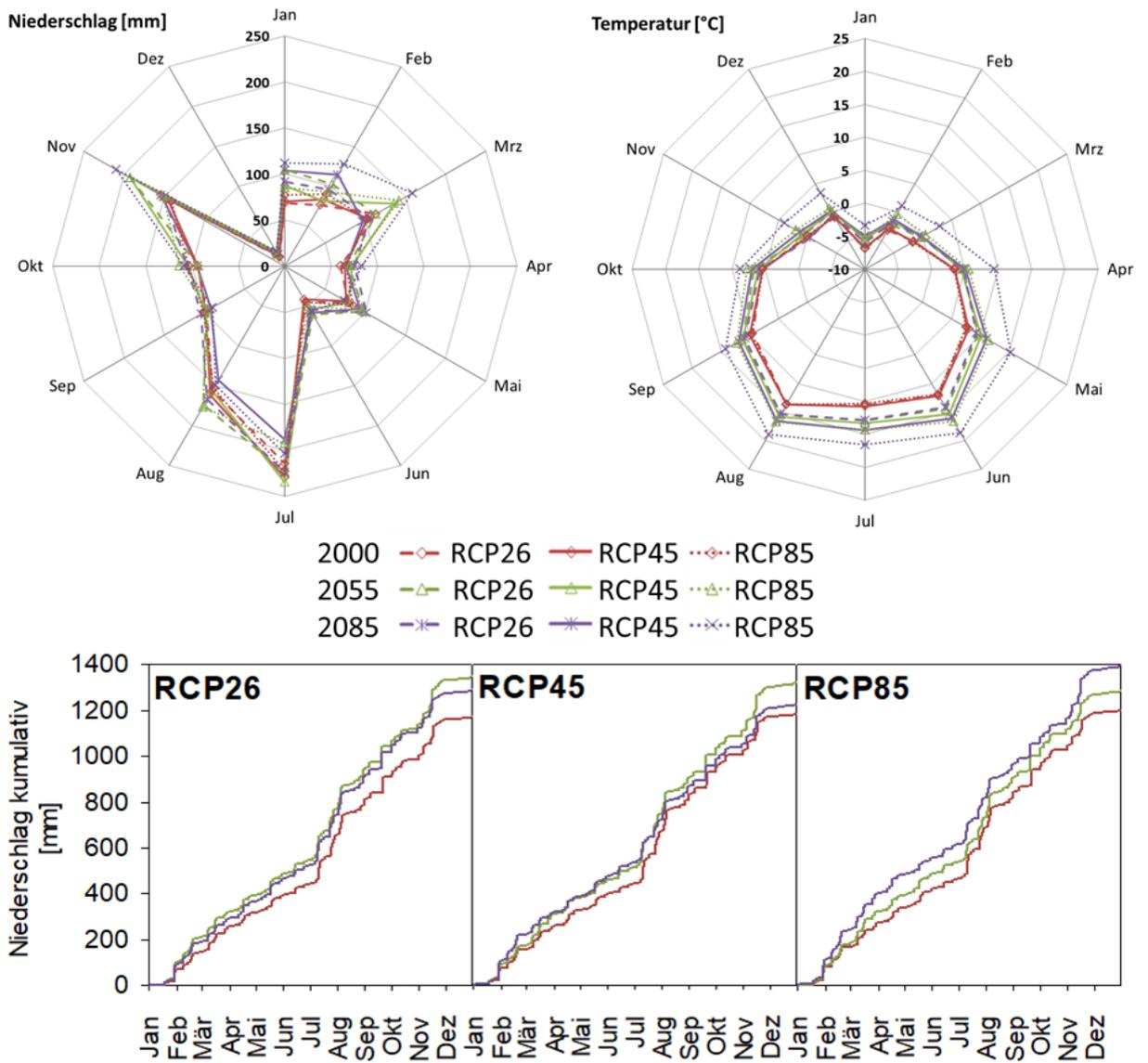


Abb. A5.5: MeteoSchweiz Standort DAV. Polardarstellung der simulierten monatlichen Niederschlags- und Temperaturverteilung. Unten: kumulierte Niederschlagssummen.

Tab. A5.4: Saisonalität (gewöhnliches Kalenderjahr) der Niederschlagssummen und Temperaturen für den MeteoSchweiz Standort DAV.

		Niederschlagssumme [mm]			Temperaturen [°C]		
		2000	2055	2085	2000	2055	2085
RCP26	MAM	244	288	256	3.3	4.8	5.3
	JJA	433	445	390	12.2	14.8	15.7
	SON	338	396	340	5.1	6.0	6.7
	DJF	166	187	235	-3.5	-2.3	-2.0
	Summe	1182	1317	1221	-	-	-
	Mittel	-	-	-	4.2	5.7	5.4
	Veränderung [%; °C]	-	13	4	-	1.5	1.2
RCP45	MAM	253	281	281	3.3	4.7	4.6
	JJA	415	458	445	12.1	14.2	14.1
	SON	346	384	360	5.0	6.2	5.4
	DJF	156	224	202	-3.7	-2.5	-2.7
	Summe	1170	1346	1288	-	-	-
	Mittel	-	-	-	4.3	5.9	6.5
	Veränderung [%; °C]	-	15	10	-	1.6	2.2
RCP85	MAM	253	308	316	3.0	5.9	9.2
	JJA	420	420	410	12.0	15.9	18.1
	SON	345	360	408	5.1	7.4	9.0
	DJF	180	193	258	-3.4	-1.6	0.4
	Summe	1198	1281	1392	-	-	-
	Mittel	-	-	-	4.2	6.9	9.2
	Veränderung [%; °C]	-	10	19	-	2.7	5.0

Frühling (MAM: März, April und Mai), Sommer (JJA: Juni, Juli und August), Herbst (SON: September, Oktober und November) und Winter (DJF: Dezember, Januar und Februar)

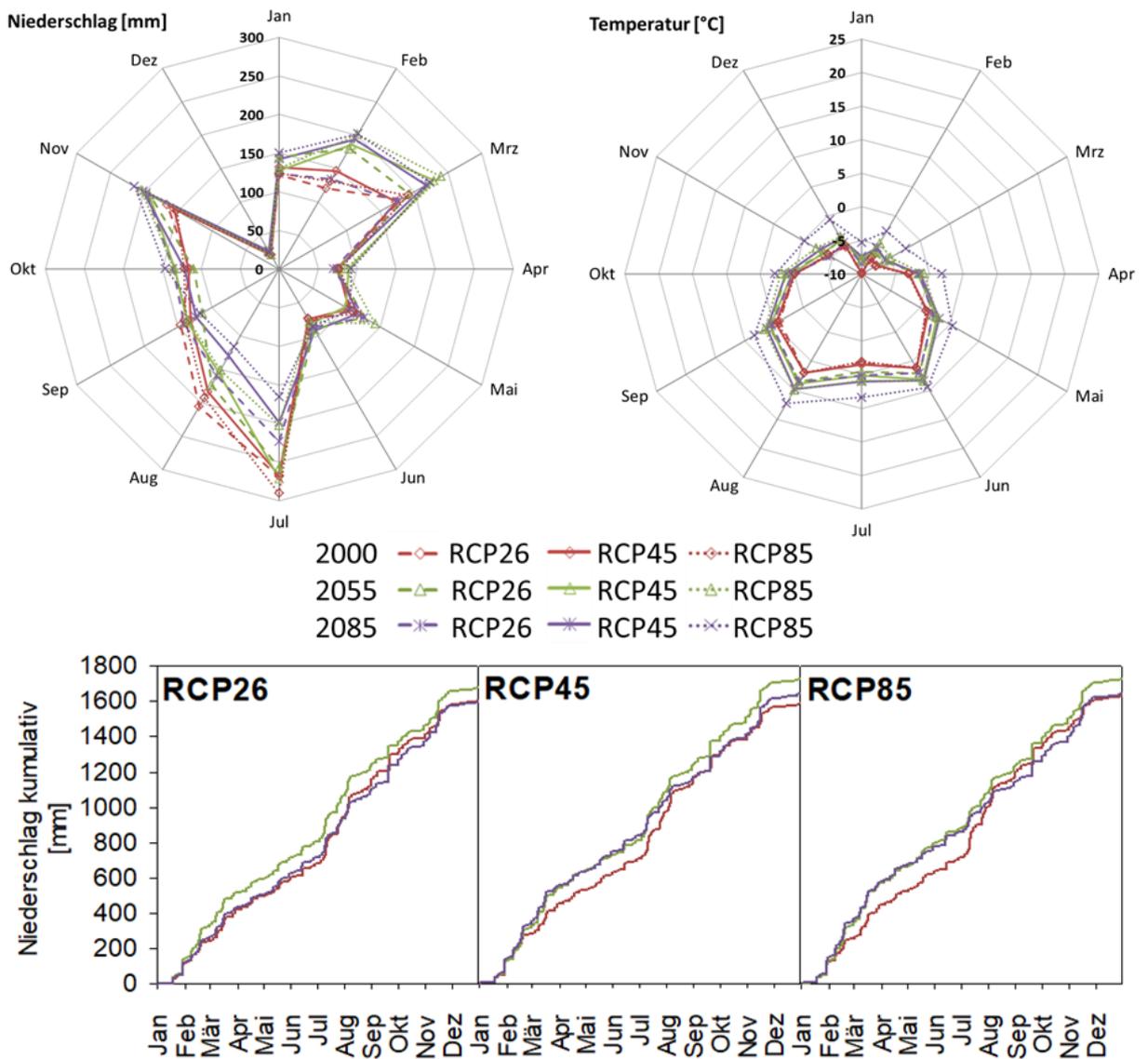


Abb. A5.6: MeteoSchweiz Standort WFJ. Polardarstellung der simulierten monatlichen Niederschlags- und Temperaturverteilung. Unten: kumulierte Niederschlagssummen.

Tab. A5.5: Saisonalität der Niederschlagssummen und Temperaturen für den MeteoSchweiz Standort WFJ.

		Niederschlagssumme [mm]			Temperaturen [°C]		
		2000	2055	2085	2000	2055	2085
RCP26	MAM	361	394	371	-3.1	-1.8	-1.7
	JJA	553	521	471	5.5	6.7	6.9
	SON	427	416	475	-0.1	1.1	0.3
	DJF	263	352	283	-7.7	-6.1	-6.2
	Summe	1604	1682	1599	-	-	-
	Mittel	-	-	-	-1.4	0.0	-0.2
	Veränderung [%; °C]	-	6	1	-	1.4	1.2
RCP45	MAM	353	416	408	-3.0	-1.6	-1.3
	JJA	526	508	420	5.6	7.3	8.1
	SON	405	463	447	0.1	0.8	1.5
	DJF	299	338	363	-7.4	-6.0	-5.6
	Summe	1583	1724	1638	-	-	-
	Mittel	-	-	-	-1.2	0.2	0.7
	Veränderung [%; °C]	-	9	3	-	1.4	1.9
RCP85	MAM	385	467	421	-3.3	-0.9	1.6
	JJA	557	432	367	5.4	8.1	10.1
	SON	412	474	477	0.0	2.1	3.6
	DJF	276	353	376	-7.3	-5.4	-2.8
	Summe	1630	1726	1642	-	-	-
	Mittel	-	-	-	-1.3	1.0	3.2
	Veränderung [%; °C]	-	9	4	-	2.3	4.5

Frühling (MAM: März, April und Mai), Sommer (JJA: Juni, Juli und August), Herbst (SON: September, Oktober und November) und Winter (DJF: Dezember, Januar und Februar)

Entwicklung Abflussregime und Temperaturprägung

Abbildung A5.7 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse der von der EPFL durchgeführten hydrologischen Modellierung (Abflussmengen und Fliessgewässertemperaturen) für die Emissionsszenarien RCP26, RCP45 und RCP85 für einen Standort an der Landwasser (Abb. 4.1.1).

(G) Landwasser (2'779'325 / 1'180'700)

Die Ergebnisse der Simulationen für die Landwasser zeigen sehr unterschiedliche Entwicklungen der Abflussmengen für die verschiedenen Emissionsszenarien und Jahre. Für alle Emissionsszenarien ist lediglich zu beobachten, dass die Abflussmengen in den Monaten Juli bis September um 6 bis 46 % abnehmen. Dies würde bedeuten, auch unter Berücksichtigung höherer Evapotranspirationsverluste im Sommer, dass sich in den Sommermonaten die Grundwasserneubildung über die Fliessgewässereinfiltration reduziert und weniger vergleichsweise „warmes“ Oberflächenwasser in den Grundwasserleiter infiltriert. Die Auswertung der saisonalen Abflussdauerlinien (hydrologisches Jahr) zeigt für die verschiedenen Emissionsszenarien, vergleichsweise höhere Abflüsse für die Monate Oktober bis Juni (Ausnahme RCP85 für den Zeitraum 2079 bis 2090) und vergleichsweise niedrigere Abflüsse für die Monate Juli bis September. Unter Annahme, dass die quantitative Grundwasserneubildung und die einhergehende Temperaturprägung von Grundwasservorkommen hauptsächlich bei "charakteristischen" Ereignissen mit hohen Abflüssen (Intensität & Dauer) erfolgt, verstärkt dieser Effekt nochmals den „negativen Rückkopplungsmechanismus“ und eine tendenzielle Abkühlung der Grundwasserressource.

Landwasser (X:2'779'325 Y:1'180'700)					
	Veränderung Q [%] zu 2000		Veränderung T [°C] zu 2000		
	2055	2085	2055	2085	
RCP26					
Jan-Mrz	→ 5%	→ 4%	↑ 1.2	↑ 1.3	
Apr-Jun	↑ 20%	→ 10%	↑ 0.9	↑ 0.8	
Jul-Sep	→ -7%	↓ -14%	↑ 1.2	↑ 1.3	
Okt-Dez	↓ -10%	→ -6%	↑ 1.1	↑ 0.4	
RCP45					
Jan-Mrz	→ 6%	→ 8%	↑ 0.4	↑ 0.4	
Apr-Jun	↑ 16%	↑ 14%	↑ 0.9	↑ 1.3	
Jul-Sep	→ -6%	↓ -26%	↑ 1.8	↑ 2.8	
Okt-Dez	↑ 13%	→ 8%	↑ 0.4	↑ 0.8	
RCP85					
Jan-Mrz	↑ 17%	↑ 130%	↑ 0.5	↑ 0.5	
Apr-Jun	→ 8%	↓ -32%	↑ 1.6	↑ 3.8	
Jul-Sep	↓ -29%	↓ -46%	↑ 3.2	↑ 5.6	
Okt-Dez	↑ 18%	↑ 40%	↑ 1.1	↑ 2.2	

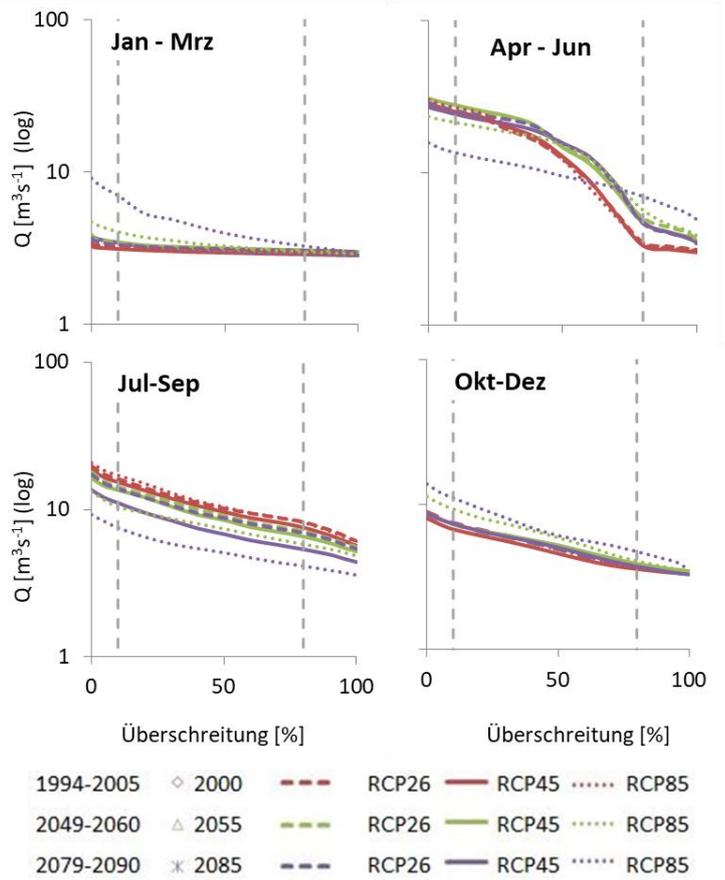
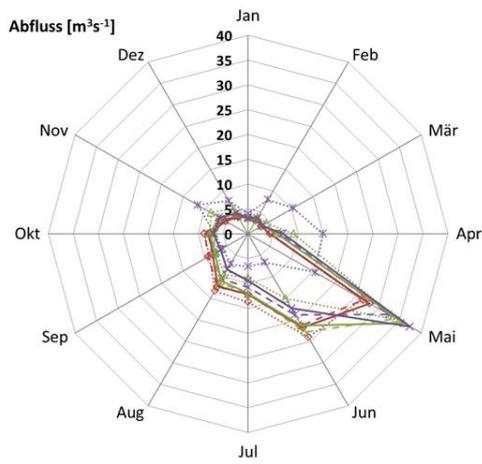


Abb. A5.7: Ergebnisse der hydrologischen Modellierung und der Abflussmengen und Fließgewässertemperaturen der Landwasser. Oben links: Relative Veränderung der modellierten Abflussmengen und Fließgewässertemperaturen für die Jahre 2055 und 2085 im Verhältnis zum Jahr 2000. Unten links: Polardarstellung der monatlichen Abflussmengen. Rechts: Saisonale (hydrologisches Jahr) Abflussdauerlinien (grau gestrichelt: 10 und 80 % Überschreitung).

Grundlagedaten

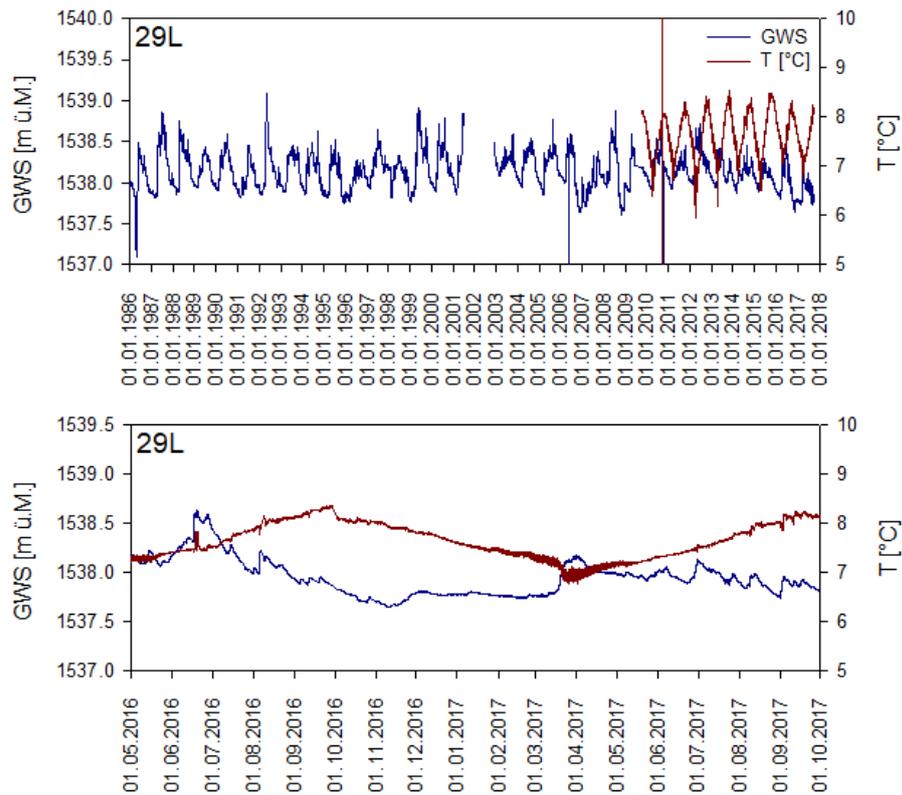


Abb. A5.8: Pegel und Temperaturmessung Grundwassermessstelle 29L (Abb. A5.1)

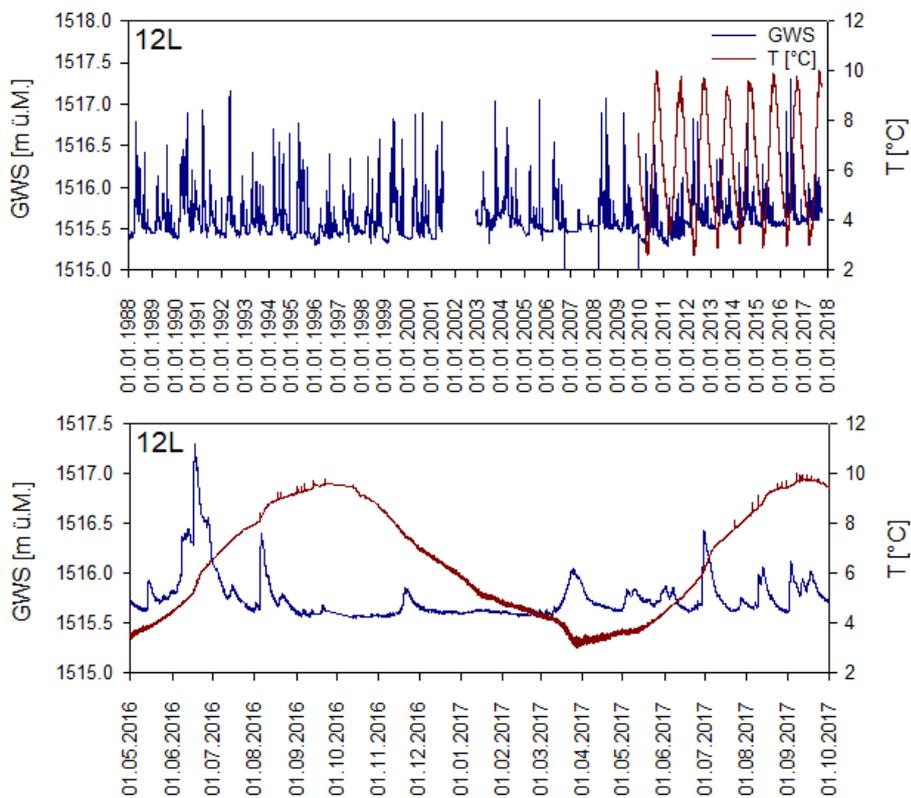


Abb. A5.9: Pegel und Temperaturmessung Grundwassermessstelle 12L (Abb. A5.1)