Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer

Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer

Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft

Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt BAFU
Bern, 2021

Impressum

Herausgeber
Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Projektgruppe
Petra Schmocker-Fackel (Projektleitung), Fabia Hüsler, Carlo Scapozza (Vorsitz), Michael Sinreich, Roland Hohmann, Sabine Kleppek, Bänz Lundsgaard-Hansen, Adrian Jakob, Carolin Schärpf, Olivier Overney † (BAFU)
Andreas Fischer (MeteoSchweiz)
Irene Roth, Jan Béguin (Bundesamt für Landwirtschaft BLW)

Autorinnen und Autoren sowie Redaktion
Petra Schmocker-Fackel, Fabia Hüsler, Edith Oosenbrug (BAFU)
Klaus Lanz (international water affairs)
Samuel Zahner, Eva Wieser (Ecoplan)

Expertinnen und Experten Bund
Bundesamt für Umwelt (BAFU): Martin Barben, Gian Reto Bezzola, Emmanuel Brocard, Therese Bürgi, Damian Dominguez, Katharina Edmaier, Daniel Hefti, Andreas Helbling, Susanne Haertel-Borer, Christian Holzgang, Andreas Inderwildi, Caroline Kan, Sybille Kilchmann, Andreas Knutti, Ronald Kozel, Manuel Kunz, Christian Leu, Roberto Loat, Stephan Müller, Reto Muralt, Martin Pfaundler, Michael Schärer, Marc Schürch, Ueli Sieber, David Siffert, Michael Sinreich, Florian Storck, Markus Thommen
MeteoSchweiz: Sven Kotlarski, Cornelia Schwierz, Michiko Hama
Bundesamt für Landwirtschaft (BLW): Ruth Badertscher, Daniel Felder, Michael Zimmermann
Bundesamt für Energie (BFE): Guido Federer

Expertinnen und Experten Forschungsprojekte und Hintergrundberichte
Agroscope: Annelie Holzkämper
Eawag – das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs: Florian Altermatt, Simon Benateau, Damien Bouffard, Adrien Gaudard †, Love Råman Vinnå, Martin Schmid, Christian Stamm, Alfred Johny Wüest
EPF Lausanne (EPFL): Hendrik Huwald, Adrien Michel
ETH Zürich (ETHZ): Paolo Burlando, Edouard L. Davin, Daniel Farinotti, Lukas Gudmundsson, Martin Hirschi, Ronny Meier, Peter Molnar, Nadav Peleg, Clemens Schwingshackl, Sonia I. Seneviratne, Richard Wartenburger
Hochschule für Technik Rapperswil (HSR): Andrea-Kristin Bachmann, Sara Bieler, Sami Gysin, Susanne Kytzia, Aurelian Schumacher, Dominik Schwere, Jürg Speerli
Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung (SISKA): Pierre-Yves Jeannin
Universität Basel: Annette Affolter Kast, Jannis Epting, Peter Huggenberger
Universität Bern: Flavio Anselmetti, Regula Mülchi, Olivia Martius, Ole Rössler, Bettina Schaefli, Jan Schwanbeck, Rolf Weingartner, Oliver Wetter, Andreas Zischg
Universität Freiburg: Matthias Huss
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau: Irene Kohn, Kerstin Stahl, Michael Stoelzle
Université de Genève: Virginia Ruiz-Villanueva, Markus Stoffel
Université de Lausanne: Emmanuel Reynard
Université de Neuchâtel: Marie Arnoux, Philipp Brunner, Daniel Hunkeler
Universität Zürich: Daphné Freudiger, Jan Seibert, Illja van Meerveld, Daniel Viviroli
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL): Norina Andres, Konrad Bogner, Manuela Brunner, Astrid Björnsen Gurung, Käthi Liechti, Elke Kellner, Bettina Matti, Heike Lischke, Tobias Jonas, Christoph Marty, Jeannette Nötzli, Marcia Phillips, Matthias Speich, Manfred Stähli, Massimiliano Zappa

Zitierung
BAFU (Hrsg.) 2021: Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2101: 134 S.

Lektorat
Fredy Joss, Beatenberg

Grafiken
Zeichenfabrik, Zürich

Gestaltung
Cavelti AG, Marken. Digital und gedruckt, Gossau

Titelbild
Areuabach
© WWF Schweiz / Eduardo Soteras

PDF-Download
www.bafu.admin.ch/uw-2101-d
Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Diese Publikation ist auch in französischer, italienischer und englischer Sprache verfügbar. Die Originalsprache ist Deutsch.

Dank
Wir danken allen oben aufgeführten Expertinnen und Experten für ihre fachlichen Beiträge und die wertvollen Diskussionen. Wir danken auch allen anderen Personen, die in der einen oder anderen Form zum Gelingen dieses Berichts beigetragen haben.

© BAFU 2021

Inhaltsverzeichnis

Abstracts		**6**
Vorwort		**7**
Zusammenfassung		**8**
1	**Einleitung**	**10**
2	**Methodik**	**12**
2.1	Modelle und deren Unsicherheiten	12
2.2	Klimaszenarien	13
2.3	Hydrologische Szenarien	14
3	**Wasserhaushalt im Klimawandel**	**20**
4	**Klimatologische Einflussgrössen**	**23**
4.1	Lufttemperatur	23
4.2	Niederschlag	24
4.3	Verdunstung und Bodenfeuchte	26
5	**Kryosphäre**	**30**
5.1	Schnee	30
5.2	Gletscher und Permafrost	31
6	**Gewässer**	**33**
6.1	Jahresabflüsse	33
6.2	Saisonale Abflüsse	36
6.3	Seen	44
6.4	Grundwasser	47
6.5	Hochwasser	51
6.6	Niedrigwasser	55
6.7	Gewässertemperatur	59
6.7.1	Fliessgewässer	59
6.7.2	Seen	63
6.7.3	Grundwasser	68
6.8	Wasserinhaltsstoffe	70
6.8.1	Schad- und Nährstoffe	70
6.8.2	Sedimente	71
6.9	Gewässerökologie	73
6.9.1	Auswirkungen auf Lebensräume und Ökosystem	73
6.9.2	Auswirkungen auf einzelne Arten und die Biodiversität	76
7	**Wasserwirtschaft**	**80**
7.1	Wassernutzung	80
7.1.1	Trinkwasserversorgung	80
7.1.2	Landwirtschaftliche Bewässerung und Brauchwasser für Industrie und Gewerbe	83
7.1.3	Wasserkraft	87
7.1.4	Thermische Nutzung von Gewässern	89
7.1.5	Freizeit, Erholung und Tourismus	90
7.2	Schutz vor dem Wasser	93
7.2.1	Hochwasserschutz	93
7.2.2	Schutz vor Oberflächenabfluss	95
7.3	Gewässerschutz	96
7.3.1	Klimawandel und der Schutz sich verändernder Gewässer	96
7.3.2	Reduktion der stofflichen Belastung	97
7.3.3	Renaturierung der Gewässer	99
7.3.4	Schutz der Wasserressourcen und des Grundwassers	103
7.4	Internationale Bedeutung der Schweizer Gewässer	107
8	**Verbesserung der Wissensgrundlagen**	**110**
9	**Fazit: Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel notwendig**	**115**
10	**Literatur**	**117**
11	**Glossar**	**129**
12	**Anhang**	**130**

Abstracts

The Hydro-CH2018 project analysed the effects of climate change on Swiss water bodies. Climate change is altering the entire water balance, especially the seasonal distribution of water resources in the water bodies and groundwater. Low flow is becoming more frequent and the water temperature is increasing. This has a serious effect on water ecology, flood protection and water use. The report "Effects of climate change on Swiss water bodies" gives a concise overview of the results and is a gateway to further technical information and data. The project was treated as a priority theme within the National Centre for Climate Services (NCCS).

Keywords:
Hydrology, Climate change, Watercourses, Lakes, Groundwater, Water temperature, Water quality, Water ecology

Das Projekt Hydro-CH2018 hat die Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässer in der Schweiz untersucht. Mit dem Klimawandel verändert sich der gesamte Wasserhaushalt, besonders aber die jahreszeitliche Verteilung der Wasserressourcen in Oberflächengewässern und im Grundwasser. Niedrigwasser wird häufiger und die Gewässer werden wärmer. Dies hat grosse Auswirkungen auf die Gewässerökologie, den Hochwasserschutz und die Wassernutzung. Der Bericht «Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer» bietet eine kompakte Übersicht über die Ergebnisse und ist ein Einstieg zu weiteren Fachinformationen und Daten. Das Projekt wurde als Themenschwerpunkt im National Centre for Climate Services (NCCS) durchgeführt.

Stichwörter:
Hydrologie, Klimawandel, Fliessgewässer, Seen, Grundwasser, Wassertemperatur, Wasserqualität, Gewässerökologie, Wasserwirtschaft

Le projet Hydro-CH2018 s'est penché sur les effets des changements climatiques sur les eaux suisses, lesquels modifient l'ensemble du régime des eaux, mais plus particulièrement la répartition saisonnière des ressources en eau dans les eaux superficielles et souterraines. Les étiages deviennent plus fréquents et les eaux se réchauffent, entraînant d'importantes répercussions sur l'écologie des eaux, la protection contre les crues et l'utilisation de l'eau. Le rapport « Effets des changements climatiques sur les eaux suisses » propose une vue d'ensemble synthétique des résultats du projet Hydro-CH2018, mené au National Centre for Climate Services en tant que thème prioritaire. Il sert également de base à d'autres données et informations spécialisées.

Mots-clés:
hydrologie, changements climatiques, cours d'eau, lac, eaux souterraines, température de l'eau, qualité de l'eau, écologie des eaux, gestion des eaux

Il progetto Hydro-CH2018 ha esaminato gli effetti dei cambiamenti climatici sulle acque della Svizzera. Con i cambiamenti climatici si modifica il regime idrico nel suo complesso, ma in particolare la distribuzione stagionale delle risorse idriche nelle acque superficiali e sotterranee. Le magre diventano più frequenti e le acque si riscaldano. Ciò ha conseguenze importanti sull'ecologia delle acque, sulla protezione contro le piene e sull'utilizzazione delle acque. Il rapporto «Effetti dei cambiamenti climatici sulle acque della Svizzera» offre un compendio dei risultati e costituisce il presupposto per l'accesso a ulteriori dati e informazioni specialistiche. Il progetto è stato condotto come tematica prioritaria nel National Centre for Climate Services (NCCS).

Parole chiave:
Idrologia, cambiamento climatico, corsi d'acqua, laghi, acque sotterranee, temperatura delle acque, qualità delle acque, ecologia delle acque, gestione delle acque

Vorwort

Die Schweiz ist das Land der Gletscher, des Schnees, der Flüsse und der Seen. Sie ist aber auch ein in grossen Teilen intensiv genutztes Land, und das schliesst die Nutzung der Gewässer ein. Diese sind in dreierlei Hinsicht betroffen: durch Wasserentnahmen, durch Schadstoffeinträge und durch die Trockenlegung und Verbauung der einstigen Gewässerlandschaften. Zusätzlich verschieben sich durch den Klimawandel jetzt noch die hydrologischen Grundkonstanten der Schweizer Gewässer: die saisonale Wasserverfügbarkeit wandelt sich, die Lebenswelt in und an den Gewässern muss sich an höhere Temperaturen und eine veränderte Wasserführung anpassen.

Um die Erderwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen, hat die Staatengemeinschaft 2015 das Übereinkommen von Paris verabschiedet. Mit der Ratifizierung hat sich die Schweiz verpflichtet, ihre Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber dem Stand von 1990 zu halbieren. Um dieses Ziel zu erreichen, sind gemeinschaftliche Anstrengungen von Wirtschaft, Politik und Gesellschaft notwendig. Erneuerbare Energien sowie Energieeffizienz werden deshalb gefördert, Treibhausgasemissionen in den Bereichen Verkehr, Gebäude, Industrie und Landwirtschaft sollen reduziert werden.

Die Schweiz ist stark betroffen: Die unter dem Dach des National Centre for Climate Services (NCCS) erstellten Klimaszenarien CH2018 für die Schweiz zeigen, dass ohne konsequenten Klimaschutz bis Ende des 21. Jahrhunderts die mittlere jährliche Lufttemperatur gegenüber heute um bis zu 4 °C ansteigen wird. Mit Klimaschutzmassnahmen kann diese Erwärmung auf 1,5 °C begrenzt werden.

Welche Auswirkungen hat dies auf den Wasserhaushalt, die Gewässerökologie, den Hochwasserschutz, die Wassernutzung und den Gewässerschutz? Um diese Fragen zu beantworten, hat das Bundesamt für Umwelt (BAFU) in Zusammenarbeit mit der Wissenschaft und basierend auf den Klimaszenarien CH2018 hydrologische Grundlagen und Szenarien für die Zukunft («Hydro-CH2018») erstellt. Das BAFU hat darauf abgestützt und gemeinsam mit anderen betroffenen Fachstellen des Bundes die Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft analysiert und den Handlungsbedarf für die Zukunft ermittelt. Diese Arbeiten erfolgten im Rahmen des NCCS über verschiedene Sektoren hinweg. Der vorliegende Bericht bietet eine Übersicht über den Stand des Wissens.

Die neuen hydrologischen Szenarien bilden zusammen mit den langjährigen Datenreihen und der modernen Messinfrastruktur des Bundes eine wichtige Grundlage für die Anpassungsmassnahmen an den Klimawandel in der Schweiz. Sie ermöglichen es, rechtzeitig die richtigen Wege für die zukünftige Wasserwirtschaft und gesunde Gewässer einzuschlagen. Gleichzeitig zeigen sie auf, wo die Grenzen der Anpassung – auch im internationalen Kontext – liegen und was durch konsequenten Klimaschutz gewonnen werden kann.

Karine Siegwart, Vizedirektorin
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Zusammenfassung

Die Schweiz ist eines der wasserreichsten Länder Europas. Zusätzlich verfügt sie über grosse Wasserspeicher in Form von Seen, Gletschern, Schnee und Grundwasser. Auf ihrem Staatsgebiet entspringen die grossen Flüsse Rhein und Rhone sowie wichtige Zuflüsse zu Po und Donau. Veränderungen des Wasserhaushalts in der Schweiz haben darum unmittelbare Auswirkungen auf die unterliegenden Länder.

Die Jahresmitteltemperatur der Schweiz hat gemäss MeteoSchweiz seit 1864 bereits um 2 °C zugenommen und damit doppelt so stark wie im globalen Durchschnitt. Die neuen Klimaszenarien CH2018 prognostizieren ohne Klimaschutzmassnahmen eine weitere Zunahme um etwa 4 °C bis Ende Jahrhundert. Durch konsequenten Klimaschutz könnte diese Zunahme auf rund 1,5 °C begrenzt werden. Ohne Klimaschutz werden sich auch die Niederschläge noch deutlicher verändern und ihre Zunahme im Winter sowie ihre Abnahme im Sommer stärker akzentuieren.

Ohne Klimaschutz werden die Gletscher der Alpen bis Ende des Jahrhunderts rund 95 % ihres heutigen Volumens verlieren. In Zukunft wird mehr Regen als Schnee fallen. Das Schmelzwasser aus Schnee und Gletschern wird dann im Sommer im Abfluss fehlen – die Sommerabflüsse gehen zurück und die Winterabflüsse nehmen zu. Bei einem Szenario ohne Klimaschutz würde der Gesamtabfluss aus der Schweiz bis Ende Jahrhundert leicht zurückgehen. Die Gesamtmenge des Grundwassers verändert sich kaum, aber die Grundwasserneubildung wird im Winter zu- und im Sommer abnehmen.

In der Schweiz wird also auch in Zukunft über das Jahr gesehen noch genug Wasser zur Verfügung stehen. Allerdings könnte es im Sommer ohne Anpassungsmassnahmen regional vermehrt zu Engpässen kommen. Zu den generell niedrigeren Abflüssen im Sommer und Herbst kommen häufigere und längere Trockenphasen hinzu. Gleichzeitig steigt genau dann der Wasserbedarf besonders in der Landwirtschaft infolge der höheren Temperaturen stark an. In Zukunft wird es immer wichtiger werden, die Wasserressourcen integral für alle Bedürfnisse und für ein gesamtes Einzugsgebiet zu bewirtschaften, auch mit Augenmerk auf die Wasserqualität und die Reduktion der Stoffeinträge. Aber auch die Wasserkraftproduktion und der Tourismus müssen sich auf die klimabedingten Veränderungen einstellen. Da wärmere Luft mehr Wasser aufnehmen kann, haben die Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen in der Schweiz seit Messbeginn bereits deutlich zugenommen, und die Klimaszenarien lassen einen weiteren Anstieg erwarten. Somit wird es auch mehr Oberflächenabfluss und lokale Hochwasser geben.

Die Jahresmitteltemperaturen der Fliessgewässer und Seen sind in den letzten Jahrzehnten bereits stark gestiegen. Bis Ende Jahrhundert zeigen die hydrologischen Szenarien einen weiteren deutlichen Anstieg. Der Anstieg ist im Sommer besonders gross und für Wasserlebewesen kritische Temperaturen werden häufiger überschritten. Der Temperaturanstieg in Seen verändert zudem deren Mischungsverhalten und kann grosse Auswirkungen auf die Seeökosysteme haben. Das Grundwasser reagiert langsamer auf den Klimawandel, aber auch hier werden die Temperaturen steigen.

Die Gewässerökosysteme stehen heute durch verschiedene anthropogene Stressfaktoren wie Verbauungen, chemische Verunreinigungen oder Veränderungen der Abflussdynamiken durch die Wasserkraft bereits stark unter Druck. Die Folgen des Klimawandels kommen noch hinzu: Fische und andere wechselwarme Lebewesen können sich nicht ohne Weiteres an höhere Wassertemperaturen anpassen. Weitere klimabedingte Veränderungen wie das Trockenfallen von Fliessgewässerabschnitten oder veränderte Schichtungsverhältnisse in Seen können das Gleichgewicht von Ökosystemen empfindlich stören. Naturnahe Gewässer haben eine höhere Widerstands- und Anpassungsfähigkeit gegenüber den Einflüssen des Klimawandels. Vor diesem Hintergrund erhöht sich die Dringlichkeit einer möglichst raschen Umsetzung von Gewässerschutzmassnahmen wie der Renaturierung, der Reduktion von stofflichen Belastungen und der Sicherung von ausreichenden Wassermengen.

Zusätzlich zu diesen Massnahmen sind eine solide Messinfrastruktur für das Monitoring der Gewässer und das

Sicherstellen von langjährigen Datenreihen sowie die Weiterentwicklung der hydrologischen Vorhersagen unter Berücksichtigung neuer Technologien und Methoden unabdingbar. Mit diesen Wissensgrundlagen wird die Schweiz auch in Zukunft über zuverlässige Entscheidungsgrundlagen für die Massnahmen zur Anpassung an den Klimawandel verfügen.

1 Einleitung

Der Themenschwerpunkt «Hydrologische Grundlagen zum Klimawandel» des National Centre for Climate Services (NCCS) – kurz Hydro-CH2018 – hat die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt, die Gewässer und die Wasserwirtschaft untersucht. Basierend auf den neuen Klimaszenarien für die Schweiz zeigen die Studien, dass Veränderungen, wie zum Beispiel das Ausmass der Sommertrockenheit, noch ausgeprägter sein werden als bisher erwartet. Die Resultate sind in verschiedenen Publikationen sowie auf der NCCS-Webplattform und dem hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES) öffentlich zugänglich.

Informationen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässer und den Wasserhaushalt in der Schweiz sind eine wichtige Grundlage für eine gezielte Anpassung. Der Bundesrat hat deshalb das Bundesamt für Umwelt beauftragt, verlässliche hydrologische Grundlagen für die Anpassungsmassnahmen bereitzustellen (BAFU 2014b, Massnahme wg2). Dies beinhaltet das regelmässige Erstellen von hydrologischen Szenarien, die Verbesserung des Wissens über die hydrologischen Prozesse sowie das Beobachten und Dokumentieren der aufgrund des Klimawandels bereits ablaufenden Veränderungen.

Der Auftrag wurde im Rahmen des Themenschwerpunktes «Hydrologische Grundlagen zum Klimawandel» des National Centre for Climate Services (NCCS) – kurz «Hydro-CH2018» – umgesetzt. Namensgebend für den Themenschwerpunkt sind die Klimaszenarien CH2018, welche das NCCS Ende 2018 veröffentlicht hat (*www.klimaszenarien.ch*). Basierend auf diesen Klimaszenarien wurden in Zusammenarbeit mit zahlreichen Schweizer Forschungsinstitutionen die Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft untersucht. Die wichtigsten Ergebnisse sind in diesem Bericht zusammengefasst.

Synthese und Türöffner zu weiteren Produkten
Der vorliegende Bericht versteht sich als Übersicht und Einstiegspforte zu weiteren Produkten und Vertiefungsmaterialien aus dem Projekt Hydro-CH2018. Wo nicht anders vermerkt, sind diese über die Webplattform des NCCS (*www.nccs.admin.ch*) einsehbar.

Zusätzlich verfügbare Produkte aus Hydro-CH2018

- NCCS-Broschüre «Schweizer Gewässer im Klimawandel» *(www.nccs.admin.ch/hydro_brochuere)*
- NCCS-Webplattform mit allgemeinen Informationen zu diesem Themenschwerpunkt, den Klimaszenarien sowie weiteren Themenschwerpunkten des NCCS. Zentraler Zugang zu allen Produkten und Publikationen aus Hydro-CH2018 *(www.nccs.admin.ch/hydro)*
- NCCS-Webatlas mit vielen Grafiken aus diesem Bericht sowie weiteren grafischen Darstellungen aus Hydro-CH2018 *(www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/materialien-und-daten/daten.html)*
- Hydro-CH2018-Fachberichte zu den einzelnen Themen und Forschungsprojekten sowie wissenschaftliche Publikationen *(www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/das-nccs/themenschwerpunkte/hydro-ch2018.html)*
- Daten: Grafiken, Karten und Indikatoren im Hydrologischen Atlas der Schweiz *(www.hydromapscc.ch)* sowie auf dem Kartenportal des Bundes *(www.map.geo.admin.ch)*

Was ist neu bei Hydro-CH2018?
Für das Projekt Hydro-CH2018 standen mit CH2018 neue Klimaszenarien zur Verfügung. Sie zeigen eine Reihe von Verbesserungen gegenüber den Szenarien CH2011 (*www.ch2011.ch*). So wurden neuere Emissionsszenarien, eine grössere Anzahl und höher aufgelöste Klimamodelle berücksichtigt und bessere statistische Verfahren für das Übertragen der Klimamodelldaten auf die Schweiz angewendet. Dies ermöglichte kontinuierliche Klimadaten von 1981 bis 2099 und eine höhere räumliche Auflösung (für weitere Informationen siehe Technischer Bericht CH2018).

In Hydro-CH2018 konnten deshalb zum ersten Mal durchgehende hydrologische Zeitreihen von 1981 bis 2099 erstellt und analysiert werden. Die Ergebnisse aus Hydro-CH2018 bestätigen zum grössten Teil frühere Erkenntnisse aus den Projekten «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (BAFU 2012a), Brennpunkt Klima Schweiz (Akademien der Wissenschaften Schweiz 2016) oder dem Nationalen Forschungsprogramm NFP 61

«Nachhaltige Wassernutzung» (*www.nfp61.ch*). In einigen Bereichen sind die Veränderungen allerdings noch ausgeprägter als in früheren Studien erwartet, z. B. beim Ausmass der Sommertrockenheit. Hydro-CH2018 legte zusätzlichen Schwerpunkt auf Themen, welche in bisherigen Berichten weniger im Fokus standen. Beispielsweise wurden bereits messbare Trends bei Abflussmessungen oder bei der Gewässertemperatur mit der zukünftigen Entwicklung abgeglichen. Ebenso wurden Fokusthemen wie Grundwasser, Niedrigwasser (Trockenheit), Gewässertemperatur sowie Auswirkungen auf Gewässerökologie und Wasserwirtschaft vertieft analysiert. Der Bericht bietet einen umfassenden, aber dennoch kompakten Gesamtüberblick über die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserhaushalt, Gewässer und Wasserwirtschaft in der Schweiz und leitet daraus Stossrichtungen der Anpassung an den Klimawandel ab. Darin eingebettet werden die Ergebnisse aus 11 Forschungsprojekten präsentiert, welche im Rahmen von Hydro-CH2018 von im Bereich Wasser führenden Schweizer Forschungsinstitutionen durchgeführt wurden (Tabelle 1-1). Zusätzlich beauftragte das BAFU verschiedene Forschungsinstitutionen mit dem Verfassen von Hintergrundberichten zu den im Bericht behandelten Themen. Drei Workshops zu den Themen «Anpassung im Wasserbereich», «weiterer Bedarf an Forschung» und «Notwendige Grundlagen» dienten der Konsolidierung des Projekts (Kapitel 8).

Tab. 1-1: Übersicht über die Hydro-CH2018-Forschungsprojekte

Inhalt des Projekts	Forschungsinstitutionen	Kapitel im Bericht
Hydrologische Szenarien, basierend auf hochaufgelösten stochastischen Klimadaten: Welche Auswirkungen hat die natürliche Variabilität in den Klimadaten auf die hydrologischen Szenarien?	ETH Zürich	4.2
Wasserbilanz und Trockenheit: Wie wirkt sich der Klimawandel auf Trockenheit, pflanzenphysiologische Regulierung der Transpiration und zukünftigen Bewässerungsbedarf aus?	ETH Zürich	4.3
Walddynamik, Landnutzung und Wasserhaushalt: Wie wirken sich zukünftige Veränderungen in der Walddynamik auf Verdunstung und Abfluss aus?	WSL	4.3
Quantifizierung von Abflussanteilen aus Schnee und Gletscherschmelze: Welche Auswirkungen hat das Abschmelzen der Gletscher und der Rückgang der Schneedecke auf den Abfluss?	Universität Zürich	6.1
Aktualisierte hydrologische Szenarien aufgrund der neuen Klimaszenarien: Wie verändern sich die Abflüsse unter unterschiedlichen Klimaszenarien?	Universität Bern	6.2
Wasserspeicher: Können natürliche Seen und künstliche Reservoire zur Bewältigung von Sommerwasserknappheit beitragen?	WSL und HS Rapperswil	6.3
Wie verändern sich die Grundwasserressourcen in alpinen Einzugsgebieten mit dem Klimawandel und welchen Einfluss haben sie auf die Abflussbildung?	Universität Neuchâtel	6.4
Einfluss des Klimawandels auf die Temperaturen von Fliessgewässern und Seen: Wie entwickeln sich die Wassertemperaturen der Schweizer Fliessgewässer und Seen in Zukunft?	EPF Lausanne, Eawag und Universität Lausanne	6.7.1
Temperaturentwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen: Welches sind die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Temperaturentwicklung von Grundwasservorkommen und wie entwickelt sich die Grundwassertemperatur in Zukunft?	Universität Basel	6.7.3
AgriAdapt: Wie verändert sich mit fortschreitendem Klimawandel der Bewässerungsbedarf und welche Auswirkungen hat dies auf den Grundwasserstand?	Agroscope	7.1.2

2 Methodik

2.1 Modelle und deren Unsicherheiten

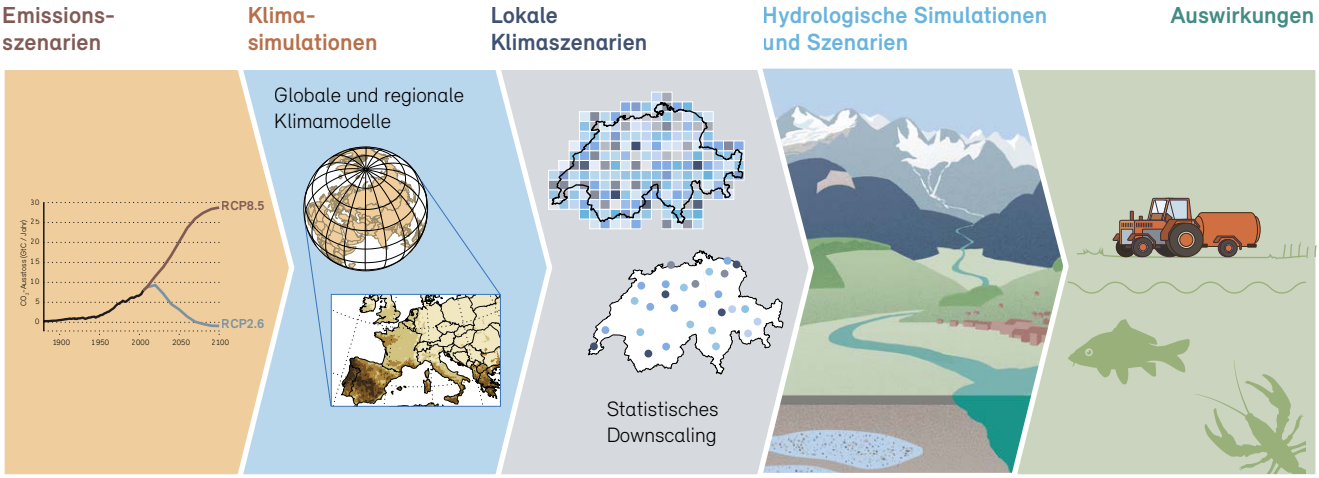
Um Aussagen zu den Veränderungen des zukünftigen Wasserhaushalts machen zu können, ist eine ganze Kette von Klima- und Wasserhaushaltsmodellen nötig. Mit jedem Modellschritt können gewisse Prozesse besser abgebildet werden, gleichzeitig entstehen aber auch zusätzliche Unsicherheiten.

Es ist ein langer Weg, aus Szenarien der zukünftigen weltweiten Treibhausgas-Emissionen die Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in der Schweiz abzuleiten. Dazu sind verschiedene Modelle, Bearbeitungsschritte und Annahmen notwendig (Abbildung 2-1). So müssen Annahmen über die zukünftigen globalen Treibhausgas-Emissionen getroffen werden, die wiederum als Grundlage für globale und regionale Klimamodelle und damit den Klimaszenarien CH2018 dienen. Aus diesen entstanden mithilfe von hydrologischen Modellen die hydrologischen Szenarien Hydro-CH2018, welche die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der Schweiz aufzeigen. Zum Teil wurden die hydrologischen Szenarien noch für weitere Modelle (z. B. Vegetationsmodelle) verwendet, um Auswirkungen etwa auf das Pflanzenwachstum oder den Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft zu untersuchen.

Modelle können die realen Verhältnisse nur vereinfacht abbilden, sodass Modellergebnisse unvermeidlich mit gewissen Unsicherheiten behaftet sind. Mit jedem Schritt der Bearbeitungskette erhöhen sich die Anzahl Kombinationsmöglichkeiten und die Komplexität der Berechnun-

Abb. 2-1: Modellkette, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft abzuschätzen

Unsicherheiten entstehen in jedem Bearbeitungsschritt, von der Auswahl der Emissionsszenarien als Input für die globalen Klimamodelle über den Regionalisierungsprozess (Verbesserung der Auflösung) als Voraussetzung für die hydrologische Modellierung bis hin zur Analyse der



Quellen der Unsicherheit:

- Zukünftige Entwicklung Treibhausgasemissionen
- Modellwahl und Modellstruktur
- Skalierung und Korrektur der Modellergebnisse
- Eingangsdaten
- Anfangsbedingungen
- Modellparameter
- Daten für Kalibration und Validierung
- Natürliche Variabilität
- Prozessverständnis
- Unvorhersehbare Ereignisse,
- die Systeme zum Kippen bringen

Quelle: eigene Darstellung, nach CH2014-Impacts (Akademien der Wissenschaften Schweiz 2016)

gen. Um die Rechenzeit zu begrenzen, muss die Anzahl der untersuchten Szenarien und Variablen bei jedem Modellierungsschritt eingeschränkt werden.

Zwar erhöht sich mit jedem Modellierungsschritt die Unsicherheit, gleichzeitig steigt aber die Genauigkeit fachspezifischer und regionaler Aussagen, da die Modelle mit beobachteten Werten kalibriert und validiert werden können. Beispielsweise ermöglicht erst die Kombination von Klimamodellen und hydrologischen Modellen verlässliche Aussagen zur zukünftigen Abflussentwicklung eines Einzugsgebiets.

Die Unsicherheiten in den Klimamodellen werden in den Klimaszenarien berücksichtigt, indem mittels verschiedener Modellketten eine Spannbreite von möglichen zukünftigen Entwicklungen angegeben wird. Diese Spannbreite und der Unsicherheitsbereich der Klimamodelle spiegeln sich somit auch in den hydrologischen Modellen wider. Wie gross der Unsicherheitsbereich der hydrologischen Modellierung tatsächlich ist, kann wiederum durch den Abgleich mehrerer hydrologischer Modelle abgeschätzt werden.

2.2 Klimaszenarien

Wie entwickelt sich das Klima in der Schweiz, wenn konsequenter Klimaschutz betrieben wird oder wenn keine Massnahmen getroffen werden? Anhand von Emissions- und Klimaszenarien können die unterschiedlichen Entwicklungen aufgezeigt werden. Für die kleinräumige Schweiz müssen dafür die Ergebnisse aus globalen und regionalen Klimamodellen mit statistischen Methoden verfeinert werden.

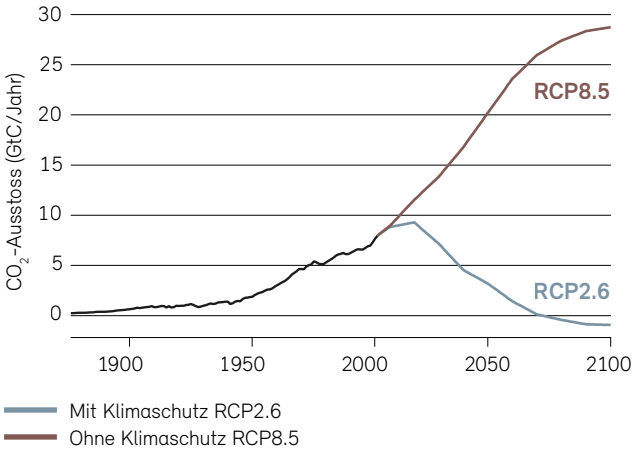
Die grösste Ungewissheit für langfristige Vorhersagen liegt bei den künftigen weltweiten Treibhausgasemissionen. Um die Spannbreite der möglichen Entwicklungen abzubilden, werden sowohl bei den Klimaszenarien als auch den hydrologischen Szenarien CH2018 jeweils die Resultate von zwei möglichen Emissionspfaden gezeigt (IPCC 2013) (Abbildung 2-2):

- «Konsequenter Klimaschutz» (RCP[1]2.6): Mit einer umgehenden und drastischen Senkung der Treibhausgasemissionen wird die globale Erwärmung auf unter 2 °C begrenzt. Dies entspricht dem Übereinkommen von Paris, oft Klimaschutzabkommen genannt, von 2015.
- «Kein Klimaschutz» (RCP8.5): Es werden keine Klimaschutzmassnahmen ergriffen, die Emissionen und die Erwärmung nehmen weiter zu.

Im Themenschwerpunkt Hydro-CH2018 werden immer beide Szenarien nebeneinandergestellt, wobei das Szenario «ohne Klimaschutz» als Referenz für Anpassungsmassnahmen wichtig ist. Einige Grafiken dieses Berichts zeigen der besseren Lesbarkeit halber nur das Szenario «ohne Klimaschutz». Resultate für beide Szenarien können den weiteren Produkten von Hydro-CH2018 entnommen werden.

Abb. 2-2: Untersuchte Emissionsszenarien

Weltweiter Netto-CO_2-Ausstoss aus fossilen und industriellen Quellen. Dargestellt sind zwei mögliche Entwicklungen.



Quelle: angepasst von IPCC 2013 / WGI / Box 1.1 / Figure 3b

Klimamodellierung und Klimaszenarien CH2018

Mit globalen Klimamodellen werden die Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien der Treibhausgasemissionen auf das globale Klima berechnet. Um deren grobe räumliche Auflösung zu verbessern, werden die Ergeb-

1 Representative Concentration Pathway: RCP ist die Abkürzung für repräsentative Konzentrationspfade, was heisst, dass den Szenarien Annahmen zu den zukünftigen Konzentrationen von Treibhausgasen und Aerosolen zugrunde liegen.

nisse aus den globalen Klimamodellen als Randbedingungen für Simulationen der regionalen Klimamodelle für Europa verwendet.

Die Klimaszenarien CH2018 verwenden für das Emissionsszenario RCP8.5 die Ergebnisse von 31 Klimamodellsimulationen aus dem europäischen Projekt EURO-CORDEX (*www.euro-cordex.net*). Dabei ist jede Modellsimulation das Resultat einer Verknüpfung von einem von neun globalen mit einem von sieben regionalen Klimamodellen. Die regionalen Klimamodelle rechnen in einer räumlichen Auflösung von 12 km bzw. 50 km. Für das Szenario RCP2.6 sind nur 12 und damit deutlich weniger Simulationen verfügbar. Der Vergleich der verschiedenen Klimamodellsimulationen ermöglicht eine Abschätzung der Unsicherheiten, die mit Klimaszenarien verbunden sind.

Die räumliche Auflösung der regionalen Klimamodelle ist für die kleinräumige und gebirgige Schweiz immer noch zu grob, um sie direkt für hydrologische Modelle zu verwenden. Mit der empirisch-statistischen Methode *Quantile Mapping* konnten die grob aufgelösten regionalen Klimamodelldaten anhand von Messwerten korrigiert und auf lokale Skalen angepasst werden. Diese Klimadaten von CH2018 liegen für sieben Klimaparameter als Zeitreihen an bestehenden meteorologischen Stationen vor. Zusätzlich wurden flächendeckende Karten in einer Gitternetzauflösung von 2 km für Temperaturwerte und die Tagesniederschlagssumme erstellt. Alle Zeitreihen und Rasterdaten liegen durchgehend für die Periode 1981 – 2099 in einer täglichen Auflösung vor (*www.nccs.admin.ch*).

2.3 Hydrologische Szenarien

Die aufbereiteten Resultate der Klimamodelle dienen als Eingangsdaten für die hydrologischen Modellierungen. Im Projekt Hydro-CH2018 wurden je nach Fragestellung verschiedene, spezialisierte hydrologische Modelle eingesetzt. Ergebnis sind die hydrologischen Szenarien, welche die künftigen Entwicklungen in den Schweizer Gewässern aufzeigen.

Der Untersuchungsraum für die hydrologische Modellierung umfasste grundsätzlich die ganze Schweiz, das Fürstentum Liechtenstein und weitere ausländische Gebiete, die ins Schweizer Staatsgebiet entwässern: in der Gesamtheit auch als «hydrologische Schweiz» bezeichnet. Tabelle 2-1 listet die in Hydro-CH2018 verwendeten hydrologischen Modelle und die jeweils damit untersuchte Grösse auf. Die Wasserhaushaltsszenarien für die hydrologische Schweiz wurden mit dem Modell PREVAH-WSL berechnet. Hydrologische Szenarien für 93 Einzugsgebiete wurden mit dem Modell PREVAH-UniBE erstellt, und für 190 vergletscherte Gebiete wurde das Modell HBV Light-UniZH verwendet. Einzelne spezifische Fragestellungen wurden nur für ausgewählte Einzugsgebiete innerhalb der Schweiz bearbeitet. So konnten aufgrund der langen Rechenzeiten z. B. für Modellierungen der Gewässertemperatur und der Grundwasserneubildung nur wenige Gebiete und Gewässer betrachtet werden (siehe Tabelle 2-1 und Anhang Tabelle A1).

Tab. 2-1: Verwendete Modelle im Projekt Hydro-CH2018

Untersuchte Grösse	Modell	Spezifische Resultate für	Anzahl Modell-ketten RCP2.6	Anzahl Modell-ketten RCP8.5
Wasserhaushalt, insbesondere Abfluss	PREVAH-WSL	· generelle Aussagen zum Wasserhaushalt der hydrologischen Schweiz · 30 grosse Einzugsgebiete in der Grösse von 700 – 35 900 km² mit Abflussmessungen	7	14
	PREVAH-UniBE	· Aussagen für verschiedene Abflusskenngrössen spezifischer Einzugsgebiete · 93 Einzugsgebiete in der Grösse von 10 – 1700 km² mit Abflussmessungen · eine Vielzahl von Einzugsgebiets-Charakteristika und Höhenlagen	8	20
	HBV Light-UniZH	· 190 vergletscherte Kopfeinzugsgebiete · Fokus auf Modellierung Schnee- und Gletschereis-schmelze	8	21
Bodenfeuchte und Verdunstung	COSMO-CLM²-gekop-peltes regionales Kli-mamodell ETH Zürich	Europa im Raster 0,44 × 0,44 ° (50 km). Es wurden drei eigene RCP8.5-Läufe auf Basis des GCM MPI-ESM-LR durchgeführt.	0	3
Wassertemperatur	Simstrat (v. 2.1.2) Eawag	29 Seen	7	17
	Alpine3 D EPFL	10 Fliessgewässer	4	7
Grundwasserneubil-dung und -stände	Hydrogeosphere and HBV Light Uni Neuchâtel	· 11 alpine Einzugsgebiete · Testgebiet im Seeland (Broye) · 3 Standorte für Berechnung Neubildung aus Niederschlag	0 1 0	3 1 6
	Feflow: ArcMap Uni Basel Alpine 3 D EPFL	· 5 Schweizer Regionen und 35 Grundwasserleiter · Ableitung der Temperaturänderung aufgrund veränderter Grundwasserneubildungsprozesse	1	1
Prozessstudien	PREVAH-WSL, gekoppelt mit Wald-entwicklungsmodell	6 Einzugsgebiete	8	18
	Topkapi-ETH ETHZ, angetrieben mit Wettergenerator AWE-GEN-2d	Thur, Kleine Emme und Maggia	0	9
	Pflanzenwachstums-modell CropSyst	Testgebiet im Seeland	4	6

Verwendete Grundlagedaten

Tabelle 2-2 zeigt die wichtigsten für die hydrologische Modellierung verwendeten Daten und ihre Herkunft. Weitere Daten, welche in den jeweiligen Hydro-CH2018-Forschungsprojekten verwendet wurden, können den spezifischen Projektberichten entnommen werden.

Tab. 2-2: Verwendete Daten für die hydrologische Modellierung

Daten	Datenherkunft
Abfluss, Wasserstand, Grundwasserstände, Gewässertemperaturen	Bundesamt für Umwelt BAFU, Kantone, Energieerzeuger und Forschungseinrichtungen
Klimadaten wie Temperatur, Niederschlag, Strahlung, Wind, Luftfeuchte	Bundesamt für Klimatologie und Meteorologie (MeteoSchweiz)
Klimaszenarien CH2018 Klimamodelldaten von EURO-CORDEX und CMIP5	NCCS Earth System Grid Federation
Digitales Höhenmodell, Informationen zu Geologie und Böden, topografische Kartengrundlagen	Bundesamt für Landestopografie (swisstopo) und Copernicus-Programm der Europäischen Umweltagentur (EUA)
Gletscherstände und Gletscherszenarien	Glacier monitoring service GLAMOS, Zekollari et al. 2019
Schneedaten MODIS-Schneebedeckungsprodukt MOD10A1 und MYD10A1	WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF US National Snow and Ice Data Center (NSIDC)
Landnutzung	Bundesamt für Statistik BFS, Bundesamt für Landwirtschaft BLW (AGIS), Copernicus-Programm der Europäischen Umweltagentur (EUA)

Betrachtete Zeiträume

Als Referenzperiode ist in diesem Bericht, wenn nicht anders vermerkt, der Zeitraum 1981 – 2010 festgelegt (Referenzperiode der World Meteorological Organization WMO). Dieser Zeitraum diente als Ausgangspunkt für die Berechnung der Szenarien. Wenn im Bericht vom heutigen Klima die Rede ist, ist damit das Klima der Referenzperiode gemeint.

Die Szenarien beschreiben jeweils den erwarteten Mittelwert der Klimaverhältnisse über eine Dauer von 30 Jahren, gruppiert um die Jahre 2060 und 2085. Im Text beziehen sich Aussagen zu «Mitte Jahrhundert» auf 2060 (d. h. Zeitraum 2045 – 2074) und «Ende Jahrhundert» oder «ferne Zukunft» auf 2085 (d. h. Zeitraum 2070 – 2099). Um trotz der hohen Variabilität zwischen den einzelnen Jahren robuste Aussagen über Veränderungen machen zu können, werden jeweils die Mittelwerte über 30 Jahre verwendet. Wenn abweichende Perioden betrachtet werden, wird dies im Bericht erwähnt.

Betrachtete Klimamodellsimulationen

Als Input für die hydrologischen Modellierungen konnte jeweils nur eine Auswahl aller möglichen Klimamodellsimulationen aus den Klimaszenarien CH2018 verwendet werden, da nicht alle für die hydrologischen Modelle notwendigen Klimaparameter für alle Klimamodelle vorhanden sind. Die von den drei hydrologischen Modellen PREVAH-UniBE, PREVAH-WSL und HBV Light-UniZH verwendeten Modellketten sind nicht identisch. Zwischen PREVAH-UniBE und HBV Light-UniZH ist der Unterschied der verwendeten Ketten sehr gering, mit dem Modell PREVAH-WSL wurden für RCP8.5 jedoch deutlich weniger Ketten berechnet. Lagen für dieselbe Klimamodellkette Ergebnisse in zwei Auflösungen vor, wurde nur die 12-km-Auflösung berücksichtigt. Aufgrund der langen Rechenzeiten für spezifische hydrologische Modelle, wie die Grundwassermodelle oder Gewässertemperaturmodelle, konnten in einigen Projekten nur wenige Klimamodellsimulationen verarbeitet werden (Tabelle 3-1). Hier wurde eine Vorauswahl getroffen, um möglichst die ganze Bandbreite und Unsicherheit der Klimamodelle abzubilden. Je weniger Projektionen betrachtet werden können, umso weniger gut wird der Unsicherheitsbereich abgedeckt. Die in den Studien verwendeten Klimaprojektionen sind im Anhang (Tabelle A2) aufgeführt.

Unsicherheiten bei der hydrologischen Modellierung

Die Klimaszenarien CH2018 dienen als Eingangsdaten für die hydrologische Modellierung und sind bereits mit Unsicherheiten behaftet. Zudem liefern sie für diverse Klimaparameter nur Tageswerte, während viele hydrologische Modelle aber Stundenwerte als Inputvariable benötigen. Daher werden z. B. beim Niederschlag oder der Temperatur weitere Verfahren angewendet, um die zeitliche

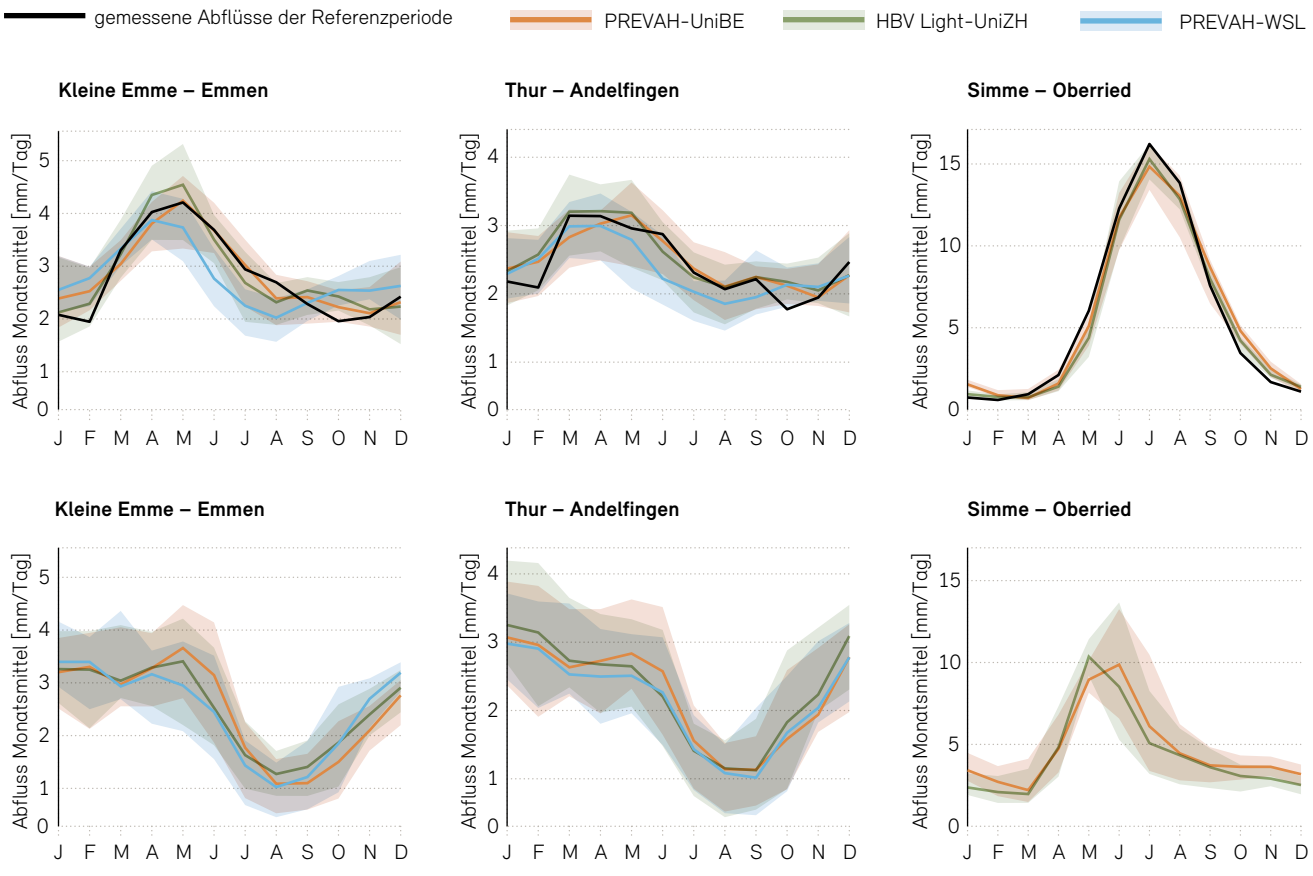
Auflösung zu verfeinern. Andere Modelle rechnen direkt mit Tageswerten, wodurch der Tagesgang von Prozessen wie der Schneeschmelze oder innerhalb von Stunden ablaufende Prozesse wie Hochwasser in kleinen Gebieten schlecht oder nicht abgebildet werden können. Weitere Unsicherheiten kommen bei der Auswahl des hydrologischen Modells sowie beim Ansatz hinzu, mit dem Prozesse wie Abflussbildung, Verdunstung, Schnee- oder Gletscherschmelze berechnet werden. Eine weitere Quelle von Unsicherheit ist die Bestimmung der Modellparameter. Sie werden, wenn möglich, durch Kalibrierung mit Messwerten wie Abfluss oder Schneebedeckung ermittelt. In Gebieten ohne Messungen müssen sie aus Gebieten mit hydrologischen Messungen unter Verwendung von Gebietsmerkmalen übertragen werden, was die Unsicherheit weiter erhöht. Um diese Unsicherheitsquelle zu vermeiden, wurden beim Modell PREVAH-UniBE nur Gebiete mit Abflussmessung modelliert. Ausserdem gehen alle Modelle davon aus, dass die für heutige Bedingungen kalibrierten Parameter auch für die Zukunft gelten. Dies ist besonders bei der Modellierung von hydrologischen Extremen, bei denen sich die dominierenden Prozesse ändern könnten, ein Unsicherheitsfaktor (Matti et al. i. E.).

Vergleich hydrologischer Szenarien

Um die Auswirkungen der Unsicherheitsfaktoren auf die Ergebnisse abzuschätzen, wurden die berechneten saisonalen Abflüsse für die Referenzperiode und das

Abb. 2-3: Vergleich der mit drei hydrologischen Modellen berechneten Abflüsse im Jahresgang für die Einzugsgebiete Kleine Emme, Thur und Simme

Dargestellt sind die gemessenen mittleren Monatsabflüsse sowie die berechneten mittleren Monatsabflüsse für die Referenzperiode (1981 – 2010) (jeweils Median und Unsicherheitsbereich; obere Zeile). Ebenfalls dargestellt sind die berechneten Werte für Ende des Jahrhunderts ohne Klimaschutz (RCP8.5) (untere Zeile). Grundsätzlich stimmen die Regime sowie deren Änderungen zwischen den unterschiedlichen



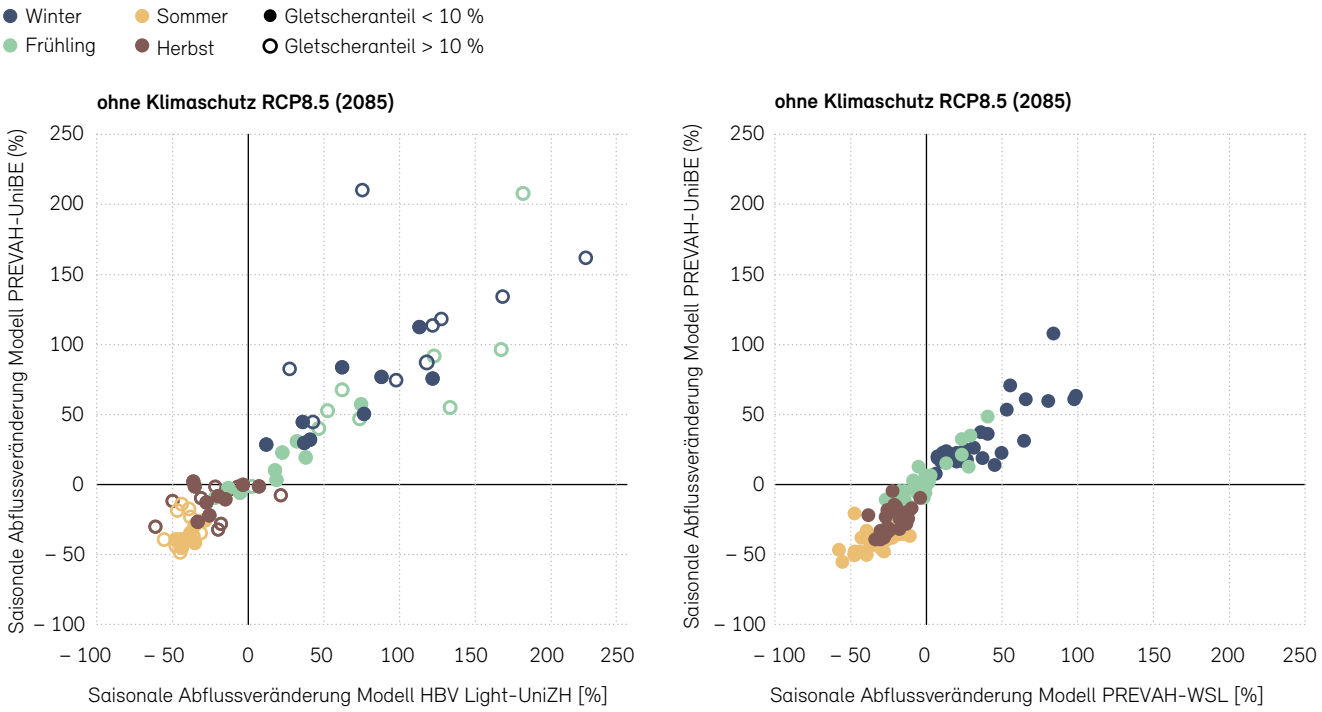
Quelle: Mülchi et al. (2020)

Szenario RCP8.5 der drei Modelle PREVAH-WSL, PREVAH-UniBE und HBV Light-UniZH miteinander verglichen (Abbildung 2-3). Dabei wurden nur von allen Modellen gemeinsam verwendete Klimamodellketten berücksichtigt. Die drei Modelle bilden den gemessenen Jahresgang der Abflüsse für die Referenzperiode gut nach, und sowohl die Mediane der Monatsmittelwerte als auch die Unsicherheitsbereiche stimmen gut überein. Auch für die Zukunft zeigen alle Modelle für Thur und Kleine Emme eine ähnliche Veränderung der Abflüsse. Bei der Simme, die in vergletscherten Regionen entspringt, ist das jährliche Abflussmaximum zwischen den Modellen PREVAH-UniBE und HBV Light-UniZH zeitlich etwas versetzt. Generell ist die Unsicherheit in der hydrologischen Modellierung bei glazialen Gebieten etwas höher als bei Gebieten ohne Gletscher. Die PREVAH-Modelle haben einen eher einfachen Ansatz, um die Gletscherschmelze zu berechnen. Das Modell HBV Light-UniZH wurde hingegen besonders zur Berechnung von Schnee- und Gletscherschmelze weiterentwickelt und kalibriert. In diesem Bericht werden deshalb für Einzugsgebiete mit mehr als 10 % Gletscherfläche die Ergebnisse des Modells HBV Light-UniZH dargestellt. Genauere Informationen zu den Modellen finden sich in Tabelle A1 im Anhang.

Für einen statistischen Vergleich der Ergebnisse wurde für jedes hydrologische Modell und jedes Einzugsgebiet das Änderungssignal zwischen der Referenzperiode und der Periode 2070 – 2099 für das Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5 bestimmt, einmal für die Jahresabflüsse und einmal für die saisonalen Abflüsse (Abbildung 2-4 und Tabelle 2-3).

Abb. 2-4: Vergleich des Änderungssignals für saisonale Abflüsse

Dargestellt sind die relativen Änderungen der saisonalen Abflüsse gegen Ende des Jahrhunderts für das Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) im Vergleich zur Referenzperiode (1981 – 2010) für die drei in Hydro-CH2018 verwendeten Wasserhaushaltsmodelle PREVAH-UniBE, PREVAH-WSL und HBV Light-UniZH. Grundsätzlich stimmen die Veränderungen zwischen den unterschiedlichen Modellen überein. Die grössten Unterschiede bestehen bei vergletscherten Gebieten im Winter und Frühling, wenn die Abflüsse sehr gering sind und schon kleine Unterschiede grosse prozen-



Bildnachweis: BAFU

Tabelle 2-3 zeigt den Anteil an Gebieten, für die die Änderungssignale zwischen zwei Modellen um weniger als 10 % voneinander abweichen. Die Modelle HBV Light-UniZH und PREVAH-WSL haben nur drei gemeinsame Gebiete und können deshalb schlecht verglichen werden. Die drei Modelle zeigen insgesamt eine gute Übereinstimmung bei den Ergebnissen, und auch in den Gebieten mit grösseren prozentualen Abweichungen zwischen den Modellen stimmt die Richtung der Veränderung (Zunahme oder Abnahme) für alle Jahreszeiten überein.

Tab. 2-3: Vergleich Modellergebnisse

Betrachtet wurden die Differenz im Klimaänderungssignal zwischen der Referenzperiode (1981 – 2010) und der Periode 2070 – 2099 für das Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) für Jahresabfluss und saisonale Abflüsse der Modelle PREVAH-UniBE, PREVAH-WSL und HBV Light-UniZH.

		PREVAH-WSL	HBV Light-UniZH
PREVAH-UniBE	Anzahl gemeinsamer Gebiete	29	18
	Anteil Gebiete mit Differenz im Klimaänderungssignal < 10 % für Jahresabfluss	95 %	83 %
	Anteil Gebiete mit Differenz im Klimaänderungssignal < 10 % für saisonale Abflüsse	60 %	55 %

Die grössten prozentualen Abweichungen zwischen den Modellen treten im Winter und Frühling und besonders bei stark vergletscherten oder hoch gelegenen Gebieten auf. Dies lässt sich dadurch erklären, dass im Winter und Frühling die Abflüsse generell sehr gering sind und schon kleine Abweichungen eine grosse prozentuale Abweichung erzeugen. Die grössten absoluten Unterschiede in den Abflüssen zwischen den Modellen treten im Sommer ebenfalls in vergletscherten Gebieten auf.

Da die drei Modelle nur eine kleine Schnittmenge an gemeinsamen Gebieten haben, kann der hydrologische Unsicherheitsbereich nicht systematisch angegeben werden, wie dies für die Klimamodelle möglich ist. Die Unsicherheit aus den Klimaszenarien wird darum auch als Unsicherheitsbereich für die hydrologische Modellierung übernommen. Generell sollte bei allen Resultaten das Änderungssignal gegenüber der Referenzperiode betrachtet werden und nicht die absoluten Werte. Im Bericht werden pro Einzugsgebiet immer nur die Ergebnisse eines Modells vorgestellt, und zwar in folgender Auswahlordnung:

- PREVAH-UniBE: 93 kleine oder mittelgrosse Gebiete, ohne oder mit weniger als 10 % Gletscherfläche
- PREVAH-WSL: für Wasserhaushalt Schweiz und 30 grosse Einzugsgebiete
- HBV Light-UniZH: vergletscherte Kopfeinzugsgebiete

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Methoden und Unsicherheiten»

- Matti et al. (i. E.): Uncertainty and further methodological topics. Hydro-CH2018 report.

3 Wasserhaushalt im Klimawandel

Der Klimawandel beeinflusst den gesamten Wasserhaushalt: Niederschläge und Abflüsse verändern sich, Temperaturen und Verdunstung nehmen zu, die Gletscher schmelzen immer schneller. Im Winter fällt weniger Schnee, und in der Folge fehlt im Sommerhalbjahr das Wasser aus der Schneeschmelze.

Die Schweiz ist mit über 1400 mm Jahresniederschlag eines der wasserreichsten Länder Europas. Zusätzlich verfügt sie über grosse Wasserspeicher wie die natürlichen und künstlichen Seen, die Gletscher, die Schneedecke, den Boden und das Grundwasser. In den Schweizer Alpen entspringen die grossen Flüsse Rhein und Rhone sowie wichtige Zuflüsse zu Po und Donau. Veränderungen bei den einzelnen Elementen des Wasserhaushalts der Schweiz haben unmittelbare Auswirkungen auf die Unterlieger.

Die Wasserhaushaltsgleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen Abfluss (Q), Niederschlag (N), Verdunstung (V) und der Speicheränderung (dS) pro Zeiteinheit (dt) und bildet damit die Grundlage für alle hydrologischen Modellierungen und Szenarien.

$$Q = N - V + dS/dt$$

Alle Grössen der Wasserhaushaltsgleichung werden durch den Klimawandel mehr oder weniger stark beeinflusst (Abbildung 3-1). Hauptverantwortlich dafür sind Veränderungen des Niederschlags und das Ansteigen der Temperatur. Durch die Erwärmung nimmt die Verdunstung zu und der Abfluss aus der Gletscherschmelze langfristig ab. Im Winter fällt der Niederschlag vermehrt als Regen und nicht als Schnee, wodurch sich im Sommerhalbjahr die Schneeschmelze vermindert. Dies führt in vielen Regionen der Schweiz zu rückläufigen Abflüssen im Sommer und Herbst. Im Winter und Frühling nehmen die Abflüsse hingegen tendenziell zu. Über das Jahr hinweg verändern sich in vielen Einzugsgebieten die Abflüsse aber kaum, allenfalls nehmen sie leicht ab (Kapitel 6.1).

Wasserspeicher reagieren unterschiedlich schnell auf Klimawandel

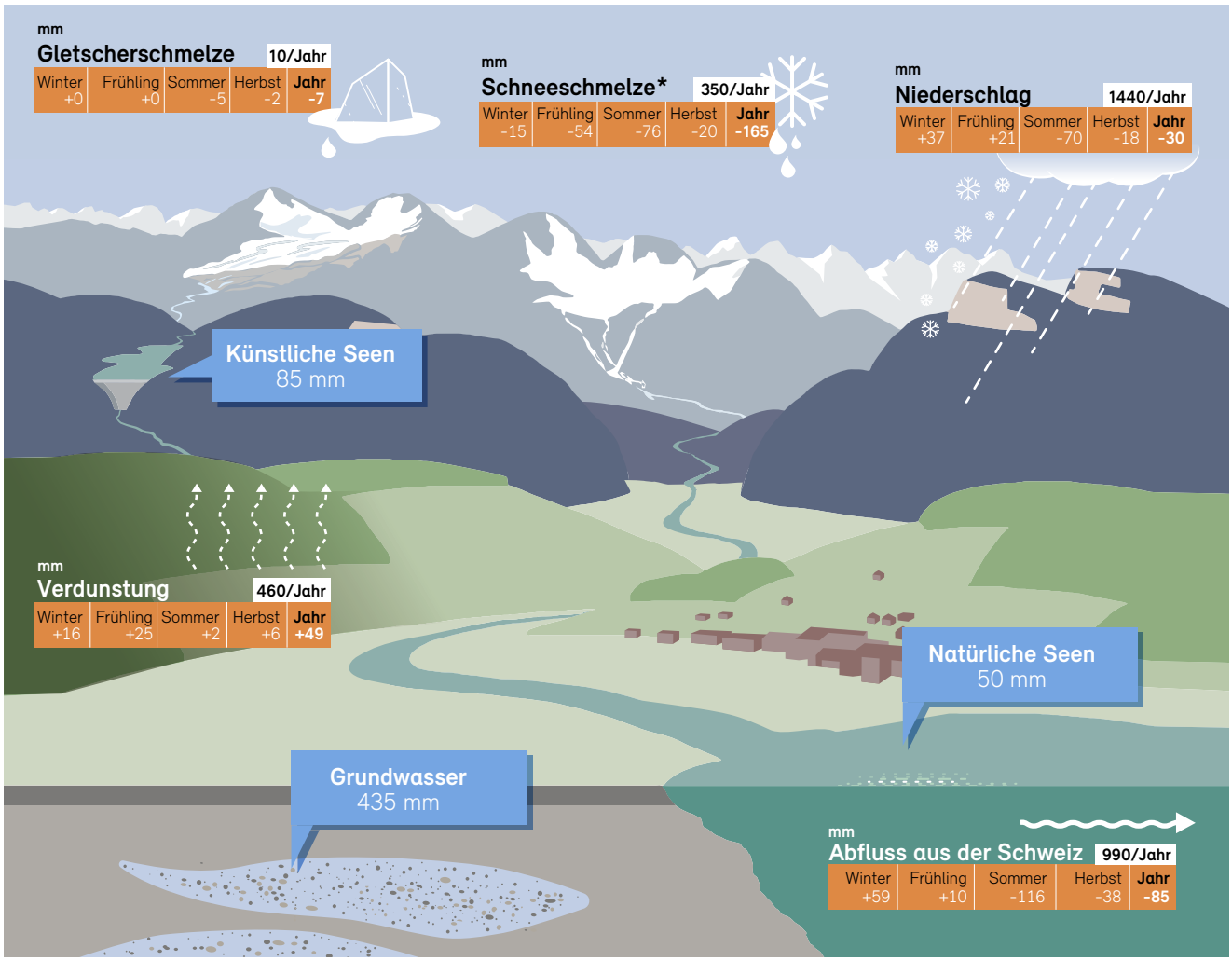
Durch den Klimawandel ändert sich der Füllungsgrad der Speicher im Jahresverlauf, und die Speicher Schnee und Gletscher gehen insgesamt zurück. Überlagert werden die klimabedingten Speicheränderungen kurzfristig durch die jeweils herrschenden meteorologischen Bedingungen und durch menschliche Entnahmen.

Die Speicher wirken auf unterschiedlichen Zeitskalen: Am schnellsten reagiert der Boden, der während eines Niederschlagsereignisses aufgenommenes Wasser je nach Bodeneigenschaften innerhalb von Minuten bis Monaten an die Gewässer oder über Verdunstung an die Atmosphäre abgibt. Am anderen Ende der Skala stehen Gletscher und tiefere Grundwasservorkommen, die Wasser über Jahre, Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte hinweg zwischenspeichern können. Je langfristiger ein Speicher wirkt, desto langsamer reagiert er auf klimatische Veränderungen.

Wasserspeicher sind zentrale Faktoren im hydrologischen System: Verändern sie sich, kann dies Auswirkungen auf die Abflussbildung, die Wassertemperatur, den Stofftransport und schliesslich die Gewässerökosysteme haben. Tabelle 3-1 gibt neben der zeitlichen Wirkung auch eine Übersicht über die Volumen der einzelnen Speicher.

Abb. 3-1: Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt

Der Klimawandel wirkt sich auf alle Grössen des Wasserhaushalts aus. Angegeben sind die modellierten Wasserhaushaltsgrössen Abfluss, Niederschlag, Verdunstung sowie Eis- und Schneeschmelze für die Referenzperiode (1981 – 2010) (weiss hinterlegt) und die ferne Zukunft (2070 – 2099) (orange hinterlegt) ohne Klimaschutz (RCP8.5), berechnet für die hydrologische Schweiz mit dem Modell PREVAH-WSL (Daten aus Brunner et al. 2019c). Das nutzbare jährliche Speicherdargebot (blau hinterlegt) kann nur für die Referenzperiode angegeben werden. Für künstliche und natürliche Seen wurde es aus den mittleren jährlichen Wasserstandschwankungen oder aus den Wehrreglementen der Seen berechnet (Brunner et al. 2019a). Das nutzbare Speicherdargebot für das Grundwasser stammt aus Sinreich et al. (2012). Die Daten zu Seen und Grundwasser beziehen sich auf das Schweizer Staatsgebiet, wobei bei den Grenzseen der gesamte See betrachtet wird.



350	Jahressummen in mm für Referenzperiode 1981–2010
+21	Zu- und Abnahme in mm pro Jahreszeit und Jahr für Periode 2070–2099 ohne Klimaschutz (RCP 8.5) im Vergleich zur Referenzperiode
85	Jährlich nutzbares Wasser aus Speichern in mm

*Die Schneeschmelze ist Teil des Niederschlags.

Tab. 3-1: Wichtige Wasserspeicher in der Schweiz

Volumen wichtiger Wasserspeicher in der Schweiz und Angabe, wie lange sie Wasser zwischenspeichern können, auch Verweilzeit des Wassers genannt. Das Bodenvolumen kann nicht abgeschätzt werden, das Konzept des nachhaltig nutzbaren Dargebots wird nur auf Seen und das Grundwasser angewendet, da nur aus diesen Speichern aktiv Wasser für die Nutzung entnommen wird.

	Gesamtvolumen km³	Nachhaltig nutzbares Dargebot km³ pro Jahr	Verweilzeit des Wassers im Speicher Minuten	Stunden	Tage	Wochen	Monate	Jahre	Weitere Informationen in Kapitel	Referenz für Volumenangaben
Boden	–	–	■	■	■	■	■		4.3	
Schnee	22[1]	–		■	■	■	■		5.1	Brunner et al. 2019c
Gletscher	53[2]	–					■	■	5.2	Langhammer et al. 2019
Natürliche Seen	130[3]	2		■	■	■	■		6.3	BAFU-Kennzahlen Seen Brunner et al. 2019a
Künstliche Seen (Reservoire)	3,5[2]	3,5		■	■	■	■		6.3	Bundesamt für Energie
Grundwasser	150	18			■	■	■	■	6.4	Sinreich et al. 2012

[1] Mittelwert 1981 – 2010
[2] Stand 2019
[3] Gesamtes Volumen bei Grenzseen

4 Klimatologische Einflussgrössen

Lufttemperatur, Niederschlag oder Verdunstung haben einen grossen Einfluss auf den Wasserhaushalt und die Gewässer. Infolge des Klimawandels erhöhen sich Temperatur und Verdunstung, und die Niederschlagsmengen verändern sich mit mehr Niederschlag im Winter und weniger im Sommer.

4.1 Lufttemperatur

In den vergangenen 150 Jahren hat sich die mittlere jährliche Lufttemperatur in der Schweiz bereits um etwa 2 °C und damit doppelt so stark erhöht wie im globalen Durchschnitt. Der Erwärmungstrend wird sich auch in Zukunft deutlich fortsetzen. Ebenso werden Hitzeperioden häufiger, länger und intensiver.

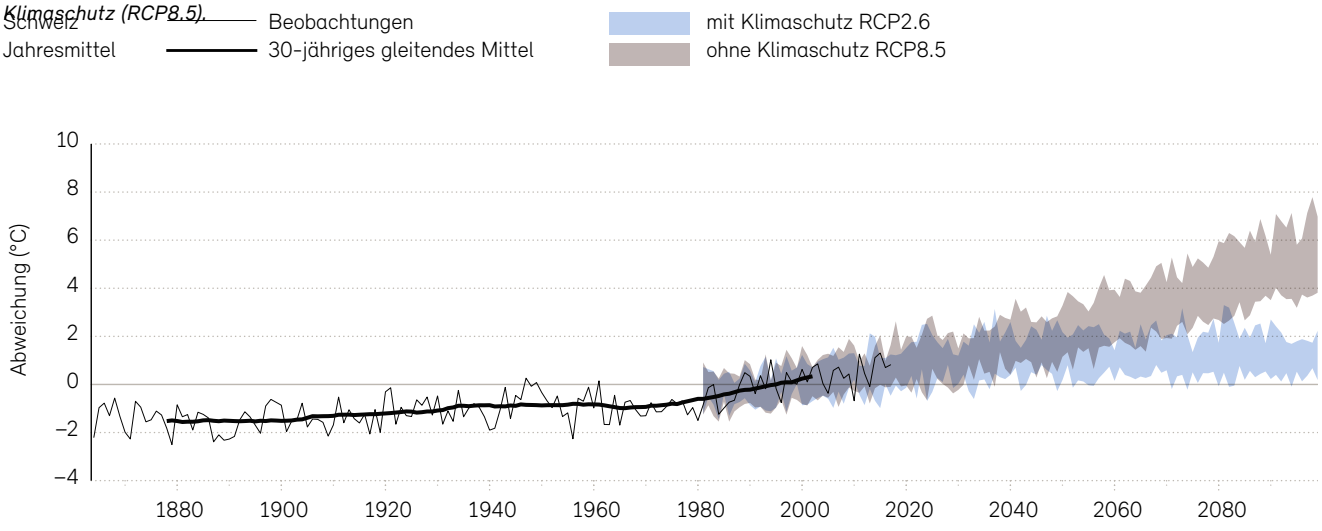
Die mittlere Lufttemperatur in der Schweiz ist seit Beginn der Messungen im Jahr 1864 um fast 2 °C angestiegen (Abbildung 4-1) und hat damit doppelt so stark zugenommen wie im globalen Durchschnitt (Begert et al. 2018). Seit den 1980er-Jahren kann eine Beschleunigung der Erwärmung beobachtet werden: Neun der zehn wärmsten Jahre traten nach 2000 auf. Die Erwärmung führt zu häufigeren und intensiveren Hitzephasen: Die Anzahl Hitzetage (Tageshöchsttemperatur über 30 °C) hat in tieferen Lagen deutlich zugenommen, während die Anzahl Frosttage (Tageshöchsttemperatur unter 0 °C) abgenommen hat. Die mittlere Nullgradgrenze ist seit 1961 im Winter um 300 bis 400 m angestiegen (Technischer Bericht CH2018). Die Nullgradgrenze ist im Jahresverlauf von grosser hydrologischer Bedeutung, da sie darüber entscheidet, ob Niederschlag als Schnee fällt und zwischengespeichert wird oder als Regen, der sofort zum Abfluss gelangt. Ausserdem bestimmt sie die Höhenlage, unterhalb welcher Schnee- und Gletscherschmelze stattfinden kann.

Fortgesetzter Temperaturanstieg

Die Klimaszenarien CH2018 zeigen eine weitere deutliche Temperaturzunahme in allen Jahreszeiten. Beim Szenario mit konsequentem Klimaschutz (RCP2.6) ist in der Schweiz mit einem zusätzlichen Anstieg der Jahresmitteltemperatur von ungefähr 0,6 bis 1,9 °C bis Ende des Jahrhunderts zu rechnen (Abbildung 4-1). Beim Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) wird die Jahresmitteltemperatur um 3,3 bis 5,4 °C bis Ende des Jahrhunderts ansteigen. Besonders stark nehmen die Höchsttemperaturen im Sommer zu. Hitzewellen und heisse Tage und Nächte

Abb. 4-1: Entwicklung der bodennahen mittleren jährlichen Lufttemperatur in Vergangenheit und Zukunft

Dargestellt sind die zu erwartenden Abweichungen von der Referenzperiode (1981 – 2010) mit konsequentem Klimaschutz (RCP2.6) und ohne Klimaschutz (RCP8.5).



Quelle: NCCS (2018)

werden nicht nur extremer, sondern treten auch deutlich häufiger auf. Im Winter steigt die Nullgradgrenze ohne Klimaschutz bis 2085 von derzeit circa 850 m ü. M. auf rund 1700 m ü. M.

4.2 Niederschlag

Der mittlere Jahresniederschlag hat sich in der Schweiz seit Messbeginn kaum verändert, und auch in der Zukunft werden keine wesentlichen Veränderungen erwartet. Stark ändern wird jedoch die saisonale Verteilung der Niederschläge mit einer Abnahme der Niederschläge im Sommer und einem Anstieg im Winter. Die bereits beobachtete Zunahme von Starkniederschlägen dürfte sich fortsetzen.

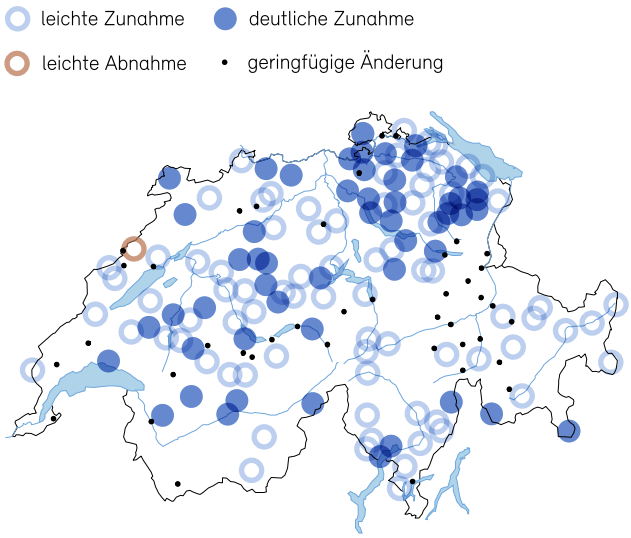
In der Schweiz werden seit 1864 die Tagessummen des Niederschlags gemessen, seit 1978 auch in Intervallen von 10 Minuten. Die Jahresniederschlagsmengen variieren räumlich stark, von unter 600 mm in Trockentälern des Wallis bis über 3000 mm in hohen Lagen der Alpen.

Bisherige Veränderungen

Die Jahres- und Saisonniederschläge haben sich seit Messbeginn nicht signifikant verändert. Eine Ausnahme stellen die Winterniederschläge auf der Alpennordseite dar, welche in den letzten 100 Jahren um 20 % zugenommen haben. Verändert haben sich hingegen die Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen. So hat die Intensität der grössten Tagesniederschläge eines Jahres im Durchschnitt aller Messstationen in 100 Jahren um rund 10,4 % zugenommen, was 7,7 % pro Grad Celsius Erwärmung entspricht. Dies entspricht ungefähr dem Wert, den die Physik bei steigender Temperatur vorhersagt (Clausius-Clapeyron-Gleichung). Für die Periode 1961 – 1990 wurden für jede Station die 100-jährlichen Tagesniederschläge berechnet. Die Häufigkeit solcher Intensivereignisse hat um 26,5 % in 100 Jahren zugenommen (Scherrer et al. 2016). Lokale Starkniederschläge mit einer Dauer von Minuten und Stunden werden in der Schweiz vor allem durch Gewitter im Sommer verursacht. Grossräumige Starkniederschläge, die einen Tag oder länger dauern, können durch verschiedene Wetterlagen verursacht werden. Je nach Region sind sie unterschiedlich intensiv und treten zu anderen Jahreszeiten gehäuft auf.

Abb. 4-2: Beobachtete Trends des stärksten Eintagesniederschlags im Jahr

Die blauen Punkte zeigen eine deutliche Zunahme, die hellblauen Kreise eine leichte Zunahme und der braune Kreis eine Abnahme der gemessenen Niederschlagsmengen in der Periode 1901 – 2014. Schwarze Punkte bedeuten eine geringfügige Änderung der Niederschlagsmenge.



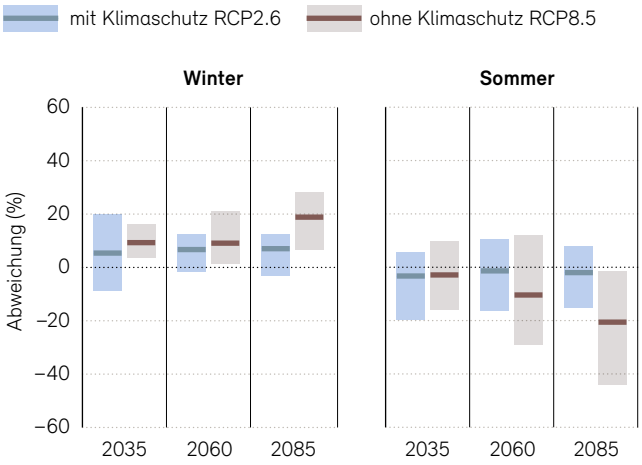
Quelle: NCCS (2018) und Scherrer et al. (2016)

Jahreszeitliche Verschiebungen in der Zukunft

Die künftigen Jahresniederschläge werden sich laut den Klimaszenarien CH2018 kaum verändern. Einzig beim Szenario ohne Klimaschutz wird in der fernen Zukunft mit einer leichten Abnahme gerechnet. Allerdings wird sich die saisonale Verteilung des Niederschlags verschieben (Abbildung 4-3). Die Winterniederschläge nehmen bei einem Szenario ohne Klimaschutz bis Ende des Jahrhunderts um rund 20 % zu, die Sommerniederschläge in der gleichen Grössenordnung ab. Bei den Sommerniederschlägen ist die Unsicherheit der Entwicklung jedoch grösser. Hinzu kommt, dass durch den Anstieg der Nullgradgrenze im Winter mehr Niederschlag in Form von Regen und nicht als Schnee fallen wird.

Abb. 4-3: Zukünftiger mittlerer Sommer- und Winterniederschlag für drei Zeithorizonte in der Schweiz

Dargestellt sind die zu erwartenden Abweichungen (Median und Unsicherheitsbereich) von der Referenzperiode (1981 – 2010) im Winter (links) und im Sommer (rechts) für zwei Emissionsszenarien und drei zukünftige Perioden bis Ende Jahrhundert (2035, 2060 und 2085).



Quelle: NCCS (2018)

Zukünftig längere Trockenphasen und zunehmende Starkniederschläge

Fast in der gesamten Schweiz wird ohne Klimaschutz bis Ende des 21. Jahrhunderts mit längeren und häufigeren Trockenphasen im Sommer gerechnet. So werden sich die Phasen aufeinanderfolgender Tage ohne Regen im Sommer beim Szenario ohne Klimaschutz in der fernen Zukunft um ein bis neun Tage verlängern (Technischer Bericht CH2018).

Die Klimaszenarien CH2018 lassen in der Zukunft ausserdem eine Zunahme von Intensität und Häufigkeit von Starkniederschlägen für alle Niederschlagsdauern erwarten. Die Zunahme der Intensität ist in allen Jahreszeiten ähnlich und beträgt ohne Klimaschutz bis Ende des Jahrhunderts etwa 20 %. Für Starkniederschläge im Sommer sind die Unterschiede zwischen den Klimamodellen und die Unsicherheit am grössten. Generell können Klimamodelle die komplexen und kleinräumigen meteorologischen Vorgänge bei der konvektiven Starkniederschlagsentstehung in der gebirgigen Schweiz noch nicht hinreichend gut nachbilden.

Unsicherheiten bei Wetterlagen

Die Intensität und Häufigkeit von Starkniederschlägen sowie von ausgeprägten Trockenphasen werden durch die Temperaturerhöhung (Thermodynamik) als auch durch Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation und in der Schichtung der Atmosphäre beeinflusst (Technischer Bericht CH2018). In der Vergangenheit gab es immer wieder dekadische Variationen der Häufigkeit von atmosphärischen Zirkulationsmustern und den daraus entstehenden Wetterlagen (Weusthoff 2011), wodurch sich in manchen Jahrzehnten z. B. grossräumige Hochwasser- oder Niedrigwasserereignisse häuften.

Die Klimaszenarien CH2018 zeigen auch bei der zukünftigen Häufigkeit von Wetterlagen dekadische Variationen, welche allerdings für häufig auftretende Wetterlagen kaum von den in der Vergangenheit beobachteten Variationen abweichen. Für seltene, lang anhaltende (persistente) Wetterlagen, die für hydrologische Extreme wie grossräumige Hochwasser oder extreme Trockenheit verantwortlich sind, sind verlässliche Aussagen bisher nicht möglich: Verschiedene Klimamodelle liefern für Häufigkeit als auch Persistenz abweichende Resultate. Zudem ist aufgrund der Seltenheit dieser hydrologischen Extreme keine statistische Analyse möglich (Huguenin et al. 2020). Damit bleibt bei den Extremen eine gewisse Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung bestehen.

Hydrologische Szenarien, basierend auf hochaufgelösten Klimadaten: Welche Auswirkungen hat die natürliche Variabilität in den Klimadaten auf die hydrologischen Szenarien?

Vorgehen
Für neun CH2018-Klimaprojektionen wurde mithilfe eines Wettergenerators die natürliche Variabilität der Atmosphäre simuliert. So konnten für die drei Einzugsgebiete Thur, Kleine Emme und Maggia meteorologische Parameter in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung (z. B. Stundenwerte des Niederschlags) errechnet werden, wie sie unter zukünftigen Klimabedingungen zu erwarten sind. Basierend auf diesen Klimadaten wurden dann mit dem hydrologischen Modell Topkapi-ETH hydrologische Szenarien berechnet. Die Ergebnisse wurden mit der heutigen natürlichen Variabilität verglichen.

Hauptergebnisse
- Bereits für die Periode 2020 – 2049 zeigen die Modelle Veränderungen im Jahresniederschlag. Allerdings sind die Veränderungen nur bei einem Szenario ohne Klimaschutz und am Ende des Jahrhunderts grösser als die heutige natürliche Variabilität.
- Die Veränderung der Starkniederschläge kann auf engem Raum, selbst innerhalb von Einzugsgebieten, stark variieren. So nehmen die Starkniederschläge etwa bei Kleiner Emme und Thur in den tiefer liegenden Teilgebieten bis Ende des Jahrhunderts zu, während sie in den höheren Lagen tendenziell abnehmen.
- Stundenwerte von Starkniederschlägen nehmen ohne Klimaschutz bis Ende des Jahrhunderts zu (Median um 5 % für Thur und Kleine Emme sowie 20 % für Maggia). Diese Zunahme, die sowohl für Starkniederschlagsereignisse mit 2-jährlicher Auftretenswahrscheinlichkeit als auch für 30-jährliche errechnet wird, ist jedoch statistisch nicht signifikant und liegt im Bereich der natürlichen Variabilität.
- Die Veränderungen der Jahreshochwasserabflüsse sind statistisch nicht signifikant und liegen ebenfalls innerhalb der heutigen natürlichen Variabilität.

Hydro-CH2018-Projekt des Instituts für Umweltingenieurwissenschaften der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ)

4.3 Verdunstung und Bodenfeuchte

Als Bindeglied zwischen Atmosphäre und Gewässern hat die Landoberfläche eine zentrale Bedeutung im hydrologischen System. Bei steigenden Lufttemperaturen verstärkt sich die Verdunstung und die Bodenfeuchte geht zurück, was sich im Sinne einer Rückkopplung wiederum auf das Klima auswirkt.

Für die Vegetation ist der Boden der wichtigste Wasserspeicher. Denn im Boden bleibt auch in längeren niederschlagslosen Phasen noch die für das Wachstum notwendige Feuchtigkeit erhalten. Auch für die Hydrologie ist der Boden entscheidend. Je nach Aufbau, Struktur und momentanem Feuchtegehalt fliesst der Niederschlag entweder schnell als Oberflächenabfluss ab, bleibt im Boden gespeichert oder durchfliesst den Boden und gelangt verzögert in Oberflächengewässer oder Grundwasser. Der Boden und die in ihm gespeicherte Bodenfeuchte beeinflussen also das gesamte Abfluss- und Speichergeschehen (z. B. Grundwasserneubildung, Hochwasserentstehung).

Durch Verdunstung gelangt im Boden gespeichertes Wasser in die Atmosphäre und die Bodenfeuchte nimmt ab. Verdunstung kann direkt an der Oberfläche von Gewässern und Böden stattfinden (Evaporation), aber auch durch den Stoffwechsel von Pflanzen (Transpiration). Die Verdunstung, in der Fachsprache Evapotranspiration genannt, beeinflusst wiederum die Niederschlagsbildung, die Lufttemperatur und die atmosphärische Zirkulation (z. B. Persistenz von Wetterlagen).

Bisher keine Zunahme der Verdunstung

Die längste Messreihe der Verdunstung in der Schweiz beginnt 1976 und stammt vom Rietholzbach-Lysimeter der ETH Zürich im Toggenburg. In den letzten 40 Jahren konnte über dem dortigen Grasland kein signifikanter Trend bei der Verdunstung beobachtet werden (Hirschi et al. 2017). Die Verdunstung wird meist als meteorologischer Parameter berechnet und nicht direkt gemessen.

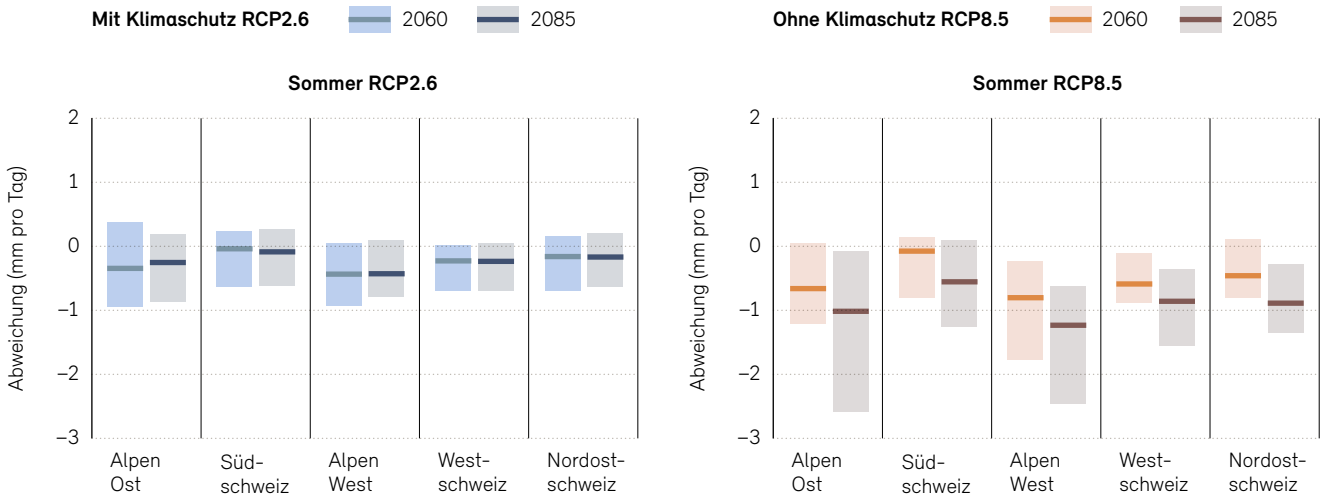
In der Schweiz gibt es kein nationales Messnetz für die Bodenfeuchte. Bodenfeuchtemessungen werden zwar von vielen Kantonen und auch von Forschungsinstitutionen durchgeführt, jedoch mit oft unterschiedlichen Zielsetzungen. Seitens der Forschung liefert beispielsweise SwissSMEX von 19 Stationen Daten zur Bodenfeuchte. Die Messreihen sind allerdings zu kurz, um bereits Aussagen über längerfristige Trends machen zu können. In der Schweiz fehlt es zudem an flächendeckenden Bodenkarten mit einer für hydrologische Fragestellungen ausreichenden räumlichen Auflösung.

Steigende Verdunstung in Zukunft

Mit den steigenden Temperaturen aufgrund des Klimawandels nimmt die potenzielle Verdunstung zu, also die maximal mögliche Verdunstung bei unbegrenzt vorhandenem Wasser, wie dies beispielsweise über einem See der Fall ist. Wie sich die (effektive) Verdunstung an einem bestimmten Ort bei steigender Temperatur entwickelt, hängt von der lokalen Wasserverfügbarkeit ab. So kann die Verdunstung trotz steigender Temperaturen sogar abnehmen, wenn der Wasservorrat im Boden erschöpft ist. Die hydrologischen Szenarien zeigen bis Ende des Jahrhunderts eine Zunahme der mittleren Verdunstung in der Schweiz um 5 % mit konsequentem Klimaschutz und 10 % ohne Klimaschutz (Brunner et al. 2019c). Künftige Landnutzungsänderungen, durch die die Verdunstung sowohl zu- als auch abnehmen kann, werden von den Klimaszenarien bisher nicht oder nur teilweise berücksichtigt.

Abb. 4-4: Saisonale Veränderung des Indikators «Niederschlag minus Verdunstung» (d[N–V]) für die Schweiz

Dargestellt sind zukünftige Abweichungen (Median und Unsicherheitsbereich) für die Sommermonate Juni, Juli und August im Vergleich zur Referenzperiode (1981 – 2010) für die zwei Emissionsszenarien mit und ohne konsequentem Klimaschutz für verschiedenen Regionen in der Schweiz. Dieser Indikator ermöglicht Aussagen über Veränderungen des im Boden gespeicherten Wassers. Ohne Klimaschutz wird diese Abweichung bis Ende Jahrhundert um rund 1 mm pro Tag abnehmen.



Quelle: NCCS-Webatlas CH2018[2]

2 *https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/materialien-und-daten/daten/ch2018-webatlas.html*

Der Klimawandel kann sich in unterschiedlicher Weise auf die Verdunstung auswirken. Eine frühere Schneeschmelze in den Alpen sowie ein Anstieg der Waldgrenze führen zu einer Zunahme. Denn Boden und Vegetation reflektieren weniger Strahlung als Schnee, erwärmen sich stärker und verdunsten so auch mehr Wasser. Eine Abnahme kann beispielsweise bei längerer Trockenheit auftreten, wenn Pflanzen verwelken und ihre Blätter abwerfen, wodurch sich die Transpiration reduziert. Bekannt ist auch, dass viele Pflanzen bei höherem CO_2-Gehalt in der Atmosphäre Wasser effizienter verwerten können und so die Verdunstung zurückgeht (Bernacchi und van Loocke 2015).

Austrocknung der Böden im Sommer

In den Sommermonaten führt die Kombination von abnehmenden Niederschlägen und steigender Verdunstung dazu, dass die Böden trockener werden. Abbildung 4-4 zeigt, wie sich die Bilanz von Niederschlag und Verdunstung mit fortschreitendem Klimawandel in unterschiedlichen Regionen der Schweiz entwickelt. Bis Ende des Jahrhunderts ist bei einem Szenario ohne Klimaschutz in den meisten Regionen während der Sommermonate im Mittel etwa ein Millimeter weniger Wasser pro Tag im Boden und beim Abfluss zu erwarten. Dies entspricht rund 20 % des heutigen mittleren Sommerniederschlags in der Schweiz. Während ausserordentlichen Trockenphasen mit andauerndem Niederschlagsdefizit kann der Rückgang der Wasserverfügbarkeit noch deutlich stärker ausfallen.

Bei der Entstehung von Trockenheit und Hitzewellen spielen Rückkopplungen mit der Landoberfläche ebenfalls eine wichtige Rolle. Durch die Verdunstung steigt der

Wasserbilanz und Trockenheit: Wie wirkt sich der Klimawandel auf Trockenheit, pflanzenphysiologische Regulierung der Transpiration und zukünftigen Bewässerungsbedarf aus?

Vorgehen

Mit dem gekoppelten regionalen Klimamodell COSMO-CLM^2 wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserbilanz und auf Trockenperioden in Europa in einem 50-km-Raster berechnet (RCP8.5-Szenario). Dabei wurden insbesondere der zukünftige Bewässerungsbedarf sowie pflanzenphysiologische Anpassungen an die erhöhten CO_2-Konzentrationen untersucht. Zusätzlich wurden die Modellketten aus CH2018 vertieft hinsichtlich der zukünftigen Trockenheit analysiert.

Hauptergebnisse

- Ohne Klimaschutz werden in der Schweiz in Zukunft längere Trockenperioden, eine Abnahme der Bodenfeuchte und eine Reduktion des Abflusses erwartet. Der genaue Grad der Austrocknung im Sommer ist noch unsicher.

- Für die heute angebauten Kulturen und unter Annahme gleichbleibender landwirtschaftlicher Nutzfläche verdoppelt sich der Bewässerungsbedarf aufgrund des Klimawandels bis Ende des Jahrhunderts.
- Pflanzen reagieren auf erhöhte CO_2-Konzentrationen mit einer Schliessung der Spaltöffnungen an ihrer Oberfläche (Stomata), was auch den Wasseraustritt reduziert. Das führt zu einer generellen Verringerung der Evapotranspiration, die in weiten Teilen Zentral- und Nordeuropas die Zunahme von Lufttemperatur und Temperaturextremen zusätzlich verstärken könnte.
- Während die globalen Klimamodelle diesen pflanzenphysiologischen Effekt berücksichtigen, fehlt er in den regionalen Klimaprojektionen, welche für die Klimaszenarien CH2018 verwendet wurden. Mit Berücksichtigung des Prozesses nimmt die projizierte Maximaltemperatur im Sommer gegenüber CH2018 noch zu (Schwingshackl et al. 2019).

Walddynamik, Landnutzung und Wasserhaushalt: Wie wirken sich zukünftige Veränderungen in der Walddynamik auf Verdunstung und Abfluss aus?

Vorgehen
Das Wasserhaushaltsmodell PREVAH-WSL wurde mit einem Waldentwicklungsmodell gekoppelt. Für sechs Einzugsgebiete wurden basierend auf den Klimaszenarien CH2018 die Auswirkungen auf die Waldentwicklung und den Wasserhaushalt berechnet.

Hauptergebnisse
- Im Mittelland und in den Voralpen sind aufgrund der veränderten Walddynamik keine grösseren Änderungen im Abfluss zu erwarten.
- Der Klimawandel begünstigt eine Zunahme der Bewaldung in den Alpen. Die Zunahme der Waldflächen hängt auch von der weiteren Entwicklung der Alpwirtschaft ab, da auf beweideten Flächen kein Wald aufkommen kann.
- Eine zunehmende Bewaldung in den Alpen hätte einen deutlichen Einfluss auf Verdunstung und Abfluss. In der fernen Zukunft könnte dies in alpinen Einzugsgebieten zu einer Zunahme der Verdunstung und damit zu einer Reduktion des jährlichen Abflusses von bis zu 10 % führen. Aufgrund der zunehmenden Wurzeltiefe ist dieser Effekt im Herbst am deutlichsten, was das klimatisch bedingte Abflussminimum im Herbst weiter verschärfen würde (Speich et al. 2020).

Wassergehalt in der Atmosphäre: Pflanzen, Böden und Luft kühlen sich ab. Transpiration schützt die Pflanzen also vor Überhitzung, während feuchte Böden durch Evaporation den Temperaturanstieg bei Hitzewellen verlangsamen (Vogel et al. 2017). Sind Böden aber erst einmal ausgetrocknet, können sie Trockenheits- und Hitzeperioden auch verlängern (Lorenz et al. 2010) und sogar ortsfeste Hochdruckgebiete verstärken (Merrifield et al. 2019). Mit fortschreitendem Klimawandel könnte dieser Rückkopplungseffekt zu einer Intensivierung von Trockenperioden führen.

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Verdunstung und Bodenfeuchte»

- Hirschi M. et al. 2020: Soil moisture and evapotranspiration. Hydro-CH2018 Bericht.
- Speich M. et al. (i. E.): Einfluss der Walddynamik auf den zukünftigen Wasserhaushalt von Schweizer Einzugsgebieten. Hydro-CH2018 Bericht.

5 Kryosphäre

In der Schweiz kann schon länger ein Abschmelzen der Gletscher, ein Anstieg der Nullgradgrenze und das Auftauen des Permafrosts infolge der Erhöhung der Lufttemperatur beobachtet werden. Diese Entwicklungen werden sich in Zukunft durch den Klimawandel weiter verstärken. Naturgefahren im Hochgebirge werden zunehmen und die Wasserwirtschaft muss sich auf das veränderte Wasserdargebot einstellen.

5.1 Schnee

Die Schneeschmelze trägt heute entscheidend zu den Abflüssen in der Schweiz bei. Infolge des Klimawandels wird die Nullgradgrenze in Zukunft auch im Winter höher liegen. Damit wird weniger Niederschlag in der Schneedecke gespeichert, zudem wird der Schnee früher im Jahr abschmelzen.

Die Schneedecke als natürlicher Wasserspeicher hat eine herausragende Bedeutung für den saisonalen Wasserhaushalt in der Schweiz. In der Referenzperiode 1981 – 2010 stammte gemäss Modellrechnungen ungefähr 40 % (22 km^3) des gesamten jährlichen Abflusses aus der Schneedecke. Die Schneedecke baut sich im Alpenraum über den Winter auf (bei gleichzeitig tiefen Abflüssen v. a. in den alpinen Gewässern) und erreicht ihr Maximum üblicherweise im März. Die anschliessende Schneeschmelze dominiert die Abflüsse in vielen Einzugsgebieten im Frühling und Frühsommer.

Rückgang der Schneedecke bereits feststellbar

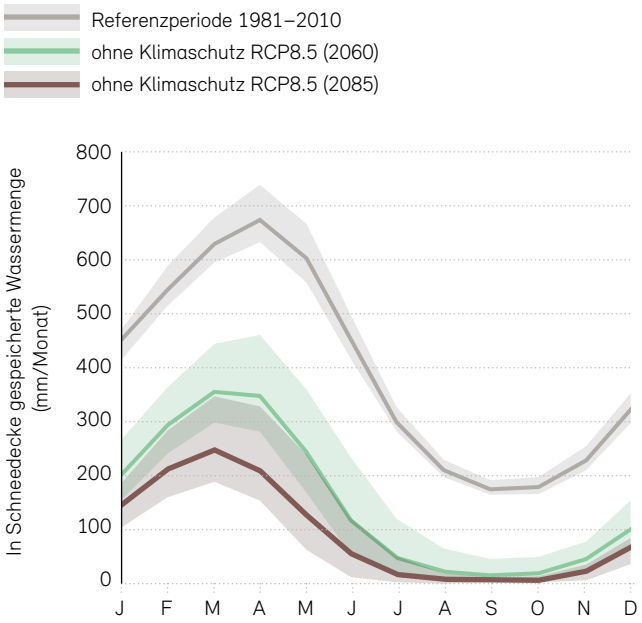
Der Anteil des Niederschlags, welcher als Schnee fällt, wird durch die Lufttemperatur gesteuert und hat wegen der Erwärmung bereits stark abgenommen. Betroffen davon waren bisher vor allem tiefere und mittlere Lagen. So ist der Anteil der Tage mit Schneefall unter 500 m ü. M. seit 1961 um ca. 40 % zurückgegangen und die im Frühling im Schnee zwischengespeicherte Wassermenge (Schneewasseräquivalent) unterhalb von 1000 m ü. M. gar um ca. 75 % (Marty et al. 2017).

Schneevolumen nimmt in Zukunft weiter ab

Mit den Wintertemperaturen steigt auch die Nullgradgrenze, und zwar um etwa 150 Meter pro Grad Celsius Temperaturzunahme (Technischer Bericht CH2018), womit der Schneeanteil am gesamten Niederschlag weiter zurückgeht. Der Aufbau einer permanenten Schneedecke wird später im Jahr beginnen und auf höhere Lagen beschränkt bleiben. Im Frühjahr setzt die Schneeschmelze früher ein. Die hydrologischen Szenarien lassen einen Rückgang der mittleren jährlichen in der Schneedecke gespeicherten Wassermenge erwarten: bis Ende des Jahrhunderts um 42 % mit konsequentem Klimaschutz und um 78 % ohne Klimaschutz (Abbildung 5-1). Gleichzeitig verschiebt sich das Maximum der Schneemenge vom März in den Februar. Die erwartete Zunahme der Winterniederschläge wirkt sich aufgrund der gleichzeitigen Temperaturzunahme nur in sehr hohen Lagen positiv auf die Schneedecke aus und kann die generelle Abnahme der Schneemengen nicht kompensieren. Diese Veränderungen in der Schneedecke haben grosse Auswirkungen auf die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse (Kapitel 6.2).

Abb. 5-1: Mittlere Änderung der in der Schneedecke gespeicherten Wassermenge ohne Klimaschutz für Mitte und Ende Jahrhundert für Höhenlagen über 1500 m ü. M.

Der Anteil des als Schnee zwischengespeicherten Wassers (Median und Unsicherheitsbereich) nimmt in allen Jahreszeiten bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ab. Die Veränderungen bei einem Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) gegenüber der Referenzperiode (1981 – 2010) zeigen, dass auch in höheren Lagen Ende Sommer nur noch wenig Wasser im Schnee gespeichert wird. Fehlender Schnee bedeutet auch geringerer Abfluss durch Schneeschmelze. Zudem steht auch weniger Schnee für die Gletscher zur Verfügung.



Quelle: eigene Darstellung mit Daten aus Brunner et al. (2019c)

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Schnee»

- Marty C. et al. 2020: Snow. Hydro-CH2018 report.

5.2 Gletscher und Permafrost

Seit 1850 haben die Schweizer Gletscher bereits 60 % ihres Volumens verloren. Bis Ende des 21. Jahrhunderts werden nur noch in sehr hohen Lagen Reste der grossen Gletscher zurückbleiben. Die Sommerabflüsse aus der Gletscherschmelze werden dadurch stark vermindert. Auch der Permafrost taut auf, womit das Potenzial für Naturgefahren steigt.

Gletschereis entsteht, wenn in hoch gelegenen Gebieten (Nährgebiet des Gletschers) der über das Jahr gefallene Schnee nicht völlig abschmilzt und in Eis umgewandelt wird. Das Eis fliesst infolge der Schwerkraft langsam talwärts und schmilzt im Sommerhalbjahr in tiefer liegenden Gebieten (Zehrgebiet). Durch den Temperaturanstieg verstärkt sich einerseits die Gletscherschmelze, andererseits verkleinern sich auch die Nährgebiete und der Zuwachs geht zurück. Dies führt dazu, dass die Gletscher an Volumen verlieren. Je kleiner ein Gletscher ist, umso schneller reagiert er auf klimatische Veränderungen.

Massiver Gletscherschwund seit 1850

Für das Ende der kleinen Eiszeit um 1850 wird das Eisvolumen in den Schweizer Alpen auf rund 130 km^3 geschätzt. 2010 betrug es noch rund 60 km^3 (Fischer et al. 2015) und 2019 sogar nur noch 53 km^3 (Langhammer et al. 2019). Insgesamt haben die Gletscher also seit 1850 rund 60 % ihres Volumens verloren. Allein in den letzten fünf Jahren (2015 – 2019) nahm das Gletschervolumen um 10 % ab (*www.glamos.ch*).

Für den Wasserhaushalt haben die Gletscher eine wichtige Bedeutung, da sie Niederschläge über Jahreszeiten, Jahre oder gar Jahrzehnte bis Jahrhunderte hinweg zwischenspeichern. Besonders während heisser und trockener Phasen im Sommer tragen Gletscher massgeblich zum Abfluss vieler alpiner Gewässer, aber auch der grossen Flüsse Rhein und Rhone bei.

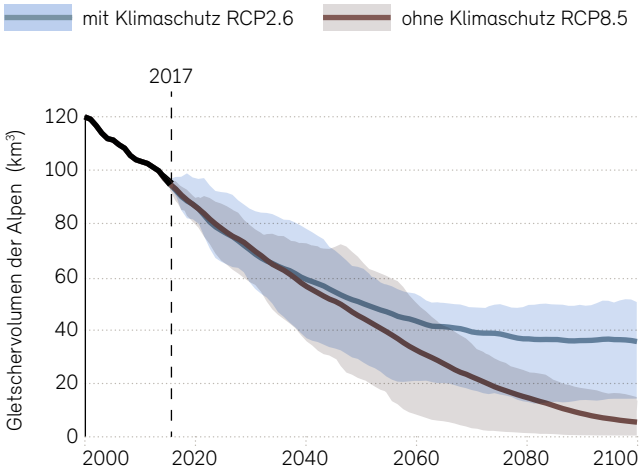
Nur noch wenige Gletscher bis Ende Jahrhundert

Die Gletscherszenarien zeigen, dass ein grosser Teil der Eismassen in den Alpen bis Ende des Jahrhunderts verschwunden sein werden (Abbildung 5-2). Bei konsequentem Klimaschutz bleiben noch rund 37 % des Gletschervolumens von 2017 erhalten, ohne Klimaschutz nur

noch rund 5 %. Da Gletscher oft Jahrzehnte benötigen, um sich an ein neues Klima anzupassen, lässt sich ein Teil des Gletscherschwunds auch bei konsequentem Klimaschutz nicht mehr verhindern, da das Gletschervolumen selbst für das heutige Klima immer noch «zu gross» ist (Zekollari et al. 2019).

Abb. 5-2: Veränderungen des Eisvolumens aller Alpengletscher bis zum Ende des Jahrhunderts

Dargestellt ist das verbleibende Eisvolumen der Gletscher in den Alpen (Mittelwert und Unsicherheitsbereich) unter den verschiedenen regionalen Klimaszenarien. Vor 2017 wurde mit beobachteten Klimadaten gerechnet. Ohne Klimaschutz werden bis 2100 95 % des heutigen Gletschervolumens abgeschmolzen sein.



Quelle: angepasst aus Zekollari et al. (2019)

Permafrost erwärmt sich – erhöhte Naturgefahren

Als Permafrost wird Untergrund bezeichnet, der ganzjährig Temperaturen von unter 0 °C aufweist. Er ist in den Alpen oberhalb von etwa 2500 m ü. M. weit verbreitet und befindet sich verborgen in eisreichen Schutthalden und Moränen, in Blockgletschern und steilen Felswänden mit eisgefüllten Poren und Klüften. Die Permafrost-Beobachtungen der vergangenen zwei Jahrzehnte in den Schweizer Alpen zeigen eine generelle Zunahme der Permafrosttemperaturen, eine Abnahme des Eisgehalts und eine Zunahme der Blockgletscherfliessgeschwindigkeiten (PERMOS 2019). Aufgrund des vergleichsweise geringen Eisvolumens (grob etwa ein Viertel des Gletschervolumens) trägt Schmelzwasser aus dem Permafrost in den Alpen weniger zum Gesamtabfluss bei. Hingegen kann die Erwärmung des Permafrosts weitreichende Folgen für Naturgefahren und Lebensräume haben. Permafrostveränderungen beeinflussen die Stabilität von steilen Gebirgsflanken und Infrastruktur im Hochgebirge. Anzahl und Ausmass von Murgängen und Felsstürzen können zunehmen.

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Gletscher und Permafrost»

- Ayala A. et al. 2020: Glaciers. Hydro-CH2018 report.
- Nötzli J. und Phillips M. 2019: Mountain permafrost hydrology. Hydro-CH2018 report.

6 Gewässer

Die hydrologischen Szenarien zeigen, wie der Klimawandel die Abflüsse der Oberflächengewässer, die Grundwasserneubildung und die Gewässertemperaturen verändern wird. Die Wasserqualität und die Gewässerökologie werden darunter leiden, die Hoch- und Niedrigwassersituationen werden sich verschärfen.

6.1 Jahresabflüsse

Die durchschnittlichen Jahresabflüsse verändern sich infolge des Klimawandels nur geringfügig. Einzig beim Szenario ohne Klimaschutz gehen sie bis Ende Jahrhundert leicht zurück. Am stärksten ist der Rückgang in heute noch vergletscherten Gebieten. Deutlich ändern werden aber die saisonalen Abflüsse mit einschneidenden Folgen für die Wassernutzung (Kapitel 6.2).

Die Jahresabflussmengen in den Schweizer Fliessgewässern variieren zwar zwischen einzelnen Jahren stark, ihr langjähriges Mittel hat sich aber seit Beginn der Abflussmessungen Anfang des 20. Jahrhunderts kaum verändert. So ist z. B. beim Rhein in Basel in der Messreihe ab 1871 kein zunehmender oder abnehmender Trend in den Jahresabflüssen erkennbar (Weingartner 2018). Grund dafür ist, dass sich auch die langjährigen Jahresniederschläge kaum verändert haben. Nur Einzugsgebiete, die vom Abfluss aus der Gletscherschmelze geprägt sind, zeigen wegen der abschmelzenden Gletscher eine Zunahme der Jahresabflüsse.

Teilweise abnehmende Jahresabflüsse bei ungebremstem Klimawandel

Auch in den nächsten Jahrzehnten werden sich die mittleren Jahresabflüsse in den meisten Einzugsgebieten nur wenig verändern (Abbildung 6-1). Bei einem Szenario mit konsequentem Klimaschutz zeigen die hydrologischen Szenarien bis Ende Jahrhundert bei der Mehrheit der Einzugsgebiete kein klares Änderungssignal. Nur bei einem Szenario ohne Klimaschutz wird es gegen Ende des Jahrhunderts zu einer leichten Abnahme der mittleren Jahresabflüsse kommen, im Mittel in der Schweiz um rund 9 %. In rund 25 % der Gebiete verändern sich die Jahresabflüsse aber auch ohne Klimaschutz kaum (Änderungssignal von +/– 5 % bis Ende Jahrhundert), für weitere 65 % der Gebiete liegt das Änderungssignal zwischen – 5 und – 20 %. Gründe für abnehmende Jahresabflüsse sind eine leichte Abnahme der Jahresniederschläge sowie die Erhöhung der Lufttemperatur und damit zusammenhängenden Folgeprozessen wie verlängerte Vegetationsperiode und erhöhte Verdunstung. In den Alpen kommt hinzu, dass Ende des Jahrhunderts die Gletscher verschwunden oder stark geschrumpft sein werden und so der Schmelzwasseranteil viel kleiner sein wird als heute (Freudiger et al. 2020). In solchen Gebieten kann auch der Rückgang der Jahresabflüsse bedeutend sein. Trotzdem wird die Schweiz in einem durchschnittlichen Jahr über das Gesamtjahr gesehen auch in Zukunft ähnlich viel Wasser haben wie heute.

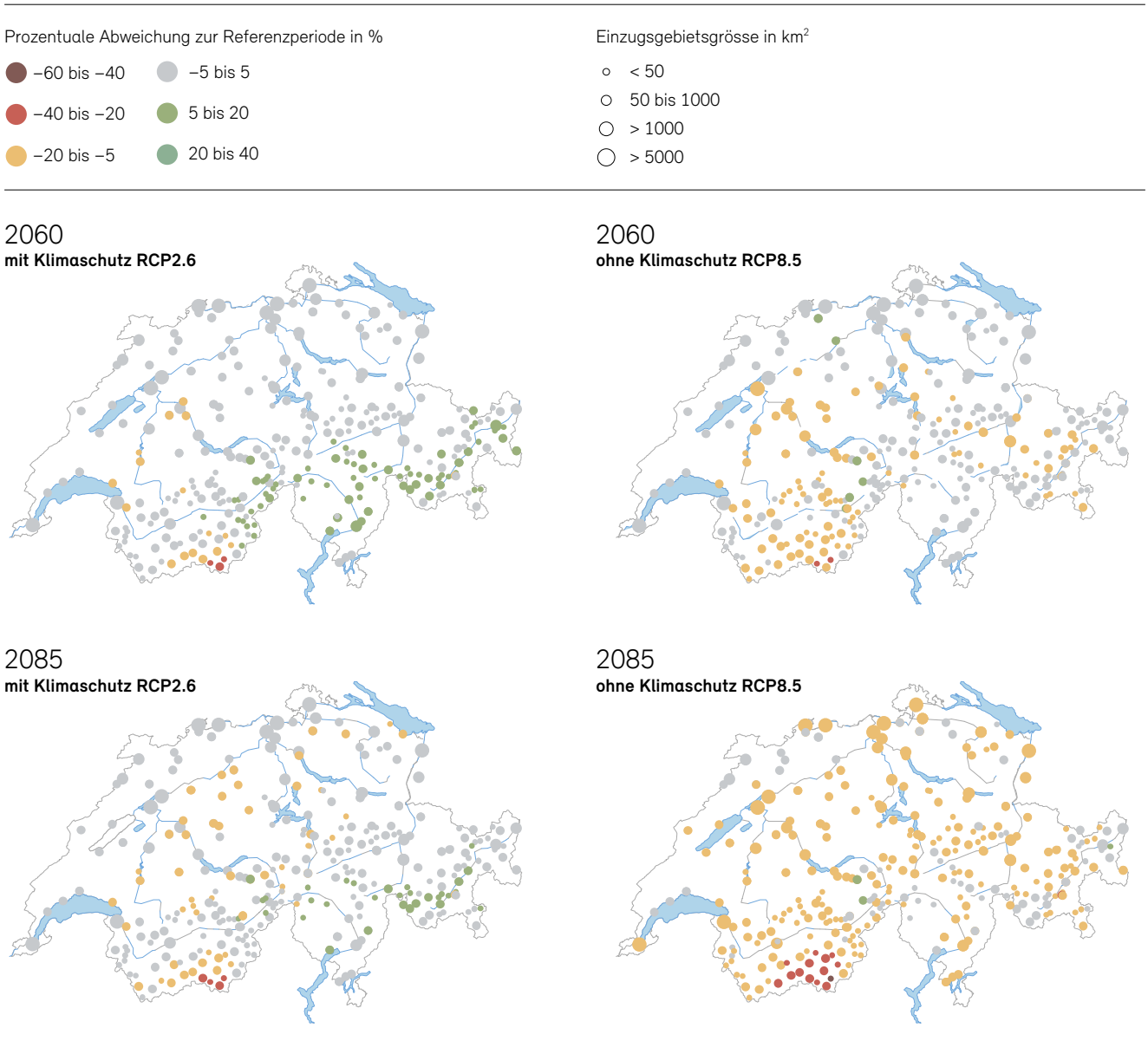
Beitrag des Schmelzwassers wird stark zurückgehen

In stark vergletscherten Einzugsgebieten kann der Jahresabfluss infolge der Gletscherschmelze beim Szenario ohne Klimaschutz noch bis 2050 (+/– 15 Jahre) weiter zunehmen. Der maximale Gletscherschmelzwasseranteil am Jahresabfluss («peak water») wurde jedoch in mehr als 90 % aller vergletscherten Einzugsgebieten bereits erreicht und wird in Zukunft in den allermeisten Kopfeinzugsgebieten weiter abnehmen. Bis Ende des Jahrhunderts wird der Anteil des Gletscherschmelzwassers am Jahresabfluss z. B. der Rhone bei Gletsch von heute 27 auf 10 % (mit Klimaschutz) oder gar auf 4 % (ohne Klimaschutz) zurückgehen (Abbildung 6-2).

Noch bedeutender für den Abfluss in den Kopfeinzugsgebieten ist der Schnee: In der Rhone in Gletsch und der Weissen Lütschine in Zweilütschinen sind es je rund 40 %. In der Mehrheit der Kopfeinzugsgebiete nimmt der Schneeschmelzanteil am Jahresabfluss in Zukunft ab, und zwar bei allen Szenarien. Nur in einigen sehr hoch gelegenen Einzugsgebieten nimmt der Abflussanteil aus der Schneedecke zu, sodass in manchen Fällen – zumindest bei konsequentem Klimaschutz – der zunehmende Schneeschmelzanteil den abnehmenden Gletscherschmelzanteil teilweise kompensieren kann (Freudiger et al. 2020).

Abb. 6-1: Veränderung des Jahresabflusses nach Einzugsgebiet und Szenario

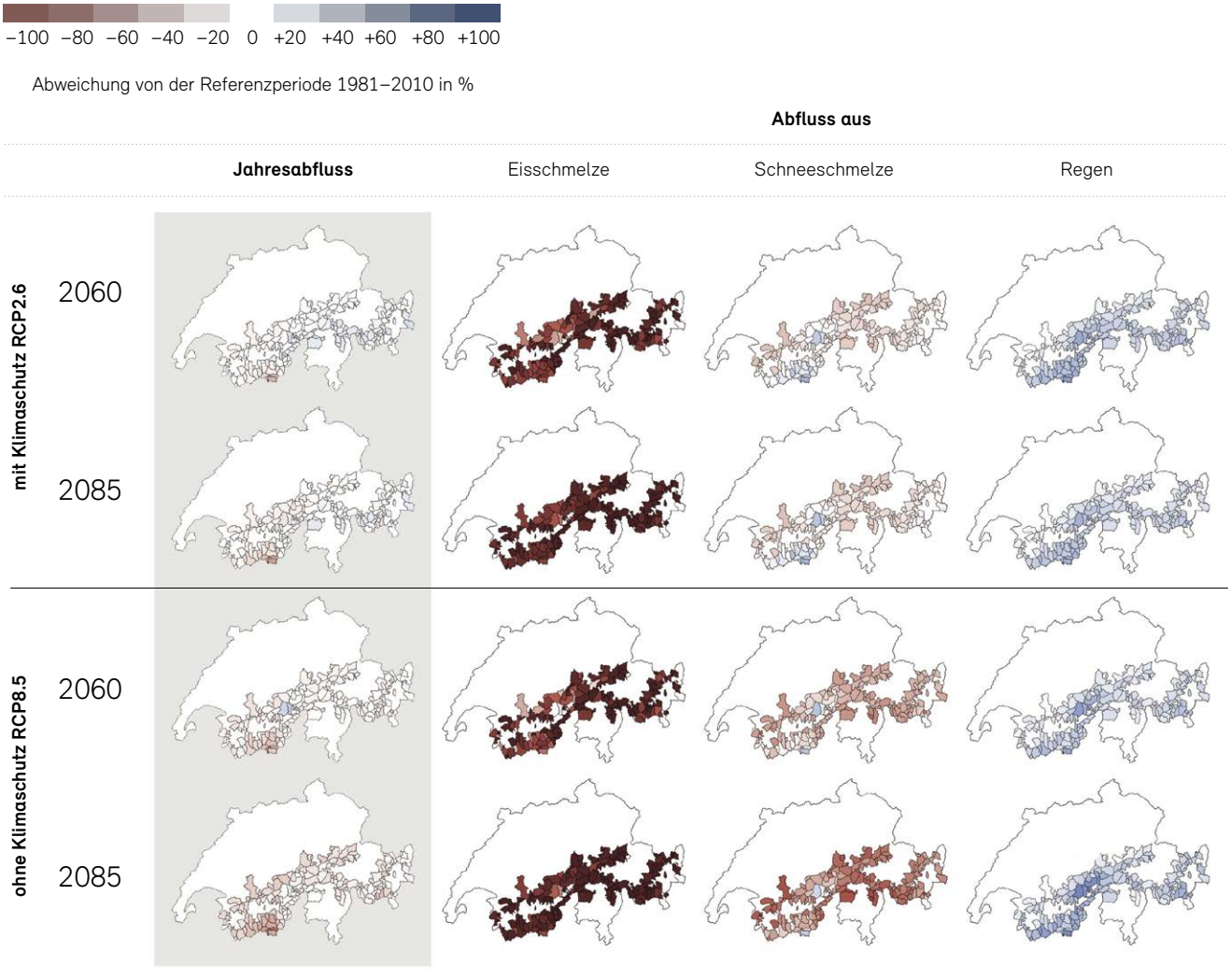
Dargestellt sind die in den hydrologischen Szenarien berechneten Mediane der prozentualen Veränderung der Jahresabflüsse im Vergleich zur Referenzperiode (1981 – 2010) für Szenarien mit (RCP2.6) und ohne Klimaschutz (RCP8.5) für die nahe und die ferne Zukunft. Die Veränderungen der Jahresabflüsse sind gering, ohne Klimaschutz nehmen sie bis Ende Jahrhundert leicht ab.



Quelle: Daten von Mülchi et al. (2020), Freudiger et al. (2020), Brunner et al. (2019c)

Abb. 6-2: Veränderung der Abflussanteile aus Regen, Schnee- und Eisschmelze sowie des Gesamtabflusses

Dargestellt sind die Veränderungen in 190 vergletscherten Kopfeinzugsgebieten der Schweiz im Vergleich zur Referenzperiode (1981 – 2010) mit (RCP2.6) und ohne Klimaschutz (RCP8.5). 0 % bedeutet keine Veränderung gegenüber der Referenzperiode, bei – 100 % ist der Anteil komplett verschwunden, bei + 100 % hat er sich verdoppelt. Besonders die Eisschmelze nimmt in allen Szenarien stark ab, im Szenario ohne Klimaschutz wird sie Ende Jahrhundert in vielen Gebieten nicht mehr zum Abfluss beitragen, und auch der Beitrag aus der Schneeschmelze wird stark abgenommen haben.



Quelle: Freudiger et al. (2020)

Quantifizierung von Abflussanteilen aus Schnee und Gletscherschmelze: Welche Auswirkungen haben das Abschmelzen der Gletscher und der Rückgang der Schneedecke auf den Abfluss?

Vorgehen
Die Abflussanteile aus Regen, Schnee- und Gletschereisschmelze wurden für 190 vergletscherte Kopfeinzugsgebiete der Schweizer Alpen mit dem hydrologischen Modell HBV Light-UniZH ermittelt. Die Schnee- und Gletschermodule des Modells wurden speziell angepasst, um Schneedecke und Gletscher bestmöglich darzustellen. Die Modellkalibration erfolgte anhand von Abflussdaten, Schneebedeckung und Gletscherdaten. Dies erlaubte es, die Abflussanteile auch für Gebiete ohne Abflussdaten zu berechnen, da Daten zu Schneebedeckung und Gletscherfläche flächendeckend vorliegen.

Hauptergebnisse
Die Aussagen zu Schnee- und Gletscherschmelze in Kapitel 6.1 sowie Teilen von Kapitel 6.2 und 6.4 des Berichts basieren auf den Ergebnissen dieses Projekts. Der Gesamtbeitrag aus der Gletscherschmelze der 190 Kopfeinzugsgebiete macht heute 8 % des Jahresabflusses aus und reduziert sich ohne Klimaschutz auf weniger als 2 % gegen Ende des Jahrhunderts. Der Schneebeitrag sinkt ohne Klimaschutz (RCP8.5) von heute 34 % des Jahresabflusses bis Ende des Jahrhunderts auf 25 %.

Hydro-CH2018-Projekt des Geographischen Instituts der Universität Zürich (UZH)

6.2 Saisonale Abflüsse

Die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse hat sich in den letzten Jahrzehnten bereits verändert. Die Abflüsse haben im Sommer ab- und im Winter zugenommen. Diese Entwicklung wird sich mit dem Klimawandel fortsetzen und kann zu Einschränkungen bei der Wassernutzung führen.

Die Fliessgewässer in der Schweiz zeigen unterschiedliche jahreszeitliche Verläufe des Abflusses (Abflussregime). Geprägt werden die Regime durch die saisonale Verteilung des Niederschlags, durch die Verdunstung und durch den Beitrag der Schnee- und Gletscherschmelze. Bei pluvialen Regimen wird der Abfluss hauptsächlich durch die Niederschlagsverteilung und die Verdunstung bestimmt. Tiefer liegende Gebiete auf der Alpennordseite gehören zu diesem Regimetyp. Die Abflüsse im Jahresverlauf bleiben relativ ausgeglichen (Abbildung 6-1). Bei nivalen Regimen wird die Niederschlagsverteilung durch Schneefall und Schneeschmelze überlagert. Die Abflüsse sind deshalb im Winter (Dezember bis Februar), wenn der Schnee liegen bleibt, gering und im Frühjahr (März bis Mai) mit Einsetzen der Schneeschmelze gross. Alpine Gebiete ohne Gletscher haben nivale Regime. Bei glazialen Regimen kommt im Sommer (Juni bis August) noch die Gletscherschmelze hinzu, welche die Abflüsse stark erhöht. Auf der Alpensüdseite sind die meisten Abflussregime geprägt durch Abflussmaxima im Frühjahr und Herbst (September bis November), da dann am meisten Niederschlag fällt. Sie werden nachfolgend südalpine Regime genannt. Neben diesen Hauptregimen gibt es Übergangsregime und regionale Untertypen (Weingartner und Aschwanden 1992).

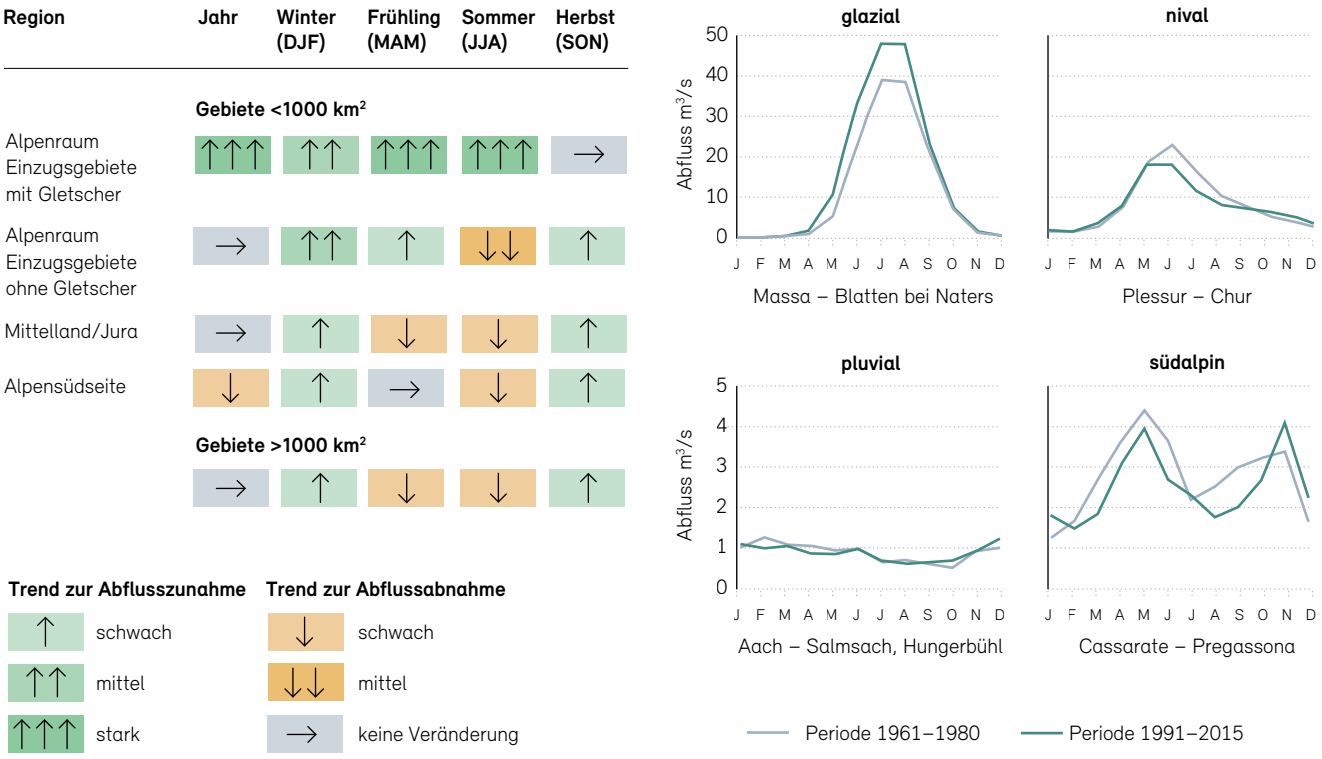
Veränderung der Abflussregime
Die Abflussregime haben sich im Verlauf der Beobachtungsperiode 1961 – 2015 verändert (Weingartner 2018). In den Wintermonaten haben die Abflüsse in den meisten Einzugsgebieten zugenommen (siehe Abbildung 6-3), weil die Lufttemperatur angestiegen ist und somit im Winter mehr Niederschlag als Regen statt als Schnee fällt. Im Sommer hingegen ist – ausser bei stark vergletscherten Einzugsgebieten – generell eine Abnahme der mittleren Abflüsse zu beobachten. Im Frühjahr haben die Abflüsse im Alpenraum wegen der früher einsetzenden Schneeschmelze tendenziell zu-, im Mittelland und Jura hingegen tendenziell abgenommen. Die Veränderungen sind im Alpenraum am stärksten ausgeprägt. Generell ist eine Verschiebung der Abflussregime von glazial in Richtung nival und von nival in Richtung pluvial erkennbar.

Abb. 6-3: Beobachtete Veränderungen der Abflüsse und Abflussregime in der Schweiz

Dargestellt sind die Veränderungen der Abflüsse in verschiedenen Regionen (a) sowie in vier ausgewählten Einzugsgebieten mit unterschiedlichen Abflussregimen (b). Eine Zunahme der Abflüsse im Winter und eine Abnahme im Sommer kann bereits beobachtet werden.

a Veränderung der saisonalen und Jahresabflüsse für verschiedene Regionen in der Schweiz von 1961 bis 2015.

b Mittlere Monatsabflüsse für die Perioden 1961–1980 und 1991–2015 für vier Einzugsgebiete mit Abflussregimetyp glazial, nival, pluvial und südalpin.



Quelle: Weingartner (2018), Daten: BAFU

Bei den stark vergletscherten Einzugsgebieten wie z. B. der Massa (Abbildung 6-3b) mit glazialem Regime haben die saisonalen Abflüsse im Winter, Frühling und Sommer zugenommen, wobei die Zunahme des Sommerabflusses auf die Gletscherschmelze zurückgeht. Nivale Regime haben wegen der Schneeschmelze die höchsten mittleren Abflüsse im Frühjahr. Da die Schneeschmelze immer früher einsetzt, haben die Abflüsse im März und April bei der Mehrheit der Einzugsgebiete zugenommen. Das bedeutet gleichzeitig, dass die Schneedecke früher abgeschmolzen ist, sodass – wie beispielsweise bei der Plessur – im Sommer vielfach eine Abnahme des mittleren Abflusses zu beobachten ist.

In den pluvialen Einzugsgebieten in Mittelland und Jura nehmen die Abflüsse im Frühjahr und Sommer tendenziell ab. Die beobachteten Veränderungen sind aber insgesamt klein, wie auch das Beispiel der Aach zeigt. Südalpine Gebiete zeigen eine Abnahme der Jahresabflüsse, wobei die sommerlichen Abflüsse besonders stark zurückgehen. Dabei gilt es aber zu beachten, dass sich diese Aussage auf langjährige saisonale Mittelwerte bezieht. Die mittleren saisonalen Abflüsse einzelner Jahre können davon teilweise stark abweichen.

Weiterhin Zunahme der Abflüsse im Winter

Die hydrologischen Szenarien lassen in der gesamten Schweiz eine weitere Zunahme der Abflüsse im Winter erwarten. Dies ist durch die prognostizierte Zunahme der Winterniederschläge und die Verschiebung von Schnee zu Regen beim winterlichen Niederschlag bedingt. Abbildung 6-4 zeigt für typische Einzugsgebiete und Abfluss-

regime, wie sich die saisonalen Abflüsse im Jahresverlauf bis Mitte und Ende des Jahrhunderts verändern werden. Abbildung 6-5 gibt einen Überblick über die Veränderungen an allen modellierten Stationen.

In der hydrologischen Schweiz ist Ende Jahrhundert im Mittel mit einer Zunahme der Winterabflüsse von rund 10 % mit Klimaschutz und rund 30 % ohne Klimaschutz zu rechnen (Brunner et al. 2019c). Besonders stark nehmen die Winterabflüsse in heute nivalen Regimen zu. Die geringsten Veränderungen der Winterabflüsse zeigen Einzugsgebiete im Mittelland, in denen die Schneedecke schon heute wenig zum Abfluss beiträgt, sowie sehr hoch gelegene Einzugsgebiete, in denen auch in Zukunft infolge der tiefen Temperaturen im Winter der Niederschlag grösstenteils in Form von Schnee fallen wird (Mülchi et al. 2021a).

Je nach Höhenlage Zu- oder Abnahme der Abflüsse im Frühjahr

Im Frühling unterscheidet sich die Entwicklung im Mittelland und Jura von derjenigen in den höher gelegenen Regionen. In den tieferen und mittleren Höhenlagen gehen die Frühjahrsabflüsse zurück, wie die Beispiele der Plessur und Thur (Abbildung 6-4) zeigen. Ursachen dafür sind die verminderte Schneedecke sowie eine höhere Verdunstung infolge der früher beginnenden Vegetationsperiode und der höheren Temperaturen. Im Alpenraum nehmen die Frühjahrsabflüsse hingegen aufgrund der früher einsetzenden Schneeschmelze zu. Der Abfluss der grossen Einzugsgebiete wie Rhone und Rhein wird infolge der gegenläufigen Entwicklungen ausgeglichener, mit mehr Abfluss im März und weniger im Mai. Die Abflüsse aus der Schweiz zu den Unterliegern verändern sich in der Summe kaum.

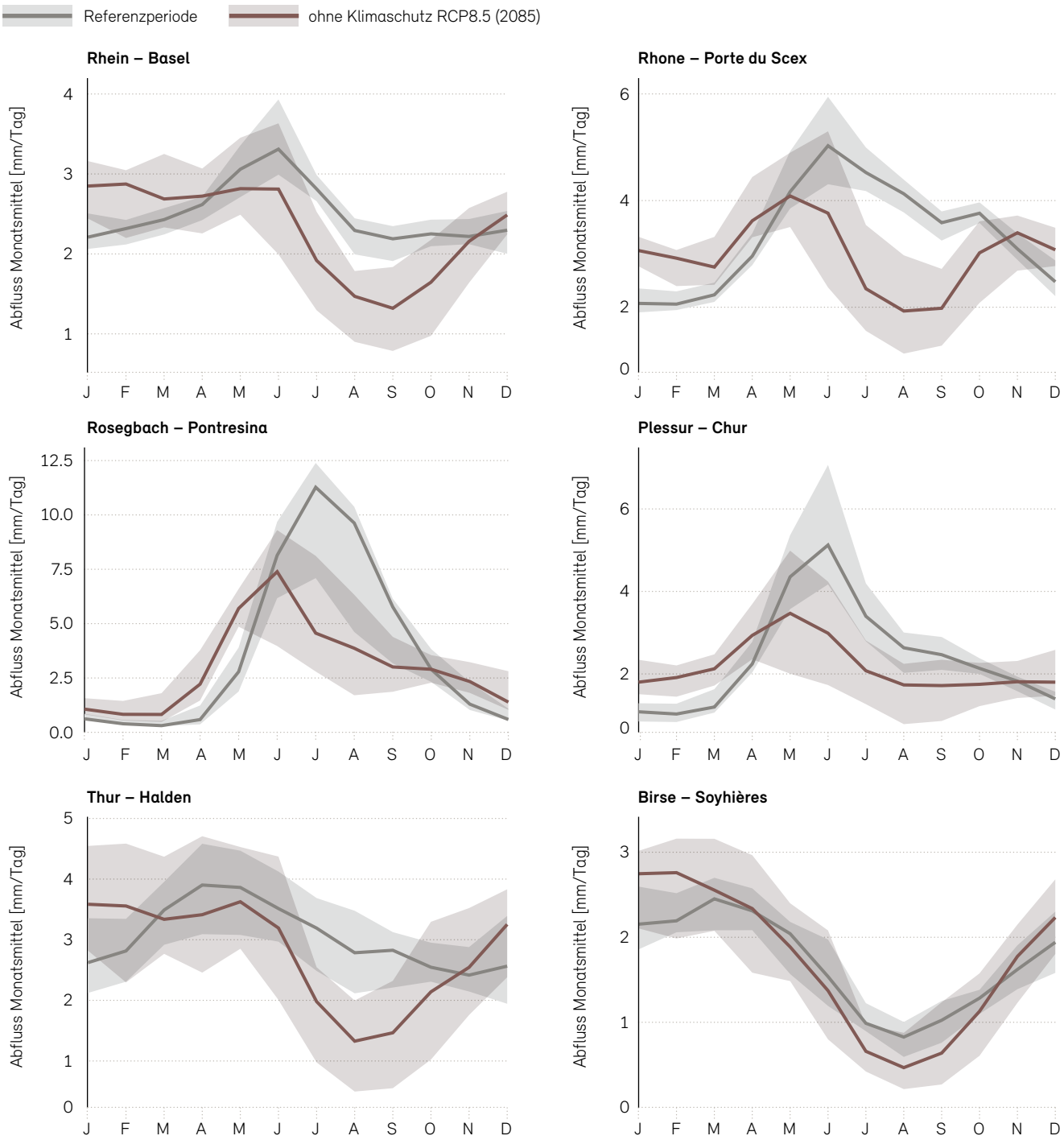
Rückläufige Abflüsse im Sommer und Herbst

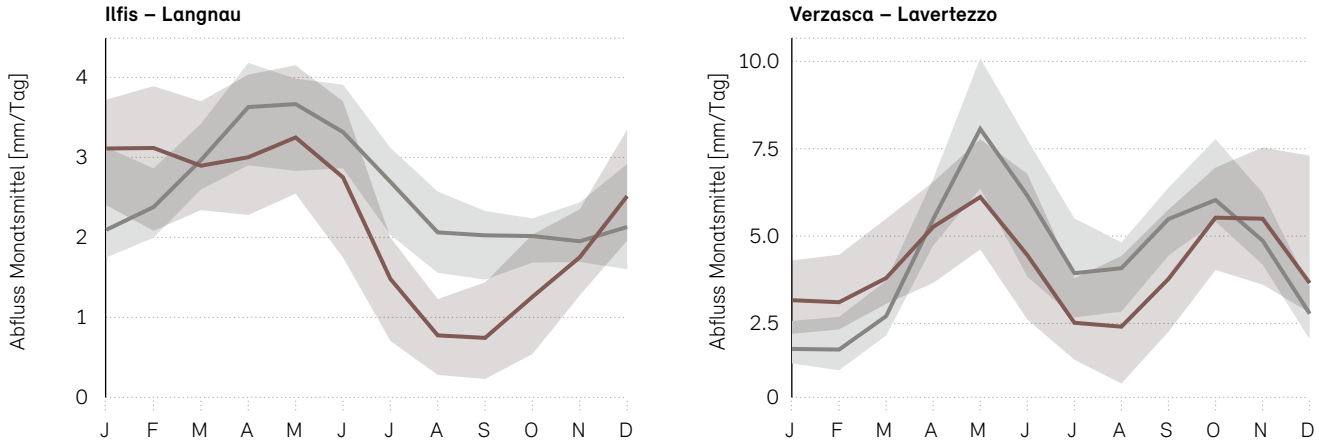
Im Sommer zeigen die Szenarien für die hydrologische Schweiz eine mittlere Abflussabnahme von rund 10 % mit Klimaschutz und 40 % ohne Klimaschutz bis Ende des Jahrhunderts. Verantwortlich für diesen Rückgang sind verminderte Sommerniederschläge, höhere Verdunstung und die Abnahme des Gletscher- und Schneeschmelzwassers (Abbildung 6-2). Gebiete aller Höhenlagen und Regionen sind von rückläufigen Sommerabflüssen betroffen. Mit einem starken Rückgang ist im Mittelland, im Jura und in den Voralpen besonders im Spätsommer zu rechnen (Beispiele Birs, Thur und Ilfis). Im Tessin wird ebenfalls eine deutliche Abnahme der Sommerabflüsse erwartet (Beispiel Verzasca). Markant werden die sommerlichen Abflüsse auch in heute noch vergletscherten Gebieten abnehmen (Beispiel Rosegbach).

Im Herbst wird der Abfluss bis Ende des Jahrhunderts ebenfalls abnehmen, wobei alle Höhenlagen und Regionen von diesem Rückgang betroffen sind. In der hydrologischen Schweiz beträgt er insgesamt rund 5 % mit und 20 % ohne Klimaschutz. Der Abflussrückgang im Sommer und Herbst zeigt sich als Summe der kleinen Einzugsgebiete auch in den grossen Flusseinzugsgebieten wie dem Rhein und der Rhone deutlich (Abbildung 6-4). Insgesamt macht diese Übersicht deutlich, dass es in Zukunft zu einer teils ausgeprägten saisonalen Umverteilung der Abflüsse kommen wird. Herausfordernd für Wasserwirtschaft und Gewässerökologie wird vor allem die Abnahmen im Sommer sein, wenn zu den tiefen Abflüssen hohe Wassertemperaturen und grosser Wasserbedarf hinzukommen.

Abb. 6-4: Veränderung der mittleren monatlichen Abflüsse in acht charakteristischen Einzugsgebieten

Mit den Modellen PREVAH-UniBE und PREVAH-WSL (Rhein und Rhone) wurden die hydrologischen Szenarien (Median und Unsicherheitsbereich) für die Referenzperiode (1981 – 2010) (grau) und die Szenarien ohne Klimaschutz (RCP8.5) für Ende Jahrhundert (rot) berechnet. In allen Gebieten wird eine deutliche Abflussabnahme im Sommer und eine Zunahme im Winter erwartet.

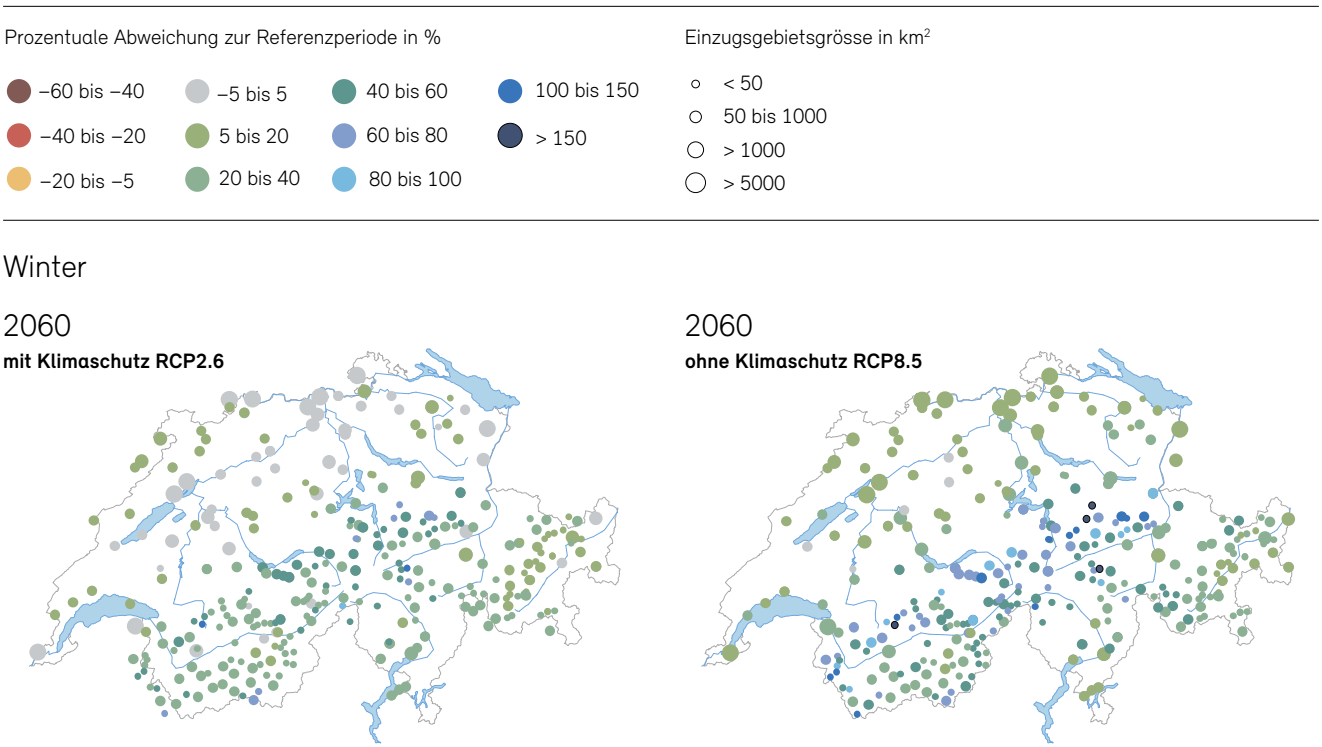




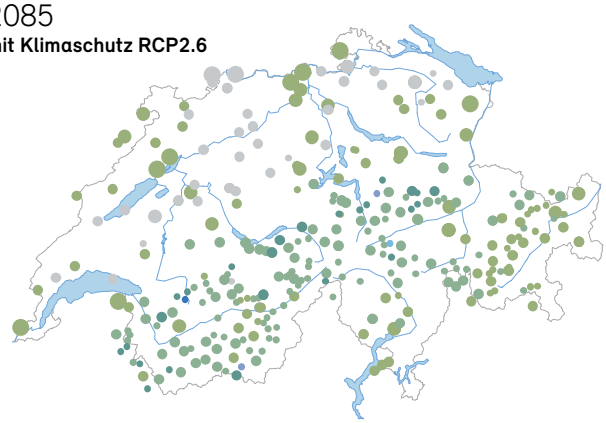
Quelle: Mülchi et al. (2020)

Abb. 6-5: Abflussveränderung im Winter, Frühling, Sommer und Herbst

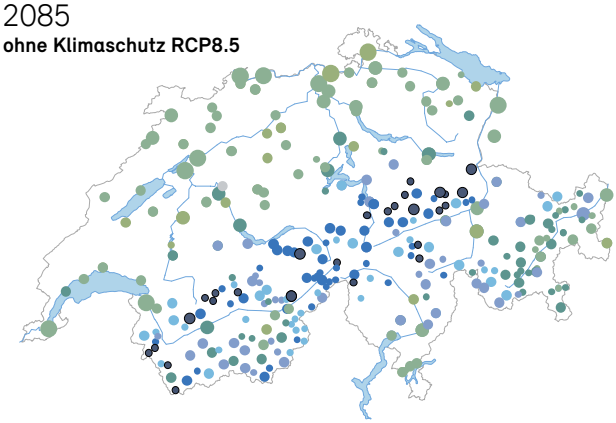
Dargestellt sind die in den hydrologischen Szenarien berechneten Mediane der prozentualen Veränderungen der saisonalen Abflüsse im Vergleich zur Referenzperiode (1981 – 2010) für Szenarien mit (RCP2.6) und ohne Klimaschutz (RCP8.5) für die nahe und die ferne Zukunft. Die Abflüsse nehmen im Winter in der gesamten Schweiz zu und im Sommer und Herbst ab. Im Frühjahr unterscheidet sich die Reaktion zwischen tiefen und hohen Lagen.



2085
mit Klimaschutz RCP2.6

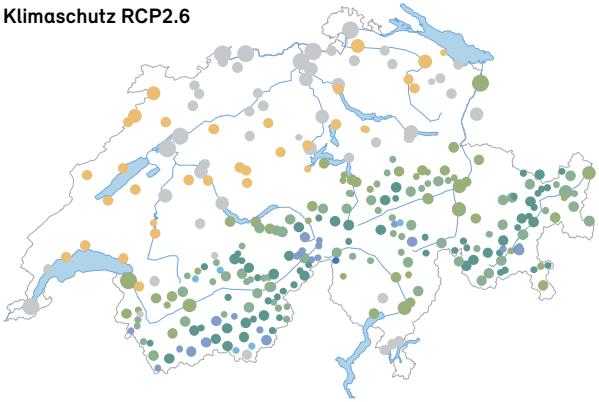


2085
ohne Klimaschutz RCP8.5

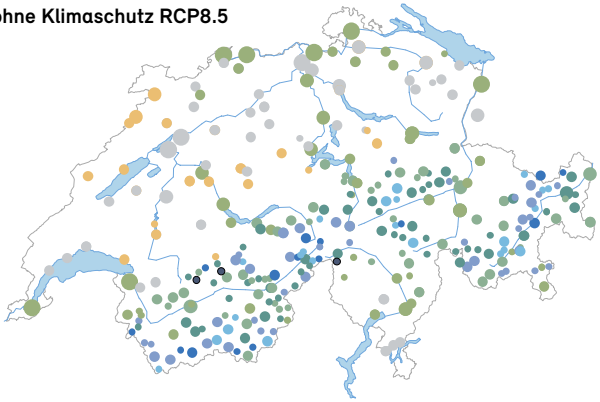


Frühling

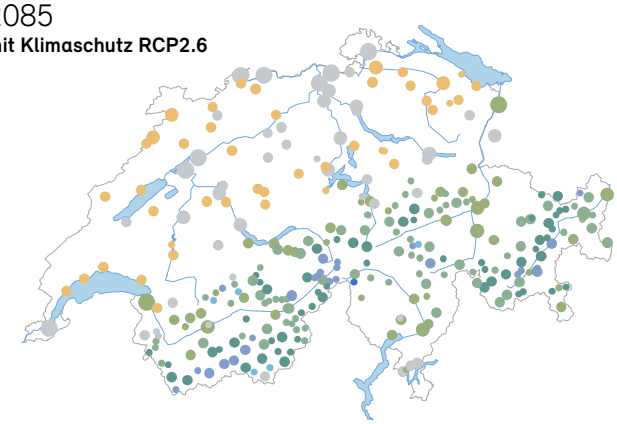
2060
mit Klimaschutz RCP2.6



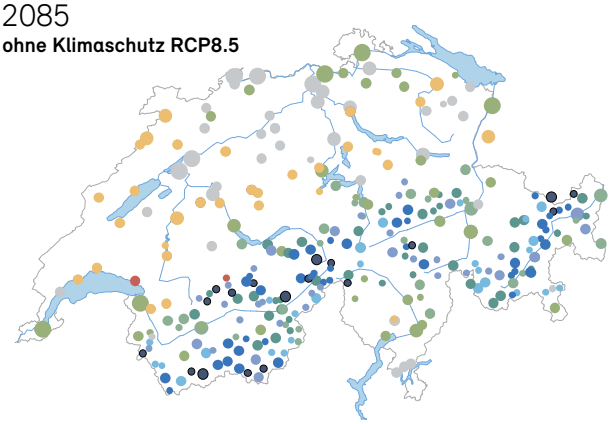
2060
ohne Klimaschutz RCP8.5



2085
mit Klimaschutz RCP2.6

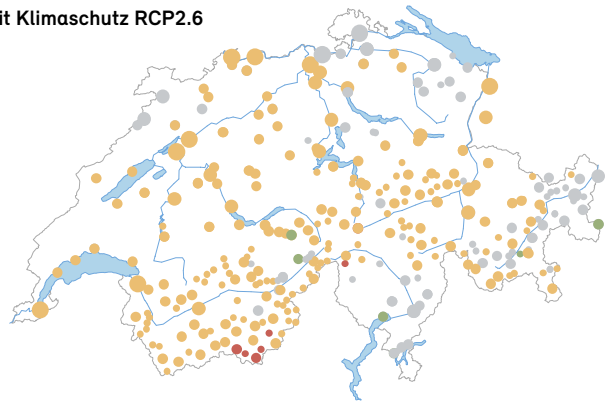


2085
ohne Klimaschutz RCP8.5

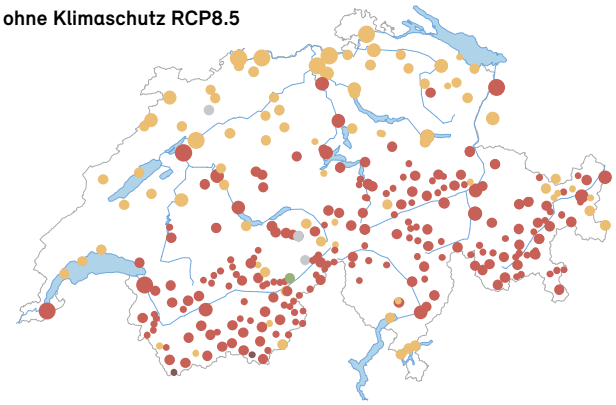


Sommer

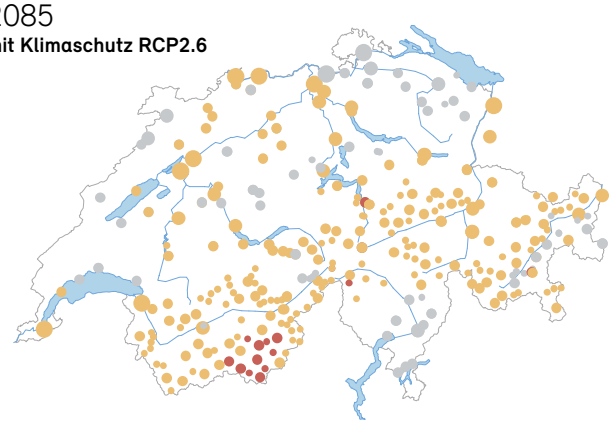
2060
mit Klimaschutz RCP2.6



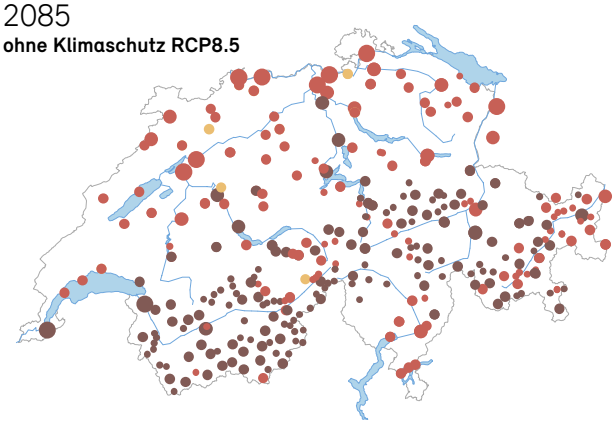
2060
ohne Klimaschutz RCP8.5



2085
mit Klimaschutz RCP2.6

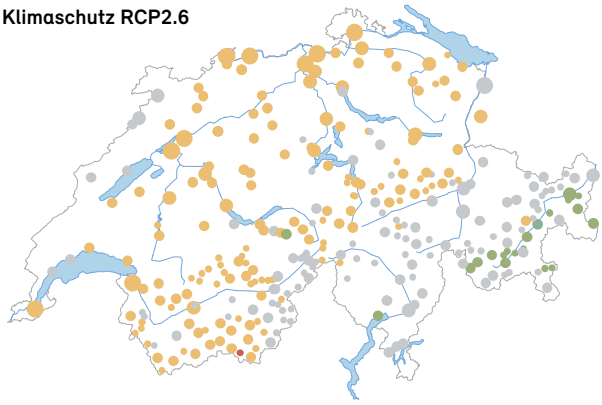


2085
ohne Klimaschutz RCP8.5

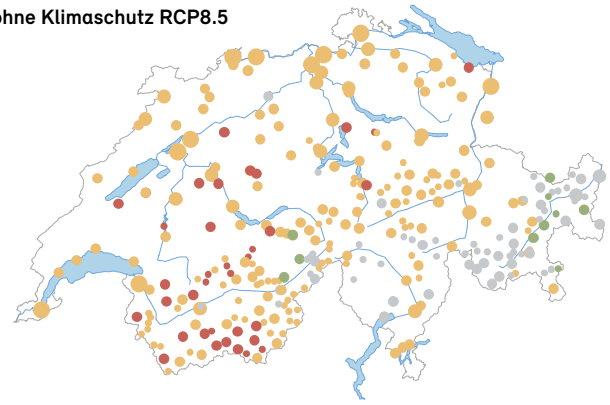


Herbst

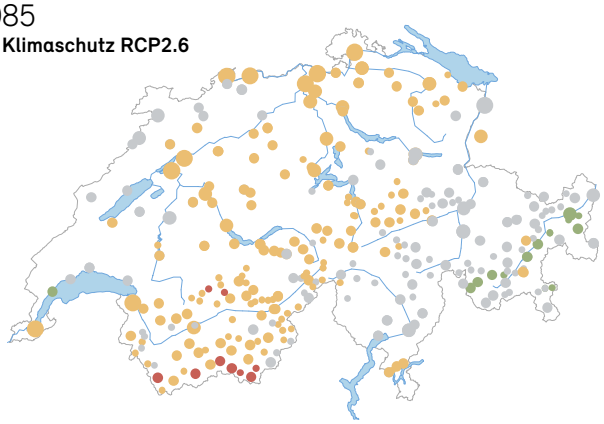
2060
mit Klimaschutz RCP2.6



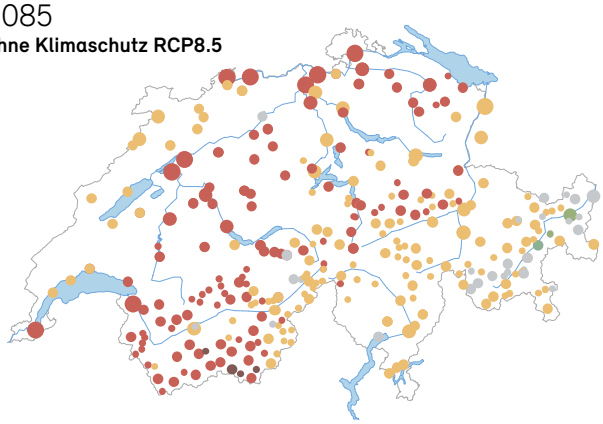
2060
ohne Klimaschutz RCP8.5



2085
mit Klimaschutz RCP2.6



2085
ohne Klimaschutz RCP8.5



Quelle: Daten aus Mülchi et al. (2020), Freudiger et al. (2020), Brunner et al. (2019c)

Aktualisierung der hydrologischen Szenarien aufgrund neuer Klimaszenarien: Wie verändern sich die Abflüsse unter unterschiedlichen Klimaszenarien?

Vorgehen

Mit dem Modell PREVAH-UniBE wurden insgesamt 93 Einzugsgebiete (BAFU-Stationen) kalibriert und validiert. Die Einzugsgebiete decken verschiedene Abflussregime (pluvial, nival, glazial, südalpin) und Einzugsgebietsgrössen (10 – 1700 km^2) ab. Anschliessend wurden für jedes Einzugsgebiet Abflusszeitreihen für verschiedene Emissionsszenarien (RCP2.6, 4.5, 8.5) in täglicher Auflösung berechnet. Die resultierenden Tagesabflüsse wurden für verschiedene Indikatoren zu Mittel-, Hoch- und Niedrigwasser analysiert. Da die neuen Klimaszenarien kontinuierlich über 120 Jahre verfügbar sind, kann erstmals auch der Zeitpunkt signifikanter Abflussveränderungen bestimmt werden.

Hauptergebnisse

- Der Zeitpunkt signifikanter Abflussveränderungen tritt in den höher gelegenen Einzugsgebieten tendenziell früher auf als in den mittelländischen Gebieten.
- Die Kapitel 6.1, 6.2 und 6.4 des Berichts basieren zu grossen Teilen auf den Ergebnissen dieses Projekts. Weitere Resultate sind auf dem NCCS-Webatlas und dem hydrologischen Atlas der Schweiz HADES (*www.hydrologischeratlas.ch*) verfügbar.

Hydro-CH2018-Projekt des Geographischen Instituts der Universität Bern

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Abflussveränderungen»

- Freudiger D. et al. 2020: Quantifying the contributions to discharge of snow and glacier melt. Hydro-CH2018 report.
- Mülchi R. et al. 2020: Neue hydrologische Szenarien für die Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.
- Weingartner R. 2018: Veränderung der Abflussregimes der Schweiz in den letzten 150 Jahren. Hydro-CH2018 Bericht.

6.3 Seen

Natürliche Seen und künstliche Reservoire sind wichtige Wasserspeicher für die Wasserwirtschaft. Durch den Klimawandel verändert sich der Wasserzufluss. Wie sich dies auf Wasserstände und Abflüsse auswirkt, hängt davon ab, ob ein See reguliert ist und wie ein Reservoir gesteuert wird. In alpinen Gebieten entstehen infolge des Gletscherrückgangs neue Gewässer in Gletschervorfeldern.

Die natürlichen Seen sind mit rund 130 km^3 Volumen der zweitgrösste Wasserspeicher der Schweiz (nach dem Grundwasser). Viele Seen sind reguliert, das heisst, der Seeausfluss erfolgt über ein Wehr und der Wasserstand wird gemäss Wehrreglement gesteuert. Viele Seeregulierungen sind zum besseren Schutz vor Hochwasser entstanden, berücksichtigen heute aber auch z. B. die Ökologie, die Wasserkraftgewinnung oder den Tourismus (Ausflugsschifffahrt, Zugänglichkeit von Ufern). Nur wenige grosse Seen sind unreguliert, namentlich Bodensee, Walensee, Greifensee und Baldeggersee. Hier folgt der Wasserstand zeitlich verzögert den Zuflüssen. Naturgemäss sind die Schwankungen des Wasserspiegels in unregulierten Seen meist grösser als in regulierten. Aus der Differenz zwischen laut Reglement höchstem und tiefstem Wasserstand lässt sich grob die potenziell nutzbare Wassermenge abschätzen. Für unregulierte Seen erfolgt die Abschätzung durch die mittlere Differenz zwischen dem tiefsten und höchsten jährlichen Wasserstand. Das zu einem gegebenen Zeitpunkt effektiv nutzbare Volumen hängt vom dann vorliegenden Wasserstand ab und kann z. B. während Trockenphasen, wenn der Wasserstand im See tief ist, gegen null gehen. Einige Seen, z. B. Zürichsee und Vierwaldstättersee, wurden in der Vergangenheit sogar unter die gemäss Reglement minimalen Seewasserstände abgesenkt, um in den unterliegenden Fliessgewässern einen ausreichenden Abfluss zu erhalten (z. B. 2018). Damit konnten die negativen Auswirkungen der Trockenheit auf die Gewässerökologie von Limmat und Reuss reduziert werden.

Hingegen kann bei den künstlichen Seen fast das gesamte Volumen genutzt werden (Brunner et al. 2019a). Es handelt sich dabei meist um alpine Reservoire, die erst durch den Bau einer Talsperre entstanden sind. Ihre nutzbare Speicherkapazität beträgt gemäss Bundesamt für Energie rund 3,5 km^3. Hauptzweck der meisten Reservoire ist die Stromerzeugung, teils dienen sie aber auch dem Hochwasserschutz, der Beschneiung oder der Trinkwasserversorgung.

Beobachtete Veränderungen der Seewasserstände

An Bodensee und Walensee, den beiden grössten unregulierten Seen in der Schweiz, konnten in den letzten Jahrzehnten Veränderungen in den Wasserständen beobachtet werden. Die mittleren Wasserstände sind im Sommer deutlich gesunken und im Winter leicht gestiegen (Abbildung 6-6). Damit folgen die Seewasserstände den infolge des Klimawandels veränderten Abflussregimen der Zuflüsse (Kapitel 6.2).

Zukünftige Seewasserstände

Der Klimawandel wird die Zuflüsse zu den Seen und Reservoiren stark beeinflussen (Kapitel 6.1). Bei den unregulierten Seen wird sich dies direkt auf die Seewasserstände auswirken und insbesondere zu tieferen Pegeln im Sommer und Herbst führen. Bei den regulierten Seen kann ein Teil der Auswirkungen abgefangen werden, allerdings wurden die Wehrreglemente nicht mit dieser Zielsetzung erstellt. Es wird deshalb untersucht, wie sich die Änderung der Zuflüsse auf die Seepegel auswirken werden und ob Handlungsbedarf bezüglich der Reguliervorschriften besteht (BAFU 2014b), z. B. indem die Wasserstände im Frühjahr höher gehalten werden als bisher, um im Sommer mehr Wasser zur Verfügung zu haben. Absehbar ist, dass die Nachfrage nach Wasserentnahmen aus den Seen besonders im Sommer zunehmen wird und mit verminderter Wasserverfügbarkeit in Konflikt geraten kann. Bei den künstlichen Reservoiren stellt sich die Frage nach einer Nutzung für die Überbrückung von Perioden mit Wasserknappheit. Ob und welchen Beitrag natürliche und künstliche Seen zur Bewältigung künftiger Sommerwasserknappheit beitragen können, wurde im Hydro-CH2018-Projekt Wasserspeicher untersucht.

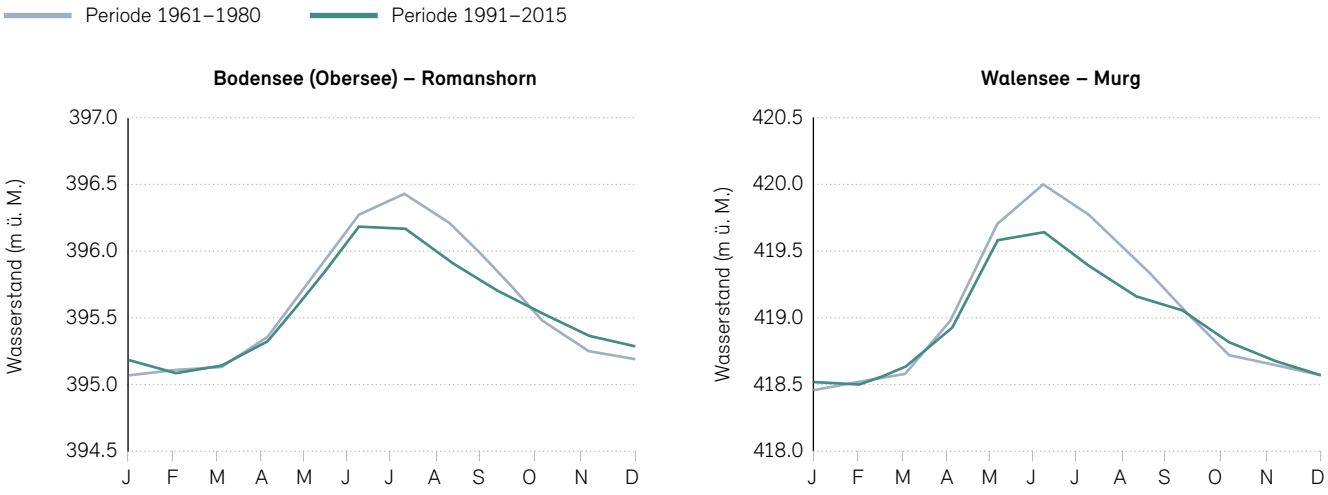
Neue Gewässer entstehen in Gletschervorfeldern

Durch das Abschmelzen der Gletscher entstehen in den Alpen neue Seen, Bäche und Auenlandschaften. Forschende der Universität Zürich schätzen, dass bis zu 500 Seen mit einer Fläche von 50 km^2 und einem Volumen von 2 km^3 entstehen könnten (Haeberli et al. 2012).

Die kleineren Seen werden aber relativ schnell wieder verlanden. Einige der neuen Seen und ehemaligen Gletschertäler könnten – wenn nötig durch den Bau von Staumauern – als Reservoire genutzt werden (Farinotti et al. 2016). Bei diesen neu entstehenden hochalpinen Seen und Landschaften müssen noch grundsätzliche Fragen zu Schutz und Nutzung gesellschaftlich beantwortet werden.

Abb. 6-6: Mittlere Wasserstände an den unregulierten Seen Bodensee und Walensee

In der Periode 1991 – 2015 haben die Wasserstände im Sommer im Vergleich zur Periode 1961 – 1980 deutlich ab-, diejenigen im Winter leicht zugenommen.



Quelle: Messdaten BAFU

Abb. 6-7: Rückzug des Triftgletschers von 1984 bis 2019

Ein eindrückliches Beispiel für den fortschreitenden Gletscherschwund in den vergangenen Jahrzehnten ist der Triftgletscher, auf dessen Gletschervorfeld sich ein neuer See gebildet hat. Abgebildet sind die Gletscherstände in den Jahren 1984, 2011 und 2019.

1984 2011 2019

Bilder: Kraftwerke Oberhasli KWO (links und Mitte: Kulturförderverein Gadmen, rechts: Françoise Funk-Salamí)

Wasserspeicher: Können natürliche Seen und künstliche Reservoire zur Bewältigung von Sommerwasserknappheit beitragen?

Vorgehen

Mit dem hydrologischen Modell PREVAH-WSL wurden hydrologische Szenarien für die gesamte Schweiz berechnet, wofür acht Klimamodellketten mit Klimaschutz (RCP2.6) und 18 Klimamodellketten ohne Klimaschutz (RCP8.5) verwendet wurden. Basierend auf diesen Ergebnissen können die Veränderungen des gesamten Wasserdargebots in der Schweiz ermittelt werden. Zudem wurde der zukünftige Wasserbedarf auf Grundlage der hydrologischen Szenarien abgeschätzt.

Hauptergebnisse

- Bei künstlichen Reservoiren ist fast die gesamte Speicherkapazität auch tatsächlich nutzbar, heute jedoch in der Regel für die Wasserkraftproduktion reserviert. Bei den natürlichen Seen ist nur ein geringer Teil nachhaltig nutzbar, da ein Mindestwasserstand nicht unterschritten werden darf. Bei allen Seen müssen auch Mindestabflüsse in das unterliegende Gewässer beachtet werden.
- Sommerwasserknappheit ist v. a. im Mittelland und nur bedingt in alpinen Regionen zu erwarten. Die künstlichen Reservoire liegen vor allem in den Alpen, weit entfernt von den Gebieten mit potenziellem Wassermangel. Deshalb ist der mögliche Beitrag alpiner Stauseen zur Verringerung von Sommerwasserknappheit im Mittelland eher gering. Ein grösseres Potenzial hätten lokale Speicher, für welche jedoch im Mittelland in der Regel der Platz fehlt.

Hydro-CH2018-Projekt der Forschungseinheiten Gebirgshydrologie sowie Wirtschaft und Sozialwissenschaften der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) und des Instituts für Bau und Umwelt der Hochschule für Technik Rapperswil (HSR)

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Wasserspeicher»

- Brunner M. et al. 2019a: Wasserspeicher. Welchen Beitrag leisten Mehrzweckspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit? Hydro-CH2018 Bericht.
- Brunner M. et al. 2019c: Present and Future Water Scarcity in Switzerland: Potential for Alleviation through Reservoirs and Lakes.

6.4 Grundwasser

Die Schweiz verfügt über sehr grosse Grundwasservorkommen, die jedoch räumlich ungleich verteilt sind. Deshalb kommt es bei Trockenheit bereits heute lokal und temporär vermehrt zu Engpässen bei der Verfügbarkeit von Grundwasser. Diese Tendenz wird durch den Klimawandel zunehmen. Die Grundwasserneubildung wird im Winter und Frühling zunehmen und im Sommer und Herbst abnehmen.

Grundwasser ist der wichtigste und grösste Wasserspeicher in der Schweiz. Dabei wird zwischen Grundwasser in Lockergestein, in Klüften des Festgesteins und im Karst unterschieden. Sein Gesamtvolumen wird auf 150 km^3 geschätzt, wobei die Grundwasservorkommen unterschiedlich ergiebig sind (Abbildung 6-8). Mit rund 120 km^3 fällt der grösste Anteil auf Karst, 20 km^3 auf Klüfte im Festgestein und 10 km^3 auf Lockergesteins-Grundwasserleiter. Nachhaltig nutzbar sind schweizweit ca. 18 km^3 pro Jahr, ein grosser Teil davon stammt aus den sehr ergiebigen Lockergesteins-Grundwasserleitern der Flusstäler (Sinreich et al. 2012).

Abb. 6-8: Übersichtskarte der Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen in der Schweiz

Die sehr ergiebigen Grundwasservorkommen liegen vor allem in den Lockergesteins-Grundwasserleitern in den Flusstälern.

Quelle: Sinreich et al. (2012)

Als nachhaltig nutzbar wird hier diejenige Menge Grundwasser bezeichnet, die im Mittel innerhalb eines normalen Jahres entnommen werden kann, ohne eine dauerhafte Absenkung des Grundwasserspiegels zu bewirken oder andere negative Auswirkungen auf die Umwelt zu haben. Insbesondere bei Niedrigwasser stammt der Abfluss von kleinen und mittelgrossen Fliessgewässern grösstenteils aus dem Grundwasser. Auch sensible Feuchtökosysteme benötigen einen genügend hohen Grundwasserstand (Kapitel 7.3.4). In Trockenjahren kann deshalb auch deutlich weniger Grundwasser nachhaltig nutzbar sein. Die effektiv nutzbare Menge ist in der Praxis aber oft noch geringer, einerseits wegen Nutzungskonflikten und beeinträchtigter Wasserqualität, andererseits, weil die Grundwasserressourcen räumlich sehr unterschiedlich verteilt sind und nicht immer dort zur Verfügung stehen, wo Wasser benötigt wird.

Beobachtete Veränderung der Grundwasservolumen

Bezogen auf das gesamte Grundwasservolumen in der Schweiz machen Änderungen der Grundwasserstände in der Regel nur einen kleinen Volumenanteil aus. So liegen die für die Lockergesteins-Grundwasservorkommen beobachteten natürlichen Schwankungen im Zentimeter- bis Meterbereich, dies im Vergleich zu einer Gesamtmächtigkeit des Grundwassers von oft einigen Zehnermetern. Anders ist es in Karst-Grundwasserleitern, bei denen grosse Abflussschwankungen an Quellen oder deren vollständiges Versiegen auf starke Veränderungen des Füllungsgrades im Jahresverlauf hinweisen. Je nachdem wie lange Wasser im Grundwasser verweilt, also wie schnell ein Grundwasservorkommen auf Trockenheit oder niederschlagsreiche Phasen reagiert, kann sich dies über Monate oder sogar bis ins Folgejahr auf die Grundwasserstände und Quellschüttungen auswirken. Besonders rasch reagieren kleine, oberflächennahe Grundwassersysteme, bei denen in Trockenperioden häufig lokale Probleme von Wasserknappheit auftreten.

Die Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA zeigt, dass die Grundwasserressourcen schweizweit regelmässig und vollständig wieder aufgefüllt werden. Auch wenn es immer wieder mehrjährige Perioden mit eher höheren oder tieferen Grundwasserständen gibt, ist über die gesamte Messperiode von derzeit rund 20 Jahren kein genereller Trend ersichtlich. So kann in quantitativer Hin-

sicht, zumindest in der mehrjährigen Bilanz, von einem weitgehend stabilen Zustand der Ressource Grundwasser in der Schweiz ausgegangen werden (BAFU 2019b).

Grundwasserneubildung als Schlüsselprozess

Die Neubildung des Grundwassers ist ein Schlüsselprozess für das Verständnis der Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwassermenge und -temperatur. Dabei gilt es zwischen Grundwasservorkommen mit diffuser Neubildung aus der Versickerung von Niederschlag und solchen mit konzentrierter Infiltration aus Oberflächengewässern zu unterscheiden. Die Menge an neu gebildetem Grundwasser wird normalerweise nicht direkt gemessen, sondern basierend auf Niederschlag, Verdunstung und Abfluss abgeschätzt. Sie variiert räumlich und zeitlich stark und beträgt über die gesamte Schweiz gemittelt etwa ein Drittel des Jahresniederschlags.

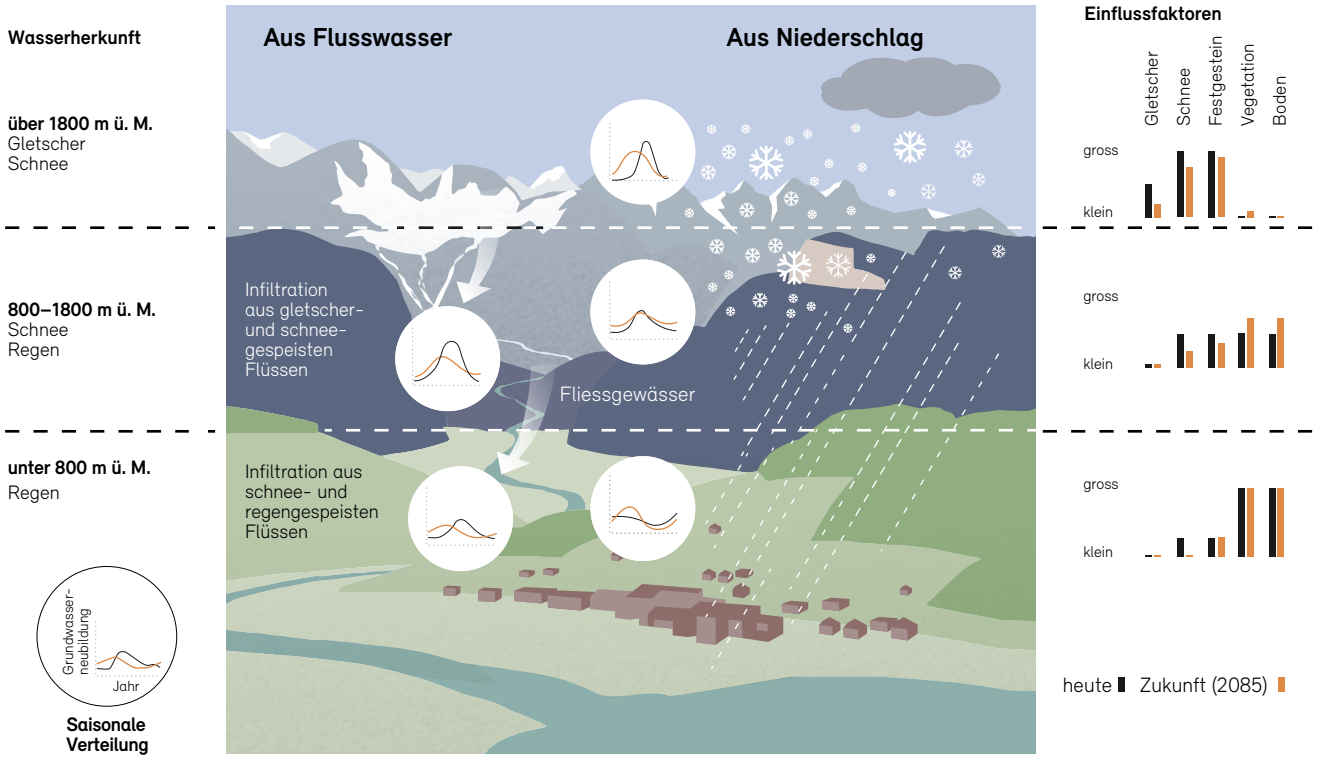
Mehr Grundwasserneubildung aus Niederschlag im Winter und Frühjahr

In Gebieten mit Neubildung aus Niederschlag bildet sich Grundwasser hauptsächlich durch das Versickern von Regen und Schmelzwasser. Generell gilt, dass bei durchlässigen Böden und Geologie mehr Wasser versickern kann. Nicht alles versickerte Wasser gelangt jedoch bis ins Grundwasser, sondern deckt den Wasserbedarf der Vegetation, verdunstet wieder oder gelangt in ein Oberflächengewässer. Die Grundwasserneubildung variiert deshalb nach Jahreszeit und Höhenstufe (Abbildung 6-9).

Infolge der erwarteten Zunahme der Winterniederschläge, des höheren Regenanteils und der früheren Schneeschmelze wird die Grundwasserneubildung im Winter und Anfang Frühling in allen Höhenlagen zunehmen. In höher

Abb. 6-9: Grundwasserneubildung und Einflussfaktoren des Klimawandels

Wie viel Grundwasser aus Flusswasser oder aus Niederschlag neu gebildet wird, hängt von der Beschaffenheit des Einzugsgebiets ab. Die Menge variiert je nach Jahreszeit und Höhenstufe des betrachteten Gebietes. Im Zuge des Klimawandels wird die Grundwasserneubildung im Winter



Quelle: Hunkeler et al. 2020

gelegenen Gebieten wird dies noch dadurch verstärkt, dass die Böden im Winterhalbjahr weniger lang gefroren oder von Schnee bedeckt sein werden.

Für drei Standorte im Mittelland wurde berechnet, wie sich die Neubildung aus Niederschlag verändern wird (Abbildung 6-10). Bei einem Szenario ohne Klimaschutz nimmt sie im Winter und Frühjahr bis Ende Jahrhundert leicht zu.

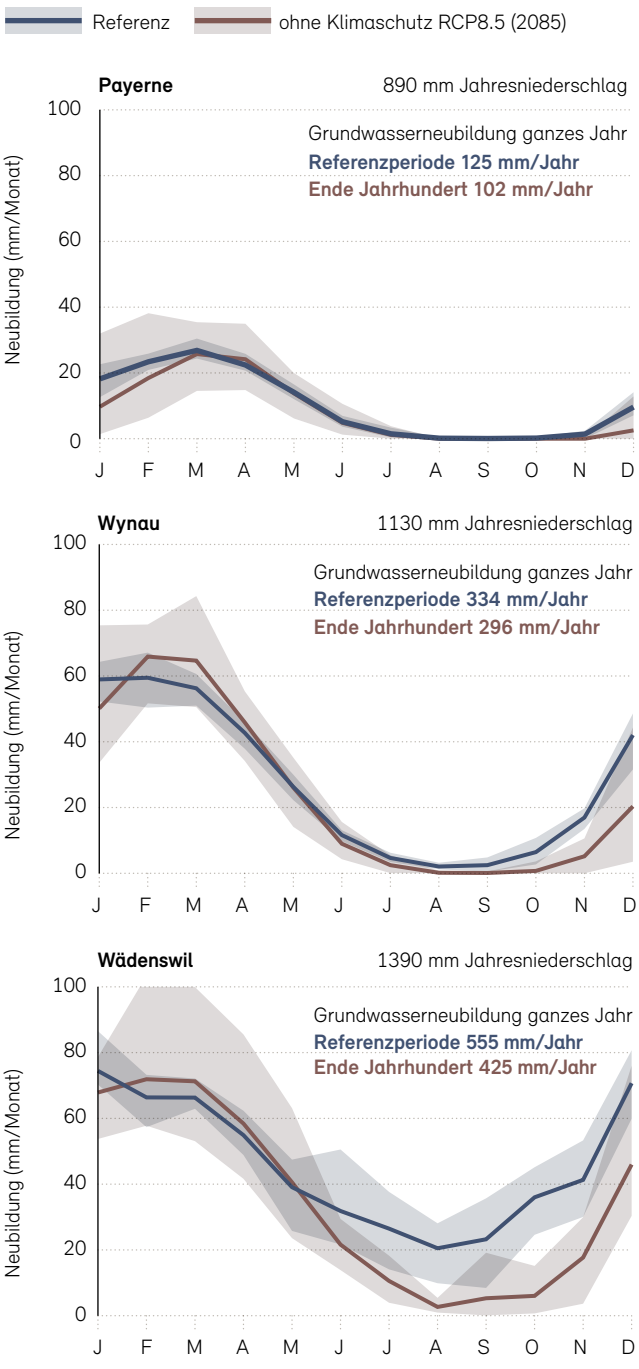
Abnahme der Grundwasserneubildung im Sommer und Herbst

In niederschlagsärmeren Gegenden (z. B. Standort Payerne) findet im Sommer kaum Grundwasserneubildung statt. In feuchteren Regionen (z. B. Standorte Wynau und Wädenswil) wird die Grundwasserneubildung im Sommer abnehmen, verursacht durch geringere Niederschläge und höhere Temperaturen, welche zu einer höheren Verdunstung führen (Abbildung 6-10). In Gebieten im Mittelland beginnt die Wiederauffüllung der Grundwasserspeicher künftig später im Jahr, da zuerst noch das sommerliche Bodenfeuchtedefizit kompensiert werden muss, bevor wieder Wasser bis zum Grundwasser versickern kann. Zusätzlich nimmt auch die Verdunstung infolge der längeren Vegetationsperiode und der höheren Temperaturen zu. Im Gegensatz dazu kann in alpinen Gebieten im Herbst länger Grundwasserneubildung stattfinden, da die Schneebedeckung später im Jahr einsetzt.

Ebenfalls im Sommerhalbjahr stark zurückgehen wird die Grundwasserneubildung durch Infiltration aus Oberflächengewässern. Diese findet in der Schweiz typischerweise entlang der Flusstäler mit mächtigen Talschottern statt (z. B. grosse Täler im Mittelland, Rhonetal, Hochrheintal). Die Grundwasserneubildung hängt dann nicht nur von den lokalen klimatischen Gegebenheiten ab, sondern auch von der Wasserführung des jeweiligen Oberflächengewässers. Bei einem Fluss aus den Alpen erfolgt die Grundwasserneubildung während des Abflussmaximums im Frühling oder Sommer. Die Grundwasserneubildung durch Infiltration verschiebt sich also zeitlich mit den klimabedingten Veränderungen im Regime des speisenden Oberflächengewässers.

Abb. 6-10: Veränderungen der Grundwasserneubildung aus Niederschlag

Veränderungen der Grundwasserneubildung aus Niederschlag in % (Median und Unsicherheitsbereich) an drei Standorten des Mittellands mit Böden mittlerer Durchlässigkeit. Dargestellt ist das Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) für die ferne Zukunft im Vergleich zur Referenzperiode (1981 – 2010). Die Grundwasserneubildung wird im Winter zu- und im Sommer abnehmen, die Jahresbilanz ist jedoch negativ.



Quelle: Hunkeler et al. 2020

Wie verändern sich die Grundwasserressourcen in alpinen Einzugsgebieten mit dem Klimawandel und welchen Einfluss haben sie auf die Abflussbildung?

Vorgehen
Für elf alpine Einzugsgebiete wurde der Zusammenhang zwischen Grundwasser- und Abflussdynamik untersucht. Messdaten und geologische Informationen wurden in physikalisch basierten Modellen integriert. Aufgrund dieser Simulationen kann der Einfluss von Klimawandel auf die Grundwasserspeicher und die Reaktion der Einzugsgebiete quantifiziert werden.

Hauptergebnisse
- Alpine Grundwasserspeicher in Lockergestein und Festgestein reagieren unterschiedlich auf den Klimawandel. Im Lockergestein ändert sich vor allem die saisonale Dynamik, über das Jahr gesehen bleibt die Menge jedoch gleich. Im Unterschied zu Standorten im Mittelland nimmt die saisonale Grundwasserdynamik in den alpinen Lockergesteinen ab.
- Im alpinen Festgestein können auch langfristig abnehmende Trends in der gespeicherten Grundwassermenge auftreten.
- Trotz der früheren Schneeschmelze und der höheren Evapotranspiration im Sommer bleibt die gespeicherte Grundwassermenge und die Abflussrate in alpinen Gebieten im Sommer bedeutend höher als im Winter. Ausgedehnte Lockergesteinsablagerungen haben eine ausgleichende Wirkung auf den Abfluss, da sie saisonal grössere Mengen an Grundwasser speichern und wieder freisetzen können.

Hydro-CH2018-Projekt des Zentrums für Hydrogeologie und Geothermie der Universität Neuchâtel

Ohne Klimaschutz negative Jahresbilanz
Über das Jahr gesehen nimmt die neu gebildete Grundwassermenge an allen drei untersuchten Standorten ab (Abbildung 6-10), da der Verlust im Herbst (und Sommer an feuchteren Standorten) im Winter nicht vollständig kompensiert wird. An heute noch niederschlagsreichen Standorten ist die Abnahme grösser, da hier auch im Sommer die Neubildung abnimmt. Ebenfalls grösser ist der Rückgang an Standorten mit gering durchlässigen Böden, da diese das zusätzliche Wasser im Winter und Frühjahr weniger gut aufnehmen können und deshalb mehr Niederschlag oberflächlich abfliesst. Solange über mehrere Jahre hinweg gesehen die Gesamtmenge der Grundwasserneubildung jedoch ausreicht, die Grundwasserspeicher zu füllen, wird sich am Gesamtvolumen des Grundwasserspeichers auch mit dem Klimawandel wenig ändern. Jedoch wirken sich die Veränderung der Grundwasserneubildung auf die jahreszeitliche Verteilung der Grundwasserstände und damit auch auf das nachhaltig nutzbare Grundwasservolumen aus.

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Grundwasser»

- Epting J. et al. 2020: Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen. Hydro-CH2018 Bericht.
- Hunkeler D. et al. 2020: Effect of Climate Change on Groundwater Quantity and Quality in Switzerland. Hydro-CH2018 report.
- Arnoux M. et al. 2020a: Dynamiques du stockage en eau souterraine et du régime hydrologique des bassins versants Alpins face aux changements climatiques. Rapport réalisé dans le cadre de Hydro-CH2018.

6.5 Hochwasser

Die hydrologischen Szenarien lassen noch keine robusten quantitativen Aussagen zu, wie sich die Häufigkeit von Hochwassern und ihre Abflüsse verändern. Allerdings deuten verschiedene klimabedingte Prozesse darauf hin, dass Hochwasser und Oberflächenabfluss mit fortschreitendem Klimawandel zunehmen werden.

Bei Hochwasser liegt der Wasserstand eines Gewässers deutlich über seinem langjährigen Mittelwert. Dabei klassiert man Hochwasserabflüsse HQx danach, mit welcher Wahrscheinlichkeit sie einmal in x Jahren auftreten oder überschritten werden. Die Hochwasserkennwerte HQ30, HQ100 und HQ300 werden für die Dimensionierung von Hochwasserschutzmassnahmen und für die Erstellung von Gefahrengrundlagen verwendet.

Lang andauernde und grossräumige Starkniederschläge über mehrere Stunden oder Tage, manchmal in Kombination mit Schneeschmelze, können zu grossräumigen Hochwassern führen. Bei diesen sind grössere Einzugsgebiete oder ganze Regionen betroffen und führen auch zu hohen Wasserständen in Seen und im Grundwasser. Bei kurzen, lokalen Starkniederschlägen besonders im Sommer, die Minuten oder wenige Stunden dauern, entstehen lokale Hochwasser in kleinen Fliessgewässern und Wildbächen oder Oberflächenabfluss ausserhalb des Gerinnes.

Häufigkeit von Hochwasserereignissen verändert sich

Auf grossräumige Hochwasser der Vergangenheit kann zum Teil aus Analysen von Sedimenten und historischen Hochwasseraufzeichnungen zurückgeschlossen werden. Solche Rekonstruktionen zeigen, dass sich in den letzten 10 000 Jahren in der Schweiz immer wieder hochwasserreiche und -arme Phasen abgewechselt haben (Ruiz-Villanueva und Molnar 2020). Diese Schwankungen fanden in den letzten 500 Jahren typischerweise in Intervallen von ca. 30 bis 100 Jahren statt (Schmocker-Fackel und Naef 2010) und wurden durch Veränderungen der grossräumigen atmosphärischen Zirkulation über Zentraleuropa verursacht (Stucki et al. 2012). Dies bedeutet, dass die Hochwasserkennwerte über die Zeit nicht konstant sind und sich mit dem Klima verändern. Dies ist eine Herausforderung für den Hochwasserschutz.

Eine Periode mit schweizweit sehr vielen grossräumigen Hochwassern gab es nach Ende der kleinen Eiszeit in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Sie war Auslöser für viele Hochwasserschutzprojekte und Gewässerkorrektionen. Hingegen traten in der Schweiz zwischen 1940 und 1970 aussergewöhnlich wenige grossräumige Hochwasser auf (sogenannte «Ereignislücke»). In den letzten Jahrzehnten war wieder eine Häufung von grossräumigen Hochwassern zu beobachten, was zu Anpassungen im Hochwasserschutz und der Einführung des integralen Risikomanagements führte (Kapitel 7.2).

Abb. 6-11: Hochwasser und Oberflächenabfluss

Die Bilder zeigen links das Hochwasser der Lütschine vom 25. August 2005 in Lütschental, rechts ein lokales Oberflächenabflussereignis im

Bilder: links: BAFU, rechts: Tiefbauamt Kanton Schaffhausen

Die Häufung von Hochwassern in jüngster Zeit wurde auch in vielen anderen Regionen Europas beobachtet. So waren die letzten 30 Jahre die hochwasserreichsten in Europa seit 500 Jahren. Dies ist umso bemerkenswerter, als in Europa hochwasserreiche Phasen in der Vergangenheit eher während kühlen Klimaphasen beobachtet wurden, während die letzten 30 Jahre überdurchschnittlich warm waren. Die momentane hochwasserreiche Phase ist klimatisch gesehen also einzigartig (Blöschl et al. 2020).

Veränderung der hochwasserbeeinflussenden Faktoren
Ob sich ein Hochwasser ereignet und zu welcher Abflussspitze es führt, ist von einer Kombination zahlreicher Einflussfaktoren abhängig. Starkniederschläge wirken zwar auslösend für das Hochwasser, doch kann dasselbe Niederschlagsereignis in einem Fall zu einem grossen Hochwasser führen, während der Abfluss in einem anderen Fall beispielsweise aufgrund einer tieferen Nullgradgrenze oder vorgängig geringerer Bodenfeuchte deutlich kleiner ausfällt. Mit dem Klimawandel verändern sich nicht nur die Starkniederschläge, sondern auch andere Einflussfaktoren des Hochwassergeschehens (Abbildung 6-12):

Mehr Energie und Feuchte in der Atmosphäre
Mit fortschreitendem Klimawandel erhöht sich das Niederschlagspotenzial, denn pro Grad Celsius Erwärmung kann die Luft 6 bis 7 % mehr Wasser aufnehmen. Ausserdem zeigen globale Klimamodelle, dass ohne Klimaschutz in Zukunft mehr atmosphärische Feuchte gegen die Alpen transportiert wird und somit das Potenzial für intensivere Niederschläge und Hochwasser steigt (Brönnimann et al. 2018). Wernli et al. (2016) haben die Auswirkungen dieser Klimafolge auf das Hochwassergeschehen in einem theoretischen Experiment untersucht. Mithilfe eines Wettermodells und eines hydrologischen Modells haben sie einzelne vergangene Hochwasserereignisse mit geänderten Anfangsbedingungen nachgerechnet. Dabei wurden eine bis zu 10 % höhere Feuchte und eine bis zu 3 °C höhere Temperatur über dem Atlantik angenommen. Die Experimente zeigen, dass die Hochwasserabflüsse in einer ähnlichen Grössenordnung zunehmen können wie die Luftfeuchte.

Der Klimawandel erhöht also grundsätzlich die potenzielle Niederschlagsmenge, was sich sowohl auf kürzere Starkniederschlagsereignisse als auch auf lang anhaltende Niederschläge auswirken kann. Aus physikalischer Sicht würde man zumindest für lokale Hochwasser und Oberflächenabfluss mit häufigeren und intensiveren Ereignissen rechnen. Ebenfalls würde man erwarten, dass bei grossräumigen Hochwassern die Abflüsse zunehmen. Die hydrologischen Szenarien können diese Veränderungen allerdings nur ansatzweise abbilden: Ohne Klimaschutz zeigen sie zwar eine leichte Zunahme von Hochwasserhäufigkeit und -intensität bis Ende des Jahrhunderts, diese ist jedoch nicht signifikant (Mülchi et al. 2020). Insbesondere bleibt sehr unsicher, ob die seltenen grossen Hochwasser häufiger auftreten werden.

Unsicherheiten bei der atmosphärischen Zirkulation
Das unklare Signal in den hydrologischen Szenarien kann auch methodische Gründe haben: Erstens werden in den Klimaszenarien CH2018 möglicherweise die grossräumigen, Hochwasser auslösenden Extremniederschläge bzw. ihre natürliche Variabilität unterschätzt. Die in der Vergangenheit beobachteten Zirkulationsänderungen in der Atmosphäre und die daraus resultierenden grossräumigen Extremniederschläge konnten ebenfalls nur teilweise mit Klimamodellen nachgebildet werden (Brönnimann et al. 2019).

Zweitens müssen für die hydrologische Modellierung statistische Verfahren angewendet werden, um die räumliche und zeitliche Auflösung der Niederschlagsdaten zu verbessern. Die regionalen Klimamodelle liefern ihre Daten in einer räumlichen Auflösung von 12 × 12 km bzw. 50 × 50 km, und der Modelloutput ist in der Regel nur in einer täglichen zeitlichen Auflösung verfügbar. Diese Auflösungen reichen nicht aus, um Hochwasserereignisse in den gebirgigen und eher kleinen Schweizer Einzugsgebieten mit hydrologischen Modellen gut nachzubilden. Deshalb werden die Ergebnisse der Klimamodelle mithilfe statistischer Verfahren weiter verfeinert (Kapitel 2). Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass durch diese statistischen Verfahren die Extremniederschläge reduziert werden.

Abb. 6-12: Einflussfaktoren auf das Hochwassergeschehen und deren Veränderung mit dem Klimawandel

Räumliche Auswirkung auf Hochwasser: Zunahme erwartet; Abnahme erwartet; Zu- oder Abnahme möglich; Keine Änderung

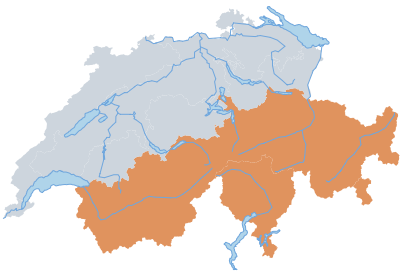
Klimafolge Mehr Energie und Feuchte in der Atmosphäre
- Grundsätzliche Erhöhung des Niederschlagspotenzials, allerdings je nach Gebietseigenschaften unterschiedliche Reaktion.
- Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen und damit lokaler Hochwasser.

Klimafolge Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation
- Auch in Zukunft hohe atmosphärische Variabilität.
- Klimamodelle können die Folgen auf Extremniederschläge heute nur bedingt abschätzen.
- Die atmosphärische Zirkulation wirkt sich besonders auf grossräumige, lang anhaltende Starkniederschläge und damit auf grossräumige Hochwasser aus.

Klimafolge Höhere Nullgradgrenze
- Mehr Niederschlag in Form von Regen, welcher direkt zum Abfluss gelangen kann.
- Besonders in alpinen Einzugsgebieten grössere Fläche, die beregnet wird.
- Hochwassersaison verlängert sich, somit potenziell mehr Niederschlagsereignisse, welche zu Hochwasser führen können.

Klimafolge Rückgang Schneedecke, Schneeschmelze
- Einfluss der Schneeschmelze im Jura und Alpenvorland nimmt ab.
- Im Mittelland bereits heute kaum Einfluss der Schneedecke auf das Hochwassergeschehen.
- Eventuell grösserer Einfluss des Schnees auf Hochwasser in alpinen Gebieten («Regen-auf-Schnee-Ereignisse»).

Klimafolge Veränderung der Bodenfeuchte
- Abnahme der mittleren Bodenfeuchte im Mittelland kann kurzfristig das Wasserrückhaltevermögen bei Niederschlägen erhöhen. Bei länger andauernden Niederschlägen ist der Effekt aber klein.
- Bei ausgetrockneten Böden, insbesondere wenn sie verdichtet sind, können wasserabweisende Effekte auftreten, womit bei Starkniederschlagsereignissen während Trockenphasen teilweise weniger Wasser infiltrieren kann. → Abnehmendes Wasserrückhaltevermögen und erhöhte Gefahr von Oberflächenabfluss.



Klimafolge Höhere Sedimentverfügbarkeit
- Erhöhung des Schadenspotenzials durch mehr mobilisierbares Geschiebe in den Alpen.
- Veränderter Feststofftransport infolge veränderter Abflüsse.

Veränderungen bei Schnee und Bodenfeuchte

Wegen des Anstiegs der Schnee- und Nullgradgrenze fällt in den Alpen häufiger Niederschlag bis in hohe Lagen als Regen und nicht als Schnee. Dies verlängert die Hochwassersaison im Frühjahr und Herbst. Im Jura entstehen Hochwasser heute vor allem im Winter durch Ereignisse, bei denen im gesamten Einzugsgebiet Starkniederschläge und Schneeschmelze zusammenfallen (Regen-auf-Schnee-Ereignisse). Dies wird infolge des Klimawandels weniger häufig der Fall sein, da Dauer und Mächtigkeit der Schneedecke im Jura stark abnehmen werden. Auch im Alpenvorland werden solche Ereignisse seltener. Im Oktober 2011 gab es im Kander- und Lötschental ein grosses Regen-auf-Schnee-Hochwasser, wie es in dieser Form noch nie beobachtet worden war (Badoux et al. 2013). Ob solche Regen-auf-Schnee-Ereignisse in den Alpen infolge des Klimawandels zunehmen werden, ist jedoch noch unklar. Die erwarteten Veränderungen der Schneedecke können – je nach betrachteter Region und Jahreszeit – sowohl hochwasserfördernd als auch -hemmend wirken. Das Gleiche gilt für die Bodenfeuchte: Böden mit geringerer Bodenfeuchte können mehr Niederschlag aufnehmen und zwischenspeichern, Hochwasserabflüsse also reduzieren. Andererseits können sehr trockene Böden aber auch wasserabweisende Eigenschaften entwickeln, sodass der Niederschlag nicht versickern kann und sich Oberflächenabfluss bildet. Dies tritt besonders bei landwirtschaftlich genutzten Böden mit geringer Vegetationsbedeckung und hoher Verdichtung auf und kann zu Bodenerosion führen.

Höhere Sedimentverfügbarkeit

Durch das Auftauen des Permafrosts und den Rückzug der Gletscher wird im Gebirge zunehmend Sediment verfügbar, das bei grossen Niederschlagsereignissen mobilisiert werden kann. Besonders in den steilen Wildbächen wird Sediment während Hochwasserereignissen transportiert, und weiteres Material kann aus dem Gerinne erodiert werden. So kann beispielsweise aus einem Hochwasser in einem Wildbach durch zusätzlich erodiertes Sediment ein Murgang entstehen. In den weniger steilen Fluss- und Bachabschnitten unterhalb der Wildbäche verlangsamt sich die Fliessgeschwindigkeit des Wassers und das Sediment wird wieder abgelagert. Durch die Ablagerung vermindert sich die Abflusskapazität des Gerinnes, und es kann zu Überflutungen und Übersarungen und damit zu grossen Schäden kommen (Speerli et al. 2020).

Unterschiedliche Reaktion der Gebiete auf Starkniederschläge

Die mit dem Klimawandel erwartete Zunahme der Starkniederschläge wird sich je nach Gebiet unterschiedlich stark auf den Abfluss auswirken. Denn Böden, Festgestein, Vegetation, Topografie und Siedlungsfläche beeinflussen, welcher Anteil des Niederschlags in einem Einzugsgebiet zurückgehalten werden kann und welcher Anteil den Hochwasserabfluss verstärkt. Ist die Aufnahmekapazität des Einzugsgebiets gross, nimmt der Abfluss unterproportional zu den Niederschlägen zu. Ist hingegen die Aufnahmekapazität erschöpft, kann der gesamte Niederschlag abfliessen und der Abfluss steigt überproportional an. Das komplexe Zusammenspiel zahlreicher teils gegenläufiger Einflussfaktoren erschwert robuste quantitative Aussagen über das zukünftige Auftreten von grossen Hochwassern.

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Hochwasser»

- Burlando P. et al. 2020: Evaluation of future hydrological scenarios using stochastic high-resolution climate data. Hydro-CH2018 report.
- Mülchi R. et al. 2020: Neue hydrologische Szenarien für die Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.
- Ruiz-Villanueva V. und Molnar P. 2020: Past, current and future changes in floods in Switzerland. Hydro-CH2018 report.
- Speerli J. et al. 2020: Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport. Hydro-CH2018 Bericht.

6.6 Niedrigwasser

Im Mittelland, im Jura und auf der Alpensüdseite werden im Sommer und Herbst Niedrigwassersituationen in Oberflächengewässern in Zukunft ausgeprägter und häufiger auftreten. Dies mit negativen Folgen für Gewässerökologie und Wassernutzung. In den Alpen steigen während der bisherigen Niedrigwassersaison im Winter die Abflüsse hingegen an.

Als Niedrigwasser bezeichnet man ungewöhnlich niedrige Abflüsse in Oberflächengewässern. Niedrigwassersituationen werden in der Regel anhand der Kennwerte Q_{347} und NM7Q charakterisiert. Q_{347} ist die Abflussmenge eines Fliessgewässers, die während 95 % der Zeit, also an 347 Tagen eines durchschnittlichen Jahres, mindestens erreicht oder überschritten wird (gemittelt über 10 Jahre). Der Abfluss Q_{347} ist im Gewässerschutzgesetz (Art. 31 Abs. 1 GSchG) als Mindestrestwassermenge festgesetzt und spielt als Niedrigwasserkenngrösse eine zentrale Rolle. Als zweite Kenngrösse für Niedrigwasser dient NM7Q, definiert als niedrigster Mittelwert von sieben aufeinanderfolgenden Tagesabflusswerten innerhalb eines betrachteten Zeitraums. NM7Q ist eine robuste Kenngrösse und wenig anfällig auf Messfehler oder kurzfristige Beeinflussungen.

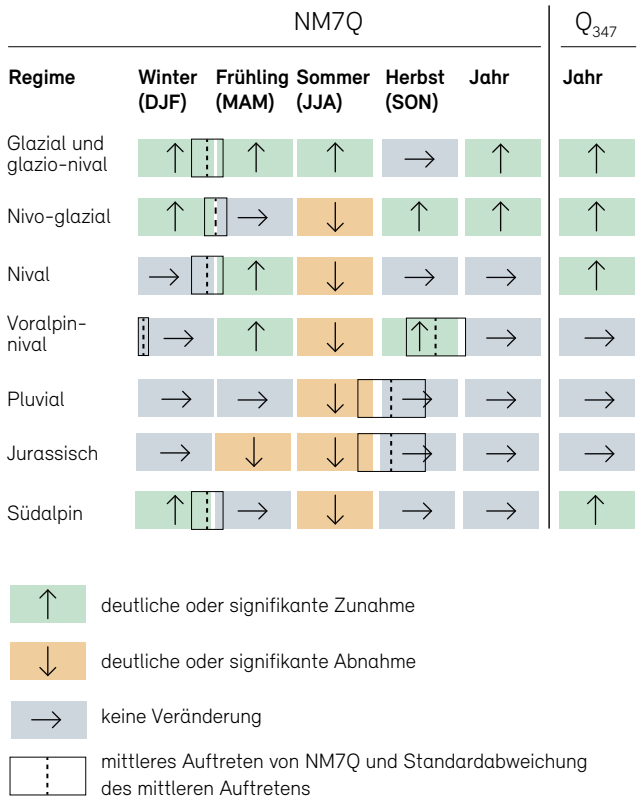
Niedrigwasserabflüsse in den Alpen nehmen zu

In hoch gelegenen alpinen Einzugsgebieten wird Niedrigwasser durch Kältephasen verursacht, wenn aller Niederschlag als Schnee fällt und nicht direkt abfliessen kann. Die kleinsten jährlichen Niedrigwasser treten hier normalerweise zwischen Januar und März auf. Bei glazialen und nivalen Einzugsgebieten haben die Abflüsse (und damit die Kennzahl NM7Q) zwischen 1961 und 2018 in der Mehrheit der Einzugsgebiete deutlich zugenommen. Auch die Mindestabflussmengen Q_{347} haben sich erhöht (Abbildung 6-13). Insgesamt sind die Abflüsse in den Alpen während der typischen Niedrigwassersaison im Winter also angestiegen, hauptsächlich, weil infolge des Klimawandels im Winter mehr Niederschlag in Form von Regen und weniger in Form von Schnee fällt.

Auch am Rhein sind ausgeprägte Winterniedrigwasser seit dem 19. Jahrhundert seltener geworden (Pfister et al. 2006). Das ist aber nicht nur eine Folge des Klimawandels. Eine wesentliche Rolle spielen auch die Speicher der Wasserkraftwerke und die Regulierung der natürlichen Seen. Ein Teil des sommerlichen Abflusses wird in alpinen Reservoiren gespeichert und im Winter zur Stromerzeugung genutzt. Dies führt zu einer deutlichen Abflusserhöhung im Winter.

Abb. 6-13: Beobachtete Entwicklung der Niedrigwasserabflüsse seit 1961

Für verschiedene Abflussregime wurden Trendberechnungen für die Niedrigwasserkennwerte NM7Q (saisonal und Jahr) und Q_{347} (nur Jahr) für die Periode 1961 – 2018 durchgeführt. Eine Zunahme dieser Kennzahlen bedeutet, dass die Niedrigwasserabflüsse zunehmen, eine Abnahme, dass die Niedrigwasserabflüsse zurückgehen. In praktisch allen Einzugsgebieten gehen die Niedrigwasserabflüsse im Sommer signifikant zurück. Hoch gelegene Gebiete zeigen eine Zunahme im Winter und Frühling. Bei Gebieten mit Niedrigwasser im Winter haben die jährlichen Werte für Q_{347} und NM7Q bereits zugenommen.



Quelle: Weingartner und Schwanbeck (2020)

Bereits tiefere Niedrigwasserabflüsse im Sommer
In den nicht-alpinen Regionen entsteht Niedrigwasser aufgrund ausbleibender Niederschläge, oft in Verbindung mit hoher Verdunstung. Die typische Niedrigwasserperiode liegt zwischen Spätsommer und Ende Herbst, wobei die Jahr-zu-Jahr-Variabilität beträchtlich ist. So können Tage mit Abflussmengen unter Q_{347} ausser von März bis Mai in allen Monaten auftreten. Im Zeitraum 1961 – 2018 sind für die Mehrheit der nicht-alpinen Einzugsgebiete keine signifikanten Veränderungen bei Q_{347} und den Jahreswerten von NM7Q erkennbar.

Anders sieht es aus, wenn man die niedrigsten Sommerabflüsse (NM7Q) betrachtet. Sie haben in der Mehrheit der untersuchten nordalpinen Einzugsgebiete – auch in den wenig oder nicht vergletscherten Einzugsgebieten im Alpenraum – signifikant abgenommen (Abbildung 6-13). Die immer frühere Schneeschmelze, die Erhöhung der Verdunstung und ausbleibende Niederschläge dürften hierbei die entscheidenden Prozesse darstellen.

Für sehr seltene und extreme Niedrigwasserereignisse, wie sie statistisch alle 50 oder 100 Jahre auftreten, können aufgrund der zu kurzen Messreihen keine Trendanalysen durchgeführt werden. Historische Analysen zeigen jedoch, dass es in der Vergangenheit im Sommer immer wieder aussergewöhnlich trockene und warme Phasen in der Schweiz und in Mitteleuropa gab wie z. B. in den 1940er- und 1960er-Jahren (Kohn et al. 2019). In den letzten 20 Jahren gab es aussergewöhnlich viele heisse und trockene Sommer mit neuen Rekordwerten bezüglich Niedrigwasserabflüssen und Temperatur (z. B. 2003, 2015, 2018). Der Trend zu heissen Sommern ist klar belegt (Technischer Bericht CH2018), sodass diese Häufung von extremen Niedrigwasserereignissen sehr wahrscheinlich nicht allein mit der natürlichen Variabilität erklärt werden kann.

Bei tiefen Grundwasserständen und Quellabflüssen ist bislang keine langfristige Tendenz ersichtlich. Die Jahre 2003, 2011 und 2018 zeigten allerdings besonders tiefe Grundwasserstände, und viele kleine Quellen, etwa im Jura, im Hügelgebiet und in den Voralpen, fielen trocken (BAFU-Indikator «Hohe und Tiefe Grundwasserstände»[3]).

3 *www.bafu.admin.ch* > Thema Wasser > Daten, Karten und Indikatoren > Indikatoren > Wasserindikatoren

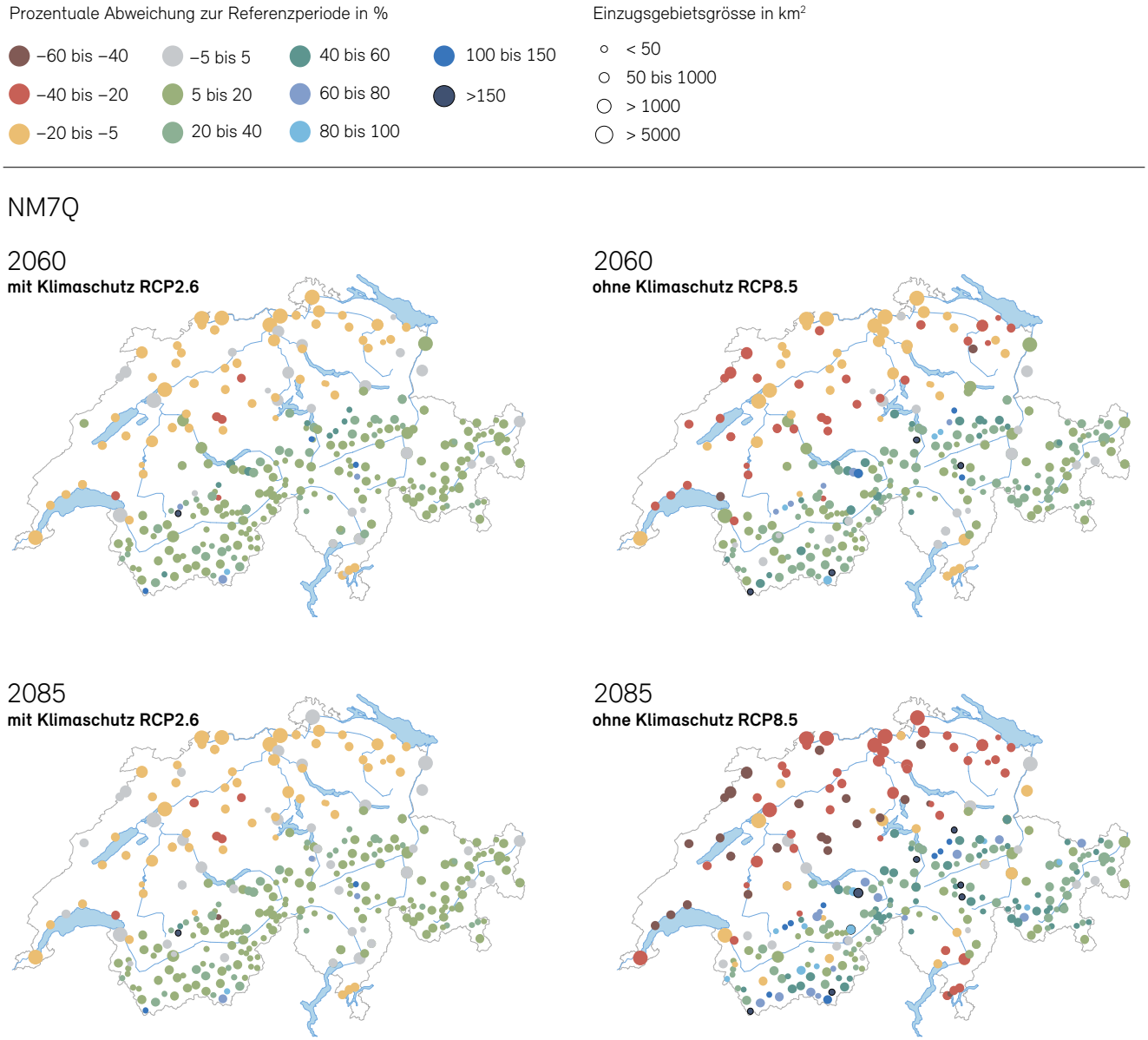
Trend zu stärker ausgeprägtem Niedrigwasser im Sommer setzt sich fort
Die Klimaszenarien CH2018 zeigen, dass die mittleren Niederschlagsmengen in den Sommermonaten abnehmen und Trockenperioden tendenziell länger anhalten werden (Kapitel 4.2). Als Folge der höheren Temperaturen steigt zudem die Verdunstung, solange genügend Wasser in Boden und Vegetation vorhanden ist. Die hydrologischen Niedrigwasser-Szenarien lassen im Mittelland, im Jura und in der Südschweiz eine Abnahme des Niedrigwasserabflusses im Sommer und Herbst erwarten. Da in diesem Zeitraum in der Regel die kleinsten Niedrigwasserabflüsse innerhalb eines Jahres auftreten, zeigen sich diese Veränderungen auch beim jährlichen NM7Q und Q_{347} (Abbildung 6-14 und Abbildung 6-15, Beispiel Thur).

Verschiebung der Niedrigwassersaison in den Alpen und Voralpen
In den Alpen und Voralpen zeigen die hydrologischen Szenarien ein etwas differenzierteres Bild. In Lagen zwischen 1500 und 2000 m ü. M. steigen die winterlichen Niedrigwasserabflüsse aufgrund der milderen und feuchteren Witterung in der nahen Zukunft an. Ohne Klimaschutz nehmen die Sommerabflüsse wegen des Rückgangs des Schmelzwassers jedoch so stark ab, dass sich die Niedrigwassersaison in einigen Gebieten vom Winter in den Herbst oder Sommer verschiebt. Niedrigwasser wird in diesen Gebieten dann nicht mehr durch tiefe Temperaturen, sondern durch ausbleibende Niederschläge verursacht. Während alle Gebiete unterhalb 1500 m ü. M. bis Ende Jahrhundert ohne Klimaschutz eine deutliche Abnahme des Q_{347} zeigen, sind die Veränderungen in Gebieten zwischen 1500 und 2000 m ü. M. nur gering (Abbildung 6-15, Beispiele Plessur und Verzasca) und der Q_{347} kann dort sowohl leicht zu- als auch abnehmen. Für die sehr hohen Lagen über 2000 m ü. M. zeigen alle Szenarien auch für die ferne Zukunft eine Zunahme der Niedrigwasserabflüsse Q_{347} und damit weniger ausgeprägte Niedrigwassersituationen im Winter (Abbildung 6-15, Beispiel Rosegbach).

Zukünftige Entwicklung bei extremen Niedrigwasserereignissen unsicher
Beim Auftreten von extremer meteorologischer Trockenheit und Niedrigwasser, also sehr seltenen Ereignissen, spielen spezifische grossräumige Zirkulationsmuster in

Abb. 6-14: Niedrigwasser-Szenarien

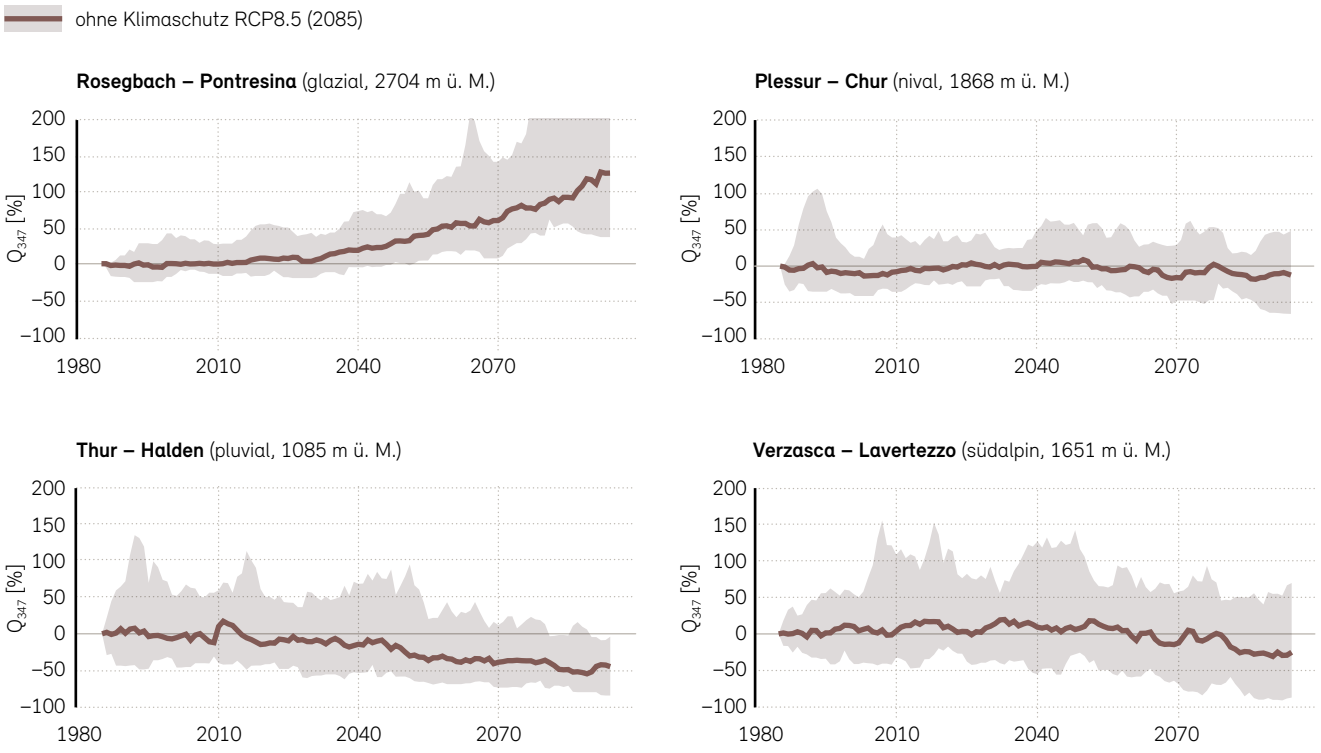
Die Veränderungen im Vergleich zur Referenzperiode (1981–2010) für die Niedrigwasserkenngrösse NM7Q mit Klimaschutz RCP2.6 (links) und ohne Klimaschutz RCP8.5 (rechts) für Mitte und Ende Jahrhundert. Eine Abnahme der jährlichen Werte bedeutet, dass die Niedrigwasserabflüsse kleiner werden. In den tiefen Lagen treten die Niedrigwasserabflüsse im Sommer auf und nehmen mit dem Klimawandel ab. In den Alpen



Quelle: Daten Mülchi et al. (2020 und 2021b), Freudiger et al. (2020), Brunner et al. (2019c)

Abb. 6-15: Entwicklung des Q_{347} mit der Zeit

Die prozentuale Veränderung der Abflusskennzahl Q_{347} (Median und Unsicherheitsbereich) gegenüber der Referenzperiode (1981 – 2010) wurde für gleitende Zehnjahresperioden von 2010 bis 2099 für das Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) berechnet. Im glazialen Gebiet Rosegbach nimmt die Abflussmenge Q_{347} bis Ende Jahrhundert stark zu, während sie in der Thur (pluvial) und der Verzasca (südalpin) abnimmt. In der



Quelle: Daten Mülchi et al. (2021b)

der Atmosphäre eine entscheidende Rolle. Beispielsweise führen beständige, bis in grosse Höhen reichende Hochdruckgebiete zu einer atmosphärischen Blockierung der Westwindzone und dadurch zu stark verringerten Niederschlägen. In den Klimamodellen bestehen noch Unsicherheiten, wie sich solche spezifischen atmosphärischen Muster mit fortschreitendem Klimawandel verändern. Damit ist auch unklar, wie stark die Häufigkeit und Intensität von extremen Trocken- und Niedrigwasserereignissen zunehmen werden (Woollings et al. 2018).

Anfälligkeit für ein Trockenfallen unterschiedlich

In Niedrigwasserperioden werden viele Fliessgewässer zum grossen Teil aus dem Grundwasser gespeist. Ausser von den meteorologischen Bedingungen, der Vegetation und der Bodenbeschaffenheit hängt der Niedrigwasserabfluss daher entscheidend von den hydrogeologischen Bedingungen im jeweiligen Einzugsgebiet ab (Carlier et al. 2018). So vermindern ausgedehnte Grundwasservorkommen im Festgestein und/oder in Lockergesteinsablagerungen die Anfälligkeit gegenüber Trockenheit. Diese hydrogeologischen Prozesse bleiben auch mit dem Klimawandel bestehen.

Spezielle hydrogeologische Bedingungen können bewirken, dass ein Fliessgewässer durch Infiltration ins Grundwasser lokal ganz versiegt. Damit der gesamte Abfluss in den Untergrund infiltrieren kann, müssen die Lockergesteinsablagerungen im Untergrund mächtig genug sein, um die ganze Wassermenge aufzunehmen und unterirdisch weiterzuleiten. Zudem muss die Flusssohle genügend durchlässig sein. Ein vollständiges Versiegen durch Infiltration wird nur bei mittleren und kleinen Fliessgewässern beobachtet. Bei grösseren Fliessgewässern ist der

Niedrigwasserabfluss zu gross, um ganz versickern und unterirdisch abfliessen zu können. In Karstgebieten ist ein Trockenfallen von Fliessgewässern häufig zu beobachten. Niedrigwassersituationen können verstärkt werden, wenn Wasser direkt aus den Oberflächengewässern oder dem angrenzenden Grundwasser entnommen wird. Umgekehrt erhöhen Einleitungen von Wasser z. B. aus Abwasserreinigungsanlagen die Niedrigwasserabflüsse. Tiefere Niedrigwasserabflüsse im Sommer, besonders in Kombination mit hohen Wassertemperaturen oder Trockenfallen des Gewässers, sind sehr problematisch für die Gewässerökologie (Kapitel 6.9) und können zu Einschränkungen bei der Wassernutzung führen (Kapitel 7.1).

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Niedrigwasser»

- Kohn I. et al. 2019: Low Flow Events – a Review in the Context of Climate Change in Switzerland. Hydro-CH2018 report.
- Mülchi R. et al. 2020: Neue hydrologische Szenarien für die Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.
- Weingartner R. und Schwanbeck J. 2020: Veränderung der Niedrigwasserabflüsse und der kleinsten saisonalen Abflüsse in der Schweiz im Zeitraum 1961 – 2018. Hydro-CH2018 Bericht.

6.7 Gewässertemperatur

Der Klimawandel erhöht die Wassertemperaturen in Fliessgewässern, Seen und Grundwasser. Während diese Erwärmung in den Oberflächengewässern schon heute deutlich messbar ist, ist der Anstieg der Grundwassertemperaturen weniger ausgeprägt. Höhere Wassertemperaturen besonders im Sommer haben negative Auswirkungen auf Wasserqualität und Gewässerökologie.

6.7.1 Fliessgewässer

Die mittlere Wassertemperatur der Fliessgewässer ist bereits in den letzten Jahrzehnten deutlich angestiegen. Die hydrologischen Szenarien zeigen, dass sich dieser Anstieg besonders im Sommer und in den alpinen Gebieten fortsetzen wird.

An der Quelle eines Fliessgewässers liegt die Temperatur des aus dem Untergrund hervortretenden Wassers nahe an der Jahresmitteltemperatur der Luft. Ausnahmen sind Gletscherbäche, die von Schmelzwasser mit einer Temperatur um 0 °C gespeist werden. Im weiteren Verlauf talabwärts wird die Temperatur des Fliessgewässers vor allem durch die Sonneneinstrahlung und die Lufttemperatur beeinflusst. Kühlend wirken sich im Sommer eine Beschattung des Gewässers durch Vegetation, Schmelzwasserzuflüsse und der Zufluss von Grundwasser aus. Gewässer mit hohen Abflussmengen bzw. grossen Wassertiefen erwärmen sich zudem langsamer. Die Temperatur von Seeabflüssen folgt im Jahresgang jener der Seeoberfläche und kann im Sommer entsprechend hoch sein. Im Winter wirken Grundwasserzufluss und hohe Abflüsse der Abkühlung entgegen.

Die thermische Nutzung der Gewässer für die Kühlung von Kraftwerken und Industrieanlagen erhöht die Wassertemperatur, Wärmeentzug für Heizzwecke senkt sie. Auch Wasserkraftnutzung hat einen Einfluss auf die Temperatur. Bei Speicherkraftwerken gelangt kaltes Wasser aus hoch gelegenen Speicherseen in tiefer gelegene Gewässer und kühlt diese im Sommer ab. Da die Abgabe je nach Stromerzeugung unregelmässig ist, kommt es nicht nur zu starken Abflussschwankungen (Schwall-Sunk), sondern auch zu grösseren unnatürlichen Temperaturschwankungen («Thermopeaking»). Unterhalb von Speicherseen

kann daher der Tagesgang oder sogar der Jahresgang der Gewässertemperatur verändert sein. Auch in Restwasserstrecken wird durch den verminderten Abfluss die Temperatur beeinflusst. Je nach Jahreszeit und lokalen Gegebenheiten kann ein Fliessgewässer wärmer oder kühler sein als bei natürlichem Abfluss (Schmid 2019).

Wassertemperatur besonders im Sommer stark angestiegen

Von 52 Fliessgewässern der Schweiz wurden die in den letzten Jahrzehnten gemessenen Wassertemperaturen systematisch untersucht. Von 31 Stationen sind Messungen seit 1970 verfügbar. Die mittlere Erwärmung der Fliessgewässer betrug im Zeitraum 1979 – 2018 0,33 °C pro Dekade (Abbildung 6-16), in den letzten 20 Jahren im Mittel gar 0,37 °C pro Dekade. Dies entspricht etwa 90 % des Anstiegs der mittleren Lufttemperatur im entsprechenden Zeitraum (Michel et al. 2019). Gedämpft wurde der Anstieg der Wassertemperaturen durch den kühlenden Effekt von Schmelzwasser aus den Alpen.

Besonders stark haben sich die Fliessgewässer im Sommer erwärmt (0,58 °C pro Dekade), während die Erwärmung im Winter deutlich geringer war (0,22 °C pro Dekade). Der stärkere Anstieg im Sommer lässt sich mit der stärkeren Erwärmung der Atmosphäre in dieser Jahreszeit erklären. Gleichzeitig sind aber auch die sommerlichen Abflussmengen im Mittelland zurückgegangen (Kapitel 6.2), und Hitzewellen haben sich gehäuft.

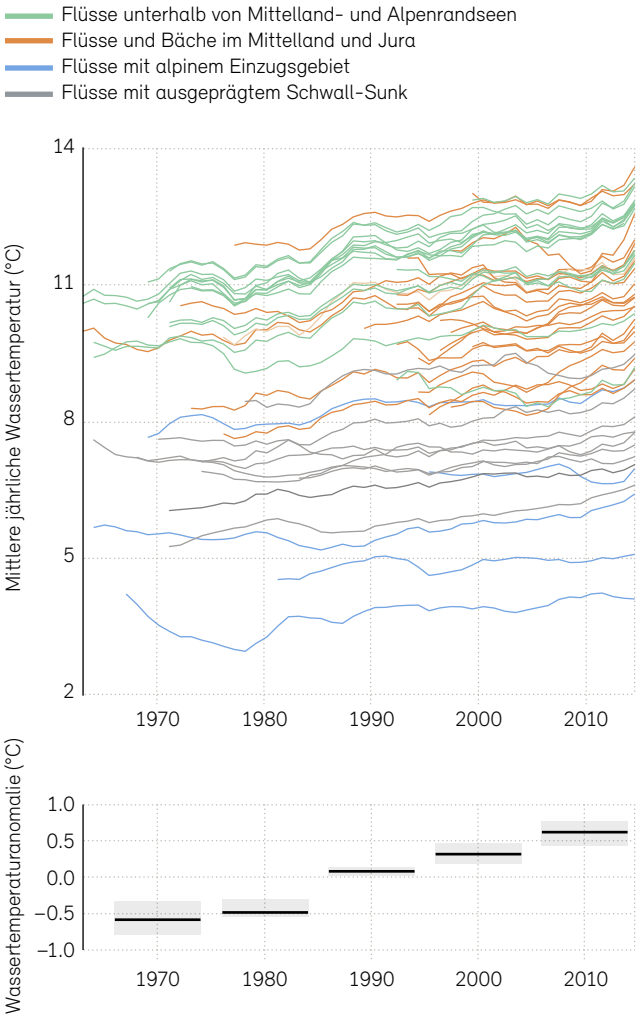
Häufigere Überschreitung von kritischen Temperaturschwellenwerten

In den Hitzesommern 2003, 2015 und 2018 wurden an vielen Stationen neue Temperaturrekorde verzeichnet, im Sommer 2018 gab es an 25 von 83 Messstationen neue Höchstwerte (BAFU 2019a). Werte deutlich über 25 °C wurden u. a. im Hochrhein, in der Limmat, der Thur und der Rhone unterhalb des Genfersees beobachtet.

Hohe Wassertemperaturen können bei zahlreichen Wasserlebewesen Stress auslösen und im Extremfall zu deren Tod führen. Auch ist der Ausbruch gewisser Krankheiten an erhöhte Wassertemperaturen gekoppelt (Kapitel 6.9.2). Wie Abbildung 6-17 zeigt, weisen seit den 1980er-Jahren immer mehr Gewässer Temperaturen auf, welche für den Ausbruch z. B. der Proliferativen Nierenkrankheit PKD bei Forellen kritisch sind. Zudem dauern diese warmen Phasen immer länger an. So hat sich die Summe der Tage pro Jahr, an welchen Temperaturen über 15 °C auftreten, über vier Dekaden hinweg im Mittel um 20 Tage vergrössert. In einigen Gebieten ist die beobachtete Erwärmung sogar noch stärker (Michel et al. 2019).

Abb. 6-16: Beobachtete Temperaturentwicklung von Fliessgewässern

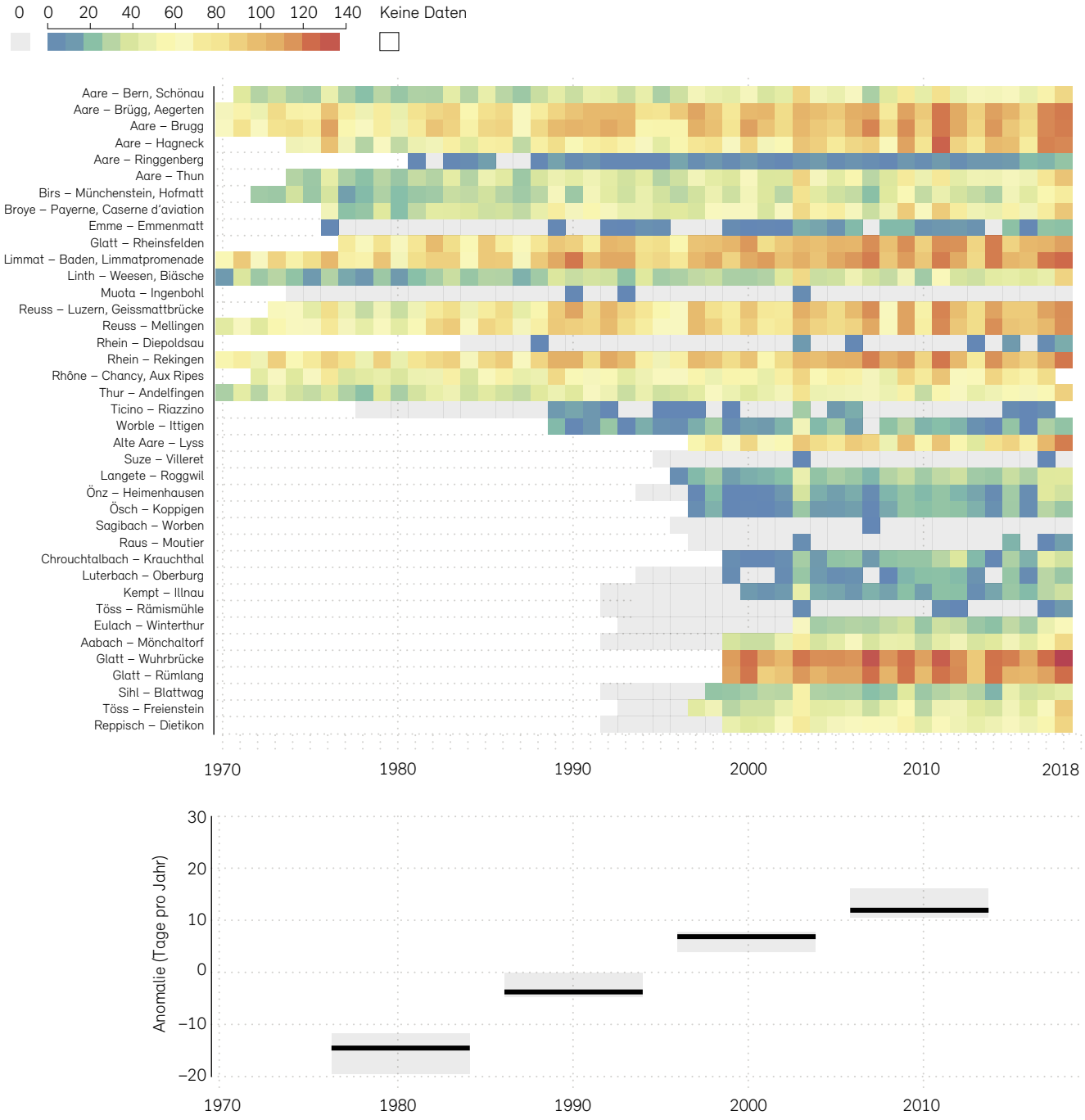
Die Linien zeigen das 5-jährige gleitende Mittel der mittleren jährlichen Wassertemperatur, gemessen an 52 Stationen. Die Farben stellen verschiedene Fliessgewässertypen dar: siehe Legende. Ebenfalls dargestellt sind die Wassertemperaturanomalien pro Dekade im Vergleich zum Mittel der Periode 1970–2018 (unten). Bei den meisten Fliessgewässern haben die Temperaturen seit den 1970er-Jahren



Quelle: Michel et al. (2019)

Abb. 6-17: Häufigere Überschreitung der Wassertemperatur von 15 °C

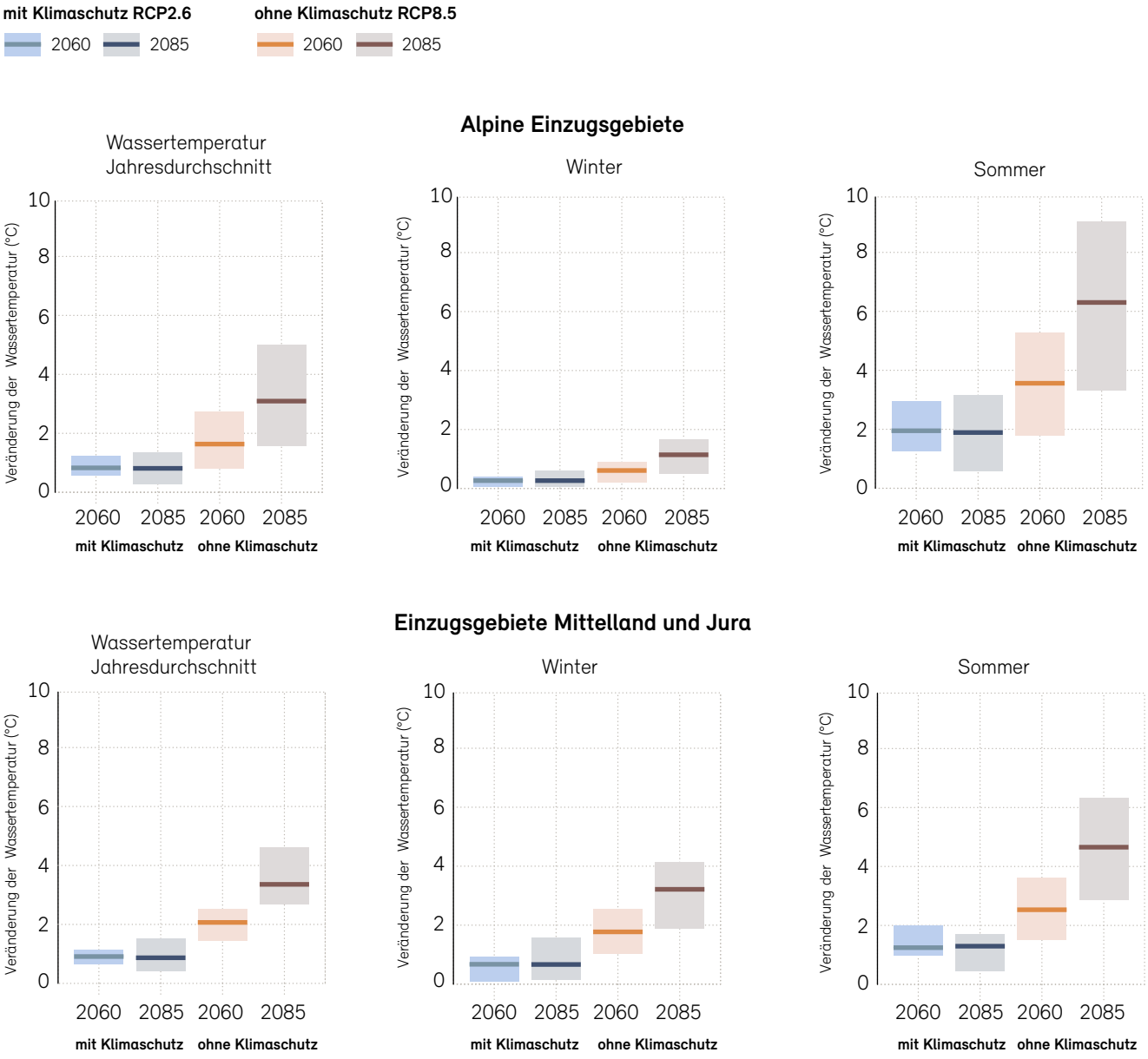
Die Anzahl Tage, an denen die 15°-Marke an einem Fliessgewässer überschritten wird, gilt als Indikator für das Auftreten der Proliferativen Nierenkrankheit PKD bei Forellen.



Quelle: Michel et al. (2019), Datengrundlage: BAFU, Kanton Bern und Kanton Zürich

Abb. 6-18: Veränderung der Wassertemperaturen in Fliessgewässern des Mittellandes und Juras sowie der Alpen

Mittlere Veränderungen der Wassertemperaturen (Mittelwert und Unsicherheitsbereich) für das gesamte Jahr sowie für Winter und Sommer mit (RCP2.6) und ohne Klimaschutz (RCP8.5) für Mitte Jahrhundert (2055 – 2065) und gegen Ende Jahrhundert (2080 – 2090) im Vergleich zur Referenzperiode (1990 – 2000). Untersucht wurden die alpinen Flüsse Inn, Kander, Landwasser und Lonza und die Mittelland- und Juraflüsse Birs, Broye, Eulach, Ergolz, Rietholzbach und Suze. In allen Flüssen werden die Wassertemperaturen weiter ansteigen.



Quelle: Michel et al. (i. E.)

Hohe Wassertemperaturen erschweren auch die Kühlwassernutzung: Einerseits wird bei steigenden Wassertemperaturen die nutzbare Temperaturdifferenz kleiner, was durch höhere Kühlwasserentnahmen kompensiert werden muss. Andererseits ist das Rückleiten von erwärmtem Kühlwasser in Fliessgewässer oberhalb einer Gewässertemperatur von 25 °C nicht mehr erlaubt.[4]

In Zukunft weitere starke Zunahme der Wassertemperatur

Im Mittelland und in den Alpen wird die mittlere Jahrestemperatur der Fliessgewässer in Zukunft weiter ansteigen. Für ein Szenario mit konsequentem Klimaschutz berechnen die Modelle bis Mitte Jahrhundert eine weitere Erwärmung um 0,85 °C. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts ist bei diesem Szenario kein weiterer signifikanter Temperaturanstieg mehr zu erwarten (Michel et al. i. E.). Anders bei einem Szenario ohne Klimaschutz: Bis Mitte Jahrhundert sagen die Modelle eine Erwärmung um 2,1 °C im Mittelland und um 1,6 °C in alpinen Gewässern voraus, bis Ende des Jahrhunderts steigen diese Werte auf 3,2 °C in allen Fliessgewässern (Abbildung 6-18). Diese Erwärmung entspricht einer Fortsetzung der beobachteten Trends der vergangenen Jahrzehnte (Michel et al. i. E.).

Bei den saisonalen Wassertemperaturen ist der Unterschied zwischen Alpen und Mittelland/Jura ausgeprägter als bei den mittleren Jahrestemperaturen. Im Winter werden sich die Fliessgewässer des Mittellands stark erwärmen, ohne Klimaschutz um über 3 °C bis gegen Ende des Jahrhunderts. In den Alpen steigen die Wassertemperaturen im Winter nur ungefähr um 1 °C, obwohl die Lufttemperatur ohne Klimaschutz um 4 °C ansteigt. Die Abflüsse stammen dort im Winter hauptsächlich aus dem Grundwasser oder aus der zunehmenden Schneeschmelze, welche kühlend wirken.

Im Sommer werden sich die Fliessgewässer weiter erwärmen: ohne Klimaschutz bis Mitte Jahrhundert bereits um ungefähr 2,5 °C im Mittelland und 3,6 °C in den Alpen, bis Ende des Jahrhunderts sogar um 3,1 bis 6,1 °C im Mittelland und 4,1 bis 8,1 °C in den Alpen. Ausschlaggebend ist neben dem Anstieg der Lufttemperatur, dass die Sommerniederschläge und -abflüsse zurückgehen werden und besonders in den alpinen Gebieten der kühlende Schmelzwasseranteil abnimmt. Auch wird sich in den Alpen der Boden infolge des früheren Abschmelzens der Schneedecke stärker erwärmen. Deshalb steigen in den alpinen Gewässern die Wassertemperaturen sogar noch stärker an als die Lufttemperatur.

Die Einzugsgebietsgrösse der untersuchten Gewässer hat keinen Einfluss auf die berechnete Temperaturerhöhung. Allerdings liegen für sehr kleine Fliessgewässer weder Temperaturmessungen noch Szenarien für die Zukunft vor. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass die Temperaturzunahme in sehr kleinen Fliessgewässern anders verläuft und eventuell noch stärker ist. Auch grosse Mittellandflüsse direkt unterhalb der grossen Seen wurden nicht betrachtet; hier wird die Temperatur massgeblich vom ausfliessenden Seewasser beeinflusst. Da sich das Oberflächenwasser in den Seen im Sommer ohne Klimaschutz bis Ende Jahrhundert um 3 bis 4 °C erwärmen wird (Kapitel 6.7.2), dürfte die Erwärmung in den Ausflüssen ähnlich sein.

6.7.2 Seen

Oberflächen- und Tiefenwasser der Seen sind in den letzten Jahrzehnten wärmer geworden, die winterliche Eisbedeckung hat abgenommen und die stabile Wasserschichtung im Sommer dauert länger an. Mit dem Klimawandel wird sich diese Entwicklung fortsetzen. In der Folge werden sich zum Teil auch die ökologisch wichtigen Mischungsverhältnisse der Seen verändern.

Die Wassertemperatur in Seen hängt von der Sonneneinstrahlung, der lokalen Lufttemperatur, der Wassertemperatur der Zuflüsse und der Häufigkeit von Extremen wie Hitzewellen, Sturm oder Hochwasser ab und wird durch die Morphologie und die Trübung des Sees zusätzlich beeinflusst. Die Temperaturverteilung innerhalb eines Sees ist nicht homogen. Im Sommerhalbjahr weisen Seen eine stabile thermische Schichtung auf, mit wärmerem Wasser in der einige Meter dicken Oberflächenschicht und kälterem Tiefenwasser (Sommerstagnation).

Nur wenn sich die Temperatur und damit die Dichte von Oberflächenwasser und Tiefenwasser angleichen, können sich die beiden Wasserschichten durchmischen. Diese Zirkulation beeinflusst die Wärme- und Stoffverteilung

4 Ausnahmen sind unter gewissen Voraussetzungen möglich, vgl. Anh. 3.3 Ziff. 21 Abs. 4 Bst. b GSchV.

innerhalb eines Sees. Die Häufigkeit und Intensität der Durchmischung des Wasserkörpers ist für die Seeökologie entscheidend, da nur dann ein Ausgleich der Stoffkonzentrationen (Nährstoffe, Sauerstoff und Schadstoffe) zwischen Tiefenwasser und Oberflächenwasser stattfinden kann (Kapitel 6.9.1).

Aufgrund der Dichteanomalie von Wasser gibt es thermisch bedingte Stagnationen auch im Winter. Eine Winterstagnation ist dann erreicht, wenn die Temperatur des Oberflächenwassers unter 4 °C sinkt, die Dichte abnimmt und das kalte Oberflächenwasser nicht mehr absinken kann. Die Tiefenschicht bildet sich dann aus maximal 4 °C warmem Wasser. Diese inverse Temperaturverteilung ist Voraussetzung für die Eisbildung.

Bereits erwärmte oberste Wasserschicht
Die mittlere Erwärmung der obersten Wasserschicht von Schweizer Seen in den letzten Jahrzehnten liegt bei ungefähr 0,4 °C pro Jahrzehnt und etwa 2 °C von 1960 – 2010 (Råman Vinnå et al. 2021), und es wurden Veränderungen in der Durchmischung beobachtet. So ergab sich beispielsweise durch Hitzewellen wie im Sommer 2003 eine verstärkte und verlängerte Sommerstagnation. Milde Winter wie in den Jahren 2006 und 2007 verhinderten in manchen Seen die saisonale Durchmischung bis ins Tiefenwasser. Das komplette Zufrieren von Schweizer Seen hat seit den 1960er-Jahren besonders im Mittelland stark abgenommen (Hendricks Franssen und Scherrer 2008).

Weitere starke Erwärmung
Die zukünftige Entwicklung der Temperatur- und Schichtungsverhältnisse wurde für 29 Seen modelliert (Abbildung 6-19). Bei allen Seen wird ein weiterer Anstieg der Temperatur der obersten Wasserschicht (bis 1 m Wassertiefe) erwartet: mit einem Szenario ohne Klimaschutz in den meisten Seen zwischen 3 und 4 °C bis gegen Ende des Jahrhunderts, mit konsequentem Klimaschutz nur um knapp 1 °C. Der Unterschied zwischen den untersuchten Seen ist bei der Oberflächentemperatur gering. Die Entwicklung ist derjenigen in den Fliessgewässern sehr ähnlich.

Einfluss des Klimawandels auf die Temperaturen von Fliessgewässern und Seen: Wie entwickeln sich die Wassertemperaturen der Schweizer Fliessgewässer und Seen in Zukunft?

Vorgehen
Mit den Modellen Snowpack/Alpine3D (Lehning et al. 2006) und StreamFlow (Gallice et al. 2016) wurden Temperaturszenarien für sechs Fliessgewässer im Schweizer Mittelland (Birs, Broye, Eulach Ergolz, Rietholzbach und Suze) und vier in den Alpen (Inn, Kander, Landwasser, Lonza) beispielhaft berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-18 zusammenfassend dargestellt. Aufgrund der langen Rechenzeiten konnten sieben RCP8.5- und vier RCP2.6-Klimaprojektionen für eine verkürzte Referenzperiode (1990 – 2000) sowie zwei Zehnjahresperioden (2055 – 2065 und 2080 – 2090) in der Zukunft betrachtet werden.

Die Temperaturen und Mischungsprozesse in 29 Seen wurden mit dem eindimensionalen physikalischen Seemodell Simstrat kontinuierlich für die Jahre 1981 bis 2099 für die drei Szenarien mit konsequentem Klimaschutz (RCP2.6), mittlerem Klimaschutz (RCP4.5) und ohne Klimaschutz (RCP8.5) berechnet. Die ausgewählten Seen decken den Höhenbereich von 200 m ü. M. bis 1800 m ü. M. ab und umfassen Seen mit Volumen von 0,004 bis 89 km^3.

Kapitel 6.7.1 und 6.7.2 basieren hauptsächlich auf den Ergebnissen des Projekts.

Hydro-CH2018-Projekt des Kryosphärenlabors der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL), der Forschungsgruppe Angewandte Systemanalyse des Wasserforschungsinstituts Eawag und des Instituts für Erdoberflächendynamik der Universität Lausanne

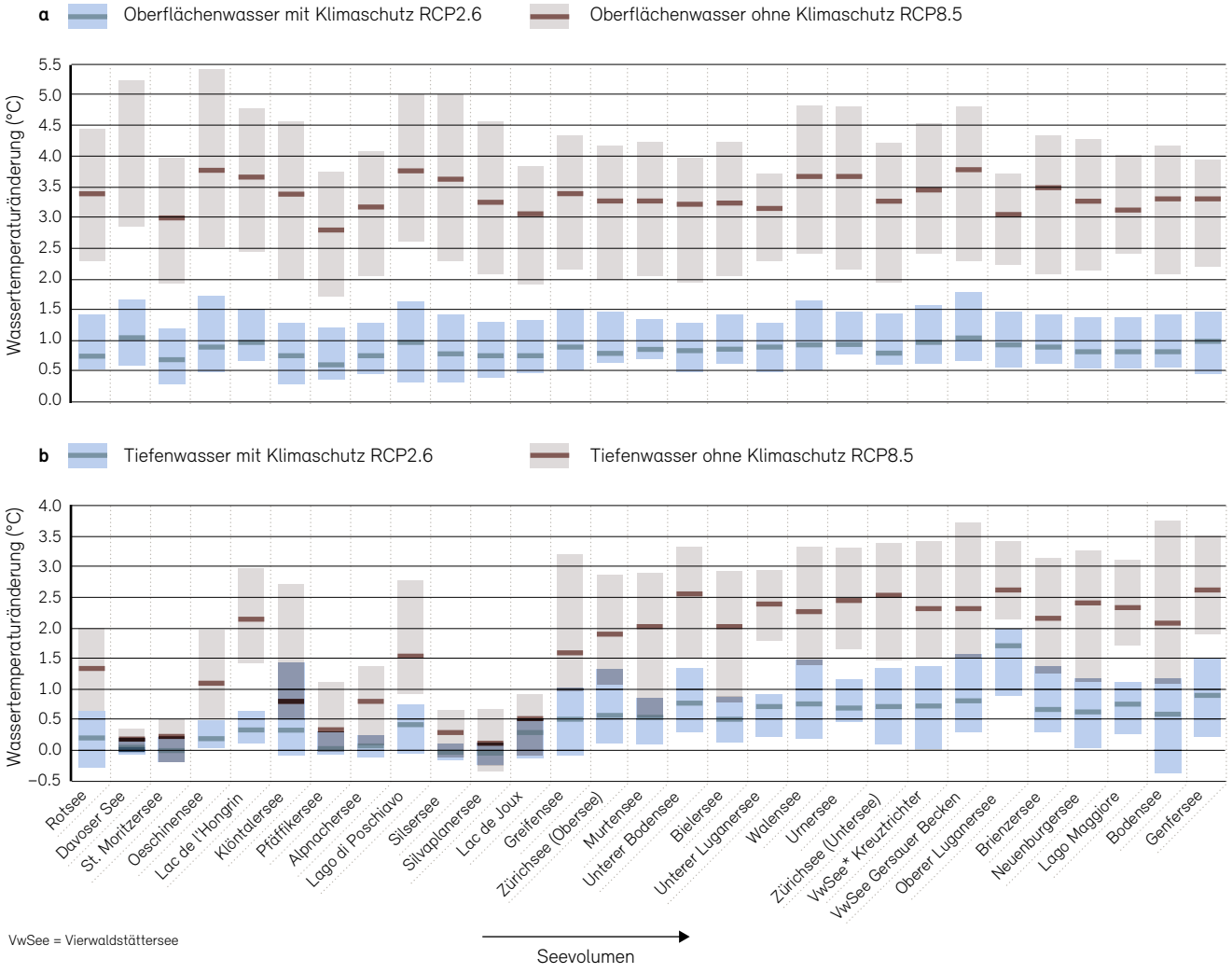
Mit grösseren Unterschieden zwischen den Seen ist bei der Erwärmung des Tiefenwassers zu rechnen. Solange sich kleine oder hoch gelegene Seen im Winter bis in der Tiefe auf 4 °C abkühlen, wird nur ein geringer Anstieg der Tiefenwassertemperatur erwartet. Bei grösseren Seen zeigen die Modelle bis Ende des Jahrhunderts ohne Klimaschutz eine Erwärmung des Tiefenwassers um 1,5 bis 2,5 °C. Die unterschiedliche Erwärmung des Tiefenwassers kann durch die unterschiedlichen Auswirkungen des Klimawandels auf das Mischungsverhalten erklärt werden (siehe unten).

Mischungsverhalten der Seen verändert sich

Infolge der veränderten Wassertemperaturen ändert sich das Mischungsverhalten der Seen in mehrfacher Hinsicht: Die stabilen Schichtungsverhältnisse im Sommer verlängern sich. Winterstagnationen treten hingegen weniger

Abb. 6-19: Wassertemperaturszenarien für 29 Schweizer Seen

Dargestellt sind die modellierten Veränderungen der Wassertemperaturen (Median und Unsicherheitsbereich) Ende des Jahrhunderts (2071 – 2099) an der Oberfläche (a) (bis 1 m Wassertiefe) sowie am Seegrund (b) (1 m über dem Grund) gegenüber der Referenzperiode (1981 – 2010). Betrachtet wurden die Szenarien mit (RCP2.6) und ohne Klimaschutz (RCP8.5). Die Seen sind nach Seevolumen geordnet. Die Temperaturen des Oberflächenwassers werden in allen Seen ansteigen. Beim Tiefenwasser ist die Erwärmung abhängig vom Mischungs-



Quelle: eigene Darstellung basierend auf Råman Vinnå et al. (2021)

häufig auf, und auch die Bildung und Dauer von Eisbedeckungen gehen zurück (Abbildung 6-20).

Seen, welche sich zweimal pro Jahr durchmischen (im Herbst und Frühling) und dazwischen eine Winter- und Sommerstagnation ausbilden, werden einem dimiktischen Regime zugeordnet. Auf solchen Seen, die heute im Winter eine Eisdecke ausbilden, tritt bei einer stetigen Erwärmung des Klimas zunächst keine Eisbedeckung mehr auf. Anschliessend verschwindet die Winterstagnation, und der See mischt sich nur noch einmal, wird also monomiktisch. Bei einer weiteren Erwärmung des Sees kann – je nach dessen Eigenschaften wie z. B. Tiefe und Windexposition – eine vollständige Mischung weiterhin jährlich auftreten, nur noch alle paar Jahre erfolgen (oligomiktisch) oder im Extremfall, wenn eine zusätzliche Stabilisierung der Wassersäule durch gelöste Substanzen entsteht, ganz ausbleiben (meromiktisch).

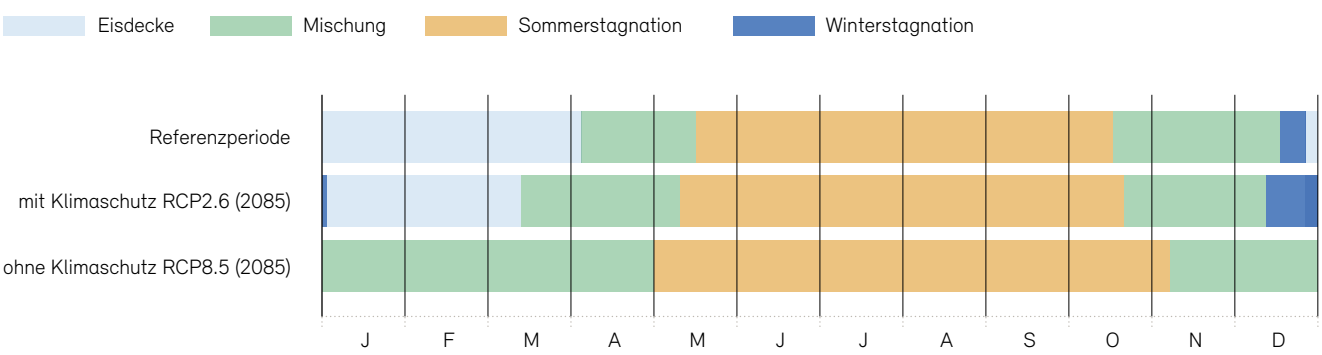
Wie sich das Mischungsverhalten von Seen verändert, hängt einerseits von ihrer Höhenlage, aber auch von den weiteren Eigenschaften wie der Seemorphologie oder der Windexposition ab. Seen in höheren Lagen (z. B. Silvaplanersee), aber auch kleine Seen in tiefen Lagen (z. B. Alpnachersee), bleiben in allen Klimaszenarien dimiktisch, allerdings bei deutlich verkürzter Winterstagnation und verminderter oder ausbleibender Eisbedeckung. Aufgrund des unveränderten Mischungsregimes ergeben sich in diesen Seen auch nur geringe Zunahmen der Tiefenwassertemperaturen. Der Eisverlust kann bei solchen Seen allerdings dazu führen, dass die Verlängerung der Sommerschichtung und die Erwärmung der Oberflächenschicht grösser ausfallen, als allein aufgrund der erhöhten Lufttemperatur zu erwarten wäre.

Mittelgrosse, heute regelmässig eisbedeckte Seen in mittleren Höhenlagen, wie der Lac de Joux (Abbildung 6-20) oder der Klöntalersee, werden je nach Klimaszenario ganz oder teilweise monomiktisch und zumindest im Szenario ohne Klimaschutz ihre Eisbedeckung weitgehend verlieren. Ähnliches gilt auch für mittelgrosse Seen in tieferen Lagen wie den Pfäffikersee, die aber bereits heute nie oder nur selten eine Eisdecke ausbilden. Im Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) ergeben die Modellrechnungen für sieben von acht dimiktischen Seen in ferner Zukunft eine Verschiebung in ein monomiktisches Regime. Im Szenario mit konsequentem Klimaschutz (RCP2.6) sind nur drei von acht Seen betroffen.

Grössere Seen in tiefen Lagen sind bereits heute monomiktisch oder oligomiktisch und werden weitgehend in diesem Zustand verbleiben. Ihre Tiefenwassertemperatur wird aber stärker zunehmen als bei den dimiktischen Seen. Interessanterweise zeigen die Modellrechnungen für die meisten

Abb. 6-20: Veränderung der saisonalen Schichtung und Eisbedeckung am Lac de Joux

Dargestellt sind die modellierten Mediane des Auftretens von Eisbedeckung, Mischung und Sommer- und Winterstagnation im Jahresverlauf für die Referenzperiode (1981 – 2010) und Szenarien mit (RCP2.6) und ohne Klimaschutz (RCP8.5) bis Ende Jahrhundert (2071 – 2099). Mit Klimaschutz nimmt die Dauer der Eisbedeckung ab, ohne Klimaschutz bildet sich im Winter kein Eis mehr auf dem See. Die Dauer der Sommerstagnation verlängert sich besonders beim Szenario ohne Klimaschutz um etwa 40 Tage. Ohne Klimaschutz wechselt der See von einem dimiktischen

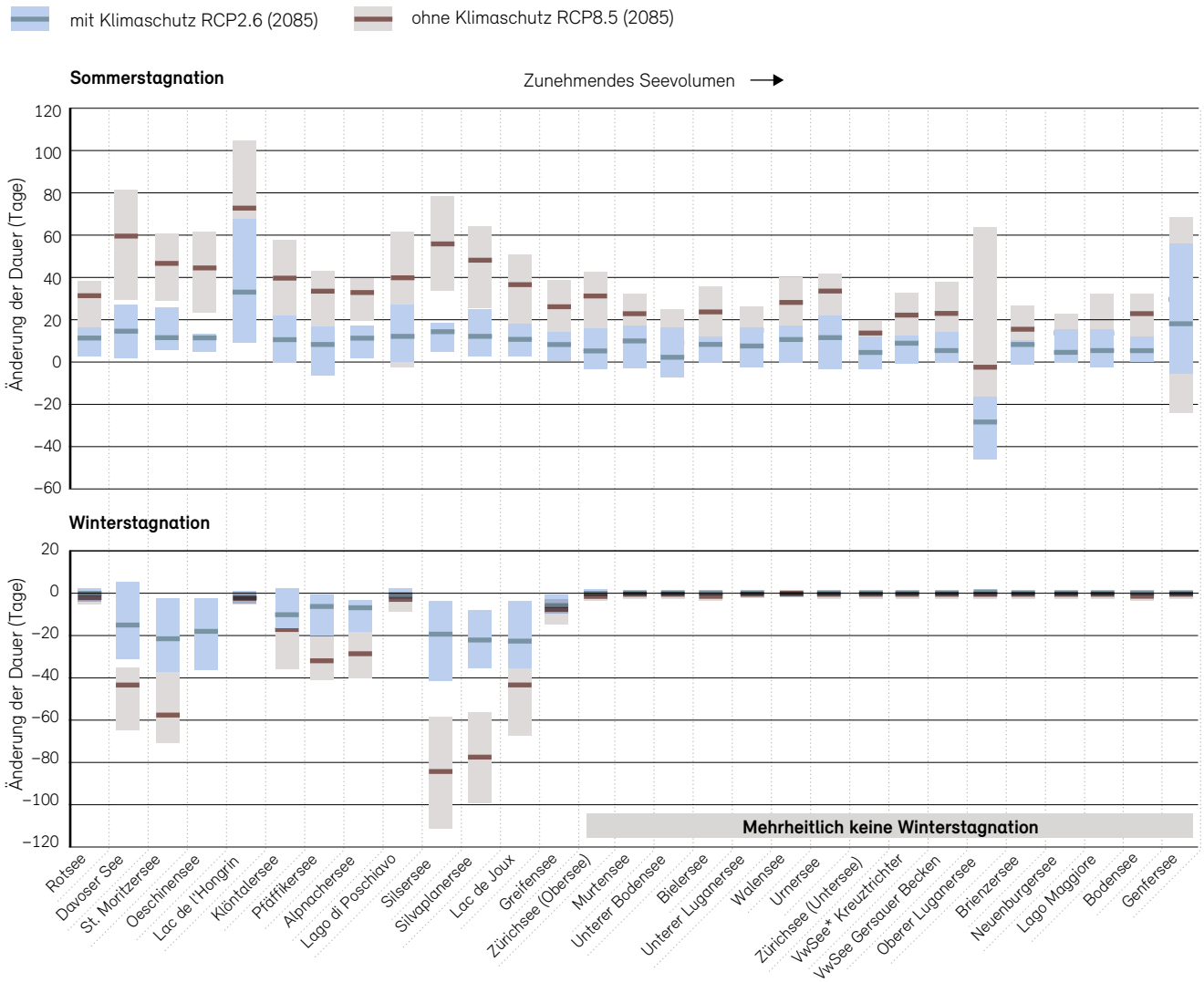


Quelle: eigene Darstellung basierend auf Råman Vinnå et al. (2021)

dieser Seen keine deutliche Veränderung der Mischungshäufigkeit. Die Unsicherheit bei der Vorhersage für die Tiefe und Häufigkeit der Mischung ist bei Seen im Grenzbereich zwischen monomiktisch und oligomiktisch aber vergleichsweise gross. Bei einzelnen Seen wurde eine Abnahme der Mischung in den letzten Jahrzehnten bereits beobachtet (z. B. Zürichsee; North et al. 2014), bei anderen hingegen nicht (z. B. Genfersee, Schwefel et al. 2016). Beim Bodensee wurde zwar in besonders warmen Wintern eine verminderte Mischung beobachtet (Straile et al. 2010), aber kein klarer Trend über 30 Jahre (Rhodes et al. 2017). Eine weniger häufige Durchmischung vermindert die Sauerstoffzufuhr ins Tiefenwasser, was erhebliche ökologische Folgen nach sich zieht (Kapitel 6.9.1). Es ist deshalb wichtig, die Entwicklung von Mischungstiefe und -häufigkeit in diesen Seen genau zu beobachten (Gaudard et al. 2019).

Abb. 6-21: Änderung der Dauer der Sommer- und Winterstagnation in 29 Schweizer Seen

Dargestellt sind Median und Unsicherheitsbereich für die Änderung der Dauer von Sommer- (oben) und Winterstagnation (unten) für die 29 untersuchten Seen (nach Seevolumen geordnet). Betrachtet wurden die Szenarien mit (RCP2.6) und ohne Klimaschutz (RCP8.5) für Ende des Jahrhunderts (2071 – 2099) gegenüber der Referenzperiode (1981 – 2010). Während generell die Dauer der Sommerstagnation zunimmt, verringert sich die Dauer der Winterstagnation. Die simulierten Veränderungen sind in kleineren Seen grösser. Für Seen, bei welchen sich im Modell bereits in der Referenzperiode mehrheitlich keine Winterstagnation ergibt, wird in Zukunft keine Änderung erwartet.



Quelle: eigene Darstellung basierend auf Michel et al. (i. E.).

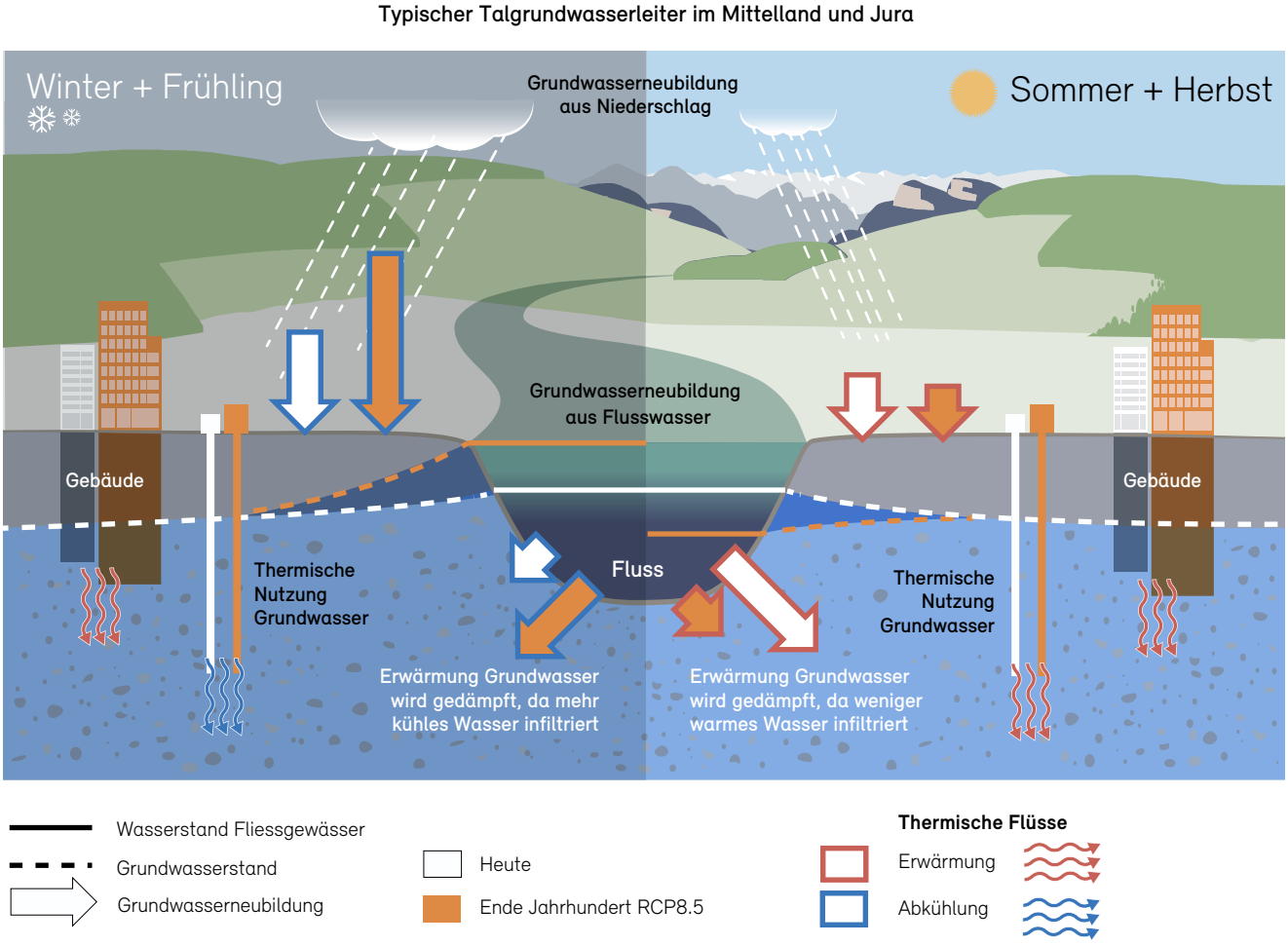
6.7.3 Grundwasser

Schweizweit ist beim Grundwasser – im Gegensatz zu den Oberflächengewässern – noch keine eindeutige Erwärmung feststellbar. Hingegen hat die Temperatur des Grundwassers in urbanen Gebieten durch den menschlichen Einfluss bereits stark zugenommen. Auch in Zukunft wird es grosse lokale Unterschiede der Grundwassertemperatur geben.

Die Temperatur des Grundwassers reagiert viel träger auf klimatische Veränderungen als jene der Oberflächengewässer. Sie unterscheidet sich örtlich und zeitlich und ist abhängig von der Jahresmitteltemperatur der Luft, von hydrogeologischen Bedingungen, von Prozessen der Grundwasserneubildung und von anthropogenen Beeinflussungen. Wird oberflächennahes Grundwasser aus Niederschlag gebildet, bestimmen die Temperatur von Luft, Niederschlag und Boden die Grundwassertemperatur. Bei der Neubildung durch infiltrierendes Flusswasser wird sie massgeblich von dessen Temperatur geprägt. Weiter wird die Grundwassertemperatur durch die thermische Nutzung (Wärme- oder Kälteentzug) und

Abb. 6-22: Wärme- und Kälteflüsse ins Grundwasser

Dargestellt sind Wärme- und Kälteflüsse im Zuge der Grundwasserneubildung für mittlere und kleine Grundwasserleiter in den Tälern der tieferen Lagen der Schweiz, wie z. B. entlang der Birs, der Suze oder der Eulach. Im Winter wird die Grundwasserneubildung von kühlem Wasser zunehmen, im Sommer die von warmem Wasser abnehmen. Diese negativen Rückkopplungseffekte verzögern den Anstieg der Grundwasser-



Quelle: eigene Darstellung nach Epting et al. (2020)

die Wärmeabstrahlung von grundwassernahen Bauten in urbanisierten Regionen massgeblich anthropogen beeinflusst (Epting et al. 2017).

Verzögerter Anstieg im Vergleich zur Lufttemperatur
In der Periode 2000 – 2016 zeigt knapp die Hälfte von 65 über die Schweiz verteilten Messstellen der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA einen Anstieg der Grundwassertemperaturen. Nur an wenigen Messstellen wurde eine Abkühlung gemessen (Schürch et al. 2018). Allerdings ist der Untersuchungszeitraum von 15 Jahren kurz. Die von den Klimaszenarien prognostizierte Zunahme der mittleren Jahreslufttemperatur wirkt sich mit Verzögerung auch auf die Grundwassertemperaturen aus. Je tiefgründiger und mächtiger ein Grundwasservorkommen ist, umso langsamer reagiert es. Abgeschwächt wird der Erwärmungstrend allerdings dadurch, dass die Grundwasserneubildung vermehrt in kühleren Jahreszeiten stattfinden wird. Dies gilt auch für die Grundwasserneubildung aus Fliessgewässern, denn infolge der erwarteten sommerlichen Abflussabnahme wird ein grösserer Anteil der Infiltration im Winter stattfinden. Hinzu kommt ein zunächst höherer Anteil an Schmelzwasser (Epting et al. 2020). Wie stark diese negativen Rückkopplungseffekte der Erwärmung entgegenwirken bzw. diese abdämpfen können, hängt überwiegend von lokalen Gegebenheiten, wie Höhenlage, Art der Grundwasserneubildung etc., ab (Abbildung 6-22).

Temperaturentwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen: Welches sind die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Temperaturentwicklung von Grundwasservorkommen und wie entwickelt sich die Grundwassertemperatur in Zukunft?

Vorgehen
Für 35 Grundwasserleiter in fünf Regionen in der Schweiz (Basel-Stadt, Basel-Landschaft, Biel, Winterthur und Davos) wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung und die Temperatur genauer untersucht und repräsentative Schlüsselparameter abgeleitet (z. B. Aquifergeometrien, Speichereigenschaften, Grundwassererneuerungsraten und -verweilzeiten). Einerseits wurde mit zeitlich und räumlich hochaufgelösten 3D-Wärmetransportmodellen Grundwasservorkommen im urbanen Raum modelliert. Andererseits wurde in Kooperation mit der EPFL und dem Modell Alpine3D die Niederschlags- und Abflussentwicklung sowie die Entwicklung der Temperaturen für die drei Emissionsszenarien konsequenter Klimaschutz (RCP2.6), mittlerer Klimaschutz (RCP4.5) sowie ohne Klimaschutz (RCP8.5) für die 35 Grundwasserleiter evaluiert. Die Auswertungen ermöglichten es, die Sensitivität von Grundwassertemperaturen in Zusammenhang mit den wesentlichen Grundwasserneubildungsprozessen für unterschiedliche Emissionsszenarien der Zukunft zu beschreiben.

Hauptergebnisse
- 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.
- Bei urbanen und flachgründigen Grundwasservorkommen mit geringen Mächtigkeiten, wie z. B. in Davos, ist damit zu rechnen, dass die Grundwassertemperaturen stärker beeinflusst werden. Dagegen sind Veränderungen der Grundwassertemperaturen 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.

Die Aussagen über die Zukunft in Kapitel 6.4 und 6.7.3 basieren auf den Ergebnissen des Projekts.

Starke Zunahme der Grundwassertemperaturen im urbanen Gebiet

In urbanen Gebieten werden auch in Zukunft die direkten anthropogenen Einflüsse die Grundwassertemperatur dominieren (Epting und Huggenberger 2013). So zeigen Daten verschiedener Messstellen in Basel, dass die Grundwassertemperatur allein im Zeitraum von 1993 bis 2016 im Mittel um 3,0 ± 0,7 °C angestiegen ist. In stark urbanen Gebieten erreichte das Grundwasser Temperaturen von bis zu 18 °C (Epting et al. 2020 und 2021). Infolge des Klimawandels steigt vor allem in städtischen Gebieten der Kühlbedarf von Haushalten, Industrie und Gewerbe, weshalb eine vermehrte thermische Nutzung des Untergrundes besonders für die Kühlung zu erwarten ist. Hinzu kommt die Abwärme von Untergrundstrukturen, die durch die Ausdehnung der Siedlungsfläche ebenfalls zunehmen wird. Dies wird zu einer weiteren Erhöhung der Grundwassertemperaturen in den Städten führen.

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Gewässertemperatur»

- Epting J. et al. 2020. Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen.
- Michel A. et al. (i. E.): Water temperature in lakes and rivers. Hydro-CH2018 report.
- Michel A. et al. 2019: Stream temperature evolution in Switzerland over the last 50 years.
- Råman Vinnå L et al. 2021: The vulnerability of lakes along an altitudinal gradient to climate change.

6.8 Wasserinhaltsstoffe

Der Klimawandel verändert den Transport von Schad- und Nährstoffen und ihre Konzentration in den Gewässern. Die Verfügbarkeit und der Transport von Sedimenten nehmen vor allem im Hochgebirge zu.

6.8.1 Schad- und Nährstoffe

Durch die Erwärmung werden biochemische Reaktionen beschleunigt, wodurch sich auch Schadstoffe grundsätzlich schneller abbauen. Allerdings können zunehmende Starkniederschläge und Trockenheit auch zu erhöhten Einträgen von Schad- und Nährstoffen in die Gewässer und zu höheren Konzentrationen führen.

Oberflächengewässer und Grundwasser enthalten gelöste oder suspendierte Stoffe. Bei den für die Wasserqualität problematischen Schad- und Nährstoffen dominieren heute die punktuellen Einträge aus der Siedlungsentwässerung und die diffusen Einträge aus der Landwirtschaft, den Siedlungen und dem Verkehr. Der Klimawandel beeinflusst sowohl die anthropogenen Quellen als auch die in der Umwelt und in den Gewässern ablaufenden biologischen, chemischen und physikalischen Transport- und Umwandlungsprozesse.

Veränderung von Nähr- und Schadstoffquellen

Bezüglich Nähr- und Schadstoffquellen ist zu erwarten, dass der Klimawandel diese vor allem indirekt durch Anpassungsmassnahmen der Landwirtschaft beeinflussen wird. Die Vegetationsperiode verlängert sich, andere Kulturen und Sorten werden angebaut, die Bewässerung wird zunehmen und Schadorganismen und Pflanzenkrankheiten werden sich verändern. Damit sind auch Auswirkungen auf die eingesetzten Pflanzenschutzmittel und die Düngepraxis verbunden. Ebenfalls starken Einfluss auf die Nähr- und Schadstoffquellen haben regulatorische Massnahmen, z. B. bei der Zulassung von Stoffen, die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und die Landwirtschaftspolitik.

Beschleunigung biochemischer Reaktionen

Schad- und Nährstoffe werden auf der Pflanze, im Boden und im Grundwasser ab- und umgebaut. Diese Prozesse erfolgen biologisch durch Mikroorganismen oder mittels chemischer Reaktionen. Biochemische Reaktionen

werden durch die Temperatur sowie die Verfügbarkeit von Wasser und Sauerstoff beeinflusst. Eine Temperaturerhöhung um 2 bis 4 °C beschleunigt die Reaktionen typischerweise um 10 bis 40 % (Davidson und Janssens 2006), solange das Temperaturoptimum der beteiligten Mikroorganismen nicht überschritten wird. Eine Zunahme der Bodenfeuchte begünstigt ebenfalls schnellere Reaktionen im Boden, solange der Boden nicht zu nass ist und noch genügend Sauerstoff enthält (Schlesinger et al. 2015). Die Temperaturerhöhung und der höhere CO_2-Gehalt in der Atmosphäre beschleunigen zudem das Pflanzenwachstum, erhöhen die Nährstoffaufnahme und fördern die Aktivität von Bodenbakterien (Hagedorn et al. 2018).

Tendenziell wird der Klimawandel also den Ab- und Umbau von Schad- und Nährstoffen im Boden und im Grundwasser beschleunigen. Generell wirkt sich ein schnellerer Schadstoffabbau positiv auf die Gewässerökologie aus, ausser es entstehen problematische, hochmobile Abbauprodukte, die beschleunigt in die Gewässer gelangen. Während die Beschleunigung der Abbauprozesse in der kalten Jahreszeit eindeutig ist, wird sie im Sommer durch die erwartete Abnahme der Bodenfeuchte und häufigere Trocken- und Hitzeperioden gebremst (Schlesinger et al. 2015). Diese Abschwächung variiert stark zwischen Regionen, Böden und Landnutzung (Benateau et al. 2019).

Klimawandel erhöht Transport von Stoffen in die Gewässer

Die infolge des Klimawandels erwartete Zunahme von Starkniederschlägen wird zu mehr Oberflächenabfluss, präferenziellem Wasserfluss im Boden und Bodenerosion führen. Viele Pflanzenschutzmittel oder Phosphor aus der Landwirtschaft, aber auch erodierte Bodenpartikel, Mikroplastik aus Reifenabrieb und andere Schadstoffe von Strassen und versiegelten Flächen werden durch diese hydrologischen Prozesse verstärkt in die Gewässer eingetragen. Der Klimawandel erhöht also den Transport natürlicher Partikel sowie von Schad- und Nährstoffen.

Ein weiterer problematischer Stoff, insbesondere für das Trinkwasser, ist Nitrat. Überschüssiges Nitrat, das die Pflanzen während der Vegetationsperiode nicht aufnehmen, wird vor allem im Winter mit der Grundwasserneubildung aus dem Boden ins Grundwasser eingetragen. Mit zunehmender Grundwasserneubildung im Winter wird sich also auch die Möglichkeit des Nitrattransports erhöhen. Im Gebiet der Broye wird beispielsweise bei einem Szenario ohne Klimaschutz im Winter eine Zunahme der Nitratauswaschung ins Grundwasser um 44 % erwartet, im Sommer würde die Nitratauswaschung gemäss dieser Studie hingegen um 25 % abnehmen (Zarrineh et al. 2020). Während die Zunahme der Nitratauswaschung im Winter unbestritten ist, ist dies im Sommer weniger eindeutig. Solange die landwirtschaftlichen Kulturen alles Nitrat aufnehmen können, wird es nicht ausgewaschen. Je nach Bewirtschaftung könnte die Nitratauswaschung aber auch im Sommer zunehmen, wenn z. B. infolge zunehmender Trockenheit die Anbauperiode kürzer wird oder die Produktivität abnimmt, wodurch die Pflanzen weniger Nitrat aufnehmen. Dann läge auch im Sommer überschüssiges Nitrat im Boden vor, das entweder schon im Sommer bei Starkniederschlägen ausgewaschen werden könnte oder dann später im darauffolgenden Herbst und Winter (Hunkeler et al. 2020).

Schlechtere Verdünnung bei Niedrigwasser

Da im Spätsommer und Herbst die Abflüsse stark zurückgehen, werden in diesen Jahreszeiten besonders die Abwasserzuflüsse aus Industrie und Siedlungen weniger verdünnt. Dies führt zu höher konzentrierten Verunreinigungen der Fliessgewässer z. B. mit Mikroverunreinigungen aus Medikamenten und Kosmetika, was für viele Wasserlebewesen problematisch sein kann. Je kleiner ein Fliessgewässer ist, umso kritischer ist deshalb die Einleitung von kommunalem Abwasser für die chemische Wasserqualität. Bezüglich Mikroverunreinigungen wird der eingeleitete Ausbau von rund 140 Kläranlagen mit einer zusätzlichen Reinigungsstufe diesem Effekt entgegenwirken. Gleichzeitig erhöhen diese Einleitungen die Wasserführung, was positive Effekte auf die Gewässerökologie während Trockenperioden haben kann.

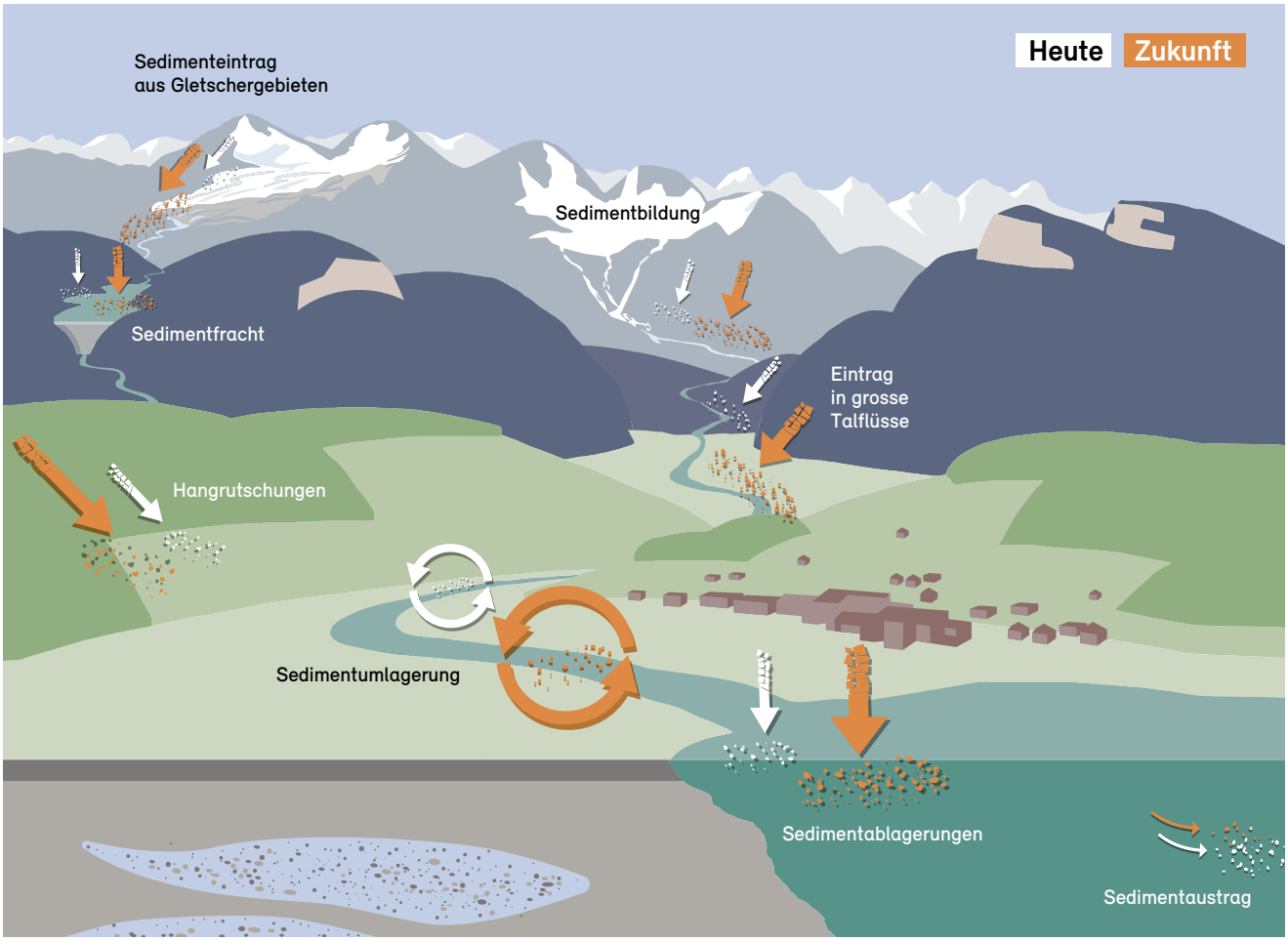
6.8.2 Sedimente

Mit dem Auftauen des Permafrosts und zunehmenden Starkniederschlägen werden in den Alpen mehr Sedimente mobilisiert. Wie sich der Sedimenttransport anschliessend in den grösseren Flüssen verändert, ist noch nicht vollständig geklärt, weil dies vor allem von der Entwicklung der Hochwasserabflüsse abhängt.

Unter Sediment versteht man Steine, Kies, Sand, Schluff und Ton, die bei erhöhtem Abfluss in einem Oberflächengewässer transportiert werden. Durch das Auftauen des Permafrosts und das Abschmelzen der Gletscher steht im Gebirge mehr Sediment zur Verfügung, welches bei einem grossen Niederschlagsereignis mobilisiert werden kann. Die zunehmenden Starkniederschläge führen zu mehr Massenbewegungen und höheren Abflüssen in den Wildbächen und somit zu einer erhöhten Erosion. Der Klimawandel führt also zu mehr Sedimentaustrag aus Wildbächen in die Talflüsse und erhöhten Sedimentablagerungen in den flacheren Talflüssen, Deltas und Seen (Abbildung 6-23). Da Sedimente von Seen zurückgehalten werden, wirkt sich der Klimawandel auf die Sedimentmengen in Flüssen unterhalb von Seen wenig aus. Durch den Sedimenteintrag kann es in Seen jedoch vermehrt zu Verlandungsproblemen kommen, was vor allem bei Stauseen problematisch ist.

Damit Sediment im Gerinne transportiert werden kann, ist ein Mindestabfluss notwendig. Je grösser und schwerer das Sediment ist, umso grösser muss auch dieser Mindestabfluss sein. Da sich die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse verändern wird, werden sich auch die Zeiten mit Sedimenttransport verändern und tendenziell im Winter zunehmen. Dies kann negative Auswirkungen auf die Fischpopulationen haben (Kapitel 6.9.2). Die Sedimentumlagerung in den Gewässern wird ebenfalls zunehmen (Speerli et al. 2020). Die grossen Sedimentmengen werden allerdings bei Hochwasserereignissen transportiert,

Abb. 6-23: Schematische Darstellung der Veränderungen des Sedimenttransports an einem beispielhaften Gewässersystem im Gebirge



Quelle: Speerli et al. (2020)

und über deren zukünftige Entwicklung bestehen einige Unsicherheiten. Es gibt jedoch Hinweise auf eine Zunahme (Kapitel 6.5).

Die Konzentration von Schwebstoffen (z. B. Schluff und Ton) in den Gewässern wird zunehmen, und es wird häufiger Schwebstofftransport stattfinden. An Schwebstoffe können jedoch Schadstoffe wie Schwermetalle oder organische Verbindungen gebunden sein und durch sie verfrachtet werden. Aber auch ohne Schadstoffe können zu hohe Schwebstoffkonzentrationen negative Auswirkungen auf die Gewässerlebewesen haben. Die Veränderungen im Schwebstofftransport haben deshalb einen direkten Einfluss auf die Wasserqualität und Gewässerökologie (Binderheim und Göggel 2007).

Der Sedimenttransport steuert die Bildung der Lebensräume in und entlang von Gewässern. Feinsedimente auf den Vorländern sind z. B. ein optimaler Nährstoffboden für Hartholzauen. Umlagerungen von Kiesbänken führen zu einer Erhöhung ihrer Wasser- und Luftdurchlässigkeit und zu neuen Lebensräumen im Gewässer (BAFU 2017b). Der Wasseraustausch zwischen Grund- und Flusswasser wird ebenfalls durch den Sedimenttransport beeinflusst. Auflandung oder Ablagerungen von Feinsediment, die eine Abdichtung der Gerinnesohle zur Folge haben, können den Wasseraustausch reduzieren, während ihn Gerinneerosion oder eine Umlagerung der Gewässersohle während Hochwasser erhöhen. Der Klimawandel und die daraus folgenden Sedimenttransportänderungen haben sowohl positive wie auch negative Auswirkungen für Wasserqualität und Gewässerökologie (BAFU 2017b).

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Sediment»

- Benateau S. et al. 2019: Climate change and freshwater ecosystems: Impacts on water quality and ecological status. Hydro-CH2018 report.
- Speerli J. et al. 2020: Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport. Hydro-CH2018 Bericht.

6.9 Gewässerökologie

Der Klimawandel verstärkt den Stress, dem die Gewässerökosysteme schon heute ausgesetzt sind. Viele Arten können sich nicht oder nur begrenzt an höhere Wassertemperaturen anpassen. Weitere Veränderungen wie das Trockenfallen von Fliessgewässerabschnitten oder veränderte Schichtungsverhältnisse in Seen können das Gleichgewicht von Ökosystemen stören. Zudem wird die Verbreitung von invasiven Arten begünstigt.

6.9.1 Auswirkungen auf Lebensräume und Ökosystem

Sowohl kurzfristige Wetterextreme als auch die längerfristigen klimatischen Entwicklungen verändern die Gewässerlebensräume und -ökosysteme. Zum Beispiel verschlechtert sich die Vernetzung der Gewässer, und die Vielfalt der Lebensräume nimmt tendenziell ab.

Quellen, Fliessgewässer, Seen, Auen- oder Feuchtgebiete beherbergen eine grosse Anzahl an Lebensräumen und Arten (BAFU 2017a). Weltweit wird in den Süsswassergewässern ein massiver Artenschwund beobachtet (IPBES 2019). Gründe dafür sind die Zerstörung der Gewässer, Gewässerkorrekturen und Verbauungen, Gewässerverschmutzung, Übernutzung, Fischfang und Jagd auf gefährdete Arten, Ausbreitung invasiver Arten sowie die Auswirkungen des Klimawandels. Die Situation in der Schweiz ist mit diesen Entwicklungen vergleichbar.

Gewässerorganismen sind an bestimmte Lebensraumbedingungen wie Gewässertemperatur, Fliessgeschwindigkeit, Wassertiefe, Struktur der Gewässer, Wasserchemie etc. angepasst. Spezialisierte Arten tolerieren dabei nur kleine Variationen in den Lebensraumbedingungen und leben in ökologischen Nischen. Generalisten sind weniger anspruchsvoll und können in einem breiten Spektrum von Lebensräumen überleben. Die hier betrachteten Gewässerorganismen sind Fische, Makroinvertebraten, also wirbellose Tiere, die grösser als ca. 1 mm sind, wie Krebse, Insekten und Weichtiere, sowie Phytoplankton (z. B. Kieselalgen, Algen oder Cyanobakterien) und Zooplankton (kleine, im Wasser freischwebende tierische Organismen).

Veränderung lokaler Lebensraumbedingungen

Der Klimawandel beeinflusst die Lebensräume und Ökosysteme in den Schweizer Gewässern in verschiede-

ner Hinsicht. Zum einen verändert er direkt die lokalen Lebensraumbedingungen, besonders durch den Anstieg der Gewässertemperatur, die jahreszeitliche Verschiebung der Abflüsse oder das veränderte Durchmischungsverhalten der Seen. Dadurch nimmt er den Organismen die Möglichkeit, lokal zu überleben, wenn zum Beispiel die neuen lokalen Bedingungen keine ökologische Nische mehr für diese Organismen bieten (Benateau et al. 2019).

Zunehmende Störungen

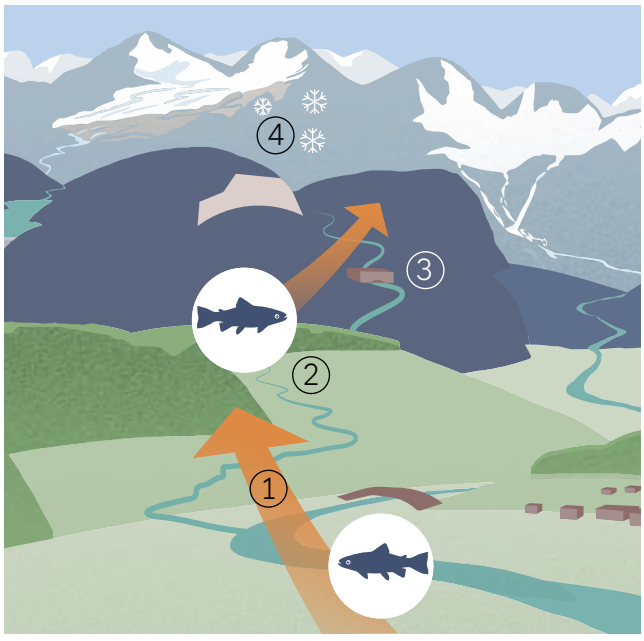
Der Klimawandel kann das Gewässerökosystem jedoch auch mit der Zunahme von kurzfristigen Störungen wie beispielsweise Hitzewellen und Trockenheit aus dem Gleichgewicht bringen. Werden bestimmte Toleranzwerte überschritten, können in manchen Fällen in kurzer Zeit drastische Veränderungen auftreten. So sind während Hitzewellen der letzten Jahre zahlreiche Gewässerabschnitte trockengefallen oder die Wassertemperaturen über die Toleranzschwelle von kälteliebenden Fischarten angestiegen (siehe auch Abbildung 6-26). Im Sommer 2003 wurde im Rhein erstmals über längere Zeit die 25°-Marke überschritten, wodurch in der Folge ein grosser Teil des Äschenbestands verendete. Auch im Sommer 2018 meldeten viele Kantone ein Fisch- und Krebssterben. Wie bei den Fischen kann sich auch bei Makroinvertebraten das Trockenfallen von Gewässerabschnitten fatal auswirken.

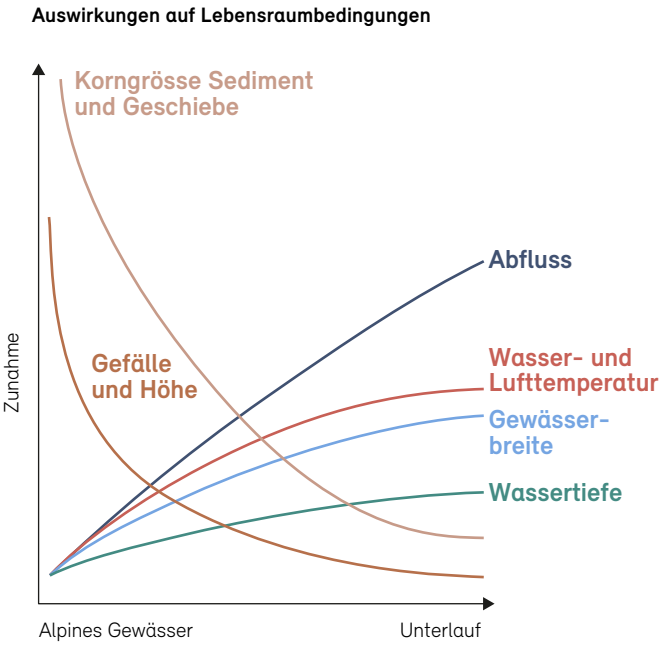
Reduktion der Vernetzung

Der Klimawandel verringert die ökologische Vernetzung entlang der Gewässer, besonders wenn Gewässer neu oder häufiger trockenfallen oder zu warm werden. Eine gute Vernetzung ist aber für das Überleben vieler Arten im Klimawandel wichtig (Altermatt et al. 2013). Wenn sich z. B. Gewässer erwärmen, werden manche Arten ihr Verbreitungsgebiet in kühlere, tendenziell höher liegende Gewässer verschieben, sofern die Gewässer vernetzt sind. Eine Verschiebung ist allerdings nur möglich, wenn in diesen Lebensräumen nicht nur die thermischen Ansprüche, sondern auch die Summe aller anderen Lebensraumansprüche erfüllt sind (Abbildung 6-24). Beispielsweise können die kälteliebenden Äschen ihren Lebensraum nicht beliebig weit in höhere Regionen verschieben, weil

Abb. 6-24: Vernetzung im Kontext veränderter Lebensraumbedingungen

Für die Verschiebung von Arten und Lebensräumen muss der Weg (1) zum höher liegenden Lebensraum (2) für sie zu bewältigen und frei von Wanderhindernissen (3) sein. Die Verschiebung ist limitiert, da sich mit steigender Höhe die Lebensraumbedingungen stark verändern (4 und





Quelle: nach Benateau et al. (2019)

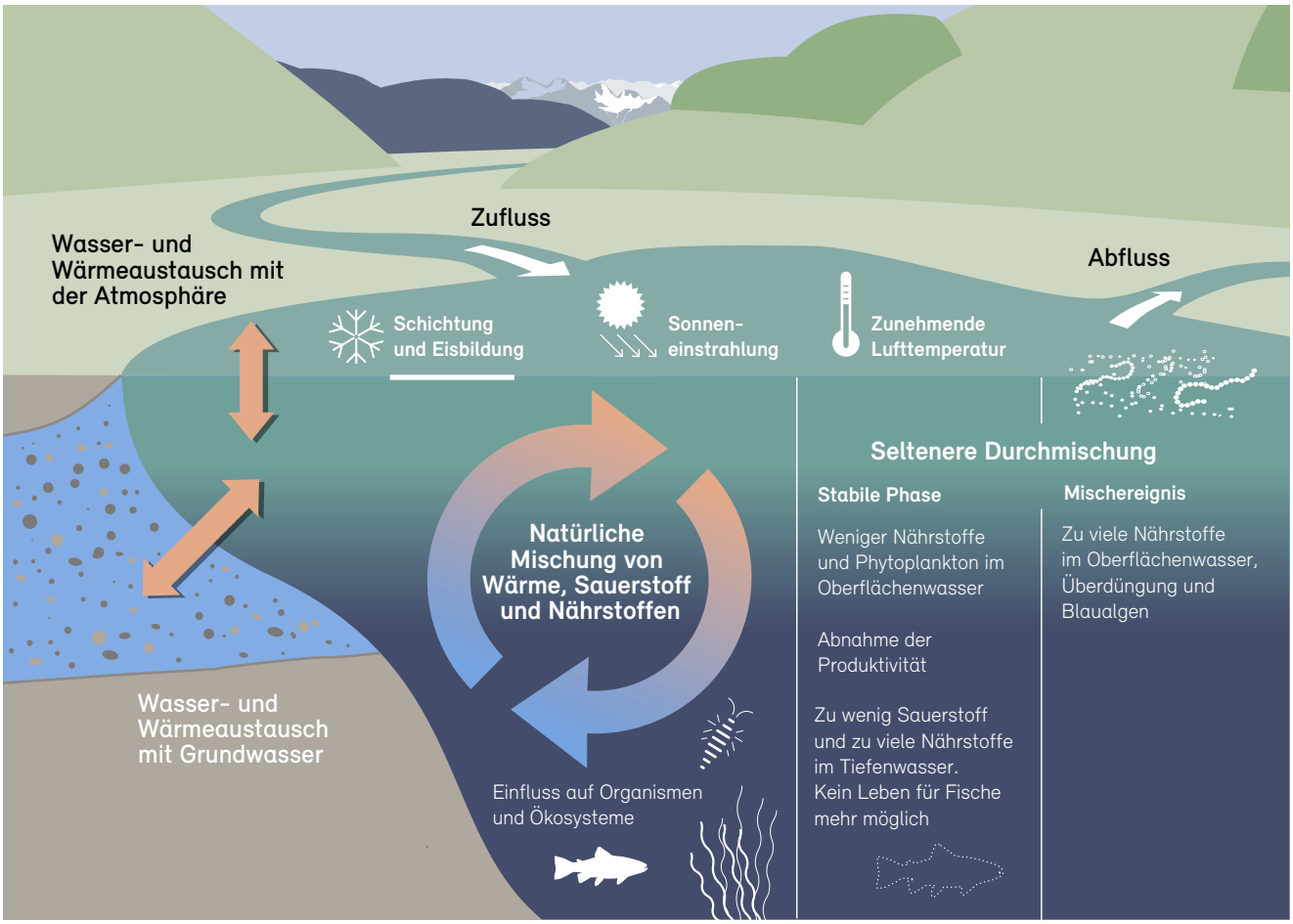
sie nicht an die Strömungsverhältnisse in schnell fliessenden Wildbächen angepasst sind. Analog können Fische in Seen nur bedingt ins kühlere Tiefenwasser ausweichen, etwa weil es dort zu wenig Futter hat. Selbst wenn einer Art ein geeigneter alternativer Lebensraum zur Verfügung steht, ist dieser nicht immer erreichbar. Einerseits kann der Weg dorthin zu weit und zu beschwerlich sein und andererseits können natürliche und künstliche Wanderhindernisse das Durchkommen behindern (Kapitel 7.3.3).

Änderung der Phänologie

Der Klimawandel verändert auch die Phänologie, also das zeitliche Auftreten bestimmter Entwicklungsprozesse im Jahresverlauf, stark (Altermatt 2010). So wird infolge der Temperaturerhöhung bereits heute ein früheres Schlüpfen von aquatischen Insekten und eine früher einsetzende Frühjahrsblüte beim Phyto- und Zooplankton beobachtet (z. B. Everall et al. 2015). Dadurch können aber die Interaktionen zwischen verschiedenen Arten innerhalb eines Ökosystems gestört werden. Ist es höher stehenden Tieren der Nahrungskette – wie etwa Fischen, Vögeln oder Säugetieren – nicht möglich, ihre Entwicklungsprozesse zeitlich an das neue Nahrungsangebot anzupassen, fehlt das notwendige Futter z. B. für die Aufzucht und Entwicklung des Nachwuchses. Solche Effekte des Klimawandels über mehrere Stufen der Nahrungspyramide hinweg sind komplex und wirken auf längerfristigen Zeitskalen (z. B. van Asch et al. 2013).

Abb. 6-25: Wichtige Prozesse in Seeökosystemen, die vom Klimawandel verändert werden können

Besonders einschneidend für die Seeökosysteme sind Veränderungen im Mischungsverhalten, also wenn sich ein See weniger häufig, weniger



Quelle: eigene Darstellung nach Gaudard et al. (2017)

Folgen für die Fliessgewässerökosysteme
In den alpinen Fliessgewässern nimmt infolge des Anstiegs der Gewässertemperatur und des Schmelzwasserrückgangs die Vielfalt der Lebensraumbedingungen insgesamt ab. Lokal, z. B. dort, wo bisher Gletscher lagen, kann die Vielfalt auch zunehmen (Benateau et al. 2019). Die Angleichung der Lebensräume erlaubt es möglicherweise Generalisten aus tieferen Lagen, diese Gewässer zu besiedeln; die bisher dort lebenden Spezialisten werden jedoch verdrängt. Lokal kann es so zu einer Zunahme der Arten kommen, regional betrachtet wird aber durch das Verschwinden vieler ökologischer Nischen und Spezialisten eine Abnahme der Biodiversität und eine Homogenisierung der Lebensräume erwartet (Brown et al. 2007). Wenn jedoch infolge des weiteren Fortschreitens des Klimawandels die Gletscher abgeschmolzen sein werden und es deshalb zu einem häufigeren Trockenfallen von alpinen Gewässerabschnitten kommt, werden auch die Generalisten beeinträchtigt (Rolls et al. 2017).

In tieferen Lagen muss zwischen kleinen und grossen Fliessgewässern unterschieden werden. Bei kleinen Fliessgewässern wird mit einem häufigeren Trockenfallen im Sommer gerechnet und damit insgesamt mit einer Abnahme der Biodiversität (Soria et al. 2017). Wie sich die Biodiversität in den grösseren Fliessgewässern verändern wird, ist noch unklar, da die Auswirkungen auf die verschiedenen Arten sehr unterschiedlich sind.

Folgen für das Seeökosystem
Das Ökosystem eines Sees ist stark durch die temperaturbedingte saisonale Schichtung des Wassers charakterisiert. In manchen Seen stabilisiert der Klimawandel diese Schichtung und führt zu verminderter saisonaler Mischung (Kapitel 6.7.2). Das reduziert den Austausch von Nährstoffen und Sauerstoff zwischen Tiefenwasser und Oberflächenwasser. Als Konsequenz kann die Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser abnehmen, was bei grossen Seen (Genfersee, Bodensee, Zürichsee, Luganersee, Lago Maggiore) bereits beobachtet wurde. Im Extremfall können Lebewesen wie z. B. Fische im betroffenen Tiefenbereich nicht mehr leben. Eine ausbleibende Durchmischung führt im Tiefenwasser zur Anreicherung mit Nährstoffen, welche nicht mehr ins Oberflächenwasser transportiert werden. Dadurch kann in nährstoffarmen Seen im Oberflächenwasser das Wachstum von Phyto- und Zooplankton abnehmen.

Tritt nach längerer Zeit der Stagnation eine Durchmischung auf, wird in kurzer Zeit nährstoffreiches Tiefenwasser an die Oberfläche gebracht, wodurch das Wachstum von Phyto- und Zooplankton stark gefördert wird. Die klimatisch verursachten Veränderungen des Nährstoffhaushalts, Sauerstoffgehalts und Planktons haben Auswirkungen auf die ganze Nahrungskette und Seeökologie. Cyanobakterien, umgangssprachlich Blaualgen, sind Teil des Phytoplanktons und profitieren besonders von hohen Wassertemperaturen und nährstoffreichen Gewässern. Bei zu vielen Nährstoffen im Wasser können sie sich stark vermehren und im Spätsommer wie 2020 im Neuenburgersee teilweise giftige Cyanotoxine ausbilden, was sich wiederum aufs Nahrungsnetz des Ökosystems auswirken kann.

6.9.2 Auswirkungen auf einzelne Arten und die Biodiversität

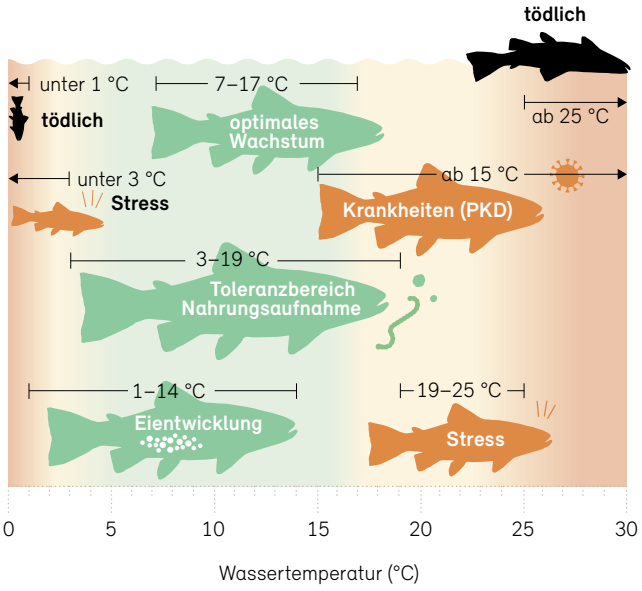
Für spezialisierte und kälteliebende Arten wird das Überleben mit fortschreitendem Klimawandel immer schwieriger. Zu den Gewinnern zählen Generalisten und wärmeliebende Arten. Insgesamt gerät die Biodiversität zusätzlich unter Druck.

Der Klimawandel führt zu homogeneren Lebensräumen in Fliessgewässern und Seen (Benateau et al. 2019), zu einem Aussterben von Arten und einer Abnahme der genetischen Vielfalt innerhalb der Arten (Bálint et al. 2011). Die Auswirkungen auf die Arten werden im Folgenden anhand einzelner Beispiele und als Auswirkungen auf die Biodiversität aufgezeigt.

Beispiel Bachforelle
An der Bachforelle ist beispielhaft zu sehen, wie sich der Klimawandel auf Fische auswirkt, die auf kühle und sauerstoffreiche Gewässer angewiesen sind (Hari et al. 2006). Ihre Population ist in der Schweiz in den letzten Jahren stark zurückgegangen (Borsuk et al. 2006). Die Wassertemperatur steuert bei wechselwarmen Wasserlebewesen wie der Bachforelle nicht nur den Stoffwechsel, sondern auch das Wander-, Fress- und Paarungsverhalten. Der ideale Bereich der Wassertemperatur liegt für den kompletten Lebenszyklus der Forelle zwischen 8 und 19 °C,

oberhalb 25 °C kann sie nicht überleben (Burkhardt-Holm et al. 2002). Abbildung 6-26 zeigt für beispielhafte Aktivitäten und Lebensstadien die thermischen Optima und Toleranzbereiche der Bachforelle. Lebt eine Population bereits in einem Gewässer mit einer Temperatur nahe ihrer Toleranzgrenze, kann schon ein geringer zusätzlicher Temperaturanstieg zum lokalen Aussterben führen. Zusätzlich entstehen neue Konkurrenzverhältnisse durch das Auftauchen von wärmeliebenderen Arten wie beispielsweise dem Alet. Weiter treten mit steigender Wassertemperatur parasitäre Krankheiten wie etwa die Proliferative Nierenkrankheit (PKD) häufiger auf. Die PKD kann bei Forellen zu starker Mortalität führen, wenn die Wassertemperatur während längerer Zeit über 15 °C liegt. Wie in Kapitel 6.7 aufgezeigt, traten solche kritischen Temperaturzustände in den letzten Jahrzehnten immer häufiger und in immer mehr Gewässern auf.

Häufigere und grössere Hochwasser im Winter und Frühling verschlechtern die Bedingungen für die Fortpflanzung der Bachforelle. Sie vergräbt von Ende Oktober bis Anfang Januar ihren Laich in Laichgruben der Gewässersohle, wo die Eier und die frisch geschlüpften Fische bis zu einem halben Jahr verbringen. Besonders in verbauten Fliessgewässern können infolge der höheren Fliessgeschwindigkeiten während Hochwasserereignissen die Laichgruben beschädigt und der abgelegte Laich oder die Brütlinge weggespült werden. Auch die infolge Hochwassers resultierende höhere Schwebstoffbelastung für Jungfische und Brütlinge kann negative Folgen auf die Fischpopulation haben (Burkhardt-Holm 2009). Deshalb ist es wichtig, die Fliessgewässer möglichst naturnah zu gestalten, sodass Bereiche mit geringeren Fliessgeschwindigkeiten entstehen. Auch die Vernetzung mit Seitengewässern ist sicherzustellen, damit die Bachforellen für die Eiablage in diese ausweichen kann (Junker et al. 2015). Der Klimawandel führt dazu, dass die Eientwicklungszeit der Forelle immer weniger zum Abflussverhalten des Gewässers passt.



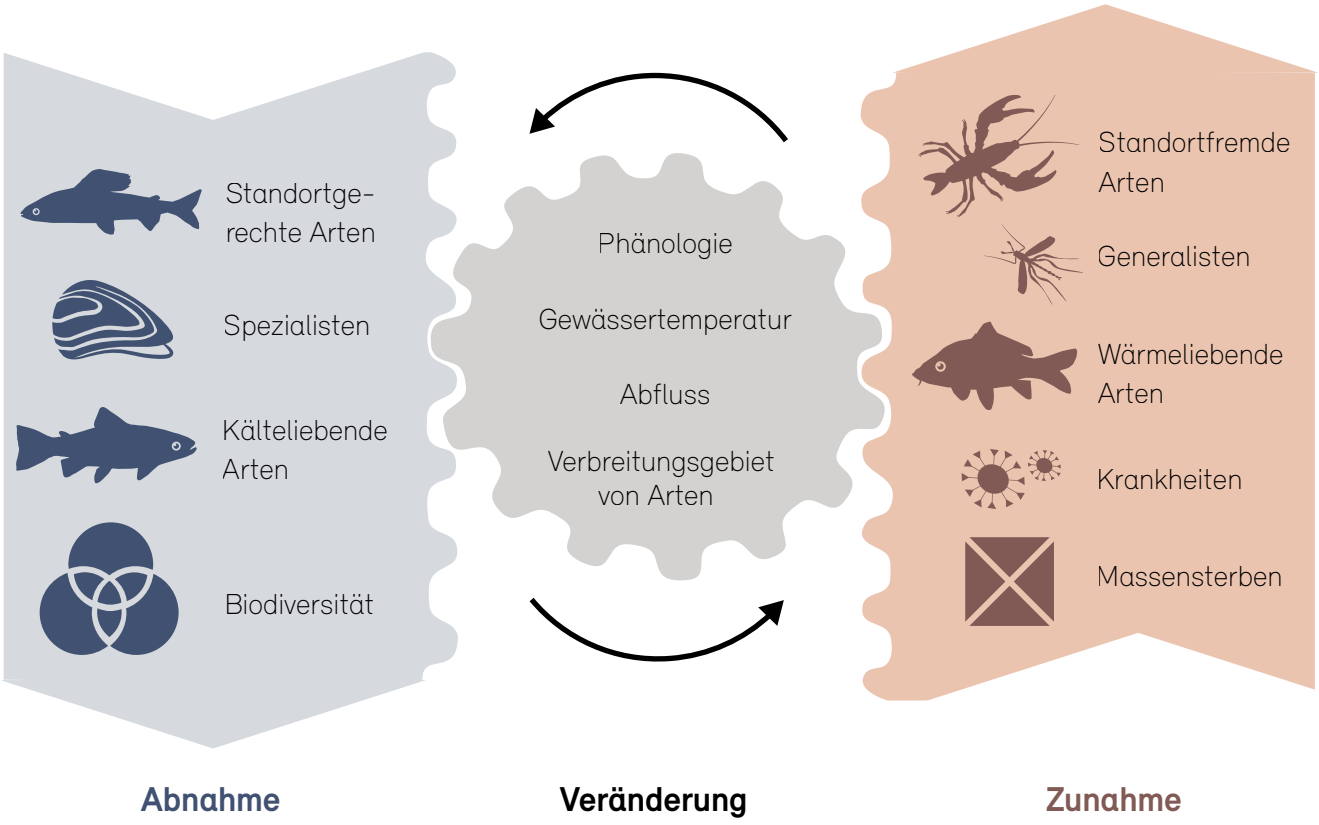
Das Beispiel der Bachforelle macht deutlich, wie stark Fische vom Klimawandel betroffen sind. Denn er führt nicht nur zu einer Erwärmung, sondern beeinflusst auch Strömungsverhältnisse, Nahrungsangebot, Sedimenttransport, Gewässerstruktur und Laichplätze und verstärkt Gefährdungen wie konkurrierende Arten und neue Krankheiten. Die Gesamtheit dieser Effekte bewirkt eine enorme Belastung der Gewässerlebewesen, welcher der zukünftige Gewässerschutz am besten durch Verringerung von weiteren Belastungen und den Erhalt oder das Wiederherstellen von natürlichen Gwässern begegnen kann.

Beispiel Makroinvertebraten

Makroinvertebraten reagieren sehr schnell auf Veränderungen im Klima. Besonders die Wassertemperatur hat einen starken Einfluss auf sie (Rüegg und Robinson 2004). Deshalb werden in dieser Gruppe starke Veränderungen bezüglich Artenvielfalt und Artenzusammensetzung erwartet (Jacobsen et al. 2014). In stehenden Gewässern in der Schweiz sind infolge der Temperaturerhöhung z. B. 11 % der Wasserkäferarten und 33 % der Libellen vom Aussterben bedroht, während 63 % der Libellen von der Temperaturerwärmung profitieren (Rosset und Oertli 2011). Aber auch wenn eine Art im Klimawandel besteht, wird sie eine wesentlich geringere genetische Vielfalt aufweisen, so werden nach einer Studie von Bálint et al. (2011) zwar 67 % der untersuchten Makroinvertebraten-

Abb. 6-27: Gewinner und Verlierer des Klimawandels

Der Klimawandel verändert die Gewässerökosysteme und Gewässerorganismen in vielfältiger Weise und führt zu einer neuen Artenzusammen-



Quelle: eigene Darstellung nach Benateau et al. (2019)

arten überleben, aber nur 16 bis 35 % der genetischen Variationen innerhalb der Arten. Die Gewinnerarten leben vor allem in den tieferen Lagen und können ihren Lebensraum in höhere Lagen ausdehnen, während die alpinen Arten diese Möglichkeit nicht haben, sie sind deshalb besonders betroffen. Aber auch andere kälteliebende Arten, wie z. B. viele Steinfliegen, sind durch die Erwärmung gefährdet. Beim in der Schweiz weit verbreiteten Gewöhnlichen Bachflohkrebs wird bei höheren Wassertemperaturen eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Pestiziden beobachtet (Russo et al. 2018).

Abnahme der Biodiversität

Obwohl lokal neue wertvolle Lebensräume entstehen, etwa im Gletschervorfeld durch den Rückgang der Eismassen, werden sich die Lebensräume insgesamt ähnlicher, da ökologische Nischen verschwinden. Besonders schwer werden es stark spezialisierte und kälteliebende Arten haben, hingegen profitieren Generalisten und wärmeliebende Arten (Abbildung 6-27). Durch den Klimawandel verschiebt sich der Lebensraum der Arten, manche können höher gelegene Gebiete innerhalb der Schweiz besiedeln, anderen gelingt das nicht. Neue nicht-einheimische oder sogar invasive Arten wandern ein. Diese standortfremden Arten können standortgerechte Arten konkurrieren und damit noch stärker unter Druck setzen. Die genetische Vielfalt innerhalb der Arten wird abnehmen. Dies ist kritisch, weil sich damit auch die Anpassungsfähigkeit an neue Bedingungen verringern kann (Bálint et al. 2011). Die langfristige Veränderung der Lebensräume in Kombination mit häufigeren Störungen durch Extremereignisse wird zu einer Zunahme von Krankheiten und Massensterben führen. Während sich Populationen bislang von Extremereignissen in der Regel erholen konn-

ten, wird dies mit fortschreitendem Klimawandel immer schwieriger, bis irgendwann ein Schwellenwert erreicht ist, ab dem irreversible Veränderungen auftreten bis hin zum Aussterben einer Art (Harris et al. 2018). Das Funktionieren eines Ökosystems basiert auf komplexen Abhängigkeiten zwischen den Arten. Veränderungen in einer Art können deshalb die Stabilität und die Widerstandskraft eines ganzen Ökosystems schwächen (Benateau et al. 2019). Alle diese Faktoren werden zu einem weiteren Verlust an Artenvielfalt führen (Urban et al. 2016).

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Gewässerökologie»

- Benateau S. et al. 2019: Climate change and freshwater ecosystems: Impacts on water quality and ecological status. Hydro-CH2018 report.

7 Wasserwirtschaft

Die Ergebnisse des Projektes Hydro-CH2018 zeigen, dass der Klimawandel den Druck auf die Schweizer Wasserwirtschaft erhöht. Alle drei Bereiche der Wasserwirtschaft – die Wassernutzung, der Hochwasserschutz und der Gewässerschutz – sind vom Klimawandel stark betroffen. Bereits eingeleitete Massnahmen helfen, die Wasserwirtschaft auf das künftige Klima auszurichten. Weitere Anpassungen an den Klimawandel müssen folgen.

7.1 Wassernutzung

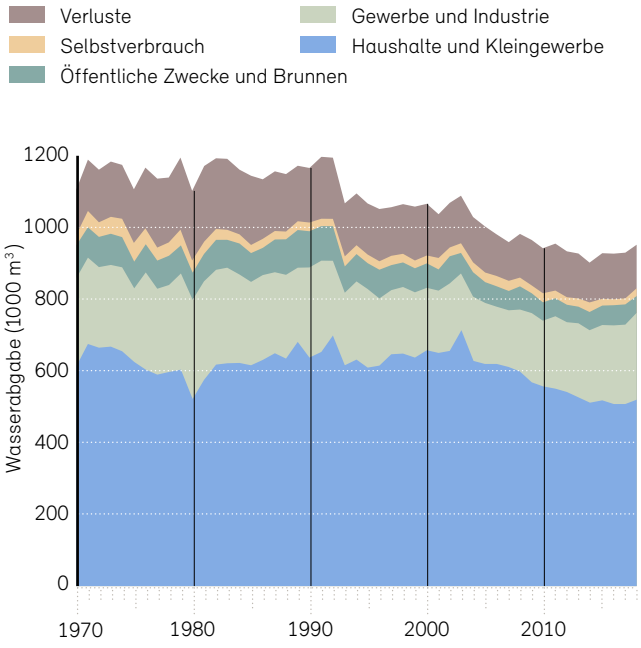
Wasser ist eine der wichtigsten Ressourcen für Leben und Wirtschaft. Wir brauchen es als Trinkwasser, für die Bewässerung, zur Energieerzeugung oder in der Industrie. Infolge des Klimawandels werden sich sowohl das Wasserdargebot als auch der Wasserbedarf verschiedener Nutzungen verändern.

7.1.1 Trinkwasserversorgung

Die Trinkwasserversorgungen beziehen den grössten Teil des Wassers aus Grundwasservorkommen, welche besonders im Mittelland und den grossen Alpentälern bereits durch die Siedlungsentwicklung und diffuse Stoffeinträge unter Druck stehen. Häufigere und längere Trockenperioden stellen die Wasserversorgung vor zusätzliche Herausforderungen.

Die Trinkwasserversorgung liefert mit rund 953 Millionen Kubikmeter (Stand 2018) den Grossteil des Wassers für die privaten Haushalte und ein Teil des Wassers für Gewerbe und Industrie. Der Verbrauch ist seit den 1990er-Jahren leicht rückläufig, steigt aber in den letzten Jahren wieder an (Abbildung 7-1). Rund 80 % des Trinkwassers wird aus dem Grundwasser gewonnen (inkl. Quellwasser). Dieses Wasser wird aus rund 18 000 Grundwasserfassungen von öffentlichem Interesse entnommen, d. h., es handelt sich um Grundwasserfassungen, welche die öffentlichen Wasserversorgungsbetriebe oder Industrie und Gewerbe im Lebensmittelbereich nutzen. Der Grossteil kann ohne Aufbereitung oder nach Anwendung einfacher Aufbereitungsverfahren ins Trinkwassernetz eingespeist werden. Weitere 20 % des Trinkwassers werden aus Seewasser gewonnen, welches danach aufbereitet wird (SVGW 2020).

Abb. 7-1: Entwicklung der Wasserabgabe in der Schweiz 1970 – 2018
Dargestellt ist die Wasserabgabe nach Verwendung über die Zeit. Der Verbrauch ist seit den 1990er-Jahren leicht rückläufig, steigt aber in den letzten Jahren wieder an.



Quelle: Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW

Auswirkungen der Trockenheit

Mit fortschreitendem Klimawandel werden die Abflüsse im Sommer und Herbst besonders in Flüssen im Mittelland und Jura stark zurückgehen (Kapitel 6.2, Abbildung 6-3) und Trockenperioden werden zunehmen. Dies beeinflusst auch die mit den Flüssen im Austausch stehenden Grundwasservorkommen und kann die verfügbaren Grundwassermengen verringern (Kapitel 6.4). Während der Trockenheit in den Jahren 2015 und 2018 lagen die Grundwasserstände an rund 60 % der Messstellen der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA über Monate auf unterdurchschnittlichem Niveau. Nach der Trockenheit von 2003 erholten sich die Grundwasserstände z. B. im oberen Emmental und im unteren Wiggertal nur langsam, weil auch das Jahr 2004 niederschlags-

arm war (Hunkeler et al. 2014). Dies zeigt, dass sich auch die Trinkwasserversorgung zeitlich befristet auf ein reduziertes Dargebot einstellen muss. Während der vergangenen Trockenperioden stand in den betroffenen Regionen in einigen Fällen nur eine reduzierte Wassermenge für die Trinkwasserversorgung zur Verfügung. Da in der Schweiz jedoch auch mit Klimawandel genügend Grundwasserressourcen vorhanden sind, liegen die Herausforderungen v. a. im Schutz des für die Trinkwasserversorgung notwenigen Grundwassers und in der Verteilung des Trinkwassers.

Verstärkte Nutzungskonflikte

Als Reaktion auf den Klimawandel können sich Nutzungsansprüche an die Gewässer, wie z. B. Brauchwasser für die landwirtschaftliche Bewässerung, verstärken. Wenn Brauchwasser aus Grundwasser gewonnen wird, besteht die Gefahr, dass besonders die lokal vorhandenen Grundwasserressourcen übernutzt werden. Um solchen Konflikten vorzubeugen, ist es zentral, die für die Trinkwasserversorgung unverzichtbaren Grundwasserressourcen und -fassungen zu identifizieren. Deren Betrieb muss langfristig, d. h. auch in Trockenperioden, gewährleistet sein.

Im Zuge der Energiewende nehmen zudem andere Nutzungen, wie z. B. die Kühlwassernutzung und die Nutzung von Grundwasserwärme für CO_2-freie, klimaneutrale Heizungen, zu. Von den für Grundwasserwärmeanlagen nötigen Bohrungen kann eine Gefahr für die Verschmutzung des Grundwassers ausgehen. Solche Bohrungen sollten tendenziell auf wenige Standorte mit grösseren, professionell betriebenen und gewarteten Anlagen beschränkt werden.

Beeinträchtigung des Grundwassers durch diffuse Schadstoffeinträge

Eine grosse Herausforderung für die Wasserversorgungen ist die Bereitstellung von Trinkwasser in ausreichender Qualität. Beim Nitrat überschreiten die Messwerte an ca. 15 % der Messstellen der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, in ackerbaulich dominierten Einzugsgebieten sogar an 40 % der Messstellen den Grenzwert der Gewässerschutzverordnung für Grundwasser von 25 Milligramm pro Liter (BAFU 2019a). An mehr als der Hälfte aller Messstellen treten Rückstände von Pflanzenschutzmitteln oder deren Abbauprodukten (Metaboliten) im Grundwasser auf. Der Grenzwert der Gewässerschutzverordnung von 0,1 Mikrogramm pro Liter wird von Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffen bei rund 2 %, bei den Metaboliten, für die dieser Grenzwert nur teilweise gilt, sogar bei 20 % der Grundwasser-Messstellen überschritten. Bei den Metaboliten des Fungizids Chlorothalonil, die seit Ende 2019 als Trinkwasser-relevant gelten, ist laut BAFU sogar davon auszugehen, dass im Mittelland etwa mehr als die Hälfte der NAQUA-Messstellen über dem Grenzwert liegen.[5] Schadstoffe im Grundwasser stellen zahlreiche Wasserversorger vor Probleme, wenn sie nicht über genügend unbelastetes Ersatz- oder Mischwasser verfügen, um Trinkwasser in der vom Lebensmittelrecht geforderten Qualität zur Verfügung stellen zu können. Diese Situation verschärft sich zusätzlich bei Trockenperioden, die mit dem Klimawandel zunehmen werden.

Klimawandel verschärft Qualitätsprobleme im Grundwasser

In landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten muss qualitativ gutes Trinkwasser vermehrt aus Fassungen nahe an grösseren Fliessgewässern gewonnen werden. Hier wird potenziell belastetes Grundwasser durch infiltrierendes Flusswasser verdünnt. Führen die Flüsse jedoch während Trockenperioden weniger Wasser, nimmt auch die Infiltration ins Grundwasser und somit die Verdünnung ab. Mitunter können dann auch solche Trinkwasserfassungen gerade zu Zeiten höchsten Wasserbedarfs aus Qualitätsgründen nicht mehr verwendet werden.

Bei Niedrigwasser ist der Anteil von in Abwasserreinigungsanlagen (ARA) gereinigtem Abwasser in Fliessgewässern höher. Infiltriert solches Oberflächenwasser, können Mikroverunreinigungen und Keime in höheren Konzentrationen in das Grundwasser gelangen. Da Trockenperioden mit zunehmendem Klimawandel häufiger auftreten werden, wird der Klimawandel indirekt auch die Qualität der flussnahen Grundwasservorkommen und damit von Trinkwasserfassungen an Fliessgewässern mit einem hohen Anteil an gereinigtem Abwasser negativ beeinflussen.

5 *www.bafu.admin.ch/chlorothalonil*

Mögliche Folgen für die Trinkwassergewinnung aus Oberflächengewässern

Für viele Ballungsgebiete sind Seen wichtige Rohwasserquellen mit oft guter Qualität und ausreichender Menge – so etwa Bodensee und Zürichsee. Durch den Klimawandel kann es in den Seen vermehrt zum Auftreten bisher nicht heimischer oder nur selten vorkommender Lebewesen und weiteren Effekten wie Sauerstoffmangel in der Tiefe kommen. Ein Beispiel sind giftige Cyanobakterien und ihre Inhaltsstoffe (Kapitel 6.9.1) oder die neu in den Bodensee eingewanderte Quagga-Muschel, die sich an Filteranlagen und in Wasserleitungen festsetzt (Abbildung 7-2). Die bestehenden Trinkwasseraufbereitungsverfahren gewährleisten in der Regel den Rückhalt dieser Lebewesen und die Entfernung von schädlichen Stoffen. Die Entwicklung muss jedoch genau beobachtet und die Aufbereitungssysteme bei Bedarf angepasst werden.

In Fliessgewässer kann durch die Zunahme von Starkniederschlägen ohne Gegenmassnahmen häufiger ungereinigtes Abwasser aus der Mischwasserentlastung gelangen. Zusätzlich kann sich die Konzentration im Wasser schwebender Partikel durch Erosion, Abspülungen und Umlagerungsprozesse im Gewässer erhöhen. Künftig könnte daher bei Flüssen der Aufwand für eine indirekte Nutzung (z. B. bei Grundwasseranreicherung mit Flusswasser oder Nutzung von Uferfiltraten) zur Trinkwassergewinnung steigen, falls die Wasseraufbereitungsanlagen häufiger unter erschwerten Bedingungen betrieben oder an neue extremere Bedingungen angepasst werden müssen. So können Desinfektionsverfahren nur bis zu einer gewissen Partikelkonzentration sicher und effizient betrieben werden. Strategien zur Bewältigung dieser Effekte werden im Grossraum Basel, der in hohem Mass von Rheinwasser abhängig ist, bereits untersucht und berücksichtigt.

Wasserverteilung

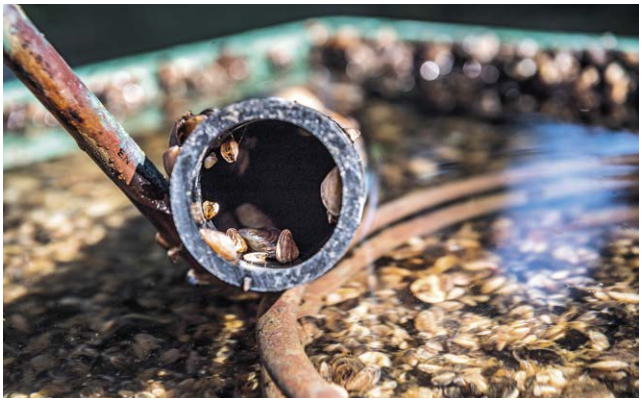
Weitere Effekte können bei der Wasserverteilung auftreten: Auf dem Weg vom Wasserwerk zu den Haushalten kann sich Trinkwasser in Hitzeperioden stark erwärmen, besonders bei exponierten Leitungen. Dies begünstigt tendenziell mikrobiologische Probleme, und der Aufwand für die vorsorgende Instandhaltung der Leitungen oder für Aufbereitungs- und Desinfektionsmassnahmen kann sich erhöhen. Verstärkt wird dieser Effekt, weil auch die Temperatur des genutzten Grund- und Oberflächenwassers durch den Klimawandel allmählich zunimmt.

Anpassungsmöglichkeiten

Grundsätzlich waren die Wasserversorgungen gut auf die Trockenperioden der letzten Jahre vorbereitet. Grössere Versorgungsprobleme konnten bisher dank Zulieferungen aus benachbarten Wasserversorgungen und einer Versorgung aus hydrologisch unabhängigen Trinkwasserressourcen (zweites Standbein) verhindert werden. Niedrige

Abb. 7-2: Problemorganismen für die Trinkwasserversorgung

Giftige Blaualgen und die invasive Quagga-Muschel in Seen können ein Problem für die Trinkwasserversorgung aus Seewasser darstellen und zu



Quelle: links: Andrea Stalder, Thurgauer Zeitung, rechts: © pegasosart, stock.adobe.com

Grundwasserstände führten in Trockenjahren wie 2018 aber verbreitet zu teilweise vorsorglichen Wassersparaufrufen. Bei einzelnen Wasserversorgern traten auch Engpässe auf, einige Wasserversorgungen in sechs Kantonen ergriffen Notversorgungsmassnahmen (BAFU 2019b).

In Zukunft lassen sich Versorgungsprobleme am besten durch regionale Wasserversorgungsplanungen und zusätzliche Vernetzung benachbarter Wasserversorgungen vermeiden. Grundsätzlich sollte jede Wasserversorgung ihr Wasser aus mindestens zwei unabhängigen hydrologischen Herkunftsräumen beziehen (BAFU 2014a). Auch ist es wesentlich, Grundwasserfassungen konsequent zu schützen und so die entsprechenden Vorkommen dauerhaft als Trinkwasserressourcen zu sichern (Kapitel 7.3.4). So lässt sich vermeiden, dass das nutzbare Dargebot durch Schadstoffeinträge noch knapper wird und dass der Aufwand für die Wasseraufbereitung zunimmt.

Stossrichtungen der Anpassung an den Klimawandel

- Erhöhung der Resilienz der Trinkwasserversorgung gegenüber Mangellagen aufgrund Trockenheit: Regionale Wasserversorgungsplanungen, Inventar der Wasserfassungen, Identifikation der für die Wasserversorgung unverzichtbaren Wasserfassungen, Wasserversorgungen vernetzen, Wassergewinnung aus zwei hydrologisch unabhängigen Standbeinen, Wasserspeicherkapazitäten erhöhen, langfristige Sicherung von Grundwasserfassungen

  (planerischer Grundwasserschutz).
- Entflechtung der Brauchwassernutzung (z. B. Wasser für die landwirtschaftliche Bewässerung) von der Trinkwasserversorgung. Identifizierung von Brauchwasserbedürfnissen und Wassersparmassnahmen bei Brauchwasser.
- Verbesserung der hydrogeologischen Grundlagen: Rechen- und Prognosemodelle für die bedeutenden Grundwasserleiter, Vulnerabilität der Grundwasserressourcen gegenüber Trockenheit und

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Trinkwasserversorgung»

- Lanz K. 2020: Trinkwasserversorgung. In: Lanz K. (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.

7.1.2 Landwirtschaftliche Bewässerung und Brauchwasser für Industrie und Gewerbe

Der Klimawandel beeinflusst die Bewässerung in der Landwirtschaft stark. Bisher werden in der Schweiz relativ wenige Flächen bewässert. Dies dürfte sich jedoch aufgrund zunehmender Temperaturen und häufigerer Trockenperioden im Sommer sowie der Zunahme des Anbaus von Gemüse und weiteren Spezialkulturen ändern. Wenig Einfluss hat der Klimawandel auf den Wasserbedarf in Industrie und Gewerbe.

Neben der Trinkwasserversorgung werden unsere Gewässer durch konzessionierte Eigenversorgung v. a. durch die Landwirtschaft, aber auch durch Industrie und Gewerbe genutzt. Zu den genutzten Mengen liegen kaum aktuelle Zahlen vor, die letzte Abschätzung stammt aus dem Branchenbericht des Schweizerischen Vereins des Gas- und Wasserfachs SVGW (SVGW 2015). 2009 wurden rund 1200 Millionen Kubikmeter aus konzessionierten Eigenversorgungen bezogen, rund die Hälfte stammt aus Oberflächengewässern (Freiburghaus 2009). In Industrie und Gewerbe dient Brauchwasser vor allem zur Kühlung, zur Reinigung und für andere Prozesse, die kein Wasser in Trinkwasserqualität erfordern. In der Landwirtschaft umfasst ein grosser Teil die Nutzung von Quellwasser für die Lauf- und Weidebrunnen. Bei der Brauchwassernutzung in Industrie und Gewerbe ist während Trockenperioden meist kein erhöhter Wasserbedarf vorhanden, allerdings kann es durch das geringere Wasserdargebot zu Einschränkungen bei der Wasserförderung kommen.

Der Klimawandel hat einen starken Einfluss auf die landwirtschaftliche Bewässerung. In der Schweiz kommen in einem Normaljahr über 95 % der landwirtschaftlichen Nutzflächen ohne künstliche Bewässerung aus. Gemäss den landwirtschaftlichen Betriebszählungen von 2010, 2013 und 2016 werden in der Schweiz nur ca. 34 000 ha regelmässig bewässert. Das entspricht gut 2 % der Landwirtschaftsfläche der Schweiz (BFS 2016).

Die grosse Mehrheit der Betriebe hat keine oder keine fest installierte Infrastruktur, die eine grossflächige Bewässerung erlauben würde. Regelmässig bewässert werden vor allem Spezialkulturen wie Gemüse, Obst und Beeren. Auch bei Ackerkulturen wie Kartoffeln, Zuckerrüben und Mais kommt Bewässerung zum Einsatz. Ein Drittel der Bewässerungsfläche sind Kunstwiesen und Dauergrünland. Den grössten Anteil daran haben die noch traditionell bewässerten Wiesen in den inneralpinen Trockentälern (BFS 2016). Ob und wie bewässert wird, entscheiden bioklimatische und vor allem sozioökonomische Rahmenbedingungen. So sind längst nicht alle bewässerungsbedürftigen Kulturen auch bewässerungswürdig.[6] Ob Bewässerungsmassnahmen wirtschaftlich tragfähig sind, hängt nicht zuletzt auch von der Verfügbarkeit der Wasserressourcen ab. Wo Wasser zuverlässig und zu geringen Kosten gewonnen werden kann, bietet sich die Bewässerung als ertragsstabilisierende Massnahme eher an als in Regionen mit begrenzter Verfügbarkeit. Wichtig ist jedoch auch, dass die tatsächlich anfallenden Kosten den Verursachern überwälzt werden, dass also die Kostenwahrheit gewährleistet ist.

Häufigere Einschränkungen von Wasserentnahmen für die Bewässrung

Der Wasserverbrauch der Landwirtschaft ist stark witterungsabhängig (Hofer et al. 2017). Grundsätzlich nimmt bei steigenden Temperaturen die potenzielle Verdunstung des Bodens und der Pflanzen und somit auch die Bewässerungsbedürftigkeit der Kulturen zu. Gleichzeitig wird durch den Klimawandel in wichtigen Anbaugebieten des Mittellands in den Sommermonaten weniger Wasser zur Verfügung stehen. Die Sommerniederschläge und -abflüsse werden abnehmen und Trockenperioden werden häufiger und ausgeprägter. In den Trockenjahren 2015 und 2018 mussten Wasserentnahmen vielerorts eingeschränkt werden, um die Mindestrestwassermengen zum Schutz der Wasserlebewesen zu gewährleisten (Abbildung 7-4). Betroffen waren vor allem kleine und mittlere Fliessgewässer, welche ungefähr 80 % des gesamten Fliessgewässernetzes ausmachen (BAFU 2009). In Extremsituationen ist also ein grosser Teil des Fliess-

6 Kulturen gelten als bewässerungsbedürftig, wenn die natürliche Niederschlagsmenge und die Wasserspeicherkapazität des Bodens nicht für ein gutes Pflanzenwachstum ausreichen. Eine Kultur ist hingegen erst bewässerungswürdig, wenn der Ertrags- und/oder Qualitätsgewinn grösser ist als die Kosten der Bewässerung.

Abb. 7-3: Bewässerungssysteme

Verschiedenen Arten der Bewässerung: Sprinklerbewässerung (oben), wassersparende Tröpfchenbewässerung (Mitte) und traditionelle

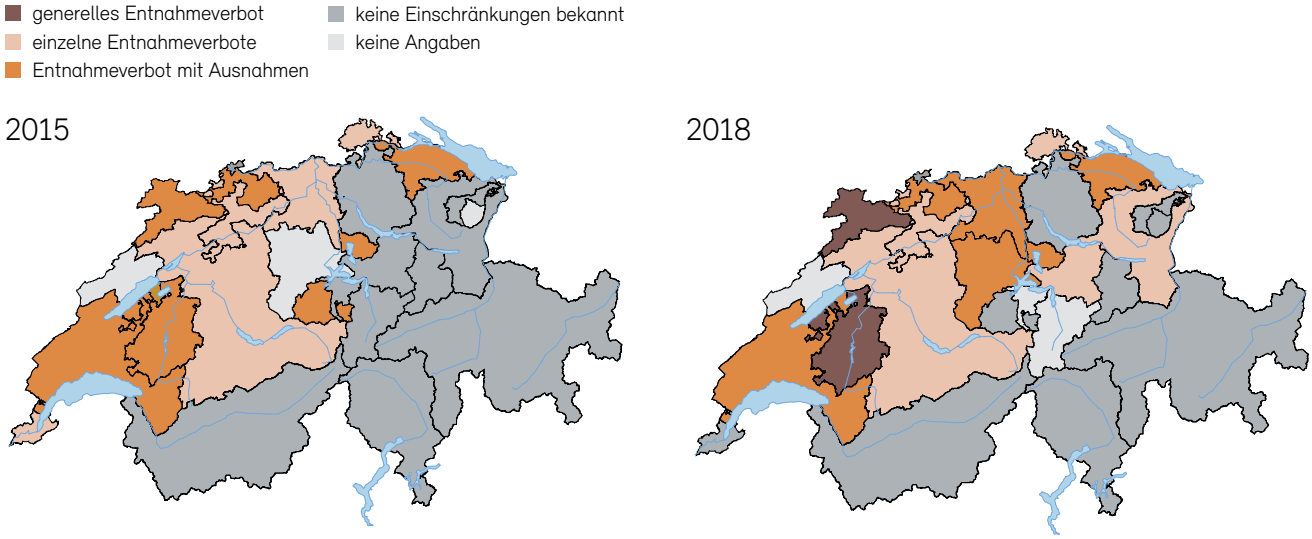
Quelle: © lysala, stock.adobe.com

Quelle: © lavizzara, stock.adobe.com

Quelle: © Rotscher, stock.adobe.com

Abb. 7-4: Einschränkungen bei der Wasserentnahme

Entnahmeverbote und Entnahmeeinschränkungen aus Oberflächengewässern für die landwirtschaftliche Bewässerung 2015 und 2018, jeweils



Quelle: BAFU (2016a) und BAFU (2019b)

gewässernetzes schon heute keine verlässliche Ressource mehr für die Bewässerung.

Kommt es nicht zu einer Anpassung der Anbausysteme, zeigen die Szenarien für das Ende des Jahrhunderts eine Zunahme der Bewässerungsnachfrage um 10 – 20 % mit Klimaschutz (RCP2.6) und gar um 40 – 50 % ohne Klimaschutz (RCP8.5) (Hirschi et al. 2020, Holzkämper 2020). Sollten in Zukunft grössere Flächen mit wasserintensiven Kulturen bestellt werden, wird diese Zunahme noch deutlich grösser ausfallen.

Komplementäre Anpassungsmassnahmen

Um eine nachhaltige Nutzung der Wasserressourcen zu gewährleisten, muss eine regionale Wasserressourcenplanung und -bewirtschaftung durchgeführt werden. Entscheidend ist, dass die unterschiedlichen Nutzungen erfasst werden und eine Übernutzung der Wasserressourcen vermieden wird. Um schwerwiegende Konflikte zu vermeiden, sollen dabei auch die unterschiedlichen Nutzungen priorisiert werden, um im Falle einer anhaltenden Knappheit nötige Beschränkungen der Nutzung vornehmen zu können.

In den besonders von Trockenheit betroffenen Anbauregionen werden vorsorgliche Massnahmen notwendig werden, um Konflikte zwischen der Bewässerung und der Gewässerökologie sowie anderen Wassernutzungen, insbesondere der Trinkwasserversorgung, in extremen Jahren minimieren zu können. Wichtig ist, dass bei der Umsetzung der Massnahmen das Prinzip der Kostenwahrheit gewährleistet ist. Zu den möglichen Massnahmen gehören Anpassungen bei der Bewirtschaftung (u. a. Kulturen-, Sorten- und Standortwahl, Bodenbearbeitung) oder im Bereich der Infrastruktur (u. a. Zuleitungen) für zusätzliche Bewässerung mit Wasser aus grösseren Reservoiren (Seen, grosse Flüsse). Vielerorts werden zurzeit regionale Bewässerungssysteme angedacht, welche zusätzliches Wasser aus Seen, grösseren Flüssen oder Speicherseen heranführen. Abseits grosser Gewässer ist auch die Bewässerung mit Grundwasser oder aus der öffentlichen Wasserversorgung im Gespräch. Dies darf jedoch keinesfalls zu einer Übernutzung der Trinkwasserressourcen und Engpässen bei der Trinkwasserversorgung führen. Ein weiterer Ansatz sind lokale, kleinere Wasserspeicher auf den landwirtschaftlichen Betrieben. Da die Zuführung von Wasser aus wei-

ter entfernt liegenden Seen und Flüssen mit aufwendigen Infrastrukturmassnahmen und hohen Investitionskosten verbunden ist, formieren sich Bewässerungsgenossenschaften. Unter bestimmten Bedingungen werden solche Projekte auch durch Strukturverbesserungsbeiträge von Bund und Kantonen unterstützt, wie z. B. das Bewässerungsprojekt Furttal (Müller 2019).

Zusätzliches Wasser kann allerdings nicht alle Probleme lösen. Einerseits ist eine Bewässerung bei der grossen Mehrheit der Kulturen unwirtschaftlich, andererseits müssen bei der landwirtschaftlichen Anpassung auch weitere klimabedingte Risiken berücksichtigt werden, wie z. B. Hitzestress, erhöhter Schädlingsdruck oder Schäden durch Starkniederschläge und Hagel. Die Entwicklung der Landwirtschaft richtet sich in erster Linie nach politischen und gesellschaftlichen Vorgaben sowie dem Marktgeschehen. In den letzten Jahren hat z. B. die Anbaufläche des durchgehend auf Bewässerung angewiesenen Gemüsebaus um 26 % zugenommen (BFS 2018). Die Wahl der Kulturen und Anbauformen wie der Art der Bodenbearbeitung sowie eine Weiterentwicklung des Agrarmarktsystems hin zu mehr Nachhaltigkeit sind längerfristig darum zentral.

AgriAdapt: Wie verändert sich mit fortschreitendem Klimawandel der Bewässerungsbedarf und welche Auswirkungen hat dies auf den Grundwasserstand?

Vorgehen
Für einen Grundwasserleiter im Berner Seeland wurden mit einem integrierten Modellsystem, bestehend aus Pflanzenmodell, hydrologischem Modell und Grundwassermodell, die Auswirkungen des Klimawandels auf die landwirtschaftlichen Kulturen, Bewässerungsbedürfnisse und die Grundwasserstände untersucht.

Hauptergebnisse
- Ohne Klimaschutz (RCP8.5) würde der Bewässerungsbedarf bis zum Ende des Jahrhunderts um etwa 40 % zunehmen, mit Klimaschutz (RCP2.6) wäre eine mittlere Zunahme um etwa 13 % zu erwarten.
- Ohne Klimaschutz und bei einer Intensivierung der Landwirtschaft (+20 % bewässerungsintensive Kulturen) würde der Wasserbedarf im Mittel um weitere 35 % zunehmen. Ein Potenzial zum Wassersparen ergibt sich durch den vermehrten Anbau von frühreifen Sorten und Winterkulturen.
- Der geschätzte Wasserbedarf für die Bewässerung ohne Klimaschutz (RCP8.5) würde in Zukunft den gegenwärtigen Trinkwasserbedarf übersteigen.
- Ohne Klimaschutz (RCP8.5) wird im Sommer und Herbst ein tieferer Grundwasserspiegel erwartet. Dieser Effekt würde durch zusätzliche Wasserentnahmen für Bewässerung verstärkt. Allerdings dominiert der Effekt des Klimawandels auf den Grundwasserstand über die Effekte der betrachteten Landnutzungsszenarien (+/- 20 % bewässerungsintensive Kulturen).

Hydro-CH2018-Projekt der Forschungsgruppe Klima und Landwirtschaft von Agroscope

Stossrichtungen der Anpassung an den Klimawandel

- Anpassung der Anbausysteme zur Verminderung des Wasserbedarfs, standortangepasste Kulturen und Bodenbewirtschaftung.
- Ernteausfallversicherung gegen übermässige Trockenheit als Absicherung.
- Optimierte professionelle Bewässerung, unterstützt durch digitale Bodenfeuchte-Messsysteme, effiziente Bewässerungstechnologien, Stärkung der Ausbildung im Bereich Bewässerung.
- Wasserressourcenplanung und -bewirtschaftung, um eine nachhaltige Nutzung der Gewässer zu gewährleisten und eine Übernutzung zu vermeiden. Dabei sollen die Wassernutzungen priorisiert werden, um im Falle von ausgeprägter Trockenheit Konflikte vermeiden zu können. Anpassung der Konzessionierungspraxis.
- Brauchwasserplanung für die landwirtschaftliche Bewässerung durchführen und eine verursachergerechte Finanzierung umsetzen. Vorsorgliche Massnahmen gegen Konflikte um die Wassernutzung ergreifen. Umsetzung des Verursacher-

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Landwirtschaftliche Bewässerung»

- Holzkämper A. et al. 2020: AgriAdapt – Modellgestützte Untersuchung der Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf Grundwasserressourcen im Berner Seeland. Hydro-CH2018 Bericht.
- Lanz K. 2020: Landwirtschaftliche Bewässerung. In: Lanz K. (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.

7.1.3 Wasserkraft

In der Schweiz wird mehr als die Hälfte der Elektrizität aus Wasserkraft erzeugt. Über das gesamte Jahr hinweg profitiert die Wasserkraft zurzeit noch von den abschmelzenden Gletschern. Auf lange Sicht werden aber die Schmelzwasserzuflüsse abnehmen. Die Rolle der Wasserkraft als Speicher für Solar- und Windstrom und zur Stabilisierung der Stromnetze wird hingegen zunehmen.

Wasser wird seit Ende des 19. Jahrhunderts für die Elektrizitätserzeugung genutzt. Viele der Wasserkraftanlagen wurden zwischen 1945 und 1970 erbaut und verfügen über eine Konzession von rund 80 Jahren. Die grossen Speicherkraftwerke liegen im Alpenraum, die grossen Laufwasserkraftwerke im Mittelland.

Unterschiedliche Betroffenheit der Speicher- und Laufkraftwerke

Während die Stromproduktion bei Speicherkraftwerken in gewissem Mass auf Nachfrage und Preis abgestimmt werden kann, ist sie bei Laufwasserkraftwerken vom momentanen Wasserdargebot abhängig. Die Fliessgewässer werden in Zukunft im Winter mehr Wasser führen, weshalb dann insgesamt mehr Strom aus Wasserkraft produziert werden kann. Der erwartete Rückgang der Sommerabflüsse wird dazu führen, dass das Wasserdargebot für die Stromproduktion im Sommer kleiner ausfallen wird. Speicherkraftwerke können diese saisonalen Veränderungen durch Rückhalt von Wasser zum Teil auffangen.

Positive und negative Auswirkungen für Laufkraftwerke

Das Swiss Competence Center for Energy Research SCCER hat für elf Schweizer Laufkraftwerke untersucht, wie sich der Klimawandel auf die Stromproduktion auswirken wird (Abbildung 7-5). Bei fast allen Laufkraftwerken steigt die Winterproduktion im Vergleich zur Referenzperiode 1981 – 2010 in Zukunft an, bis Mitte Jahrhundert durchschnittlich um ungefähr 5 % unabhängig davon, ob das Szenario mit konsequentem (RCP2.6) oder ohne Klimaschutz (RCP8.5) betrachtet wird (SCCER-SoE 2019). Bis Ende des Jahrhunderts steigt dieser Wert ohne Klimaschutz auf 10 % an, während er mit Klimaschutz stabil bleibt. Die jährliche Produktion wird mit Klimaschutz unverändert bleiben oder nur leicht abnehmen. Ohne Klimaschutz werden jedoch Abnahmen um 3 % bis Mitte und um 7 % bis Ende Jahrhundert erwartet. Ausnahmen bilden hoch gelegene alpine Kraftwerke, die auch dann noch eine Zunahme der Produktion aufweisen. Dies ist vor allem durch das Abschmelzen der Gletscher zu erklären. Von der Gletscherschmelze profitiert zurzeit auch noch die gesamte Schweizer Wasserkraft. Im Zeitraum von 1980 bis 2010 stammten 3 bis 4 % der Schweizer Wasserkraftproduktion aus der Gletscherschmelze, was unge-

fähr 1,0 bis 1,4 TWh pro Jahr entspricht. Der Beitrag der Gletscherschmelze wird bis Mitte Jahrhundert jedoch um 0,56 TWh pro Jahr und bis Ende des Jahrhunderts um 1 TWh pro Jahr zurückgehen (Schaefli et al. 2019).

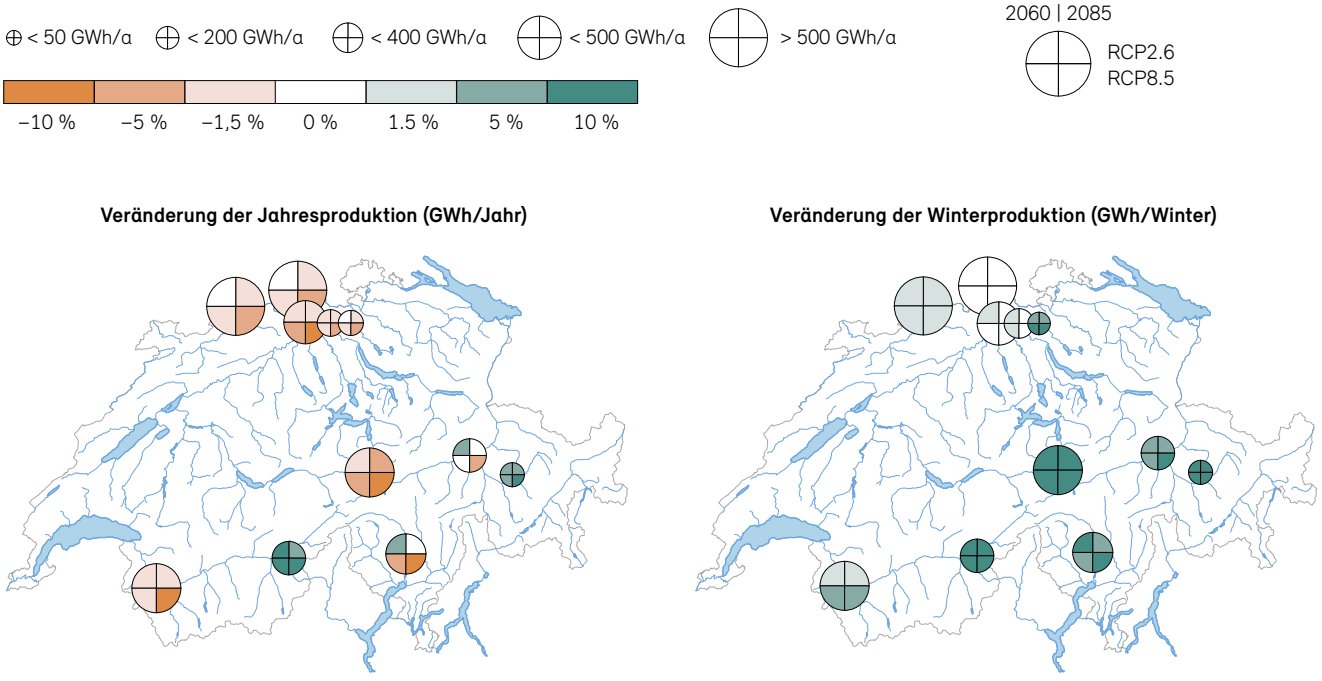
Wie sich die Stromproduktion tatsächlich verändern wird, hängt aber auch vom Ausbaugrad der Kraftwerke ab. Geringe Abflüsse können aufgrund der Mindestrestwassermengen nicht genutzt werden, und bei grösseren Abflüssen ist die Kraftwerkskapazität (Ausbauwassermenge) limitierend (SCCER-SoE 2019). Bei noch nicht maximal ausgebauten Kraftwerken könnte z. B. durch eine Erhöhung der Ausbauwassermenge oder effizientere Stromerzeugung mehr Strom produziert werden als heute und so die Verluste infolge des Klimawandels kompensiert werden, wobei die ökologische Bedeutung der Überläufe bei den Fassungen berücksichtigt werden muss (dynamische Restwassermengen).

Herausforderungen und Chancen für Speicherkraftwerke

Speicherkraftwerke sind aufgrund ihrer alpinen Lage gegenüber Naturgefahren stark exponiert. Besonders das Abschmelzen der Gletscher, die Erwärmung des Permafrostes und häufigere Starkniederschläge verschärfen die Naturgefahrensituation für die Wasserkraftanlagen in den Alpen. Je nach Speicherfüllung können sie im Hochwasserfall aber auch grosse Wassermengen zurückhalten und so zum Hochwasserschutz beitragen. In Zukunft könnten die Ansprüche für Mehrzwecknutzung von Speicherseen z. B. für den Hochwasserrückhalt oder als Wasserressource bei Wasserknappheit steigen. Weiter ist damit zu rechnen, dass alpine Speicherseen durch zusätzlichen Sedimenteintrag schneller verlanden. Es wird versucht, mit technischen Methoden und Unterhalt dem Verlandungsproblem zu begegnen.

Abb. 7-5: Erwartete Änderungen der Produktion von Laufkraftwerken

Die erwarteten Änderungen der Jahres- und Winterproduktion beispielhafter Schweizer Laufwasserkraftwerke in den Perioden 2060 (2045 – 2074) und 2085 (2070 – 2099) im Vergleich zur Referenzperiode (1981 – 2010) für ein Szenario mit (RCP2.6) und ohne Klimaschutz (RCP8.5). Die Projektionen gehen von gleichbleibender Leistung der Kraftwerke und unveränderten Restwassermengen aus.



Quelle: SCCER-SoE (2019)

Die Wasserkraft ist vom Klimawandel nicht nur betroffen, sondern auch Teil der Lösung

Um das Übereinkommen von Paris umzusetzen, ist ein Umbau der Energieversorgung weg von fossilen Energieträgern notwendig. Die Energiestrategie 2050 sieht als Beitrag der Wasserkraft im Jahr 2035 eine durchschnittliche Jahresproduktion von mindestens 37 400 GWh vor, 2,6 % mehr als 2018 (Art. 2 EnG). Dazu sind Effizienzsteigerungen nötig, und zusätzliche Speichervolumen oder neue Anlagen müssen erstellt werden. Durch das Abschmelzen der Gletscher werden neue Gebiete frei, die teilweise für die Wasserkraft genutzt werden könnten (Farinotti et al. 2019), wie z. B. im Fall des geplanten Speicherkraftwerks am Triftgletscher im Berner Oberland.

Neben der Stromerzeugung selbst sind Pumpspeicherkraftwerke auch wichtig für die Speicherung von Strom und zur Stabilisierung der Stromnetze. Diese Eigenschaft wird mit der Zunahme von Strom aus Solar- und Windkraftwerken, die wetterabhängig und darum unregelmässig produzieren, immer wichtiger.

Stossrichtungen der Anpassung an den Klimawandel

- Neuausrichtung der Anlagenkonfiguration aufgrund des veränderten Wasserdargebots.
- Überprüfung des Naturgefahrenrisikos für Stauanlagen infolge der Erwärmung von Permafrost und des Abschmelzens von Gletschern.
- Multifunktionalität von Speicherseen als neue Dienstleistung prüfen.
- Langfristige Abflussvorhersagen zur Optimierung der Stromproduktion verbessern.

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Wasserkraft»

- Lanz K. und Wechsler T. 2020: Wasserkraft. In: Lanz K. (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.
- SCCER-SoE 2019: Climate change impact on Swiss hydropower production.

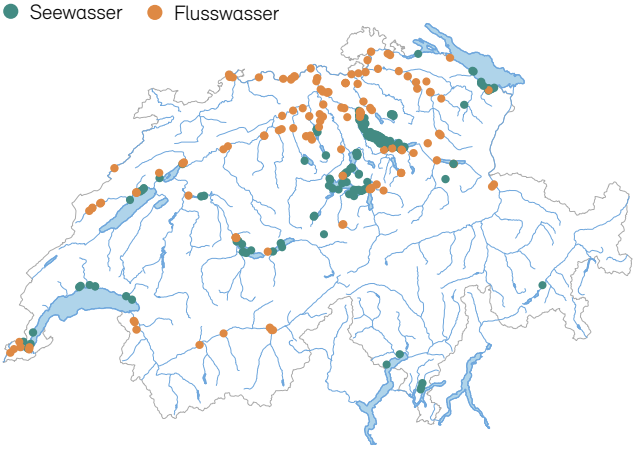
7.1.4 Thermische Nutzung von Gewässern

Gewässer werden in der Schweiz zur Wärmegewinnung und Kühlung genutzt. Auf die Wärmenutzung wirkt sich der Klimawandel positiv aus: Da die Gewässer wärmer werden, kann ihnen mehr Energie entzogen werden. Gegenläufig ist die Entwicklung bei der Kühlung: Zunehmender Kühlbedarf im Sommer trifft auf höhere Wassertemperaturen und verminderte Abflüsse.

Für die Kühlung von Grossanlagen spielen Fliessgewässer seit Jahrzehnten eine bedeutende Rolle. Seit der Abschaltung des Kernkraftwerks Mühleberg im Dezember 2019 gibt das Kernkraftwerk Beznau die grösste Wärmemenge an einen Schweizer Fluss ab, gefolgt von Kehrichtverbrennungsanlagen und industriellen Betrieben. Bezüglich Wärmenutzung bieten Seen und Fliessgewässer zwar ein grosses Potenzial, ihre Nutzung für Heizzwecke ist aber durch Aufwand und Kosten für die nötigen Fernwärmenetze räumlich begrenzt. Heizsysteme mit See- oder Flusswasser sind am ehesten in Kombination mit grösseren Kühlanwendungen z. B. für Industrieanlagen oder Rechenzentren rentabel (Rust 2017). Die Heiznutzung von Gewässern ist eine Möglichkeit, um den Treibhausgasausstoss der Schweiz zu reduzieren und sollte deshalb vermehrt genutzt werden. Eine Übersicht über die thermische Nutzung von Seen und Fliessgewässern zeigt Abbildung 7-6.

Abb. 7-6: Thermische Nutzung von Fluss- und Seewasser in der Schweiz

Punkte zeigen, wo Flusswasser (orange) oder Seewasser (türkis) zur thermischen Nutzung derzeit verwendet wird.



Quelle: Daten von Eawag, Stand 2018 *(https://thermdis.eawag.ch)*

Kaum mehr Potenzial für Kühlanlagen an Fliessgewässern

Die klimabedingte Erwärmung der Gewässer reduziert deren Kühlkapazität. Besonders im Sommer, wenn die Nachfrage nach Kühlung am grössten ist, erreichen Fliessgewässer schon heute immer häufiger für Wasserlebewesen kritische Temperaturen (Kapitel 6.9.1). In den Hitzesommern 2003, 2006, 2015, 2018 und 2019 mussten darum einige Grossanlagen ihre Kühlnutzung zeitweise einschränken. Um zusätzlich zur klimabedingten Belastung eine thermische Belastung der Gewässerökosysteme zu vermeiden, sind neue Kühlnutzungen an den meisten Fliessgewässern kritisch zu betrachten. Allfällige Potenziale bestehen bei grösseren Fliessgewässern in den Voralpen, welche auch in Zukunft im Sommer noch hohe Abflüsse aufweisen.

Potenzial von Seen für die thermische Nutzung

Die grossen Seen haben auch mit fortschreitendem Klimawandel beträchtliches Potenzial für thermische Nutzungen, sowohl für Wärmeentzug als auch für Kühlzwecke, vor allem aufgrund ihrer grossen Volumen und des auch im Sommer kühlen Tiefenwassers. Um negative Auswirkungen auf das Ökosystem See auszuschliessen, sind allerdings die Auswirkungen von Wasserentnahmen und der Rückgabe von erwärmtem bzw. abgekühltem Wasser auf die durch den Klimawandel veränderten Schichtungsverhältnisse zu beachten. So wird bei einigen Seen erwartet, dass sich in Zukunft die Sommerstagnation verstärkt und verlängert (Kapitel 6.7.2). Um diesen Effekt durch Kühlwassernutzung nicht zusätzlich zu verstärken, muss das erwärmte Kühlwasser ins Tiefenwasser zurückgeleitet werden. Dies führt zu einer Erwärmung des Tiefenwassers, welche ebenfalls negative Auswirkungen hat und deshalb möglichst gering gehalten werden muss. Bei kleinen Seen mit geringem Tiefenwasservolumen besteht deshalb kaum Potenzial für Kühlungen. Bei grossen Seen sollte sich das Kühlpotenzial des kalten Tiefenwassers auch in heissen Sommern ohne negative ökologische Folgen nutzen lassen (Gaudard et al. 2019). Bei Nutzungen im Bereich von Seeabflüssen besteht zudem die Möglichkeit, das aus dem Tiefenwasser entnommene, durch die Nutzung erwärmte Wasser in den Seeabfluss einzuleiten. Je nach Temperaturgradient kann dies sogar zu einer Abkühlung des Seeabflusses führen, wenn das zurückgeleitete Wasser immer noch kühler ist als das Oberflächenwasser des Sees. In solchen Fällen wird aber durch die Wasserentnahme die Grenze zwischen kaltem Tiefenwasser und warmem Oberflächenwasser im See abgesenkt.

Grundwasserwärmenutzung

Die Erdwärme- und damit auch Grundwasserwärmenutzung ist in der Schweiz weit verbreitet. Bislang steht bei der thermischen Grundwassernutzung nicht die allfällige Beeinflussung der Grundwassertemperatur im Zentrum. Es geht vielmehr darum, Konflikte mit dem Grundwasserschutz zu vermeiden: Da für jede Nutzung die schützende Deckschicht des Grundwassers durchstossen werden muss, ist die Wärmenutzung in Grundwasserschutzzonen und Grundwasservorkommen, welche für die Trinkwassergewinnung genutzt werden können, nicht erlaubt.

Stossrichtungen der Anpassung an den Klimawandel

- Vermeidung und Verminderung des Kühl- und Heizbedarfs durch bessere Gebäudetechnik und Optimierung von Prozessen.
- Keine weiteren Kühlanlagen an Fliessgewässern

  und Sanierung bestehender Anlagen, welche die Anforderungen der Gewässerschutzverordnung nicht oder nicht mehr einhalten.
- Nutzung der Seewasserpotenziale unter Berücksichtigung der Konsequenzen für die Ökosysteme

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Thermische Nutzung»

- Lanz K. 2020: Thermische Nutzung. In Lanz K. (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.

7.1.5 Freizeit, Erholung und Tourismus

Die Attraktivität des Schweizer Tourismus und der Naherholungsgebiete ist durch die Landschaft und das Wasser, den Schnee und das Eis geprägt. Der Klimawandel wird das touristische Angebot besonders durch den Rückgang der Gletscher und den Anstieg der Nullgradgrenze verändern, aber auch das Bedürfnis nach Abkühlung in den Bergregionen und Gewässern erhöhen.

Mit 53,3 Millionen Übernachtungen pro Jahr ist der Tourismus in der Schweiz ein bedeutender Wirtschaftszweig. Er generiert einen Jahresumsatz von 18,7 Milliarden Franken, entsprechend 2,4 % des Bruttoinlandprodukts, und ist mit 175 489 Vollzeitäquivalenten (2018) ein wichtiger Arbeitgeber (STV 2019, BFS 2019). Die Rolle der Gewässer für Naherholung und Tourismus dürfte in Zeiten des Klimawandels noch wichtiger werden, nicht nur als Grundlage touristischer Aktivitäten, sondern auch als Ressource für den täglichen Bedarf der Touristen (Abbildung 7-7).

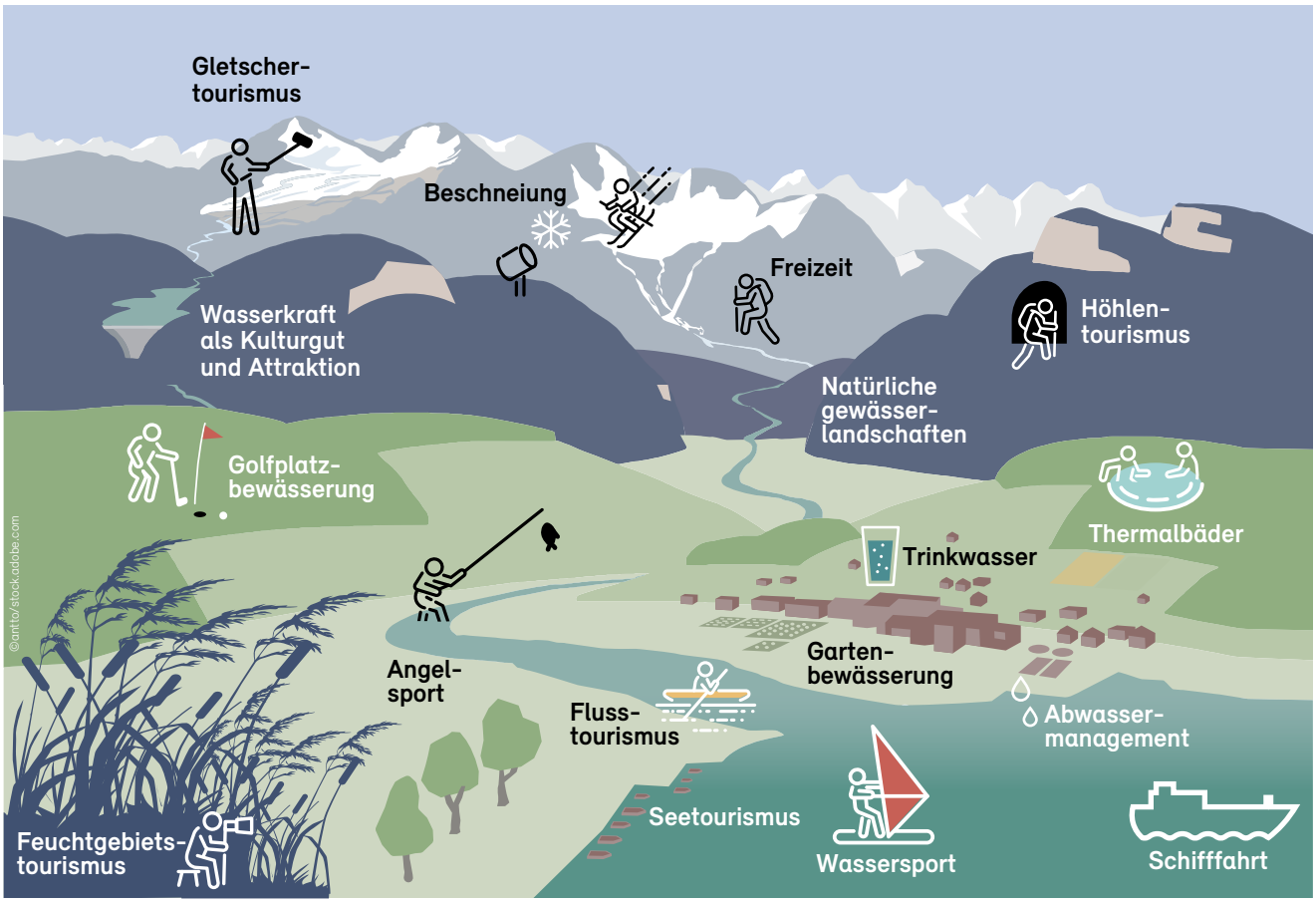
Herausforderungen für den Wintertourismus

Höhere Wintertemperaturen führen dazu, dass die Anzahl Neuschneetage in den Alpen stark zurückgeht (NCCS 2018). Die Wintersportorte in tieferen Lagen haben die höhere Nullgradgrenze in den letzten Jahren bereits zu spüren bekommen; einige mussten ihren Betrieb einstellen. Um den Schneerückgang zu kompensieren, haben die meisten Destinationen mit Beschneiungsanlagen aufgerüstet. 2016 konnten 49 % der rund 22 500 Pistenkilometer in der Schweiz künstlich beschneit werden (Seilbahnen Schweiz 2017).

Das für die Beschneiung benötigte Wasser muss in den abflussarmen Herbst- und Wintermonaten in grossen Höhenlagen bereitstehen, wobei auch in hochalpinen Gewässern Restwasservorschriften zu beachten sind. Vielerorts wird daher im Sommer Schmelzwasser und Niederschlag in eigens erstellten Speichern im Skigebiet gesammelt. Wo dies nicht ausreicht, muss Wasser aus

Abb. 7-7: Wasserabhängigkeit von Tourismus und Naherholung in der Schweiz

Für die Versorgung der touristischen Infrastruktur und als Grundlage zahlreicher Aktivitäten des Winter- und Sommertourismus ist Wasser eine



Quelle: eigene Darstellung nach Reynard et al. (2020a)

tieferen Lagen durch Pumpen zugeführt werden. Für die Beschneiung wird zum Teil auch Wasser aus der lokalen Trinkwasserversorgung eingesetzt, was zu Konflikten führen kann (Lanz 2016). In einigen Orten kann Wasser aus Wasserkraftstauseen bezogen werden, z. B. in Saas-Fee, Nendaz-Veysonnaz oder Crans-Montana (Reynard et al. 2014).

Wassernutzung in alpinen Feriendestinationen

Die extremen saisonalen Schwankungen der Übernachtungszahlen und die dezentrale Lage von Feriendestinationen im Gebirge machen deren Anpassung an den Klimawandel besonders herausfordernd. Der Wasserverbrauch aus der öffentlichen Trinkwasserversorgung steigt an Spitzentagen sprunghaft an. Gleichzeitig fällt mehr Abwasser an, was mit besonderen Anforderungen an die Infrastruktur und erhöhten Kosten verbunden ist. Wo in Zukunft Spitzentage vermehrt mit geringerem Wasserdargebot zusammentreffen, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit von Versorgungsengpässen.

Im Sommer verändert sich das Landschaftsbild durch das Abschmelzen der Gletscher. Besonders Destinationen, die heute auch wegen ihrer Gletscher oder Gletscherattraktionen besucht werden, verlieren an Attraktivität.

Chancen für den Sommertourismus

Für die Tourismusregionen im Berggebiet eröffnet der Klimawandel auch Chancen. Es ist davon auszugehen, dass Erholungssuchende an heissen Sommertagen vermehrt das kühlere Bergklima aufsuchen werden. So konnte bereits vor einigen Jahren eine Korrelation zwischen der Anzahl der Übernachtungen von Schweizer Touristen im Berggebiet und hohen Temperaturen in tieferen Lagen nachgewiesen werden (Serquet und Rebetez 2011). Durch den im Herbst später einsetzenden Schneefall verlängert sich zudem die Wandersaison. Inwiefern die von den Gletschern hinterlassenen neuen Hochgebirgsseen und Landschaften attraktive Destinationen für Feriengäste werden können, ist noch unklar. Zudem gewinnen in Zeiten des Klimawandels attraktive, vielfältige Gewässer an Bedeutung für die Naherholung. Lokale Badeanstalten und attraktive See- und Flussufer stehen der Bevölkerung für Abkühlung und Erholung zur Verfügung.

Einschränkungen bei der Freizeitschifffahrt

Der Sommer 2018 zeigte, dass Trockenheit und Hitze auch der Schifffahrt auf Seen und Flüssen zusetzen können. Am stärksten betroffen waren der unregulierte Bodensee und kleinere Seen, bei denen der Wasserstand trotz Regulierung aufgrund mangelnder Zuflüsse nicht gehalten werden konnte, wie z. B. bei Zugersee, Hallwilersee und Greifensee.

Tab. 7-1: Einschränkungen der Schifffahrt auf Schweizer Seen und Flüssen im Sommer und Herbst 2018

Gewässer	Auswirkungen, Einschränkungen
Bodensee	Landestellen Bad Schachen ab 23. Juli, Langenargen ab 24. September ausser Betrieb, seit Juli an mehreren Stationen kein Rollstuhlzugang
Bodensee (Untersee)	Keine Kursschiffe zwischen Diessenhofen und Stein am Rhein ab 23. Juli bis Oktober
Bodensee (Altenrhein)	Ab 30. Juli keine Kursschiffe zwischen Rorschach und Rheineck, bis Ende September
Walensee	Verlegung Anlegestelle Quinten, steilere Rampen an allen Anlegestellen
Zugersee, Ägerisee	Trotz rekordtiefer Sommerpegel alle Stationen erreichbar, aber sehr steile Rampen
Greifensee	Landestelle Mönchaltorf ab 16. Juli ausser Betrieb, Seepegel ein Meter tiefer als normal
Hallwilersee	Seepegel mehr als 60 cm tiefer als normal, grosse Probleme beim Zustieg (Rampe nötig), aber alle Stationen erreichbar
Lago Maggiore	Landestelle Isola Madre (Italien) ab August wegen niedrigem Pegel nicht erreichbar
Zürichsee	Trotz rekordtiefem Sommerwasserstand keine Einschränkungen
Limmat	Schifffahrt wegen zu hohen Temperaturen an Bord (verglaste Schiffe) zeitweise eingestellt
Vierwaldstättersee	Trotz rekordtiefem Sommerwasserstand keine Einschränkungen

Quelle: Reynard et al. (2020b)

Stossrichtungen der Anpassung an den Klimawandel

- Innovation und Diversifikation, insbesondere Förderung des Sommer- und Ganzjahrestourismus.
- Wasserbedarf reduzieren, um Wasserressourcen nicht zu übernutzen. Besser aufgelöste Datengrundlagen zum Wasserverbrauch für verschiedene Nutzungen in Tourismusdestinationen: Übernachtungen, Beschneiung, Golfplätze, Bäder, Abwasserreinigung. Regionale Wasserressourcenplanung durchführen.
- Vernetzung der Wasserversorgungs- und Abwasserinfrastrukturen mit den Nachbargemeinden und Ausbau der Speicherkapazitäten, zweites hydrologisch unabhängiges Standbein.

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Tourismus»

- Reynard E. et al. 2020a: Eau et tourisme. Rapport réalisé dans le cadre de Hydro-CH2018.
- Reynard E. et al. 2020b: Wasser und Tourismus. In: Lanz K. (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.

7.2 Schutz vor dem Wasser

Häufigere und intensivere Starkniederschläge, die klimabedingte Zunahme des Sedimenttransports und die fortschreitende Siedlungsentwicklung in Gefahrengebieten erhöhen die Risiken durch Hochwasser und Oberflächenabfluss. Dem wird im Hochwasserschutz und bei der Siedlungsentwässerung bereits Rechnung getragen.

7.2.1 Hochwasserschutz

Für den zukünftigen Hochwasserschutz ist es entscheidend, die klimabedingten Veränderungen zu berücksichtigen. Der Grundstein dafür wurde mit dem integralen Risikomanagement in den letzten Jahrzehnten bereits gelegt.

In der Vergangenheit gab es immer wieder Phasen mit vielen und grossräumigen Hochwasserereignissen (Schmocker-Fackel und Naef 2010). Grossräumige und katastrophale Hochwasser können auch im heutigen Klima auftreten, wie z. B. die grossen Ereignisse von 1987, 1999 und 2005 zeigen, und auch in Zukunft wird es solche Hochwasser geben. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens gewisser Hochwasserabflüsse ist über die Zeit nicht konstant und verändert sich durch den Klimawandel. Diese Auftretenswahrscheinlichkeit ist eine wichtige Grösse für die Planung und Dimensionierung von Hochwasserschutzmassnahmen, und es gibt Hinweise darauf, dass sie zunimmt (Kapitel 6.5). Unsicherheiten bezüglich Extremereignissen bestehen bereits heute; sie nehmen angesichts des Klimawandels künftig noch zu. Der Hochwasserschutz muss diese Unsicherheiten konsequent berücksichtigen. Zusätzlich dürfte durch den Klimawandel auch mehr Sediment mobilisiert und während Hochwasserereignissen mittransportiert und abgelagert werden, was zu grossen Schäden führen kann.

Ständige Weiterentwicklung des Hochwasserschutzes

Der Schutz vor dem Wasser gewann im 19. Jahrhundert an Bedeutung, als im Zuge von Industrialisierung und Bevölkerungswachstum immer neue gewässernahe Flächen in Anspruch genommen wurden. In der Folge wurden Flussläufe korrigiert und mit Dämmen versehen, um die Abflusskapazität bei Hochwasser zu erhöhen und flussnahe Flächen zu schützen. Die Einengung der

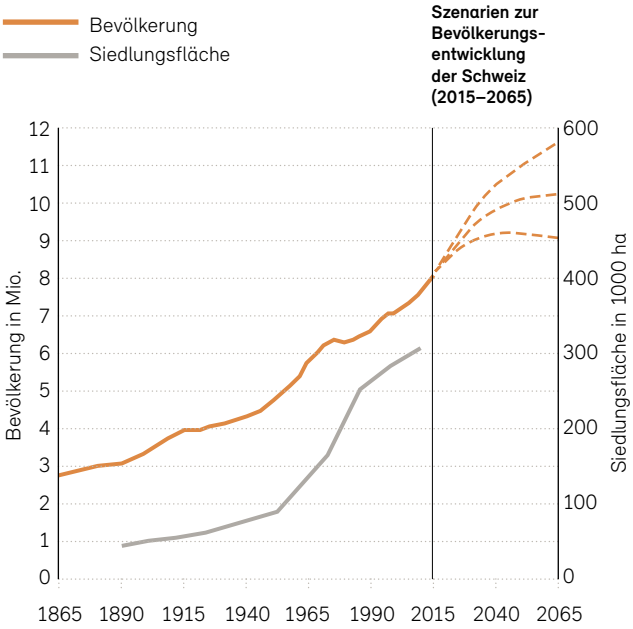
Fliessgewässer und der Rückhalt von Geschiebe aus den seitlichen Zubringern führte unter anderem zu einer stärkeren Erosion von Flusssohle und Ufern, der man mit weiteren Verbauungen zu begegnen versuchte. Diese Strategie erwies sich auf Dauer als ungeeignet, um Siedlungen und Sachwerte nachhaltig vor Überflutungen zu schützen. Nach teils verheerenden Hochwasserereignissen mit enormen Schäden setzte in der Schweiz bereits vor rund 25 Jahren ein Paradigmenwechsel im Hochwasserschutz ein: weg von der Gefahrenabwehr durch rein bauliche Massnahmen hin zu einem integralen Risikomanagement. Heute werden Prävention, Vorsorge, Bewältigung und Regeneration von Naturgefahrenereignissen ganzheitlich und als zyklischer Prozess betrachtet. Alle wichtigen Akteure beteiligen sich an der Planung und Umsetzung von Massnahmen, wobei technische, (raum-)planerische, biologische und organisatorische Massnahmen bestmöglich kombiniert werden. Seit einigen Jahren werden auch klimabedingte Auswirkungen und Einflussfaktoren berücksichtigt. Im Bericht «Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz» (BAFU 2016b) wurde der Handlungsbedarf erkannt; er wird im Hochwasserschutz bereits zum Teil umgesetzt.

Sozioökonomische Entwicklung als Treiber des Schadenpotenzials

Wie sich die Hochwasserrisiken in den nächsten Jahrzehnten entwickeln, hängt nicht nur von der Veränderung der Spitzenabflüsse ab, sondern auch davon, ob das Schadenpotenzial weiter zunimmt. Die Siedlungsfläche in der Schweiz hat sich seit dem Ende des Zweiten Weltkriegs bis 2009 mehr als verdreifacht (Abbildung 7-8). Durch die Ausdehnung der Siedlungsfläche, höhere Sachwerte in den Gebäuden und der intensivierten Raumnutzung auch in potenziellen Gefahrengebieten hat sich das Schadenpotenzial von Hochwasserereignissen laufend vergrössert, während immer weniger Raum für mögliche Schutzmassnahmen zur Verfügung steht. Um einer weiteren Zunahme der Risiken vorzubeugen, ist es entscheidend, den Risikogedanken schon bei der Ausarbeitung von Richtplänen, Nutzungsplänen oder Baureglementen einzubeziehen. Zu diesem Zweck wurden schweizweit Gefahrenkarten erstellt, die zeigen, wo in der Schweiz Siedlungen und Verkehrswege durch Hochwasser und andere Naturgefahren bedroht sind (ARE und BAFU 2005).

Abb. 7-8: Entwicklung von Bevölkerung und Siedlungsfläche in der Schweiz

Die Bevölkerung in der Schweiz hat von 1865 bis 2015 um etwa 5,5 Millionen Einwohner zugenommen (orange Linie) und werden je nach Szenario bis 2065 weiter zunehmen (orange Linien gestrichelt). Stärker als das Bevölkerungswachstum verläuft der Anstieg der überbauten Fläche in der Schweiz (grau). Waren um 1890, bei knapp 3 Millionen Einwohnern, noch weniger als 50 000 ha besiedelt, so stieg die Siedlungsfläche bis 2009 bei rund 7,5 Millionen Einwohnern bis auf über 300 000 ha an.



Datenquellen: Teilweise korrigierte Angaben der Eidg. Arealstatistiken und Schätzungen. Ständige Wohnbevölkerung gemäss ESPOP, STATPOP und den Bevölkerungsszenarien des Bundesamtes für Statistik BFS.

Stossrichtungen der Anpassung an den Klimawandel

- Sensibilisierung und Berücksichtigung neuer oder verstärkter Gefahren infolge des Klimawandels wie z. B. Verkettung von Prozessen oder Überschreiten von Prozessschwellenwerten.
- Akzeptanz erhöhen für einschneidende und unpopuläre Massnahmen wie z. B. Rückzug aus gefährdeten Gebieten.
- Vermeidung neuer inakzeptabler Risiken durch eine risikobasierte Raumplanung.

7.2.2 Schutz vor Oberflächenabfluss

Die Zunahme der Starkniederschläge wird zu häufigerem und intensiverem Oberflächenabfluss und dadurch zu mehr Schäden führen, auch in Gebieten, die von Hochwasser der Flüsse und Seen nicht gefährdet sind. Deshalb sind Objektschutzmassnahmen, eine risikobasierte Raumplanung und eine Anpassung der Siedlungsentwässerung an den Klimawandel wichtig.

Die Klimaszenarien CH2018 prognostizieren ohne Klimaschutz einen Anstieg der Starkniederschläge um bis zu 20 % bis Ende Jahrhundert. Bei Starkniederschlägen kann das Wasser vom Boden nur noch teilweise aufgenommen werden und fliesst oberflächlich ab (sogenannter Oberflächenabfluss). Dadurch kann es zu flächendeckenden Überflutungen auch fern von Gewässern kommen. Oberflächenabfluss kann Schäden an Gebäuden, Infrastruktur und in der Landschaft in Millionenhöhe verursachen. So waren beispielsweise bei einem anhaltenden Gewitter in Zofingen im Juli 2017 zahlreiche Gebäude ausserhalb der bekannten Gefahrenzonen von Schäden betroffen (Abbildung 7-9). Als wichtigen ersten Schritt hat der Bund in den letzten Jahren gemeinsam mit der Vereinigung der Kantonalen Gebäudeversicherungen und dem Schweizerischen Versicherungsverband eine gesamtschweizerische Gefährdungskarte erarbeitet: Sie zeigt, wo Oberflächenwasser abfliesst, welche Flächen betroffen sind und wie hoch das Wasser stehen kann. Im Kontext des Klimawandels sollte das Bewusstsein für die Gefahren durch Oberflächenabfluss gestärkt werden. Bereits mit oft einfachen und kostengünstigen Objektschutzmassnahmen oder Sperren und niedrigen Barrieren kann das Eintreten von Wasser in Keller oder Tiefgaragen verhindert werden.

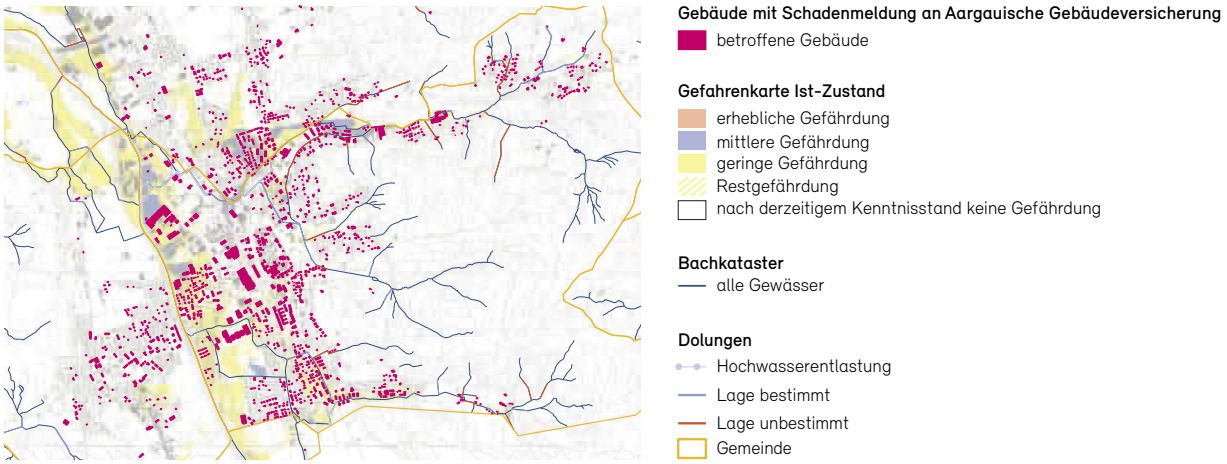
Angepasste Siedlungsentwässerung

Besonders problematisch sind Starkniederschläge in Siedlungen, wo ein Grossteil der Flächen versiegelt ist und kein Wasser infiltrieren kann. Die Siedlungsentwässerung muss sich mit fortschreitendem Klimawandel dieser Herausforderung stellen. Eine Möglichkeit ist die Erhöhung der Abflusskapazität aus dem Siedlungsgebiet, einerseits durch den Ausbau der Kanalisation, andererseits durch die Schaffung oberflächlicher Notabflusskorridore. Starkregen kann auch zu einer Überlastung der Kanalisation mit Ableitung von ungereinigtem Schmutzwassers führen (Kapitel 7.3.2).

Durch die beschleunigte Abführung von Starkregen aus Siedlungen können sich allerdings flussabwärts die Hochwasserabflüsse erhöhen. Deshalb sind auch neue Ideen und eine stärkere Zusammenarbeit zwischen Siedlungsentwässerung, Stadtplanung und dem Hochwasserschutz gefragt. Ein solch ganzheitlicher Ansatz ist das Konzept der sogenannten «Schwammstadt»: Regenwasser wird in

Abb. 7-9: Neue Gefahren auch ausserhalb von Zonen, die gemäss Gefahrenkarte durch Hochwasser gefährdet sind

Viele Gebäude (rot eingefärbt) in Zofingen (AG), die bei einem anhaltenden Gewitter im Juli 2017 Wasserschäden erlitten, liegen ausserhalb



Quelle: Abteilung Landschaft und Gewässer (ALG) des Kantons Aargau (2017)

Zisternen, Regenwasserteichen oder Gründächern gespeichert, statt es direkt via Kanalisation abzuführen. Dies entlastet nicht nur die Kanalisation, sondern kann im Sommer die Folgen von Hitzewellen in Städten und Agglomerationen reduzieren. Klimaanalysekarten zeigen, dass es an Hitzetagen z. B. in Zürcher Stadtquartieren 6 bis 7 °C wärmer werden kann als in der ländlichen Umgebung. In der klimaangepassten Stadtentwicklung setzt man darum auf mehr Freiräume, Grünflächen, Schattenplätze und offene Gewässer.

Stossrichtungen der Anpassung an den Klimawandel

- Schaffung oberflächlicher Notabflusskorridore für Regenereignisse in Siedlungen, bei denen die Fassungskapazität von Kanalisation und Regenüberlaufbecken nicht ausreicht, sodass der überschüssige Niederschlag schadenfrei in die Gewässer gelangen kann.

- Klimaangepasste Stadtentwicklung: Schaffung von entsiegelten Flächen, Grünflächen, Dach- und Fassadenbegrünung, Bau von lokalen Speichern und Mulden, um Regenwasser zwischenzuspeichern, sowie grössere Regenüberlaufbecken in der Kanalisation. Diese Massnahmen wirken teilwei-

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Hochwasserschutz»

- Lanz K. 2020: Hochwasserschutz. In: Lanz K. (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.

7.3 Gewässerschutz

Aufgabe des Gewässerschutzes ist es, die Gewässer vor nachteiligen Einwirkungen zu schützen. Dies, um eine langfristige Nutzung der Gewässer durch den Menschen zu ermöglichen und die aquatischen Ökosysteme zu erhalten. In den letzten Jahren wurden verschiedene Sanierungsprogramme eingeleitet, um die stoffliche Belastung der Gewässer zu reduzieren, sie zu renaturieren und vor Übernutzung zu schützen. Diese Massnahmen zum Schutz der Gewässer werden vor dem Hintergrund des Klimawandels weiter an Bedeutung gewinnen.

7.3.1 Klimawandel und der Schutz sich verändernder Gewässer

Die Gewässer und ihre Ufer werden in der Schweiz durch den Menschen stark genutzt. Grosse Abschnitte sind bezüglich Wasserführung, Wasserqualität und Struktur des Gewässers beeinträchtigt. Mit dem Klimawandel als zusätzlichem Stressfaktor gewinnen eine rasche Umsetzung des Gewässerschutzgesetzes und eine noch schonendere Nutzung an Bedeutung. Weiter ist damit zu rechnen, dass unvorhergesehene Klimafolgen eine punktuelle Überprüfung von Gewässerschutzkonzepten und -massnahmen erforderlich machen könnten.

Gewässer haben eine Schlüsselfunktion für Gesellschaft, Wirtschaft und Natur. Sie gestalten Landschaften und sind unsere Wasserressource. Der Gewässerschutz sorgt dafür, dass die Gewässer ihre Funktionen als Lebensraum für Pflanzen und Tiere, als Trinkwasserressource und als Erholungsraum für die Menschen möglichst dauerhaft erfüllen können. Zudem sollen die Gewässer auch als Grundlage wirtschaftlicher Aktivitäten zur Verfügung stehen (z. B. Wärmenutzung, Stromproduktion, Tourismus).

Viele Gewässer mitsamt ihren Ufern (Gewässerraum) sind heute durch anthropogene Stressoren wie Verbauungen, chemische Verunreinigungen oder Veränderungen der Abflussdynamik beeinträchtigt. Zu den negativen Auswirkungen dieser menschgemachten Gewässerveränderungen kommen die Folgen des Klimawandels hinzu oder verstärken diese noch. Eine konsequente Umsetzung des Gewässerschutzgesetzes ist daher entscheidend, um die Widerstands- und Anpassungsfähigkeit der Gewässer

gegenüber dem Klimawandel möglichst rasch zu stärken. Dies erfordert die Reduktion stofflicher Belastungen, die rasche Umsetzung von Revitalisierungen und Sanierungen der Wasserkraft, eine gesetzeskonforme Festlegung, Gestaltung und Bewirtschaftung des Gewässerraums und die Sicherung ausreichender Wassermengen in den Gewässern.

Da der Klimawandel auch die Beanspruchung der Gewässer durch die Gesellschaft erhöhen wird (z. B. zusätzliche Entnahmen für Bewässerung und Beschneiung, geringere Schadstoffverdünnung bei Niedrigwasser), erhalten verschiedene Aufgabenbereiche des Gewässerschutzes eine erhöhte Bedeutung. Insgesamt wird die Abstimmung mit anderen Sektoren wichtiger (z. B. Hochwasserschutz, Gewässernutzung). Zudem ist regelmässig zu überprüfen, ob die aktuellen Strategien und Praktiken des Gewässerschutzes vor dem Hintergrund des Klimawandels optimiert werden können oder müssen. So werden etwa die Gewässerschutzmassnahmen auf Bundesebene im Projekt «Überprüfung des Gewässerschutzes hinsichtlich Klimawandel» zurzeit durch externe Expertinnen und Experten im Auftrag des BAFU überprüft (Ecoplan i. E.). Erfahrungsaustausche können einen Beitrag leisten, den Vollzug in den Kantonen zu stärken.

Bund und Kantone beobachten und dokumentieren den Zustand und die Veränderungen der Schweizer Gewässer mit mehreren Messnetzen:

- für die Wasserqualität mit der Nationalen Wasserbeobachtung NAWA, der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA und den Messnetzen Temperatur und Feststoffe;
- für die Wassermengen mit den Messnetzen Wasserstand und Abfluss sowie NAQUA;
- für die Gewässerökologie mit NAWA und dem Biodiversitätsmonitoring.

Mit den Methoden nach dem Modulstufenkonzept (MSK) wird aus den Beobachtungswerten der Gewässerzustand ermittelt. Damit die Gewässerbeobachtung und -beurteilung als zentrale Steuerungsinstrumente der Gewässerpolitik funktionieren, müssen sie sowohl die Auswirkungen des Klimawandels als auch weiterhin primär die Auswirkungen von anderen anthropogenen Einflüssen auf die Gewässer aufzeigen. Monitoringprogramme und Beurteilungsmethoden sollen darum regelmässig daraufhin überprüft werden, ob sie aufgrund des Klimawandels weiterentwickelt werden müssen.

Stossrichtungen der Anpassung an den Klimawandel

- Fortführung der Gewässerbeobachtung, um Veränderungen zu erkennen und zu dokumentieren. Regelmässige Überprüfung, ob infolge des Klimawandels Bedarf für eine Weiterentwicklung der Monitoringprogramme besteht.
- Bund und Kantone überprüfen regelmässig ihre bestehenden Strategien und Praktiken im Gewässerschutz, sodass die Gewässer ihre Funktionen

7.3.2 Reduktion der stofflichen Belastung

Die Wasserqualität ist durch Einträge von Nährstoffen, Pflanzenschutzmitteln und anderen Mikroverunreinigungen stark beeinträchtigt. Mit verschiedenen Massnahmen soll einerseits die derzeitige Belastung reduziert und andererseits das Risiko neuer Verschmutzungen minimiert werden. Damit reduziert sich der Stress auf die Gewässerökosysteme, die Widerstandsfähigkeit erhöht sich und die Wasserqualität wird verbessert. Dies kommt auch den menschlichen Nutzungen zugute.

Über 97 % des kommunalen Abwassers in der Schweiz wird zentral gesammelt und in Abwasserreinigungsanlagen (ARA) behandelt. Dafür sind etwa 1 300 000 km Kanalisation und rund 800 ARAs vorhanden. Täglich gelangen pro Kopf etwa 650 Liter Abwasser in die ARAs, wovon etwa 22 % aus den Haushalten und etwa gleich viel aus Industrie und Gewerbe stammen. 55 % der von der Kanalisation transportierten Volumen sind Regenwasser von Dächern und Strassen oder Fremdwasser[7] (Maurer et al. 2012). Nach der Behandlung in ARAs gelangen 88,3 % des gereinigten Abwassers in Fliessgewässer und 11,7 %

7 Fremdwasser aus Brunnenabläufen, Bächen, Drainagen, eindringendem Grundwasser

in Seen (ARA-Datenbank des BAFU, Stand 2018). Da diese Gewässer Lebensraum für Tiere und Pflanzen sind, aber auch direkt oder indirekt als Trinkwasserressourcen dienen, müssen die ARAs eine sehr hohe Reinigungsleistung erbringen.

Reinigungsleistung der Abwasserreinigungsanlagen verbessern

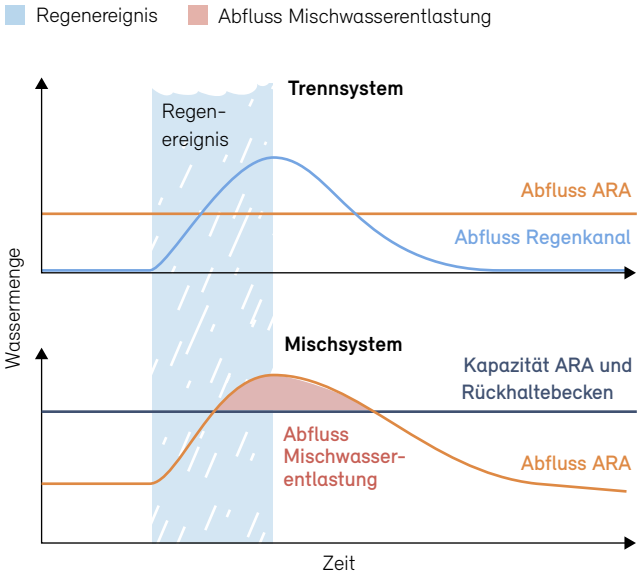
Der Klimawandel vermindert zeitweise den Abfluss der Fliessgewässer, wodurch der Abfluss der ARAs weniger stark verdünnt und die stoffliche Belastung erhöht wird. Allerdings arbeiten die ARAs bei höherer Wassertemperatur und wenig Niederschlägen effizienter, was der schlechteren Verdünnung etwas entgegenwirkt (BAFU 2019b). Mit dem Ausbau von Kläranlagen um eine vierte Reinigungsstufe soll gemäss revidiertem Gewässerschutzgesetz von 2014 der Eintrag von Mikroverunreinigungen wie z. B. Arzneimittelwirkstoffen oder Bioziden in die Gewässer, aber auch die als kritisch betrachtete Ausbreitung von antibiotikaresistenten Bakterien über die Gewässer reduziert werden. Dazu wurden nach zielorientierten, gesetzlich verankerten Kriterien rund 140 ARAs ausgewählt. Diese werden bis 2040 mit zusätzlichen Reinigungsstufen ausgerüstet.

Siedlungsentwässerung an Klimawandel anpassen

Für das Management der städtischen Niederschläge haben sich in der Schweiz historisch zwei Systeme etabliert. Auf 70 % der Siedlungsfläche wird im sogenannten Mischsystem der Regen von Dächern und Strassen gemeinsam mit dem Schmutzwasser zur ARA geführt und dort behandelt. Bei Starkregen, wenn Mischkanalisation und Regenrückhaltebecken nicht alles Wasser aufnehmen können, gelangt ein Gemisch von Schmutz- und Regenwasser unbehandelt in die Gewässer, was als Mischwasserentlastung bezeichnet wird (Abbildung 7-10). Auf den restlichen 30 % der Siedlungsfläche kommt das Trennsystem zum Einsatz, wobei eine zweite Kanalisation die Niederschläge sammelt und direkt in Oberflächengewässer leitet. Wo Regenwasser stark verschmutzt wird, etwa auf stark befahrenen Durchgangsstrassen, muss das abgeführte Wasser vor der Einleitung in ein Gewässer behandelt werden.

Abb. 7-10: Reaktion von Trenn- bzw. Mischsystem bei starken Regenfällen

Bei Mischsystemen, welche 70 % der Siedlungsfläche entwässern, kann bei Starkregen ein Gemisch aus Schmutz- und Regenwasser ohne Reinigung in die Gewässer gelangen.



Quelle: Braun et al. (2015)

Die Zunahme der Starkniederschläge wird dazu führen, dass ohne Anpassung der Siedlungsentwässerung zukünftig häufiger unbehandelte Abwässer via Mischwasserentlastung direkt in die Gewässer gelangen. Um die Kanalisation zu entlasten, sollte deshalb Regenwasser vermehrt auch im Siedlungsgebiet versickert werden. Wo dies nicht ausreicht, müssen Zwischenspeicher erstellt werden (Regenüberlaufbecken, Anlagen zur Behandlung von entlastetem Mischwasser) oder die Mischkanalisation in eine Trennkanalisation (mit separater Regenwasserableitung) umgebaut werden. Da die Anlagen der Siedlungsentwässerung eine Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten haben, kommt es darauf an, den Klimawandel schon bei heutigen Baumassnahmen zu berücksichtigen. Dementsprechend müssen auch Instrumente wie die generelle und regionale Entwässerungsplanung und die entsprechenden Normen und Datengrundlagen regelmässig überprüft und aktualisiert werden.

Massnahmen zur Reduktion der stofflichen Belastung fortführen

Ein grosser Teil der Mikroverunreinigungen, etwa Insektizide, Herbizide und Fungizide, sind diffuse Einträge aus der Landwirtschaft, auf die der Ausbau der Kläranlagen keinen Einfluss hat. Auch Phosphor und Stickstoff aus Düngemitteln und Gülle gelangen in die Gewässer. All diese Stoffe haben negative Auswirkungen auf die Gewässerökologie, und es ist Ziel des Gewässerschutzes, ihren Eintrag zu reduzieren. Durch den Klimawandel wird es zu Veränderungen in der Landwirtschaft kommen, z. B. die geografische Verschiebung der intensiven landwirtschaftlichen Kulturflächen, der Anbau anderer Kulturen und Sorten oder das Auftreten neuer Schadorganismen und Krankheiten. All dies wird auch den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln verändern. Diese indirekten Einflüsse sind für die Belastung der Gewässer mit Pflanzenschutzmitteln voraussichtlich massgeblicher als die direkten Einflüsse des Klimawandels selbst. Die durch den Klimawandel erwartete Zunahme von Oberflächenabfluss und die Veränderungen bei der Grundwasserneubildung können den Transport dieser Stoffe in die Gewässer noch erhöhen. Der Eintrag kritischer Stoffe muss darum weiter vermindert werden, was unter anderem im Rahmen des Aktionsplans Pflanzenschutzmittel (Bundesrat 2017) erfolgt. Dabei steht im Vordergrund, die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln zu reduzieren, z. B. durch mechanische Unkrautbekämpfung, biologischen Landbau, Verbot einzelner Pflanzenschutzmittel oder Förderung von Nützlingen. Weitere Ansätze sind die Verhinderung der Abschwemmung von den Feldern, extensiv bewirtschaftete Pufferstreifen entlang der Gewässer oder die umweltschonende Reinigung von Spritztanks. Die Massnahmen und Ziele zur Reduktion der Belastung der Gewässer mit Pflanzenschutzmitteln und Nährstoffen müssen auch unabhängig vom Klimawandel umgesetzt werden.

Stossrichtungen der Anpassung an den Klimawandel

- Regelmässige Prüfung des Entwässerungskonzepts einer Region und bei Bedarf Anpassung. Begrenzung von Mengen und Häufigkeit von Mischwasserentlastungen.
- Fortführen des Ausbaus der ARAs, um Reinigungsleistung zu verbessern.
- Raumplanerische Festlegung und extensive Gestaltung und Bewirtschaftung des Gewässerraums.
- Konsequente Umsetzung des Aktionsplans Pflanzenschutzmittel.

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Reduktion der stofflichen Belastung»

- Bundesrat 2017: Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln.
- Lanz K. 2020: Siedlungsentwässerung. In: Lanz K. (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.

7.3.3 Renaturierung der Gewässer

Naturnahe Gewässer sind vielfältige Lebensräume für einheimische Tiere und Pflanzen. Die Gewässerökosysteme werden sich klimabedingt verändern. Natürliche Gewässer können mit diesen Veränderungen besser umgehen als chemisch belastete, verbaute oder durch Wasserkraft hydrologisch beeinflusste Gewässer.

Ein grosser Teil der natürlichen Gewässer der Schweiz ist seit dem 19. Jahrhundert verloren gegangen. Weitreichende Folgen hatten etwa grosse Gewässerkorrektionen und Verbauungen von kleinen Flüssen und Bächen. Gründe dafür waren die Verbesserung des Schutzes vor Hochwasser, die Energieproduktion, die industrielle Nutzung sowie die Erschliessung von Verkehrskorridoren, landwirtschaftlichen Nutzungsflächen und Siedlungsräumen. Vor allem Gewässer im stark genutzten Mittelland weisen eine ungenügende Strukturvielfalt auf und sind weit von ihrem ursprünglichen Zustand entfernt. Insgesamt ist rund ein Viertel aller Gewässerstrecken in der Schweiz künstlich, stark beeinträchtigt oder überdeckt.

Um die Gewässer wieder natürlicher zu gestalten und die wesentlichen Beeinträchtigungen zu beseitigen, wurde im Jahr 2011 das Gewässerschutzgesetz revidiert. Die Renaturierung von Gewässern wurde unabhängig vom Klimawandel initiiert, trägt aber direkt zu widerstands- und anpassungsfähigen Gewässern bei. Die Kantone haben systematisch untersucht, in welchen Gewässern die dort lebenden Tiere und Pflanzen wesentlich beeinträchtigt sind, und geplant, wo Wasserkraftanlagen saniert oder Gewässer revitalisiert werden sollen.

Abb. 7-11: Wertvolle Lebensräume nach Revitalisierungen

Bei Rietheim im Kanton Aargau wurde der Chli Rhi, ein zugeschütteter Seitenarm des Rheins, wieder freigelegt und darf bei Hochwasser über die Ufer treten. So ist eine dynamische Auenlandschaft entstanden. Im Bild die Situation am 22. August 2016.

Bild: Herbert Böhler und Markus Forte/Ex-Press/BAFU

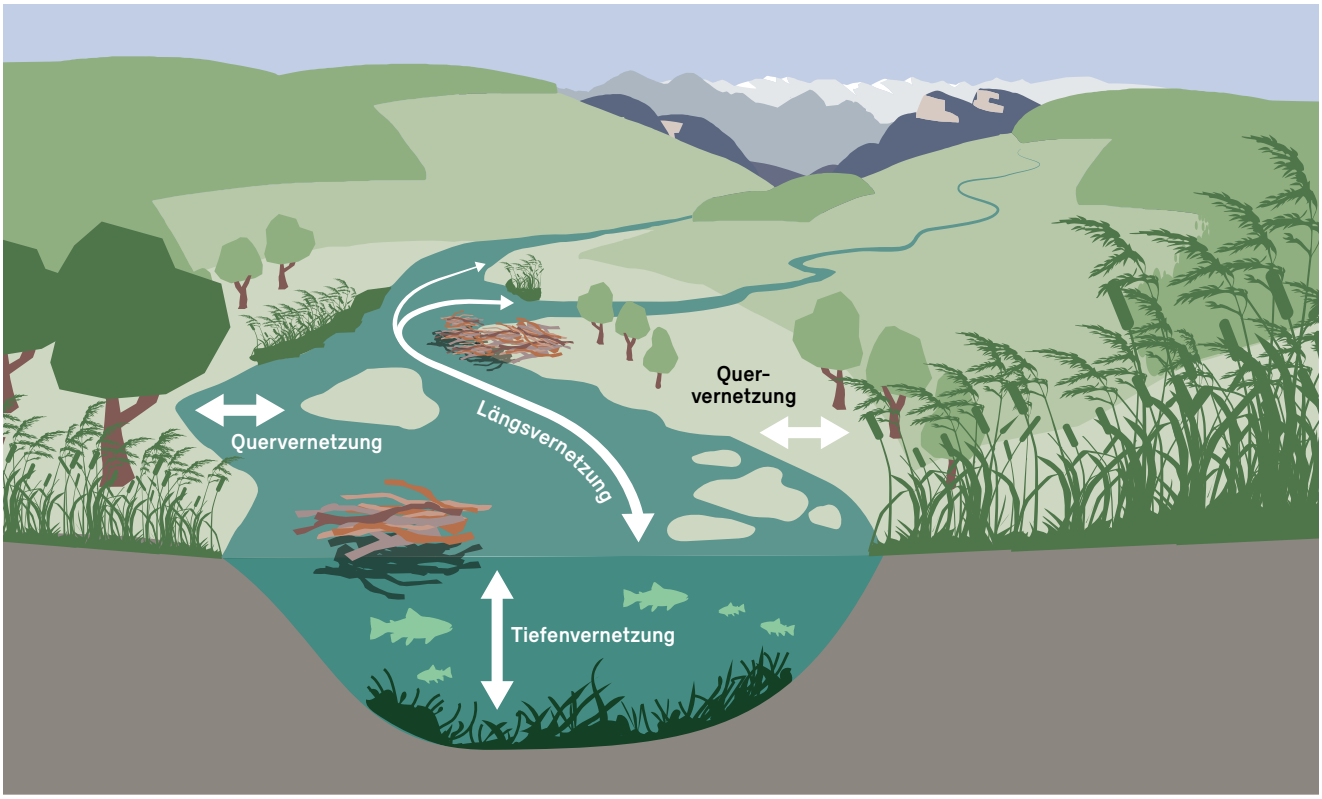
Vielfältige Lebensräume erhalten und schaffen

Der Klimawandel wird zu höheren Wassertemperaturen und Veränderungen in den Abflüssen und beim Sedimenttransport führen. Viele Arten können sich nicht ohne weiteres an die veränderten Bedingungen anpassen. Sie sind darauf angewiesen, in alternative Lebensräume umsiedeln oder sich in Extremsituationen – wie etwa bei Hitzewellen oder Niedrigwasser – in andere, weniger betroffene Bereiche im Gewässersystem zurückziehen zu können. Dazu ist ein intaktes Gewässernetz mit vielfältigen Lebensräumen notwendig. Naturnahe Gewässer sind zentral für den Erhalt der Artenvielfalt.

Zentral für die Vernetzung sind die Wandermöglichkeiten der Lebewesen in und an den Gewässern (Abbildung 7-12). Doch wird der Auf- und Abstieg von Fischen und anderen wandernden Arten (z. B. Krebse) in der Schweiz durch rund 1000 Hindernisse von Wasserkraftanlagen verunmöglicht. Sanierungspflichtige Wasserkraftanlagen werden daher bis 2030 mit Auf- und Abstiegshilfen für Fische ausgestattet. Zusätzlich unterbrechen rund 100 000 Sohlschwellen und Abstürze von mehr als 0,5 m Höhe die Vernetzung. Diese sollen im Rahmen von Wasserbauprojekten und Gewässerunterhalt laufend beseitigt werden.

Abb. 7-12: Dimensionen der Vernetzung in einem intakten Gewässersystem

Damit sich Wasserlebewesen entlang der Gewässer ausbreiten können, ist eine gute Längsvernetzung notwendig. Viele Arten wandern für die Fortpflanzung über lange Strecken, kürzere Strecken werden aber auch für die Futtersuche oder zum Rückzug während Hitzeperioden, Niedrig- oder Hochwasser zurückgelegt. Ebenso wichtig sind eine gute Quervernetzung (periodisch überflutete Auengebiete) sowie die Tiefenvernetzung in Form von Austausch zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser.



Quelle: nach BAFU (2011)

Gewässer bieten erst dann vielfältige Lebensräume, wenn auch eine abwechslungsreiche, gut strukturierte Gewässersohle, Bereiche mit unterschiedlichen Fliessgeschwindigkeiten, Rückzugsmöglichkeiten für Extremsituationen (z. B. Niedrigwasserrinnen) und Verstecke für Wasserlebewesen gewährleistet sind. Es ist wichtiger denn je, Wasserbauprojekte so zu gestalten, dass vielfältige Lebensräume erhalten und geschaffen werden. Da Revitalisierungsprojekte Jahrzehnte Bestand haben müssen, sollten sie das zukünftige Klima antizipieren und die erwarteten Veränderungen in Wasserführung, Temperatur und Gewässerökologie bereits heute berücksichtigen. Besonders bei kleinen Gewässern kann ausreichende Beschattung durch Uferbepflanzung den Temperaturanstieg bremsen. Auch werden sich die Lebensräume der Arten in gewissem Rahmen verschieben und neue Arten in das Gewässer einwandern, während bestehende verschwinden. Diese neuen Arten haben aber möglicherweise andere Ansprüche an das Gewässer als die heutigen, z. B. bezüglich Struktur oder Fliessgeschwindigkeiten. Bis zum Jahr 2090 sollen rund 4000 km Gewässerabschnitte revitalisiert und damit die natürlichen Funktionen der Gewässer wiederhergestellt werden (Göggel 2012).

Mehr Raum für die Gewässer

Gewässer mitsamt ihren Ufern erfüllen zahlreiche natürliche Funktionen. Naturnahe Gewässer brauchen ausreichend Raum; nur so können sie sich entwickeln. Durch den Übergang vom Wasser zum Land entstehen auf engem Raum sehr vielfältige Lebensräume, weshalb der Gewässerraum eine grosse Bedeutung für die Biodiversität hat. Weiter wirken die Ufer auch als Puffer für den Eintrag von

Schad- und Nährstoffen. Im Hochwasserfall können im gesamten Gewässerraum Wasser und Geschiebe zurückgehalten und so Hochwasserspitzen und Schäden reduziert werden. Viele Fliessgewässer speisen zudem das Grundwasser.

Die natürlichen Funktionen eines Gewässers können nur wiederhergestellt werden, wenn genügend Raum zur Verfügung steht. Durch einen gewässernahen, standortgerechten Baum- und Strauchbestand können vor allem bei kleinen Flüssen und Bächen insbesondere die maximalen Wassertemperaturen reduziert und thermische Rückzugsorte geschaffen werden. Kaltwasserzonen können aber nur dann als Rückzugsort dienen, wenn die Lebewesen sie auch erreichen können (Durchgängigkeit). Zudem hat eine gewässergerechte Bestockung nicht nur eine kühlende Wirkung, sondern erhöht auch die Strukturvielfalt eines Gewässers und wertet den Lebensraum auf.

Ökologische Anforderungen an Restwassermengen gewinnen an Bedeutung

An rund 1500 Stellen wird Schweizer Gewässern Wasser für die Stromerzeugung entnommen. Es darf dabei nur so viel Wasser entnommen werden, dass eine angemessene Restwassermenge im Gewässer verbleibt. Mit dem Gewässerschutzgesetz von 1992 wurde festgelegt, wie angemessene minimale Restwassermengen zu bestimmen sind. Allerdings gilt dies nur für Entnahmen, die nach 1992 bewilligt wurden. Auf ältere Entnahmekonzessionen sind die Restwasserbestimmungen erst bei einer Neukonzessionierung anwendbar. Soweit dies wirtschaftlich tragbar ist, müssen allerdings auch die bestehenden Restwasserstrecken saniert werden (Art. 80 und 81 GSchG). Restwassermengen werden anhand der hydrologischen Kenngrösse Q_{347} sowie spezifischen ökologischen Anforderungen im betroffenen Gewässerabschnitt festgelegt. Dabei muss der Wasserbedarf für vom Gewässer abhängige Lebensräume, für die Fischwanderung oder für die Grundwasserspeisung berücksichtigt werden. Bei dieser Festlegung werden die mit dem Klimawandel erwartete Zunahme der Wassertemperatur, der Rückgang der Sommer- und Niedrigwasserabflüsse sowie häufigere Trockenheit die Bedeutung der spezifischen ökologischen Anforderungen erhöhen.

Sanierung Wasserkraft konsequent fortführen

Nahezu alle Fische unternehmen im Laufe ihres Lebens grössere oder kleinere Wanderungen. Aufgrund der Wasserkraftnutzung sind viele Fluss- und Bachsysteme für Fische nicht oder nur teilweise durchwanderbar. Mit dem Klimawandel bekommt die Sanierung der ca. 1000 Fischwanderhindernisse an Wasserkraftanlagen zusätzliche Bedeutung, damit die Fische in Trocken- und Hitzeperioden in Gewässerabschnitte ausweichen können, in denen sie weniger Stress ausgesetzt sind.

In Speicherkraftwerken wird Wasser in Speicherseen gesammelt und dann zur Stromerzeugung abgelassen. Da die Stromerzeugung nach Massgabe von Nachfrage und Strompreisen unregelmässig erfolgt, führt dies zu schnellen Abfluss- und Wasserstandschwankungen in den Gewässerabschnitten unterhalb der Wasserkraftanlagen (Schwall-Sunk). Rund 100 Wasserkraftanlagen verursachen in der Schweiz solche künstlichen Abflussschwankungen. Dies ist für die Gewässerökologie problematisch, da Tiere von der Strömung mitgerissen werden oder beim schnellen Abflussrückgang in trockenfallenden Bereichen stranden. Kraftwerke können auch den Geschiebetransport verändern, besonders dort, wo Staubereiche als Sedimentfalle wirken und im Unterlauf ein Geschiebedefizit verursachen. Deshalb werden auch Wasserkraftwerke saniert, welche künstliche Abflussschwankungen verursachen, und 150 Anlagen, die Geschiebedefizite verursachen (BAFU 2015).

Mit den beschriebenen Renaturierungs- und Sanierungsmassnahmen werden die Gewässerökosysteme aufgewertet und somit auch gegenüber klimabedingten Stressoren widerstandsfähiger. Diese längerfristigen Massnahmen müssen im Ereignisfall häufig durch kurzfristig wirksame Massnahmen wie etwa Notfallkonzepte in der Fischerei ergänzt werden. So wurden im Sommer 2018 beispielsweise entlang des Hochrheins in den Kantonen Schaffhausen, Thurgau und Zürich zahlreiche Bachmündungen ausgebaggert, um den Fischen kühlere Rückzugsorte bereitzustellen (BAFU 2019b).

Stossrichtungen der Anpassung an den Klimawandel

- Konsequente Umsetzung der Renaturierungsplanung der Kantone: Sanierung Fischgängigkeit, Sanierung Schwall-Sunk, Sanierung Geschiebe und Revitalisierung unter Berücksichtigung des Klimawandels.
- Regelmässige Evaluierung von Gewässerschutzkonzepten und -massnahmen auf ihre Wirksamkeit für den Erhalt und die Schaffung klimaangepasster aquatischer Lebensräume und Überprüfung der

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Renaturierung»

- BAFU 2015: Renaturierung der Schweizer Gewässer. Die Sanierungspläne der Kantone ab 2015.

7.3.4 Schutz der Wasserressourcen und des Grundwassers

Mangellagen aufgrund von Trockenperioden können bei der Trinkwasserversorgung durch gute Planung und Vorsorge vermieden werden. Während Trockenperioden besteht jedoch grosser Bedarf an Brauchwasser für die Bewässerung. Um die Wasserversorgungen vor erhöhten Ansprüchen und das Grundwasser und die Oberflächengewässer vor einer Übernutzung zu schützen, ist eine regionale Wasserressourcenplanung und -bewirtschaftung notwendig.

Der Klimawandel führt praktisch überall in der Schweiz zu zunehmender Trockenheit im Sommer und Herbst. Gleichzeitig nimmt der Brauchwasserbedarf besonders für die landwirtschaftliche Bewässerung im Sommer zu. Abbildung 7-13 zeigt, wie sich mit dem Klimawandel die Wasserknappheit im Sommer (als Verhältnis von Wasserbedarf zu Wasserdargebot in Oberflächengewässern) auf Einzugsgebietsebene verändern wird. Bereits in der Referenzperiode weisen einige Einzugsgebiete im Sommer ein Wasserdefizit aus Oberflächengewässern auf (Brunner et al. 2019a). In normalen Jahren kann die Brauchwassernachfrage jedoch durch Entnahmen aus dem Grundwasser gedeckt werden. Bei einem 10- bis 100-jährlichen Trockenheitsereignis sind schon heute weite Teile des Mittellands und des Juras von Sommerwasserknappheit betroffen. Dies hat sich in den Trockenjahren 2003, 2015 und 2018 bestätigt, als es zu Entnahmeverboten aus Oberflächengewässern, aber auch aus dem Grundwasser kam (BAFU 2019b). Dabei war besonders bei kleineren Grundwasservorkommen keine Entnahme mehr möglich. Da bei Trockenperioden auch das Grundwasserdargebot reduziert ist, kann davon ausgegangen werden, dass zukünftig auch die Grundwasserentnahmen regional stärker eingeschränkt werden müssen.

Sicherung der Trinkwasserversorgung

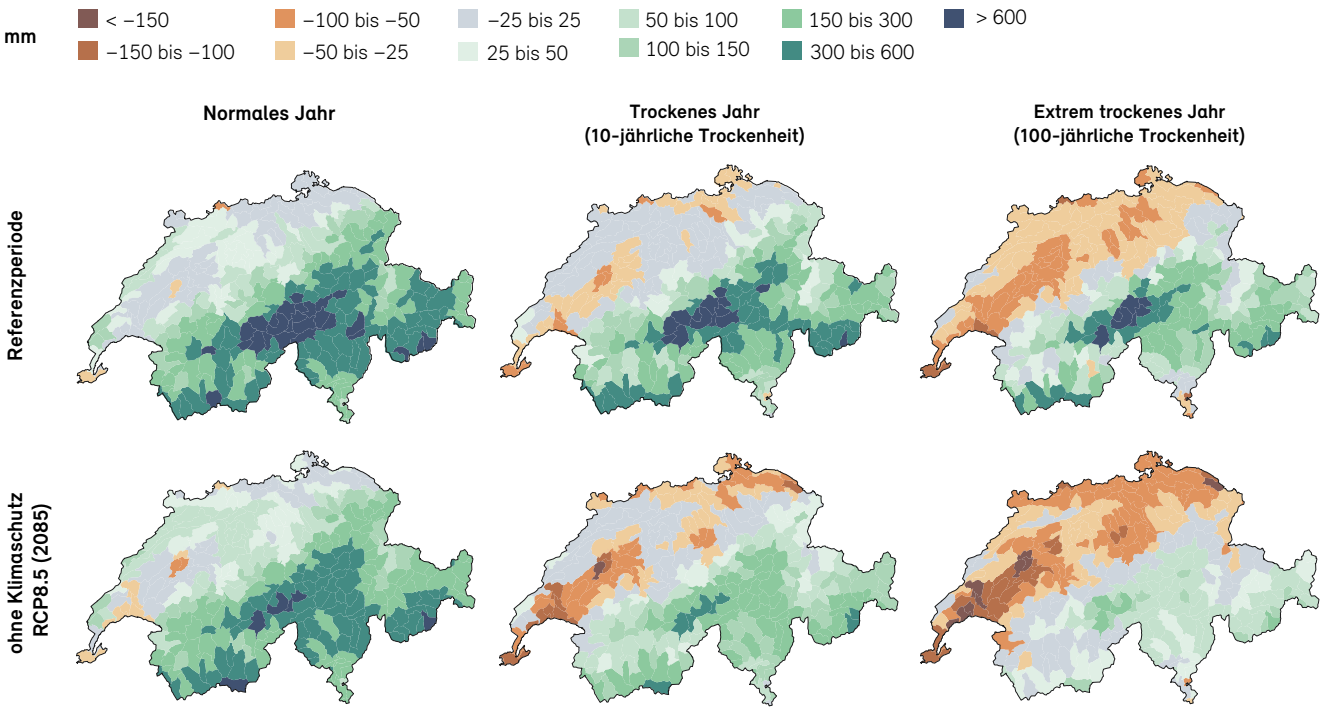
Die Trinkwasserversorgung kann durch eine Vernetzung der Wasserversorgungen und eine bessere Verteilung des Trinkwassers gewährleistet werden. Grundlage für diese Massnahmen ist eine regionale Planung der Wasserversorgung, in welcher die konkreten Massnahmen zur Sicherung der Trinkwasserversorgung definiert und danach im Rahmen der natürlichen Erneuerung und Anpassung der Wasserversorgungsinfrastrukturen realisiert werden. Darüber hinaus ist wichtig, dass die durch die Trinkwasserversorgung genutzten Grundwasservorkommen nicht aufgrund anderer Bedürfnisse, besonders die der Landwirtschaft, übernutzt werden. Ebenso muss die Wasserversorgung vor Forderungen anderer Nutzer nach möglichst preiswertem Wasser in grossen Mengen geschützt werden. Wo nötig, muss die Brauchwasserversorgung auf- oder ausgebaut werden. Dabei muss insbesondere die Kostenwahrheit berücksichtigt werden. Zusätzlich können durch geeignete Massnahmen in der Landwirtschaft wie innovative Bewässerungstechniken, angepasste Drainagen und den Anbau trockenresistenterer Kulturpflanzen eine Übernutzung der Gewässer und/oder Mangellagen bei der Verfügbarkeit von Brauchwasser vermieden werden. Generell gewinnt die Bewirtschaftung der Wasserressourcen durch die Kantone an Bedeutung, um Interessenkonflikte zwischen den Wassernutzungen zu vermeiden.

Grundwasserfunktionen bei Trockenheit gewährleisten

Das Grundwasser muss so genutzt werden, dass seine wichtigen natürlichen Funktionen erhalten bleiben. Grundwasser trägt nämlich gerade bei Niedrigwasser einen bedeutenden Teil zur Speisung vieler Fliessgewässer bei

Abb. 7-13: Wasserknappheitsrisiko in den Sommermonaten (Juni, Juli, August)

Abgebildet ist für ein normales, ein trockenes und ein extrem trockenes Jahr die Wasserbilanz, berechnet aus Dargebot in Oberflächengewässer pro Einzugsgebiet minus Wasserbedarf in diesem Gebiet unter heutigen und zukünftigen Bedingungen ohne Klimaschutz (RCP8.5). Braune Farb-



Quelle: Brunner et al. (2019a)

und verhindert so, dass aquatische Lebensräume ganz oder teilweise trockenfallen. Auch Wälder sind während Trockenheit auf Grundwasser angewiesen (Seibert et al. 2018b). Die Sensitivität der Lebensräume und die Anfälligkeit von Grundwasserfassungen gegenüber Niedrigwasser und sinkenden Grundwasserständen ist von Ort zu Ort sehr unterschiedlich (Abbildung 7-14). Es erfordert eine gesamthafte regionale Betrachtung von Grundwasserressourcen und deren Nutzung, um die Grundwasserfunktionen für Mensch und Natur auch bei Trockenheit so weit wie möglich zu erhalten.

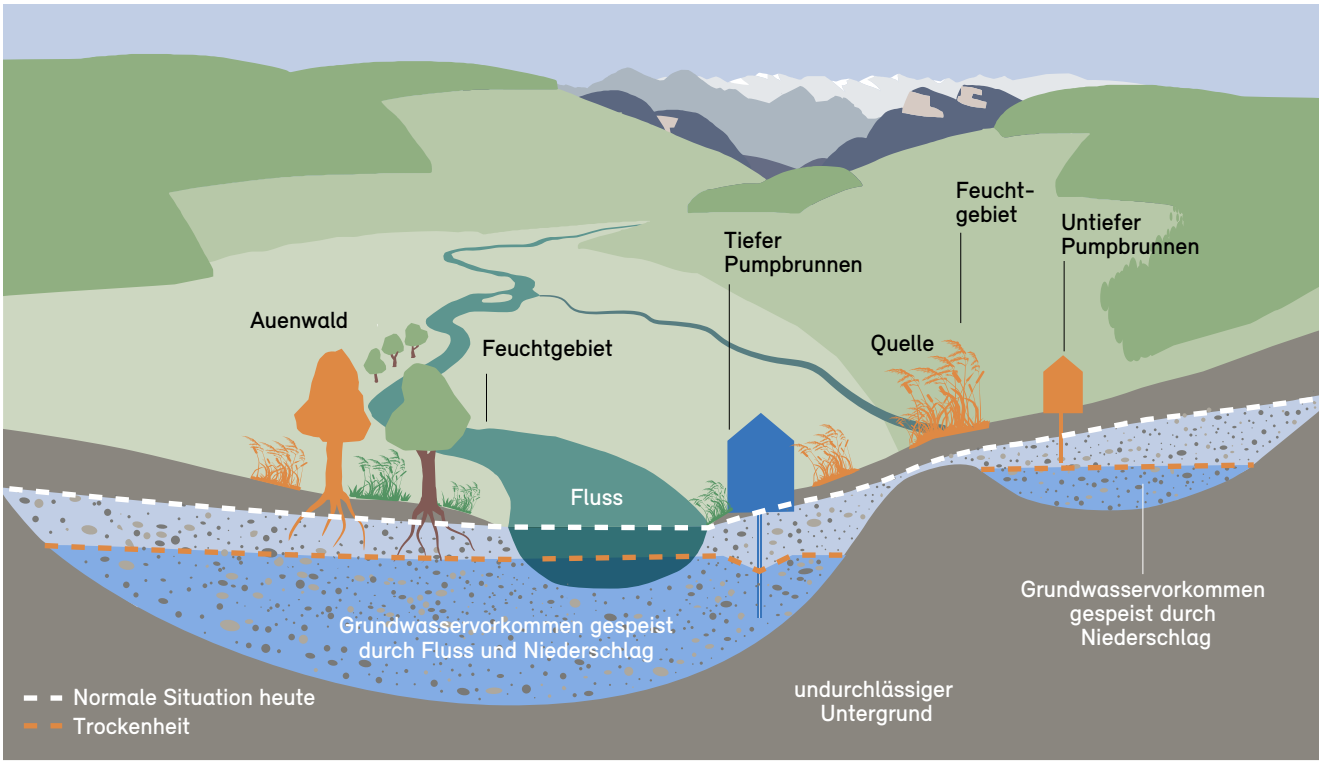
Konsequenter Schutz der Grundwasserfassungen für die Trinkwasserversorgung

Während Trockenperioden steht lokal und auch regional weniger Grundwasser zur Verfügung. Die Wasserversorgung ist dann besonders auf wenige von Trockenheit nicht betroffene Grundwasserfassungen angewiesen. Der vorsorgliche Schutz dieser für die Trinkwasserversorgung unverzichtbaren Fassungen muss gestärkt und beschleunigt werden. Dazu müssen für alle Grundwasserfassungen von öffentlichem Interesse (Trinkwasserversorgung) Zuströmbereiche zum Schutz der Wasserqualität bezeichnet werden, und verunreinigte Fassungen müssen durch Massnahmen saniert werden. Dies umfasst vor allem eine Anpassung der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung, um die verbreiteten Verunreinigungen mit Nitrat und Pflanzenschutz-Metaboliten zu beseitigen. Ebenso muss bei Trinkwasserfassungen, bei welchen aufgrund der Nutzung im Zuströmbereich die Gefahr einer Verunreinigung besteht, eine mögliche Verunreinigung durch geeignete Massnahmen verhindert werden.

Der ausserordentlich hohe Nutzungsdruck im Mittelland und in den Alpentälern (siehe Abbildung 7-15) führt häufig zu Konflikten zwischen Grundwasserschutz und dem Flächenbedarf für Siedlungen, Verkehrswege oder Landwirtschaft. Viele Fassungen sind darum heute nicht mehr

Abb. 7-14: Grundwasserstände und Grundwasserfunktionen

Effekt von trockenen Bedingungen auf unterschiedliche Grundwasserfunktionen: Während längerer Trockenperioden mit tiefen Grundwasserständen fallen Feuchtgebiete und Auenwälder zeitweise trocken. Auch können kleinere Pumpbrunnen nicht mehr tiefer gelegene Wasser-



Quelle: eigene Darstellung nach Hunkeler et al. 2020

umfassend gemäss den bundesrechtlichen Anforderungen geschützt. Hier besteht nach den Bestimmungen der Gewässerschutzgesetzgebung ein klarer Handlungsbedarf. Bestehende und neue Schutzzonen müssen konsequent geschützt werden, damit sie von kurzfristigen Verschmutzungen durch Ereignisse in der näheren Umgebung der Fassung (z. B. lecke Tankanlagen, defekte Abwasserleitungen) nicht gefährdet werden können.

Zahlreiche Fassungen mussten sogar aufgegeben werden, weil keine ausreichende Wasserqualität mehr gewährleistet werden konnte oder das Risiko einer Verunreinigung zu gross war. Um die Versorgungssicherheit weiterhin zu gewährleisten, müssen solche Flächenkonflikte gelöst und verbreitete Verunreinigungen des Grundwassers bekämpft werden.

Stossrichtungen der Anpassung an den Klimawandel

- Umsetzung regionales Wasserressourcenmanagement durch die Kantone.
- Ausschöpfung der Potenziale für effizientere Wassernutzung.
- Konsequenter Vollzug des planerischen Grundwasserschutzes und der Planung zur haushälterischen Nutzung des Grundwassers (Art. 43 GSchG i. V. m.

Abb. 7-15: Beeinträchtigung der Umgebung von Grundwasserfassungen durch den Ausbau von Siedlungen und Verkehrswegen

Die ursprünglich im Jahre 1962 auf der grünen Wiese erstellten Grundwasserpumpwerke in Niedergösgen (braun) und Schönenwerd (blau) liegen

1962

2020

Quelle: Lanz K. (Hrsg.) (2020), basierend auf Hug et al. (2017); Kartengrundlage: Bundesamt für Landestopografie

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Gewässerschutz»

- BAFU-Website Restwasser: *www.bafu.admin.ch/restwasser*
- Brunner M. et al. 2019a: Wasserspeicher. Welchen Beitrag leisten Mehrzweckspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit? Hydro-CH2018 Bericht.
- Praxisgrundlagen für ein regionales Wasserressourcenmanagement in drei Modulen: *www.bafu.admin.ch/wasserressourcenmanagement*
- Seibert J. et al. 2018b: BAFU-Projekt Niedrigwasser und Grundwasser.

7.4 Internationale Bedeutung der Schweizer Gewässer

Rhein, Rhone, Ticino, Inn und Doubs transportieren grosse Mengen an Wasser aus der Schweiz in umliegende Länder und weiter bis in die Meere. Da die unterliegenden Länder auf dieses Wasser angewiesen sind, trägt die Schweiz eine grosse Verantwortung für einen sorgsamen Umgang mit dieser Ressource.

Die Nachbarländer und Unterlieger nutzen die Ressource Wasser in vielfältiger Weise, sei es für Trinkwasserzwecke, für die Bewässerung, zur Kühlung oder für die Stromproduktion. Zudem müssen die Grundlagen für eine intakte Gewässerökologie und der Hochwasserschutz auch flussabwärts garantiert sein. Die verschiedenen Interessen werden durch internationale Abkommen, Staatsverträge oder spezifische Gremien geregelt (vgl. Fallbeispiel Ticino, Seite 113). Auch der ungehinderte Schiffsverkehr via Rhein zum Meer ist vertraglich gesichert (revidierte Rheinschifffahrts-Akte oder Mannheimer Akte 1868). Eine Übersicht über die international abgestimmten Interessen gibt Abbildung 7-16.

Folgen für die Rheinanlieger und die Rheinschifffahrt

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Grenzgewässer treffen die Unterlieger zum Teil stärker als die Schweiz selbst. Zum Beispiel treten im Rhein unterhalb von Basel Hochwasser hauptsächlich im Winter auf, wenn der Rhein oberhalb von Basel wenig Abfluss führt. Mit der Zunahme der Winterabflüsse und Winterniederschläge steigt in Zukunft der Hochwasserbeitrag aus der Schweiz in der kalten Jahreszeit. Hingegen geht der Abflussbeitrag aus Schnee und Eis zurück, was künftige Niedrigwasserereignisse im Sommer und Herbst im Unterlauf des Rheins noch verstärken könnte. So stammte etwa beim Niedrigwasserereignis im September 2003 noch über 75 % des Rheinabflusses bei Lobith an der niederländischen Grenze aus dem Einzugsgebiet oberhalb von Basel. Davon stammten 16 % aus der Gletscherschmelze (Stahl et al. 2016). Während dieser anhaltenden und ausgeprägten Niedrigwasserperiode musste die Grossschifffahrt stark reduziert und zeitweise ganz eingestellt werden. In der Folge nahmen die Importmengen auf dem Wasserweg z. B. von Rohöl oder Futtermitteln um rund 20 % gegenüber dem Vorjahr ab (Schweizerische Rheinhäfen 2019). Die wirtschaftliche und strategische Bedeutung der Rheinschifffahrt ist enorm: Mengenmässig werden über 10 % des Aussenhandels der Schweiz via Rhein abgewickelt – etwa 7 Millionen Tonnen Güter und etwa 100 000 Container jährlich. Wegen ihrer grossen Abhängigkeit von Importen über den Rhein ist die Schweiz stark an einer international abgestimmten Bewirtschaftung des Flusses interessiert. Sollten am Rhein in Zukunft, wie von den hydrologischen Szenarien prognostiziert, häufigere und ausgeprägtere Niedrigwasserereignisse auftreten, wäre das mit erheblichen wirtschaftlichen Risiken verbunden.

Zielkonflikte bei der Wassernutzung

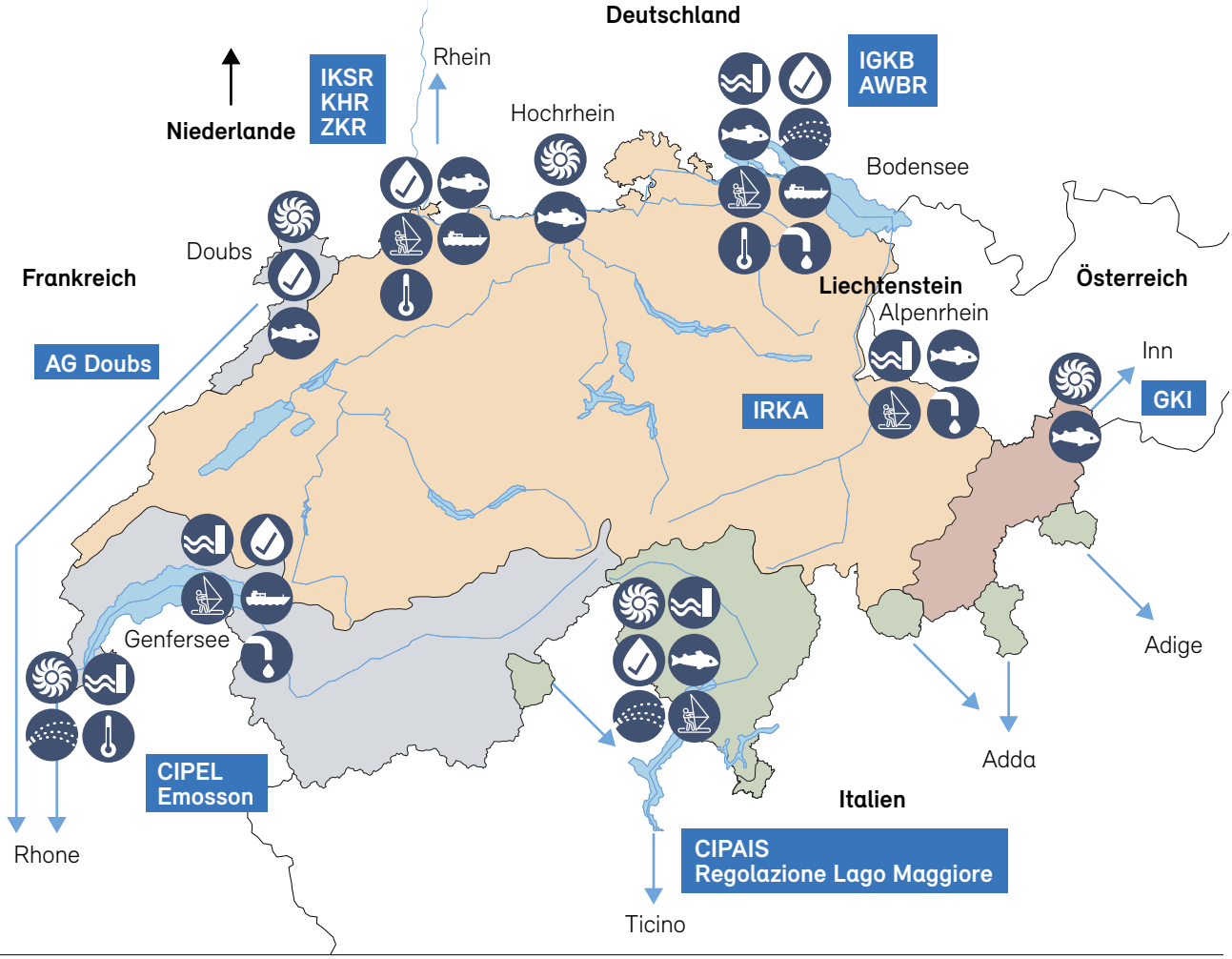
Die Betroffenheit der internationalen Wasserwirtschaft und deren Anpassungsmassnahmen sind aber je nach Region sehr unterschiedlich. Die Reaktionen der verschiedenen Wassernutzer können Zielkonflikte zwischen Ober- und Unterliegern, aber auch zwischen verschiedenen Sektoren verstärken, wie das Fallbeispiel Ticino zeigt.

Stossrichtungen der Anpassung an den Klimawandel

- Nachhaltige Bewirtschaftung der internationalen Flusseinzugsgebiete mit wertvollen Lebensadern für Natur und Mensch, damit diese gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels widerstandsfähiger werden. Sicherstellen oder Verbesserung der Wasserqualität der Gewässer, da sie von den Unterliegern zur Trinkwassergewinnung genutzt werden.
- Optimierung des Wassereinsatzes (Demand Management): Anreize schaffen, um bestehende Wassersparpotenziale zu nutzen, z. B. bei Bewässerung und Kühlung. Dies reduziert den Druck auf die Wasserressourcen und vereinfacht die grenzüberschreitende Zusammenarbeit.

Abb. 7-16: International abgestimmte Bewirtschaftungsaspekte

Die Bewirtschaftung grenzüberschreitender Gewässer bedingt in vielerlei Hinsicht eine abgestimmte Planung. Dazu wurden internationale Kommissionen und Arbeitsgruppen ins Leben gerufen.



Verschiedene Aspekte sind dabei zu berücksichtigen:

- Wasserkraft
- Hochwasserschutz
- Wasserqualität
- Gewässerökologie
- Bewässerung
- Tourismus
- Schifffahrt
- Thermische Nutzung
- Trinkwasserversorgung
- Aare/Rhein
- Rhone
- Inn/Donau
- Ticino/Po

Internationale Gremien

AG Doubs Binationale Arbeitsgruppen Doubs
AWBR Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein
Regolazione Lago Maggiore Bilaterales italienisch-schweizerisches Konsultationsgremium zur Regulierung des Lago Maggiore
CIPAIS Internationale Kommission zum Schutz von Schweizerisch-italienischen Gewässern
CIPEL Internationale Kommission zum Schutz des Genfersees
Emosson Französisch-schweizerische Arbeitsgruppe zum Wasserabkommen von Emosson
GKI Gemeinschaftskraftwerk Inn
IGKB Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee
IKSR Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
IRKA Internationale Regierungskommission Alpenrhein
KHR Hydrologische Kommission des Rheins
ZKR Zentralkommission für die Rheinschifffahrt

Quelle: nach Lanz (Hrsg.) (2020)

Fallbeispiel Ticino, Lago Maggiore

Das Einzugsgebiet des Lago Maggiore teilen sich die Schweiz und Italien je fast zur Hälfte, während sich der See selbst zum grössten Teil in Italien befindet. Die wasserwirtschaftliche Schnittstelle zwischen der Schweiz und Italien ist das Wehr von Sesto Calende, wo der Abfluss des Lago Maggiore in den Ticino seit 1943 reguliert wird. Auf die Abflusssteuerung hat die Schweiz keinen Einfluss, doch wurde schon 1938 zwischen Italien und der Schweiz ein Regulierungsbereich für den Seepegel vereinbart. Innerhalb dieser Koten kann das italienische Consorzio del Ticino frei über den Seeabfluss entscheiden.

Für die flussabwärts liegenden Provinzen Lombardei und Piemont steht in den Sommermonaten die Bewässerung im Vordergrund: Die vom Ticino gespeisten Kanäle Villoresi und Naviglio Grande leiten bis zu 120 m^3/s auf lombardische Ackerflächen (Gandolfi 2003). Weitere Entnahmen kommen den piemontesischen Provinzen Vercelli und Novara zugute, in denen etwa die Hälfte des italienischen Reisanbaus konzentriert ist. Aus Sicht der Bewässerungskonsortien sollte der See als Rückhaltebecken mit hohem Wasserstand bewirtschaftet werden, um auch im Juli und August noch unbegrenzt bewässern zu können. Andererseits liesse sich der Wasserbedarf der Landwirtschaft durch effizientere Anwendungstechniken enorm senken, denn der Flächenanteil von Mikrobewässerungssystemen in der Lombardei betrug 2010 nur 1,4 % (Regione Lombardia 2015).

Der Unterlauf des Ticino mit dem Naturschutzgebiet Parco del Ticino leidet ganzjährig unter verminderten Abflussmengen, da bis zu 90 % des Flusswassers in Kanäle abgeleitet wird. Die dortigen Naturschutzverbände plädieren daher, wie die Landwirtschaft, für einen möglichst hohen Wasserstand im Lago Maggiore, um auch bei anhaltender Trockenheit ausreichende Restwassermengen zu garantieren.

Eine Anhebung des maximalen Wasserpegels im Sommer wird allerdings von den Anrainergemeinden des Lago Maggiore beidseits der Grenze abgelehnt. Ein hoher Wasserstand vermindert die Pufferkapazität für die Aufnahme von Intensivniederschlägen, wie sie im Einzugsgebiet des Lago Maggiore häufig sind. Die Überflutungsgefahr steigt am Seeufer sowie flussabwärts beim Zusammenfluss des Ticino mit dem Po nahe Pavia. Zudem hat ein erhöhter Pegel negative Auswirkungen auf die Nutzbarkeit der Strände und besonders im Frühling auf das Naturschutzgebiet der Bolle di Magadino.

Genau betrachtet ist die Regulierung von Abfluss und Pegel des Lago Maggiore kein Konflikt zwischen Italien und der Schweiz, sondern zwischen den Akteuren am Unterlauf und den Interessen der Seeanlieger.

Weitere Informationen und Referenzen zum Thema «Bewirtschaftung der Grenzgewässer»

- Lanz K. 2020: Bewirtschaftung der Grenzgewässer. In: Lanz K. (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.

8 Verbesserung der Wissensgrundlagen

Die Anpassung an den Klimawandel in der Wasserwirtschaft ist bereits in die Wege geleitet. Um effektiver auf die Folgen des Klimawandels reagieren und um die Anpassungsstrategien weiterentwickeln und optimieren zu können, sind noch mehr qualitativ hochstehende Wissens- und Datengrundlagen notwendig. Die aufgezeigten Forschungslücken müssen geschlossen und das Monitoring verbessert werden. Zudem muss ein Dialog mit den Nutzern dieser Informationen geführt werden.

Für die Anpassung an den Klimawandel sind umfassende Wissensgrundlagen erforderlich, zum einen über die klimabedingt sich verändernden Naturprozesse, zum anderen über die bereits beobachteten und zukünftigen Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Diese Wissens- und Entscheidungsgrundlagen werden in der Regel von Fachspezialistinnen und Fachspezialisten aus Forschung und Umweltbeobachtung in enger Zusammenarbeit mit Experten und Nutzern aus der Praxis erstellt. Darauf aufbauend werden die Anpassungsmassnahmen selbst anschliessend durch Fachleute aus den verschiedenen Sektoren der Wasserwirtschaft entwickelt. Um die Wissensgrundlagen für die Entwicklung von Anpassungsmassnahmen verwenden zu können, müssen sie zusammengetragen, interpretiert und zum Teil weiterentwickelt und nutzergerecht aufbereitet werden.

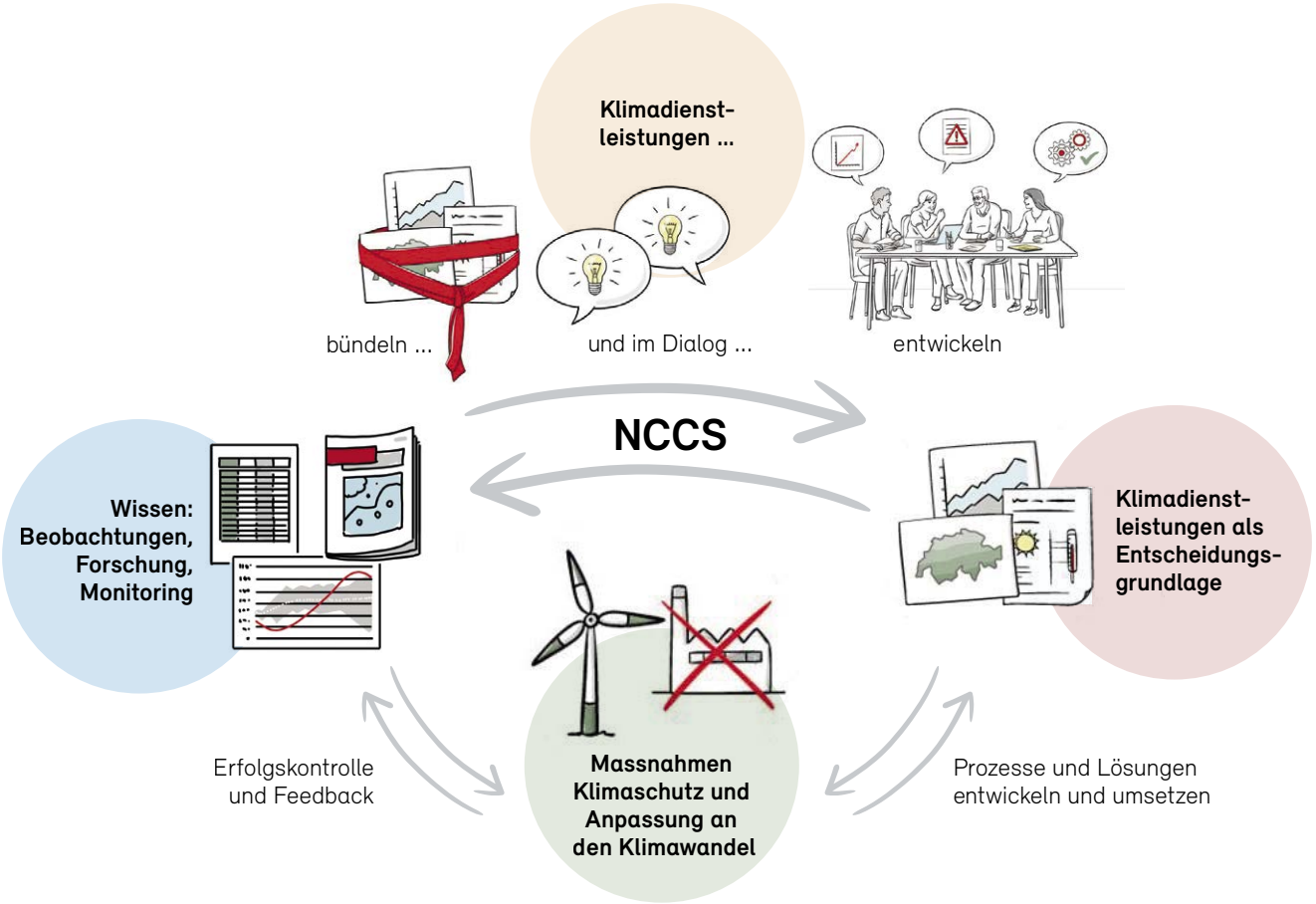
Hydro-CH2018 ist ein Themenschwerpunkt des National Centre for Climate Services (NCCS). Ziel des NCCS ist es, die erforderlichen aufbereiteten Wissensgrundlagen – auch Klimadienstleistungen genannt – für die Schweiz zur Verfügung zu stellen (siehe Kasten). Eine weitere Aufgabe des NCCS ist es, den Wissensbedarf der Praxis an Forschung und Umweltbeobachtung weiterzuleiten. Umgekehrt geben erfolgreich umgesetzte Massnahmen zu Klimaschutz und Anpassung wertvolle Anregungen zur Optimierung der Wissensgrundlagen und besonders der Zukunftsszenarien. Dieser Zusammenhang von Wissen, Klimadienstleistungen und Massnahmen sowie die Rolle des NCCS darin sind in Abbildung 8-1 dargestellt. Diese Arbeiten werden im Rahmen von Themenschwerpunkten durchgeführt.

Klimadienstleistungen und NCCS

Klimadienstleistungen sind auf wissenschaftlichen Erkenntnissen basierende Informationen und Daten über das vergangene, gegenwärtige und zukünftige Klima und seine Folgen für Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft. Sie bilden die Grundlage für klimakompatible Entscheidungen. Von der World Meteorological Organization (WMO) wurde deshalb 2009 das Global Framework for Climate Services GFCS (*https://gfcs.wmo.int/*) ins Leben gerufen, welches dazu aufruft, nationale Koordinationsmechanismen für die Entwicklung und Verbreitung von Klimadienstleistungen zu etablieren. Für die Schweiz koordiniert das 2015 gegründete National Centre for Climate Services NCCS als Netzwerk des Bundes diese Aufgaben. Das NCCS ist im Sinne eines virtuellen Zentrums organisiert und ist ein Zusammenschluss von zentralen und dezentralen Verwaltungseinheiten[8] des Bundes. Ziel des NCCS ist es, Klimadienstleistungen über verschiedene Sektoren hinweg zu bündeln und zur Nutzung zur Verfügung zu stellen, den Dialog mit den Akteuren zu fördern und so koordinierte, massgeschneiderte Klimadienstleistungen zu erstellen und zu kommunizieren. Dies erlaubt es den Nutzenden, Prozesse und Lösungen für den Klimaschutz und die Anpassung an den Klimawandel zu entwickeln.

8 Mitglieder NCCS: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bundesamt für Gesundheit BAG, Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS, Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen BLV, Bundesamt für Energie BFE, ETH Zürich, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Partner NCCS: Agroscope, Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL, ProClim, Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen KGV, Schweizer Hagel-Versicherung, Schweizerischer Versicherungsverband SVV

Abb. 8-1: Zusammenhang von Wissen, Klimadienstleistungen als Entscheidungsgrundlage und Massnahmen zu Klimaschutz und Anpassung sowie die Rolle des NCCS in diesem System



Quelle: nach NCCS

Viele Klimadienstleistungen liegen bereits vor

Die Themenschwerpunkte des NCCS stellen Klimadienstleistungen bereit, wie die Klimaszenarien CH2018 als Grundlage für alle anderen Themenschwerpunkte und die hydrologischen Szenarien Hydro-CH2018. Mit weiteren Projekten des Bundes wie dem Pilotprogramm «Anpassung an den Klimawandel» werden ebenfalls Klimadienstleistungen erstellt. Klimadienstleistungen liegen in den verschiedensten Formen vor:

- Syntheseprodukte ermöglichen den Interessierten einen einfachen und schnellen Zugriff auf das aktuelle Wissen in Form von z. B. Abschluss- und Hintergrundberichten, NCCS-Broschüren, Informationen auf der NCCS-Webplattform (*www.nccs.admin.ch*) und Videos.
- Veranstaltungen wie z. B. Stakeholder-Workshops und das Abschlusssymposium des Projekts Hydro-CH2018, das jährlich stattfindende NCCS-Forum oder das Symposium «Anpassung an den Klimawandel» bieten eine Plattform für die Wissensvermittlung und den Dialog zwischen Wissenschaft und Praxis, aber auch für die Formulierung von Bedürfnissen durch die Stakeholder.
- Datenportale wie der NCCS-Webatlas, HADES-Daten oder das Kartenportal *www.map.geo.admin.ch* stellen Klima- und hydrologische Szenarien, Daten und Grafiken zur Verfügung.
- Durchführung von Beratung, Kommunikation und Medienarbeit zum Thema Klimawandel und Klimadienstleistungen.

Bedürfnis nach weiteren Klimadienstleistungen besteht

Folgender Bedarf an Klimadienstleistungen in den Bereichen Klimaszenarien, Hydrologie und Wasserwirtschaft wurde an einem Stakeholder-Workshop 2018 identifiziert:

- Informationen zu und während Trockenperioden: Einerseits werden aktuelle Informationen und Vorhersagen im Ereignisfall gewünscht, andererseits besteht auch ein Bedürfnis nach hochaufgelösten, langfristigen Projektionen von Niedrigwasser und Trockenheits-Kenngrössen (z. B. Q_{347} und NM7Q).
- Schweizweite und flächendeckende Informationen zu gegenwärtigen und zukünftigen Wassertemperaturen in den Gewässern für den Gewässerschutz und die thermische Nutzung.
- Schweizweite und flächendeckende Informationen zu lokalen und grossräumigen Starkniederschlägen heute und in der Zukunft für Siedlungs- und Strassenentwässerung sowie den Hochwasserschutz.
- Hydrologische Grundlagen für die Landwirtschaft zur Sensibilisierung und als Entscheidungsgrundlagen für die Landwirtschaftspolitik, für die landwirtschaftliche Beratung sowie für Versicherungen, kantonale Fachstellen und landwirtschaftliche Betriebe .
- Informationen im Bereich Grundwasser zum Wärmetransport besonders für urbane Regionen mit grosser Nutzung durch geothermische Sonden; zu Speicherprozessen in Grundwasserleitern sowie zur Bedeutung der Karstregionen während Niedrigwasserperioden.
- Aktivitäten und Materialen für Bildung, Kommunikation, Sensibilisierung und Beratung.

Forschung gezielt weiter vorantreiben

Um die oben beschriebene Nachfrage nach Klimadienstleistungen zu decken, braucht es u. a. weitere Forschung. Neben der Fortführung der Grundlagenforschung mit dem Ziel, Prozesswissen und daraus abgeleitete Modelle zu verbessern, wurden folgende Bereiche als besonders wichtig identifiziert:

- Weiterentwicklung der Klimamodellierung und des statistischen Downscalings, insbesondere unter Berücksichtigung kleinräumiger Prozesse und Strukturen wie z. B. der konvektiven Niederschlagsbildung (z. B. Gewitter). Ziel ist dabei die Verbesserung der räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie der Konsistenz zwischen den einzelnen Klimavariablen. Basierend auf dieser Weiterentwicklung werden präzisere Aussagen zu zukünftigen Entwicklungen der Hochwasser erwartet.
- Aussagen zur Entwicklung/Veränderung von grossflächigen Hochwassern bezüglich Wahrscheinlichkeit, Abfluss und der räumlichen Ausdehnung.
- Systemische Betrachtung des gesamten Wasserkreislaufs: Atmosphäre, Landoberfläche, Hydro(geo)logie, Ökosysteme sowie Auswirkungen verschiedener Nutzungen. Die einzelnen Teilsysteme sind voneinander abhängig und beeinflussen einander stark. Die meisten Umweltmodelle beschränken sich jedoch auf ein Teilsystem, während die anderen Teilsysteme stark vereinfacht oder nur als konstante Randbedingung berücksichtigt werden. Dadurch können Rückkopplungseffekte zwischen den Teilsystemen nur schwer erkannt und quantifiziert werden.
- Vertiefte Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserqualität und die Gewässerökosysteme. So ist beispielsweise über die Folgen einer Zunahme der Bewässerung auf Pestizid- und Nitratbelastung der Gewässer oder zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Erosion und Sedimenttransport noch wenig bekannt. Zudem fehlt es an Wissen über die kombinierte Wirkung von stofflichen Belastungen und klimabedingtem Stress (Multistressoren) auf die aquatischen Ökosysteme.
- Umgang mit den in Vorhersagen enthaltenen Unsicherheiten. Besonders relevant sind Unsicherheiten bei Entwicklungen, die ein System schnell und irreversibel verändern und in einen anderen Systemzustand bringen (Kipppunkte). Das Wissen über solche Kipppunkte reicht für eine Modellierung bisher nicht aus. Ein geeignetes Frühwarnsystem ist aber unerlässlich, um irreversible Veränderungen verhindern zu können. Darum ist im Bereich der Kipppunkte mehr Forschung nötig.
- Sozio-ökonomische und politische Forschung: Gefragt sind sozio-ökonomische Szenarien als Input für die Umweltmodellierung, Kosten-Nutzen-Abwägungen von Klimaschutz und Anpassungsmassnahmen, Akzeptanz und Werte (Legitimation von Handlungsentscheiden) sowie Zielvorgaben zur angestrebten zukünftigen Entwicklung der Gewässer.

Neben der Bereitstellung solcher wissenschaftlichen Grundlagen sollte auch die Vernetzung von Forschung und Praxis weiter intensiviert werden, etwa durch Schaffung systematischer Schnittstellen (wie z. B. VSA-Plattform Wasserqualität).

Hydrologische Szenarien regelmässig aktualisieren
Die Massnahmen zur Anpassung an den Klimawandel sind auf die hydrologischen Szenarien ausgerichtet und zum Teil sehr langfristig angelegt. Eine häufige Aktualisierung der hydrologischen Szenarien könnte daher die Anpassung komplizieren. Deshalb sollten die Szenarien nur bei relevanten Veränderungen im Wasserhaushalt aktualisiert werden. Welche Veränderungen relevant sind, muss im Dialog mit den Nutzern bestimmt werden. Gründe für grosse Veränderungen in den hydrologischen Szenarien können neue Erkenntnisse aus zukünftigen Generationen von Klimaszenarien, neues Prozesswissen oder eine bessere Verfügbarkeit von Grundlagedaten sein. Dafür ist eine Operationalisierung der Erstellung von hydrologischen Szenarien (analog der Klimaszenarien) und ein Monitoring der wissenschaftlichen Entwicklungen im Rahmen des NCCS notwendig.

Bestehendes Monitoring besser auf Klimafragen ausrichten
Sowohl für die Forschung als auch für die Erstellung von Szenarien oder die Umsetzung der Anpassungsmassnahmen im Bereich Wasser sind gute Datengrundlagen zu Klima, Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft und Gebietseigenschaften unerlässlich. Um klimabedingte Veränderungen in den Gewässern beobachten und dokumentieren zu können, braucht es lange und homogene Messreihen, die wasserwirtschaftlich (also durch menschliche Nutzungen) möglichst unbeeinflusst sind. Es ist deshalb sehr wichtig, Messreihen fortzuführen, die diese Kriterien erfüllen. Dies ist nicht selbstverständlich, da immer wieder bestehende Messstandorte aufgegeben oder verschoben werden müssen, z. B. aufgrund von wasserbaulichen Massnahmen für einen besseren Hochwasserschutz, durch den Aus- und Umbau von Wasserkraftnutzungen oder auch, um das Monitoring praktikabler zu gestalten.

Das Monitoring von hydrologischen Parametern (z. B. Abfluss, Grundwasserstand) diente in der Vergangenheit primär der Wassernutzung, dem Hochwasserschutz oder dem Gewässerschutz, nicht der Beobachtung von Auswirkungen des Klimawandels. Einige klimarelevante Parameter und Einzugsgebiete sind deshalb in den Messnetzen unterrepräsentiert. Bei den Abflussmessungen betrifft dies besonders alpine vergletscherte Gebiete, beim Wassertemperatur-Messnetz vor allem kleine Fliessgewässer des Mittellands. Bei den grossen Seen muss die kontinuierliche Aufzeichnung von Temperatur-Tiefenprofilen verstärkt werden. Insbesondere bei Seen im alpinen Bereich, welche sich als Folge des Gletscherrückgangs gerade erst neu bilden, fehlen Grundlagen, bzw. es findet noch gar kein Monitoring statt. Unzureichend ist die Datenlage auch bei Sedimenttransport und Bodenfeuchte.

International werden Daten zu zahlreichen klimarelevanten Messreihen u. a. durch das Global Climate Observing System GCOS[9] gesammelt und verfügbar gemacht. In der Schweiz betreiben verschiedene Institutionen Messnetze, die insgesamt einen sehr breiten Überblick über die Auswirkungen des Klimawandels erlauben. GCOS Schweiz hat zum Ziel, diese klimarelevanten Messreihen zu erhalten, bei Bedarf aufzubauen und zu koordinieren.

Wichtige Datengrundlagen fehlen oder genügen nicht
Die hydrologische Modellierung, aber auch Modellierungen von Entwicklungen in Landwirtschaft, Waldwirtschaft oder Ökologie bilden die Grundlage für diverse Anpassungsmassnahmen. All diese Modelle benötigen Grundlagendaten, welche derzeit nicht oder nicht in ausreichender Qualität und Auflösung verfügbar sind. Im Zentrum stehen hier vor allem systematische und flächendeckende Informationen zu Böden, Geologie und Landnutzung. Vorrangig ist hierbei v. a. die Erhebung schweizweiter Bodeninformationen.

Zahlen über die gegenwärtige Wassernutzung von Landwirtschaft, Tourismus, Industrie und Gewerbe werden von den meisten Kantonen derzeit nicht systematisch erhoben. Auch sozio-ökonomische Zukunftsszenarien, aus denen sich die zukünftige Entwicklung des Wasserverbrauchs ableiten liesse, bestehen nur teilweise. Der Wassereinsatz sowohl individueller Nutzer als auch ganzer Branchen sollte aber als Grundlage einer langfristigen Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel bekannt sein. Denn nur die genaue Kenntnis von Verbrauchsmustern erlaubt es, Versorgungsnetze angemessen zu dimensionieren und den Wassereinsatz auf das langfristig verfügbare Wasserdargebot abzustimmen.

9 *https://gcos.wmo.int*

Ebenfalls nicht systematisch gesammelt werden in der Schweiz Daten zu den bereits beobachteten Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft, beispielsweise wo und wann bei Niedrigwasser Wasserentnahmeverbote ausgesprochen werden müssen. Zwar sind dazu auf kantonaler, regionaler und lokaler Ebene sowie bei privaten Akteuren einige Daten vorhanden, diese werden aber nicht systematisch und einheitlich erhoben und zusammengeführt. Wasserwirtschaftliche Informationen sind aber für die Anpassung an den Klimawandel besonders wichtig, und es besteht ein Bedarf, Daten zu Klimafolgen koordiniert zu erheben und zentral verfügbar zu machen.

9 Fazit: Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel notwendig

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserressourcen sind bereits heute spürbar und werden sich in Zukunft weiter verstärken. Sofern sich der Klimawandel ungebremst fortsetzt, wird es grosse Veränderungen in den Gewässern geben, mit starken negativen Auswirkungen auf die Gewässerökologie und die Wasserwirtschaft. Wenn es gelingt, die Ziele des Übereinkommens von Paris zu erreichen und die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen, können viele dieser Veränderungen vermieden werden, und es wird einfacher und günstiger sein, sich an die Veränderungen anzupassen.

Die Ergebnisse von Hydro-CH2018 zeigen, dass die Abflüsse im Winter zu- und im Sommer weiter abnehmen werden. Auch das Abschmelzen der Gletscher wird sich fortsetzen, und es wird immer weniger Schnee fallen. Aussergewöhnliche Trocken- und Hitzeperioden im Sommer werden gehäuft auftreten und zu Situationen mit Wasserknappheit führen. Die Gewässertemperaturen werden ansteigen, mit teils gravierenden Folgen für die Gewässerlebewesen. Es gibt aber auch noch Unsicherheiten über die zukünftige Entwicklung, beispielsweise hinsichtlich Häufigkeit von hydrologischen Extremereignissen oder dem Erreichen von ökologischen Kipppunkten, ab denen grundlegende und irreversible Veränderungen auftreten. Um die weitere Entwicklung besser abschätzen zu können, sind ein Monitoring der Veränderungen sowie die Verbesserung der Wissensgrundlagen und verlässliche hydrologischen Szenarien unabdingbar. Als Basis dafür muss eine solide hydrologische Messinfrastruktur mit zuverlässigen Datenreihen sichergestellt und weiterentwickelt werden. Auch sind Vorhersagen für Trockenheit und Niedrigwasser notwendig, bei denen neue Methoden aus der Digitalisierung und Fernerkundung zur Anwendung kommen.

Der Gewässerschutz, die Wassernutzung, der Hochwasserschutz, aber auch die Landwirtschaft müssen sich auf die neuen hydrologischen Bedingungen mit veränderter Verfügbarkeit von Wasser einstellen. Es bestehen jedoch grosse Unterschiede im Ausmass der Veränderungen, je nachdem, ob sich das künftige Klima gemäss einem Szenario mit oder ohne globale Klimaschutzmassnahmen entwickelt, wie ein Vergleich der Szenarien für die Fliessgewässer im Sommer exemplarisch zeigt. Mit konsequentem Klimaschutz kann die Temperaturerhöhung der Fliessgewässer im Mittelland bis zum Ende des Jahrhunderts auf unter 2 °C, der Rückgang der Sommerabflüsse auf 20 % begrenzt werden. Hingegen würden sich ohne Klimaschutz die Mittellandflüsse um rund 4,5 °C erwärmen und die Wasserführung im Sommer um bis zu 50 % abnehmen – selbst im langjährigen Durchschnitt. Dies würde auch zu einem häufigeren Trockenfallen kleiner Fliessgewässer führen. Eine Erwärmung und Abnahme des Abflusses in diesem Ausmass würden die Gewässer also zumindest im Sommer in nie dagewesener Weise verändern. Die heutigen Gewässerökosysteme und die Zusammensetzung und Verbreitung von Arten würden sich grundlegend und unaufhaltsam ändern.

Die Begrenzung des Klimawandels ist also auch aus Sicht der Gewässer wichtig. Damit die Ökosysteme auch in ferner Zukunft die wesentlichen Ökosystemfunktionen erfüllen können, ist zudem eine vorausschauende Gewässerentwicklung entscheidend. Das angelaufene Renaturierungsprogramm zur Revitalisierung von Gewässern und zur ökologischen Sanierung der Wasserkraft, die Sicherung angemessener Restwassermengen, der Ausbau von Kläranlagen sowie die Reduktion von Stoffeinträgen aus der Landwirtschaft sind zentral, um den Druck auf die Gewässer zu reduzieren. Dieser Druck wird mit dem Klimawandel weiter ansteigen, weshalb dem Schutz und der Förderung möglichst natürlicher Gewässer eine noch grössere Bedeutung zukommt.

Die Wassernachfrage für Brauchwasser, besonders seitens der Landwirtschaft, wird stark ansteigen, während gleichzeitig das Wasserdargebot knapper wird. Das Fortführen heutiger Systeme und Nutzungen wird vielfach nicht mehr möglich sein, sie müssen angepasst werden. In der Landwirtschaft z. B. kann dies durch den Anbau

trocken- und hitzeresistenter Kulturen oder Sorten, eine effizientere Wasserverwendung oder das Erstellen von Infrastrukturen zur Speicherung und Zufuhr von Wasser geschehen. Auch in Industrie und Gewerbe ist es wichtig, wassersparende Techniken und Verfahren zu entwickeln und zu fördern. Ausserdem sind regionale Wasserversorgungsplanungen über alle Nutzungssektoren hinweg notwendig, um lokalen Engpässen vorzubeugen.

Besonders ausgeprägt werden die Veränderungen im Hochgebirge sein. Der Anstieg der Nullgradgrenze wird Auswirkungen auf den Wintertourismus haben, mit potenziell erheblichen negativen Folgen für die Tourismusindustrie. Dafür entstehen Chancen für den Sommertourismus in den Alpen und an den Gewässern. Durch das Abschmelzen von Gletschern und die Erwärmung des Permafrosts, aber auch durch intensivere Starkniederschläge werden die Naturgefahren zunehmen. Diesen Gefahren wird bereits mit dem integralen Risikomanagement Rechnung getragen.

Im Hochgebirge werden neue Seen, Fliessgewässer und Auenlandschaften entstehen. Diese sind von grosser ökologischer Bedeutung, könnten aber auch für die Stromgewinnung genutzt werden. Dementsprechend ist es wichtig, schweizweit und sektorenübergreifend einen Klärungsprozess bezüglich des zukünftigen Umgangs mit diesen veränderten Landschaften anzustossen. Der hydrologische Wandel im Hochgebirge wird sich auch auf die Nachbarländer auswirken, wo zahlreiche Nutzungen auf das aus der Schweiz abfliessende Wasser angewiesen sind.

Die Natur sowie Wassernutzung, Hochwasserschutz und Gewässerschutz haben bereits begonnen, sich an die veränderten Bedingungen anzupassen. Mit der Strategie «Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz» (BAFU 2012b) hat der Bundesrat den Rahmen für ein koordiniertes Vorgehen geschaffen. Sie beinhaltet die Ziele der Anpassung und beschreibt die grössten Herausforderungen sowie die Handlungsfelder für die Anpassung auf Bundesebene. Die Anpassungsstrategie wurde mit einem ersten Aktionsplan für die Jahre 2014 bis 2019 (BAFU 2014b) umgesetzt. Ein zweiter Aktionsplan, der 2020 verabschiedet wurde, regelt die Umsetzung in den Jahren 2020 bis 2025 (BAFU 2020).

Die Ergebnisse aus Hydro-CH2018 sind – soweit sie schon vorhanden waren – in die Erarbeitung des Aktionsplans 2020 – 2025 eingeflossen (Tabelle A-3). Für eine erfolgreiche Anpassung dürfen die klimabedingten Veränderungen im Wasserhaushalt aber nicht zu schnell ablaufen. Aus Sicht der Gewässer ist es eindeutig: Klimaschutz ist keine Option, sondern eine Notwendigkeit! Nur mit Klimaschutz können weitreichende Veränderungen verhindert und die Kosten für die Anpassung begrenzt werden.

Der Klimawandel ist ein globales Phänomen. Das Übereinkommen von Paris, das am 12. Dezember 2015 an der Klimakonferenz in Paris verabschiedet wurde, verpflichtet die Vertragsparteien, die globale Erwärmung unter 2 °C zu halten und eine maximale Erwärmung von 1,5 °C anzustreben. Die Schweiz hat das Übereinkommen am 6. Oktober 2017 ratifiziert und sich verpflichtet, die Emissionen bis 2030 um 50 % gegenüber dem Stand von 1990 zu senken. Bis 2050 sollen die Treibhausgasemissionen auf «netto null» gesenkt werden. Gleichzeitig muss aber auch die Anpassung an den Klimawandel mit aller Kraft vorangetrieben werden.

10 Literatur

Hydro-CH2018 Berichte

Arnoux M., Hunkeler D., Cochand F., Brunner P., Schaefli B. 2020a: Dynamiques du stockage en eau souterraine et du régime hydrologique des bassins versants alpins face aux changements climatiques. Rapport Hydro-CH2018. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 23.

Ayala A., Farinotti D., Stoffel M., Huss M. 2020: Glaciers. Hydro-CH2018 report. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 44. DOI 10.3929/ethz-b-000398099.

Benateau S., Gaudard A., Stamm C., Altermatt F. 2019: Climate change and freshwater ecosystems: Impacts on water quality and ecological status. Hydro-CH2018 report. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 110. DOI: 10.5167/uzh-169641.

Brunner M., Björnsen Gurung A., Speerli J., Kytzia S., Bieler S., Schwere D., Stähli M. 2019a: Wasserspeicher. Welchen Beitrag leisten Mehrzweckspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit? Hydro-CH2018 Bericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 66.

Burlando P., Peleg N., Moraga-Navarrete S., Molnar P., Fatichi S. 2020: Evaluation of future hydrological scenarios using stochastic high-resolution climate data. Hydro-CH2018 report. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 50.

Epting J., Huggenberger P., Affolter A., Michel A. 2020: Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen. Hydro-CH2018 Bericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 119.

Freudiger D., Vis M., Seibert J. 2020: Quantifying the contributions to discharge of snow and glacier melt. Hydro-CH2018 report. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 50.

Hirschi M., Davin E.L., Schwingshackl C., Wartenburger R., Meier R., Gudmundsson L., Seneviratne S.I. 2020: Soil moisture and evapotranspiration. Hydro-CH2018 report. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 48. DOI: 10.3929/ethz-b-000389455.

Holzkämper A., Cochand F., Rössler O., Brunner P., Hunkeler D. 2020: AgriAdapt – Modellgestützte Untersuchung der Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf Grundwasserressourcen im Berner Seeland. Hydro-CH2018 Bericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 38.

Hunkeler D., Malard A., Arnoux M., Jeannin P.Y., Brunner P. 2020: Effect of Climate Change on Groundwater Quantity and Quality in Switzerland. Hydro-CH2018 report. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 79.

Kohn I., Stahl K., Stoelzle M. 2019: Low Flow Events – a Review in the Context of Climate Change in Switzerland. Hydro-CH2018 report. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 75. DOI: 10.6094/UNIFR/150448.

Lanz K. (Hrsg.) 2020: Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 400.

Marty C., Bavay M., Farinotti A., Huss M. 2020: Snow. Hydro-CH2018 report. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 25. DOI: 10.16904/slf.2.

Matti B., Andres N., Zappa M., Bogner K., Liechti K., Seibert J., van Meerveld I., Viviroli D., Seneviratne S.I., Hirschi M., Schaefli B. (in Erarbeitung): Uncertainty and further methodological topics. Hydro-CH2018 report. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern.

Michel A., Bouffard D., Huwald H., Råman Vinnå C., Schmid M. (in Erarbeitung): Water temperature in lakes and rivers. Hydro-CH2018 report. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern.

Mülchi R., Rössler O., Schwanbeck J., Weingartner R., Martius O. 2020: Neue hydrologische Szenarien für die Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 51.

Nötzli J. und Phillips M. 2019: Mountain permafrost hydrology. Hydro-CH2018 report. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 18. DOI:10.16904/slf.1.

Reynard E., Calianno M., Milano M. 2020*a* Eau et tourisme. Rapport dans le cadre de Hydro-CH2018. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 40.

Reynard E., Calianno M., Milano M. 2020b: Wasser und Tourismus. In: Lanz K. (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 45.

Ruiz-Villanueva V. und Molnar P. 2020: Past, current and future changes in floods in Switzerland. Hydro-CH2018 report. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 79.

Speerli J., Gysin S., Bieler S., Bachmann A.-K. 2020: Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport. Hydro-CH2018 Bericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 49.

Speich M., Lischke H., Zekollari H., Huss M., Farinotti D., Zappa M. (in Erarbeitung): Einfluss der Walddynamik auf den zukünftigen Wasserhaushalt von Schweizer Einzugsgebieten. Hydro-CH2018 Bericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern.

Weingartner R. und Schwanbeck J. 2020: Veränderung der Niedrigwasserabflüsse und der kleinsten saisonalen Abflüsse in der Schweiz im Zeitraum 1961–2018. Hydro-CH2018 Bericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 42.

Weingartner R. 2018: Veränderung der Abflussregimes der Schweiz in den letzten 150 Jahren. Hydro-CH2018 Bericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 67.

Wissenschaftliche Publikationen aus Hydro-CH2018

Arnoux M., Halloran L.J.S., Berdat E., Hunkeler D. 2020b: Characterising seasonal groundwater storage in alpine catchments using timelapse gravimetry, water stable isotopes, and water balance methods. *Hydrological Processes,* 34(22): 4319–4333. DOI: 10.1002/hyp.13884.

Arnoux M., Brunner P., Schäfeli B., Mott R., Cochand F., Hunkeler D. 2021: Low-flow behavior of alpine catchments with varying quaternary cover under current and future climatic conditions. *Journal of Hydrology,* 592: 125591. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125591.

Arnoux M., Cochand F., Schäfeli B., Jonas T., Brunner P., Hunkeler D.: Storage in quaternary deposits buffers the discharge response to climate change of a small alpine catchment. In Erarbeitung für *Groundwater.*

Brunner M., Björnsen Gurung A., Speerli J., Kytzia S., Bieler S., Schwere D., Stähli M. 2019b: Beitrag von Wasserspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit? *Wasser Energie Luft,* 111(3), Baden: 145–152.

Brunner M., Björnsen Gurung A., Zappa M., Zekollari H., Farinotti D., Stähli M. 2019c: Present and Future Water Scarcity in Switzerland: Potential for Alleviation through Reservoirs and Lakes. *Science of The Total Environment,* 666: 1033–1047. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.169.

Brunner M., Farinotti D., Zekollari H., Huss M., Zappa M. 2019d: Future shifts in extreme flow regimes in Alpine regions. *Hydrology and Earth System Sciences,* 23(11): 4471–4489. DOI: 10.5194/hess-23-4471-2019.

Cochand F., Brunner P., Hunkeler D., Rössler O. Holzkämper A.: Cross-sphere modelling to evaluate impacts of climate and land management changes on groundwater dynamics. In Erarbeitung für *Sciences of the Total Environment.*

Epting J., Michel A., Affolter A., Huggenberger H. 2021: Climate change effects on groundwater recharge and temperatures in Swiss alluvial aquifers. *Journal of Hydrology,* 11, 100071. DOI: 10.1016/j.hydroa.2020.100071.

Gaudard A., Råman Vinnå L., Bärenbold F., Schmid M., Bouffard D. 2019: Toward an open access to high-frequency lake modeling and statistics data for scientists and practitioners – the case of Swiss lakes using Simstrat v2.1. *Geoscientific Model Development,* 12(9): 3955–3974. DOI: 10.5194/gmd-12-3955-2019.

Holzkämper A. 2020: Varietal adaptations matter for agricultural water use – a simulation study on grain maize in Western Switzerland. *Agricultural Water Management,* 237(106202). DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106202.

Kellner E. und Brunner M. 2020: Reservoir governance in world's water towers needs to anticipate multi-purpose use. *Earth's Future.* DOI: 10.1029/2020EF001643.

Michel A., Brauchli T., Lehning M., Schaefli B., Huwald H. 2019: Stream temperature evolution in Switzerland over the last 50 years. *Hydrology and Earth System Sciences,* 24(1): 115–142. DOI: 10.5194/hess-24-115-2020.

Michel A., Carletti F., Sharma V., Huwald H., Lehning M.: Snow cover changes in Switzerland using an enhanced temporal downscaling method for climate change scenarios in Switzerland. In Erarbeitung.

Michel A., Lehning M, Huwald H.: Future trends in river temperature in Switzerland using physical models. In Erarbeitung.

Moraga S., Peleg N., Fatichi S., Molnar P., Burlando P.: High-resolution investigation of climate change in mountain catchments reveals diverse impacts on streamflow and its uncertainties. In Erarbeitung für *Journal of Hydrology.*

Mülchi R., Rössler O., Schwanbeck J., Weingartner R., Martius O. 2021a: Future runoff regime changes and their time of emergence for 93 catchments in Switzerland. Eingereicht bei *Hydrology and Earth System Sciences.*

Mülchi R., Rössler O., Schwanbeck J., Weingartner R., Martius O. 2021b: Changes in high and low flow indicators in mesoscale Swiss catchments under climate change. In Erarbeitung für *Hydrology and Earth System Sciences.*

Mülchi R., Rössler O., Schwanbeck J., Weingartner R., Martius O. 2021c: Hydro-CH2018-Runoff: An ensemble of daily simulated discharge data (1981–2099) under climate change conditions for 105 catchments in Switzerland. In Erarbeitung für *Earth System Science Data.*

Råman Vinnå L., Medhaug I., Schmid M., Bouffard D. 2021: The vulnerability of lakes along an altitudinal gradient to climate change. *Nature Communications Earth & Environment* 2, 35. DOI: https://doi.org/10.1038/s43247-021-00106-w.

Schwingshackl C., Davin E.L., Hirschi M., Sørland S.L., Wartenburger R., Seneviratne S.I. 2019: Regional climate model projections underestimate future warming due to missing plant physiological CO_2 response. *Environmental Research Letters,* 14(11): 114019. DOI: 10.1088/1748-9326/ab4949.

Speich M., Zappa M., Scherstjanoi M., Lischke H. 2020: FORests and HYdrology under Climate Change in Switzerland v1.0: a spatially distributed model combining hydrology and forest dynamics. *Geoscientific Model Development,* 13(2): 537–564. DOI: 10.3929/ethz-b-000402828.

Weitere Literatur

Akademie der Wissenschaften Schweiz 2016: Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven. *Swiss Academies Reports,* 11(5): 218.

Alcaraz M., García-Gil A., Vázquez-Suñé E., Velasco V. 2016: Advection and dispersion heat transport mechanisms in the quantification of shallow geothermal resources and associated environmental impacts. *Science of The Total Environment,* 543: 536–546. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.11.022.

ALG (Abteilung Landschaft und Gewässer) 2017: Ereignisanalyse Hochwasser Juli 2017: Gefahrenkarte mit betroffenen Gebäuden, Region Zofingen, Stand 25. Juli 2017. Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Kanton Aargau, Sektion Wasserbau, Aarau.

Altermatt F. 2010: Tell me what you eat and I'll tell you when you fly: diet can predict phenological changes in response to climate change. *Ecology Letters,* 13(12): 1475–1484. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2010.01534.x.

Altermatt F., Seymour M., Martinez N. 2013: River network properties shape α-diversity and community similarity patterns of aquatic insect communities across major drainage basins. *Journal of Biogeography,* 40(12): 2249–2260. DOI: 10.1111/jbi.12178.

ARE (Bundesamt für Raumentwicklung) und BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Hrsg.) 2005: Empfehlung Raumplanung und Naturgefahren. *Vollzug Umwelt,* 7516, Bern: 50.

Badoux A., Hofer M., Jonas T. 2013: Hydrometeorologische Analyse des Hochwasserereignisses vom 10. Oktober 2011. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, geo7 geowissenschaftliches Büro, Bundesamt für Umwelt (BAFU): 92.

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Hrsg.) 2009: Strukturen der Fliessgewässer in der Schweiz. Zustand von Sohle, Ufer und Umland (Ökomorphologie); Ergebnisse der ökomorphologischen Kartierung. Stand: April 2009. *Umwelt-Zustand,* 0926, Bern: 100.

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Hrsg.) 2011: Lebensadern der Landschaft. *Magazin «die umwelt»,* 3: 8–15.

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

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Hrsg.) 2012b: Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder. Erster Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012. *Umwelt-Diverses,* 1055, Bern: 64.

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Hrsg.) 2014a: Grundlagen für die Wasserversorgung 2025. Risiken, Herausforderungen und Empfehlungen. *Umwelt-Wissen,* 1404, Bern: 116.

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Hrsg.) 2014b: Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2014–2019. Zweiter Teil der Strategie des Bundesrates vom 9. April 2014. *Umwelt-Diverses,* 1081, Bern: 100.

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Hrsg.) 2015: Renaturierung der Schweizer Gewässer: Die Sanierungspläne der Kantone ab 2015. Bern: 13.

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Hrsg.) 2016a: Hitze und Trockenheit im Sommer 2015. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. *Umwelt-Zustand,* 1629, Bern: 108.

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Hrsg.) 2016b: Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz. Bericht des Bundesrats in Erfüllung des Postulats 12.4271 Darbellay vom 14.12.2012, Bern: 131.

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Hrsg.) 2017a: Biodiversität in der Schweiz: Zustand und Entwicklung. Ergebnisse des Überwachungssystems im Bereich Biodiversität, Stand 2016. *Umwelt-Zustand,* 1630, Bern: 60.

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Hrsg.) 2017b: Geschiebe und Habitatsdynamik. Merkblatt-Sammlung Wasserbau und Ökologie. *Umwelt-Wissen,* 1708, Bern: 85.

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Hrsg.) 2019a: Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz. Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016. *Umwelt-Zustand,* 1901, Bern: 138.

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Hrsg.) 2019b: Auswirkungen von Hitze und Trockenheit im Sommer 2018. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. *Umwelt-Zustand,* 1909, Bern: 91.

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Hrsg.) 2020: Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2020 – 2025. *Umwelt-Info,* 2022. Bern: 155.

Bálint M., Domisch S., Engelhardt C.H.M., Haase P., Lehrian S., Sauer J., Theissinger K., Pauls S.U., Nowak C. 2011: Cryptic biodiversity loss linked to global climate change. *Nature Climate Change,* 1(6): 313–318. DOI: 10.1038/nclimate1191.

Begert M, Stöckli R, Croci-Maspoli M. 2018: Klimaentwicklung in der Schweiz – Vorindustrielle Referenzperiode und Veränderung seit 1864 auf Basis der Temperaturmessung. *Fachbericht MeteoSchweiz,* 274, Zürich: 23.

Bernacchi C.J. und van Loocke A. 2015: Terrestrial Ecosystems in a Changing Environment: A Dominant Role for Water. *Annual Review of Plant Biology,* 66(1): 599–622. DOI: 10.1146/annurev-arplant-043014-114834.

BFS (Bundesamt für Statistik) 2016: Landwirtschaftliche Betriebszählung – Zusatzerhebung. Neuchâtel.

BFS (Bundesamt für Statistik) 2018: Landwirtschaftliche Strukturerhebung 2017. Weniger Landwirtschaftsbetriebe, aber immer mehr Bio-Betriebe. Medienmitteilung vom 8.5.2018, Neuchâtel: 6. Internet: *https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/aktuell/neue-veroeffentlichungen.assetdetail.5127812.html*. Abgerufen am 04.09.2020.

BFS (Bundesamt für Statistik) 2019: Schweizer Tourismusstatistik 2017, Neuchâtel: 81.

Binderheim E. und Göggel W. 2007: Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer, Äusserer Aspekt. *Umwelt-Vollzug,* 0701. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern: 43.

Blöschl, G., Kiss, A., Viglione, A. et al. 2020: Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years. *Nature,* 583(7817): 560–566. DOI: 10.1038/s41586-020-2478-3.

Borsuk M.E., Reichert P., Peter A., Schager E., Burkhardt-Holm P. 2006: Assessing the decline of brown trout (Salmo trutta) in Swiss rivers using a Bayesian probability network. *Ecological Modelling,* 192(1): 224–244. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.07.006.

Braun C., Gälli R., Leu C., Munz N., Schindler Wildhaber Y., Strahm I., Wittmer I. 2015: Mikroverunreinigungen in Fliessgewässern aus diffusen Einträgen – Situationsanalyse. *Umwelt-Zustand,* 1514. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern: 78.

Brönnimann S., Rohr C., Stucki P., Summermatter S., Bandhauer M., Barton Y., Fischer A., Froidevaux P., Germann U., Grosjean M., Hupfer F., Ingold K., Isotta F., Keiler M., Martius O., Messmer M., Mülchi R., Panziera L., Pfister L., Raible C.C., Reist T., Rössler O., Röthlisberger V., Scherrer S., Weingartner R., Zappa M., Zimmermann M., Zischg A.P. 2018: 1868 – das Hochwasser, das die Schweiz veränderte. Ursachen, Folgen und Lehren für die Zukunft. *Geographica Bernensia* G94: 52. DOI:10.4480/GB2018.G94.01.

Brönnimann S., Frigerio L., Schwander M., Rohrer M., Stucki P., Franke J. 2019: Causes of Increased Flood Frequency in Central Europe in the 19th Century. *Climate of the Past,* 15(4): 1395–1409. DOI: 10.5194/cp-15-1395-2019.

Brown L.E., Hannah D.M., Milner A.M. 2007: Vulnerability of alpine stream biodiversity to shrinking glaciers and snowpacks. *Global Change Biology,* 13(5): 958–966. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2007.01341.x.

Brunner P. und Simmons C.T. 2012: HydroGeoSphere: A fully integrated, physically based hydrological model. *Ground Water,* 50(2): 170-176. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2011.00882.x.

Bundesrat (Hrsg.) 2017: Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. Bericht des Bundesrates, Bern: 78.

Burkhardt-Holm 2009: Klimawandel und Bachforellenrückgang – gibt es einen Zusammenhang? Resultate aus der Schweiz. *Environmental Sciences Europe,* 21(2): 177–185. DOI: 10.1007/s12302-009-0043-7.

Burkhardt-Holm P., Peter A., Segner H. 2002: Decline of fish catch in Switzerland. *Aquatic Sciences,* 64(1): 36–54. DOI: 10.1007/s00027-002-8053-1.

Carlier C., Wirth S.B., Cochand F., Hunkeler D., Brunner P. 2018: Geology controls streamflow dynamics, *Journal of Hydrology,* 566: 756–769. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.08.069.

CH2014-Impacts 2014: Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland. Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, ProClim, Bern: 136. ISBN: 978-3-033-04406-7.

Comola F., Schaefli B., Rinaldo A., Lehning M. 2015: Thermodynamics in the hydrologic response: Travel time formulation and application to Alpine catchments. *Water Resources Research,* 51(3): 1671–1687. DOI: 10.1002/2014WR016228.

Davidson E.A. und Janssens I.A. 2006: Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature,* 440(7081): 165–173. DOI: 10.1038/nature04514.

Davin E.L., Stöckli R., Jaeger E.B., Levis S., Seneviratne S.I. 2011: COSMO-CLM2: a new version of the COSMO-CLM model coupled to the Community Land Model. *Climate Dynamics,* 37(9–10): 1889–1907. DOI: 10.1007/s00382-011-1019-z.

Diersch H.-J. 2014: FEFLOW Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, XXXV: 996. DOI: 10.1007/978-3-642-38739-5.

Ecoplan (in Erarbeitung): Überprüfung der GSchG-Massnahmen hinsichtlich Klimawandel. Projektbericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern.

Elliott J.M. 1994: Quantitative Ecology and the Brown Trout. Oxford series in ecology and evolution, Band 7. Oxford University Press: 286. ISSN: 1746-3130.

Epting J. und Huggenberger P. 2013: Unraveling the Heat Island Effect Observed in Urban Groundwater Bodies – Definition of a Potential Natural State. *Journal of Hydrology.* 501: 193–204. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.08.002.

Epting J., Scheidler S., Egli L., Affolter A., Mueller M.H., García-Gil A., Borer P., Huggenberger P. 2017: Thermal impact of subsurface building structures on urban groundwater ressources. *Science of the Total Environment,* 596–597: 87–96. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.296.

Everall N.C., Johnson M.F., Wilby R.L., Bennett C.J. 2015: Detecting phenology change in the mayfly Ephemera danica: responses to spatial and temporal water temperature variations: Mayfly phenology in relation to river temperature. *Ecological Entomology,* 40(2): 95–105. DOI: 10.1111/een.12164.

Farinotti D., Pistocchi A., Huss M. 2016: From dwindling ice to headwater lakes: could dams replace glaciers in the European Alps? *Environmental Research Letters,* 11(5): 054022. DOI: 10.1088/1748-9326/11/5/054022.

Farinotti D., Round V., Huss M. Compagno L., Zekollari H. 2019: Large hydropower and water-storage potential in future glacier-free basins. *Nature,* 575(7782): 341–344. DOI: 10.1038/s41586-019-1740-z.

Fatichi S., Rimkus S., Burlando P., Bordoy R., Molnar P. 2015: High-resolution distributed analysis of climate and anthropogenic changes on the hydrology of an Alpine catchment. *Journal of Hydrology,* 525: 362–382. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.036.

Fischer M., Huss M., Hoelzle M. 2015: Surface elevation and mass changes of all Swiss glaciers 1980-2010. *The Cryosphere,* 2(2): 525-540. DOI: 10.5194/tc-9-525-2015.

Freiburghaus M. 2009: Wasserbedarf der Schweizer Wirtschaft. *gwa,* 12, Zürich: 1001–1009.

Gallice A., Bavay M., Brauchli T.J., Comola F., Lehning M., Huwald H. 2016: StreamFlow 1.0: an extension to the spatially distributed snow model Alpine3D for hydrological modelling and deterministic stream temperature prediction. *Geoscientific Model Development,* 9(12): 4491–4519. DOI: 10.5194/gmd-9-4491-2016.

Gandolfi C. 2003: Ricerca sui consumi irrigui e le techniche di irrigazione in Lombardia. Università degli Studi di Milano, Istituto di Idraulica Agraria: 225.

Gaudard A., Schmid M., Wüst A. 2017: Thermische Nutzung von Oberflächengewässern. *Aqua & Gas,* 97(5), Zürich: 40–45.

Göggel W. 2012: Revitalisierung Fliessgewässer. Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. *Umwelt-Vollzug,* 1208. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern: 42.

Goudsmit G.-H., Burchard H., Peeters F., Wüest A. 2002: Application of k-e turbulence models to enclosed basins: the role of internal seiches. *Journal of Geophysical Research,* 107: 3230. DOI: 10.1029/2001JC000954.

Haeberli W., Schleiss A., Linsbauer A., Künzler M., Bütler M. 2012: Gletscherschwund und neue Seen in den Schweizer Alpen: Perspektiven und Optionen im Bereich Naturgefahren und Wasserkraft. *Wasser Energie Luft,* 104(2): 94–102. DOI: 10.5167/uzh-140414.

Hagedorn F., Krause H.-M., Studer M., Schellenberger A., Gattinger A. 2018: Boden und Umwelt – Organische Bodensubstanz, Treibhausgasemissionen und physikalische Belastung von Schweizer Boden. Thematische Synthese TS2 des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68), Bern: 93. ISBN: 978-3-907087-30-5.

Hari R.E., Livingstone D.M., Siber R., Burkhardt-Holm P., Güttinger H. 2006: Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology,* 12(1): 10–26. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.001051.x.

Harris R.M.B., Beaumont L.J., Vance T.R., Tozer C.R., Remenyi T.A., Perkins-Kirkpatricket S.E., Mitchel P.J., Nicotra A.B., McGregor S., Andrew N.R., Letnic M., Kearney M.R., Wernberg T., Hutley L.B., Chambers L.E., Fletcher M.-S., Keatley M.R., Woodward C.A., Williams G., Duke, N.C., Bowman D.M.J.S.: 2018: Biological responses to the press and pulse of climate trends and extreme events. *Nature Climate Change,* 8(7): 579–587. DOI: 10.1038/s41558-018-0187-9.

Hendricks Franssen H.-J. und Scherrer S.C. 2008: Freezing of lakes on the Swiss Plateau in the period 1901–2006. *International Journal of Climatology,* 28(4): 421–433. DOI: 10.1002/joc.1553.

Hirschi M., Michel D., Lehner I., Seneviratne S.I. 2017: A site-level comparison of lysimeter and eddy covariance flux measurements of evapotranspiration. *Hydrology and Earth System Sciences,* 21(3): 1809. DOI: 10.5194/hess-21-1809-2017.

Hock R. 1999: A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. *Journal of Glaciology,* 45(149): 101-111. DOI: 10.3189/S0022143000003087.

Hofer S., Egli T., Steingruber N., Lehner M. 2017: Entwicklung von Instrumenten zur Früherkennung und von Lösungsansätzen für die Thurgauer Land- und Ernährungswirtschaft beim Umgang mit Wasserknappheit. Pilotprojekt zur Anpassung an den Klimawandel. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Frauenfeld: 74.

Hug R., Schöni T., Schibli M., Lanz K. 2017: Gutes Wasser für morgen – regionale Wasserversorgungsplanung im Kanton Solothurn am Beispiel Olten Gösgen. *Aqua & Gas,* 97(6), Zürich: 44–51.

Huguenin M.F., Fischer E.M., Kotlarski S., Scherrer S.C., Schwierz C., Knutti R. 2020: Lack of change in the projected frequency and persistence of atmospheric circulation types over Central Europe. *Geophysical Research Letters,* 47(9): e2019GL086132. DOI: 10.1029/2019GL086132.

Hunkeler D., Moeck C., Käser D., Brunner P. 2014: Klimaeinflüsse auf Grundwassermengen. *Aqua & Gas,* 94(11), Zürich: 42–49.

IPBES 2019: Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services: 45.

IPCC 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press: 1535.

Jacobsen D., Cauvy-Fraunie S., Andino P., Espinosa R., Cueva D., Dangles O. 2014: Runoff and the longitudinal distribution of macroinvertebrates in a glacier-fed stream: implications for the effects of global warming. *Freshwater Biology,* 59(10): 2038–2050. DOI: 10.1111/fwb.12405.

Junker J., Heimann F.U.M., Hauer C., Turowski J.M., Rickenmann D., Zappa M., Peter A. 2015: Assessing the impact of climate change on brown trout (Salmo trutta fario) recruitment. *Hydrobiologia,* 751(1): 1–21. DOI: 10.1007/s10750-014-2073-4.

Langhammer L., Grab M., Bauder A., Maurer H. 2019: Glacier thickness estimation of alpine glaciers using data and modeling constraints. *The Cryposphere,* 13(8): 2189–2202. DOI: 10.5194/tc-13-2189-2019.

Lanz K. 2016: Wasser im Engadin – Nutzung, Ökologie, Konflikte. Im Auftrag des WWF Schweiz, Evilard: 101.

Lanz K. und Wechsler T. 2020: Wasserkraft. In: Lanz K. (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 30.

Lehning M., Völksch I., Gustafsson D., Nguyen T.A., Stähli M., Zappa M. 2006: ALPINE3D: a detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology. *Hydrological Processes,* 20(10): 2111–2128. DOI: 10.1002/hyp.6204.

Lorenz R., Jaeger E.B., Seneviratne S.I. 2010: Persistence of heat waves and its link to soil moisture memory. *Geophysical Research Letters.* 37(9). DOI: 10.1029/2010GL042764.

Marty C., Tilg A.-M., Jonas T. 2017: Recent Evidence of Large-Scale Receding Snow Water Equivalents in the European Alps. *Journal of Hydrometeorology,* 18(4): 1021–1031. DOI: 10.1175/JHM-D-16-0188.1.

Maurer M., Chawla F., von Horn J., Staufer P. 2012: Abwasserentsorgung 2025 in der Schweiz. *Schriftenreihe der Eawag,* (21): 232. ISBN: 978-3-906484-54-9.

Merrifield A.L., Simpson I.R., McKinnon K.A., Sippel S., Xie S.-P., Deser C. 2019: Local and nonlocal land surface influence in european heatwave initial condition ensembles. *Geophysical Research Letters,* 46(23): 14082–14092. DOI: 10.1029/2019GL083945.

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. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.250.

Müller U. 2019: Bewässerungsprojekt Furttal. *Agrarbericht 2019.* Müller Ingenieure AG, Dielsdorf. Internet: *https://www.agrarbericht.ch/de/politik/strukturverbesserungen-und-soziale-begleitmassnahmen/bewaesserungsprojekt-furttal?highlight=Furttal*. Abgerufen am 04.09.2020.

NCCS (National Centre for Climate Services) (Hrsg.) 2018: CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz, Zürich: 24. ISBN: 978-3-9525031-0-2.

North R.P., North R.L., Livingstone D.M., Köster O., Kipfer, R. 2014: Long-term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: consequences of a climate regime shift. *Global Change Biology,* 20(3): 811–823. DOI: 10.1111/gcb.12371.

Peleg N., Fatichi S., Paschalis A., Molnar P., Burlando P. 2017: An advanced stochastic weather generator for simulating 2-D high resolution climate variables. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems,* 9(3): 1595–1627. DOI: 10.1002/2016MS000854.

Peleg N., Molnar P., Burlando P., Fatichi S. 2019: Exploring stochastic climate uncertainty in space and time using a gridded hourly weather generator. *Journal of Hydrology,* 571: 627–641. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.02.010.

Pellicciotti F., Brock B., Strasser U., Burlando P., Funk M., Corripio J. 2005: An enhanced temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance: Development and testing for Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. *Journal of Glaciology,* 51(175): 573–587. DOI: 10.3189/172756505781829124.

PERMOS 2019: Permafrost in Switzerland 2014/2015 to 2017/2018. Nötzli J., Pellet C., Staub B. (Hrsg.), Glaciological Report (Permafrost) No. 16–19 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences: 104. DOI:10.13093/permos-rep-2019-16-19.

Pfister C., Weingartner R., Luterbacher J. 2006: Hydrological winter droughts over the last 450 years in the Upper Rhine basin: A methodological approach. *Hydrological Sciences Journal,* 51(5): 966–985. DOI: 10.1623/hysj.51.5.966.

Regione Lombardia 2015: Lombardy Agriculture in Figures 2015. Mailand: 188.

Reynard E., Bonriposi M., Graefe O., Homewood C., Huss M., Kauzlaric M., Liniger H., Rey E., Rist S., Schädler B., Schneider F., Weingartner R. 2014: Interdisciplinary Assessment of Complex Regional Water Systems and their Future Evolution: How Socioeconomic Drivers Can Matter more than Climate. *WIREs Water,* 1(4): 413–426. DOI: 10.1002/wat2.1032.

Rhodes, J., Hetzenauer, H., Frassl, M.A., Rothhaupt, K.O., Rinke, K. 2017: Long-term development of hypolimnetic oxygen depletion rates in the large Lake Constance. *Ambio,* 46(5): 554–565. DOI: 10.1007/s13280-017-0896-8.

Rolls R.J., Heino J., Ryder D.S., Chessman B.C., Growns I.O., Thompson R.M., Gido K.B. 2017: Scaling biodiversity responses to hydrological regimes. *Biological Reviews,* 93(2): 971–995. DOI: 10.1111/brv.12381.

Rosset V. und Oertli B. 2011: Freshwater biodiversity under climate warming pressure: Identifying the winners and losers in temperate standing waterbodies. *Biological Conservation,* 144(9): 2311–2319. DOI: 10.1016/j.biocon.2011.06.009.

Rüegg J. und Robinson C.T. 2004: Comparison of macroinvertebrate assemblages of permanent and temporary streams in an Alpine flood plain, Switzerland. *Archiv für Hydrobiologie,* 161(4): 489–510. DOI: 10.1127/0003-9136/2004/0161-0489.

Russo R., Becher J.M., Liess M. 2018: Sequential exposure to low levels of pesticides and temperature stress increase toxicological sensitivity of crustaceans. *Science of the Total Environment,* 610–611: 563–569. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.073.

Rust P. 2017: See-Energie Projektübersicht ewl (Energie Wasser Luzern). Vortrag anlässlich Eawag-PEAK-Kurs «Heizen und Kühlen mit Seen und Flüssen» am 08.11.2017.

SCCER-SoE (Hrsg.) 2019: Climate change impact on Swiss hydropower production: synthesis report. Swiss Competence Center for Energy Research – Supply of Electricity, Zürich: 28.

Schaefli B., Manso T., Fischer M., Huss M., Farinotti D. 2019: The Role of Glacier retreat for Swiss Hydropower Production. *Renewable Energy,* 132: 615–627. DOI: 10.1016/j.renene.2018.07.104.

Scherrer S.C., Fischer E.M., Posselt R., Liniger M.A., Croci-Maspoli M., Knutti R. 2016: Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres,* 121(6): 2626–2637. DOI: 10.1002/2015JD024634.

Schlesinger W.H., Dietze M.C., Jackson R.B., Phillips R.P., Rhoades C.C., Rustad L.E., Vose J.M. 2015: Forest biogeochemistry in response to drought. *Global Change Biology,* 22(7): 2318–2328. DOI: 10.1111/gcb.13105.

Schmid M. 2019: verwundBAR: Wie verändert die Energienutzung die Gewässertemperaturen? *Forum für Wissen. Schweiz erneuerbar! WSL Berichte,* 84, Birmensdorf: 31–36.

Schmocker-Fackel P. und Naef F. 2010: Changes in Flood Frequencies in Switzerland since 1500. *Hydrology and Earth System Sciences,* 14(8): 1581–1594. DOI: 10.5194/hess-14-1581-2010.

Schürch M., Bulgheroni M., Sinreich M. 2018: Température des Eaux Souterraines. Un Aperçu de l'Etat et de l'Evolution en Suisse. *Aqua & Gas,* 98(7), Zürich: 40–48.

Schwefel R., Gaudard A., Wüest A., Bouffard D. 2016: Effects of climate change on deepwater oxygen and winter mixing in a deep lake (Lake Geneva): Comparing observational findings and modeling. *Water Resources Research,* 52(11): 8811–8826. DOI: 10.1002/2016WR019194.

Schweizerische Rheinhäfen 2019: Niedrigwasser prägt Güterumschlag 2018 – Container bleiben auf Rekordniveau. Medienmitteilung vom 07.02.2019, Basel. Internet: *https://port-of-switzerland.ch/niedrigwasser-praegt-gueterumschlag-2018-container-bleiben-auf-rekordniveau/.* Abgerufen am 04.09.2020.

Seibert J. und Vis M. 2012: Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences,* 16(9): 3315–3325. DOI: 10.5194/hess-16-3315-2012.

Seibert J., Vis M., Kohn I., Weiler M., Stahl K. 2018a: Technical note: Representing glacier geometry changes in a semi-distributed hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences,* 22(4): 2211–2224. DOI: 10.5194/hess-22-2211-2018.

Seibert J., Weiler M., Stahl K., Brunner P., Hunkeler D. 2018b: BAFU-Projekt Niedrigwasser und Grundwasser. Synthesebericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern: 54.

Seilbahnen Schweiz 2017: Fakten und Zahlen zur Schweizer Seilbahnbranche, Bern: 36. Internet: *http://docplayer.org/71756776-Fakten-zahlen-zur-schweizer-seilbahnbranche.html*. Abgerufen am 04.09.2020.

Serquet G. und Rebetez M. 2011: Relationship between tourism demand in the Swiss Alps and hot summer air temperatures associated with climate change. *Climatic Change,* 108(1): 291–300. DOI: 10.1007/s10584-010-0012-6.

Sinreich M., Kozel R., Lützenkirchen V., Matousek F., Jeannin P.-Y, Loew S., Stauffer F. 2012: Grundwasserressourcen der Schweiz – Abschätzung von Kennwerten. *Aqua & Gas,* 92(9), Zürich:16–28.

Soria M., Leigh C., Datry T., Bini L.M., Bonada N. 2017: Biodiversity in perennial and intermittent rivers: a meta-analysis. *Oikos,* 126(8): 1078–1089. DOI: 10.1111/oik.04118.

Speich M.J.R., Bernhard L., Teuling A.J., Zappa M. 2015: Application of bivariate mapping for hydrological classification and analysis of temporal change and scale effects in Switzerland. *Journal of Hydrology,* 523: 804–821. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.086.

Stahl K., Weiler M., Freudiger D., Kohn I., Seibert J., Vis M., Gerlinger K., Böhm M. 2016: Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels. Abschlussbericht an die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR), Freiburg im Breisgau: 151.

Stöckle C.O., Donatelli M., Nelson R. 2003: CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy,* 18: 289–307. DOI: 10.1016/S1161-0301(02)00109-0.

Straile D., Kerimoglu O., Peeters F., Jochimsen M.C., Kümmerlin R., Rinke K., Rothhaupt K.-O. 2010: Effects of a half a millennium winter on a deep lake – a shape of things to come? *Global Change Biology,* 16(10), 2844–2856. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02158.x.

Stucki P., Rickli R., Brönnimann S., Martius O., Wanner H., Grebner D., Luterbacher J. 2012: Weather Patterns and Hydro-climatological Precursors of Extreme Floods in Switzerland since 1968. *Meteorologische Zeitschrift,* 21(6): 53–550. DOI: 10.1127/0941-2948/2012/368.

STV (Schweizer Tourismus-Verband) 2019: Schweizer Tourismus in Zahlen 2018. Schweizer Tourismus-Verband, Bern: 60.

SVGW (Schweizerische Verein des Gas- und Wasserfaches) 2015: Branchenbericht der schweizerischen Wasserversorgung: für eine sichere und nachhaltige Trinkwasserversorgung, Zürich: 40.

SVGW (Schweizerische Verein des Gas- und Wasserfaches) 2020: Statistische Erhebungen der Wasserversorgungen in der Schweiz, Betriebsjahr 2018, Information W 15 001, Zürich: 91.

Technischer Bericht CH2018 2018: CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. National Centre for Climate Services (NCCS), Zürich: 271. ISBN: 978-3-9525031-4-0.

Urban M.C., Bocedi G., Hendry A.P., Mihoub J.B., Pe'er G., Singer A., Bridle J.R., Crozier L.G., Meester L.D., Godsoe W., Gonzalez A., Hellmann J.J., Holt R.D., Huth A., Johst K., Krug C.B., Leadley P.W., Palmer S.C.F., Pantel J.H., Schmitz A., Zollner P.A., Travis J.M.J. 2016: Improving the forecast for biodiversity under climate change. *Science,* 353(6304). DOI: 10.1126/science.aad8466.

Van Asch M., Salis L., Holleman L.J.M., van Lith B., Visser M.E. 2013: Evolutionary response of the egg hatching date of a herbivorous insect under climate change. *Nature Climate Change,* 3(3): 244–248. DOI: 10.1038/nclimate1717.

Viviroli D., Gurtz J., Zappa M., Weingartner R. 2009: An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and psot-processing tools. *Environmental Modelling & Software,* 24(10): 1209 – 1222. DOI: 10.1016/j.envsoft.2009.04.001.

Vogel M.M., Orth R., Cheruy F., Hagemann S., Lorenz R., van den Hurk B.J.J.M., Seneviratne S.I. 2017: Regional amplification of projected changes in extreme temperatures strongly controlled by soil moisture-temperature feedbacks, *Geophysical Research Letters,* 44(3): 1511–1519. DOI: 10.1002/2016GL071235.

Weingartner R. und Aschwanden H. 1992: Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.2, Bern.

Wernli H., Naef F., Piaget N., Smoorenburg M. 2016: Heavy Precipitation and Flood, Final Report. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Zürich: 51.

Weusthoff T. 2011: Weather type classification at MeteoSwiss: Introduction of new automatic classification schemes, *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz,* 235: 46.

Woollings T., Barriopedro D., Methven J. Son S., Martius O., Harvey B., Sillmann J., Lupo A., Seneviratne S.I. 2018: Blocking and its Response to Climate Change. *Current Climate Change Reports,* 4(3): 287–300. DOI: 10.1007/s40641-018-0108-z.

Zarrineh N., Abbaspour K.C., Holzkämper A. 2020: Integrated assessment of climate change impacts on multiple ecosystem services in Western Switzerland. *Science of The Total Environment,* 708: 135212. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135212.

Zekollari H., Huss M., Farinotti D. 2019: Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *The Cryosphere,* 13(4): 1125–1146. DOI: 10.5194/tc-13-1125-2019.

11 Glossar

Abflussregime: glazial, nival, pluvial
Charakteristischer Verlauf der jahreszeitlichen Abflüsse eines Fliessgewässers, der von meteorologischen Faktoren und den Eigenschaften des Einzugsgebiets abhängt. Glaziale Regime sind durch die Gletscherschmelze im Sommer geprägt, nivale Regime durch die Schneeschmelze im Frühjahr, pluviale Regime durch das Wechselspiel von Regen und Verdunstung.

Biodiversität
Die Biodiversität umfasst die verschiedenen Lebensformen (Arten von Tieren, Pflanzen, Pilzen, Bakterien), die unterschiedlichen Lebensräume, in denen Arten leben (Ökosysteme wie Gewässer), sowie die genetische Vielfalt innerhalb der Arten (z. B. Unterarten, Sorten und Rassen).

Emissionsszenarien, RCP2.6, RCP8.5
Mögliche zukünftige Entwicklungspfade des menschlichen Ausstosses von Treibhausgasen und Aerosolen. Die neusten Emissionsszenarien (Representative Concentration Pathways, RCP) geben an, wie sich die Treibhausgas- und Aerosolkonzentrationen entwickeln müssen, um ein bestimmtes Klimaziel zu erreichen. 2.6 und 8.5 sind der erwartete Strahlungsantrieb im Jahr 2100 in W/m^2
RCP2.6: Emissionspfad bei konsequentem Klimaschutz, welcher dem Übereinkommen von Paris entspricht
RCP8.5: Emissionspfad ohne Klimaschutzmassnahmen

NM7Q
Die jährlich kleinsten über 7 Tage gemittelten Abflüsse. Durch die Mittelung über mehrere Tage ist diese Niedrigwasserkenngrösse weniger anfällig als andere Kenngrössen auf Messfehler oder kurzfristige anthropogene Einflüsse.

Oberflächenabfluss
Oberflächenabfluss ist Regenwasser, das besonders bei starken Niederschlägen nicht versickert, über das offene Gelände abfliesst und so Schäden anrichten kann.

PKD
PKD ist die englische Abkürzung (Proliferative Kidney Disease) für eine bei gewissen Fischarten auftretende Nierenkrankheit. Die Krankheit kann tödlich verlaufen, wenn die Wassertemperatur über längere Zeit über 15 °C liegt.

Q_{347}
Die Abflussmenge Q_{347} ist gemäss Art. 4 Gewässerschutzgesetz diejenige Abflussmenge, die, gemittelt über zehn Jahre, durchschnittlich während 347 Tagen (95. Perzentil) des Jahres erreicht oder überschritten wird und die durch Stauung, Entnahme oder Zuleitung von Wasser nicht wesentlich beeinflusst ist.

Rückkopplungseffekte
Reaktion eines Systems auf eine Veränderung: Eine positive Rückkopplung ist ein selbstverstärkender Prozess, eine negative Rückkopplung bedeutet, dass eine Veränderung durch eine entgegengesetzte Reaktion kompensiert wird.

Schwall-Sunk
Kurzfristige und häufige Wechsel des Abflusses aufgrund der Turbinierung von Speicherwasser in Wasserkraftwerken zur Stromproduktion. Schwall-Sunk-Strecken sind Fliessgewässerabschnitte, die von solchen Abflussschwankungen betroffen sind.

Starkniederschlag
Starkniederschlag ist ein Niederschlag, der im Verhältnis zu seiner Dauer eine hohe Niederschlagsintensität aufweist. Starkniederschlagsereignisse können sowohl Niederschläge kurzer Dauer und hoher Intensität als auch mehrere Stunden oder Tage anhaltende Niederschläge mit grossen Niederschlagshöhen sein. Neben der Niederschlagsdauer und -häufigkeit ist auch die Grösse der vom Starkniederschlag betroffenen Fläche wesentlich.

Wasserwirtschaft
Die Wasserwirtschaft umfasst alle Aktivitäten des Menschen zur Nutzung des Wassers, zum Schutz des Wassers sowie zum Schutz vor den Gefahren des Wassers.

12 Anhang

Tab. A1: Verwendete Modelle im Projekt Hydro-CH2018

Modell	Verwendete Ansätze	Kalibration	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung	Literatur
PREVAH-WSL	Verdunstung: Penman-Monteith Abflussbildung: PREVAH HBV-type Schneeschmelze: Degree-day-extended (Hock 1999) Gletschereisschmelze: Degree-day extended (Hock 1999). Nur Gletscherausdehnung wird berücksichtigt. Gletscherausdehnung wird alle 5 Jahre aufdatiert mit Daten aus Zekollari et al. (2019)	Kalibration an gemessenen Abflüssen. Regionalisierung für Gebiete ohne Abflussmessung mit Kriging.	Raster politische Schweiz 500 × 500 m Raster hydrologische Schweiz 200 × 200 m	1 Tag	Brunner et al. 2019c Speich et al. 2015
PREVAH-UniBE	Verdunstung: Hamon Abflussbildung: PREVAH HBV-type Schneeschmelze: Degree-day (Hock 1999) Gletschereisschmelze: Degree-day extended (Hock 1999). Nur Gletscherausdehnung wird berücksichtigt. Gletscherausdehnung wird alle 5 Jahre aufdatiert mit Daten aus Zekollari et al. (2019)	Kalibration an Abfluss. Keine Regionalisierung.	HRU-basiert; 93 Einzugsgebiete	1 Tag	Viviroli et al. 2009
HBV Light-UniZH	Verdunstung: Hamon Grad-Tag-Ansatz für Schnee- und Gletschereisschmelze Gletscherveränderungen mit dem Huss-dH-Ansatz simuliert (Seibert et al. 2018a)	Kalibration an gemessenen Abflüssen, Schneelinie aus MODIS, Gletschervolumen. Regionalisierung der Abflussbildungsparameter für Gebiete ohne Abflussmessung.	Semi-distribuiert, HRU-basiert; 190 vergletscherte Einzugsgebiete	1 Tag	Seibert und Vis 2012 Seibert et al. 2018a
COSMO-CLM2-gekoppeltes regionales Klimamodell ETH Zürich			Europa im Raster 0,44 × 0,44° (50 km)	1 Tag	Davin et al. 2011
Simstrat (v. 2.1.2) Eawag	Eindimensionales (vertikal aufgelöstes) hydrodynamisches Modell	Kalibriert mit gemessenen Temperaturen für 27 der 29 simulierten Seen	0,5 m (vertikal)	10 Minuten	Goudsmit et al. 2002 Gaudard et al. 2019
Snowpack/ Alpine3D, StreamFlow EPFL	Physikalisch basierte Ansätze. Aufenthaltszeit des Wassers im Boden ist nach Comola et al. (2015) parametrisiert und die Wasserkonzentration nach Gallice et al. 2016.	Snowpack/Alpine3D: keine Kalibration Streamflow: Kalibration Aufenthaltszeit des Wassers im Boden und Bodenwärmefluss	Snowpack/ Alpine3D: 100 oder 500 m Streamflow: 100 oder 500 m	1 Stunde	Lehning et al. 2006 Gallice et al. 2016
Hydrogeosphere Uni Neuchâtel	Verdunstung: Aktuelle Evapotranspiration Bodenwasser-Grundwasser-Abflussbildung voll gekoppelt Grundwasser: Räumlich verteiltes Fliessfeld nach Darcy Gleichung Abfluss: Abfluss im Flussnetz Schneeschmelze: Degree-day	Kalibration an gemessenen Schneehöhen, Abfluss und Grundwasserständen	Finite Elemente (2 bis 100 m)	1 Stunde bis 1 Tag	Brunner und Simmons 2012

Modell	Verwendete Ansätze	Kalibration	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung	Literatur
Feflow©, ArcMap© Uni Basel	«Raster analysis», «Hydrology Tool» (ArcMap©), Fliessdauer abgeleitet aus berechneten Fliesslängen und Darcy-Fliessgeschwindigkeiten «GeoTher» tool (Alcaraz et al. 2016)	Basel-Stadt: Kalibration und Validierung an Hydraulik und Temperaturdaten von >100 GW-Messstellen	5 bis 25 m	1 Tag	Diersch 2014 Alcaraz et al. 2016 Epting et al. 2013 Mueller et al. 2018
PREVAH-WSL gekoppelt mit Waldentwicklungsmodell	Verdunstung: Penman-Montheith Abflussbildung: PREVAH HBV-type Schneeschmelze: Degree-day-extended (Hock 1999) Gletschereisschmelze: Degree-day extended (Hock 1999). Die Gletscherveränderungen mit dem Huss-dH-Ansatz simuliert	Kalibration an gemessenen Abflüssen. Regionalisierung für Gebiete ohne Abflussmessung mit Kriging.	200 × 200 m 6 Grossregionen in unterschiedlichen Klimaregionen der Schweiz und Abwechslung zwischen süd- und nordexponierten Hängen.	1 Tag	Speich et al. 2015 Speich et al. 2020
Topkapi-ETH ETHZ angetrieben mit Wettergenerator AWE-GEN-2d	Räumlich verteiltes und physikalisch explizites Modell Verdunstung: Priestley-Taylor Wellenablauf im Gerinne: Kinematic wave (Fatichi et al. 2015) Schneeschmelze und Gletschereisschmelze: Temperaturindexmethode (Pellicciotti et al. 2005)	Kalibration an gemessenen Abflüssen	100-m-Raster für Thur, Kleine Emme und Maggia	1 Stunde, Downscaling mit Wettergenerator	Fatichi et al. 2015 Peleg et al. 2017 Peleg et al. 2019 Peleg et al. 2020
Pflanzenwachstumsmodell CropSyst	Verdunstung: Penman-Montheith Bodenwassergehalt: Kaskadenmodell (täglich)	Kalibration an statistischen Ertragsdaten	Feldskala	1 Tag	Stöckle et al. 2003

Tab. A2a: Für hydrologische Modellierung verwendete Klimamodellketten RCP8.5

Manche Klimamodellketten liegen in zwei räumlichen Auflösungen vor: EUR-11- oder 0,11°-Auflösung als x markiert und EUR-44- oder 0,44°-Auflösung als (x) markiert.

Globales Klimamodell GCM	Modell-lauf	Regionales Klimamodell RCM	PREVAH-WSL	PREVAH-UniBE	HBV Light-UniZH	ETH Zürich Boden	See Eawag	Wassertemp. EPFL	UniNE GW-Neubildung	UniNE alpine HSG	UniNE alpine HSG	Uni Basel	Topkapi-ETHZ	HSG Agriadapt	Cropsyst Agriadapt	WSL- Waldentwicklung
ICHEC-EC-EARTH	r1i1p1	KNMI-RACM022E	x	x	x	(x)	x	(x)								x
	r3i1p1	DMI-HIRHAM5	x(x)	x(x)	x	x	x	x					x		x	x(x)
	r12i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17		x	x	x							x			
	r12i1p1	CLMcom-CCLM5-0-6	x	x	x	(x)	x									x
	r12i1p1	SMHI-RCA4	x(x)	x(x)	x	x	x		x				x			x(x)
MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	KNMI-RACM022E	x	x	x	(x)	x	(x)							x	x
		CLMcom-CCLM4-8-17	x	x(x)	x	x	x						x		x	x
		CLMcom-CCLM5-0-6	x	x	x	(x)	x	(x)								x
		SMHI-RCA4	x(x)	x(x)	x	x	x		x		x		x			x(x)
		ICTP-RegCM4-3			x	(x)										
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17		x(x)	x	x							x			
		CLMcom-CCLM5-0-6	x	x	x	(x)	x									x
		MPI-CSC-REMO2009		x(x)									x			
		SMHI-RCA4	x(x)	x(x)	x	x	x	(x)	x	x	x	x	x		x	x(x)
	r2i1p1	MPI-CSC-REMO2009		x(x)	x	x										
MIROC-MIROC5	r1i1p1	CLMcom-CCLM5-0-6	x	x	x	(x)	x									x
		SMHI-RCA4	x	x	x	(x)	x	(x)	x						x	x
CCCma-CanESM2	r1i1p1	SMHI-RCA4	x	x	x	(x)	x	(x)	x	x	x					x
CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	r1i1p1	SMHI-RCA4		x	x	(x)	x		x					x	x	
IPSL-IPSL-CMSA-MR	r1i1p1	SMHI-RCA4		x(x)	x	x	x						x			
NCC-NorESM1-M	r1i1p1	SMHI-RCA4	x	x	x	(x)	x									x
NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	r1i1p1	SMHI-RCA4		x	x	(x)	x									

Tabelle A2b: Für hydrologische Modellierung verwendete Klimamodellketten RCP2.6

Manche Klimamodellketten wurden in zwei räumlichen Auflösungen verwendet: EUR-11- oder 0,11°-Auflösung als x markiert und EUR-44- oder 0,44°-Auflösung als (x) markiert.

Globales Klimamodell GCM	Modell-lauf	Regionales Klimamodell RCM	PREVAH-WSL	PREVAH-UniBE	HBV Light-UniZH	ETH Zürich Boden	See Eawag	Wassertemp. EPFL	UniNE GW-Neubildung	UniNE alpine HSG	UniNE alpine HSG	Uni Basel	Topkapi-ETHZ	HSG Agriadapt	Cropsyst Agriadapt	WSL- Waldentwicklung
ICHEC-EC-EARTH	r1i1p1	KNMI-RACM022E														
	r3i1p1	DMI-HIRHAM5	x	x(x)	x		x	(x)						x	x	x
	r12i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17														
	r12i1p1	CLMcom-CCLM5-0-6														
	r12i1p1	SMHI-RCA4	x(x)	x(x)	x		x									x(x)
MOHC-HadGEM2-E	r1i1p1	KNMI-RACM022E	x	x	x		x	(x)							x	x
		CLMcom-CCLM4-8-17														
		CLMcom-CCLM5-0-6														
		SMHI-RCA4	x	x	x		x									x
		ICTP-RegCM4-3														
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17														
		CLMcom-CCLM5-0-6														
		MPI-CSC-REMO2009		x(x)												
		SMHI-RCA4	x	x	x		x	(x)				x			x	x
	r2i1p1	MPI-CSC-REMO2009		x(x)	x											
MIROC-MIROC5	r1i1p1	CLMcom-CCLM5-0-6														
		SMHI-RCA4	x	x	x		x	(x)							x	x
CCCma-CanESM2	r1i1p1	SMHI-RCA4														
CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	r1i1p1	SMHI-RCA4														
IPSL-IPSL-CMSA-MR	r1i1p1	SMHI-RCA4														
NCC-NorESM1-M	r1i1p1	SMHI-RCA4	x	x	x		x									x
NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	r1i1p1	SMHI-RCA4														

Tab. A3: Anpassungsmassnahmen an den Klimawandel auf Bundesebene

Dargestellt sind Massnahmen mit Bezug zu Wasserwirtschaft und Gewässern im ersten und zweiten Aktionsplan AP1 und AP2 sowie der Stand ihrer Umsetzung (BAFU 2014b und 2020).

	Nummer	Name	Stand 2020
Wasser	AP2-w1	Erhebung Wasserbedarfsdaten Schweiz	Neue Massnahmen
	AP2-w2	Überprüfung der Gewässerschutzmassnahmen hinsichtlich Klimawandel	
	AP1-w1	Planungsinstrumente für eine Wasserressourcen-Bewirtschaftung	Werden fortgeführt
	AP1-w3	Vernetzung und Sicherung der Wasserversorgung	
	AP1-w4	Potenzial von Wasserrückhalt und Speichern	
	AP1-w5	Seeregulierung	
	AP1-w6	Schweizer See- und Speichermanagement im internationalen Kontext	
	AP1-w7	Berücksichtigung veränderter Abfluss- und Temperaturregimes bei der Siedlungsentwässerung	
	AP1-w10	Früherkennung von Trockenheit	
	AP1-w2	Rahmenbedingungen Gewässerbewirtschaftung im Einzugsgebiet – Förderung durch Kommunikation, Wissensaustausch und Ausbildung	Sind abgeschlossen
	AP1-w8	Wärmeeinleitung in Gewässer	
	AP1-w9	Wasserqualität – Verhinderung einer zusätzlichen Beeinträchtigung der Gewässer durch Starkniederschläge oder die Bewässerung von Kulturen	
	AP1-w11	Korrektur Schifffahrtsrinne Basel–Birsfelden	
Naturgefahren	AP1-n1	Monitoring der Gefahrenprozesse	Werden fortgeführt
	AP1-n2	Gefahren und Risiken kennen	
	AP1-n3	Schutzmassnahmen robust und angepasst auslegen	
	AP1-n4	Raumplanerische Massnahmen umsetzen: Reduktion des Schadenpotenzials durch risikobasierte Raumplanung	
	AP1-n5	Naturereignisse erfolgreich bewältigen	
	AP1-n6	Naturgefahrenbewusstsein, Weiterbildung und Forschung im Bereich Naturgefahren stärken	
Boden	AP2-s1	Umsetzungskonzept nationale Bodenkartierung	Neue Massnahme
Landwirtschaft	AP1-l1	Optimierter Einsatz von angepassten Sorten und Rassen inkl. Umgang mit Schadorganismen	Werden fortgeführt
	AP1-l2	Schonende Nutzung von Boden und Wasser	
	AP1-l3	Erarbeitung von Grundlagen für die standortangepasste Bewirtschaftung	
Energie	AP1-e4	Studien zu Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung inkl. Sensibilisierung der Betroffenen	Werden fortgeführt
	AP1-e5	Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels in der Talsperrenaufsicht	Sind abgeschlossen
	AP1-e6	Prüfung der Vorschriften zur Rückleitung von Kühlwasser	
Biodiversität	AP2-b7	Beschattung durch Bestockung	Neue Massnahme
	AP1-b3	Sicherstellung ökologischer Mindestanforderungen und Aufwertungsmassnahmen für auf ausreichende Wasserversorgung besonders angewiesene Lebensräume	Sind abgeschlossen
Grundlagen	AP2-wg4	Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweiz – CH-Impacts	Neue Massnahme
	AP1-wg1	Regelmässige Erstellung von regionalen Klimaszenarien für die Schweiz	Werden fortgeführt
	AP1-wg2	Hydrologische Grundlagen und Szenarien für die Anpassung an den Klimawandel	
	AP1-wg3	Konzept für die Erhebung von Bodeninformationen	Ist abgeschlossen