

NFP 61 – Thematische Synthese 1
im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61
«Nachhaltige Wassernutzung»

Wasserressourcen der Schweiz

Dargebot und Nutzung – heute und morgen

Astrid Björnsen Gurung und Manfred Stähli



Nachhaltige Wassernutzung
Nationales Forschungsprogramm NFP 61



SCHWEIZERISCHER NATIONALFONDS
ZUR FÖRDERUNG DER WISSENSCHAFTLICHEN FORSCHUNG

NFP 61 – Thematische Synthese 1
im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61
«Nachhaltige Wassernutzung»

Wasserressourcen der Schweiz

Dargebot und Nutzung – heute und morgen

Astrid Björnsen Gurung und Manfred Stähli

Impressum

Autorenteam:

Dr. Astrid Björnsen Gurung, WSL

Dr. Manfred Stähli, WSL

Empfohlene Zitierweise: Björnsen Gurung, Astrid; Stähli, Manfred (2014): Wasserressourcen der Schweiz: Dar- gebot und Nutzung – heute und morgen. Thematische Synthese 1 im Rahmen des Nationalen Forschungspro- gramms NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung», Bern.

Erarbeitet und publiziert mit Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissen- schaftlichen Forschung im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 «Nachhaltige Wassernut- zung».



Nachhaltige Wassernutzung
Nationales Forschungsprogramm NFP 61



SCHWEIZERISCHER NATIONALFONDS
ZUR FÖRDERUNG DER WISSENSCHAFTLICHEN FORSCHUNG

Leitungsgruppe: Prof. em. Christian Leibundgut (Präsident), Universität Freiburg i.Br.; Prof. Günter Blöschl, Tech- nische Universität Wien; Prof. Dietrich Borchardt, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung UFZ, Leipzig; Ulrich Bundi (bis 2013), Eawag, Dübendorf; Prof. Bernd Hansjürgens, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung UFZ, Leip- zig; Prof. Bruno Merz, GeoForschungsZentrum, Potsdam; Prof. i.R. (Universität Wien) Franz Nobilis, Ministerialrat im Lebensministerium (Sektion Wasser, Hydrographisches Zentralbüro), Wien

Programmbeirat: Dr. Christoph Böhnner, Dienststelle für Landwirtschaft und Wald, Kanton Luzern; Katharina Dob- ler (bis 2013), Amt für Gemeinden und Raumordnung, Kanton Bern; Dr. Anton Kilchmann, Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW); Roger Pfammatter, Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband (SWV); Irène Schmidli (bis 2011), Amt für Wasser und Abfall, Bern; Moritz Steiner, Dienststelle für Energie und Wasserkraft, Kanton Wallis; Adèle Thorens Goumaz, Nationalrätin VD, Grüne; Luca Vetterli, Pro Natura Ticino; Hansjörg Walter, Nationalrat TG, SVP; Martin Würsten, Amt für Umwelt, Kanton Solothurn

Delegierte der Abteilung IV des Nationalen Forschungsrats: Prof. Nina Buchmann, ETH Zürich

Bundesvertreter: PD Dr. Stephan Müller, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern

Programmkordinatorin: Dr. Barbara Flückiger Schwarzenbach, Schweizerischer Nationalfonds SNF, Bern

Leiterin Wissensaustausch: Dr. Patricia Fry, Wissensmanagement Umwelt, Zürich

Sprecher: Dr. Bruno Schädler, Universität Bern

Video, Videostills und -zitate: Patricia Fry, Wissensmanagement Umwelt; Renata Grünenfelder, Halbbild Halbton

Layout und Grafik: Esther Schreier, Ilaria Curti, Basel; Guido Köhler, Atelier Guido Köhler & Co., Binningen

Druck: PrintMediaWorks, Schopfheim im Wiesental

Papier: LuxoSatin, FSC-zertifiziert, 135 g/m² (Inhalt), 250 g/m² (Umschlag)

Übersetzung: Trad8, Delémont

Bilder Umschlag: Patricia Fry, Videostills aus den Projekten SACFLOOD, HYDROSERV, NELAK, GW-TEMP, WATER- CHANNELS. Hintergrundfotos Beat Ernst, Basel

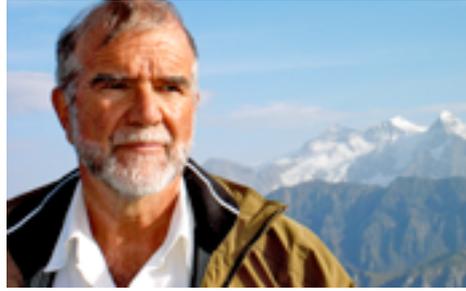
Bilder und Zitate: Wenn nicht anders vermerkt, stammen die verwendeten Bilder (Videostills) und Zitate aus den NFP 61-Videos «Einblick» und «Ausblick» (siehe auch www.nfp61.ch). Die Quelle ist jeweils mit dem entsprechenden NFP 61-Projekt Kürzel vermerkt. Die Zitate widerspiegeln die Meinung der abgebildeten Personen.

Für die erwähnten Forschungsergebnisse sind die jeweiligen Forschungsteams verantwortlich, für die Themati- schen Synthesen und die Empfehlungen die Autorenteams, deren Auffassung nicht notwendigerweise mit der- jenigen des Schweizerischen Nationalfonds, der Mitglieder der Leitungsgruppe oder des Programmbeirats über- einstimmen muss.

Inhalt

4	Vorwort
6	Zusammenfassung
7	Summary
8	Wasserressourcen Schweiz: aktuelle Situation
8	Wasserverfügbarkeit und -verteilung
12	Wasserknappheit
13	Hochwasser
17	Ökologischer Zustand
21	Aktuelle Nutzung der Wasserressourcen
21	Trinkwasserversorgung
22	Energiewirtschaft
25	Landwirtschaft
27	Siedlungs- und Verkehrsflächen
28	Industrie und Gewerbe
28	Rohstoffgewinnung
29	Schifffahrt
29	Tourismus
30	Wassergouvernanz und Wasserinfrastruktur
33	Klima- und Gesellschaftswandel: Auswirkungen auf die natürlichen Wasserressourcen
33	Klimabedingte Änderungen und Auswirkungen bis 2050 und 2085
34	Niederschlag und Verdunstung
36	Gletscher
37	Bodenwasser
38	Grundwasser
39	Abfluss
44	Oberflächengewässer
45	Zukünftige Nutzungsansprüche von Gesellschaft und Natur
45	Landschafts- und Landnutzungswandel
47	Siedlungs- und Verkehrsflächen, Infrastruktur und Schifffahrt
47	Energiewirtschaft
49	Landwirtschaft
52	Waldentwicklung
53	Tourismus
53	Gewässerschutz
54	Schlussfolgerungen
56	Abbildungsverzeichnis
56	Tabellenverzeichnis
56	Literatur
65	Dank
66	Anhang
66	Was ist das NFP 61?
66	Die 16 Forschungsprojekte des NFP 61
68	Produkte des NFP 61

Vorwort



Prof. em. Dr. Christian Leibundgut

Das Nationale Forschungsprogramm «Nachhaltige Wassernutzung» (NFP 61) wurde 2008 gestartet, um **Grundlagen für eine Zukunftsstrategie zur Sicherung der Ressource Wasser und der Wasserwirtschaft in der Schweiz** zu erarbeiten.

Bereits zu Beginn war erkennbar, dass vom Klimawandel und von gesellschaftlichen Entwicklungen wie der zunehmenden Zersiedelung der Schweiz und den internationalen Marktöffnungen ein massgeblicher Druck auf die Ressource Wasser ausging. Eine angestrebte nachhaltige Nutzung des Wassers wird zudem durch politische und wirtschaftliche Einflussfaktoren erschwert, die oftmals weder vorhersehbar noch in ihren Folgewirkungen abschätzbar sind.

Mit dem breit angelegten Programm wurde das hohe Potenzial der Wasserforschung in der Schweiz zusammengeführt und gefestigt. Vor dem Hintergrund der teilweise unkontrollierbaren Einflussfaktoren sollten die vorhandenen wissenschaftlichen Bausteine über die Forschung weiterentwickelt, strategisch vernetzt und auf ein gemeinsames Ziel hin fokussiert werden, um auch als Grundlage für eine nationale Wasserstrategie zu dienen. Dazu musste jedoch ein **Paradigmenwechsel** vorgenommen werden von der partiellen Betrachtung von Wasserproblemen zur ganzheitlichen Betrachtung der Systeme und Einzugsgebiete. Eine ganzheitliche und integrale Herangehensweise bedeutet, die Wasserressourcen gemeinsam mit den übrigen Ressourcen und gesellschaftlichen Aktionsfeldern zu behandeln. Dazu zählen die Energieproduktion, die land- und forstwirtschaftliche Produktion sowie die gegenseitigen Rückkopplungen, die beispielsweise durch die Wasserkraftnutzung, die Flusskorrekturen und Gewässerrevitalisierungen, die Siedlungsentwicklung und die Ansiedlung von Industrie und Gewerbe, den Tourismus und den Erholungssektor ausgelöst werden.

Die **Transdisziplinarität** hat in diesem Programm einen hohen Stellenwert. Die Forschung wurde von Beginn an unter Einbezug von Stakeholdern betrieben, und dem Weg der Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis wurde grosses Gewicht beigemessen. Erfahrene Anwendergruppen halfen mit, die Entwicklung von Werkzeugen wie Anleitungen und Modellen praxisnah zu gestalten. Mit dieser konzeptionell im Programm verankerten Arbeitsweise – Vernetzung und Austausch zwischen Forschung und Anwendung – könnte eine Umsetzung in die Praxis mit langfristiger Wirkung erleichtert werden.

Eine nachhaltige Wassernutzung kann nur unter Einbezug weiterer Lebens- und Wirtschaftsbereiche konzeptionell entworfen und realisiert werden. So stand die **ganzheitliche und integrale Vorgehensweise** grundsätzlich im Mittelpunkt der Projektarbeiten des NFP 61; sie bildet eine massgebliche Grundlage für ein erfolgreiches Wassermanagement und die zugehörige Wasserpolitik in der Schweiz (Wassergouvernanz).

Niemand konnte zu Programmbeginn davon ausgehen, dass sich der Parameter «unkontrollierbare Einflussfaktoren» so schnell konkretisieren würde. Die europäische Energiepolitik zum Beispiel schwenkte auf eine beschleunigte Energiewende ein. Dies wird massive Auswirkungen auch auf den Wassersektor in der Schweiz haben. Die angepeilte **Wasserstrategie** wurde vorläufig verschoben, und damit fehlt ein solider Pfeiler, um die Interessenabwägungen mit anderen Politikfeldern wie z.B. der Energiepolitik aus einer integralen Sicht und auf allseitig fundierten Grundlagen zu führen.

Diese Entwicklung zeigt, wie schnell sich Einflussfaktoren und die Interessen treibender Kräfte ändern können und dass eine frühzeitige Vorsorge umso wichtiger ist.

Das NFP 61 hat sich in **16 Projekten** zentralen Aspekten der schweizerischen Wasserwirtschaft gewidmet. **Vier Thematische Synthesen** zu wichtigen Schwerpunkten hatten das Ziel, für Fachleute in Bund, Kantonen und der Praxis die **Projektresultate miteinander zu verknüpfen und projektübergreifend Schlussfolgerungen zu ziehen**. Dafür wurden auch externe Forschungsergebnisse eingearbeitet, sodass ein **Gesamtbild der nachhaltigen Wassernutzung in der Schweiz** der Zukunft entstand. Dies ist zusammenfassend in der **Gesamtsynthese** dargestellt.

Die fünf nun vorliegenden Synthesebände dieses Nationalen Forschungsprogrammes sind ein faszinierendes Kompendium zu Nutzung und Umgang mit dem Wasser in der Schweiz. Sie zeigen auf, wie in der Schweiz die Zukunft des Wassersektors gestaltet sein könnte, was auf uns zukommen kann und welche Vorsorgemassnahmen zu empfehlen sind.

Ein grosser Dank gilt allen, die sich über Jahre mit Begeisterung intensiv für das Programm eingesetzt haben: den Forschenden, den Mitgliedern der Leitungsgruppe und des Beirates, der Leiterin Wissensaustausch, der Programmkoordinatorin und den weiteren Mitarbeitenden des SNF, den Beteiligten aus dem BAFU und weiteren Bundesämtern, den Kantonen, Regionen, Gemeinden und Verbänden sowie den Autorinnen und Autoren der Synthesen.

Präsident der Leitungsgruppe des NFP 61

Christian Leibundgut





Zusammenfassung

Links: Berge als Wolkenfänger. (Foto VBS)

Mitte: Moore sind hochwirksame Speicher. (Foto Ariel Bergamini)

Rechts: Wasserkraftproduzenten werden von den Folgen des Klimawandels betroffen sein. (FUGE)

Die Alpen stellen sich quer. Mit Berggipfeln bis zu 4810 m Höhe wirkt das Alpenmassiv als **Wetterbarriere**, welche feuchte Luftmassen in kühlere Höhen leitet und überdurchschnittliche Mengen über der Schweiz zum Ausregnen oder Ausschneien bringt [1]. Als Ursprungsland wichtiger Ströme gilt die Schweiz als **Wasserschloss Europas**. Dieses wird bereits heute durch den Klimawandel merklich beeinflusst. Gleichfalls wirken demografische, wirtschaftliche und politische Kräfte auf die Wasserverfügbarkeit sowie auf die Nutzungsansprüche in der Schweiz.

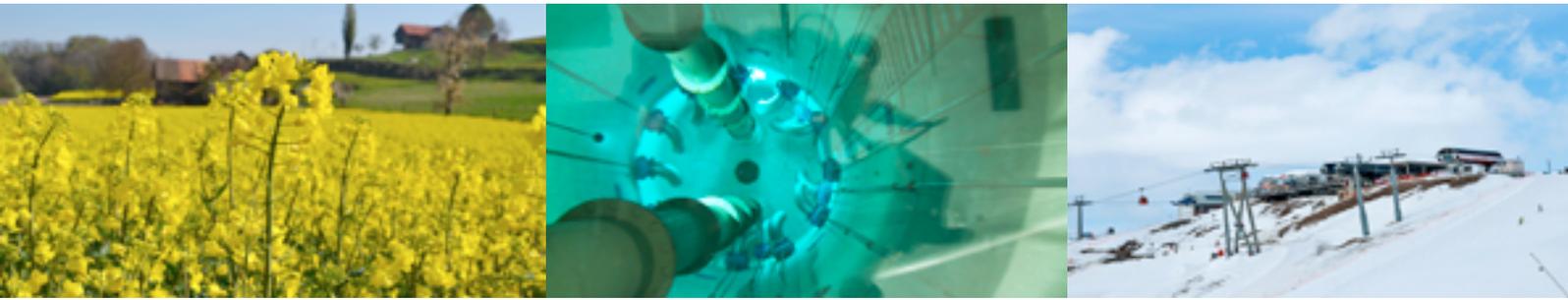
Die vorliegende Thematische Synthese präsentiert **Grundlagen zum heutigen Wasserdargebot und dessen Nutzung** in der Schweiz und skizziert die **zukünftigen Rahmenbedingungen** aus klimatischer und gesellschaftlicher Sicht. Sie macht deutlich, dass selbst in der Schweiz Wasser keine unendliche Ressource darstellt und Anpassungen notwendig werden. Dies betrifft v.a. **die Wasser- und Elektrizitätswirtschaft, die Industrie und das Gewerbe, die Landwirtschaft, die Schifffahrt und den Tourismus**. Um auch zukünftig genügend Wasser in ausreichender Qualität zur Verfügung zu haben, ist die Wasserforschung der Schweiz aufgefordert, neben fundiertem Systemwissen auch Grundlagen für die Formulierung von gesellschaftlichen Zielen und die dazu notwendigen Weichenstellungen bereitzustellen.

Selbst wenn sich die jährlich zur Verfügung stehende Wassermenge bis Ende Jahrhundert kaum vermindert, wird sich das zeitliche und räumliche **Wasserangebot in alpinen Gebieten** aufgrund des Klimawandels stark verändern, vor allem in der 2. Jahrhunderthälfte. Die schwindende Speicherkapazität von Schnee und Gletschern wird sich insbesondere auf den Wintertourismus und die Wasserkraft auswirken. Die Betreiber der Wasserkraftanlagen müssen sich auf neue Abflussregimes, eine grössere Geschiebeverfügbarkeit und neue Gefahrensituationen einstellen, welche sich aufgrund des Gletscherschwunds und der neu entstehenden Gletscherseen ergeben. Im **Mittelland** führt das zukünftige Klima einerseits zu einer veränderten Hochwassergefahr, andererseits zu einer starken Verminderung der Abflüsse im Spätsommer, was insbesondere die Rheinschifffahrt zeitlich einschrän-

ken dürfte. Indirekt betroffen sind auch viele **Grundwasserreserven**, die inskünftig wegen lang anhaltender Trockenperioden **im Sommer öfter unter Druck** geraten. Selbst wenn dank des NFP 61 die üppigen Grundwasserspeicher in der Schweiz – insbesondere in Karstgebieten – besser erfasst werden konnten, wird zugleich deutlich, dass viele dieser Reserven wegen technischer, wirtschaftlicher, ökologischer oder rechtlicher Beschränkungen nicht nutzbar sind. Viel stärker als das Klima wirken sich in den dicht besiedelten **Gebieten des Mittellandes** nämlich die **wachsenden Nutzungsansprüche** und neue Schadstoffeinträge auf die verfügbare Wassermenge sowie auf die Wasserqualität aus. Dort ist die nachhaltig nutzbare Grundwassermenge nur unzureichend beschrieben, vor allem in Situationen lang anhaltender Trockenheit.

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Nutzungsansprüche, die auf engstem Raum auf die Schweizer Gewässer einwirken, darf sich **nachhaltige Wassernutzung** nicht ausschliesslich mit dem Wasserdargebot und dem Erhalt der Wasserqualität befassen, sondern **muss den gesamten Gewässerraum betrachten**, der die Ressource Wasser hervorbringt, erhält und speichert. Zudem bringt der Standortvorteil, den die Schweiz in Bezug auf Wasser als Oberlieger hat, Verantwortung für die Nachbarstaaten mit sich. **Neben einer Schweizer Wasserstrategie bedarf es einer grenzüberschreitenden Vision zur zukünftigen Raum- und Ressourcennutzung**, in welcher Wasserdargebot und -nutzung eine zentrale Stellung einnehmen. Die Schweiz kann dazu auf lange Messreihen und imposante Datenbanken zurückgreifen. Durch die Schliessung von Datenlücken (z.B. Bodenfeuchte oder Geschiebetransport) und eine verstärkte Zusammenarbeit zwischen den Akteuren könnte das Systemwissen zugunsten der nachhaltigen Wassernutzung weiter ausgebaut und besser genutzt werden.

Klar ist: Die Berge werden auch in Zukunft für reichlich Niederschläge und Abflüsse sorgen. **Doch als Gemeinschaft müssen wir heute die Weichen für die Generation von morgen stellen**. Die NFP 61-Projekte haben das dazu notwendige Wissen und geeignete Instrumente erarbeitet.



Summary

The Alps are an obstacle. With summits of up to 4810 metres above sea level, they function as a barrier pushing water-saturated air up into cooler spheres, thereby triggering above-average rainfall and snowfall [1]. As many important rivers originate in Switzerland, the country is referred to as the «water tower» of Europe. Climate change has already altered this setting. At the same time, demographic, economic and political drivers influence water availability and demand in Switzerland.

This thematic synthesis presents the **foundations of today's water availability and management** in Switzerland and outlines the **anticipated future situation** with regard to climate and society. The synthesis makes clear that even in Switzerland water resources can become scarce and, as a consequence, call for adaptation measures. **Water management agencies and hydropower companies will be particularly affected alongside industry, agriculture, shipping and tourism.** In order to provide sufficient water of adequate quality also in future, Swiss water research is asked to generate sound systems knowledge. Of equal importance though is the provision of expertise to formulate social targets and, closely related, the development of appropriate steering instruments to reach those targets.

Even though the annual water availability will not significantly decrease until the end of the century, climate change will affect the spatial and temporal **water availability in Alpine areas**, particularly in the second half of the century. The dwindling storage capacity of snow and glaciers will notably have an impact on winter tourism and hydropower production. Operators of hydropower plants will have to cope with altered discharge regimes, increased sediment supplies and new hazards triggered by melting glaciers and emerging glacial lakes.

On the **central plateau** (Mittelland), the future climate will alter flood hazards in general and increase the number of low-flow situations in late summer, affecting, for instance, shipping on the river Rhine. Indirectly, **groundwater storage** will be affected and will reach critical levels during **the more frequent summer droughts**. Although the research conducted by NRP 61 succeeded in quantifying Switzerland's groundwater storage capacities, which

are abundant particularly in Karst areas, the results reveal that many of those vast groundwater resources cannot be exploited due to technical, economic, ecological and legal restrictions. In the densely populated **regions of the central plateau**, it is not so much the changing climate but the **growing user demands** and new polluting factors that affect water availability and quality. The amount of groundwater that can be sustainably used on the plateau is insufficiently described, especially during extended drought events.

Due to the wide range of overlapping user demands that have an impact on rivers and lakes in Switzerland, **sustainable water management** cannot solely focus on water quantity and quality but **needs to encompass the entire aquatic system**, i.e. the system that generates, sustains and stores the water. Moreover, the locational advantage of Switzerland entails a high responsibility towards downstream neighbours. Accordingly, **a cross-border vision for future spatial planning and resource use** – within which water availability and management plays a central role – **needs to be developed in addition to a Swiss water strategy**. To this end, Switzerland can take stock of long-term monitoring data and extensive databases. The closure of knowledge gaps (e.g. soil moisture or sediment transport) and increased cooperation could enhance system knowledge as a whole and thereby facilitate the expansion of sustainable water management and use.

No doubt, mountains will trigger ample precipitation and run-off also in future. **Yet, today's society needs to set the course for the generations to come.** With this in mind, the projects of NRP 61 have elaborated the necessary knowledge and suitable tools.

Links und rechts: In der Landwirtschaft und im Tourismus werden Anpassungen an den Klimawandel notwendig sein. (AGWAM)

Mitte: Grundwasserpumpbrunnen. (GW-TEMP)

Rechts: Mont-Lachaux. (Foto Emmanuel Rey)

Wasserressourcen Schweiz: aktuelle Situation

Die Schweiz ist privilegiert: Neben regelmässigen Niederschlägen profitiert das Land von riesigen Wasserspeichern, deren Grösse dem sechsfachen Jahresniederschlag entspricht. Das Gewässerschutzgesetz gewährleistet den Schutz von Wasserressourcen und Lebensräumen und sichert daher auch die Nutzung. Das vorliegende Kapitel macht deutlich, dass die Nutzbarkeit des Wasserdargebots nicht nur örtlich und zeitlich variiert, sondern auch durch Nährstoff- und Schadstoffbelastungen oder die Temperatur empfindlich geschmälert werden kann. Für eine ganzheitliche Betrachtung der Schweizer Wasserressourcen müssen neben den Ansprüchen von Gesellschaft und Wirtschaft auch zwingend diejenigen des Ökosystems berücksichtigt werden.

Wasserverfügbarkeit und -verteilung

Mit einem Volumen von rund 363 km³ verfügt die Schweiz über einen üppigen Wasserspeicher. Teilt man die jährlich erneuerte Wassermenge (40 km³) durch die Einwohnerzahl (8 Mio.), stehen pro Kopf 5000 m³ Wasser zur Verfügung. Das ist viel. Aber nicht alles Wasser kann gefasst und am richtigen Ort, zum richtigen Zeitpunkt und in der gewünschten Menge und Qualität zur Verfügung gestellt werden. Das tatsächliche Wasserdargebot wird massgeblich durch die Jahreszeiten sowie durch die Topografie und den Untergrund geprägt. Um es zu nutzen, müssen Menge und Qualität bestimmt werden. In der Schweiz wird Oberflächen- und Grundwasser über ein dichtes Netz von Messstationen beobachtet, um schwankende Pegelstände, Verunreinigungen oder andere problematische Veränderungen frühzeitig zu erkennen und entsprechende Gegenmassnahmen zu ergreifen.

Messnetze

Quantität und Qualität des Wasserdargebots sind allgemein gut erfasst, könnten aber von einer verbesserten Koordination, Vernetzung und Datenverfügbarkeit profitieren [2]. Derzeit laufen Anstrengungen, auf Bundesebene ein gesamtschweizerisches Umweltbeobachtungssystem (NUS) zu realisieren. Für die nachhaltige Wassernutzung sind insbesondere folgende Messnetze bedeutsam:

Das **Basisnetzwerk des Bundesamtes für Umwelt** misst Wasserstände und Abflüsse an Oberflächengewässern und dient als Grundlage für den Hochwasserschutz, die Wasserkraftnutzung und zur Untersuchung der Auswirkungen von Klimaveränderungen. Ergänzend liefert die nationale Daueruntersuchung der Fliessgewässer **NADUF** Informationen zur Wasserqualität. Dabei werden

u.a. Wassertemperatur, Nähr- und Schadstoffkonzentrationen gemessen. Weit dichter ist das Messnetz der Nationalen Beobachtung Oberflächenwasserqualität **NAWA**, wo Bund und Kantone den Zustand und die Entwicklung der Gewässer anhand chemisch-physikalischer und biologischer Parameter dokumentieren. Die Nationale Grundwasserbeobachtung **NAQUA** erfasst in Zusammenarbeit mit Bund, Universitäten, Wasserversorgungen und Kantonen sowohl Quantität als auch Qualität und liefert damit Grundlagen für den gesamtschweizerisch koordinierten Grundwasserschutz. Im Rahmen von NAQUA wurde **ISOT**, ein Modul zur Beobachtung der Isotopen im Wasserkreislauf, ins Leben gerufen. Eine Vielzahl von Institutionen beteiligt sich schweizweit an den Isotopenmessungen im Niederschlagswasser, in Fliessgewässern, Seen, Gletschern, im Schnee und im Grundwasser [3]. Isotopenmessungen erlauben die Erfassung von Wasservolumina, Fliesswegen und Aufenthaltszeiten in den verschiedenen Komponenten des Wasserkreislaufs. Für zahlreiche Prognosen und Modellierungen unverzichtbar ist auch das interkantonale Mess- und Informationssystem **IMIS**, das in grösseren Höhenlagen über den ganzen Schweizer Alpenraum verteilt Informationen zur Schneehöhe und anderen Klimaparametern liefert. Die stündlich übertragenen Daten dienen verschiedenen Vorhersagen (Schneesituation, Lawinen, Abfluss und Naturgefahren). Für die Risikobeurteilung, aber auch für Gewässerrenaturierungen bedeutend ist das Monitoring von Feststofffrachten. Eines der weltweit wenigen, grossräumig und langfristig angelegten Messnetze für Feststofffrachten ist das vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) unterhaltene Geschiebemessnetz **SOLID** [4]. Ergänzend führt die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) in mehreren Einzugsgebieten kontinuierliche, indirekte Messungen der Geschiebetransportintensität mit dem Swiss Plate Geophone System durch. Für den Wasserkreislauf relevant sind auch Klimabeobachtungen zu Niederschlag, Strahlung und Wasserdampf, wie sie durch das automatische Bodenmessnetz (**SwissMetNet**) und das manuelle Niederschlagsmessnetz der Meteo-Schweiz seit Jahrzehnten erhoben werden. Für die ökologische Zustandsbeurteilung der Oberflächengewässer wurde in Zusammenarbeit von Bund, Kantonen und des Wasserforschungsinstituts Eawag das **Modul-Stufen-Konzept** entwickelt (Abb. 1) [5].

Die Schweiz verfügt über reichlich Daten, was das Dargebot, den Zustand und die Verteilung der Wasserressourcen betrifft. Es bestehen aber auch **Lücken**. Daten zur Verdunstung und zur Bodenfeuchte, wie sie für viele hydrologische Modelle und die Vorhersage von Trockenperioden wichtig wären (vgl. DROUGHT-



CH), stehen in der Schweiz nur punktuell und auf Projektbasis zur Verfügung (SwissFluxnet für die Verdunstung, SwissSMEX für die Bodenfeuchte). Unzureichend sind auch die technisch anspruchsvollen Beobachtungen zum Sediment- und Geschiebetransport sowie Beobachtungen zum ökologischen Gewässerzustand. In alpinen Gebieten ist die Datenglage generell schlechter als im Mittelland. Dies liegt einerseits an der Zugänglichkeit, andererseits aber auch daran, dass Langzeitmessprogramme oft durch spezifische Probleme (z.B. Überdüngung) ins Leben gerufen wurden. **Daten zur Nachfrage- und Verbraucherseite** sind selbst auf kantonaler Ebene oft unzureichend und basieren vorwiegend auf Konzessionsmengen, Abschätzungen und Hochrechnungen. Dies gilt auch für den Wasserverbrauch der traditionellen Bewässerungskanäle im Wallis (MONTANAQUA [6]).

Niederschlag, Verdunstung und Abfluss

Mit einer Jahresniederschlagssumme von rund 60 km³ ist die Schweiz ein niederschlagsreiches Land. Aussagen über Niederschlagsänderungen im letzten Jahrhundert sind aufgrund der starken natürlichen Variabilität nur schwer möglich [7]. Zudem variieren die mittleren jährlichen **Niederschläge** zwischen maximalen Werten >2300 mm/J in den Berner und Walliser Alpen, hohen Werten im Tessin und minimalen Werten (800–900 mm/J) im Seeland, Bodenseegebiet, der Region Basel, aber auch im Wallis und im Engadin [8]. Im Winter fallen weniger Niederschläge als im Sommer [1]. Zwei Drittel der Niederschläge fallen als Regen, ein Drittel als Schnee [9].

Schnee ist eine Schlüsselkomponente im Klimasystem und gut erforscht – auch im Zusammenhang mit der Klimaerwärmung. Das Vorhandensein von Schnee wird nicht nur vom Klima beeinflusst, sondern wirkt sich ebenfalls auf das Klima aus. Weil die Schneedecke die Sonnenstrahlung weit mehr reflektiert, als dies der unbedeckte Boden machen würde, bleibt die Luft über der verschneiten Landschaft kühl. Nicht zuletzt sorgt die Zwischenspeicherung von Niederschlag in Form von Schnee für verzögerte Abflüsse, wovon Ökosysteme und Mensch profitieren. Über 100-jährige Messreihen weisen darauf hin, dass die mittleren Wintertemperaturen auf Kosten der Schneemenge steigen [10].

Ein Drittel des jährlichen Niederschlags (20 km³) verdunstet. Wie viel, wo und wann er verdunstet, hängt von der Jahreszeit, dem Gelände, der Höhe über Meer, der Vegetation, der Bodenbeschaffenheit und -bewirtschaftung sowie von der Art des Niederschlags ab. Im Mittelland und Jura erreicht der Verdunstungsanteil 50%, im Einzelfall bis zu 70% des Gebietsniederschlags. Im Alpenraum sind die Verdunstungsanteile klein und machen in hochalpinen Gebieten nur noch 10% der Niederschläge aus. Die höhenabhängige **Verdunstung** ist zunächst in der länger dauernden Schneebedeckung sowie in den tieferen Temperaturen begründet. Auch sind alpine Böden oft flachgründiger und haben gar keine oder eine spärliche Pflanzendecke mit kürzeren Wachstumsphasen. Die Verdunstung von Fels- und Eisflächen ist gering. Ebenfalls niedrige Verdunstungswerte haben die flachgründigen Böden des Juras und Siedlungs-, Industrie- und Verkehrsflächen. Zu den

Links: Fangkorbmessungen am Erlenbach erfassen die transportierte Geschiebemenge. (Foto Dieter Rickenmann, WSL)

Mitte: Der Monitoringstandort Rietholzbach ist eines der hydrologisch am besten untersuchten Gebiete Europas. (DROUGHT-CH)

Rechts: Mithilfe eines Lysimeters wird gemessen, wie viel Wasser in einem Boden versickert und verdunstet. Im Bild die unterirdische Anlage in Rietholzbach. (DROUGHT-CH)

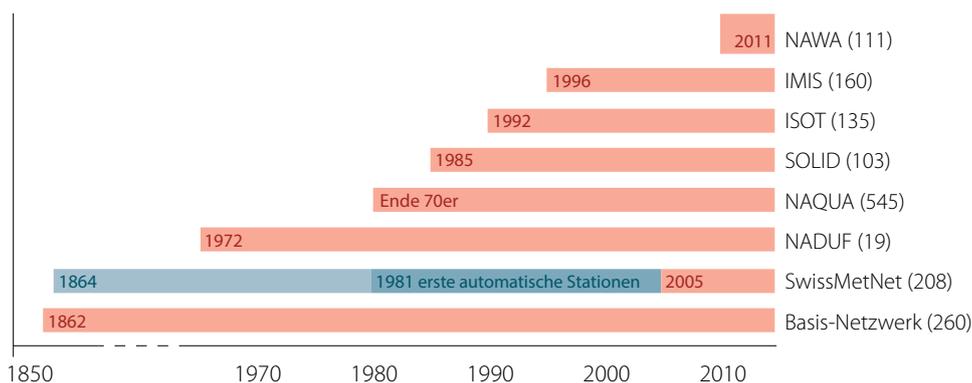


Abb. 1: Die Datenreihen für verschiedene Messgrößen von Schweizer Gewässern reichen teilweise weit in die Vergangenheit. Die Nummer in Klammern bezieht sich auf die Anzahl Messstationen. (A. Björnßen)

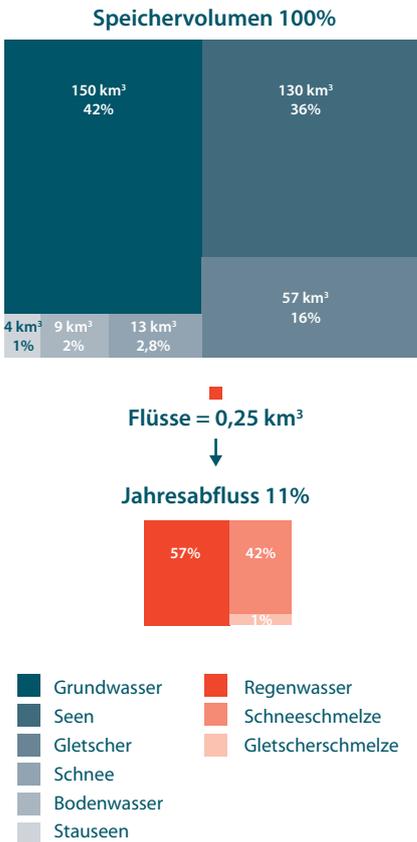


Abb. 2: Der Jahresabfluss der Schweiz entspricht rund 11% des gesamten Speichervolumens. (A. Björnßen mit Zahlen von [7, 27])

verdunstungsreichen Gebieten zählen die bewaldeten Höhenzüge des Mittellandes, das Tessin und Lagen um den Genfersee. Hohe Verdunstungsraten haben auch die Seen [11]. Über die Hälfte der Verdunstung erfolgt in den Sommermonaten Juni bis August. Zwei Drittel des jährlichen Niederschlags (40 km³) kommen zum **Abfluss** in den Gerinnen [8], der sich im Mittel zu 57% aus Regenwasser, 42% Schneeschmelze und 1% Gletscherschmelze zusammensetzt. Ungefähr die Hälfte des Abflusses stammt aus dem Untergrund. Wie viel und in welcher zeitlichen Verteilung Wasser abfließt, hängt vom Niederschlagsvolumen ab, aber auch von der Höhe über Meer, welche sich auf die Speicherung von Schnee und Eis auswirkt. Schmelzwasser, welches im Frühjahr und Sommer freigegeben wird, prägt den Abfluss. In der Schweiz werden die verschiedenen Abflussmuster in 16 Regimes eingeteilt [12], die durch den fortschreitenden Klimawandel merklich beeinflusst werden. Auch der Mensch prägt den Abfluss. Er veränderte zahlreiche Seen und Flüsse, um Hochwasser zu vermeiden, Kulturland zu gewinnen und Energie zu erzeugen. Daneben beeinflusst auch die Landnutzung die Abflüsse.

Wasserspeicher

Unter einem Wasserspeicher versteht man eine Einheit, die Wasser kurz- oder längerfristig dem Kreislauf entzieht und dann wieder zurückgibt. Zu den wichtigsten Speichern gehören das Grundwasser, die natürlichen Seen, Gletscher und die Schneedecke. Aber auch Speicherbecken (z.B. für Kraftwerke, Trinkwasserreservoir, das Bodenwasser, Moore und Feuchtgebiete tragen zum Speichervorkommen bei (Abb. 2). Gespeist werden die Speicher in der Regel durch Niederschläge, welche die abflussbedingten Speicherverluste wieder wettmachen. Jedenfalls fast. Durch die fortschreitende Gletscherschmelze geht jährlich rund 1 km³ an Speichervolumen verloren. Das Wasservolumen der Schweizer Flüsse wurde bisher nicht quantifiziert, da Flüsse nicht als Speicher gelten. Das geschätzte Volumen von ca. 0,25 km³ ist im Vergleich zu den anderen Speichern sehr klein und macht deutlich, dass bei Starkniederschlägen vornehmlich der Boden und andere Speicher das Wasser aufnehmen müssen, um Hochwasser zu verhindern.

Einen besonderen Wasserspeicher stellen die **Gletscher** dar, die von grosser hydrologischer Bedeutung sind. Die Alpen erhalten relativ viel Niederschlag, der im Winter und je nach Höhe ganzjährig als Schnee fällt und über längere Zeiträume gespeichert wird. Die Schweizer Gletscher speichern rund 55 ± 15 km³ (NELAK [13]), die Alpengletscher insgesamt rund 80 ± 20 km³ (NELAK [14, 15]), wobei die grössten und dicksten Gletscher (Aletsch, Gorner, Fiescher) in der Schweiz liegen. Seit dem Ende der kleinen Eiszeit um 1850 hat das Volumen

jedoch um gut die Hälfte abgenommen [9] und nimmt weiter ab. Gletscher verzögern den Abfluss der winterlichen Niederschläge, die erst im Frühjahr und Sommer die Abflüsse zusätzlich speisen. Insbesondere im Sommer liefert das Schmelzwasser einen bedeutenden Anteil des Abflusses, welcher auch für das Grundwasser, die Trinkwasserversorgung, die Landwirtschaft und die Gewässerökologie wichtig ist.

Gut ein Drittel des Niederschlags in der Schweiz wird heute als **Schnee** zwischengespeichert [9]. Abhängig von der Witterung des vorgängigen Winters, speichert die Schneedecke jährlich 4–20 km³ Wasser zum Zeitpunkt ihrer maximalen Ausdehnung im März [16, 17]. Obwohl die Speicherkapazität relativ gering ist, ist die Klimarelevanz sehr gross, denn die Schneegrenze, die Anzahl Tage mit Schneebedeckung und auch die Mächtigkeit sind stark von der Temperatur und somit vom Klima abhängig. Auch der Schmelzwasserbeitrag zum Gesamtabfluss ist beträchtlich (Abb. 2). Schweizer **Seen** stellen mit 130 km³ Wasser den zweitgrössten Speicher dar. Das in den rund 200 künstlichen Speicherseen gefasste Wasser fällt mit rund 4 km³ [17] für die Gesamtbilanz nicht ins Gewicht, ist aber insbesondere für die Energiewirtschaft von Bedeutung. Mit Ausnahme des Bodensees und des Walensees sind alle grossen Schweizer Seen reguliert, d.h., sie vermögen insbesondere im Hochwasserfall und bei Schnee- und Gletscherschmelze einen Ausgleich zu schaffen und versorgen auch in lang anhaltenden Trockenzeiten die grossen Fließgewässer des Mittellandes mit ausreichend Wasser. Neben den grossen Seen verfügt die Schweiz über 6668 Kleinseen, wovon ein Grossteil über 2200 m ü. M. liegt [18]. Eine beachtliche Zahl, und doch kein Vergleich mit früher. Im Laufe der letzten 200 Jahre sind Hunderttausende von Kleingewässern verschwunden. Seen, Kleinseen und Kleingewässer sind nicht nur als Speicher bedeutend, sondern ebenso als Lebens- und Erholungsraum [19]. Mit rund 150 km³ ist **Grundwasser** der grösste Wasserspeicher in der Schweiz. Mit 120 km³ liegt der Hauptanteil in Karstgrundwasserleitern, rund 20 km³ in Kluftgrundwasserleitern und 10 km³ in Lockergesteinen (Abb. 3). Das ist eine beachtliche Menge, doch wie viel ist effektiv nutzbar?

Der Grundwasserleitertyp bestimmt die Tiefe des Wasserspeichers und damit auch die **technische Nutzbarkeit**. Während Lockerstein-Grundwasserspeicher relativ nahe an der Oberfläche liegen, befinden sich Kluft- und Karstgrundwasserleiter auch in grossen Tiefen. Dort stünde die tatsächlich zu erzielende Entnahmerate aber in einem derart schlechten Verhältnis zum Aufwand, dass von einer Nutzbarkeit nicht mehr ausgegangen werden kann [20]. Dies gilt auch für Grundwasservorkommen in Moränen, tonigen Schottern und Feinsanden [21].

Die **Qualität** des Grundwassers wird durch

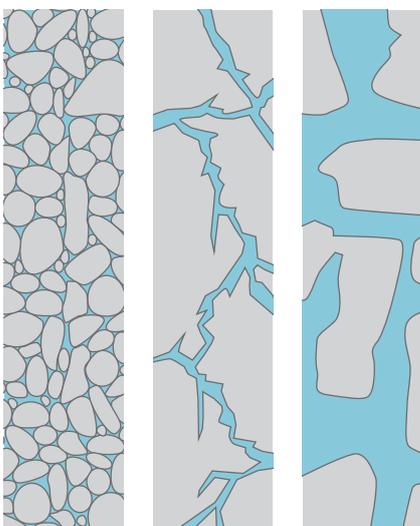


Abb. 3: v.l.: Lockergestein-, Kluft- und Karstgrundwasserleiter unterscheiden sich in ihrer Morphologie und folglich auch in ihrer technischen Nutzbarkeit.



den Leiter, aber auch durch das infiltrierte Wasser beeinflusst. Ist dieses kontaminiert, schränkt sich auch die Nutzbarkeit als Trinkwasser ein. In der Schweiz fallen durch den wachsenden Raumbedarf von Siedlungen, Verkehrswegen und Industrie immer mehr Flächen für die Trinkwassergewinnung weg, weil die nötige Grundwasserqualität nicht gewährleistet werden kann. Auch Stoffeinträge aus der Landwirtschaft und von belasteten Oberflächengewässern beeinflussen die Grundwasserqualität. Das Ausmass dieser Beeinträchtigung wurde bisher kaum quantifiziert, weil Aquifere, die nicht mehr zur Trinkwassergewinnung genutzt werden, oft nicht mehr beprobt werden. Wird Grundwasser für die Wärme- oder Kältenutzung verwendet, kann die Nutzung für die Trinkwasserversorgung ebenfalls eingeschränkt sein. Die Verschmutzungsgefahr durch Entnahme- und Rückgabeanlagen wird von den Kantonen aber sehr unterschiedlich bewertet.

Für die Qualität wichtig ist auch die **Temperatur**. Die Untersuchung vom NFP 61-Projekt GW-TEMP von fünf Messreihen über einen Zeitraum von 20 Jahren zeigte einen Temperaturanstieg des Grundwassers von 0,7 bis 1,1 °C, was ungefähr dem Anstieg der Luft- und Flusswassertemperaturen entspricht [22, 23]. Selbst der abrupte Temperaturanstieg in den späteren 1980er-Jahren war in der Grundwassertemperatur wiederzuerkennen [24]. Bei den alleine durch Niederschläge gespeisten Grundwässern hingegen, dürfte die Erhöhung der Temperaturen durch die ungesättigte Zone hindurch gedämpft und langsamer erfolgen [25], wobei weitere Faktoren wie Förderraten, die Landnutzung und intrinsische Eigenschaften des Grundwasserleiters eine wesentliche Rolle spielen dürften [24]. Auch im Karstgrundwasser wurde ein jährlicher Temperaturanstieg von 0,5 °C über die letzten 22 Jahre beobachtet (SWISSKARST [26]).

Das Grundwasserdargebot kann also durch die technische Nutzbarkeit, die Wirtschaftlichkeit, die Umweltverträglichkeit und die Wasserqualität eingeschränkt sein. Als **nachhaltig nutzbares Grundwasserdargebot** wird diejenige Wassermenge bezeichnet, welche dem Untergrund über einen längeren Zeitraum jährlich im Mittel entnommen werden kann. Nachhaltig nutzbar sind diejenigen erneuerbaren Reserven, welche durch die Grundwasserspeicherung über Niederschläge und Fließgewässer-

rinfiltration wieder aufgefüllt werden. Für die Schweiz sind das 18 km³ (Abb. 4) [9]. Gemäss Gewässerschutzgesetz (Artikel 43) darf es auch bei langfristiger Nutzung zu keiner nennenswerten Abnahme des Grundwasservolumens sowie zu keinen negativen ökologischen Auswirkungen kommen. Um eine Übernutzung zu verhindern, werden Konzessionsmengen für die Grundwasserentnahme festgelegt. Oft liegen jedoch nur unzureichende Kenntnisse über das effektiv nutzbare Vorkommen vor. In der hydrogeologischen Praxis ist es gebräuchlich, dass in über Förderbrunnen erschlossenen Grundwasservorkommen etwa 20% der natürlichen Neubildung genutzt werden [20] und in der Regel auch verträglich sind. Für eine zuverlässige Bestimmung der nachhaltig nutzbaren Menge braucht es allerdings eine differenzierte Betrachtung unter Berücksichtigung der jeweiligen lokalen Gegebenheiten. Ähnlich wie Oberflächenfließgewässer weist Grundwasser ein jahreszeitliches Schwankungsverhalten auf, das von versickerndem Niederschlags- und Schmelzwasser oder auch durch Flusswasserinfiltration beeinflusst wird. Bei einem durch Regenwasser gespeisten (pluvialen) **Grundwasserregime** in den Lockergesteinen des Juras und des Mittellandes zum Beispiel erreicht der Grundwasserspiegel in den Monaten Januar bis März das Maximum und im Spätsommer das Minimum. Liegt hingegen ein Grundwasservorkommen im Einflussgebiet eines Flusses, dessen Abfluss durch die sommerliche Schnee- und Gletscherschmelze geprägt ist, profitiert auch das Grundwasser (importiertes nivo-glaziales Grundwasserregime). Ein solches ist typisch für die Voralpen und die Alpensüdseite und zeigt einen maximalen Grundwasserstand im März und April auf, während das Minimum im Winter erfolgt [21] (→ SWISSKARST Seite 14). Das für Pflanzen verfügbare **Bodenwasser** der Schweiz wird auf 5–7 km³ geschätzt [27]. Über das gespeicherte Wasser in Form von Permafrost (im Boden oberhalb rund 2500 m ü. M. und in Blockgletschern) gibt es keine verlässlichen Zahlen. Das Wasservolumen dürfte vergleichsweise gering sein und ist für den Wasserkreislauf mittelfristig auch nicht von Bedeutung [28].

Links: Gut ein Drittel des Niederschlags in der Schweiz wird heute als Schnee zwischengespeichert. (NELAK)

Mitte: Ein neuer See am Fusse des Gauligletschers im Berner Oberland (August 2012). In der nächst höheren Flachzone wird sich in den kommenden 10 bis 20 Jahren wahrscheinlich ein weiterer See bilden. (Foto Michael Bütler)

Rechts: Schweizer Seen stellen mit 130 km³ Wasser den zweitgrössten Speicher dar. (IWAGO)

Grundwasserspeicher



Abb. 4: Erneuerbarer und heute genutzter Anteil des Grundwasservorkommens in der Schweiz. (A. Björnsen)



Links: Der Zusammenfluss von Aare, Reuss und Limmat, auch Wasserschloss genannt, führte 2011 weniger als die Hälfte Wasser, als dies in normalen Jahren der Fall ist. (Foto WSL, Nadine Hilker)

Mitte: Dürreschäden bei Zuckerrüben. (Foto Jürg Fuhrer)

Rechts: Hochwasser führen zu grossen Geschiebeverlagerungen. (SACFLOOD)

«Wenn man von Trockenheit redet, gibt es verschiedene Aspekte. Oft denkt man bei Trockenheit an mangelnde Niederschläge. Für die Landwirtschaft ist jedoch die Bodenfeuchtigkeit entscheidender.»

Sonia Seneviratne
DROUGHT-CH
ETH Zürich



Mehr dazu im  DROUGHT-CH unter www.nfp61.ch

Wasserknappheit

Trotz beträchtlicher Wasserressourcen können Trockenheit und Wasserknappheit auch in der Schweiz auftreten, mit Folgen für Ökosysteme, Wirtschaft und Bevölkerung. Wie das Jahr 2003 zeigte, bleiben in extrem warmen Sommern selbst die wasserreichen Alpen nicht vor Trockenheit verschont (DROUGHT-CH [29]). Die Auswirkungen des Hitzesommers betreffen die Umwelt (z.B. verminderte Abflüsse, Gletscherschmelze und Felsstürze), die Wirtschaft (Produktionseinbussen im Landwirtschafts- und Energiesektor) und die Gesellschaft (gesundheitliche Folgen und erhöhte Sterblichkeit), waren aber nicht ausschliesslich negativ (DROUGHT-CH [30]). Im Vergleich zu vergangenen Jahrhunderten waren grössere Trockenperioden im 20. Jahrhundert selten (1947, 1949 und 1976) [31]. In den kommenden Jahrzehnten, so die Klimaszenarien, wird die Häufigkeit von Trockenheit aber zunehmen. Allgemein sind die erwarteten Klimaeinflüsse auf Ökosysteme stärker in tieferen Gebieten, auf südexponierten Hängen sowie auf Kalkuntergrund [32].

Der Begriff Trockenheit bezieht sich ausschliesslich auf die Dargebotsseite («es hat zu wenig für die gewünschte Nutzung»). Dabei handelt es sich um ein zeitlich und räumlich begrenztes Niederschlagsdefizit (meteorologische Trockenheit), um eine ungenügende Bodenfeuchte (landwirtschaftliche Trockenheit) oder um tiefe Abflussraten oder Grundwasserstände (hydrologische Trockenheit) (DROUGHT-CH [33]). Verantwortlich für landwirtschaftliche Trockenheit sind fehlende oder ungenügende Niederschläge und eine starke Verdunstung in Verbindung mit Bodeneigenschaften und Landnutzung, welche die Wasserrückhaltung beeinflussen.

Knappheit bezeichnet ein Ungleichgewicht zwischen der Verfügbarkeit von nutzbarem Wasser und dem Bedarf [17]. Sie tritt auf, sobald der gesamte Bedarf die Verfügbarkeit übersteigt. Das Auftreten von Wasserknappheit ist folglich nicht nur von Klima und Wetter abhängig, sondern auch vom Bedarf der Ökosysteme und von den übrigen Nutzungen (Wasserkraft, Fischerei, Landwirtschaft und Trinkwasserversorgung). Dieser Bedarf ändert u.a. infolge von Bewirtschaftungsänderungen. Für einen landwirtschaftlichen Betrieb, zum Beispiel, ändert er mit der Umstellung auf Bewässerungswirtschaft zur Ertragssicherung.

In der Schweiz tritt landwirtschaftliche Trockenheit v.a. im Sommer auf, wenn die Bodenfeuchte tief ist und temporär mehr Wasser verdunstet, als durch die Niederschläge wieder zugeführt wird. Niedrigwasser in den Flüssen kommt hingegen auch im Winter vor. Für das Tessin wurde über die vergangenen Jahrzehnte auch eine zunehmende Wintertrockenheit beobachtet [34], was die Waldbrandgefahr im Frühjahr beträchtlich erhöht. Aufgrund der Erfahrung mit Niederschlagsarmut hat der Kanton Tessin ein System zur Vorbeugung von Waldbränden entwickelt [35]. Die Jahresniederschläge verzeichneten hingegen keinen Trend einer Änderung, mitunter weil die Niederschläge im Herbst stark zunahmen [36].

Die physiografische Vielfalt der Schweiz führt dazu, dass Trockenheit und Wasserknappheit oft nur lokal oder regional begrenzt auftreten (DROUGHT-CH [37]). In einigen **Regionen** wie den inneralpinen Trockentälern standen schon über Jahrhunderte nur geringe Niederschlagsmengen zur Verfügung. In der Folge entwickelten sich aufwendige Bewässerungssysteme (Suonen) zur Vermeidung von Wasserknappheit. Andere Regionen, speziell Produktionsgebiete im westlichen und im östlichen Mittelland, sind heute vermehrt mit Wasserknappheit konfrontiert. Dort, wo die Produzenten auf die Wasserentnahme aus voralpinen Flüssen oder flussnahen Grundwasserströmen angewiesen sind, kam es in den letzten Jahren wiederholt zu Verboten von Wasserentnahmen aus Oberflächengewässern. Auch in Gebieten mit wenig ergiebigen oder flachgründigen Grundwasservorkommen kann es zu Wasserknappheit kommen [17, 20]. Trockenheitsprobleme des Juras sind v.a. durch die kalkhaltigen Unterböden begründet, durch die das Wasser sehr schnell abfließt. Der Basisabfluss in Karstgrundwasser hingegen bleibt auch von lang andauernden Trockenperioden weitgehend unbeeinflusst, selbst wenn die Quellschüttungen zurückgehen oder in kleinen Karstsystemen gar ganz versiegen (→ DROUGHT-CH Seite 14).

Obwohl Bewässerung in der Schweizer **Landwirtschaft** im internationalen Vergleich eine untergeordnete Rolle spielt, kommt es auch hier zu Knappheitssituationen. Im Gebiet vom Genfersee über das Seeland, den Jurasüdfuss, das Zürcher Weinland bis zum Bodensee werden heute neben den Spezialkulturen mit

zumeist lokalen Bewässerungsnetzen auch zunehmend Ackerkulturen und Kunstwiesen bewässert. Entsprechend kommt es in Gebieten, wo nur Bäche (z.B. im Jura, im Waadtland und in Teilen des Seelandes und der Ostschweiz) oder Flüsse aus pluvialen Einzugsgebieten (z.B. Broye, Thur) vorhanden sind, bereits heute in Trockenjahren zu Knappheit und folglich Entnahmebeschränkungen und -verboten [17]. Demgegenüber können in Trockenjahren niederschlagsreiche Gebiete der Voralpen durchschnittlich bessere Ernten einfahren [38]. Gesamtschweizerisch führen durch Trockenheit oder andere Extremereignisse verursachte Ernteverluste aber nicht zwingend zu starken Einkommensreduktionen bei den Produzenten. Brancheninterne Festlegungen von Produzentenrichtpreisen und auf dem Verwaltungsweg gewährte Einfuhrerleichterungen (z.B. Viehfutter) und Finanzhilfen können starke Einkommenschwankungen begrenzen. Falls die Verluste lokal bzw. regional sehr unterschiedlich sind, kann ein solcher ökonomischer Ausgleich aber dem einzelnen Betrieb allenfalls wenig bringen.

Neben der Landwirtschaft reagieren auch andere Sektoren wie die Wasserkraft, die Forstwirtschaft, die Trinkwasserversorgung, die Schifffahrtsgesellschaften, die Fischerei und der Tourismus empfindlich auf Wasserknappheit (DROUGHT-CH [30, 37]). Die **Wasserkraftproduktion** war nicht nur im legendären Hitzesommer 2003 eingeschränkt, sondern auch im Jahr 2011, wo von Februar bis Juni und dann wieder im Herbst Trockenheit herrschte. Die tiefen Pegelstände in den Flüssen führten dazu, dass kleinere Laufkraftwerke abgestellt und grössere nur mit eingeschränkter Leistung betrieben werden konnten. Der fehlende Strom wurde teils importiert, teils durch Speicherseen kompensiert. Aufgrund des europäischen Strommarktes und schwankender Preise führen solche Produktionsrückgänge aber nicht zwangsläufig zu starken Einbussen bei den Stromproduzenten (DROUGHT-CH [30]). Auch bei **Klein- und Kleinsttrinkwasserversorgungen**, die nur aus Quellwasser gespeist werden und nicht miteinander vernetzt sind, kann es bei anhaltender Trockenheit zu Versorgungsengpässen kommen. 2003 sahen sich rund 50 kleine, ungenügend vernetzte Tessiner Gemeinden gezwungen, provisorisch zusätzliche Wasserbezugsquellen zu erschliessen, z.B. durch den Anschluss an andere Wasserversorgungen, Wasserentnahmen aus Seen über improvisierte Filter- und Desinfektionsanlagen oder durch die Versorgung mit Tankwagen. In besonders kritischen Fällen musste die Wasserversorgung zu gewissen Tageszeiten eingeschränkt werden. Ähnliche Einschränkungen zeigten sich im Herbst 2011 in verschiedenen Gegenden der Romandie. Die **Rheinschifffahrt** wird unmittelbar durch die tiefen Wasserstände beeinflusst. Saisonal bedingt sind die Wasserstände im Spätherbst eher tief. Im trockenen Herbst 2011

waren diese aber noch tiefer als im Normalfall. Im Basler Rheinhafen konnten die Frachtschiffe nur etwa 30% ihrer regulären Ladung transportieren, um nicht auf Grund zu laufen [17].

Hochwasser

Hochwasser zerstört Infrastrukturen und Kulturlächen und behindert die Nutzung der Gewässer. In der Schweiz ist Hochwasser vorwiegend ein Sommerthema, aber auch im Frühjahr und im Herbst treten Hochwasser auf. Im Winter ist das Hochwasserrisiko geringer, weil die Niederschläge in der Regel wenig intensiv sind und als Schnee und Eis gespeichert werden. Die durch Hochwasser verursachten Schadenskosten lassen sich durch ein erweitertes Prozessverständnis und die Entwicklung von Modellen begrenzen, welche die Vorhersagbarkeit sowie die Planung von Schutzmassnahmen verbessern. Die vom NFP 61-Projekt SACFLOOD erarbeiteten Erkenntnisse lassen sich auch auf andere Regionen der Schweiz übertragen.

Die überwiegende Zahl von Hochwassern wird von Starkregen verursacht. Katastrophenhochwasser hingegen entstehen erst durch eine Kombination von **Ursachen**, wenn zum Beispiel die Schneeschmelze oder ein Vorregen die Speicher auffüllen und so ein zusätzlicher Starkregen «voll durchschlägt» [39]. Die grössten Hochwasser in alpinen Gebieten entstehen in den nordwestlich exponierten Voralpen und in der Südschweiz. In inneralpinen Tälern fallen Starkniederschläge weit geringer aus. In Karstregionen sind Hochwasser ein Thema, weil Karstleiter ein Ereignis entweder abschwächen oder auch verstärken können. Trotz dieser Tatsache beschäftigen sich nur wenige Forschungsprojekte mit Naturgefahrenprozessen in Karstgebieten. Auch für die Dimensionierung von Hochwasserschutzmassnahmen wird die Rolle von Karst oft vernachlässigt [40]. Erst neuere Studien untersuchen den Zusammenhang von Karstsystemen und Hochwasserereignissen [41, 42]. **Historische Untersuchungen** haben gezeigt, dass sich hochwasserreiche und hochwasserarme Perioden abwechseln. Hochwasserreiche Phasen traten im Schweizer Alpenraum zwischen 1560 und 1590 und um 1760 auf. Vor allem das 19. Jahrhundert erlebte eine markante Hochwasserperiode. Von 1910 bis 1972 herrschte relative Ruhe, die mit den Hochwassern an der Reuss (1977) und der Thur (1978) wieder ein Ende fand [43]. Auch die letzten drei Jahrzehnte waren durch Hochwasserereignisse mit beträchtlichen Schäden geprägt. In der gleichen Periode hat zudem die Siedlungsdichte und die Konzentration von Sachwerten entlang der Gewässer erheblich zugenommen [44] und damit das Schadenpotenzial markant erhöht. Im historischen Vergleich sind die Hochwasserhäufigkeiten der letzten Jahre jedoch nicht aussergewöhnlich [45, 46].

«Karstquellen gehören zu den letzten Quellen, die austrocknen. Deshalb sind sie eine wichtige Ressource während langer Trockenperioden.»

Pierre-Yves Jeannin
SWISSKARST
SISKA



Mehr dazu im  SWISSKARST
unter www.nfp61.ch

NFP 61-Projekt SWISSKARST:

Karst als eine unterschätzte Ressource

Karst spielt in der Schweizer Wassernutzung eine wichtige Rolle, denn fast 20% der Landesfläche, v.a. im Jura und in den Voralpen, bestehen aus Karst (Abb. 5). Auch in anderen Landesteilen befinden sich wenige Hundert Meter unter der Oberfläche Karstgrundwasserleiter. Da Niederschläge fast ungehindert im porösen Kalkuntergrund versickern können, weisen Karstgebiete kaum stehende Gewässer und nur seichte Flüsse auf. Zumindest an der Oberfläche. Im Untergrund sieht es anders aus: Laut Schätzungen von SWISSKARST versickern jährlich 6,6 bis 9,1 km³ Niederschläge in den Karstuntergrund und tragen damit die Hälfte zur jährlichen Grundwasserbildung der Schweiz bei. Das ist viel. Ein kompliziertes System von Ritzen (Klufte) und Röhren entwässert die zerklüfteten Felsmassen, stellt gleichzeitig aber auch einen bedeutenden Wasserspeicher dar, dessen Volumen aufgrund der Porosität des Kalkgesteins auf 60–120 km³ geschätzt wird. Das entspricht 60–80% des gesamten Grundwasservolumens in der Schweiz. Gelangt dieses Grundwasser an die Oberfläche, speist es oft sehr ergiebige Quellen. Während kleine Karstquellen 5–100 Liter pro Sekunde schütten, erreichen grosse Quellen eine jährliche mittlere Schüttung von 1 bis 7 m³ pro Sekunde (z.B. die Orbe in Val-orbe, VD). Die Nutzung von Karstwasser ist aber nicht einfach: zum einen ist es schwierig, für Grundwasserpumpen einen geeigneten Punkt im Labyrinth des Grundwasserrohrnetzes zu finden, zum anderen ist die Wasserqualität nicht immer gewährleistet, weil sich Schadstoffeinträge sehr rasch durch die verzweigten Karstleiter verbreiten. Für die Evaluierung und Dokumentation von Karstgrundwasserleitern entwickelte SWISSKARST einen praxisorientierten Ansatz und wendete diesen auf 1/3 der Landesfläche an. Bis 2018 soll die gesamte Schweiz erfasst werden (siehe www.swisskarst.ch) [47, 48].

NFP 61-Projekt DROUGHT-CH:

Das Langzeitgedächtnis des Bodens

Gegen die Auswirkungen von Trockenheit kann man sich wappnen, wenn man früh genug darüber Bescheid weiss. Die trägen Bodenwasserspeicher erlauben eine Vorhersage. Während Niederschläge kurzfristig stark variieren können, entwickeln sich Bodentrockenheit und Niedrigwasser in Flüssen meist über mehrere Wochen und Monate, weil Bodenfeuchte und Grundwasser nur langsam und verzögert auf Wetteranomalien reagieren [49]. Grosse Systeme, wie die tiefgründigen Böden im Mittelland und im Südtessin, verzögern die Austrocknung weit mehr, als die weniger mächtigen Böden in den Alpen. Auch benötigen grosse Systeme mehr Zeit, um wieder das Gleichgewicht zu erreichen. Eine ähnliche Rolle spielen Schneeressourcen. Das Projekt DROUGHT-CH nutzt diese Reaktionszeiten für Trockenheitsvorhersagen. Tatsächlich konnte ein von der ETH Zürich entwickeltes Modell die tägliche Bodenfeuchte zwei Wochen im Voraus gut bestimmen [50]. Ferner verarbeitete ein operationelles Modell der WSL Informationen über Schneemengen, um die Niedrigwasser-Vorhersage zu verbessern. Dabei wurde deutlich, dass die niedrigen Wasserstände der grösseren Seen des Schweizer Mittellandes im Juni 2011 nicht allein durch das aktuelle Niederschlagsdefizit verursacht wurden, sondern auch durch die unterdurchschnittlichen Schneeressourcen im Frühjahr [51]. Lehrreich ist auch die Erkenntnis, dass der Sommer 2003 eigentlich nicht das grösste anzunehmende Trockenheitsereignis bei heutigen Klimaverhältnissen war. Wäre es im Frühjahr 2003 so trocken gewesen wie im Jahr 2011, dann hätte sich der Hitzesommer ungleich schlimmer ausgewirkt [52, 53]. Aufgrund der neuen Erkenntnisse lassen sich heute Niedrigwasserstände drei Wochen im Voraus vorhersagen, wobei die Prognosen für die Grosseinzugsgebiete unterhalb der Alpenrandseen am zuverlässigsten sind. Die internetbasierte Testinformationsplattform von DROUGHT-CH (www.trockenheit.ch) bietet Abschätzungen zur aktuellen Trockenheitssituation und stellt mehrtägige Prognosen zur Verfügung [37].

NFP 61-Projekt SACFLOOD:

Vom Überfluss zum Überdruss?

Hochwasserschutzmassnahmen werden in der Schweiz so ausgelegt, dass auch seltene Hochwasser beherrscht werden können. Die Grösse und den Zeitpunkt solcher Ereignisse abzuschätzen, ist eine anspruchsvolle Aufgabe, weil nicht nur das Wetter mitspielt, sondern auch der oft unbekannte Untergrund Überraschungen mit sich bringt. Ob Starkniederschläge in einem Gebiet Hochwasser verursachen und wie diese verlaufen, wird wesentlich von der Speicherfähigkeit des Untergrundes bestimmt. Ist dieser wenig durchlässig, führen schon kurze, gewitterartige Niederschläge zu Hochwasser. Bei einer grossen Bodenmächtigkeit oder einem speicherfähigen Untergrund sind lang andauernde, ergiebige Niederschläge für die Entstehung von Hochwasser notwendig. Wenn diese verborgenen Bodenspeicher gefüllt werden, kann dies zu einem, oft auch abrupten, Anstieg des Abflusses führen. Dabei führt die steile Topografie der Alpen nicht zwingend zu einem raschen Abfluss der Niederschläge. Im Gegenteil: Abflüsse in alpinen Gebieten mit ausgedehnten Flächen mit Felsstürzen, Rutschungen oder Moränen reagieren oft stark verzögert oder gedämpft [54]. Ein typisches Beispiel dafür ist das Einzugsgebiet des Schächens (Abb. 6). Das Projekt SACFLOOD entwickelte Methoden, um das Speicherverhalten unterschiedlicher Flächen in alpinen Einzugsgebieten zu erfassen und daraus das Abflussverhalten bei extremen Niederschlägen vorherzusagen. Exemplarisch wurde anhand von Berechnungsversuchen, Abflussmessungen und Modellen die Anfälligkeit für Hochwasser der Einzugsgebiete Schächens (109 km², Abb. 7) und Hinterrhein (54 km²) unter Extrembedingungen untersucht. Mit derselben Methode lassen sich auch in anderen Regionen Einzugsgebiete identifizieren, die bei grossen Niederschlagsereignissen mit einem verschärften Abflussverhalten reagieren. Eine Anleitung für die Praxis wird noch zur Verfügung gestellt.



Abb. 5: Karstgebiete in der Schweiz liegen v.a. im Jura und in den Voralpen. (Grafik SWISS-KARST)

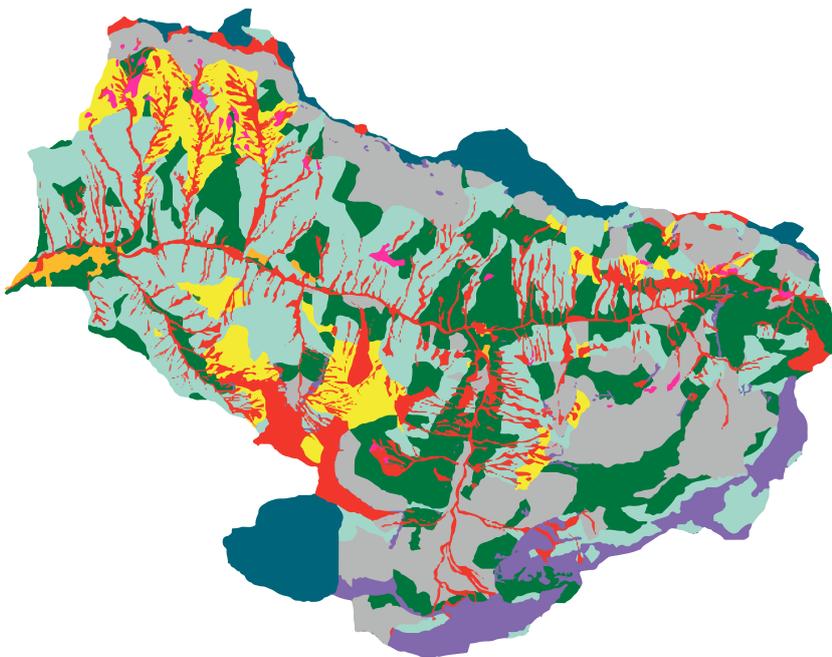
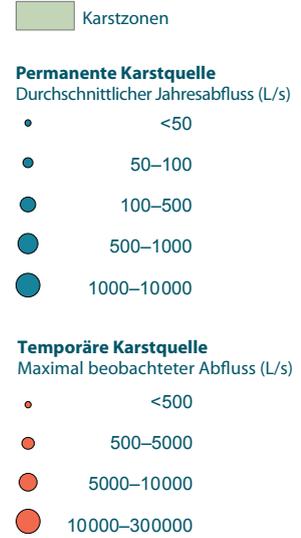


Abb. 6: Kartierung des Einzugsgebietes Schächen (109 km²) mit Zonen, die unterschiedlich stark zu den Abflüssen und der damit verbundenen Hochwassergefahr beitragen. Die violetten, roten, orangen und gelben Flächen reagieren schneller auf Starkniederschläge, die türkisen, grünen und grauen erst verzögert. Ihr Einfluss wird dementsprechend im Niederschlag-Abfluss-Modell berücksichtigt. (Grafik Maarten Smoorenburg, SACFLOOD Schlussbericht)

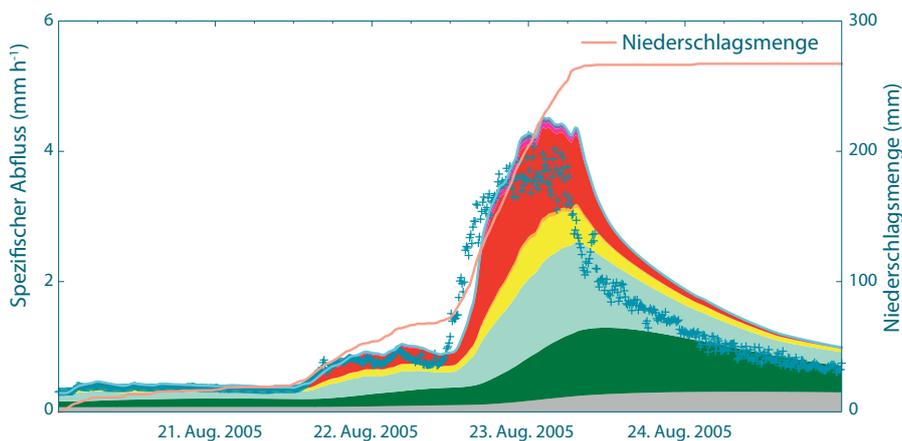


Abb. 7: Modellierter Beiträge der unterschiedlich grossen Bodenspeicher zum Hochwasser im Schächen vom 22. August 2005. Der lang andauernde, ergiebige Regen führte dazu, dass auch speicherfähige, verzögert reagierende Flächen (türkis, grün) wesentlich zum Abfluss beitrugen. Erst durch diese Beiträge, die sich mit dem Abfluss aus den rasch reagierenden Flächen (violett, rot, gelb) überlagerten, wurde das Ereignis zu einem aussergewöhnlichen Hochwasser. Die orangene Kurve zeigt die Gesamtsumme der Niederschläge. (Grafik Maarten Smoorenburg, SACFLOOD Schlussbericht)



Links: Schächental (UR). Rückhaltekapazität und Abflussverhalten in alpinen Einzugsgebieten sind dank dem NFP 61 besser bekannt. (SACFLOOD)

Mitte: Mit Beregnungsversuchen wurde bestimmt, wie viel Wasser im Untergrund versickert. (SACFLOOD)

Rechts: Hochwasser bringen nicht nur Zerstörung, sondern auch einen Nutzen für die Gewässerökologie. Auf dem Bild ist eine Laichgrube der Bachforelle zu sehen. (SEDRIVER)

Der **Hochwasserschutz** gewann in der Schweiz ab 1700 im Zuge der Siedlungsentwicklung an Bedeutung. Vor allem im Laufe des 19. und 20. Jahrhunderts wurde die Hochwassergefahr durch bauliche Massnahmen stark eingedämmt, vorwiegend in weiten Tal Ebenen, wo der Siedlungsdruck am höchsten war, aber auch im **Gebirge** (z.B. Wildbachverbauungen). Die grossen Gewässerkorrekturen bannten nicht nur die zerstörerische Kraft des Wassers, sondern wandelten versumpfte Talböden zu fruchtbarem Ackerland um. Ab 1850 gaben auch der Eisenbahn- und Strassenbau Ausschlag für zahlreiche Flusskorrekturen [39].

Trotz grosser Anstrengungen und Investitionen ist die Hochwassergefahr nicht gebannt. Hochwasser und die damit einhergehenden Rutschungen, Murgänge und Sturzereignisse

verursachen jährliche **Schadenskosten** von durchschnittlich 329 Mio. Franken [61]. Allein die durch den Geschiebetransport bedingten Schäden an Infrastruktur und Kulturland kosten jährlich rund 110–125 Mio. Franken [62] (→ SACFLOOD Seite 14).

Was dem einen Überdross, ist des anderen Gewinn. Hochwasser bringen nicht nur Zerstörung, sondern auch einen Nutzen für die Gewässerökologie. Grössere Hochwasser mobilisieren Sedimente, verändern die Wasserführung, vertiefen das Flussbett und schwemmen Feinpartikel ab, die ansonsten die Flusssohle verschliessen (Kolmation) und Organismen sowie die Grundwasserspeisung behindern. Hochwasser verhindern ferner die Veralgung und prägen die Biodiversität und das Landschaftsbild.

«Es hat uns verblüfft, dass in dem steilen Einzugsgebiet sehr viel Niederschlag gespeichert wird und erst verzögert abfließt.»

Felix Naef
SACFLOOD
ETH Zürich



Mehr dazu im  SACFLOOD unter www.nfp61.ch



Ökologischer Zustand

Wasserqualität

Neben der Wassermenge spielt die Wasserqualität für die Wassernutzung und den Erhalt verschiedener Ökosysteme eine bedeutende Rolle. Dank dem weitreichenden Gewässerschutzgesetz sowie technischer Verbesserungen bei der Abwasserreinigung hat sich die Wasserqualität in Schweizer Fließgewässern seit Anfang der 1990er-Jahre in vielerlei Hinsicht verbessert [55]. Ebenfalls kann der Zustand der grossen Alpenrandseen grösstenteils als gut bezeichnet werden [1], so dass sie für die Trinkwasseraufbereitung uneingeschränkt genutzt werden können [56]. Auch die Grundwasserqualität kann allgemein als gut bezeichnet werden. Selbst Karstgrundwasser wird oft ohne nennenswerte Probleme zur Deckung des Trinkwasserbedarfs genutzt [57]. Auch wenn das Fazit zur Wasserqualität grundsätzlich positiv ist, bestehen **räumliche Unterschiede**. Folgt man den Fließgewässern von den Alpen bis zur Landesgrenze, nimmt die anthropogene Belastung durch Nährstoffe, Schwermetalle und andere Schadstoffe mit der Fließstrecke zu. So korrelieren zum Beispiel Stickstoffeinträge mit der Anzahl Einwohner (mehr Abwässer) und der intensiv landwirtschaftlich genutzten Fläche [55]. Ähnliches gilt für Phosphor, wobei alpine und voralpine Flüsse meist nur kleine oder unbedeutende Frachten an gelöstem Phosphor führen. Einzelne kleine Mittellandseen sind jedoch trotz technischer Sanierung (Belüftung) immer noch mit hohen Phosphorkonzentrationen belastet. In mittleren und grösseren Seen sind die Phosphorgehalte stark zurückgegangen und pendeln sich auf einem konstanten Niveau ein. Erschwert wird die dauerhafte Gesundung der Seen durch die über Jahrzehnte in den Seesedimenten abgelagerten Phosphate, welche in das Seewasser zurückgelöst werden können. Obwohl die sichtbaren Auswirkungen der Überdüngung weitgehend verschwunden sind, sind die Seen als Ökosysteme nicht in den Ausgangszustand vor der Eutrophierung zurückgekehrt, was mitunter die Anzahl Felchenarten und die genetische Vielfalt innerhalb der Felchenarten belegen [58].

In den **Fließgewässern** hat sich die Überdüngung mit Stickstoff und Phosphor wegen des wesentlich rascheren Wasseraustauschs weni-

ger stark ausgewirkt als in den Seen. Wie die Auswertung von NADUF-Messreihen zeigt, nahmen die Nitrat- und Gesamtstickstoffkonzentrationen bis 2012 bei fast allen Messstationen ab und erhöhten sich kurzfristig als mögliche Folge der Trockenjahre 2003 und 2005 (Abb. 8) [55]. Im Unterschied zu Seen führen in Fließgewässern punktuelle und diffuse Stoffeinträge zu höheren Schadstoffkonzentrationen, da die Verdünnung geringer ist. Bezogen auf die Fließstrecke sind v.a. jene diffusen Stoffeinträge dominierend, die aus der **Landwirtschaft** stammen (Dünger, Pestizide, hormonell wirksame Substanzen). Eine aktuelle Analyse des BAFU zeigt, dass Pflanzenschutzmittel und Schwermetalle (Zink, Kupfer, Cadmium, Chrom, Nickel, Quecksilber) die relevantesten, diffus eingetragenen Schadstoffe in Oberflächengewässern darstellen. Gerade im Schweizer Mittelland sind Fließgewässer mit einer Vielzahl von **Pestiziden** belastet, wobei der Anforderungswert der Gewässerschutzverordnung von $0,1 \mu\text{g/l}$ verbreitet und zum Teil auch deutlich überschritten wird [59]. Hohe Belastungen können insbesondere in kleinen Fließgewässern auftreten. Von Frühling bis Herbst sind Fließgewässer stark, in den Sommermonaten Juni und Juli am stärksten belastet [60]. Bei **Schwermetallen** werden schon lange Massnahmen zur Verminderung der Einträge getroffen, zum Beispiel durch Verbesserungen in der Industrie, durch den Ausbau von Kläranlagen und die Einführung von bleifreiem Benzin. Der Erfolg wird in den Konzentrationen und den Frachten der Schwermetalle sichtbar, welche sich bei der Mehrzahl der Stationen sehr deutlich und signifikant bis zu 7% pro Jahr verringern [55].

Wichtigste **Punktquellen** sind die Kläranlagen, die den Flüssen gereinigte, kommunale oder industrielle Abwässer zuführen. Aktuelle Auswertungen aus dem NAWA-Programm der Kantone zeigen, dass der Nährstoffaustrag bezüglich Nitrat und Kohlenstoff in 80–90% der Fälle im sehr guten oder guten Bereich liegt. Bei Phosphat liegen diese Werte mit rund 70% etwas tiefer. Heute stellt v.a. die Belastung durch Mikroverunreinigungen (z.B. hormonell wirksame Substanzen, Pflanzenschutzmittel, Biozide, Kosmetika oder Haushaltschemikalien) eine Herausforderung dar. Ein Teil dieser Stoffe kann in den Hormonhaushalt der Lebewesen eingreifen und ihr Regelsystem negativ beeinflussen [63]. Auch Lebensmittelzusatz-

Links: Dank technischer Verbesserungen bei der Abwasserreinigung hat sich die Wasserqualität in Schweizer Fließgewässern seit Anfang der 1990er-Jahre in vielerlei Hinsicht verbessert. (IWAQA)

Mitte: Aus der Landwirtschaft stammen Dünger, Pestizide und hormonell wirksame Substanzen, welche die Gewässer belasten. (GW-TREND)

Rechts: Wichtigste Punktquellen sind die Kläranlagen, die den Flüssen gereinigte, kommunale oder industrielle Abwässer zuführen. (RIBACLIM)

stoffe (v.a. Süsstoffe wie Acesulfam), die teils kaum abgebaut werden, werden inzwischen in sehr hohen Konzentrationen gemessen [64]. In den nächsten Jahren bis Jahrzehnten sollte sich die Situation durch den gezielten Aus- und Umbau der Kläranlagen verbessern. Vermehrt sind Anstrengungen nötig, auch Stoffeinträge aus diffusen Quellen zu reduzieren.

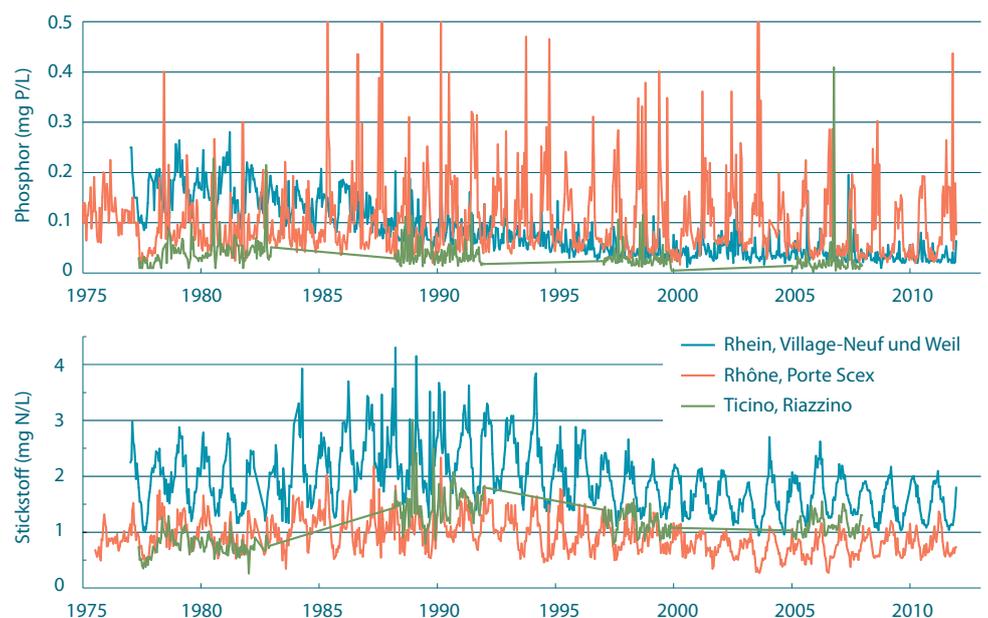
Ein räumliches Muster zeigt sich auch in der Grundwasserqualität. Grundwasser enthält v.a. in Ballungsräumen sowie in landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten trotz generell guter Qualität Spuren von unerwünschten Fremdstoffen. Gut dokumentiert sind die Nitratkonzentrationen aus Hof- und Kunstdünger. Nach einem mehrjährigen Zeitraum mit sinkenden Konzentrationen sind diese zwischen 2003 und 2006 wieder deutlich angestiegen, in erster Linie an Orten im Mittelland und im Jura, wo Ackerbau sowie Gras- und Viehwirtschaft dominieren (Abb. 9). Als Gründe werden die aussergewöhnlichen Wetterbedingungen sowie die Zunahme der winterlichen Brachflächen vermutet. Ein Abbild der Besiedlungsdichte sind auch die Grundwasserbelastungen mit flüchtigen organischen Verbindungen (VOC, z.B. Treib-, Brenn- und Schmierstoffe sowie Lösungsmittel). Hier gilt die Situation zwar nicht als alarmierend, sollte aber im Auge behalten werden.

Zu Schadstoffeinträgen kommt es auch in den Tallagen grösserer Flüsse, wo sich Grundwasser v.a. durch die Infiltration von Flusswasser bildet, dessen Qualität das Grundwasser

unmittelbar beeinflussen kann (→ RIBACLIM Seite 40). Dort werden beispielsweise organische Verbindungen und pharmazeutische Verbindungen im ng/l-Bereich nachgewiesen. Auch Pestizide wurden vom NAQUA-Messprogramm v.a. in Grundwasser von Einzugsgebieten gefunden, wo eine intensive Landwirtschaft oder Siedlungen die Bodennutzung dominieren. Durch den vermehrten Einsatz von Mitteln zum Schutz von Flachdächern und Fassadenverputzen gegen Wurzeln sowie Algen- und Pilzwachstum versickert auch in Siedlungsgebieten zunehmend belastetes Wasser. Besonders betroffen sind das Mittelland sowie die Haupttäler im Wallis, im Tessin und im Jura (Abb. 9).

Karst- und Kluftgrundwasserleiter reagieren empfindlicher auf Verunreinigungen als Grundwasserleiter in Lockergesteinsablagerungen, die über eine höhere Filterwirkung verfügen. An gewissen Standorten ist die Aufbereitung kostenintensiver aufgrund von hohen Schwankungen der Trübung bei Niederschlag oder wegen bakterieller Verunreinigungen. In höheren Lagen im Jura sind für die Nutzung von Karstwasser tiefe Bohrungen nötig, die nicht immer erfolgreich sind. Ein umfassender Überblick über die Qualität von Karstgrundwasser fehlt aber noch heute [26]. Die Nutzung von **Grundwasser als Trinkwasser** ist in der Schweiz nicht unmittelbar gefährdet. Es gilt allerdings zu beachten, dass in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Grundwasserfassungen wegen zu hoher Schadstoffgehalte für die Trinkwassernutzung aufgegeben wur-

Abb. 8: Gesamtstickstoff- und Gesamtphosphor-Konzentrationen in 2-wöchentlichen, abflussproportionalen Sammelpuben ausgewählter Stationen der Nationalen Daueruntersuchung der Fliessgewässer bis 2011 (NADUF, www.naduf.ch). (Grafik Ursi Schoenenberger, Eawag, und Peter Waldner, WSL)



den. Auch heute werden Fassungen häufig stillgelegt statt saniert. Welchen Anteil diese Praxis an der momentan beobachteten, mehrheitlich guten Grundwasserqualität hat, kann nicht quantifiziert werden, da keine Untersuchungen zu diesen aufgegebenen Grundwasservorkommen existieren und die betroffenen Grundwasserfassungen meist nicht mehr beprobt werden [56]. Da viele der ergiebigen Vorkommen in stark genutzten Gebieten liegen, sind die Anstrengungen im Gewässerschutz konsequent beizubehalten.

Gewässerräume

Der Begriff **Gewässerraum** bezieht sich auf den Raumbedarf der oberirdischen Gewässer, wie zum Beispiel auch Wasser- und Zugvogelreservate und Moorlandschaften. Laut Artikel 36a des revidierten Gewässerschutzgesetzes sind Gewässerräume bis 2018 festzulegen und gelten explizit als geschützt.

Am Anfang des Gewässerraumes stehen rund 80 000 **Quellen und Quellgruppen** [65], die zu Grundwasserleitern von wenigen Hektaren gehören. Daneben tragen 500–1000 grosse, meist in Karstgebieten gelegene Quellschütungen rund 50–70% zum Gesamtabfluss bei [66]. Kleine Gewässer (Flussordnungszahl 1 und 2, d.h. kleine Bäche im Oberlauf) machen 80% des 65 000 km langen **Fliessgewässernetzes** aus [60]. Fast drei Viertel aller Fliessgewässer liegen im Alpenraum.

Fliess- und Stillgewässer werden vielfältig genutzt, auf Kosten von Landschaften, Lebensräumen und Arten aber auch oft verändert. Von der gesamten Fliessgewässerstrecke gelten 54% der Gewässerräume als natürlich oder naturnah, 24% als wenig beeinträchtigt und 22% als künstlich, stark beeinträchtigt oder eingedolt [67]. Die Sense und die Maggia gehören zu den letzten Gewässern, die noch naturnah fließen [68]. Zusätzlich beeinträchtigen 101 000 künstliche Durchgangshindernisse den Lebensraum [67, 69]. Fliessgewässer im Jura und Mittelland sind am stärksten verbaut. Als Folge des revidierten Gewässerschutzgesetzes nimmt der Anteil der beeinträchtigten Abschnitte wegen Renaturierungen tendenziell ab. Auch die Ufer der Seen sind heute oft mit Hafenanlagen und Mauern verbaut, um die Ufererosion zu vermindern. Solche Verbauungen beeinträchtigen die Selbstreinigung der Seen und den Lebensraum vieler Tierarten.

Die Gewässerlandschaft Schweiz hat sich im letzten Jahrhundert stark verändert. Über 190 000 ha Land wurden im Rahmen von Meliorationen und Arbeitsbeschaffungsmassnahmen entwässert. Allein im Kanton Zürich verringerte sich die Fläche der **Feuchtgebiete** in den letzten 150 Jahren um 91% [70]. Feuchtgebiete sind nicht nur Lebensraum für spezialisierte Tier- und Pflanzenarten, sondern auch wichtige hydrologische und klimatische Puffer [68]. Mit der Annahme der Rothenthurm-Initiative im Jahr 1987 wurde der Schutz von Feuchtgebieten nationaler Bedeutung in der

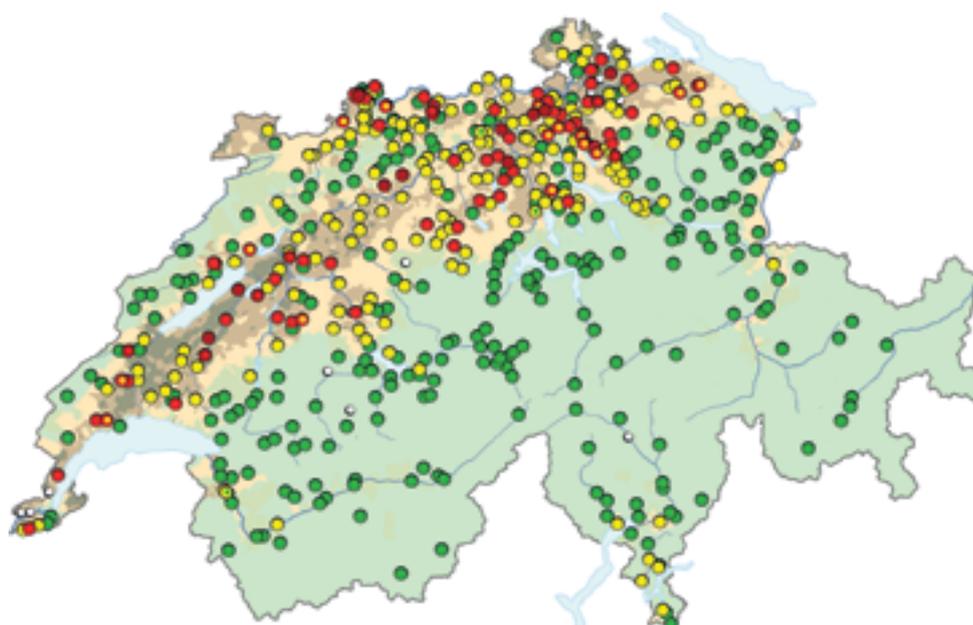


Abb. 9: Die höchsten Nitratkonzentrationen im Grundwasser finden sich im landwirtschaftlich intensiv genutzten Mittelland. (Grafik Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA, Bundesamt für Umwelt, 2011)

Nitratkonzentrationen

- ≤ 10 mg/l
- 10–25 mg/l
- 25–40 mg/l
- > 40 mg/l

- Maximalwert
- Mittelwert
- nicht beprobt

Anteil offenes Ackerland

- ≤ 1%
- 1–5%
- 5–20%
- 20–40%
- > 40%



Links: Der künstlich verlängerte Alpenrhein-zufluss in den Bodensee verhindert ufernahe Geschiebeablagerungen, welche die Hochwassergefahr durch Auflandung erhöhen könnten. (Foto VBS)

Mitte: Gänsesäger. (Foto Werner Scheuber)

Rechts: Graureiher. (Foto Michael Gerber)

Verfassung gesetzlich verankert. Wegen mangelnder Vernetzung und geringer Grösse der verbleibenden Moore und Sümpfe wird in der zweiten Jahrhunderthälfte ein Kollaps dieser Systeme vorausgesagt [70].

Weitaus sichtbarer sind die ökomorphologischen Auswirkungen von Speicherkraft- und Laufwasserkraftwerken. Viele Staumauern stellen ein Hindernis für die Wanderung von Fischen und anderen Organismen dar. Oberhalb werden Sedimente zurückgehalten, unterhalb wird der Lebensraum von einheimischen und invasiven Arten durch das veränderte Abflussregime, den veränderten Geschiebetransport und Sedimentablagerungen beeinflusst [71]. Dennoch generieren solche «Beeinträchtigungen» einen Nutzen für die Gesellschaft.

Neben der Landnutzung und dem Klima verändern auch ökologische Faktoren den Schweizer Gewässerraum. Der **Biber** zum Beispiel wurde ab den 1950er-Jahren ausgesetzt und hat sich bis heute mit rund 2000 Tieren entlang der grossen Flüsse Aare, Rhein, Rhone, Thur und Broye fast lückenlos etabliert. Bundesrechtlich bleibt er weiterhin geschützt. 90% der Biberaktivitäten im Kulturland spielen sich in einer Distanz von weniger als 10 m vom Gewässer ab. Mit der Ausscheidung des

Gewässerraums nach Gewässerschutzverordnung kann somit den Bibern ausreichend Raum geboten werden.

Die Bestände der Gänsesäger und Graureiher haben sich seit den 1960er-Jahren wieder erholt, nachdem sie wegen Bejagung fast ausgerottet waren. Der **Gänsesäger** lebt heute als genetisch eigenständige Population von rund 1200 Brutpaaren in den Schweizer Alpen. Da sich der Gänsesäger vorwiegend von kleineren und mittelgrossen Fischen ernährt, kann er einzelne Fischarten in verbauten Gewässern unter Druck setzen, wo für Fische keine natürlichen Rückzugsmöglichkeiten mehr bestehen. Der **Graureiher** wurde 1925 unter Schutz gestellt und unterhält heute eine stabile Population von etwa 1400 Paaren im Mittelland und im Tessin. Er ernährt sich von Fischen, Mäusen und Amphibien [72]. Fische, die auch zum Speiseplan der Wasseramsel und des Eisvogels gehören, sind ein wichtiger Bestandteil der Nahrungskette. Damit diese erhalten bleibt, müssen Gewässer, auch wenn sie vom Menschen genutzt werden, naturnah gestaltet und vernetzt werden. Auch müssen sie ausreichend Raum bieten, um die natürliche Fortpflanzung sämtlicher Arten zu gewährleisten.

Aktuelle Nutzung der Wasserressourcen

Wasser ist einer der wertvollsten Rohstoffe der Schweiz und wird in vielfältiger Weise genutzt. Dieses Kapitel beschreibt die gegenwärtigen Nutzungen und deren Auswirkungen auf das Wasserdargebot, die Wasserqualität und den Gewässerraum. Vor dem Hintergrund des klimatischen und des gesellschaftlichen Wandels können diese Kenntnisse auf potenzielle Nutzungskonflikte hinweisen. Die Analyse zeigt ferner auf, dass die gegenwärtigen Kenntnisse zur aktuellen Wassernutzung in der Schweiz ungenügend sind und vorwiegend auf Hochrechnungen und Abschätzungen beruhen. Als Grundlage für den Schutz und die Bewirtschaftung der Gewässer müssen Datenlücken geschlossen und vorhandene Daten zusammengefasst werden.

Bei der Verwendung von Wasser wird zwischen Wasserverbrauch und Wassernutzung unterschieden. Wenn Wasserentnahmen dazu führen, dass Wasser dem Kreislauf vorübergehend entzogen und dann verzögert, eventuell anderenorts, wieder zurückgeführt wird, sprechen wir in der Regel von **Wasserverbrauch**. Dazu gehören zum Beispiel der Trinkwasserkonsum, das Bewässerungswasser oder das Kühlwasser, welches in Kühltürmen von Kernkraftwerken verdunstet. Unter **Wassernutzung** verstehen wir die Verwendung von Wasser, welches sauber und ohne Verzögerung an die Umwelt zurückgegeben wird, sofern es dieser überhaupt entzogen wurde. Die Verwendung für die Wasserkraftproduktion, zur Durchflusskühlung und für den Transport sind typische Beispiele.

Quantitativ betrachtet man in der Schweiz die Wassernutzung als nachhaltig, solange die Nutzung die erneuerbaren Wasserressourcen nicht übersteigt. Erneuert werden die Wasserspeicher durch die Differenz zwischen Jahresniederschlag und Verdunstung, womit jährlich rund 40 km³ Wasser zur Verfügung stehen. Ob die Wassernutzung nachhaltig ist, kann allerdings nur unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten bestimmt werden. Für eine **nachhaltige Wassernutzung** reicht jedoch die ausschliessliche Betrachtung von Wasserverbrauch und -nutzung nicht aus. Neben gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Ansprüchen gilt es, auch die ökologischen Ansprüche zu berücksichtigen. Ziel der nachhaltigen Wassernutzung ist die Erhaltung der wesentlichen Eigenschaften der Ressource Wasser, ihrer Stabilität und der natürlichen Regenerationsfähigkeit.

Als **nachhaltige Wassergouvernanz** wird ein Prozess verstanden, in dem alle relevanten Akteure die Ziele der Nachhaltigkeit konkretisieren, ein gemeinsames Verständnis für die Probleme der Gegenwart und eine Vision für die Zukunft entwickeln und darauf aufbauend

die bestehenden Normen, Institutionen und Praktiken der Wassergouvernanz verändern. Dies ermöglicht, die Wasserressourcen so zu bewirtschaften, dass ein ausreichendes und gerechtes Mass an sozialer und wirtschaftlicher Wohlfahrt erreicht wird, ohne die hydrologischen Ökosysteme irreversibel zu beeinträchtigen.

Insgesamt werden in der Schweiz jährlich über 2 Mia. m³ Wasser für verschiedene Sektoren und öffentliche Zwecke verbraucht (Abb. 11) [9, 73]. Dies entspricht ca. 3,7% des Niederschlags bzw. 5,4% des erneuerbaren Wassers der Schweiz [28, 74].

Die Zahlen vermitteln den Eindruck, als würde nur ein kleiner Bruchteil des Wasserdargebots wirklich genutzt. Bezieht man die Kühlleistung für Kernkraftwerke oder die Nutzung für die Wasserkraftproduktion in die Betrachtung ein, ergibt sich ein anderes Bild: Die Wasserkraftbetreiber nutzen pro Jahr rund 248-mal mehr Wasser, als alle anderen Sektoren zusammen verbrauchen. Im Vergleich zum Dargebot verbraucht die Schweiz zwar wenig, nutzt aber viel (Abb. 12).

Der Wasserverbrauch unterliegt jährlichen und täglichen **Schwankungen**, welche stark von den Sektoren abhängen. Für die Walliser Region Crans-Montana-Sierre zum Beispiel, aber auch in anderen Tourismusorten, liegt eine Verbrauchsspitze im Sommer (Bewässerung und Trinkwasserkonsum), eine zweite im Winter (Trinkwasser und Kunstschneeproduktion). Die täglichen Nutzungsspeaks entstehen am späten Nachmittag, sobald die Touristen von ihren Ausflügen oder von der Piste zurückkehren (MONTANAQUA [6]). Wasserinfrastrukturen müssen in der Regel für diese Nutzungsspeaks dimensioniert sein.

Trinkwasserversorgung

Daten über die Abgabe von Trink- und Brauchwasser werden vom Schweizerischen Verein des Gas- und Wasserfaches gesammelt und durch die Wasserversorgungen ermittelt. Die wichtigste Trinkwasserreserve ist das Grundwasser, welches 80% des Trinkwassers liefert. Die restlichen 20% stammen aus Seewasser. Grundwasser ist in der Regel als Trink- und Brauchwasser am geeignetsten, da das versickernde Wasser verschiedene Reinigungsprozesse durchläuft. 25–30% des Trinkwassers werden aus Uferfiltrat gewonnen (RIBACLIM [75, 76]).

Für die Trinkwasserversorgung werden nur 2% (0,94 km³) des erneuerbaren Wassers genutzt (Abb. 13). Die Haushaltungen verbrauchen rund die Hälfte des über die öffentliche Versorgung verteilten Trinkwassers (447 Mio. m³). Gewerbe und Industrie beziehen weitere 300 Mio. m³. Beträchtliche Mengen gehen durch Verluste verloren (2006: 115 Mio. m³ [77]; 2012: 127 Mio. m³ [78]) oder fliessen über rund

«Wir haben eine gute Methode für die Planung von Infrastrukturen entwickelt, welche ganz unterschiedliche Ziele berücksichtigt.»

Judit Lienert
SWIP
Eawag



Mehr dazu im  SWIP
unter www.nfp61.ch



Abb. 10: In einem Schweizer Privathaushalt werden pro Person und Tag durchschnittlich 160–170 Liter Trinkwasser verbraucht. Fast 30% davon gehen auf Kosten der Toiletenspülung [81].

22 000 Laufbrunnen ab. Ein bescheidener Anteil wird von der Landwirtschaft verbraucht (31–36 Mio. m³) [73, 79].

Trotz kontinuierlichem Bevölkerungswachstum geht der **Trinkwasserverbrauch** seit den Achzigerjahren zurück. Der aktuelle Durchschnittsverbrauch liegt nun bei 325 Liter pro Person und Tag. Davon macht der Bezug der privaten Haushalte rund 160–170 Liter pro Einwohner und Tag aus (Abb. 10) [80]. Einer der Gründe für den sinkenden Wasserverbrauch liegt im strukturellen Wandel der Wirtschaft. Wasserintensive Industriezweige sind verschwunden, haben ihre Produktion ins Ausland verlegt oder recyceln Wasser. Im Privathaushalt haben wassersparende Technologien und Verhaltensänderungen zum Verbrauchsrückgang beigetragen.

Energiewirtschaft

Im europäischen Vergleich wird die Wasserkraft in der Schweiz sehr stark genutzt und ist der Hauptpfeiler der Elektrizitätsversorgung. Neben Wasserkraftanlagen und Pumpspeicherwerken im Hochgebirge tragen auch die Laufkraftwerke im Mittelland wesentlich zur Stromproduktion bei. Daneben ist Wasser für die Kühlung thermischer Nuklearkraftwerke elementar und gewinnt als Energieträger für Wärmetauscher an Bedeutung.

Wasserkraft wird seit 1879 zur Stromgewinnung eingesetzt [82], wobei die meisten Wasserkraftanlagen zwischen 1955 und 1970 entstanden sind. Seither erhöhte sich die inländische Wasserkraftproduktion nur geringfügig. Speicherkraftwerke nutzen rund **200 künstliche Stauseen** mit fast 4 km³ Speichervolumen. 1278 Zentralen produzieren heute rund 36 000 GWh pro Jahr, wobei wenige, dafür sehr grosse Zentralen (14%) über 90% der Stromproduktion bereitstellen. **Damit trägt die Schweizer Wasserkraft ca. 54% zur inländischen Elektrizitätserzeugung** bei [83].

Je rund die Hälfte der Wasserkraftproduktion stammt aus Laufwasser- bzw. aus Speicherkraftwerken.

Vergleicht man den Schweizer Stromverbrauch mit dem **Energieverbrauch**, wird deutlich, dass die inländische Wasserkraft nur rund 10% des Bruttoenergieverbrauchs zu decken vermag. Der Ausstieg aus der Atomenergie und europäische Dekarbonisierungspläne steigern die Erwartungen an die Wasserkraft zusätzlich und Ausbaupläne für die Wasserkraft liegen bereits vor (siehe S. 47ff). Doch die Wasserkraftproduktion stösst an Grenzen. Von insgesamt 1488 erhobenen Wasserentnahmestellen (Konzessionen) dienen 95% der Wasserkraftnutzung. Wie viel Wasser aus Flüssen und Bächen für die Produktion von Wasserkraft genutzt wird, kann aufgrund der ungenügenden Datengrundlage nicht genau quantifiziert werden, wird aber auf rund 550 000 Mio. m³ pro Jahr geschätzt [9]. In anderen Worten wird der gesamte Jahresabfluss rund vierzehnmal für die Elektrizitätserzeugung turbinieren, wobei die regionalen Unterschiede natürlich gross sind. Für die Region Crans-Montana-Sierre, zum Beispiel, werden rund 90% des genutzten Wasservolumens für die Wasserkraft genutzt und zweimal turbinieren, während die restlichen 10% für Bewässerung, Trinkwasserversorgung und Kunstschneeproduktion verwendet werden. Wasser aus Speicherseen wird auch für andere Zwecke verkauft, so zum Beispiel an Gemeinden (Trinkwasserversorgung), an Betreiber von Golfanlagen (Bewässerung) oder an Skibetriebe (Kunstschneeproduktion) (MONTANAQUA [6]).

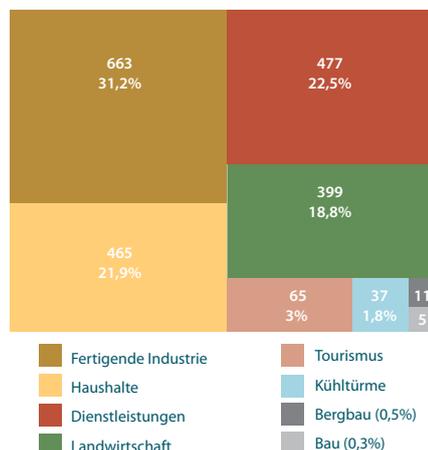
Theoretisch lässt sich die Wasserkraft weiter ausbauen. Betrachtet man die gesamte potenzielle Energie des Wassers, in der Annahme, dass alle Fließgewässer zur Stromerzeugung genutzt würden, werden derzeit nur gerade 30% ausgeschöpft [9]. Dies aus gutem Grund, setzen doch ökologische, wirtschaft-

Abb. 11 (links): Der jährliche Wasserverbrauch verschiedener Sektoren in der Schweiz summiert sich auf 2152 Mio. m³ (inkl. Trink-, Quell-, Grund- und Oberflächenwasser). (A. Björnson mit Zahlen aus [73])

Abb. 12 (rechts): Vergleich des Volumens des jährlichen Wasserverbrauchs (2152 Mio. m³) mit der Nutzung für Durchflusskühlung von KKW (1643 Mio. m³) und für die Stromproduktion (550 000 Mio. m³) in der Schweiz. (A. Björnson mit Zahlen aus [9], [65] und [73])

Wasserverbrauch nach Sektoren

in Mio. m³/Jahr
2152 Mio. m³/Jahr = 100%



Wassernutzung Wasserkraft

in Mio. m³/Jahr





liche, gesellschaftliche und raumplanerische Hemmnisse dem Ausbau in der dicht besiedelten Schweiz enge Grenzen: über 90% der für Wasserkraftproduktion geeigneten Flüsse werden bereits genutzt. Dennoch schätzt der Bund im Rahmen der **Energiestrategie**, dass die aktuelle Stromerzeugung durch Wasserkraft bis 2050 ohne Lockerung der Umwelt- und Gewässerschutzbedingungen um 10% gesteigert werden könnte [84]. Wie und in welchem Umfang dies geschieht, ist letztlich ein gesellschaftlicher Entscheid und eine Interessenabwägung zwischen Wirtschaft und Umweltschutz.

Dass sich die Wasserkraftproduktion auf die **Gewässerökologie** und die **Landschaft** auswirkt, ist unbestritten. So beeinflussen z.B. tägliche und jährliche Abflussschwankungen die **Fischgängigkeit**. In Ausleitkraftwerken wirkt sich die verminderte Fließgeschwindigkeit im **Restwasser** auf die Zug- und Scherkraft des Flusses aus, sodass Geschiebmaterial liegen bleibt, die Flusssohle kolmatiert und bei Spitzenabflüssen zu Risiken eines erhöhten Geschiebetransportes führt [85]. Andererseits ist Wasserkraft eine **umwelt- und klimaschonende Form** der Stromproduktion und übernimmt die vermehrt benötigten Regel- und Ausgleichsleistungen für die Sicherung der Netzstabilität. Zum Hochwasserschutz leisten Speicherkraftwerke durch die Dämpfung von

Hochwasserspitzen einen Beitrag und verhindern nicht nur Schäden, sondern auch die entsprechenden Folgekosten [86, 87]. Diese Dienste und die damit verknüpfte Ertragsminderung werden den Wasserkraftbetreibern bisher nicht vergütet.

Das revidierte Gewässerschutzgesetz trägt zur Überwindung bestehender Zielkonflikte bei, indem es z. B. vorschreibt, dass der natürliche **Geschiebehaushalt** so weit wie möglich gewährleistet sein soll (Art. 43). Ferner schreibt es die **Sanierung der Restwasserstrecken** von bestehenden und die gesetzeskonforme Umsetzung der Restwasserbestimmungen bei neuen und erneuerten Wasserkraftkonzessionen vor.

Die Umsetzung dieser Bestimmungen ist mit grossen rechtlichen, wirtschaftlichen und ökologischen Herausforderungen verbunden und wird nicht in allen Kantonen bis 2015 abgeschlossen sein [18]. Artikel 39 schreibt vor, dass **Schwall und Sunk** mit baulichen Massnahmen verhindert oder beseitigt werden muss. Auf Antrag können auch betriebliche Massnahmen angeordnet werden. Auch die Spülung und Entleerung von Stauräumen soll das Ökosystem im Unterlauf nicht beeinträchtigen und bedarf einer Bewilligung. Damit bietet das neue Gewässerschutzgesetz eine Chance, die Wasserkraft ökologischer auszugestalten.

Der Ausstieg aus der Atomenergie und europäische Dekarbonisierungspläne steigern die Erwartungen an die Wasserkraft.

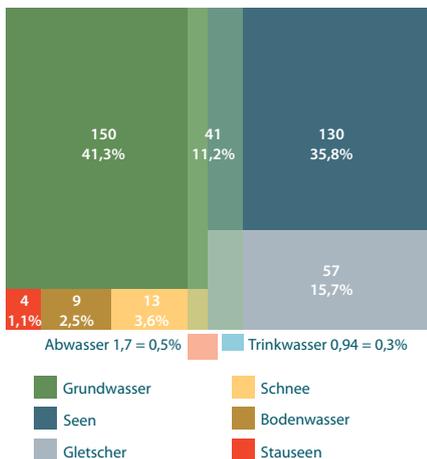
Links: Foto Lisa Rigendinger

Mitte: Essence Design

Rechts: NELAK

Erneuerbares Wasser Trinkwasservolumen

in Mia. m³/Jahr
363 Mia. m³ = 100%



Wasserverbrauch Dienstleistungen

in Mio. m³/Jahr
477 Mio. m³/Jahr = 100%

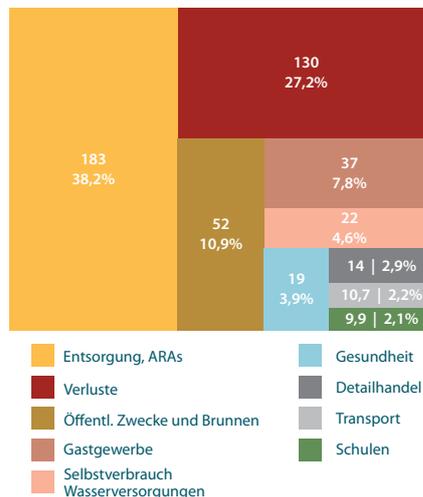


Abb. 13 (links): Nur 2% des erneuerbaren Wassers werden über die öffentliche Trinkwasserversorgung verteilt. Vermischt mit Strassen- und Meteorwasser gelangt fast die doppelte Menge in die Abwasserreinigungsanlage. (A. Bjørnsen mit Zahlen aus [79])

Abb. 14 (rechts): Jährlicher Wasserverbrauch für verschiedene Dienstleistungen von insgesamt 477 Mio. m³ (ohne Tourismus). Die Wassermengen stammen aus der öffentlichen Versorgung (Trinkwasser) sowie aus der Eigenversorgung. (A. Bjørnsen mit Zahlen aus [73])

NFP 61-Projekt WATERCHANNELS: Wasser prägt Lebensräume und Landschaft

Die historischen Bewässerungskanäle im Wallis und in Graubünden führen Wasser aus Gebirgsbächen auf trockene Wiesen, Äcker und Weinberge und prägen damit die Landschaft. Das Projekt WATERCHANNELS untersuchte die Auswirkungen der Beregnung und Berieselung auf die Artenvielfalt der Wiesen, Vögel und des Waldes und die damit verbundenen Nutzungssysteme. In den Heuwiesen wirkten sich die unterschiedlichen Bewässerungsarten nicht auf die Artenzahl von Pflanzen und Schnecken aus, und auch nicht auf die kleinräumige Verteilung von Bodennährstoffen und Pflanzenarten, wenn im gleichen Umfang und Rhythmus bewässert wird [88, 89]. Allerdings führte die Beregnung zu einem höheren Anteil an Grasarten [88], was sich negativ auf die Biodiversität anderer Organismen auswirken könnte. Von der Beregnung profitieren bei den Pflanzen die Generalisten. In der unmittelbaren Umgebung der Wiesen verringerte sich die Habitatsvielfalt [90]. Massnahmen wie die Nutzungshäufigkeit und Düngung können die Artenzusammensetzung unter Umständen viel stärker beeinflussen als die Art der Bewässerung [38]. So hat die Sprinklerbewässerung von ehemals nicht bewässerten Wiesen einen starken Einfluss auf die Nutzungsintensität und damit auf das Vogelvorkommen. Im Engadin haben die Wiesenbrüterbestände (z.B. Feldlerche, Baumpieper, Braunkehlchen) dort am stärksten abgenommen, wo sich auch die Vegetation und die Nutzung verändert haben [91]. In Waldbeständen verbessert die passive Bewässerung durch die offenen Wasserkanäle die Bodeneigenschaften und regt das Baumwachstum an [92]. Das führt zu einer erhöhten Habitatsvielfalt und damit zu einer erhöhten Biodiversität in inneralpinen Trockentälern, wo seit Jahren trockenheitsbedingtes Baumsterben beobachtet wird [93].

Von den offenen Wasserkanälen profitiert nicht nur die Natur, sondern auch die Gesellschaft: Die landschaftliche Heterogenität und die Habitatsvielfalt tragen entscheidend zur Attraktivität des Raumes bei. Die spektakulären Bauten und das mit der Bewässerung verbundene differenzierte Regelungssystem stellen ein bedeutendes Kulturerbe dar, sind aber nicht immer Garant für eine nachhaltige Wassernutzung. Die Suonengenossenschaften (frz. Bisses-Consortages) müssen sich vielmehr erneuern und gegenüber den effektiven Bewirtschaftern, Naturschutz- und Heimatschutz- sowie Tourismuskreisen öffnen, um in der stärker werdenden Wassernutzungskonkurrenz bestehen zu können [94].

NFP 61-Projekt AGWAM: Die Landwirtschaft am Tropf

Für die Schweizer Landwirtschaft würden heute gemäss Modellrechnungen jährlich durchschnittlich 154 Mio. m³ Bewässerungswasser benötigt, um einen Ertragsverlust durch Trockenheit zu vermeiden. In Trockenjahren kann sich dieser Wert allerdings vervielfachen. Geht man davon aus, dass bei vielen heute üblichen Bewässerungssystemen ein bedeutender Teil des Wassers ungenutzt bleibt, so müssen die Bedarfswerte zusätzlich nach oben korrigiert werden. Besonders hohe Bedarfswerte haben grosse Teile des Mittellandes, die Region um den Genfersee sowie verschiedene Alptäler (z.B. Rhonetal, Rheintal, siehe auch Abb. 15). Eine Abschätzung des flächenverteilt ermittelten Bewässerungsbedarfs für einzelne Kantone zeigt höchste Bedarfsmengen für die Kantone Bern, Waadt und Graubünden [95].

Im Projekt AGWAM wurde am Beispiel der Region Broye die Erhöhung des Bewässerungsbedarfs berechnet, welche der Klimawandel bis um 2050 mit sich bringt. Diese Menge könnte auch in einem durchschnittlichen Jahr mit hohem Produktionsniveau nicht durch Entnahmen in Fliessgewässern in der Region selbst gedeckt werden. Nur durch eine Anpassung der Bewirtschaftung (Kulturenwahl, Bodenbearbeitung) und der Raumorganisation sowie einen effizienten Einsatz des nutzbaren Wassers wäre der Bedarf einer produzierenden Landwirtschaft ohne zusätzliche Zufuhr aus grösseren Reservoirs (z.B. Neuenburgersee) zu decken.

NFP 61-Projekt IWAGO: Der Weg zu einer integrierten Wasserwirtschaft

Das Zusammenspiel der verschiedenen Akteure und Institutionen in der Schweizer Wasserwirtschaft wird durch eine Vielzahl von Gesetzen, Verordnungen, Regelwerken und informellen Absprachen geregelt. Diese Regelungen können unter dem Begriff Wassergouvernanz zusammengefasst werden.

Die wachsenden Nutzungsintensitäten in der Wasserwirtschaft führen vermehrt zu Konflikten zwischen verschiedenen Nutzungs- und Schutzinteressen. Zudem verlangen künftige Herausforderungen wie der Klimawandel und das Bevölkerungswachstum nach langfristigen und integrierten Planungen und Problemlösungen.

Das Projekt IWAGO analysiert zahlreiche regionale und kantonale Fallbeispiele und beschreibt drei mögliche Varianten für die Entwicklung in Richtung einer integrierten Wasserwirtschaft, welche auf dem Hintergrund der eidgenössischen Stärken und Schwächen reflektiert werden. Als «Schweizer Weg» empfohlen wird eine mittlere Variante: Zunächst sollen mit einem systematischen, flächendeckenden Grobscreening die Probleme und Potenziale in den hydrologischen Einzugsgebieten bestimmt werden. Nur dort – und nur in dem Ausmass –, wo eine integrale Bewirtschaftung sinnvoll und nutzbringend ist, soll das integrierte Wassermanagement auch umgesetzt werden. Der Impuls kommt vom Bund, die konkrete Ausgestaltung liegt aber in der Verantwortung von Kantonen und weiteren Akteuren [96].

Thermische Kraftwerke verbrauchen Oberflächenwasser für die Verdunstung in Kühltürmen. Für die Kraftwerke Leibstadt und Gösgen beläuft sich der jährliche Wasserverbrauch auf rund 39 Mio. m³, während weitere 1643 Mio. m³ als Durchlaufkühlwasser genutzt werden [65]. Im Sommer 2003 mussten die Bewilligungen für Kühlwasser aus den Flüssen wegen der hohen Wassertemperaturen durch die kantonalen Behörden überprüft werden. Um die Temperaturauflagen für das in die Aare zurückgeführte Kühlwasser einhalten zu können, reduzierten die Kernkraftwerke Beznau und Mühleberg zeitweise ihre Leistung [17].

Landwirtschaft

Die Schweizer Landwirtschaft benötigt jährlich rund 400 Mio. m³ Wasser. Wie viel für welchen Zweck verwendet wird, kann anhand von Konzessionen grob abgeschätzt werden. Genaue Verbrauchszahlen fehlen. Nur ein Drittel des landwirtschaftlich genutzten Wassers dient der Bewässerung und die bewässerte Fläche in der Schweiz ist noch sehr gering. Dennoch kann die Bewässerung lokal wichtig sein. Zukünftige Wasserknappheiten und Nutzungskonflikte müssen durch **Anpassungen in der Bewirtschaftung und der Raumorganisation** sowie durch einen **effizienten Einsatz des nutzbaren Wassers** entschärft werden.

In der Schweizer Landwirtschaft stellt nicht die Bewässerung (140–170 Mio. m³) [97] die wichtigste Wassernutzung dar, sondern das fließende Wasser der privaten Lauf- und Weidebrunnen (200 Mio. m³). Dieses Quellwasser wird nach kurzer Laufstrecke meist ungenutzt in ein Fließgewässer eingeleitet und nur in geringem Masse wirklich verbraucht [65]. In der Landwirtschaft dient Wasser ferner der Tränkung, Kühlung sowie der Reinigung von

Nahrungsmitteln, Gerätschaften, Ställen und Produktionsanlagen [73] (Abb. 16).

Bewässerung wird ein Thema, wenn sie für das Wachstum und die Ertragsbildung der Nutzpflanzen unerlässlich ist. Neben der mengenmässigen Ertragssicherung sind auch die Sicherung der Qualität sowie die Liefersicherheit und -kontinuität wichtige Faktoren. Nur 3–5% der landwirtschaftlichen Nutzfläche werden saisonal bewässert (rund 55 000 ha) [97, 98, 99]. Meist handelt es sich um kleinere Flächen oder ausgesprochene Trockengebiete.

An erster Stelle, was die Fläche und den Gesamtwasserbedarf betrifft, steht die Wiesenbewässerung. Der überwiegende Anteil des Bewässerungswassers geht nämlich auf Kosten der Suonenbewässerung (frz. Bisses) im Kanton Wallis, wo insbesondere Wiesen berieselt und beregnet werden, daneben aber auch Obst- und Rebanlagen. Die Wiesenbewässerung hat in niederschlagsarmen, inneralpiner Trockentälern des Wallis und des Engadins Tradition, wurde aber auch im Mittelland praktiziert. Insgesamt werden in der Schweiz ca. 27 000 ha Wiesen bewässert, was über einem Drittel der bewässerten landwirtschaftlichen Fläche entspricht (Abb. 17).

Das Ausmass der **Bewässerung unterscheidet sich regional**. Viel bewässert wird im westlichen **Berner Seeland**, der Gemüsekammer der Schweiz, welches zusammen mit dem östlichen Berner und dem Freiburger Seeland über beste Voraussetzungen für den Gemüse- und Ackerbau verfügt. Die Region ist begünstigt durch das scheinbar unerschöpfliche Wasserangebot der grossen Seen und der Aare, das mit dem Binnenkanalnetz zu den Bewirtschaftungsflächen gelangt [100]. Im **Wallis** wurde 2010 über ein Viertel (10 803 ha) der landwirtschaftlichen Nutzfläche bewässert, wobei die Hälfte auf Kunstwiesen und Dauergrasland

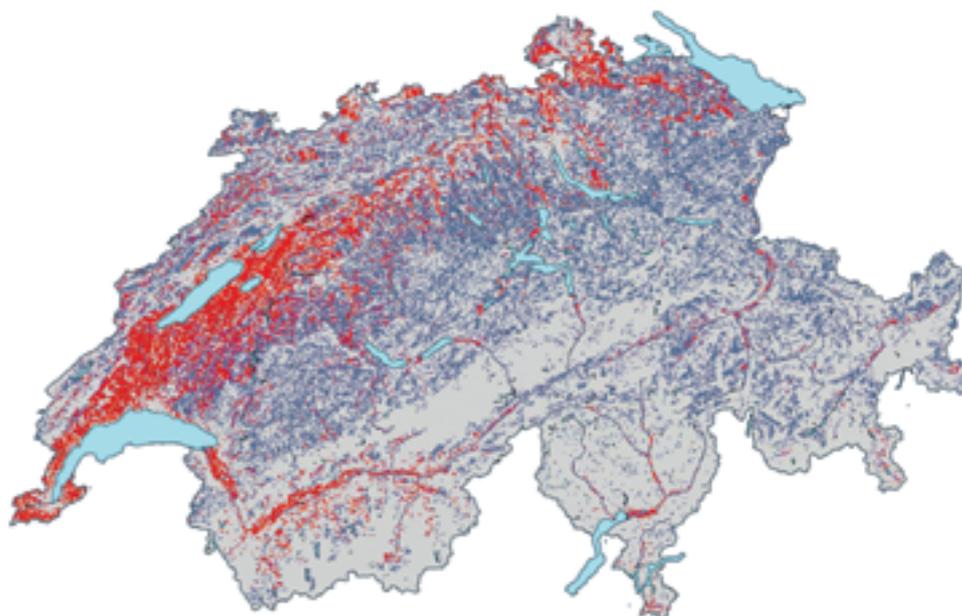


Abb. 15: Bewässerungsbedürftigkeit der landwirtschaftlichen Nutzflächen (1980–2006). Die Beurteilung basiert auf einem Schwellenwert für die relative Verdunstung (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration) von 0,8.

Farblich markiert sind Flächen, in denen der Schwellenwert in 33% der Jahre entweder unterschritten (rot = bewässerungsbedürftig) oder überschritten (blau = nicht bewässerungsbedürftig) wird. Graue Flächen werden nicht landwirtschaftlich genutzt. (Grafik Fuhrer und Jasper 2009).

Unterschreitung Schwellenwert (relativer Flächenanteil)

- Nein (74%)
- Ja (26%)



Links: Was die Fläche und den Gesamtwasserbedarf anbelangt, steht die Wiesenbewässerung an erster Stelle. (WATERCHANNELS)

Mitte: Suonenbewässerung im Kanton Wallis. (WATERCHANNELS)

Rechts: Viel bewässert wird im westlichen Berner Seeland, der Gemüsekammer der Schweiz. (DROUGHT-CH)

entfiel [99]. Daneben werden im Wallis auch Obst, Gemüse und Reben bewässert. Eine andere Erhebung hingegen schätzt die regelmässig bewässerte Landwirtschaftsfläche im Wallis auf mehr als das Doppelte (25 000 ha) [97]. Im Wallis erfolgt die Bewässerung mehrheitlich durch Beregnung (74% der Betriebe), zu einem geringen Anteil durch Berieselung (16%) oder Tröpfchenbewässerung (10%) [38]. Im geringeren Umfang werden auch im Kanton **Graubünden** Wiesen bewässert (2633 ha), wobei 80% der bewässerten Flächen auf Dauergrünland entfallen. Die Bewässerung erfolgt mehrheitlich durch Beregnung, der Anteil der Berieselung wird auf 8% geschätzt [99]. Die Bewässerung von Grünland wirkt sich nicht nur auf die Produktivität aus, sondern kann auch weitreichende Konsequenzen für das Landschaftsbild und die Artenvielfalt haben (→ WATERCHANNELS Seite 24).

Nebst den Wiesen im inneralpinen Raum sind es besonders die **Hochwertkulturen** wie Gemüse, Früchte und Beeren, aber auch Ackerkulturen wie Kartoffeln und Mais, die bewässert werden (Abb. 17). In Trockenjahren sind es Gebiete mit solchen Kulturen, die im Vergleich zu Gebieten mit hauptsächlich Dauergrünland einen stärker zunehmenden Bewässerungsbedarf aufweisen [95]. Schweizweit beziehen die meisten Betriebe ihr **Bewässerungswasser aus Bächen, Flüssen und Seen** (37% der Betriebe). Viele nut-

zen auch **Grundwasser** (30%) oder **Trinkwasser** aus der öffentlichen Versorgung (25%) [99] (siehe auch Abb. 18).

Die Bewässerung mit Grundwasser ist aus ökonomischen und ökologischen Gründen nicht unbedenklich, da Grundwasser über Bohrungen kontaminiert werden kann und auch Versalzungs- und Versickerungsprobleme auftreten können. Ebenfalls fragwürdig ist die Verwendung von Trinkwasser für die Bewässerung (wie auch in der Region Crans-Montana-Sierre praktiziert [MONTANAQUA] [6]). Für Gemüse und Früchte, die roh auf den Markt gelangen, muss das Bewässerungswasser die hygienischen Anforderungen von Trinkwasser erfüllen [97] (→ AGWAM Seite 24).

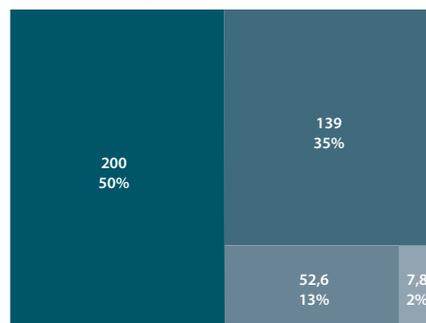
Die **Landnutzung** beeinflusst den Wasserhaushalt durch Umnutzung und Entwässerung. Seit 1945 wird den Gewässern durch Drainagen und Kanalisierungen verstärkt der natürliche Raum entzogen. Auch Bodennutzung, -bearbeitung und Düngung können einen Einfluss auf die Versickerung, die Verdunstung, den Abfluss und die Stoffeinträge haben, allerdings nur bei einer sehr intensiven Bewirtschaftung [101].

Zusätzliche Pflanzungen im Herbst, die durch die klimabedingte Verlängerung der Vegetationsperioden möglich werden, können die Grundwasserneubildung verzögern und reduzieren (minus 3%), dürften aber insgesamt unbedeutend sein [102].

Abb. 16 (links): Die Schweizer Landwirtschaft nutzt jährlich rund 400 Mio. m³ Wasser. (A. Björnson mit Zahlen aus [73, 79])

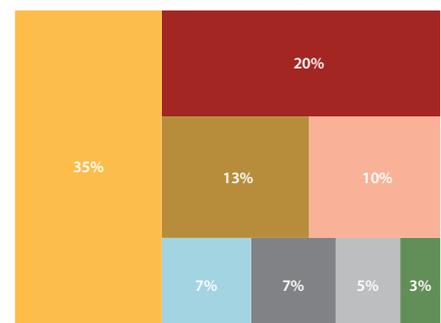
Abb. 17 (rechts): Bewässerte Fläche im Freiland in den Landwirtschaftsbetrieben in Prozenten von total 36 183 ha bewässerten Flächen. (A. Björnson mit Zahlen aus [99])

Wasserverbrauch Landwirtschaft
in Mio. m³/Jahr
399,4 Mio. m³/Jahr = 100%



■ Laufbrunnen ■ Nutzung im landwirtschaftlichen Betrieb
■ Bewässerung ■ Baumschulen

Bewässerte Fläche
in %
36 183 ha = 100%



■ Kunstwiesen und Dauergrünland ■ Reblagen
■ Gemüse und Erdbeeren ■ Getreide
■ Obst und Beeren ■ Mais
■ Kartoffeln ■ Anderes

Siedlungs- und Verkehrsflächen

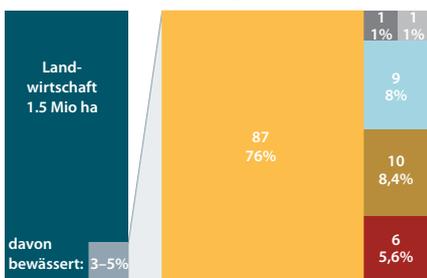
Siedlungsflächen nehmen rund 7,5% der Schweizer Landesfläche ein, im Mittelland sind es sogar 16% [103]. Für den Wasserhaushalt sind Siedlungsflächen relevant, weil davon etwa 60% bebaut, asphaltiert oder zubetoniert sind [104], was sich auf die Verdunstung, die Qualität und die Menge des Abflusses auswirkt. Über vegetationsfreien oder -armen Flächen ist die Verdunstung generell tiefer. Während von einer Wiese praktisch nichts abfließt, gelangen von einer Asphaltfläche 80% des Regens ungehindert in die Kanalisation. Trotzdem lässt sich der Einfluss der **Versiegelung** auf die Abflüsse schwer nachweisen. So führt der beschleunigte Abfluss bei Starkniederschlägen in Siedlungsgebieten nicht zwingend zu einer erhöhten Hochwassergefahr. Wird das Wasser nämlich schneller abgeleitet, als dies bei einer begrünter Fläche der Fall wäre, kann so die Siedlungswasserwelle im Vorfluter vorbei sein, bevor die natürliche Abflussspitze überhaupt entstanden ist. So wirkt sich «beschleunigtes Siedlungswasser» manchmal hochwasserermindernd aus. Anders verhält es sich bei überlasteten Kanalisationssystemen, die bei Starkniederschlägen Keller, Strassen oder Flächen überfluten können und deshalb im Hinblick auf zukünftige Klimaentwicklungen neu dimensioniert werden müssen. Mit der **verringerten Bodenversickerung** reduziert sich auch das Bodenwasservolumen. Dies wiederum führt zu geringeren Abflüssen in Trockenzeiten, verringerten Verdunstungsraten und einem reduzierten Wiederauffüllen von Grundwasserspeichern [85], was das Risiko von Trockenheit und Hochwasser erhöhen könnte. Letzteres ist angesichts des fortschreitenden Klimawandels mit sich mehrenden Starkregenereignissen besonders bedeutsam. Zugleich besteht auf versiegelten Bau-, Gewerbe- und Verkehrsflächen die Gefahr, dass Nähr- und Schadstoffe, die durch Risse in der versiegelten Oberfläche oder

durch Kanalundichtigkeiten punktuell in den Boden eindringen, weniger durch Regenwasser verdünnt werden und deshalb in erhöhter Konzentration im Boden vorliegen. Dadurch kann die Leistungsfähigkeit des Bodens als Filter- und Puffermedium überschritten werden, sodass Nähr- und Schadstoffe in hoher Konzentration in das Grundwasser gelangen. Nach Hitzegewittern haben auch sprunghaft erhöhte Wassertemperaturen negative Auswirkungen auf die Gewässerökologie. Versiegelung und Bebauung wirken sich folglich nicht nur auf die Menge des Grundwassers, sondern auch auf dessen Qualität aus [105]. Wie sich Siedlungsflächen auf die **Grundwasserneubildung** auswirken, ist schlecht erforscht, da Grundwasserleiter in Siedlungsgebieten ohnehin nicht zur Trinkwassergewinnung genutzt werden.

Das Strassennetz der Schweiz ist rund 87 000 km lang. Aus topografischen Gründen befinden sich viele Strassen in der Nähe eines Gewässers und beeinflussen dieses durch ihre Abflüsse, da ein Grossteil des **Strassenabwassers** unbehandelt abfließt. Durch Strassenabfluss verursachte Hochwasserspitzen können zu morphologischen Veränderungen wie zu Verschlammung, Erosion, Auflandung und Umlagerung von Feinsedimenten führen und die Gewässersohle verstopfen. Während eines Sommergewitters kann der plötzliche Wärmeeintrag die Temperatur des Gewässers erhöhen. Ist das von kurzer Dauer (Stunden), dürfte das für Flora und Fauna in den meisten Fällen unproblematisch sein. Im Winterhalbjahr kann die **Strassensalzung** den Ionengehalt von kleineren Gewässern stark beeinflussen, was v.a. Kiemenatmer beeinträchtigt. Problematisch sind auch Ablagerungen von belasteten Feinsedimenten an Seeufern, in Kleinseen oder in strömungsberuhigten Hinterwasserzonen, welche oft infolge Schwarzfärbung und geruchlich erkennbar sind. Insbesondere hohe Konzentrationen von Kupfer (bis 400 µg/l Cu) und Zink (bis 2000 µg/l Zn) sind im

Bewässerte Flächen: Herkunft und Volumen des Bewässerungswassers

114 Mio. m³/Jahr = 100%



- Anteil Suonenbewässerung
- Flüsse
- Grundwasser
- Kanäle, Bäche
- Seen
- Trinkwasser

Wasserverbrauch Industrie

in Mio. m³/Jahr

663 Mio. m³/Jahr = 100%

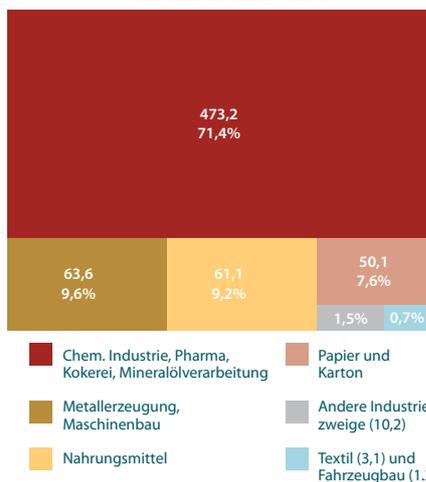


Abb. 18 [links]: Nur wenige Prozent der Landwirtschaftsfläche werden in der Schweiz bewässert. Der grösste Anteil des Bewässerungswassers stammt aus der Suonenbewässerung. (A. Björnsen mit Zahlen aus [97])

Abb. 19 [rechts]: Jährlicher Wasserverbrauch der fertigen Industrie von insgesamt 663 Mio. m³. (A. Björnsen mit Zahlen aus [73])

Strassenabwasser problematisch. Die biologischen Auswirkungen von solchen Schadstoffen betreffen insbesondere wenig mobile oder standortgebundene Organismen [106]. Mit etwa 5000 km ist das Schweizer **Schiennetz** wesentlich kürzer als das Strassennetz. Das Bahnareal, d.h. das Bahnhofgelände, offene Bahnstrecken und Bahngrün, nimmt rund 8500 ha Fläche in Anspruch und hat in den letzten Jahren nur geringfügig zugenommen. Der Bahnverkehr führt zu Emissionen, die mit dem Niederschlagswasser in die Gewässer gelangen können. Diese Emissionen werden v.a. durch physikalische Abriebprozesse an Bremsen (überwiegend Eisen), Fahrleitungsdrähten (Kupfer), Rädern und Schienen verursacht. Dazu gehört auch die Auswaschung von **Herbiziden** (seit den 90er-Jahren ausschliesslich Glyphosat), die im Gleisbereich mit Handspritzen zur Vegetationskontrolle angewendet werden. Im Vergleich zur Strassenentwässerung liegen die Schadstoffkonzentrationen in Gleisabwasser deutlich tiefer. Dort, wo es überhaupt gefasst wird, wird Gleisabwasser nach Möglichkeit direkt über die Böschung oder in einer Versickerungsanlage versickert oder in das Oberflächenwasser eingeleitet. Im urbanen Raum wird Gleisabwasser teilweise auch der Kläranlage zugeführt. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei geringer Wasserführung (<10 l/s) und gleichzeitig hohem Abfluss von den Gleisanlagen die Konzentrationen von Chrom, Kupfer und Zink problematisch sein können, während Eisen unterhalb des Toleranzwertes für Trinkwasser liegt. Die Glyphosatwerte liegen bis zu einem Faktor 190 über den Qualitätszielen für Fließgewässer, wenn sie beim ersten Regenereignis nach der Applikation gemessen werden [107]. In kleinen Vorflutern können solche Konzentrationen ökologische Auswirkungen haben.

Industrie und Gewerbe

Obwohl die Industrie- und Gewerbezone in der Schweiz flächenmässig zulegen, ist der industrielle Wasserverbrauch insgesamt rückläufig [108], mitunter wegen verschwundener Grossverbraucher, Rezykliersystemen und Spartechnologien. Daneben ist zu beobachten, dass der Bezug durch die öffentliche Trinkwasserversorgung zunehmend durch die Eigenversorgung substituiert wird. Trotzdem bleibt der Industrie- und Gewebesektor mit einem Jahresverbrauch von über 1 Mia. m³ Wasser der mit Abstand grösste Wasserverbraucher in der Schweiz (Abb. 19). Vergleicht man die verschiedenen Industriezweige, gehört die **Chemie** zu den grössten Verbrauchern. Sie benötigt Wasser zur Herstellung chemischer Erzeugnisse und für die Mineralölverarbeitung und bezieht dies fast ausschliesslich aus Eigenversorgung. Bedeutende Mengen werden noch immer durch die **Papierbranche** verbraucht, die sich weitgehend selber versorgt. Die **Nahrungsmittel-**

branche verwendet grosse Mengen an Trinkwasser. Die Branchengruppe **Metall** deckt den jährlichen Bedarf weitgehend selber ab. Die **Textilbranche** spielt eine untergeordnete Rolle. Der Bedarf für die Druckindustrie, die Kunststoff- und Glasherstellung sowie die Energieerzeugung (ohne Wasserkraft und Kühlwasser) (= **weitere Branchen**) wird in grossem Ausmass durch Eigenversorgung mit Oberflächenwasser abgedeckt. Der grösste Anteil entfällt auf das in Kühltürmen verdunstete Wasser in den Kernkraftwerken Gösgen und Leibstadt. Auch in der **Entsorgungsbranche** spielt Wasser eine wichtige Rolle, wo es für die Kühlung von Kehrrechtverbrennungsanlagen sowie für die Abwasserreinigung genutzt wird. Nicht zu unterschätzen ist der Wasserverbrauch für **weitere Dienstleistungsbranchen** (Detailhandel, Transportwesen, Bäder und Tierparks, Gastgewerbe, Bildungsstätten, Spitäler, Heime) sowie die Verwaltung (v.a. Gebäudeklimatisierung) und Finanzinstitute, wo der Anteil an Trinkwasser mehr als die Hälfte ausmacht [65].

Rohstoffgewinnung

Kies und Wasser gehören zusammen. Und die Schweiz ist reich an **Kies**, dem einzigen Rohstoff, den der hiesige Boden in grösseren Mengen hergibt. Aus 900 Gruben und Steinbrüchen und 100 Stellen an Seen und Flüssen werden pro Jahr fast 50 Mio. Tonnen Kies und Sand abgebaut [109]. Kiesabbau ist bewilligungspflichtig und darf den Geschiebebehalt nicht nachteilig beeinflussen (NELAK [14]). Die wichtigsten Kiesreserven bestehen aus jungquartären und postglazialen Flussablagerungen, also Ressourcen, die gleichzeitig auch bedeutende Grundwasserleiter sind und durch die natürliche Reinigungswirkung einen grossen Dienst für die Trinkwasserversorgung leisten. Aufgrund der Geologie gibt es grosse regionale Unterschiede. In einstmaligen vergletscherten Regionen bieten Schotterablagerungen wertvolle Kiesreserven. Der Jura und das St. Galler Rheintal hingegen verfügen über praktisch kein Kiesvorkommen. In Bergregionen wird der Kies aus Geschiebematerial und Bachablagerungen gewonnen.

Was die Auswirkungen auf das **Grundwasser** betrifft, ist bei der Kiesgewinnung sowohl der Abbau wie auch die Wiederauffüllung der Gruben bedeutend. Das Gewässerschutzgesetz schreibt deshalb vor, dass eine schützende Materialschicht von mindestens 2 m über dem natürlichen, zehnjährigen Grundwasserhöchstspiegel belassen werden und die Grundwasserneubildung erhalten bleiben muss. Was die Wiederauffüllung von Kiesgruben betrifft, untersagt die technische Verordnung für Abfälle die Errichtung von Deponien innerhalb von nutzbaren Grundwasservorkommen. Inertstoffe im Randbereich dürfen hingegen deponiert werden. Die Wegleitung Grundwasserschutz weist auf die Gefahr hin, dass das Auffüllmaterial teilweise verschmutzt



sein oder die natürliche Grundwasserneubildung oder -belüftung behindern kann. Der Kiesabbau macht die Grundwasservorkommen vulnerabler gegenüber Schadstoffeinträgen und reduziert das nachhaltig nutzbare Grundwasserangebot um ca. 0,6% [110].

Die Branchengruppe Kies umfasst neben der Gewinnung von Kies und Sand die Herstellung von Zement und Frischbeton. Wasser wird sowohl für die Kiesaufbereitung verwendet wie auch für die Betonproduktion. Der Wasserverbrauch wird auf rund 16 Mio. m³ geschätzt, wobei der Grossteil durch die Eigenversorgung gedeckt und aus Grundwasserreserven bezogen wird (über 10 Mio. m³ pro Jahr) [65, 109].

Schifffahrt

Der Fluss als Verkehrsweg ist nicht nur für den Tourismus von Bedeutung, sondern auch für den internationalen Gütertransport. Bezogen auf die Gütermenge werden über die Rheinhäfen rund 15% des Aussenhandels abgewickelt; bei den Mineralölprodukten sind es sogar 35%. Das entspricht einem Gütertransport von 9 Mio. Tonnen pro Jahr. Dank der Schnee- und Gletscherschmelze im Frühjahr und Sommer weist der Fluss auch während niederschlagsarmen Monaten einen stabilen Abfluss auf. Der Hitzesommer 2003 machte aber deutlich, wie empfindlich dieser Verkehrsweg ist. Aber auch Hochwasserereignisse wie im Februar 1999 und im Mai 1994 können zu einem wochenlangen Unterbruch der Schifffahrt führen [111].

Tourismus

Wasser spielt für den Tourismus nicht nur als Landschaftselement eine entscheidende Rolle, sondern auch für **Freizeitaktivitäten, Bäder und Thermen, zur Bewässerung von Golfanlagen, die Ausflugsschifffahrt und für die Beschneigung** (Abb. 20). Rund die Hälfte der Hotelleriebetriebe liegt in den Bergkantonen Graubünden, Wallis, Luzern und der Ostschweiz und ist massgeblich vom **Wintertourismus** und vom natürlichen Schneevorkommen abhängig [112]. Seit den 1980er-Jahren gehen die Schneemengen in der Schweiz zurück und beeinträchtigen den Betrieb v.a. in Skigebieten unter 1300 m [113]. Um Kunden einen planbaren Skiurlaub und

Bahnen und Hotellerie die überlebenswichtigen Einkünfte zu garantieren, werden seit 1990 Pisten künstlich beschneit. Heute werden 39% der Pistenfläche (rund 90 km²) beschneit [114], weit weniger als in den Nachbarländern Österreich (67%) und Italien (70%). Die höher gelegenen Skigebiete in der Schweiz profitieren nach wie vor von einer grossen Schneesicherheit. Dennoch wird die für die Kunstschneeproduktion benötigte Wassermenge auf jährlich 8,4 bis 17 Mio. m³ geschätzt [65, 85]. Um den Wasserbedarf zu decken, werden in höheren Lagen Speicherbecken angelegt. Falls diese unterhalb des Skigebietes liegen, wie im Falle des Tseuzier-Sees in Crans-Montana-Sierre, muss das Wasser vor der Verwendung hochgepumpt werden (MONTANAQUA [6]). Trinkwasser wird für die Beschneigung selten verwendet (0,2% des gesamten Trinkwasserverbrauchs) [65], kann lokal aber beträchtliche Mengen in Anspruch nehmen [115, 116]. Kritiker bemängeln, dass durch die Verdunstung im Wasserspeicherbecken, während der Kunstschneeproduktion und auf der Piste grosse Wassermengen nicht zum Abfluss gelangen, diesen verzögern und kleinräumig sogar das Hochwasserrisiko erhöhen [117, 119]. Tatsächlich führt die Beschneigung zu einem Verdunstungsverlust von 10–30% der benötigten Wassermenge [83, 118]. Bezieht man die Verdunstung in Speicherseen mit ein, gehen bis zu 50% verloren. Da die Gewässer im Winter generell eine tiefere Wasserführung aufweisen, ist das Einhalten der Restwassermenge ökologisch wichtig.

Im Frühjahr und Sommer kamen bei zehn untersuchten Skigebieten bei beschneiten Flächen durchschnittlich über 360 zusätzliche Liter Wasser pro Quadratmeter zum Abfluss (im Vergleich zu Naturschnee). Aufgrund der hohen Bodenverdichtung unter Skipisten kann der erhöhte Abfluss zu Bodenerosion, grösseren Rutschungen oder zur Vernässung der an die Pisten angrenzenden Bereiche führen [120].

Bei der Beschneigung spielen auch qualitative Betrachtungen eine Rolle. Wird nährstoffreiches Wasser aus talnahen Flüssen oder Seen hinaufgepumpt [116, 121], kann dieses einen entscheidenden Einfluss auf das Wachstum und die Artenzusammensetzung der Alpwiesen haben. Durch die zunehmende Praxis, Speicheranlagen in Hochlagen zu errichten und dort nährstoffarmes Wasser zu sammeln,

Links: Siedlungsflächen nehmen rund 7,5% der Schweizer Landesfläche ein, im Mittelland sind es sogar 16%. (IWAQA)

Mitte: Das Strassennetz der Schweiz ist rund 87 000 km lang. Aus topografischen Gründen befinden sich viele Strassen in der Nähe eines Gewässers. (Foto Reportair)

Rechts: Dank der Schnee- und Gletscherschmelze im Frühjahr und Sommer weist der Rhein auch während niederschlagsarmen Monaten einen ausreichenden Abfluss auf. (DROUGHT-CH)



Links: Auch Parks und Freizeitanlagen benötigen Bewässerungswasser. Hier Golfanlage in Crans-Montana. (MONTANAQUA)

Mitte: In grossen Tourismusdestinationen wie Crans-Montana unterliegt der Trinkwasserverbrauch den saisonalen Schwankungen der Gästezahl. (MONTANAQUA)

Rechts: Künstlich beschneite Skipiste auf dem Jakobshorn während des schneearmen Dezembers 2011. (Foto VBS)

ist dieses Risiko in den letzten Jahren aber gesunken. In der Schweiz ist ferner die Zumischung von bakteriellen Kristallisationskeimen (Snomax) erlaubt, welche für die Vegetation als unbedenklich eingestuft werden. Gewächshausexperimente haben allerdings gezeigt, dass gewisse Pflanzen mit gesteigertem resp. verzögertem Wachstum auf die Behandlung mit Snomax reagieren [122]. Für die alpinen Fliessgewässer gelten die primär organischen Bestandteile von Snomax ebenfalls als unbedenklich, da sie sich innert Tagen abbauen [123]. Zu den Auswirkungen von Kunstschnee-Schmelzwasser auf die Ökologie alpiner Fliessgewässer liegen keine Untersuchungen vor. Dasselbe gilt für den Verbleib von Schneehärtern auf Skipisten, das heisst Salze, die der Schneedecke Wärmeenergie entziehen und für die Präparierung von Rennpisten eingesetzt werden. In der Schweiz werden solche Anwendungen in Ausnahmefällen vorgenommen [124].

Wassergouvernanz und Wasserinfrastruktur

Wassergouvernanz beschreibt Regeln, Normen und Zusammenarbeitsprozesse, welche Aktivitäten im Zusammenhang mit Wasser leiten und damit den Umgang mit Wasserressourcen steuern. Dies betrifft die Wassernutzung und -verteilung, aber auch den Gewässerschutz und den Schutz vor Wasser, was insbesondere im Zusammenhang mit dem Gletscherschwund und den neuen Seen Bedeutung gewinnt. Wichtige Instrumente für die Wassergouvernanz sind Gebühren und Konzessionen, die für Bau, Betrieb und Unterhalt diverser Wasserinfrastrukturen erhoben werden.

Laut **Bundesverfassung Art. 76** sorgt der Bund für die häushälterische Nutzung und den Schutz der Wasservorkommen sowie für die Abwehr schädigender Einwirkungen des Wassers. Er legt Grundsätze fest über die Erhaltung und die Erschliessung der Wasservorkommen, über die Nutzung der Gewässer zur Energieerzeugung und für Kühlzwecke sowie über andere Eingriffe in den Wasserkreislauf. Mittels Gesetzen und Verordnungen erlässt der Bund Vorschriften über den Gewässerschutz, die Sicherung angemessener Restwassermengen, den Wasserbau und die Sicherheit der Stauanlagen. Kantone und Gemeinden

verfügen über die Wasservorkommen und verwalten diese. Dazu gehören die **Wasserversorgung, die Abwasserentsorgung, der Hochwasserschutz, der Gewässerschutz und Revitalisierungen**, aber auch die **Wasserkraft**. Für die integrative Betrachtung dieser Aufgaben verfügt die Schweiz über reichlich Erfahrung, wird aber durch die verbreitete Fragmentierung, die vorherrschenden sektoralen Strukturen und die dezentrale Bewirtschaftung der Wasserressourcen in der Umsetzung stark gefordert (IWAGO [96]). Die vom Bundesrat angekündigte **Wasserstrategie Schweiz**, die aufgrund des Postulats Segmüller (11.3914) im Jahr 2011 angestossen wurde, stellt eine politische Antwort auf die Sorge um Wassersicherheit und Koordination der Wassernutzung dar. Wie eine solche ganzheitliche Wasserstrategie am besten formuliert wird, ist jedoch weniger offensichtlich. Das Potenzial einer stärkeren Integration ist dabei unbestritten (→ IWAGO Seite 24).

Auch im **Berggebiet** braucht es Gouvernanzüberlegungen. Gletscher und Gletscherseen, auch solche, die durch den Gletscherschwund erst neu entstehen, unterliegen als sogenanntes kulturunfähiges Land der kantonalen Hoheit und stehen jedem zur freien Benützung offen (Wandern, Skitouren, Schlauchbootfahren usw.). Nur in Ausnahmefällen, die in historischen Nutzungsrechten oder in alten Grenzbeschreibungen begründet liegen, stehen Gletscher und ihre Seen im Eigentum von Privatpersonen (z.B. Rhonegletscher oder die Aaregletscher). Sondernutzungen wie z.B. für die Wasserkraft, Seilbahnen oder Skipisten benötigen eine Wasserrechtskonzession bzw. eine andere staatliche Bewilligung, in welchen die Nutzungsrechte und die Pflichten festgelegt werden (z.B. bei Wasserrechten, Leistungen, Bedingungen, Wasserzins, Konzessionsdauern und möglichem Heimfall). **Schwindende Gletscher und neue Seen** konfrontieren uns nicht nur mit veränderten Nutzungsbedingungen, sondern auch mit der Frage nach der Haftung oder von strafrechtlichen Sanktionen, falls unterhalb liegende Bauten oder Anlagen bzw. ihre Benutzer durch Eis- oder Felsstürze, Murgänge oder Flutwellen beschädigt bzw. verletzt werden. Grundsätzlich sind bei Gletschergefahren Kantone und Gemeinden verantwortlich, die mit raumplanerischen und wasserbaulichen Massnahmen einige präventive Instrumente



zur Hand haben. Im Schadenfall müssen Geschädigte allerdings ihren Schaden selber tragen, wenn keine Werkeigentümerhaftung oder eine Haftung gestützt auf schuldhaftes Verhalten greift. Werkeigentümer wie zum Beispiel Betreiber von Wasserkraftanlagen haben nämlich dafür zu sorgen, dass ihr Werk keine Mängel aufweist. Auch bei zufälligen, von menschlichem Verhalten unabhängigen Ereignissen gilt die Kausalhaftung. Das heisst, dass es grundsätzlich auf das Verschulden des Werkeigentümers nicht ankommt und er im Falle von Körper- oder Sachschäden als Folge von Werkmängeln haftet. Eine Haftung des Werkeigentümers ist jedoch nicht gegeben, wenn Fälle sogenannter höherer Gewalt vorliegen (z.B. heftige und seltene Hochwasser, Murgänge, unvorhersehbare Lawinen und grosse Felsstürze).

Auch Präventionsmassnahmen zur Abwehr schädigender Einwirkungen des Wassers gehören zur Aufgabe der Gemeinwesen und Werkbetreiber. Im Zusammenhang mit Gletscherseen gelten für Wanderwegverantwortliche und für die Betreiber von Stauanlagen spezielle Pflichten. Bei drohender Gefahr müssen Staueisen abgesenkt oder geleert werden können. Bei grösseren Staueisen muss zudem, falls der sichere Betrieb der Stauanlage nicht mehr gewährleistet ist, ein Wasseralarmsystem erstellt sein (NELAK [14]).

Wasser ist wertvoll und gilt als öffentlicher Rohstoff. Für die Wasserkraftnutzung verlei-

hen Kantone und Gemeinden privatrechtlichen Unternehmen ein Nutzungsrecht, d.h. eine **Konzession**, für maximal 80 Jahre. Die Konzessionsnehmer entrichten dafür ein Entgelt für die Sondernutzung, den sogenannten **Wasserzins**. Gesamtschweizerisch belaufen sich die Wasserzinse auf rund 400 Mio. Franken pro Jahr [125].

Wertvoll ist auch die **Wasserinfrastruktur**. Die Schweizer Wasserwirtschaft investiert jährlich über 7 Mia. Franken in den Unterhalt und für den Neubau von Anlagen [126]. Am kapitalintensivsten ist die Wasserkraft, gefolgt von der Wasserversorgung, der Abwasserentsorgung, dem Wasserbau und dem Hochwasserschutz (inkl. Revitalisierungen), Drainagen und Pumpen (Abb. 21).

Die Betriebskosten der Wasserversorgung und der Abwasserentsorgung (aber nicht deren Kapitalkosten) werden grundsätzlich über verursachergerechte und kostendeckende Gebühren gedeckt. So kostet 1 m³ Trinkwasser durchschnittlich 1.85 Franken, was rund 30 Rappen pro Kopf und Tag entspricht [81]. Auch die Abwassergebühren von durchschnittlich 1.80 Franken pro m³ werden verursachergerecht ausgestaltet. Das Gesetz schreibt vor, dass die Gebühren nicht nur den Unterhalt, sondern auch Sanierungen und Ersatzbauten decken müssen. Um den Wert der Abwasserreinigungsanlagen und der Kanalisation zu erhalten, müssten jährlich 2,2 Mia. Franken aufgewendet werden. Dem stehen Einnah-

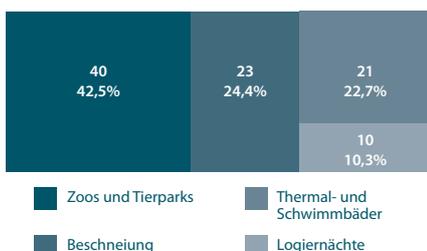
Links: Schwindende Gletscher und neue Seen konfrontieren Berggänger, Unternehmer sowie Behörden mit veränderten Nutzungsbedingungen. (NELAK)

Mitte: Grundsätzlich sind bei Gletschergefahren Kantone und Gemeinden verantwortlich. (NELAK)

Rechts: Im Zusammenhang mit Gletscherseen gelten für Wanderwegverantwortliche und für die Betreiber von Stauanlagen spezielle Pflichten. (NELAK)

Wasserverbrauch Tourismus

in Mio. m³/Jahr
95 Mio. m³/Jahr = 100%



Wasserinfrastrukturkosten

in Mia. CHF/Jahr
7,8 Mia. /Jahr = 100%

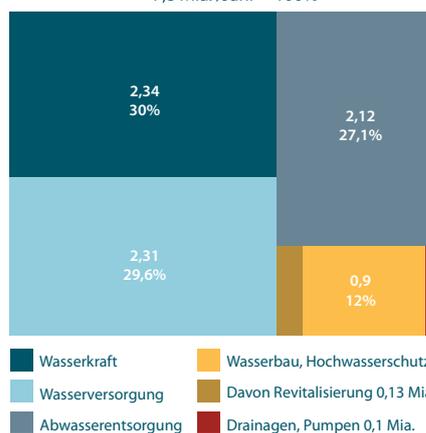


Abb. 20 (links): Jährlich werden in der Schweiz für Freizeit und Tourismus insgesamt 95 Mio. m³ Wasser verbraucht. (A. Björnsen mit Zahlen aus [73])

Abb. 21 (rechts): Jährliche Betriebs- und Kapitalkosten für diverse Wasserinfrastrukturen in der Schweiz. (A. Björnsen mit Zahlen aus [126, 127])



Links: Die Schweizer Wasserinfrastruktur ist wertvoll. (SWIP)

Mitte: Gebühren decken Unterhalt, Sanierungen und Ersatzbauten. (SWIP, Foto Max Maurer)

Rechts: Für die integrative Betrachtung der Siedlungswasserwirtschaft verfügen Schweizer Fachleute bereits über reichlich Erfahrung. (SWIP)

men in der Höhe von 1,7 Mia. Franken gegenüber, was auf eine deutliche Unterdeckung hinweist [128]. Weitere Investitionen sind für die vom Bundesrat vorgesehene Aufrüstung von rund 100 Abwasserreinigungsanlagen notwendig. Die Investitionskosten werden auf 1,2 Mia. Franken geschätzt, was jährliche Kosten von 60 Mio. Franken verursacht [129].

In den meisten Kantonen sind zudem **Konzessionsgebühren** für die Fassung, Nutzung und Entnahme von Wasser an die Kantone oder Gemeinden zu entrichten [17]. Die Gebühren sind kantonal unterschiedlich geregelt, wobei der Bund teils Vorgaben macht. Einige Kantone erheben eine einmalige, mengenabhängige Gebühr für Entnahmebewilligungen, andere Kantone erheben jährliche Gebühren für die bewilligte Leistung oder für Leistung und Menge.

Seit Mitte der 1980er-Jahre wurden durch **Subventionen** nur noch Bewässerungsanlagen in den inneralpinen Trockentälern unterstützt, v.a. im Wallis. In Zukunft könnte sich die Subventionspraxis aber ändern, um den Produzenten gleiche Bedingungen wie in der EU zu gewähren [97].

Für **Gewässerrevitalisierungen** stehen seitens des Bundes jährliche finanzielle Mittel von 40 Mio. Franken zur Verfügung. Mit diesen Mitteln werden Revitalisierungen in den Kantonen mit 35–80% aus Bundesmitteln gefördert. Des Weiteren werden Massnahmen zur Minderung von negativen Schwall-Sunk-Effekten, zur Wiederherstellung des Geschiebehaushalts und der Fischgängigkeit über Zuschläge via Swissgrid finanziert, hier geht man von einer Summe von etwa 50 Mio. Franken aus.

Die Schweiz regelt die Wasserbewirtschaftung aber nicht allein. Die **grenzüberschreitende Zusammenarbeit** im Bereich des Wassermanagements ist für die Schweiz wichtig und ermöglicht neben der gemeinsamen Bewirtschaftung auch den Austausch internationaler Expertise. Zu den Gremien, die sich um die grossen Gewässer mit Einzugsgebiet in Grenzregionen kümmern, gehören die Internationale Regierungskonferenz Alpenrhein (IRKA), die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), die Internationale Rheinregulierung (IRR), die Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB), die Internationale Kommission für den Schutz der schweizerisch-italienischen

Gewässer (CIPAIS), die schweizerisch-französische Kommission für den Schutz des Genfersees, der Rhone und ihrer Zuflüsse (CIPEL) und die Internationale Fischereikommission für den Doubs [96]. Wieso ist das wichtig? Der Rhein, zum Beispiel, entwässert nicht nur 68% der Schweizer Landesfläche, sondern auch die bevölkerungsstärksten Gebiete mit knapp 80% der Gesamtbevölkerung. Der Anteil an kommunalem Abwasser im Rhein bei Basel beträgt bei Niedrigwasser 5%. Was vom Rhein entsorgt wird, sorgt die Anrainerstaaten mit unterschiedlichsten Nutzungs- und Schutzinteressen. Seit 1963 dient die IKSR als völkerrechtliche Vertragsgrundlage. Sie verpflichtet sich seit 1976 zum Betrieb von Messstationen sowie zum Aufbau eines Warn- und Alarmsystems. 1987 folgte, als Reaktion auf die verheerenden Folgen des Schweizerhalle-Unglücks vom 1. November 1986 für Flussökologie und Trinkwassergewinnung, das «Aktionsprogramm Rhein», welches durch koordinierte Programme der Anliegerstaaten die ständige Schadstoffbelastung reduzieren, die hydrologischen, biologischen und morphologischen Verhältnisse verbessern und die Trinkwassergewinnung sichern sollte. Unter anderem wurde die Meldepflicht für Störfälle konkretisiert und eine kontinuierliche Überwachung der Rheinwasserqualität vereinbart (RÜS Basel) [64].

Klima- und Gesellschaftswandel: Auswirkungen auf die natürlichen Wasserressourcen

Die Schweiz befindet sich in der komfortablen Lage, sich wenig Sorge um das Wasserdargebot machen zu müssen. Grosse Speicher federn die Auswirkungen von Trockenperioden ab und lassen die jährlich benötigten Mengen für Trinkwasser und Bewässerung vernachlässigbar klein erscheinen. Aus gesamtschweizerischer Sicht geht man davon aus, dass trotz klimatischer, demografischer und wirtschaftlicher Veränderungen auch in Zukunft genügend Wasser zur Verfügung steht. Aber: Selbst wenn die Speichervolumina und jährlichen Abflüsse keine grossen Änderungen erfahren, werden die veränderten Umweltbedingungen zeitlich und räumlich für das zukünftige Wasserdargebot von Bedeutung sein. Landschafts- und landnutzungsbedingte Änderungen können lokal eine grosse Rolle spielen. Ob das Wasserschloss Bestand haben wird, hängt nicht zuletzt auch von gesellschaftlichen Ansprüchen und Nutzungen ab.

Klimabedingte Änderungen und Auswirkungen bis 2050 und 2085

Die Alpen bekommen den Klimawandel zu spüren. Im Vergleich zum globalen Durchschnitt stieg die Temperatur im Alpenraum im Verlauf des letzten Jahrhunderts etwa doppelt bis dreimal so stark an [130, 131]. Dies aufgrund der einfachen Tatsache, dass in den Bergen viel Schnee und Eis liegt. Im Gegensatz zu Boden und Wasser reflektieren Schnee und Eis einen Grossteil des einfallenden Sonnenlichts und erwärmen sich so weniger. Verringert sich die von Schnee und Eis bedeckte Fläche, wird die Region vergleichsweise stärker aufgeheizt. In anderen Worten: Die Abnahme der Schnee- und Eisflächen führt durch positive Rückkopplungseffekte dazu, dass sich das Klima in der Höhe stärker erwärmt als anderswo. Darüber hinaus führt der Temperaturanstieg zu einer Beschleunigung des Wasserkreislaufs. Da der Alpenbogen sowohl vom Atlantik als auch vom Mittelmeer beeinflusst und von konvektiven wie auch geschichteten Niederschlagsprozessen geprägt wird [132], stellen **Klimaszenarien für die Schweiz** eine spezielle Herausforderung dar, zumal auch die Topografie zuverlässige Aussagen erschwert. Um ein Bild über die zukünftigen Klimaentwicklungen der Schweiz zu erhalten, wurden unter dem Namen **CH2011** Szenarien publiziert, die quantitative Aussagen zur erwarteten Änderung der mittleren Temperatur, des mittleren Niederschlags sowie einer Auswahl von Klimaindikatoren enthalten [133]. Szenarien sind mit relativ grossen Unsicherheiten

verbunden, weshalb neben der Berechnung der Temperatur- und Niederschlagsänderung immer auch der dazu gehörende Unsicherheitsbereich bestimmt wird. Die Szenarien bauen auf einer grossen Anzahl verschiedener Klimamodellrechnungen des IPCC, des EU-Projektes ENSEMBLES sowie Analysen und weiteren Nachbearbeitungen des CH2011-Konsortiums auf. Das Projekt CH2011 verfeinerte diese Modelle für die nordöstliche und westliche Schweiz und das Gebiet südlich der Alpen für drei Zeitfenster (2020–2049, 2045–2074, 2070–2099). Als Weiterentwicklung zu früheren Klimaszenarien verwendete CH2011 drei Emissionsszenarien, A1B, A2 und RCP3PD (statt nur A1B), für die Modellrechnungen und bezieht damit eine mögliche CO₂-Reduktion auf 450 ppm bis Ende des Jahrhunderts in die Betrachtung ein. Die nachfolgenden Ausführungen stützen sich vorwiegend auf die Erkenntnisse von CH2011.

In der Schweiz wird der bisher beobachtete **Temperaturanstieg** anhalten und im Vergleich mit anderen Ländern stärker ausgeprägt sein [134, 135]. Bis 2050 werden viele Auswirkungen noch relativ gering sein, nach 2050 ist aber mit einschneidenden Veränderungen zu rechnen. Selbst wenn die globale Temperaturänderung in Bezug auf vorindustrielle Werte auf weniger als 2 °C stabilisiert wird (RCP3PD-Szenario), projizieren die Modelle eine weitere Erwärmung für die Schweiz von 1,4 °C gegen Ende des Jahrhunderts. In den Szenarien ohne Interventionsmassnahmen (A1B, A2) wäre die Erwärmung zwei bis drei Mal so gross.

Eine solche Erwärmung wird in allen Regionen und übers ganze Jahr erwartet, wenn auch mit unterschiedlicher Ausprägung. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts wird sich die Temperaturerhöhung weit deutlicher ausprägen und saisonal variieren. Für alle Emissionsszenarien ist die erwartete Temperaturzunahme im Sommer und im Winter am höchsten, während für die Gebiete südlich der Alpen die höchsten Werte erwartet werden (1,77 °C Anstieg der mittleren Sommertemperatur für RCP3PD-Szenario 2085; +4,83 °C für A2 2085; Abb. 22). Die Sommertemperaturen steigen stärker an als die Wintertemperaturen [133], weil die Bewölkung und die Bodenfeuchtigkeit im Sommer geringer sind [133].

Klimaextreme nennt man seltene, weit vom Mittelwert abweichende Ereignisse [135] wie ausgedehnte Hitze-, Trocken- und Kälteperioden oder Starkniederschläge. Voraussagen zu zukünftigen Veränderungen bezüglich Frequenz, Intensität, Dauer und räumlichen Ausmasses von Klimaextremen sind mit grösseren Unsicherheiten behaftet, als dies für Tempe-

«Absolut gesehen wird es im Jahr 2050 genug Wasser haben. Saisonal und regional kann es zu Engpässen kommen.»

Flurina Schneider
MONTANAQUA
Universität Bern



Mehr dazu im  MONTANAQUA unter www.nfp61.ch

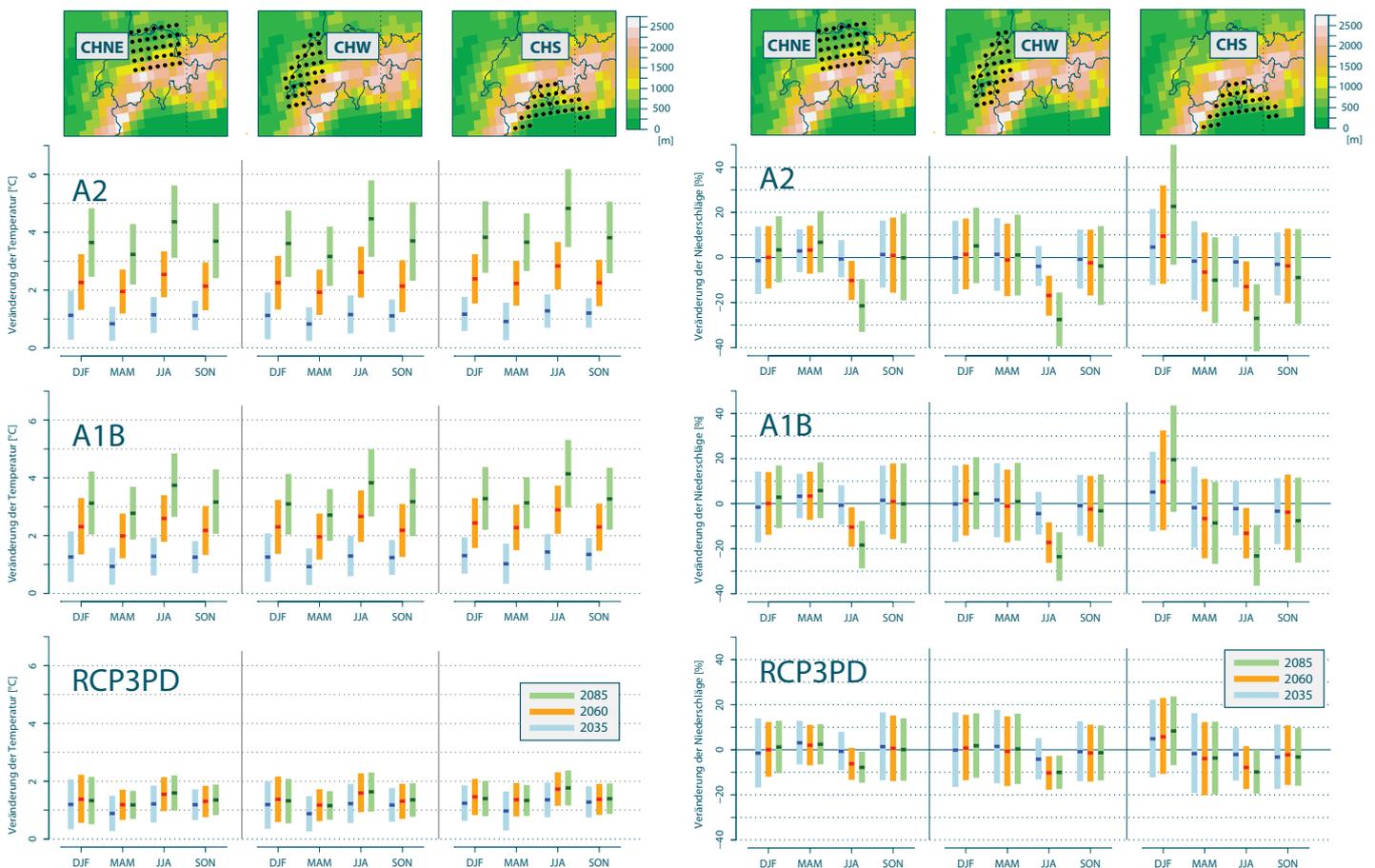
ratur- und Niederschlagsmodelle der Fall ist. Bereits während der letzten Jahrzehnte nahm die Frequenz und Intensität von **Hitzeperioden** in Zentraleuropa zu, auch in der Schweiz. Dieser Trend wird sich wahrscheinlich fortsetzen und weiter ausprägen. Dann könnte Ende des 21. Jahrhunderts jeder zweite Sommer so warm werden wie der legendäre Hitzesommer 2003 – oder sogar wärmer [136, 137]. Wahrscheinlich nimmt auch die Frequenz und Dauer von sommerlichen **Trockenperioden** zu. Abnehmen wird hingegen die Zahl der kalten Wintertage und -nächte und die Dauer und Häufigkeit von ausgedehnten Kälteperioden [135].

Niederschlag und Verdunstung

Die Prognosen für die Jahresniederschläge sind beruhigend: Die Menge dürfte nur geringfügig abnehmen [138]. Allerdings sind Voraussagen zu zukünftigen Niederschlagsänderungen durch die zentrale Lage der Schweiz mit grösseren Unsicherheiten behaftet. Während für Nordeuropa eine Zunahme der Niederschläge prognostiziert wird, dürfte sich die Niederschlagsmenge in Südeuropa stark verringern, v.a. im Sommer. In Frühjahr, Herbst und Winter befindet sich die Schweiz in der Übergangszone zwischen zwei Klimaregimes, was Voraussagen zusätzlich erschwert. Das jährliche **Niederschlagsvolumen** wird sich insgesamt um ca. 7% verringern. Während im Winter von einer Zunahme von 15–35%

ausgegangen wird, wird im Sommer überall mit einer Abnahme von 20–40% gerechnet [139]. Die Schweiz dürfte also auch in Zukunft viel Wasser haben. Sorgen könnten uns allerdings die Verteilung und die Intensitäten der prognostizierten Niederschläge bereiten. Nördlich des Alpenbogens wird eine Zunahme der mittleren Niederschlagsmengen im Herbst, im Winter und mancherorts auch im Frühjahr vorhergesagt. Während im **Sommer** die mittleren Niederschlagsmengen in allen Teilen der Schweiz abnehmen, insbesondere in der Süd- und der Nordwestschweiz (–30 bis –50%), erhöht sich das Risiko von Starkniederschlägen vor allem in der Nordwest- und Nordostschweiz. Für den **Herbst** lassen die Modelle eine Verstärkung der Intensiv- und Extremniederschläge in allen Regionen erwarten. Im **Winter** dürfte bedingt durch die Zunahme der Niederschlagsintensität die mittlere Niederschlagsmenge [132] und ebenso die Häufigkeit der Starkniederschläge deutlich zunehmen [135, 140]. Auch in der Südschweiz dürften die Winterniederschläge zunehmen, insbesondere in der zweiten Jahreshälfte [135]. Der Einfluss des Klimawandels auf das **Schneevorkommen** äussert sich räumlich wie auch zeitlich durch die steigende Schneefallgrenze. Es ist klar, dass in tiefen und mittleren Lagen, also in Höhenlagen nahe des Gefrierpunktes, im Winter vermehrt mit Regen statt Schnee zu rechnen ist [135, 139, 141]. Lag die mittlere

Abb. 22: Saisonaler Temperaturanstieg (links) und zukünftige Veränderung der mittleren, saisonalen Niederschläge (rechts) für die 3 Regionen der Schweiz für das A2-, das A1B- und das RCP3PD-Szenario für 2035, 2060 und 2085. Für den nordöstlichen Teil der Schweiz (CHNE) dürften die Wintertemperaturen (DJF) für das A2-Szenario für die ferne Zukunft (2085, grün) etwa 3,6 °C höher liegen als heute. (CH2011)





Nullgradgrenze im Winter 1960 bei ca. 600 m ü.M., so befindet sie sich heute bei ca. 900 m ü.M. und dürfte sich bis 2050 auf ca. 1200 m ü.M. verschieben [142]. Die Folgen sind auch im Tiefland zu spüren, weil die Schneeschmelze den **Abfluss** massgeblich beeinflusst. Zum Gesamtabfluss aus der Schweiz trägt die Schneeschmelze stolze 42% bei. Für das Mittelland sind es bloss 20%, für die Gebirgsregionen aber über 60%. Gemäss Modellrechnungen (A1B; Kontrollperiode 1980–2009) wird der Niederschlagsanteil, welcher im Winter in Form von Schnee akkumuliert und später als Schneeschmelze zum Abfluss beiträgt, in der ersten Jahrhunderthälfte um mehr als 15% abnehmen. Dieser Trend wird sich in der zweiten Szenarioperiode (2070–2099) noch massiv verstärken. Bei ähnlich bleibenden Niederschlagsmengen reduzieren sich die Schneeresourcen um mehr als 35% [143]. Selbst wenn die Winterniederschläge zunehmen und in höheren Regionen gesamthaft mehr Schnee fällt, dürften die Schneereserven im Frühjahr kleiner werden, da die Flächen, die nicht mehr mit Schnee bedeckt werden, überproportional gross sind im Vergleich zur gesamten schneebedeckten Fläche [28]. Ganz konkret wird eine Temperaturerhöhung um 4 °C bis 2071–2100 für Regionen um 1000 m ü.M. eine Reduktion des Schneevolumens von mindestens 90% zur Folge haben. Auf 2000 m ü.M. schwinden immer noch 50% und auf 3000 m sind es noch rund 35% des heute üblichen Schneevolumens. Diese Zahlen stimmen mit neueren Schätzungen überein, die für Höhenlagen auf 2000–2500 m ü.M. eine Reduktion auf 20 bis 70% des heutigen Schnee-Wasser-Äquivalents vorhersagen (A1B; Referenzperiode 1971–2000) [144].

Auch die Anzahl Tage mit Schneebedeckung wird sich verringern, v.a. auf Kosten der Schneetage im Frühjahr. Der Winter mag gering verzögert einsetzen, hört aber sehr viel früher auf. Neuere Modellrechnungen für Lagen in 1000–1500 m Höhe prognostizieren eine Reduktion der Schneebedeckung um 24 Tage (2020–2049) resp. 53 Tage (2070–2099) [141].

Was die **Niederschläge** betrifft, sagen die Klimamodelle für den Alpenraum eine Intensivierung der Extremereignisse voraus [141]. Im letzten Jahrhundert haben die Niederschläge im Winterhalbjahr und auch Starkniederschlagsereignisse zugenommen [145, 146].

Auch für die ferne Zukunft (2070–2099, A1B, Referenzperiode 1970–1999) wird aber ein erhöhtes Risiko für Extremereignisse vorausgesagt, sowohl für Starkniederschläge wie auch andauernde Trockenperioden [135], wobei die Wahrscheinlichkeit saisonal und regional unterschiedlich ist. Im Herbst wird auf der Alpennordseite mit einer Zunahme der Niederschlagsextrwerte bis zu 10% gerechnet, auf der Alpensüdseite mit 20%. Im Winter und Frühling liegt die Zunahme beidseits der Alpen zwischen 0 und 20%. Als Folge der Kombination von höheren Spitzen und längerer Dauer wird im Winter und Frühling eine Zunahme der Niederschlagsvolumen erwartet. Für den Sommer erlauben die Modellsimulationen keine Aussagen. Allenfalls sind Tendenzen für eine Zunahme nordalpin und eine Abnahme südalpin erkennbar [147]. Zuverlässige Vorhersagen für das **Auftreten von Stürmen** und Zyklonen sind zwar nicht möglich, doch wird davon ausgegangen, dass die Nordschweiz in Zukunft von seltenen, aber starken Zyklonen und Winterstürmen betroffen sein wird [135].

Während der vergangenen 100 Jahre ist die **Verdunstung** in der Schweiz angestiegen [148]. Mit der zunehmenden Temperatur und abnehmenden Schnee- und Eisflächen dürfte auch die potenzielle Verdunstung bis Ende des Jahrhunderts weiter um etwa 20% ansteigen [149]. Da in vielen Regionen während langer Zeit genügend Regen fällt, dürfte auch die reelle Verdunstung weiterhin leicht ansteigen [28], wobei es deutliche Unterschiede zwischen Regionen, Höhenlagen und Jahreszeiten geben wird. Während die Sommergeverdunstungsraten in hohen Lagen und auf der Alpensüdseite zunehmen werden, werden sie in niederen Lagen im nördlichen Mittelland und inneralpinen Tälern abnehmen (A2-Szenario für 2071–2100) [149]. Wieso das? Verknüpft man Klima- mit Waldentwicklungsmodellen, sagen diese für die Einzugsgebiete der Rhone und des Tessins eine Erhöhung der mittleren Verdunstung um 5 bis 10 mm pro Jahr voraus. In niedrigen Lagen (unter 1200 m ü. M.) führen die durch Trockenstress verursachten Waldschäden zwar langfristig (2070–2100) zu einer starken Verminderung der Verdunstungsraten, doch werden diese durch das gesteigerte Waldwachstum und die damit einhergehenden erhöhten Verdunstungsraten in höheren Lagen (über 1300 m

Links: Zum Gesamtabfluss aus der Schweiz trägt die Schneeschmelze 42% bei. (NELAK)

Mitte: Bereits während der letzten Jahrzehnte nahm die Frequenz und Intensität von Hitzeperioden in Zentraleuropa zu. (DROUGHT-CH)

Rechts: Ob das Wasserschloss Schweiz Bestand haben wird, hängt nicht zuletzt auch von gesellschaftlichen Ansprüchen und Nutzungen ab. (Foto Reportair)



Links: Im letzten Jahrhundert haben die Niederschläge im Winterhalbjahr und auch Starkniederschlagsereignisse zugenommen. (Foto Philippe Gyarmati)

Mitte: Wesentliche Teile des gegenwärtigen Eisvolumens der Schweizer Gletscher ($55 \pm 15 \text{ km}^3$) werden bis zur Jahrhundertmitte abschmelzen. (NELAK)

Rechts: Neuer Gletschersee am Fusse des Rhonegletschers im August 2012. Die Fläche des Gletschersees dürfte in Zukunft noch erheblich zunehmen. (Foto Wilfried Haeberli)

Abb. 23: Modellierte Übertiefungen und potenzielle Gletscherseen in den heute vergletscherten Schweizer Zentralalpen. Der grüne Kreis kennzeichnet den Gauligletscher mit einem bereits existierenden und einem voraussichtlich bald entstehenden Gletschersee. (Aus [154] (NELAK))

ü. M.) kompensiert [150]. Auch die verlängerte Vegetationszeit und die erhöhte Biomassenproduktion fördern die Verdunstung durch die Pflanze [151]. Allgemein könnten die höheren Verdunstungsraten im Sommer zusammen mit einer Erhöhung der Temperaturen und der Strahlung in der Schweiz die Abnahme der Bodenfeuchtigkeit weiter verschärfen und das Risiko einer landwirtschaftlichen Dürre erhöhen [135].

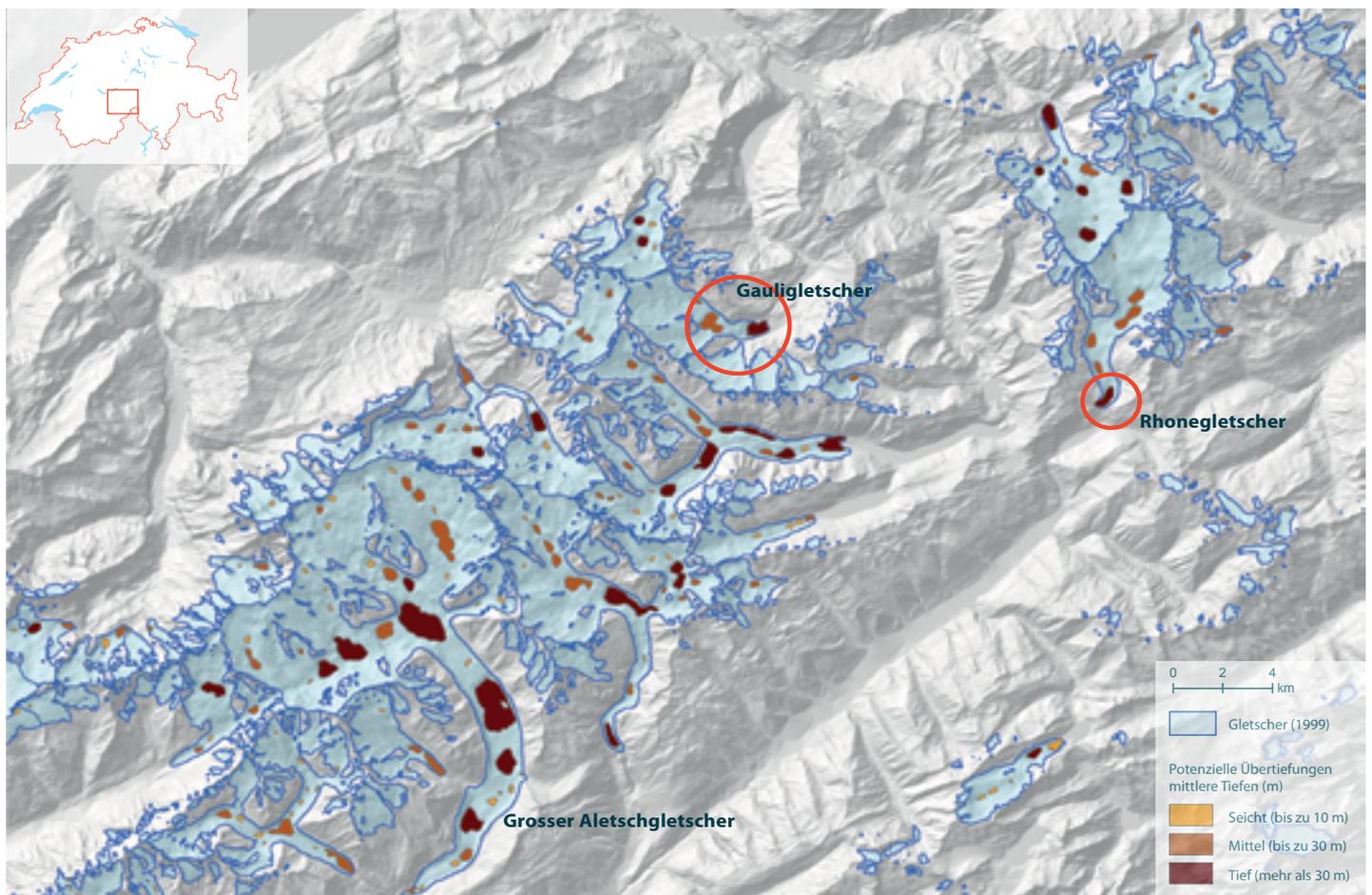
Gletscher

Nach den neuesten Hochrechnungen von NELAK verlieren die Gletscher der Alpen gegenwärtig jährlich etwa 40 km^2 ihrer heute noch verbleibenden Fläche (ca. 1800 km^2) und etwa 2 km^3 ihres Volumens ($80 \pm 20 \text{ km}^3$) [15]. Wesentliche Teile des gegenwärtigen **Eisvolumens der Schweizer Gletscher** ($55 \pm 15 \text{ km}^3$) werden bis zur Jahrhundertmitte abschmel-

zen. Selbst grosse Gletscher werden in der zweiten Jahrhunderthälfte bis auf kleine Reste verschwinden [152]. Damit reduziert sich auch der Abflussbeitrag durch Gletscherschmelzwasser.

Fehlt nach dem Gletscherrückzug die stabilisierende Eismasse und damit der Druck auf die Bergflanken, erhöht sich das **Risiko von Felsstürzen und Murgängen**. Die frei werdenden Bergflanken absorbieren die Sonnenstrahlung weit stärker, als es zuvor die Gletscherfläche getan hat, was zu einer zusätzlichen Erwärmung der Lufttemperatur führt. Wie vom Projekt NELAK genauer untersucht, bilden sich als Folge des Gletscherschwundes in den nächsten Jahrzehnten **neue Seen** [152], welche den Eiszerfall zusätzlich beschleunigen [153,154] (→ NELAK Seite 40, Abb. 23).

Weit weniger sichtbar als der Volumenverlust sind die **qualitativen Auswirkungen** auf



die Ökosysteme, die durch Gletscherwasser gespeist werden. Gletscherschmelzwasser transportiert viele Feinsedimente und gelöste Stoffe (z.B. Kalzium, Magnesium, Bikarbonate und Sulfat), ist kalt und unterliegt einer typischen Tages- und Jahresschwankung. Im Spätsommer trägt Gletscherschmelzwasser massgeblich zum Abfluss zahlreicher alpiner Bäche und Flüsse bei [155].

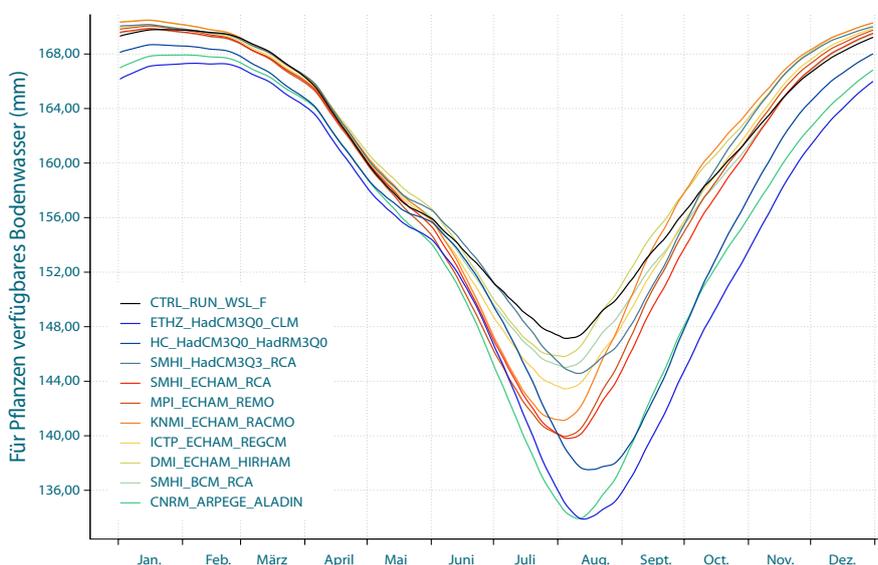
Flora und Fauna in hochalpinen Ökosystemen haben sich diesen Bedingungen angepasst. Im Zuge des Gletscherschwunds werden grundwassergespeiste und damit wärmere Bäche zunehmen [156]. Eine verkürzte Eisbedeckung von Gebirgsbächen und kleinen Seen, die sich wiederum auf die **Licht- und Temperaturverhältnisse** auswirkt, bestimmt auch das Algenwachstum und die davon abhängigen Organismen in der Nahrungskette. Der kleinräumige Charakter der Hochgebirgslandschaften hat zur Folge, dass die Temperaturerhöhung von alpinem Oberflächenwasser zum **Verschwinden von Spezies** führt, die diese Nischen bisher erfolgreich genutzt haben, aber auf keine anderen Lebensräume ausweichen können [157]. Ein Verlust der Artenvielfalt im Gletschervorfeld könnte die Folge sein, mitunter weil auch wärmeliebende Arten einwandern. Andere Studien haben gezeigt, dass sich der Gletscherschwund unmittelbar auf die Mikrobengesellschaften im Gletschervorfeld auswirken, welche geochemische Prozesse und Nährstoffkreisläufe antreiben und damit höhere Organismen mit der nötigen Nahrung versorgen. Verändern sich die Mikroorganismen in den alpinen Bach- und Seesedimenten, ist auch eine Veränderung der Tier- und Pflanzengesellschaften absehbar [156]. Gletscher sind nicht zuletzt auch ein wichtiger Motor der **Landschaftsentwicklung**, nicht nur in hohen Lagen. Wie für das Val Roseg gezeigt wurde, führt der Strom von Gletscherschmelzwasser dazu, dass das Grundwasser förmlich an die Talflanken zurück- und hochgedrängt wird, wo die vernässten Böden Tier-

ren und Pflanzen einen einzigartigen Lebensraum bieten. Fliesst dieses Hangwasser im Winter als Grundwasserstrom wieder ab, sorgt es dafür, dass die Temperaturen im Sediment über den ganzen Winter im positiven Bereich bleiben, selbst wenn die Lufttemperatur bis -18 °C sinken kann [155]. Versiegt dieser Schmelzwasserstrom, verändert sich auch das Ökosystem.

Als unmittelbare Folge des Eisschwundes lagern sich Sediment und Geschiebe im Gletschervorfeld ab und werden durch den Abfluss ins Tal transportiert. Mit der prognostizierten Zunahme von Extremereignissen kann dieses Material mobilisiert werden, zu einem erhöhten **Geschiebetransport** führen und die Flusslandschaft neu gestalten [158]. Bekannt ist der Geschiebetransport im Spreitgraben bei Guttannen im Berner Oberland, wo 2009 der auftauende Permafrost einen ersten Murgang auslöste. Seither kommt dieses Grabensystem nicht mehr zur Ruhe und bedroht Siedlungsteile, die Kantonsstrasse und eine grosse Gasleitung [159]. Für die Bewohner, aber auch für Wasserkraftbetreiber und Landwirte, stellt diese, durch das Klima angetriebene Landschaftsgestaltung eine Herausforderung dar. Gleichzeitig eröffnen **Gletscherseen** neue Perspektiven für die Wasserkraft und den Tourismus. Für die Wasserkraft interessant sind diejenigen Seen, die sich in flacheren Partien von Talgletschern bilden. Die Speicherfunktion der bestehenden und zukünftigen Stauseen ist für den Wasserhaushalt in der Schweiz von grösster Bedeutung, da diese nach dem Abschmelzen der Gletscher deren Speicherfunktion übernehmen müssen [153] (NELAK). Ob die neuen Gletscherseen den landschaftlichen Wert und die Anziehungskraft der verschwundenen Gletscher wettmachen können, wird unterschiedlich beurteilt.

Bodenwasser

Der Klimawandel wirkt sich direkt und indirekt auf das Bodenwasser aus. Temperatur



«Der Gletscherrückzug, weltweit und auch hier in der Schweiz, ist eindeutig eine Folge des Temperaturanstiegs in der Atmosphäre. Da besteht überhaupt kein Zweifel.»

Wilfried Haerberli
NELAK
Universität Zürich

Mehr dazu im NELAK unter www.nfp61.ch

Abb. 24: Projektionen des Bodenwassers der Schweiz für die ferne Zukunft (zehn Klimaszenarien in Farbe, 2070–2099) im Vergleich zur Kontrollperiode (schwarz, 1980–2009). Eine signifikante Abnahme des gespeicherten Bodenwassers wird v.a. im Spätsommer und Herbst erwartet. (Grafik CCHydro)

«Wir waren überrascht, dass der Grundwasserspiegel während des Pumpversuchs am Hagneck-Kanal grossräumig abgesunken ist – auf 10 km² etwa 10 Meter – obwohl noch sehr viel Wasser im Fluss verblieb.»

Daniel Hunkeler
GW-TREND
Universität Neuenburg



Mehr dazu im  GW-TREND unter www.nfp61.ch

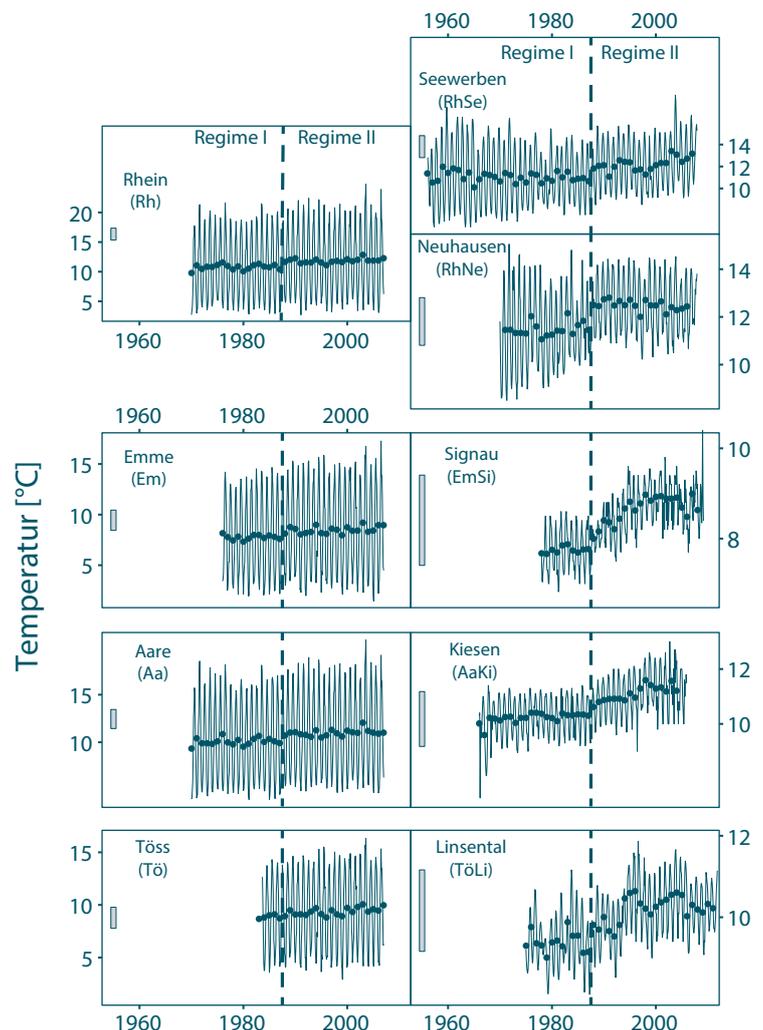
und Art, Menge und die Verteilung der Niederschläge wirken sich unmittelbar auf die Bodenstrukturen, die Abbauprozesse, die Vegetation und die Abflüsse aus. Viele dieser Prozesse sind bekannt und werden modelliert. Bezüglich der im Boden gespeicherten Wassermenge gibt es grosse Unsicherheiten. Gemäss den Ergebnissen von CCHydro dürfte sich der **Bodenwasserspeicher** in der nahen Zukunft nur unwesentlich verändern. Für die ferne Zukunft nimmt er aufgrund höherer Temperaturen und längerer Trockenperioden in den Sommermonaten jedoch erheblich ab (Abb. 24) [27]. Weil das Bodenwasser nur 2% des gesamten Speichervolumens ausmacht, scheinen die zukünftigen Veränderungen des Bodenwasserspeichers für die Gesamtbilanz des Wasserhaushaltes der Schweiz irrelevant [16]. Bodenwasser ist aber ökonomisch und ökologisch wichtig, weil es Niederschlagsdefizite über mehrere Wochen kompensieren kann. Wie eine Analyse im Einzugsgebiet des Rietholzbaches gezeigt hat, wurde das Niederschlagsdefizit im Frühjahr 2003 durch den vorgängigen Niederschlagsüberschuss kompensiert, sodass sich das Defizit nicht zusätzlich auf die nachfolgende sommerliche Trockenperiode ausgewirkt hat. Auf der anderen Seite wirkte sich der Hitzesommer 2003 bis ins drauffolgende Frühjahr auf die

Bodenspeicher aus (DROUGHT-CH [53]). Insbesondere die Landwirtschaft profitiert von der **Pufferwirkung des Bodens**. Doch es gibt auch das andere Extrem, wenn der Bodenspeicher voll ist. Die prognostizierte Zunahme der Winterniederschläge und die höheren Wintertemperaturen führen zu stärker gesättigten Böden im Winter und Frühjahr. Zu dieser Jahreszeit können erhöhte Niederschlagsintensitäten, insbesondere bei gleichzeitiger Schneeschmelze, im Mittelland und Jura zu Hochwasserereignissen führen [142].

Grundwasser

Mit rund 150 km³ Speichervolumen sitzt die Schweiz auf einer riesigen Grundwasserressource, welche sich auch im Zuge der Klimaveränderung nicht dramatisch verändern wird. Für die nachhaltige Grundwassernutzung interessiert aber nicht in erster Linie das Speichervolumen, sondern das Grundwasserdargebot, welches gerade in kleinen, lokalen Aquiferen abnehmen könnte [20]. Das Trockenjahr 2003, in welchem die Grundwasserspiegel zum Teil auf historische Tiefstände sanken, zeigte deutlich, dass es zu Engpässen kommen kann und dass Grundwasserdefizite auch im Folgejahr nicht immer wettgemacht werden können [160].

Abb. 25: Flusswassertemperaturen (links) und Grundwassertemperaturen (rechts). Zwischen 1980 und 2000 sind die Grundwassertemperaturen, bedingt durch eine – nur geringfügig stärkere – Zunahme der Luft- und Flusswassertemperaturen, um 1 bis 1,4 °C angestiegen. Auffällig ist der starke Temperatursprung in allen Zeitreihen Ende der 1980er-Jahre. (Aus [24] GW-TEMP)





Eine Schlüsselgrösse ist die **Grundwasserneubildung**, welche eine jahreszeitliche Verschiebung erfahren wird. Auch reagieren nicht alle Grundwasserleiter gleich. Für Grundwässer, die hauptsächlich durch Versickerung von Niederschlag gespeist werden, dürfte sich der Klimawandel insbesondere auf **pluviale Lockerstein-Grundwässer** im Jura und im Mittelland auswirken. Deren maximale Wasserstände von Januar bis März und trockenheitsbedingte Tiefststände im Spätsommer werden durch den Klimawandel nochmals verstärkt, insbesondere, wenn auch infiltrierende Flüsse trocken liegen. Auch Karstgrundwässer im Tiefland werden betroffen sein (SWISSKARST [26]). Für **pluvio-nivale Grundwässer** in den Voralpen und der Alpensüdseite ist eine Vorhersage schwierig, da die Infiltration stark davon abhängt, ob die Niederschläge als Schnee oder Regen fallen. **Nivo-glaziale Grundwässer in den Alpen**, deren Pegelstände heute Maxima zur Gletscher- und Schneeschmelze von Mai bis Juli erreichen, werden diese in Zukunft früher erreichen. Die Wintertrockenheit wird stark von den Schnee- resp. Regenmengen abhängen. In **alpinen Karstsystemen**, bei denen die Infiltration wegen der Schneebedeckung im Winter für 3 bis 6 Monate reduziert ist, dürfte sich die Wintertrockenheit in Zukunft weniger stark ausprägen. Viele wichtige Aquifere werden aber auch mit Flusswasser gespeist und weisen daher ein importiertes Regime auf. So können Grundwasserleiter auch im Mittelland ein alpines Regime aufweisen und entsprechend durch die frühere Schneeschmelze und den Gletscherschwund betroffen sein. Während sich zukünftige Niederschlagsänderungen massgeblich auf die Grundwasserermenge auswirken, beeinflusst die klimabedingte Temperaturerhöhung die Grundwasserqualität (Abb. 25). Ähnlich wie bei Oberflächengewässern spielen dabei einerseits die jährlichen Schwankungsmuster (Regimes) eine Rolle, andererseits auch die Herkunft des infiltrierten Wassers (Flusswasser oder Niederschläge) und die Grundwassertemperatur (→ GW-TEMP und RIBACLIM Seite 40). Die Temperatur von Grundwässern, die von Flusswasser gespeist werden, wird in Zukunft mit einer ähnlichen Rate ansteigen wie die Flusstemperatur selbst [22, 24, 25]. Selbst wenn die Vorhersagen mit erheblichen Unsi-

cherheiten behaftet sind, dürfte die **Temperaturerhöhung** im Bereich von maximal 1 °C bis 2,5 °C liegen (Referenzperiode 1980–2009) (GW-TEMP [23]). Bedeutend wichtiger als die durchschnittliche Temperaturerhöhung dürfte allerdings die Entwicklung von Extremwerten sein, d.h. der Einfluss von zukünftigen Hitzewellen auf die Grundwasserqualität. Die vermehrten Sommertrockenperioden in kleinen und mittleren Flüssen führen darüber hinaus zu verminderten Abflussraten und folglich zu einem verschlechterten Verdünnungsverhältnis zwischen Flusswasser und geklärtem Abwasser. Wie das Projekt RIBACLIM aber gezeigt hat, führt dies nicht zwingend zu einer Kontamination von flussgespeistem Grundwasser. Auch **Stoffeinträge** bleiben für die zukünftige Grundwasserqualität weiterhin ein Thema. Die Stickstoffauswaschung wird durch den Klimawandel womöglich noch verstärkt werden (Starkniederschläge). Der Nitratgehalt wird in erster Linie von der Landnutzung und -bewirtschaftung beeinflusst [161]. Feuchtere und wärmere Winter ermöglichen den Bodenbakterien, aktiver zu bleiben und mehr Stickstoff zu mineralisieren, welcher dann mit den Frühlingsniederschlägen in die Gewässer und ins Grundwasser transportiert wird [142]. Erhöhte Nitratwerte können auch nach einem Wiederanstieg des Grundwasserpegels nach einer trockenheitsbedingten Grundwasserspiegelabsenkung auftreten [25].

Abfluss

Änderungen der Niederschläge, der Verdunstung und des Speichervolumens sind bestimmend für die zukünftigen **Abflüsse**. Nur ein geringer Anteil der Niederschläge fliesst direkt ab. Der grösste Teil wird in der Schneedecke, in Gletschern, im Boden- und Grundwasser oder in Seen zwischengespeichert. Diese Speicher sind mitverantwortlich, dass sich der mittlere Abfluss wie auch die Abflussregimes in den grossen Schweizer Einzugsgebieten in den letzten 100 Jahren kaum verändert haben [148] und auch Starkniederschläge nicht automatisch erhöhte Abflussspitzen zur Folge haben [147]. Betrachtet man die Zukunft, wird sich die Schweiz auf reduzierte, jahreszeitlich verschobene Abflüsse, aber auch auf vermehrte Hochwasser einstellen müssen [139, 162]. Infolge der erwarteten Abnahme der Som-

Links: Wie eine Analyse im Einzugsgebiet des Rietholzbaches gezeigt hat, wurde das Niederschlagsdefizit im Frühjahr 2003 durch den vorgängigen Niederschlagsüberschuss kompensiert. (DROUGHT-CH)

Mitte: Anhand von Archivdaten wurde die Entwicklung der Grundwassertemperatur in den letzten Jahrzehnten untersucht. (GW-TEMP)

Rechts: Die klimabedingte Temperaturerhöhung kann die Grundwasserqualität beeinflussen. (RIBACLIM)

NFP 61-Projekt NELAK: Alpen ohne Gletscher?

Als erstes Land erhielt die Schweiz für ihren Hochgebirgsanteil jüngst ein hochaufgelöstes digitales Geländemodell «ohne Gletscher». Für ein solches Modell wird, aufgrund von Radarmessungen und physikalischen Grundprinzipien, aus der Oberflächentopografie die Eisdicke und damit das Gletscherbett berechnet. Mit dieser Grundlage kann nun abgeschätzt werden, wie sich die Hochgebirgslandschaft zukünftig entwickelt. Im Bereich der heutigen Gletscherbetten zeigt das Modell 500–600 geschlossene Depressionen mit einer Gesamtfläche von rund 50–60 km², in denen sich in absehbarer Zukunft Seen mit einem Gesamtvolumen von 2 km³ bilden könnten, was rund 3% des heutigen Gletschervolumens der Schweiz entspricht [15, 153]. Potenzielle Seen mit Volumen über 50 Mio. m³ sind in flacheren Partien der Gletscher Aletsch, Gorner, Otemma, Corbassière, Gauli und Plaine Morte zu erwarten. Solche Seen könnten zusätzlich künstlich aufgestaut werden. Sie kompensieren teilweise den Attraktivitätsverlust durch den Gletscherschwund, sind für die Wasserkraft interessant und könnten bei heisser und trockener werdenden Sommern ohne Gletscher sogar für die Wasserversorgung eine Rolle spielen. Sie müssen aber weiterhin als gefährliche Schönheiten betrachtet werden [153, 154], weil die Stabilität der Steiflanken mit dem Eisschwund langfristig abnimmt, was zu grosskalibrigen Sturzereignissen mit weit reichender Schwall- und Flutwellenbildung führen kann [163]. Flutwellen und Murgänge als Folge von Seeausbrüchen im Hochgebirge können über grosse Distanzen schwere Schäden anrichten. Hochwasserabflüsse aus entsprechenden Grossereignissen können dabei das Ausmass von Niederschlagshochwassern bei Weitem übersteigen und den Charakter von Flutwellen und Murgängen nach Dambrüchen annehmen [15]. Die Wahrscheinlichkeit solch potenzieller Katastrophen mag derzeit noch klein erscheinen, nimmt aber mit wachsender Anzahl neuer Seen und weiter schwindendem Eis zu [13].

NFP 61-Projekt GW-TEMP: Lässt der Klimawandel das Grundwasser kalt?

Der Sauerstoffgehalt ist ein wichtiger Parameter für die Güte des Grundwassers. In den meisten Aquiferen, die untersucht wurden, sinkt die Sauerstoffkonzentration langfristig. Der Grund liegt wohl in den erhöhten Wassertemperaturen, welche die mikrobiellen Abbauraten steigern [23]. Was kümmert uns das? Problematisch sind die Redoxverhältnisse, die durch die niedrigen Sauerstoffkonzentrationen verändert werden. Wird nämlich Sauerstoff vollständig gezehrt, können unter Umständen natürliche Eisen- und Manganhydroxide durch mikrobiologische Prozesse in Lösung gehen und im Pumpwerk bei Kontakt mit der Umgebungsluft wieder ausfallen. Solche Ausfällungen stellen die Eignung des Grundwassers für die Trinkwasserproduktion infrage. Einerseits wegen der geschmacklichen und optischen Beeinträchtigung, andererseits wegen technischer Probleme bei der Förderung des Grundwassers (Verstopfen der Pumpenfilter) [22], wie es z.B. im Spätsommer 2003 bei einer Trinkwasserfassung im Thurtal vorkam. Die meisten Wasserversorgungen fördern aber Trinkwasser ohne Aufbereitung, sind also nicht für die Behandlung von sauerstoffarmem oder gar anoxischem Rohwasser ausgerüstet [160]. Das langfristige Verhalten der Sauerstoffkonzentration ist nicht alleinig von der Temperatur abhängig und kann von Grundwasser zu Grundwasser stark variieren. In einigen Grundwässern lassen sich 60–70% der Variabilität der Sauerstoffkonzentration anhand der Fluss- und Grundwassertemperatur statistisch erklären. In anderen ist der Einfluss gering oder gar nicht vorhanden [22]. Ein wichtiger Faktor sind nämlich Hochwasserereignisse, die der Bodenversiegelung (Kolmatierung) des Flussbettes entgegenwirken, das System also förmlich mit sauerstoffreichem Wasser durchspülen oder die Grundwasseräquifere durch höher gelegene Infiltrationsbereiche auffüllen. In Zukunft mögen anoxische Zustände in flusswassergespeisten Aquiferen vielleicht häufiger auftreten, doch dürften regelmässige Hochwasser das System auch wieder durchspülen [164].

NFP 61-Projekt RIBACLIM: Heisse Zeiten für das Trinkwasser

Fast ein Drittel des Grundwassers stammt aus Flusswasser, welches durch die klimatischen Veränderungen, insbesondere durch extreme Sommertemperaturen, massgeblich beeinflusst wird. Das Projekt RIBACLIM untersuchte die klimabedingten Veränderungen auf dem Weg vom Fluss ins Grundwasser, um daraus Erkenntnisse für die zukünftige Wasserversorgung und die Abwasserreinigung zu gewinnen. Temperatur ist wichtig, weil das geklärte Abwasser, welches in die Flüsse geleitet wird, in der Regel hohe Frachten von organischem Kohlenstoff führt, welcher von Mikroorganismen abgebaut wird. Steigende Grundwassertemperaturen fördern die mikrobielle Aktivität und folglich auch die Sauerstoffzehrung, was das Risiko von Fe- und Mn-reduzierten Verhältnissen erhöht. Wenn zukünftig ein Fluss während der Sommermonate weniger Wasser führt, erhöht sich sowohl der Abwasseranteil wie auch die Wassertemperatur. Hat das Folgen für die Grundwasserqualität?

Wie Untersuchungen an der Thur und zusätzliche Laborexperimente zeigten, ist die Zehrung von gelöstem organischem Material nicht temperaturabhängig. Die Zehrung des partikulären organischen Materials hingegen unterliegt einer deutlichen Temperaturabhängigkeit und bestimmt die Redoxprozesse. So wurden an der Thur bei einer Wassertemperatur von über 20 °C vollständig sauerstofffreie Bedingungen angetroffen [75, 165]. Trotzdem ist die Gefahr gering, dass es deswegen zu Fe- und Mn-Ausfällungen (Verockerungen) kommt, denn unter heutigen Sommerbedingungen ist genügend Nitrat vorhanden, um das Redoxsystem zu puffern. Für die Trinkwasserqualität problematisch ist allerdings die Tatsache, dass unter Laborbedingungen aus der Zehrung von Nitrat teilweise Nitrit und Ammonium entstehen können [165].

Das Redoxmilieu in Uferfiltrationssystemen wird aber nicht allein von Temperatur und Kohlenstofffrachten bestimmt, sondern hängt gleichfalls vom hydraulischen Anschluss vom Fluss ans Grundwasser und von der Einzugsgebietcharakteristik ab. Die höchste Vulnerabilität haben Uferfiltrationssysteme, die durch einen direkten hydraulischen Anschluss des Flusses an das Grundwasser und durch ein Einzugsgebiet ohne Rückhaltebecken charakterisiert sind. Dort kann eine starke Erhöhung der Flusstemperatur während zukünftiger Hitzewellen den Umsatz von partikulärem organischem Material dermassen steigern, dass es zu einer kompletten Zehrung des gelösten Sauerstoffs und allenfalls Nitrats kommt, was die Mn- und Fe-Lösung begünstigen könnte [75, 76].



merniederschläge um 21–28%, des rückläufigen Beitrags der Gletscher sowie der leicht erhöhten Verdunstung wird für 2070–2099 mit einem um 1,1% verminderten jährlichen Wasserabfluss gerechnet, dies obwohl die Winterniederschläge tendenziell zunehmen [133].

Der Abflussbeitrag der **Gletscher** ist nicht zu unterschätzen, selbst wenn nur ein geringer Flächenanteil der Schweiz vergletschert ist und der gesamtschweizerische Beitrag der Gletscher zum Jahresabfluss mit 1–2% vernachlässigbar klein erscheint. Das legt den Trugschluss nahe, dass der zukünftige Wegfall der Gletscherschmelze unbedenklich sein dürfte. Doch Gletscher sind sowohl für kleine wie auch für grosse Einzugsgebiete bedeutend. In kleinen, hoch gelegenen und gletschernahen Fliessgewässern hat sich der Abfluss mit zunehmendem Gletscherschwund erhöht und Regimeänderungen sind bereits sichtbar [166]. Bis Ende des Jahrhunderts wird sich gerade in solchen Einzugsgebieten der Gesamtabfluss wieder stark verringern. Für zwanzig kleine Einzugsgebiete im südlichen Graubünden, zum Beispiel, wird mit einer Abnahme des Jahresabflusses von –23% gerechnet [167]. Diese **Regimeveränderungen** dürften sich auch in nivalen Regimes zunehmend bemerkbar machen [168]. Daneben leistet Gletscherschmelzwasser einen überregionalen und überproportionalen Beitrag zu den Abflüssen des Rheins, der Rhone, des Pos und der Donau, vor allem im Spätsommer, sobald der Schnee verschwunden ist und auch die Niederschläge im Ein-

zugsgebiet nur marginal zum Abfluss beisteuern (hohe Verdunstung). Der Rhein bei Basel, zum Beispiel, führt normalerweise im August rund 9% Gletscherschmelzwasser. Im Hitzesommer 2003 stieg der Anteil auf fast 23%. Für Flüsse, die in stark vergletscherten Einzugsgebieten liegen, ist die Situation noch extremer. Die Rhone bei Chancy, zum Beispiel, wird in normalen Jahren von rund 37% Gletscherschmelzwasser gespeist. Im Hitzesommer 2003 stieg der Anteil auf fast 75%. Fällt dieser Anteil an Gletscherschmelzwasser weg, sinkt der Pegel unter eine Marke, die für die Ökologie wie auch für die Wirtschaft (Schifffahrt, Kühlung) kritisch ist. Für den Rhein bei Basel wird sich der Gletscherwasseranteil im August in der nahen Zukunft (2020–2040) zwar auf 12% erhöhen, bis Ende des Jahrhunderts aber auf 2% reduzieren [169]. Damit sind die Gletscher nicht nur für die Schweiz bedeutend, sondern auch für die Nachbarstaaten (→ MONTANAQUA Seite 42).

Viele hydrologische Modelle ignorieren **nicht-klimatische Faktoren**, wie z.B. die Art und Intensität der Landnutzung, wasserbauliche Massnahmen oder den Grad der Bodenversiegelung, welche einen mildernden oder verstärkenden Einfluss auf die Wasserspeicherkapazität des Bodens und somit den Abfluss haben können. Der steigende Einsatz von Kunstdünger zum Beispiel, welcher das Pflanzenwachstum fördert und sich damit unmittelbar auf eine erhöhte Evapotranspiration auswirkt, aber auch Bewässerungstechnologien in der Landwirtschaft können einen Einfluss auf die Abflüsse kleiner Gewässer haben [170].

Links: Das Pumpwerk Forren im Kanton Thurgau musste 2003 künstlich belüftet werden, da durch reduzierte (anaerobe) Bedingungen im Grundwasser bei den Verbrauchern Ausfällungen (Verockerung) gemeldet wurden. (Foto Andreas Scholtis, Amt für Umwelt Kanton Thurgau)

Mitte: Verockerung in Rohrleitungen und Grundwasserpumpen. (Foto Kanton Aargau, Amt für Verbraucherschutz)

Rechts: Trinkwasserpumpwerk (Foto Max Maurer)

Tab.: Veränderte zukünftige Hochwasserisiken in der Schweiz. (Mit Zahlen aus [43, 44, 133, 171, 172])

	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
<1500 m Mittelland, Jura pluvial	++ Gesättigte Böden Mehr Regen Jahreshochwasser möglich	++ Schneesmelze u. intensive Niederschläge Jahreshochwasser möglich	–(+) Weniger Niederschläge Erhöhte Verdunstung Gewitterhochwasser in kleinen Einzugsgebieten	++ Gesättigte Böden Mehr Regen
>1500 m (Nord-)Alpen	(+) Gelegentlich höhere Abflüsse	+ Kleine Schmelzhochwasser mit grösseren Spitzen	++ Jahreshochwasser	Kaum Änderungen
Alpensüdseite und inneralpine Gebiete (Wallis, Engadin)	+ Grössere Hochwasser Mehr Regen Höhere Intensitäten	+ Grössere Hochwasser Mehr Regen Höhere Intensitäten	– Abnehmende Niederschlagssummen Kleinere Abflussspitzen	+ Grössere Hochwasser

NFP 61-Projekt GW-TREND: Für das Grundwasser zählen Äusserlichkeiten

Vom Grundwasser hängt in der Schweiz eine Menge ab: die Trinkwasserversorgung, die Industrie und vermehrt auch die Landwirtschaft. Zu Trockenzeiten profitieren auch Flüsse und Feuchtgebiete vom unterirdischen Zufluss. Wie zuverlässig diese Versorgung auch in Zukunft funktioniert, untersuchte das Projekt GW-TREND [173]. Ziel der Forschung war, den Einfluss von Temperatur und Niederschlag auf die Grundwasserstände im Schweizer Mittelland zu quantifizieren. Insbesondere interessierte der Einfluss von einzelnen und wiederholt auftretenden Trockenperioden.

Die Modellrechnungen zeigten, dass sich die absolute Menge der direkten Grundwasserbildung zukünftig kaum verändern wird, hingegen aber die Verteilung. Im Winter und Frühjahr wird sich die direkte Neubildung wegen der prognostizierten Niederschlagszunahme erhöhen. Im Sommer und Herbst wird die Grundwasserbildung wegen verminderter Niederschläge und erhöhter Verdunstung abnehmen. Ob damit eine sichere Trinkwasserversorgung infrage gestellt wird, muss lokal untersucht werden. Insbesondere kleine, gut durchlässige Grundwasserleiter (z.B. in fluvio-glazialen Ablagerungen) können sich rasch entleeren. Grössere, tiefere Grundwasserleiter oder weniger durchlässige Systeme (z.B. Molassequellen) aber können Wasser länger zurückhalten und Trockenperioden ausgleichen. Die von den Vor-alpen bis ins Mittelland reichenden Talgrundwasserleiter (z.B. Tösstal oder Emmental) profitieren oft durch den dynamischen Speicher im oberen Flusslauf. Aber selbst Flüsse, die im Spätsommer Wasser führen, vermögen die Grundwasserleiter nicht immer zu füllen. Führt die Aare zum Beispiel wenig Wasser, hemmt die Flussbettkolmation die Auffüllung des Seeland-Grundwasserleiters, selbst wenn ausreichend Wasser zur Verfügung steht. Grundwasserleiter reagieren also sehr unterschiedlich auf den Klimawandel. Wie empfindlich sie reagieren und ob Klimaanpassungsmassnahmen notwendig sind, kann dank der methodischen Entwicklungen von GW-TREND heute besser bestimmt werden.

NFP 61-Projekt MONTANAQUA: Das Klima wirkt auch im Untergrund

Kompliziert werden die Zusammenhänge zwischen Gletscherschwund und Abfluss insbesondere in Karstgebieten, wo die verborgenen Fliesswege des Schmelzwassers für Überraschungen sorgen. So etwa im Gebiet des Plaine-Morte-Gletschers im Berner Oberland, wo Eis und Schneeschmelze, aber auch die Fliesswege, stark von der Jahreszeit abhängen und sich die Ergiebigkeit der Karstquellen klimabedingt verändern wird.

Einfärbungen des Schmelzwassers mit fluoreszierenden Tracern und Isotopenmessungen im Jahr 2011 und 2012 haben gezeigt, dass das Gletscherschmelzwasser sowohl nach Norden in den Kanton Bern abfließt, wie auch nach Süden in den Kanton Wallis [121]. Bis Ende Juni wird das Abflusswasser von der Schneeschmelze dominiert, ab August besteht es mehrheitlich aus Gletscherschmelze, während im September und Oktober dann vornehmlich Regenwasser abfließt. Spannend ist die Tatsache, dass das Abflusssystem sich während der sommerlichen Gletscherschmelze verändert: Im Frühjahr versickert das meiste Schmelzwasser im unterirdischen Karst, welcher das Wasser zu zahlreichen Karstquellen leitet (eine davon liegt oberhalb des Tseuzier-Stausees).

Während des Sommers fliesst immer mehr Schmelzwasser durch das Abflusssystem im Gletscher Richtung Norden ins Simmental ab; im Winter wird das sommerliche Abflusssystem durch Schneefall und Gletscherfließen wieder geschlossen. Klimaprojektionen deuten darauf hin, dass der Plaine-Morte-Gletscher bis Ende Jahrhundert mehrheitlich wegschmilzt. Es liegt auf der Hand, dass mit dem schwindenden Gletscher Karstquellen, welche bisher von der sommerlichen Gletscherschmelze gespeist wurden, im Herbst austrocknen. Wie auch im Vispental [174] sollten daher rechtzeitige Anpassungen der Infrastruktur geplant werden, damit auch in Zukunft die Wasserversorgung für die lokale Bevölkerung und die Stromproduktion gewährleistet werden können.

NFP 61-Projekt SEDRIVER: Geht die Zukunft den Bach runter?

Veränderte Abflussregimes und Hochwasserspitzen wirken sich unmittelbar auf den Geschiebetransport aus. Wen kümmert's? Die Fische! Für die Bachforelle (*Salmo trutta fario*) zum Beispiel dient die oberste Kies-schicht als geeigneter Eiablageplatz. Die Weibchen graben Vertiefungen, sogenannte Laichgruben, in die sie Ende Oktober bis Anfang Januar ihre Eier 5–20 cm tief im Kies-substrat vergraben. Ob sich eine Kiesbank eignet, hängt neben Wassertemperatur, -tiefe und -strömung von der Zusammensetzung des Flussbettes ab [175]. Zu viel Feinmaterial verringert nämlich den Reproduktionserfolg. Hochwässer sind folglich wichtig, um das Substrat ab und zu durchzuspülen. Andererseits können starke Hochwässer während der Laichzeit die Laichgruben empfindlich beeinträchtigen, insbesondere in Flüssen, deren Abflüsse im Winterhalbjahr wegen der Schneefälle gewöhnlich niedrig sind. In solchen glazio-nivalen Abflussregimes, so die Erkenntnisse aus dem SEDRIVER-Projekt, sind die Eier nur wenig tief (4–5 cm) vergraben und daher durch den hochwasserbedingten Geschiebetransport und Erosionsprozesse stark gefährdet. Verschieben sich also Zeit und Höhe des Spitzenabflusses, kann das für das Überleben der Bachforelle eine grosse Rolle spielen. Im Sommer hingegen könnte der zukünftige Geschiebetransport dazu führen, dass die erweiterten Flusshabitate für Jungfische geeigneter werden [176].



Allein durch die Veränderung der Temperatur und der Niederschlagssummen dürften die mittleren und häufigeren **Hochwasser** in der Schweiz ansteigen, v.a. gegen Ende des Jahrhunderts [172]. Fällt in der Zukunft im Winterhalbjahr mehr Regen als Schnee, kann es zu einer Zunahme von Hochwasserspitzen und -volumen kommen [147, 172]. In Einzugsgebieten, wo die Abflüsse stark durch die Schneeschmelze geprägt sind, werden sich die Hochwasserspitzen auch jahreszeitlich stärker verändern [162]. Hochwasserspitzen werden auch ausgeprägter, wenn ein Starkregen mit der Schneeschmelze im Frühjahr zusammentrifft oder konvektive Starkniederschläge im Sommer auf ausgetrocknete Böden fallen, welche das plötzlich auftretende Wasser nicht aufnehmen können [131]. Je nach Exposition und Höhenstufe verändert sich das Hochwasserrisiko unterschiedlich (Tab. 1). Die Unsicherheiten dieser Projektionen sind allerdings relativ hoch, insbesondere was Niederschlagsextremwerte im Sommer betrifft [43, 171]. Über 2000 m ist die Hochwassergefahr gering, weil Schnee die Niederschläge in der Regel zwischenspeichert und Abflussspitzen verhindert [177, 178].

Tiefe Abflüsse wirken sich zudem auf flussgespeiste **Grundwasserleiter** aus, da die Flusssohle bei niedrigen Abflüssen eher kolmatiert und undurchlässig wird. Flüsse, die durch Karstgrundwasser gespeist werden, profitieren während Niedrigwasser vom Zustrom aus der Tiefe (SWISSKARST [179]). Insbesondere Flüsse im Jura und in den Voralpen (z.B. Suze, Areuse, Promenthouse, Ernon etc.) führen zu Trockenzeiten hauptsächlich Wasser aus dem Karstsystem.

Bei der Betrachtung der Abflüsse sind auch die **Sedimentfrachten** von Bedeutung. Aufgrund des Gletscherrückzugs und des Auftauens des Permafrostes oberhalb 2300–2400 m ü. M. und der damit verbundenen Freigabe von mobilisierbarem Lockermaterial ist in Zukunft mit einer Zunahme der Feststofffrachten in hoch gelegenen Einzugsgebieten zu rechnen [4, 180]. Mit höheren Hochwasserspitzen und Geschiebefrachten werden die Fliessgewässer auch mehr Raum als heute beanspruchen [44]. Um den Geschiebetransport in alpinen Einzugsgebieten besser quantifizieren zu können, entwickelte das NFP 61-Projekt SEDRIVER das neue Simulationsprogramm SedFlow, welches anhand von Datenreihen zweier Gebirgs-

flüsse im Detail getestet wurde. Viele bisherige Modelle haben das Ausmass des Geschiebetransports überschätzt. Da Gebirgsflüsse oft steilere Gerinneabschnitte aufweisen, wurde das SedFlow-Modell so konzipiert, dass die erhöhten Energieverluste (grosse Steine im Verhältnis zur Wassertiefe) und höhere kritische Schubspannungen beim Transportbeginn (die Kraft, die es braucht, bis ein Stein auf der rauen Sohle «ins Rollen» kommt) berücksichtigt werden (SEDRIVER [180, 181]). Mit dem Modell kann man nun aufgrund von Szenarien für die Abflüsse die jeweiligen Geschiebefrachten und die Sedimenteinträge aus Seitenbächen quantifizieren, vorhersagen und so Anpassungs- oder Schutzmassnahmen dimensionieren. Mit demselben Modell konnte gezeigt werden, dass das zusätzliche Geschiebematerial, welches in Zukunft aus den seitlichen Zuflüssen in die Hasliaare gelangt, bereits innerhalb der ersten 2–4 km wieder abgelagert wird und dort das Gerinne massgeblich beeinflusst [183]. Das wirkt sich auf den Querschnitt aus, aber auch auf die Gewässerökologie (→ SEDRIVER Seite 42).

Die Zunahme der Lufttemperatur wirkt sich nicht nur auf die Abflüsse aus, sondern auch auf die **Qualität**. Bereits in den letzten 100 Jahren nahm sowohl die Lufttemperatur wie auch die Wassertemperatur der grossen Schweizer Flüsse, aber auch in kleineren Wildbächen zu, wobei der Anstieg insbesondere in den letzten Jahrzehnten erfolgte [28, 184]. Die Auswertung der NADUF-Temperaturmessungen von 1974–1998 zeigte bei der Mehrzahl der Messstellen eine Zunahme von 0,4 bis 0,8 °C in 10 Jahren [55]. Für die nächsten 50 Jahre ist eine weitere Erhöhung der Lufttemperatur um 2 °C oder mehr zu erwarten [55, 142]. Die Temperatur der Gewässer wird, durch tiefe Pegelstände im Sommer noch beschleunigt, weiter ansteigen und dadurch die Ökologie der Fliessgewässer und die Wassernutzung vermehrt unter Druck setzen [185]. Verringerte und wärmere Abflüsse senken zudem die Sauerstoffkonzentration und begünstigen die Ausbreitung von Fischkrankheiten, was die Mortalität erhöht. Im Jahr 2003 wurden rund 85 000 tote Fische eingesammelt und rund 120 000 Fische umgesiedelt [17]. Temperaturerhöhungen ermöglichen invasiven Arten, sich in Lebensräumen auszubreiten, die bisher nicht geeignet waren. Im Gegenzug beeinflussen wärmere Tempe-

Links und Mitte: Tracer-Versuche auf dem Plaine-Morte-Gletscher. (Links: Foto Flurina Schneider; Mitte: Foto Emmanuel Rey)

Rechts: Entnahme einer Wasserprobe im Simmental (Siebenbrunnen). Der Tracer entschlüsselt die Herkunft des Wassers. (Foto Emmanuel Rey)

«Wo befinden sich Grundwasservorkommen, die gegenüber Trockenheit resistent sind? An diesen Orten sollte das Grundwasser gegenüber anderen Wassernutzungen Priorität erhalten. Das verlangt Koordination und Denken in regionalen Zusammenhängen.»

Daniel Hunkeler
GW-TREND
Universität Neuenburg



Mehr dazu im  GW-TREND
unter www.nfp61.ch

raturen die Entwicklung der Fischeier im Winter, wo 1 °C Temperaturzunahme die Reifung um 2 Wochen beschleunigt [55]. Gleichzeitig hat sich in den letzten 25 Jahren als Folge der Erwärmung die Forellenregion um 100–200 Höhenmeter aufwärts verschoben. Mit einer Erwärmung von 2 °C bis 2050 wird geschätzt, dass die Lebensräume der Salmoniden um 17–25% gegenüber heute schrumpfen werden [111]. Für die **Bachforelle** verringert sich der besiedelbare Raum nach Modellrechnungen um 6–44%, d.h., die Bachforelle würde im Mittelland ganz verschwinden [186]. Daneben werden die niedrigen Wasserstände und die Ausbreitung von Fischkrankheiten vielen Tieren zum Verhängnis.

Oberflächengewässer

Auch für die **Seen** bleibt die Klimaerwärmung nicht ohne Folgen. Für die grossen Seen in Österreich zum Beispiel wird bis 2050 ein Anstieg der Oberflächentemperatur von 2 °C erwartet [187]. Das hat einen entscheidenden Einfluss auf die Eisbildung, die Sauerstoffversorgung und die Zusammensetzung der Phytoplanktongesellschaft [188]. Steigende Wassertemperaturen stabilisieren auch die Schichtung der Mittellandseen, zuungunsten der Durchlüftung. Werden die Durchmischungsereignisse im Winter in Zukunft seltener und kürzer, steigt damit das Risiko von Sauerstoffmangel [111, 142].

Für hochalpine Gewässer wirkt sich der Temperaturanstieg indirekt auf den Wasserstand aus, der wesentlich von der Eis- und Schneeschmelze beeinflusst wird. Wie deutlich diese Entwicklungen sein können, haben Aufzeichnungen im Schweizer Nationalpark gezeigt, wo gletschergespeiste Teiche auf über 2600 m ü. M. innerhalb weniger Jahre einen Tempe-

raturanstieg von bis zu 4 °C erfuhren, was v.a. auf den schwindenden Einfluss des Gletschereises zurückzuführen war [189].

Die verkürzte Eisdeckung könnte die Durchmischung aber auch intensivieren und sich daher positiv auf die Belüftung des Tiefenwassers auswirken. Was die **Trinkwasserversorgung** aus Seen betrifft, werden die tiefen Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenwasser nicht als problematisch betrachtet, da die Tiefe der Wasserentnahme bei Bedarf leicht in einen geeigneten Tiefenbereich versetzt werden könnte. Eher problematisch ist das massenhafte Auftreten von Cyanobakterien, umgangssprachlich als Blaualgen bezeichnet, welche, durch wärmere Wassertemperaturen begünstigt, die Wasserqualität beeinträchtigen können [160]. In Seen mit einer hohen Kohlenstofffracht und Sedimentationsrate kann der Temperaturanstieg die Methanproduktion im Sediment exponentiell beschleunigen [190]. In der Schweiz kommt das aber nur selten vor.

Auf die **Gewässerökologie** wirkt sich der Klimawandel v.a. durch die steigenden Wassertemperaturen und die niedrigen Wasserstände aus. Der Temperaturanstieg könnte die Ausbreitung von wärmeliebenden Neobiota, d.h. von Tier- und Pflanzenarten, die von Natur aus nicht in Schweizer Gewässern vorkommen, begünstigen und einheimische Arten gefährden [191, 192, 193]. Das Auftreten der Süswasserqualle im Bodensee seit 1999 ist nur ein Beispiel. Nur wenige Untersuchungen widmen sich der klimabedingten Ausbreitung von Neobiota.

Zukünftige Nutzungsansprüche von Gesellschaft und Natur

Neben dem Klimawandel wirken Landschaft, Raum- und Bodennutzung auf die Gewässer und den Wasserhaushalt. Die Vegetation beeinflusst sowohl den Wasserrückhalt im Boden wie auch die Verdunstung. Ebenso prägen die Landwirtschaft und die fortschreitende Urbanisierung die Menge und Qualität der Abflüsse. **Zukunftsszenarien** zur Raum- und Bodennutzung sind daher wichtige Instrumente für die Planung der nachhaltigen Wasserbewirtschaftung von morgen.

Szenarien für das «System Schweiz» werden von zahlreichen, sich gegenseitig beeinflussenden globalen und lokalen Faktoren bestimmt. Der Klimawandel selbst und die damit einhergehenden Naturgefahren oder Wetterextreme prägen die Wahrnehmung, die Entscheide und das Verhalten der Gesellschaft Schweiz. Der Weltmarkt und die europäische Agrarpolitik steuern die Preise von Agrarprodukten und beeinflussen damit den Entscheid, ob bewässert wird oder nicht. In hohem Ausmass wirken sich auch die weltweite Verfügbarkeit von Erdöl- und Erdgas, das Kyoto-Abkommen oder der Fukushima-Reaktorunfall auf die Schweizer Energiepolitik und damit verbunden auch auf die Wassernutzung aus. Was ausserhalb der Schweiz passiert, hat weitreichende Konsequenzen für den Umgang mit Wasser vor Ort.

Schlüsselfaktoren für die nachhaltige Wassernutzung in der Schweiz sind Demografie, Politik, Wirtschaft und das individuelle und kollektive Verhalten, welches sich v.a. über die Grössen Raumbedarf und Landnutzung, aber auch über die Menge und Art der verwendeten Stoffe auf den Wasserhaushalt auswirken. Lassen sich diese Veränderungen überhaupt voraussagen? Leider nein. Und doch ist die Auseinandersetzung mit möglichen Zukunftsszenarien ein wichtiges Instrument für die Planung einer nachhaltigen Wassernutzung.

Zu diesem Zweck haben verschiedene NFP 61-Projekte (SWIP, IWAQA, AGWAM) Szenarien für die möglichen Entwicklungen für das Gebiet der Mönchaltorfer Aa (ZH) entwickelt. Das **Boom-Szenario** beschreibt eine wirtschaftlich florierende, technisch fortschrittliche und von extremem Bevölkerungswachstum geprägte Gesellschaft. Der Trinkwasserbedarf nimmt zu, während Industrie und Landwirtschaft an Bedeutung verlieren. Das **Doom-Szenario** schildert eine wirtschaftlich angeschlagene Schweiz mit leicht sinkender Bevölkerungszahl. Der Pro-Kopf-Wasserbedarf der Bevölkerung halbiert sich und der Zustand der Wasserinfrastrukturen ist allgemein schlecht, mit den entsprechenden Konsequenzen für die Umwelt. Das **Lebensqualität-Szenario** steht für eine wettbewerbsfähige Schweiz mit gemässigtem Bevölkerungswachstum, hohen Umweltstandards und gleichbleibendem Trinkwasserbedarf [194] (SWIP).

Unabhängig davon beschreibt das Bundesamt für Statistik Szenarien für die zukünftige **demografische Entwicklung** [195]. Das mittlere Referenzszenario schreibt die Entwicklungen der letzten Jahre fort und bezieht die Trends im freien Personenverkehr mit der EU mit ein. Die ständige Wohnbevölkerung der Schweiz wächst bis im Jahr 2055 auf knapp 9 Mio. Personen an und stabilisiert sich dann. Gemäss dem hohen Szenario, welches auf der Annahme eines begünstigten Bevölkerungswachstums beruht, nimmt die Bevölkerung im Zeitraum 2010 bis 2060 auf über 11 Mio. Personen zu. Gemäss dem tiefen Szenario, das Hypothesen kombiniert, die dem Bevölkerungswachstum weniger förderlich sind, sinkt die Bevölkerung auf 6,8 Mio. im Jahr 2060. Grosse Wellen von Umweltflüchtlingen werden in der Schweiz nicht erwartet [196].

Was die zukünftige Trinkwasserversorgung betrifft, wird das Bevölkerungswachstum insbesondere durch den wachsenden Flächenbedarf und vermehrte Stoffeinträge qualitative Auswirkungen haben (→ IWAQA Seite 50) [63, 197]. Die prognostizierte Überalterung wird sich über einen erhöhten Verbrauch von Arzneimitteln und Lebensmittelzusatzstoffen auf die Wasserqualität auswirken. Die erhöhten Einträge können allerdings durch die eingeleiteten technischen Massnahmen bei den Kläranlagen wieder aufgefangen werden.

Nicht zuletzt bestimmen gesellschaftliche Werte und Wahrnehmungen, die sich durch das individuelle und kollektive Verhalten ausdrücken, den Umgang mit Wasser, Gewässern und Landschaft. Die Nachfrage nach intakten Landschaften wird aufgrund der Einkommens- und Bevölkerungsentwicklung tendenziell zunehmen [17], was den Gewässerzustand einerseits begünstigen wird, andererseits den Druck auf die Fläche wieder erhöht, denn der wachsende Anspruch nach Mobilität und Raum erhöht wiederum den Flächenbedarf pro Kopf (→ MONTANAQUA Seite 50).

Landschafts- und Landnutzungswandel

Eine Schlüsselgrösse für den Erhalt der Wassermenge und -qualität ist die Fläche und deren Nutzung. Die Flächennutzung beeinflusst den Wasserhaushalt sowohl durch direkte Wassernutzungen (z.B. Entnahmen) wie auch durch indirekte Nutzungen (z.B. Schadstoffeinträge, Drainagen), die sich auf den gewässerbiologischen Zustand, aber auch auf die Sedimentfrachten oder den ökomorphologischen Zustand auswirken. Weit tiefgreifender ist aber der direkte Einfluss der Landnutzung. In der Schweiz führt die beschränkt besiedelbare Fläche von rund 13 000 km² zusammen mit einer hoch entwickelten Wirtschaft und hohem Wohlstand zu einem starken Nutzungsdruck durch die hohe Siedlungsdichte und intensive landwirtschaftliche Nutzung. Nur rund 8% der Fliessgewässer werden nicht von der Landnutzung beeinflusst. Diese liegen im Alpenbogen oder in tiefer gelegenen, ausschliesslich bewaldeten Gebieten [62].



Landschaft wird ganz unterschiedlich genutzt. Fast immer werden die Wasserspeicher dadurch verändert oder beeinflusst.

Alle: Fotos Reportair

Als Reaktion auf den hohen Nutzungsdruck nehmen Umwelt- und Landschaftsschutz in der Schweiz einen hohen Stellenwert ein. Den rechtlichen Rahmen dazu setzt das **Raumplanungsgesetz** des Bundes, welches Kantone und Gemeinden zur gemeinsamen Sorge für die haushälterische Bodennutzung verpflichtet. Die gegenwärtige Ausrichtung der neuen Raumordnungspolitik liegt in der dezentralen Konzentration, also auf einem Netz von kompakten Siedlungsgebieten. Der **Planungsgrundsatz der «Schonung der Landschaft»** enthält mehrere Elemente, die für die Wassernutzung durchaus relevant sind.

Wichtiges Instrument der Raumplanung ist die **Arealstatistik**, welche die Landnutzung periodisch quantifiziert. Den grössten Flächenanteil nimmt in der Schweiz noch immer die Landwirtschaft ein, gefolgt von Wald, unproduktiven Flächen und Siedlungsflächen (Abb. 26). Je weiter oben die Landnutzung, desto grösser ist auch der potenzielle Einfluss auf die darunterliegende Fliegsstrecke. Das Grünland der Alpen, Voralpen, aber auch des Juras zum Beispiel beeinflusst die längste Fliegsstrecke. Andere Landnutzungen dagegen, welche eher regional (z.B. Ackerland) oder nur lokal vorkommen (z.B. Rebbau), beeinflussen einen kleineren Teil des Gewässernetzes [198]. Dazu gehören auch die Siedlungen im Mittelland, welche die Wasserqualität entscheidend beeinträchtigen.

Siedlungsflächen wachsen vornehmlich auf Kosten der Landwirtschaftsflächen und nehmen heute rund 7,5% der Landesfläche ein. Das grösste Wachstum ist dem Gebäudeareal zuzuschreiben, gefolgt von den Verkehrsflächen, dem Industrie- und Gewerbeareal und den Erholungs- und Grünanlagen [103]. Es war zwar ein raumplanerisches Ziel, den Pro-Kopf-Flächenverbrauch auf 400 m² zu stabilisieren, doch kommt das Siedlungswachstum trotz grosser Anstrengungen kaum zum Stillstand, teils wegen der vielen neuen Infrastrukturbauten, teils wegen des Bevölkerungswachstums und des stetig steigenden Raumbedarfs.

Die **Kulturlandfläche** nimmt jährlich um 3% ab. Auch dieser Trend wird in Zukunft anhalten. In ebenen und gut erschlossenen Flächen wurde die landwirtschaftliche Nutzung intensiviert, in den Randregionen dagegen extensiviert. Während Kulturen mit hoher Wertschöpfung (Freilandgemüse) teilweise

zugenommen haben, nahmen die alpwirtschaftlichen Flächen ab. Viele Weiden im Jura, in den Voralpen und auf der Alpensüdseite sind verschwunden, während neue Weideflächen in Hofnähe entstanden. Was den Wasserhaushalt betrifft, werden diffuse Stoffeinträge in intensiv genutzten Regionen ein Thema bleiben. Eine abnehmende Beweidung auf Alpweiden hingegen kann die Stoffeinträge und den Oberflächenabfluss vermindern. Werden Alpweiden nämlich beweidet, kann dies den Oberboden verdichten und den Oberflächenabfluss bei Starkniederschlägen erhöhen [199]. Durch die Verringerung der Blattoberfläche führt die Beweidung zu geringeren Verdunstungsverlusten und damit zu erhöhten Abflüssen [200].

Über 40% des Trinkwassers, das hierzulande konsumiert wird, stammen aus dem **Wald**. Aus diesem Grund hat die Waldpolitik 2020 mitunter als Ziel, die Waldböden und das Trinkwasser nicht zu gefährden. Der Wald dehnt sich weiter aus [103]. Die grössten Veränderungen sind mit der Aufgabe der Alpwirtschaft verknüpft, wo insbesondere die Verbuschung in bisher offenen Gebieten zum Problem wird [201, 202]. Als Ursache dieser Entwicklung ist neben den strukturellen Veränderungen in der Berglandwirtschaft auch der Anstieg der mittleren Jahrestemperaturen denkbar. Wald spielt für den Wasserhaushalt eine wichtige Rolle, weil das Kronendach den Boden vor Niederschlägen abschirmt, einen Teil des Regens direkt verdunsten lässt und dem Boden viel Feuchtigkeit entzieht. Waldböden sind daher vor Niederschlagsereignissen meist trockener und können mehr Wasser aufnehmen als Wiesen und Ackerland [203]. Zudem verdunstet zum Beispiel Fichtenwald fast doppelt so viel Wasser wie Grasland und vermindert somit den Abfluss [201].

Zu den **unproduktiven Flächen**, die einen Viertel der Schweiz ausmachen, gehören Fels, Sand, Geröll (44,6%), Gletscher und Firn (10,9%), die unproduktive Vegetation (knapp 27,6%) und stehende Gewässer und Fließgewässer (knapp 16,9%). Solche Flächen können, insbesondere Feuchtgebiete, Moore und Sumpfwiesen, eine bedeutende Rolle spielen, wenn es darum geht, den Gewässern für den Hochwasserschutz mehr Raum zu geben und überschüssiges Wasser zu speichern. Auch für die Artenvielfalt und als Erholungsraum sind

diese Flächen wertvoll. Die leichte Zunahme der Fläche der Fliessgewässer ist auf Hochwasserverbauungen zurückzuführen. Auch Ufervegetation, Nassstandorte und Gebüschvegetation haben leicht zugenommen. In verschiedenen Gegenden sind ausserdem durch Renaturierungen von Fliessgewässern und im Zuge von Meliorationen neue Ufervegetationen entstanden [103]. Die in der revidierten Gewässerschutzgebung vorgesehenen Ausweitungen von stark verengten Bächen und Flüssen bis Ende des Jahrhunderts erfordern einen zusätzlichen Raumbedarf von rund 20 km² (Abb. 26).

Siedlungs- und Verkehrsflächen, Infrastruktur und Schifffahrt

Schon heute beträgt in der Schweiz der Pro-Kopf-Flächenverbrauch 407 m² [103]. Auch in Zukunft wird sich der **Siedlungsraum** weiter ausdehnen. Für das Mittelland wird ein Anstieg des Siedlungsflächenanteils von heute 16% auf rund 20% erwartet [111], was sich insbesondere auf das Grundwasser und die Schadstoffeinträge auswirken dürfte. Was die **Verkehrsflächen** betrifft, wird sich der Druck auf die Gewässer aufgrund der prognostizierten Zunahme des motorisierten Individualverkehrs von bis zu 20% zukünftig noch erhöhen [106]. Im Gegenzug werden die Siedlungen in den nächsten Jahrzehnten von zahlreichen Revitalisierungsmassnahmen bei ehemals begradigten, eingedolten Gewässern profitieren.

Für die Trinkwasserversorgung wird die Alterung der **Siedlungswasserinfrastruktur** als eine der grösseren Herausforderungen betrachtet. Die klimabedingten Auswirkungen auf die Siedlungshydrologie sind schwer zu beurteilen. Modellierungen lassen darauf schliessen, dass der Klimawandel einen starken Einfluss auf Mischwasserentlastungen und Überflutungen mit Abwasser haben kann [104]. Dennoch gilt in der Regel die Wasserversorgung der Siedlungsgebiete auch in der Zukunft als gewährleistet [204], allerdings zu einem höheren Preis. Die Kosten im Wasserversorgungssektor werden wegen eines stark erhöhten Investitionsbedarfs, v.a. bei kleineren Wasserversorgungen, in Zukunft ansteigen und sich auf den Wasserpreis auswirken. Die Kosten werden weiterhin mehrheitlich von den Konsumenten getragen. Ähnlich verhält es sich mit der Abwasserentsorgung, wo die Kosten durch den steigenden Sanierungsbedarf der Kanalisationsnetze, den Ausbau von Kläranlagen zur Behandlung von neuen Problemstoffen und durch neue Herausforderungen im Gewässerschutz weiter ansteigen dürften. Auch der Klimawandel könnte Mehrkosten verursachen: Längere Trockenperioden im Sommer können Grundwasserstände so weit absenken, dass Kanalisationen, die heute durch gesättigte Zonen führen, öfter durch ungesättigten Boden verlaufen, mit entsprechenden Auswirkungen auf die Infrastruktur und den Sanierungsbedarf [104].

Auch im **Hochwasserschutz und Wasserbau** ist mit steigenden Kosten zu rechnen [126]. Langfristig kann die Klimaänderung in den Alpen und Voralpen die Stabilität grosser Rutschvolumen beeinträchtigen, die durch die zunehmenden Winterniederschläge und das Schmelzwasser mobilisiert werden können. Die Häufigkeit von Sturzereignissen und Massenbewegungen wird in Zukunft wahrscheinlich zunehmen, und damit auch die Schadenskosten [205]. Um die Sicherheit der Menschen in den Bergen zu gewährleisten, werden erhebliche Investitionen zum Schutz vor Extremereignissen unausweichlich. Dazu gehören wasserbauliche Massnahmen, wasserregulierende Ersatzanlagen für die Gletscher, der Bau von neuen Kraftwerken oder hangstabilisierende Massnahmen. Sollten Hochwasserereignisse zunehmen, würde dies zu einer veränderten Gefährdung von Siedlungen, Gebäuden, Verkehrswegen, Infrastrukturen und landwirtschaftlichen Nutzflächen führen. Dabei gelten Siedlungsmuster mit grossen versiegelten Flächen, welche die Versickerung verhindern, als besonders anfällig [171]. Die zugrunde liegenden Prozesse der urbanen Hydrologie sind in der Schweiz jedoch noch wenig erforscht.

Der Fortbestand der **Rheinschifffahrt** wird durch den Klimawandel nicht gefährdet sein. Die zeitliche Zuverlässigkeit dürfte aber in Mitteleuropa gezogen werden. Heute weist der Rhein einen stabilen Abfluss auf. Im Frühling und Sommer wird er durch Schmelzwasser und Niederschlag in den Alpen gespeist, im Herbst und Winter dann vor allem durch die Niederschläge in tiefer gelegenen Gebieten. Mit dem Abschmelzen der Gletscher nimmt der ausgleichende Einfluss ab, sodass die Wahrscheinlichkeit von längeren Perioden mit aussergewöhnlich niedrigen Wasserständen in der nahen Zukunft zunehmen wird [111]. Für die Wintermonate hingegen werden weniger extreme Niedrigwasser vorhergesagt, was sich günstig auf die Schifffahrt auswirkt. Für die ferne Zukunft wird sich die Situation v.a. in den Sommermonaten verschärfen und die Rheinschifffahrt einschränken [17] (Abb. 27). Verbesserte Abflussvorhersagen und Prognosen zu ausgedehnten Trockenperioden (→ DROUGHT-CH Seite 14) erhöhen aber die Planbarkeit und können die abflussbedingten Ausfälle mildern.

Energiewirtschaft

Die Wasserkraft wird auch in Zukunft die wichtigste und effizienteste erneuerbare Energie in der Schweiz bleiben (FUGE [206]). Weil die Wasserkraft aber Teil eines grösseren, durch den technologischen, klimatischen und gesellschaftlichen Wandel gesteuerten Gefüges ist, steht die Schweiz vor der Herausforderung, intelligente, aber auch flexible Lösungen für die zukünftige Energieversorgung zu finden.

Gegenwärtig sieht sich die Energiewirtschaft mit einem **stetig wachsenden Strombe-**

«In den letzten Jahrzehnten haben wir ein relativ starkes Siedlungswachstum beobachtet. Wir haben mehr Flächen, die versiegelt sind. Dort kann das Wasser nicht in den Boden infiltrieren. Es fliesst deshalb schneller ab. Dieses Wasser kann auch mit Schadstoffen belastet sein, die dann in die Gewässer gelangen.»

Christian Stamm
IWAQA
Eawag



Mehr dazu im IWAQA unter www.nfp61.ch

Landnutzung Schweiz

Fläche in km²

Landesfläche 41'285 km² = 100%

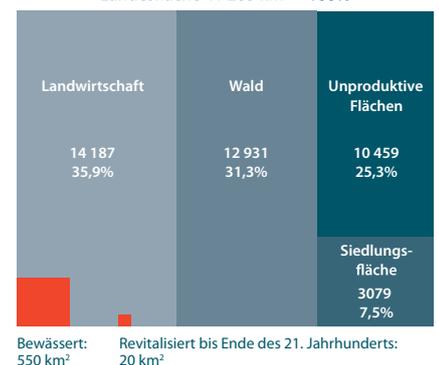
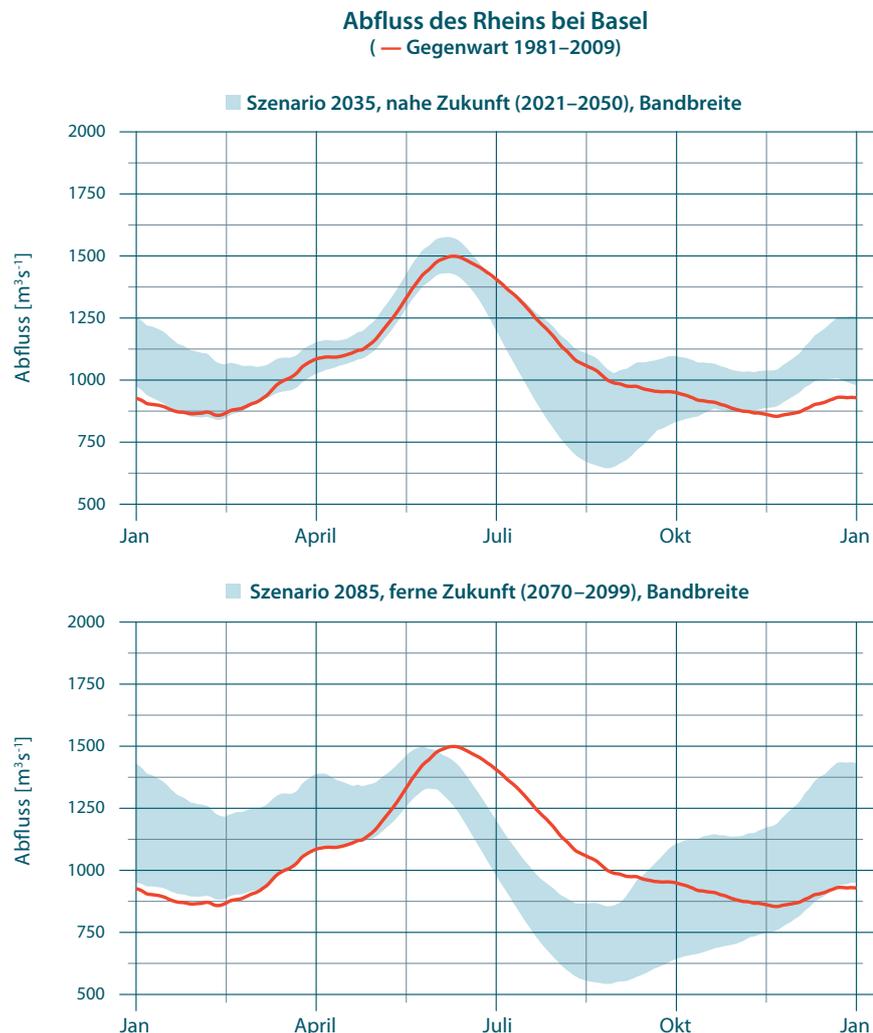


Abb. 26: Anteil verschiedener Nutzungsarten an der gesamtschweizerischen Landesfläche von 41285 km². (A. Björnsen mit Zahlen aus [103])

darf konfrontiert, der im Winterhalbjahr nicht mehr durch die heimische Energieproduktion gedeckt werden kann [207]. Trotz Effizienzsteigerungen wird bis 2035 mit einem Bedarfszuwachs von 14% gerechnet, bis 2050 mit 17%. Die Ursachen für den wachsenden Strombedarf liegen in Bevölkerungswachstum und -struktur (z.B. nimmt der Anteil an älteren Personen zu) und im Konsumverhalten (z.B. zunehmende Wohnfläche pro Kopf). Als Folge der Klimaänderung wird der Stromverbrauch ohne Lenkungsmaßnahmen vermutlich ansteigen (weniger Heizenergie im Winter, mehr Kühlenergie im Sommer). Zuletzt tragen auch Bewässerungs- und Beschneigungsanlagen, die Anwendung neuer Technologien, steigende Konsummöglichkeiten und die Substitution fossiler Energiequellen in den Bereichen Raumwärme (Wärmepumpen) und Mobilität (Elektrofahrzeuge) zum Stromverbrauch bei [197, 208]. Dem wachsenden Strombedarf steht eine Energieversorgung gegenüber, die einerseits durch den Klimawandel und die Klimapolitik beeinflusst wird, andererseits durch die schwindende Fördermenge von fossilen Energieträgern. Für die **Wasserkraftproduktion** wird wegen der abschmelzenden Gletscher kurzfristig ein grösseres Wasserdargebot zur Verfügung stehen, sodass im Sommer mehr Strom produ-

ziert werden kann. Aber bereits für den Zeitraum 2021–2050 rechnet man im Sommer mit einer Abnahme von 4–6%, während für den Winter ein Produktionsanstieg von 10% vorausgesagt wird (im Vergleich zu 1980–2009) [209]. Der verringerte Abfluss dürfte bis 2050 zu einer um durchschnittlich 7% geringeren Wasserkraftproduktion führen, wobei die Situation für Kraftwerke im Tessin und im südlichen Wallis noch prägnanter sein dürfte. Weiter wird die Produktion eingeschränkt durch die Gefährdung der Wasserkraftanlagen durch Felsstürze und Murgänge, den Verschleiss an Zuleitungen und Maschinen durch den erhöhten Geschiebetransport sowie durch die zunehmende Verlandung der Speicherseen (→ FUGE Seite 50) [206]. Die Stromproduktion der **Flusskraftwerke** im Mittelland wird durch Niedrigwasser im Spätsommer und Herbst zwar eingeschränkt werden, kann aber im Winter und Frühjahr von den erhöhten Abflüssen profitieren, da Turbinen in dieser Jahreszeit kaum ausgelastet sind. Insgesamt wird für 2020–2050 mit einer leichten Zunahme der Stromproduktion in den Flusskraftwerken gerechnet [209]. Die Produktion von **Kernenergie** wird wegen der höheren Wassertemperaturen im Sommer zukünftig weniger Kühlleistung aus den Flüssen beziehen. Weil die Bewilligungen für die

Abb. 27: Mittlerer Abfluss des Rheins bei Basel im Jahresverlauf modelliert für das Jahr 2035 (oben) und 2085 (unten) in m^3/s . Blau: Abfluss gerechnet für zehn unterschiedliche Klimaszenarien. Rot: Abfluss der Kontrollperiode in der Gegenwart. (Grafik M. Zappa, WSL 2013)



Atomkraftwerke auslaufen, dürften diese Einschränkungen aber bald irrelevant sein.

Der Bundesrat und das Parlament haben 2011 entschieden, mittelfristig aus der Kernenergie auszusteigen und einen starken Fokus auf den **Ausbau der Wasserkraft** zu setzen [17, 210, 211]. Damit wird bis 2050 ein massiver Ausbau der Energieproduktion aus alternativen Energien notwendig sein, wobei das Gesamtpotenzial durch den Ausbau der Wasserkraft auf 4 TWh geschätzt wird [211]. Die Entwicklung der Wasserkraft hängt ausserdem von den anstehenden Konzessionserneuerungen, kostendeckenden Einspeisevergütungen und anstehenden Ausrüstungsinvestitionen ab [126]. Gegenwärtig wird der Ausbau der Wasserkraft durch die Tatsache gehemmt, dass günstige Standorte bereits genutzt werden und dem Landschaftsschutz ein hoher Stellenwert eingeräumt wird. Da der europäische Strommarkt den Strompreis durch Subventionszahlungen beeinflusst, sind Investitionen in die Wasserkraft gegenwärtig nicht attraktiv. Nicht zuletzt hindert auch der Auslauf vieler Konzessionen bis 2050 die Betreiber an weiteren Investitionen.

Wasserkraftanlagen könnten neben der Stromproduktion **weitere Funktionen** im Bereich des Hochwasserschutzes, der Bewässerung oder der Trinkwasserversorgung übernehmen. Pumpspeicherkraftwerke gewinnen zudem an Bedeutung, weil sie wetterbedingte Produktionsschwankungen von Solar- und Windenergie abfedern, wenn auch nicht gänzlich vermeiden können. Diese Flexibilität als Dienstleistung für grössere «Smart grids» könnte zusätzlich vergütet werden, zumal die Wasserkraft gegenwärtig die einzige Speichertechnologie anbietet, die für Speicherzwecke grosser Strommengen im Bereich von mehreren Stunden bis wenigen Tagen ausreichend ausgereift ist [206] (FUGE). Für die zukünftige Entwicklung einer multifunktionalen Schweizer Wasserkraft bedarf es daher einer integralen Analyse der Nutzungsansprüche und Ressourcen innerhalb, aber auch ausserhalb der Schweiz.

Entscheidet man sich für den Ausbau der Wasserkraft, birgt der Ausbau der existierenden **Grosskraftwerke** das grösste Potenzial, da häufig eine beachtliche Produktionssteigerung mit nur wenig zusätzlichen Konflikten erzielt werden kann. Der Bau von **Kleinwasserkraftwerken** hingegen, v.a. in bisher nicht genutzten Einzugsgebieten, weist im Vergleich zur produzierten Energiemenge ein erhebliches Konfliktpotenzial auf [212]. Die neu entstehenden **Gletscherseen** könnten, falls sie höher als die bestehenden Stauseen gelegen sind, mithelfen, die heutige Stromproduktion aus Wasserkraft aufrechtzuerhalten [153] (NELAK). So könnten sie in bestehende Anlagen überführt werden, was allerdings die Erteilung von wasserrechtlichen Konzessionen und einer gewässerschutzrechtlichen Bewilligung zur Wasserentnahme (Restwassermengen) voraussetzt [213]. Wie

die Schweiz das handhabt, ist noch unklar. Die neue Abschätzung des Bundes zum Ausbaupotenzial der Wasserkraftnutzung geht davon aus, dass weitaus mehr Potenziale genutzt werden können, als in den Energieperspektiven 2035 angenommen [214]. Wie dieses Ausbaupotenzial realisiert wird (grosse vs. kleine Anlagen; moderate Nutzung überall vs. volle Nutzung in ökologisch weniger bedeutenden Gebieten), bleibt Gegenstand einer gesellschaftspolitischen Diskussion, die es noch zu führen gilt.

Landwirtschaft

Klima, Agrarpolitik, Preise und Raumnutzung sind nebst der Nachfrage nach inländischen Produkten Faktoren, welche die zukünftige Entwicklung der Schweizer Landwirtschaft – und somit auch die Gewässer – massgeblich beeinflussen. Dabei sind v.a. die Auswirkungen auf die Gewässerqualität durch diffuse Stoffeinträge von Bedeutung, aber auch zeitliche und räumliche Engpässe in der Verfügbarkeit von Bewässerungswasser können zukünftig vermehrt auftreten und zu Nutzungskonflikten führen.

Kurz- und mittelfristig prägt die **Agrarpolitik** die Entwicklung der Landwirtschaft weit stärker als der Klimawandel, ist aber schwierig zu fassen und vorherzusagen. Entsprechend berücksichtigen die **Klimastrategie Landwirtschaft** [215] und der Bericht des Bundesrates zum **Postulat «Wasser und Landwirtschaft»** insbesondere klimabedingte Aspekte in seinen Empfehlungen zur Optimierung des Wassermanagements [17]. Die Klimastrategie sieht eine Anpassungsstrategie in der Optimierung des Wassermanagements, indem z.B. durch eine strukturschonende Bodenbearbeitung die Wasserrückhaltung der Böden verbessert und kritische Bodenwasserzustände vermieden werden. Ferner soll sich die Bewässerung am Wasserdargebot orientieren und sparsam und effizient erfolgen. Auch sollen vermehrt trockenheitstolerante Kulturen und Sorten angebaut werden [215]. Damit orientiert sich die Klimastrategie an «sanften», d.h. für den Produzenten einfach zu realisierenden Anpassungsmassnahmen. Trotzdem kann davon ausgegangen werden, dass sich der Druck auf Fliessgewässer, Seen und Grundwasser für Bewässerungszwecke in Zukunft weiter erhöhen wird. Besonders mit der erwarteten Abnahme der Sommerniederschläge wird eine verstärkte Bewässerung in gewissen Regionen nötig werden, selbst in Gebieten und bei Kulturen, die ursprünglich nicht auf Bewässerung angewiesen waren [216]. Für das Einzugsgebiet der Broye wird zum Beispiel für den Zeithorizont 2050 ein um 22–48% erhöhter Wasserverbrauch berechnet. Der grösste Bedarf fällt mit der Jahreszeit zusammen, in der gleichzeitig auch der Abfluss der Fliessgewässer vielerorts am tiefsten ist [217] (AGWAM). Ein früherer Vegetationsbeginn könnte die Situation etwas entschärfen.

Zeitlich und regional kann es deshalb zu Kon-

NFP 61-Projekt IWAQA: Den grössten Einfluss auf die Wasserqualität hat der Mensch

Heute wie in Zukunft wird die Wasserqualität durch die Umwelt und durch sozioökonomische Bedingungen beeinflusst. Dazu gehören Wasserentnahmen wie auch die Landnutzung und damit verbundene Stoffeinträge. Um die Wasserqualität für kommende Generationen zu erhalten, braucht es heute Massnahmen. Massnahmen, die auf einem Systemverständnis aufbauen, das Klima-, Gesellschafts- und Landnutzungswandel verknüpft. Zu diesem Systemverständnis hat das Projekt IWAQA beigetragen, indem es eine Modellkette entwickelte, welche klima- und sozioökonomische Szenarien mit Wasserqualität und dem ökologischen Gewässerzustand verknüpft. Vor dem Hintergrund vier sozioökonomischer Szenarien wurde eine Palette von Handlungsalternativen formuliert, die im Einzugsgebiet der Mönchaltorfer Aa getestet wurden. Die Modellrechnungen machten deutlich, dass der chemische und ökologische Gewässerzustand auch in Zukunft vornehmlich durch menschliche Aktivitäten beeinflusst wird, und weit weniger durch den Klimawandel. Letzterer wird sich insbesondere durch erhöhte Wassertemperaturen ausprägen. Die Modelle zeigten ferner, dass Stoffeinträge besser vorausgesagt werden können, wenn sie kontinuierlich ins System gelangen. Durch Starkregen eingeschwemmte Verunreinigungen aus Siedlung und Landwirtschaft sind weit schwieriger zu fassen. Will man für den Erhalt der zukünftigen Wasserqualität Strategien und Massnahmen entwickeln, sollte man in der Gegenwart ansetzen. Denn: Probleme, die wir heute vermeiden oder lösen, werden wir morgen nicht mehr haben. Die Wasserqualität liegt in Menschenhand.

NFP 61-Projekt MONTANAQUA: Ein Gut, viele Nutzer

Wie eng der gesellschaftliche Wandel mit der Wassernutzung verknüpft ist, zeigt die Entwicklung in der Region Crans-Montana-Sierre. Ende des 19. Jahrhunderts entwickelte sich dort die bisher agrarisch geprägte Talschaft hin zum Gesundheits- und Sporttourismus und löste nach 1960 einen Bauboom aus. Der Wasserbedarf stieg nicht nur wegen der Bevölkerungszunahme, sondern auch wegen der einhergehenden Intensivierung der Landwirtschaft und des Weinbaus [218]. Auch die Wasserkraftproduktion stellte ab 1957 Ansprüche, ermöglichte andererseits aber die industrielle Entwicklung in der Talschaft (Aluminiumwerke in Sierre), welche den landwirtschaftlichen Nutzungsdruck wieder entschärfte. Wasserknappheit war folglich stets ein Thema. Wenn Nutzungen räumlich und zeitlich verteilt sind, führen verschiedene Nutzungsansprüche nicht zwingend zu Ressourcenkonflikten. Wie eine Analyse der Wassernutzer in der Crans-Montana-Sierre-Region zeigt, weist der Wasserbedarf im Sommer durch den Bewässerungs- und Trinkwasserbedarf einen Höchstwert auf. Im Winter verursachen der hohe Trinkwasserbedarf und die Beschneigung einen weiteren Höchstwert, mit täglichen Verbrauchsspitzen am späten Nachmittag. Das für die Wasserkraftproduktion gespeicherte Wasser macht fast 90% des genutzten Wasservolumens aus und ist auch für andere Ansprüche von Bedeutung. So wird es einigen Gemeinden auch für die Trinkwasserversorgung (Winter), für die Bewässerung der Golfplätze und für die Kunstschneeproduktion verkauft. Die letzteren beiden Nutzungen sind zeitlich begrenzt und regional betrachtet eher unbedeutend. Da die künstliche Beschneigung aber zu einer Zeit stattfindet, wo die natürlichen Abflüsse ohnehin gering sind, müssen zu diesem Zweck zwingend Speicherseen zur Verfügung stehen [6]. In Zukunft dürfte sich die Situation noch verschärfen: Wie Modellierungen für das Jahr 2050 gezeigt haben, wird sich die Region in trockenen Jahren am Jahresanfang (Januar bis März) wie auch im Spätsommer (August und September) auf ein Wasserdefizit einstellen müssen (Abb. 29).

NFP 61-Projekt FUGE: Dreht das Klima den Wasserkraftproduzenten den Hahn zu?

Eisdickemessungen und Massenbilanzierungen für 50 Gletscher der Schweizer Alpen für den Zeitraum 1900–2010 haben bestätigt, was bereits offensichtlich ist: Die Gletscher ziehen sich zurück. Diese genauen Zahlen ermöglichen Modellierungen für die Zukunft, die zeigen, dass rund 90% des aktuell vorhandenen Eisvolumens bis Ende des Jahrhunderts wegschmelzen werden, wobei 10–20 der untersuchten Gletscher gänzlich verschwinden [219]. Dieser Schwund wirkt sich auf den Abfluss aus, welcher vom Projekt «Future glacier evolution and consequences for hydrology» (FUGE) untersucht wurde. Die Eisschmelze wird die jährlichen Abflussmengen erst erhöhen und zwischen 2030 und 2050 zu maximalen Abflusswerten führen. Dann aber werden die Mengen zurückgehen und Ende des Jahrhunderts den Jahresabfluss kaum noch beeinflussen. Damit verschieben sich auch die Abflussspitzen: Während das Gletscherschmelzwasser im glazialen Regime zu Spitzenabflüssen im Hochsommer führt, werden diese sich nach 2050 abschwächen und sich 1–2 Monate früher ereignen [220, 221]. Da Gletscherschmelzwasser nur rund 1% zum Gesamtvolumen des Abflusses beiträgt, legt das den Schluss nahe, dass der Wegfall dieser Ressource nur einen unbedeutenden Einfluss auf die Wasserkraft hat. Die meisten Speicherkraftwerke liegen aber im Hochgebirge, wo die Eisschmelze einen weit bedeutenderen Anteil des Abflusses ausmacht. Die Walliser Kraftwerke Mauvoisin, zum Beispiel, müssen im Vergleich zu heute zukünftig mit rund 18% weniger Zuflüssen betrieben werden. Allerdings können betriebswirtschaftliche Massnahmen diese klimabedingten Verluste teils wieder wettmachen: Vermeidet man eine zu starke Absenkung des Wasserpegels, kann mehr Energie aus der gleichen Wassermenge gewonnen werden. Auch die verstärkte Produktion zu Hochpreiszzeiten mildert die ökonomischen Verluste [222]. Für die Betreiber von Speicherkraftwerken geben aber nicht nur die verringerten Wassermengen Anlass zur Sorge, sondern auch die Sediment- und Geschiebefrachten und Risiken, welche durch den Klimawandel signifikant erhöht werden [223].



kurrenzsituationen mit andern Nutzungen kommen [97], zumal die Bewässerung vielerorts auf Wasserressourcen zugreift, die in lang anhaltenden Trockenperioden ohnehin schon knapp sind und auch von anderen Akteuren genutzt werden [18, 38]. Auch in anderen Einzugsgebieten könnte der potenzielle Bewässerungsbedarf in Normaljahren um ein Vierfaches steigen [224] (AGWAM). In Berggebieten hingegen wird davon ausgegangen, dass der Bedarf in den meisten Fällen aus den Fließgewässern gedeckt werden kann [225].

Zugunsten der Gewässerqualität könnte sich auch die Reform des Direktzahlungssystems im Rahmen der **Schweizer Agrarpolitik 2014–2017** auswirken, die eine Umlagerung von tierbezogenen Direktzahlungen hin zu flächengebundenen Versorgungssicherheitsbeiträgen vorsieht. Im Tal- und Berggebiet wird das zu einem Rückgang der Tierbestände und bei einer leicht geringeren Nutzfläche zu einer Reduktion des Tierbesatzes führen [226], was den Nähr- und Schadstoffeintrag in Gewässer verringern dürfte. Die Auswirkungen können aber regional sehr unterschiedlich sein [227].

Auch die fortschreitende Siedlungsentwicklung führt zu einer **Verringerung der bewirtschafteten Kulturlandfläche**. Diese Entwicklung ist jedoch nicht mit Bestimmtheit

voraussagbar. Nimmt aber die landwirtschaftlich genutzte Fläche weiterhin ab, dürften sich Nährstoff- und Pflanzenschutzbeiträge flächenbezogen durch die Landwirtschaft weiter verringern und zur Verbesserung der Gewässerqualität beitragen. Kommt hinzu, dass dem revidierten Gewässerschutzgesetz zufolge beidseits der Ufer von Bächen und Flüssen landesweit rund 20 000 Hektaren ohne Dünger und Pflanzenschutzmittel bewirtschaftet werden müssen. An kleineren Fließgewässern wirken sich die neuen Vorschriften jedoch kaum auf die bisherige Bewirtschaftung aus, weil der Dünger- und Pestizideinsatz hier seit längerem durch die Direktzahlungsverordnung und die Chemikalien-Risikoreduktionsverordnung eingeschränkt wird.

Neben der Agrarpolitik und der Landnutzung wirkt sich insbesondere in der 2. Jahrhunderthälfte das Klima auf die Landwirtschaft aus. Die durch den Klimawandel verursachten **Temperaturerhöhungen** beeinflussen nicht nur die landwirtschaftliche Produktivität, sondern verlängern auch die Vegetationsperiode und erlauben damit eine zusätzliche Feldkultur oder einen weiteren Grundfutterschnitt. Insbesondere in höheren Lagen, die weniger Probleme mit der sommerlichen Trockenheit haben, wird die Pflanzen- und Tierproduktion durch den Temperaturanstieg und die verlän-

Links: Wenn bei der Petite-Grâne Bewässerungswasser im Frühsommer entnommen wird und gleichzeitig die Temperatur steigt, dann verenden viele Wasserlebewesen. (AGWAM)

Mitte: Mobile Wasserentnahme aus einem Kanal im Broyetal. (Foto Jürg Fuhrer, Agroscope)

Rechts: Der Schweizer Wald wird sich in der zweiten Jahrhunderthälfte stark verändern. Dies betrifft sowohl die Artenzusammensetzung wie auch die Biomasse. Davon wird auch der Wasserhaushalt betroffen sein. (DROUGHT-CH)

Gesamtes Speichervolumen versus Bewässerungsbedarf

in km³, Total 363 km³ = 100%

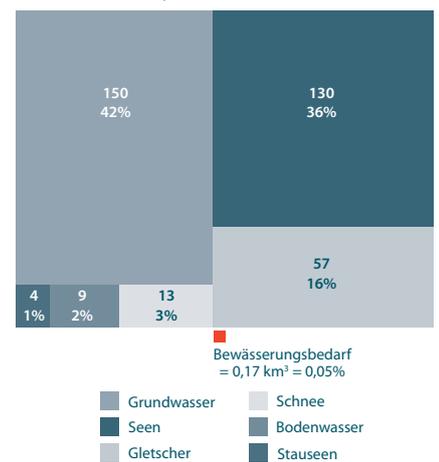


Abb. 28: Das Volumen des zukünftig benötigten Bewässerungswassers scheint mit rund 0,17 km³ im Vergleich zum gesamten Speichervolumen vernachlässigbar klein. Lokal muss in Zukunft jedoch vermehrt mit Engpässen gerechnet werden. (A. Björnsen)

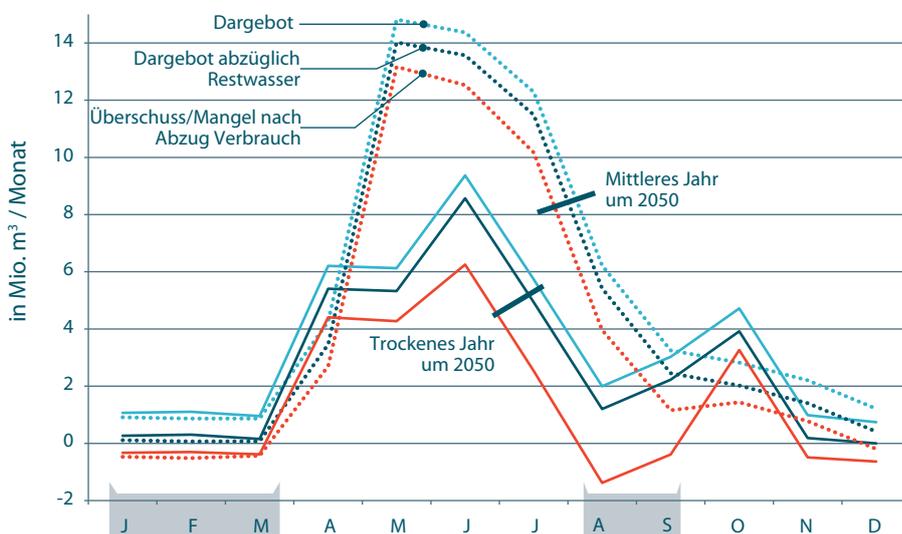


Abb. 29: Wasserdargebot der Region Crans-Montana-Sierre in normalen und trockenen Jahren nach 2050. ([228], MONTANAQUA)

gerte Sömmerungsperiode gefördert. Insgesamt könnte die Bedeutung der Hochlagen für die Viehwirtschaft zunehmen, besonders in feuchteren, gut nutzbaren Gebieten (z.B. Berner Oberland oder Obwalden). Im Futterbau wird an Standorten mit ausreichender Wasserversorgung die Produktivität steigen. Die Tierproduktion wird von kostengünstigeren, vermehrt im Inland produzierten Futtermitteln profitieren. Auch die Verlängerung der Weideperiode und neue, angepasste Futterpflanzenmischungen können das Potenzial der tierischen Produktion vergrössern [111]. Anders verhält es sich in trockenen und weniger intensiv genutzten Gebieten. Im Wallis wird es eher zu Trockenschäden auf den Weiden kommen. Auch im südlichen Graubünden wird die Wasserverfügbarkeit spürbar abnehmen. Der Klimawandel erhöht auch die Risiken durch **Extremereignisse** [215], welche zu reduzierter Produktivität, Ertragseinbussen und verminderter Ertragssicherheit führen können, aber auch die Problematik der Stickstoffauswaschung weiter verstärken dürften. Die Zunahme der Hitzetage kann die Tierhaltung und die Futterqualität negativ beeinträchtigen [229]. Was Trockenperioden angeht, betrachtet sich die Schweiz für den Umgang mit Schäden und Risiken als relativ gut gerüstet, weil sie auf die Erfahrung aus anderen Bereichen des Naturgefahrenmanagements zurückgreifen kann [30] und daher über ausreichend Grundlagen für den Aufbau eines integralen Trockenheitsmanagements verfügt (→ DROUGHT-CH Seite 14).

Waldentwicklung

Die Waldentwicklung wird in Zukunft massgeblich durch das Klima bestimmt und ist auch für das Wasser relevant. Die **Waldpolitik 2020** berücksichtigt diese Tatsache und schreibt einen Waldflächenerhalt vor. Während die klimabedingten Waldveränderungen in der ersten Jahrhunderthälfte noch gering sind, ist in der zweiten Jahrhunderthälfte mit einem spürbaren Wandel zu rechnen. Dies betrifft die Artenzusammensetzung, den Zustand und die damit verbundene Boden-

speicherkapazität und Verdunstung sowie die davon betroffenen Abflüsse.

Bis Mitte des Jahrhunderts wird allgemein mit einem **Zuwachs an Biomasse** gerechnet, insbesondere in steilen und eher abgelegenen, alpinen Einzugsgebieten [230]. Trockenheitsbedingte Folgen, wie z.B. die zunehmende Feuerhäufigkeit, werden vorwiegend in niedrigen und mittleren Lagen warm-trockener Alpentäler erwartet, zumindest bis sich wasserstresstolerante Arten etabliert haben.

Um die Jahrhundertmitte wächst die Biomasse aufgrund wärmerer Temperaturen und verringerter temperaturbedingter Wachstumsbegrenzung (+2-°C-Szenario) in höheren Lagen (2200 m ü. M.) und dürfte 2100 historische Höchstwerte erreichen [231]. In Wäldern des Alpennordhangs (z.B. Dischmatal) ist die Situation weniger eindeutig. Während die Waldbiomasse für die Szenarien A1B und A2 in Zukunft abnimmt, nimmt sie für das +2-°C-Szenario zu. Über 2200 m ü. M. wird ein wesentlicher Zuwachs erwartet.

Die **Artenzusammensetzung** der Wälder ist für den Wasserhaushalt und den Wasserrückhalt im Boden bedeutend und ist insbesondere für niedrige Lagen relevant, weil sie flächenmässig einen weit grösseren Anteil ausmachen als die Regionen nahe der Waldgrenze [150]. In Zukunft wird die Fichte der wärmeliebenden, aber trockenheitsempfindlichen Buche weichen (siehe Abb. 30), womit sich die öfter und heftiger auftretenden Trockenperioden der fernen Zukunft (2070–2099) negativ auf den Waldzustand auswirken könnten. Im Tiefland könnte sich die Eiche weiter etablieren. Der klimabedingte Artenwechsel von Fichte hin zu Buche könnte sich durch die Erhöhung der Wasserspeicherkapazität im Wurzelraum positiv auf die Hochwasserfunktion auswirken [232]. Wälder in inneralpinen Trockentälern könnten sich in Richtung Steppenvegetation entwickeln und auch zusammenbrechen.

Auch die artenspezifische **Verdunstung** spielt eine Rolle. Die zukünftigen Trockenperioden wirken sich v.a. auf die Wälder in niedrigen Lagen aus, wo sowohl die Temperaturen wie auch die potenziellen Verdunstungsraten

Abb. 30: Heutiges und zukünftiges Verbreitungspotenzial der Fichte (*Picea abies*) in der Schweiz, welches auf 36 Modellkombinationen basiert. In den hellen Flächen ist das Verbreitungspotenzial der Fichte sehr gering und in den orangen Bereichen mit grossen Unsicherheiten behaftet. Mit hoher Wahrscheinlichkeit findet die Fichte in den rot gefärbten Flächen ein geeignetes Habitat, wenn auch dies nicht bedeutet, dass sie sich dort bis Ende des Jahrhunderts tatsächlich etabliert hat. (Grafik A. Psomas und N. Zimmermann/WSL, Forschungsprogramm Wald und Klimawandel)

Aktuelles Verbreitungspotenzial der Fichte

- <30% der Modelle
- 30–60%
- >60%



Verbreitungspotenzial der Fichte im Jahr 2100

- <30% der Modelle
- 30–60%
- >60%



am höchsten sein werden. Die gekoppelten Modelle besagen, dass reine Laubwälder im Einzugsgebiet des Ticino bis Ende des Jahrhunderts beinahe und für das Rhone-Einzugsgebiet gänzlich verschwinden. Im Fall des Rhonetals werden sogar Mischwälder in Mitteleuropa gezogen. Damit einhergehend verändert sich die potenzielle Evapotranspiration in Abhängigkeit der Höhe über Meer. Die Laubwaldverluste in niederen Lagen bewirken in der zweiten Jahrhunderthälfte eine verringerte Verdunstungsrate in Regionen unter 1300 m ü. M. In Gebieten oberhalb 1300 m ü. M. erhöht sich die Evapotranspiration im selben Zeitraum aufgrund des temperaturbedingten Biomassezuwachses und wirkt sich damit auf die Abflussmenge aus. Während folglich in höheren Lagen der Abfluss Ende des Jahrhunderts abnimmt (viele Verdunstungsverluste), erwartet man für tiefere Lagen eine Zunahme (verringerte Verdunstungsrate). Für das Einzugsgebiet der Rhone wird allein durch die veränderten Waldbestände mit einer Verringerung des Jahresabflusses um rund 1% gerechnet, für das Gebiet des Ticino mit 0,6% [150]. Das bedeutet, dass sich neue Waldstrukturen in Abhängigkeit der Höhe auf lokale Abflüsse auswirken werden, selbst wenn der gesamtschweizerische Abfluss sich nur wenig verändert.

Tourismus

Überlegungen zur zukünftigen Entwicklung des Tourismus und den daraus resultierenden Folgen für die nachhaltige Wassernutzung betreffen in erster Linie den **Wintertourismus**. Von den ansteigenden Temperaturen werden sämtliche Skisportdestinationen in den Alpen betroffen sein, insbesondere aber diejenigen unter 2000 m ü. M., die mit einem Rückgang der Schneesicherheit rechnen müssen [113, 141, 233]. Bei einem Temperaturanstieg um 2 °C bis Ende Jahrhundert wird sich die Anzahl schneesicherer Skigebiete in der Schweiz um gut einen Fünftel reduzieren [171]. Für die Wintertourismusorte Braunwald, Davos und Scuol sagen Modellrechnungen voraus, dass die Zahl der schneesicheren Tage in tiefer gelegenen Pisten 2030 unter die kritische Marke von 100 fällt [115]. Insbesondere der Skitourismus der Waadtländer und Freiburger Alpen, im Tessin sowie in der Zentral- und der Ostschweiz ist gefährdet. Weniger betroffen sind die Skigebiete im Wallis und in Graubünden [234].

Im europäischen Vergleich ist die Schweiz mit den höher gelegenen Skigebieten zwar im Konkurrenzvorteil, wird sich aber trotzdem anpassen müssen, sei es durch Verlagerung in höhere Zonen, durch den vermehrten Einsatz von Schneekanonen, durch aufwendige Skipistenpflege oder durch die Abdeckung von Eisflächen. Der Wasserbedarf im Winter für Beschneigung sowie für die Trink- und Brauchwasserversorgung wird auch in Zukunft hoch bleiben.

Wegen ökonomischer Betrachtungen hat sich die Wintertourismusindustrie bereits heute von der natürlichen Schneeverfügbarkeit abgekoppelt [233, 235]. Selbst die Klimaanpassungsstrategie des Bundes stellt die künstliche Beschneigung als Anpassungsmassnahme in den Vordergrund [171]. Damit werden die Kunstschneeproduktion [115] und auch der Stromverbrauch zunehmen [236]. Die Errichtung von Speicherbecken soll Nutzungskonflikte vermeiden [17].

Der **Sommertourismus** gehört sowohl zu den Gewinnern wie auch zu den Verlierern. Wärmere und trockenere Sommer locken Gäste ins Gebirge, während sich die touristische Attraktivität der alpinen Landschaft durch den starken Rückgang der Gletscher markant verändern wird. Der Anteil an bewässerten Golf- und Freizeitanlagen dürfte geringfügig zunehmen.

Gewässerschutz

Damit die Fliessgewässer Hochwasserspitzen, Geschiebe und Schwemmholz ohne Schaden ableiten und Siedlungsgebiete sowie Kulturland entwässern können, sind die Kantone gesetzlich verpflichtet, in ihrer Richt- und Nutzungsplanung ausreichend Gewässerräume vorzusehen. Grundlage dazu ist das **Wasserbaugesetz**, das verlangt, dass Hochwasserschutz primär mit raumplanerischen Massnahmen zu gewährleisten ist. Die Kantone sind auf dieser Grundlage verpflichtet, den Raumbedarf der Fliessgewässer auszuweisen. Auch das **Gewässerschutzgesetz** (Art. 38) beauftragt die Kantone in ihrer Richt- und Nutzungsplanung, Gewässerräume für Revitalisierungen vorzusehen, womit gewisse Synergien mit dem Hochwasserschutz entstehen. Der dazu benötigte Raumbedarf für die vorgesehenen Ausweitungen von Bächen und Flüssen beträgt rund 2000 ha bis Ende des Jahrhunderts (Abb. 26). Als Revitalisierungen gelten bauliche Massnahmen zur Wiederherstellung der natürlichen Funktionen eines verbauten, korrigierten, überdeckten oder eingedolten oberirdischen Gewässers. Dazu gehört auch die Reduktion der negativen **Auswirkungen der Wasserkraftnutzung** durch die Verminderung von Schwall und Sunk, die Reaktivierung des Geschiebehaushalts und die Wiederherstellung der Fischgängigkeit, wovon Gewässerabschnitte von einer Gesamtlänge von etwa 4000 km profitieren werden [237]. Die Kosten betragen etwa 1 Mia. Franken. Die Planung und Umsetzung der Massnahmen findet in einer Sanierungsphase von 20 Jahren statt, woraus sich eine durchschnittliche jährliche Investitionssumme von rund 50 Mio. Franken ableitet, welche durch einen Zuschlag auf die Übertragungskosten finanziert wird [238], d.h. über den Stromkunden. Einen bedeutenden Beitrag zum Gewässerschutz leistet auch der **Ausbau** von rund 100 grossen **Abwasserreinigungsanlagen** [64].

Schlussfolgerungen

Wasser in der Schweiz ist keine unendliche Ressource

Mit rund 40 km³ Wasser, die jährlich aus der Schweiz abfliessen, verfügt das Land nominell über reichlich Wasserressourcen. Die mittlere Jahresmenge wird sich auch mit dem Klimawandel nicht grundlegend ändern. Die Schweiz bleibt ein Wasserschloss.

Die Gesamtbilanz hat aber wenig Aussagekraft, was das effektive Wasserdargebot anbelangt. Wichtig für die nachhaltige Wassernutzung ist die Berücksichtigung der zeitlichen und räumlichen Variabilität (→ z.B. AGWAM, NELAK, FUGE).

Zudem verlieren wichtige Speicher, wie Gletscher und Schnee, zukünftig an Volumen, was die Abflüsse und die damit verbundenen Leistungen beeinflusst. Nicht zuletzt wird das nutzbare Dargebot durch die von Mensch und Umwelt beeinflusste Wasserqualität geschmälert. Quantifiziert man also die effektiv nutzbare Menge zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort, ist die Schweiz nicht immer und überall so reich wie bisher angenommen.

Kleiner Verbrauch, grosser Nutzen

Im Vergleich zum Wasserdargebot ist der Verbrauch der Schweiz bescheiden. Haushalte und die verschiedenen Wirtschaftszweige verbrauchen kaum mehr als 5% der erneuerbaren Wassermenge.

Sobald sich jedoch Nutzungsansprüche überlagern oder Wasser mehrfach verwendet wird, kann die Nutzungsintensität regional und zeitlich sehr hoch sein. Die von der Wasserkraft genutzte Menge, zum Beispiel, beläuft sich auf das 14-Fache des gesamten Jahresabflusses. Dasselbe Wasser dient später der Kühlung, der Bewässerung oder wird als Trinkwasser gefördert. Zahlreiche Wirtschaftssektoren und Privathaushalte sind von einem zuverlässigen Dargebot abhängig und erheben Ansprüche. Ist diese Zuverlässigkeit in Zukunft gefährdet, muss dies in der Ressourcenverteilung und -nutzung berücksichtigt werden.

Grundwasser: überschätzt und unterschätzt

Im Untergrund der Schweiz lagern rund 150 km³ Wasserreserven. Grundwasser stellt ein wichtiges Bindeglied zwischen verschiedenen aquatischen Ökosystemen dar. Bedeutungsvoll sind die Grundwasserreserven aber auch für viele Nutzungen, insbesondere für die öffentliche Trinkwasserversorgung, die zu 80% von Grundwasser gespeist wird.

In seiner Ergiebigkeit wird Grundwasser oft überschätzt, denn die tatsächlich nutzbare Menge wird durch technische, wirtschaftliche, ökologische und rechtliche Faktoren eingeschränkt. Die Siedlungsentwicklung und die Landwirtschaft beeinflussen Menge und Qualität in hohem Ausmass. Bislang ist in vie-

len Regionen die nachhaltig nutzbare Menge nur ungenügend quantifiziert, insbesondere in Karst- und alpinen Gebieten (→ z.B. GW-TREND Seite 42, SWISSKARST Seite 14). Ebenso werden qualitative Einschränkungen für die Grundwassernutzung nur ungenügend dokumentiert (z.B. Grundwasserqualität in Karstgebieten und in Gebieten, die nicht mehr für die Trinkwassernutzung geeignet sind). Die nachhaltig nutzbare Menge sollte zudem im Hinblick auf potenziell längere Trockenperioden näher untersucht werden.

Alpines Wasserdargebot: Der Durchschnitt bleibt, die Verteilung ändert

Der Einfluss des Klimawandels auf die Krysphäre ist bereits heute beobachtbar und lässt sich mit guter Sicherheit voraussagen.

Schlüsselkomponenten des alpinen Wasserdargebots sind die Schneedecke und die Gletscher, welche sich im Laufe dieses Jahrhunderts spürbar verändern werden. Für die Fliessgewässer ändert sich weniger die jährliche Menge der Abflusspende, sondern primär der Zeitpunkt. Da die Schmelzwasserspitze früher im Jahresverlauf erreicht wird, verlängert sich die nachfolgende, wasserarme Periode. Niedrige Pegelstände werden v.a. im Spätsommer erwartet, wenn der Schmelzwasserfluss versiegt ist. Bislang geht es bei Diskussionen zu zukünftigen Änderungen des Wasserdargebots häufig um Jahresmittelwerte. Bedeutender werden die Abflussänderungen im zeitlichen Jahresverlauf als Folge der früheren Schmelze und der Niederschlagszunahme im Winter sein, was sich mitunter auf das Wasserdargebot auswirkt. Innovative Ideen zur zusätzlichen Wasserspeicherung sind gefragt.

Wasser prägt Landschaft, Landschaft prägt Wasser

Wasser ist ein bedeutendes Landschaftselement und zentral für den Erhalt der Kulturlandschaft. Die Land(schafts)nutzung wirkt sich stark auf die Wasserressourcen aus. Doch die Wechselwirkungen sind wenig untersucht. Die Landnutzung wirkt sich unmittelbar auf die Wasserquantität, -qualität und die Ökologie der Gewässer aus (→ z.B. WATERCHANNELS Seite 24, HYDROSERV, IWAQA Seite 50). Um das Wasserdargebot nicht nur haushälterisch zu nutzen, sondern auch zu erhalten, sind die Raumplanung und die Flächennutzung in die Betrachtung der nachhaltigen Wassernutzung einzubeziehen. Die Hydrologie von komplexen Einzugsgebieten wurde in der Schweiz bisher wenig untersucht. Nur wenige Studien quantifizieren den Einfluss der Landnutzung (z.B. Drainagen, Bodenverdichtung und -versiegelung) auf die Abflüsse, obwohl diese Landnutzung insbesondere im stark genutzten Mittelland ausgeprägt ist. Ähnliches gilt für Stoffeinträge, mit welchen



«die Landschaft» indirekt die Wasserqualität beeinflusst. Offensichtlich wird der Wasserhaushalt des Mittellandes insgesamt deutlich weniger vom Klimawandel beeinflusst werden als hochalpine und alpine Gebiete (→ z.B. NELAK Seite 40).

Es geht um Gewässer, nicht nur um Wasser

Die Schweiz verfügt über hochwertiges Trinkwasser und hat in den vergangenen Jahrzehnten durch einen verbesserten Gewässerschutz viele diffuse Nährstoff- und Schadstoffeinträge erfolgreich reduziert. Durch den Ausbau von Abwasserreinigungsanlagen konnten auch punktuelle Stoffeinträge verringert werden.

Doch es ist nicht nur die Ressource Wasser die zählt, sondern auch das Ökosystem, welches die Ressource generiert, erhält, speichert, reinigt oder mitnutzt. Folglich geht es nicht alleine um eine nachhaltige Wassernutzung, sondern vielmehr um eine nachhaltige Gewässernutzung, die sicherstellt, dass die Ökosysteme ihre Leistungen erbringen können. Eine solch erweiterte Betrachtung birgt Chancen: Als Bindeglied zwischen vielen, unterschiedlichen Ökosystemen vermögen Gewässer den Umweltzustand als Ganzes adäquat darzustellen und eignen sich daher als Umweltbeobachtungssysteme. Um die Entwicklungen richtig zu deuten und die kausalen Zusammenhänge zu verstehen, sind Langzeitstudien unabdingbar. Diese würden erlauben, den natürlichen Zustand zu definieren (z.B. SEDRIVER: Bachforelle) und geeignete Anpassungsmassnahmen an den Klimawandel zu formulieren (z.B. → IWAQA Seite 50).

Wasserdaten Schweiz: Überblick und Gesamtverantwortung schaffen

Die Schweiz verfügt über lange Messreihen und imposante Datenbanken. Das Land ist nicht nur reich an Wasser, sondern auch an Wasserdaten. Jedenfalls was die Quantität und teilweise auch die Qualität auf der Dargebotsseite betrifft.

Nachhaltiges Wassermanagement ist in Zeiten des Klimawandels eine nationale Aufgabe, die eine verstärkte Koordination und Abstimmung der wasserwirtschaftlichen Aktivitäten notwendig macht (→ IWAGO Seite 24). Als Grundlage für den Schutz und die Bewirtschaftung der Gewässer müssen Datenlücken

geschlossen und vorhandene Daten zusammengefasst werden. Datenlücken bestehen insbesondere an der Schnittstelle zwischen Landnutzung und Wasserqualität, aber auch im Bereich der Wassernutzung. Kenntnisse zur aktuellen sowie zur geplanten Wassernutzung sind ungenügend [239] und beruhen vorwiegend auf Schätzungen und Hochrechnungen. Zeitlich wie auch räumlich sind sie mit hohen Unsicherheiten behaftet.

Bestehende Datensätze sollten durch die verstärkte Zusammenarbeit zwischen Bund, Kantonen, Gemeinden und Ämtern für einen umfassenden Daten- und Informationsaustausch aufgearbeitet werden. Neue Datensätze sollten von diesen politischen Akteuren vermehrt gemeinsam erhoben werden, wie dies von der Hydrologischen Kommission bereits vorgeschlagen wurde [2].

Die Schweiz ist keine Insel: Es braucht eine internationale Ressourcenstrategie

Die Schweiz hat heute wie auch zukünftig einen Standortvorteil in Bezug auf Wasser. Neben einem beträchtlichen Nutzen bringt dies auch Verantwortung mit sich.

Da Wasserdargebot, -nutzung und -qualität in bedeutendem Ausmass von Landnutzungen und gesellschaftlichen Ansprüchen beeinflusst werden, braucht es neben einer «Wasserstrategie» eine übergeordnete Ressourcen- und Raumstrategie, in welcher Wasser eine wichtige Komponente darstellt. Als Ursprungsland von Rhein, Inn, Ticino und Rhone teilt die Schweiz ihre Gewässer mit anderen europäischen Ländern. Ihre Verantwortung als Oberlieger kann sie nutzen, um Wassernutzungsprinzipien und Konzepte zur Erhaltung wasserbedingter Ökosystemleistungen zu erarbeiten und umzusetzen, die auf die Nachbarländer ausstrahlen – und dies auch, weil deren Erfahrungen und Bedürfnisse in diese Erarbeitung und Umsetzung eingehen müssen.

Links: Die zeitliche und räumliche Variabilität des Wasserdargebots wird in Zukunft zahlreichen Sektoren Anpassungsmassnahmen abverlangen. (WATERCHANNELS)

Mitte: Der Klimawandel wird in hochalpinen und alpinen Gebieten weit spürbarer sein als im Mittelland, wo vor allem die Nutzungsansprüche des Menschen den Wasserhaushalt beeinflussen. (NELAK)

Rechts: Es ist nicht nur die Ressource Wasser, die zählt, sondern auch das Ökosystem. (IWAQA)

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Datenreihen für verschiedene Messgrößen von Schweizer Gewässern.
Abb. 2: Jahresabfluss der Schweiz.
Abb. 3: Lockergestein-, Kluft- und Karstgrundwasserleiter und ihre Morphologie.
Abb. 4: Erneuerbarer und heute genutzter Anteil des Grundwasservorkommens in der Schweiz.
Abb. 5: Karstgebiete in der Schweiz.
Abb. 6: Kartierung der Abflussprozesse im Einzugsgebiet Schächen.
Abb. 7: Modellierte Bodenspeicherbeiträge zum Hochwasser im Schächen.
Abb. 8: Gesamtstickstoff- und Gesamtposphorkonzentrationen in Fliessgewässern.
Abb. 9: Nitratkonzentrationen im Grundwasser.
Abb. 10: Trinkwasserverbrauch im Schweizer Privathaushalt.
Abb. 11: Jährlicher Wasserverbrauch verschiedener Sektoren in der Schweiz.
Abb. 12: Jährlicher Wasserverbrauch vs. Durchflusskühlung und Stromproduktion.
Abb. 13: Nutzung des erneuerbaren Wassers für die öffentliche Trinkwasserversorgung.
Abb. 14: Jährlicher Wasserverbrauch verschiedener Dienstleistungen.
Abb. 15: Bewässerungsbedürftigkeit der landwirtschaftlichen Nutzflächen (1980–2006).
Abb. 16: Wassernutzung der Schweizer Landwirtschaft.
Abb. 17: Bewässerte Landwirtschaftsfläche im Freiland (nach Kulturen).
Abb. 18: Anteil der bewässerten Landwirtschaftsfläche in der Schweiz.
Abb. 19: Jährlicher Wasserverbrauch der fertigen Industrie.
Abb. 20: Jährlicher Wasserverbrauch für Freizeit und Tourismus.
Abb. 21: Jährliche Betriebs- und Kapitalkosten für Wasserinfrastrukturen in der Schweiz.
Abb. 22: Saisonaler Temperaturanstieg und zukünftige Veränderung der Niederschläge für 3 Schweizer Regionen.
Abb. 23: Modellierte Übertiefungen und potentielle Gletscherseen in den Zentralalpen.
Abb. 24: Bodenwasserprojektionen für die ferne Zukunft.
Abb. 25: Flusswasser- und Grundwassertemperaturen ab 1980.
Abb. 26: Anteil verschiedener Landnutzungsarten an der gesamten Landesfläche.
Abb. 27: Modellierter mittlerer Abfluss des Rheins bei Basel im Jahresverlauf.
Abb. 28: Volumen des zukünftig benötigten Bewässerungswassers vs. gesamtes Speichervolumen.
Abb. 29: Wasserdargebot der Region Crans-Montana-Sierre nach 2050.
Abb. 30: Heutiges und zukünftiges Verbreitungspotenzial der Fichte in der Schweiz.

Tabellenverzeichnis

- Tab.: Veränderte zukünftige Hochwasserrisiken in der Schweiz.

Literatur

- [1] Spreafico M., Weingartner R. (2005): Hydrologie der Schweiz – Ausgewählte Aspekte und Resultate. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 7, Bern.
- [2] Walther P. (2013): Foresight Report Hydrological Research in Switzerland. Final Workshop Report, Olten (24.11.2011), Bern.
- [3] Seiz G., Foppa N. (2007): Nationales Klima-Beobachtungssystem (GCOS Schweiz). Publikation von MeteoSchweiz und ProClim, 92 S.
- [4] Grasso A., Jakob A., Spreafico M., Béro D. (2010): Monitoring von Feststofffrachten in schweizerischen Wildbächen. Wasser Energie Luft 102(1): 41–45.
- [5] Schlosser J. A., Haertel-Borer S., Liechti P., Reichert P. (2013): Konzept für die Untersuchung und Beurteilung der Seen in der Schweiz. Anleitung zur Entwicklung und Anwendung von Beurteilungsmethoden. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen 1326: 38 S.
- [6] Reynard E., Bonriposi M. (2012): Water use management in dry mountains of Switzerland. The Case of Crans-Montana-Sierre Area. In: Nemenyi M., Heil B. (eds). The impact of Urbanization, Industrial, Agricultural and Forest Technologies on the Natural Environment. Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron: 281–301.
- [7] Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) (2012): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen 1217: 76 S.
- [8] Schädler B., Weingartner R. (2002): Ein detaillierter hydrologischer Blick auf die Wasserressourcen der Schweiz: Niederschlagskartierung im Gebirge als Herausforderung. Wasser-Energie-Luft 94 (7/8), Baden.
- [9] Blanc P., Schädler B. (2013): Das Wasser in der Schweiz – ein Überblick. Schweizerische Hydrologische Kommission CHy, Akademie der Naturwissenschaften Schweiz, Bern: 31 S.
- [10] Scherrer S. C., Wüthrich C., Croci-Maspoli M., Weingartner R., Appenzeller C. (2013): Snow variability in the Swiss Alps 1864–2009. International Journal of Climatology 33(15): 3162–3173.
- [11] Menzel L. (1999): Flächenhafte Modellierung der Evapotranspiration mit TRAIN. PIK Report 54, Potsdam: 30 S.
- [12] Aschwanden H., Weingartner R. (1983): Die Abflussregimes der Schweiz. Publikation Gewässerkunde 65, Bern.
- [13] Haeberli W., Paul F., Zemp M. (2013): Vanishing glaciers in the European Alps. In: Fate of Mountain Glaciers in the Anthropocene. Pontifical Academy of Sciences, Scripta Varia 118: 1–9.
- [14] NELAK (2013): Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge – Chancen und Risiken. Forschungsbericht NFP 61. Haeberli W., Büttler M., Huggel C., Müller H., Schleiss A. (Hrsg.). Zürich, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich: 300 S.

- [15] Haerberli W., Linsbauer A. (2012): Global Glacier Volumes and Sea Level – Effects of ice below the surface of the ocean of new local lakes on land. *The Cryosphere Discussions* 6: 5169–5179.
- [16] Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL) und Hydrologische Kommission (CHy) (Hrsg.) (2011): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung – Synthesebericht. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz 38: 28 S.
- [17] Bundesamt für Umwelt BAFU (2012): Umgang mit lokaler Wasserknappheit in der Schweiz. Bericht des Bundesrates zum Postulat «Wasser und Landwirtschaft. Zukünftige Herausforderungen» (Postulat 10.353 von Hansjörg Walter 17.6.2010). Bern: 87 S.
- [18] Bundesamt für Umwelt BAFU (2013): Restwassersanierungen: Zahlreiche Kantone im Rückstand (<http://www.news.admin.ch/message/index.html?lang=de&msg-id=49177>, abgerufen am 4.2.2014).
- [19] Baumgartner H. (2012): 1001 neue Weiher. *Umwelt 2*: 39–42.
- [20] Sinreich M., Kozel R., Lützenkirchen V., Matousek F., Jeannin P.-Y., Löw S., Stauffer F. (2012): Grundwasserressourcen in der Schweiz. *Aqua & Gas* 9: 16–28.
- [21] Schürch M. (2010): Typisierung von Grundwasserregimen in der Schweiz. *gwa* 11: 955–965.
- [22] Interview mit Livingstone D. M. (2012): «Jedes Grundwasser hat seinen eigenen Charakter». *Aqua & Gas*: 8–9.
- [23] Figura S., Livingstone D. M., Hoehn E., Kipfer R. (2013): Klima und Grundwasser: Rückblicke und Vorhersagen von Temperatur und Sauerstoff mittels historischer Aufzeichnungen. *Aqua & Gas* 7/8: 28–33.
- [24] Figura S., Livingstone D. M., Hoehn E., Kipfer R. (2011): Regime shift in groundwater temperature triggered by the Arctic Oscillation. *Geophysical Research Letters* 38, L23401.
- [25] Schürch M. (2011): Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser. *gwa* 3: 177–182.
- [26] ISSKA (2012): Swisskarst Project – toward a sustainable management of karst waters in Switzerland, NRP61 2012 Intermediate Report. Swiss Institute for Speleology and Karst Studies, La Chaux-de-Fonds, Switzerland: 47 S. (unpublished report).
- [27] Bernhard L., Zappa M. (2012): Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Einzugsgebiete. Schlussbericht CCHydrology. Teilprojekt WHH-CH-Hydro. WSL Birmensdorf.
- [28] Schädler B. (2010): Anpassung an die Klimaänderung – Teilstrategie Wasser. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Bern.
- [29] Kruse S., Seidl I., Stähli M. (2010): Informationsbedarf zur Früherkennung von Trockenheit in der Schweiz: Die Sicht potenziell betroffener Nutzergruppen. *Wasser Energie Luft* 102: 305–308.
- [30] Kruse S., Seidl I. (2013): Social capacities for drought risk management in Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13(12): 3429–3441.
- [31] Pfister C., Rutishauser M. (2000): Dürresommer im Schweizer Mittelland seit 1525.
- [32] Theurillat J. P., Guisan A. (2001): Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: A review. *Climatic Change* 50: 77–109.
- [33] Fundel F., Jörg-Hess S., Zappa M. (2013): Monthly hydrometeorological ensemble prediction of streamflow droughts and corresponding drought indices. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 395–407.
- [34] Rebetez M. (1999): Twentieth century trends in droughts in southern Switzerland. *Geophysical Research Letters* 26(6): 755–758.
- [35] Pezatti G. B., Zumbrennen T., Bürgi M., Ambrosetti P., Conedera M. (2013): Fire regime shifts as a consequence of fire policy and socio-economic development. An analysis based on the change point approach. *Forest Policy and Economics* 29: 7–18.
- [36] Reinard M., Rebetez M., Schlaepfer R. (2005): Recent climate change: rethinking drought in the context of forest fire research in Ticino, South of Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology* 82: 17–25.
- [37] Stähli M., Kruse S., Fundel F., Zappa M., Stahl K., Bernhard L., Seidl I. (2013): DROUGHT.CH – auf dem Weg zu einer Trockenheits-Informationenplattform für die Schweiz. *Wasser Energie Luft* 105(2): 117–121.
- [38] Marbot B., Schneider M., Flury C. (2013): Wiesenbewässerung im Berggebiet. Bericht Forschungsprogramm AgriMontana. Ettenhausen: 55 S.
- [39] Vischer D. L. (2003): Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz – Von den Anfängen bis ins 19. Jahrhundert. *Berichte des BWG No. 5, Serie Wasser*, Bern: 208 S.
- [40] Bezzola G. R., Hegg C. (Hrsg.) (2008): Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2: Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. *Umwelt-Wissen* 0825: 429 S.
- [41] Vouillamoz J., Malard A., Schwab-Rouge G., Weber E., Jeannin P.-Y. (2013): Mapping flood related hazards in karst using KARSYS approach. Application to the Beuchire-Creugenat karst system (JU, Switzerland). *Proceedings of the 13th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*, held in Carlsbad, New Mexico, May 6–10, 2013: 333–342.
- [42] Malard A., Jeannin P.-Y., Weber E. (2014): Assessing the contribution of karst hydrological flows in the extremely high water events of the Suze River affecting the city of Bienne (Switzerland). *Proceeding of the IAEG XII Congress – Torino*, September 15–19, 2014.
- [43] Schädler B. (2013). Umweltveränderungen und Auswirkungen auf die Hochwasserabflüsse Schweiz. In: Spreafico M., Viviroli D. (Hrsg.). *Ausgewählte Beiträge zur Abschät-*

- zung von Hochwasser und Feststofftransport in der Schweiz. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz 40: 41–46.
- [44] KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. Wasser Energie Luft 1: 55–57.
- [45] Schmocker-Fackel P., Naef F. (2013): Historische Hochwasser. In: Spreafico M., Viviroli D. (Hrsg.). Ausgewählte Beiträge zur Abschätzung von Hochwasser und Feststofftransport in der Schweiz. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz 40: 33–40.
- [46] Schmocker-Fackel P., Naef F. (2010): Changes in Flood Frequencies in Switzerland since 1500. Hydrology and Earth System Sciences 14(8): 1581–1594.
- [47] Malard A., Jeannin P.-Y. (2013): Characterisation of karst aquifers in Switzerland: The KAR-SYS approach. European Geologist 35: 59–63.
- [48] ISSKA (2013). Estimation des ressources en eau (volume annuel écoulable) des aquifères karstiques suisses. BAFU, Bern. (in review)
- [49] Orth R., Seneviratne S. I. (2012): Analysis of soil moisture memory from observations in Europe. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 117(D15, 16).
- [50] Orth R., Seneviratne S. I. (2013): Predictability of soil moisture and streamflow on sub-seasonal timescales: A case study. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 118: 10963–10979.
- [51] Schmid M. (2012): Verification of monthly probabilistic low-flow forecasts in the Swiss Rhine basin, Masterarbeit, ETH Zürich.
- [52] Seneviratne S. I., Orth R., Jörg-Hess S., Kruse S., Seidl I., Stähli M., Zappa M., Seibert J., Staudinger M., Stahl K., Weiler M. (2013): Trockenheit in der Schweiz: Ergebnisse des NFP 61-Projekts DROUGHT.CH. Aqua & Gas 9: 38–47.
- [53] Seneviratne S. I., Lehner I., Gurtz J., Teuling A. J., Lang H., Moser U., Greber D., Menzel L., Schrott K., Vitvar T., Zappa M. (2013): Swiss prealpine Rietholzbach research catchment and lysimeter: 32-year time series and 2003 drought event. Water Resources Research 48, W06526.
- [54] Interview mit Naef F. (2013): «Die Anforderungen an die Dimensionierung von Schutzmassnahmen werden steigen». Aqua & Gas 2: 8–9.
- [55] Hari R., Zobrist J. (2003): Trendanalyse der NADUF-Messresultate 1974 bis 1998. Eawag, Dübendorf: 200 S.
- [56] Eawag (Hrsg.) (2009): Wasserversorgung 2025 – Vorprojekt. Dübendorf: Eawag: 198 S.
- [57] Bundesamt für Umwelt BAFU (2009). Ergebnisse der Grundwasserbeobachtung Schweiz (NAQUA). Zustand und Entwicklung 2004–2006. Umwelt-Zustand Nr. 0903: 144 S.
- [58] Vonlanthen P., Bittner D., Hudson A. G., Young K. A., Müller R., Lundsgaard-Hansen B., Roy D., Di Piazza S., Largiader C. R., Seehausen O. (2012): Eutrophication causes speciation reversal in whitefish adaptive radiations. Nature 482: 357–363.
- [59] Wittmer I., Moschet Ch., Simovic J., Singer H., Stamm Ch., Hollender J., Junghans M., Leu Ch. (2014): Über 100 Pestizide in Fließgewässern. Programm NAWA SPEZ zeigt die hohe Pestizidbelastung der Schweizer Fließgewässer auf. Aqua & Gas 3: 32–43.
- [60] Munz N., Leu Ch., Wittmer I. (2012): Pestizidmessungen in Fließgewässern. Aqua & Gas 11: 32–41.
- [61] Andres N., Badoux A., Hegg Ch. (2013): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahr 2012: Rutschungen, Murgänge, Hochwasser und Sturzereignisse. Wasser Energie Luft 105(1): 55–61.
- [62] Badoux A., Andres N., Turowski J. M. (2013): Damage costs due to bedload transport processes in Switzerland. Natural Hazards Earth System Sciences Discussion 1: 4181–4222.
- [63] Rensch D. (2009). Mikroverunreinigungen im Abwasser und Trinkwasser. PUSCH Dossier «Neue Herausforderungen im Wasserschloss Schweiz»: 6–7.
- [64] Ruff M., Singer H., Ruppe S., Mazacek J., Dolf R., Leu Ch. (2013): 20 Jahre Rheinüberwachung: Erfolg und analytische Neuausrichtung in Weil am Rhein. Aqua & Gas 5: 16–25.
- [65] Freiburghaus M. (2009): Der Wasserbedarf der Schweizer Wirtschaft. Eine Erhebung des Schweizerischen Vereins des Gas- und Wasserfaches (SVGW): 43 S.
- [66] Jeannin P.-Y. (2014): SWISSKARST Final Report.
- [67] Bundesamt für Statistik (BFS) (2012): Umweltstatistik Schweiz in der Tasche 2012. Neuchâtel: 37 S.
- [68] Seitz N. J. (2013): Drainagen der Schweiz: Zeitlicher Verlauf, aktuelle Datenlage und Einfluss auf die Landschaftsentwicklung. Masterarbeit an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL: 88 S.
- [69] Zeh Weissmann H., Könitzer Ch., Bertiller A. (2009): Strukturen der Fließgewässer in der Schweiz. Zustand von Sohle, Ufer und Umland (Ökomorphologie). Ergebnisse der ökomorphologischen Kartierung. Stand: April 2009. Umwelt-Zustand 0926. Bundesamt für Umwelt, Bern: 100 S.
- [70] Gimmi U., Lachat T., Bürgi M. (2011). Reconstructing the collapse of wetland networks in the Swiss lowlands 1850–2000. Landscape Ecology 26: 1071–1083.
- [71] Konrad C. P., Olden J. D., Lytle D. A., Melis T. S., Schmidt J. C., Bray E. N., Freeman M. C., Gido K. B., Hemphill N. P., Kennard M. J., McMullen L. E., Mims M. C., Pyron M., Robinson C. T., Williams J. G. (2011). Large-scale flow experiments for managing river systems. BioScience 61(12): 948–959.
- [72] Bundesamt für Umwelt BAFU Webseite: (www.bafu.admin.ch/tiere/09262/, abgerufen am 16.12.13).
- [73] Gander-Kunz Y. (2013): Regionalisierung Kennzahlen Wassernutzung. Bericht zu den Auswertungen und Resultate. Hunziker Beta-tech-Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU.
- [74] Bundesamt für Umwelt BAFU (2012): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz im Sektor Wasserwirtschaft – Beitrag des Bun-

- desamtes für Umwelt zur Anpassungsstrategie des Bundesrates: 23 S.
- [75] Diem S., Schirmer M., von Rohr M. R., Kohler H.-P. E., Hering J. G., von Gunten U. (2013): Qualität des Uferfiltrats: Einfluss der klimabestimmten Variablen Temperatur und Abfluss. *Aqua & Gas* 11: 14–21.
- [76] Diem S., von Rohr R., Hering J. G., Kohler H.-P. E., Schirmer M., von Gunten U. (2013): NOM degradation during river infiltration: Effects of climate variables temperature and discharge. *Water Research* 47(17): 6585–6595.
- [77] Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW) (2007): Statistische Erhebungen der Wasserversorgungen in der Schweiz Betriebsjahr 2006. Zürich.
- [78] Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW) (2013): Statistische Erhebungen der Wasserversorgungen in der Schweiz Betriebsjahr 2012. Zürich.
- [79] Freiburghaus M. (2009): Wasserbedarf der Schweizer Wirtschaft. gwa: 1001–1009.
- [80] Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW) (2013). Der Trinkwasserkonsum in der Schweiz. Trinkwasserinformation 9.
- [81] Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW) (2013): Wasserverbrauch im Haushalt: Studie des SVGW in Zusammenarbeit mit dem BUWAL.
- [82] Caviezel-Padrutt E. (2008): Das Ende der dunklen Nächte: Geschichte und Geschichten aus den Anfangszeiten des elektrischen Lichtes in Graubünden. Bündner Monatsblatt, Chur: 165 S.
- [83] Bundesamt für Energie (BFE) (2013): Statistik der Wasserkraftanlagen der Schweiz (Stand 1. 1.2013), Ittingen.
- [84] Bundesamt für Energie (BFE) (2012): Wasserkraftpotenzial der Schweiz: Abschätzung des Ausbaupotenzials der Wasserkraftnutzung im Rahmen der Energiestrategie 2050: 22 S.
- [85] Wehren B., Schädler B., Weingartner R. (2010): Human Interventions. In: Bundi U.: *Alpine Waters. Handbook of Environmental Chemistry. Vol 5: Series Water Pollution*. Springer Verlag, Berlin: 71–92.
- [86] Hauenstein W. (2010): Der Schweizerische Wasserwirtschaftsverband 1910–2010, ein Portrait. *Verbandsschrift* 67: 156 S.
- [87] Pfammatter R. (2012). Wasserkraftpotenzial der Schweiz – eine Auslegeordnung. *Wasser Energie Luft* 104(1): 1–9.
- [88] Riedener E., Rusterholz H. P., Baur B. (2013): Effects of different irrigation systems on the biodiversity of species-rich hay meadows. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 164: 62–69.
- [89] Melliger R. L., Riedener E., Rusterholz H. P., Baur B. (2014): Do different irrigation techniques affect the small-scale pattern of soil characteristics and plant species in mountain hay meadows? *Plant Ecology* (submitted).
- [90] Riedener E., Rusterholz H. P., Baur B. (2014): Small-scale habitat diversity affects the plant species richness of differently irrigated hay meadows. (in preparation)
- [91] Graf R., Korner P. (2011): Veränderungen in der Kulturlandschaft und deren Brutvogelbestand im Engadin zwischen 1987/88 und 2009/10. Schweizerische Vogelwarte, Sempach.
- [92] Feichtinger L., Eilmann B., Buchmann N., Rigling A. (2014): Growth adjustments of conifers to drought and century-long irrigation in a xeric environment. (in preparation)
- [93] Rigling A., Bigler C., Eilmann B., Mayer P., Ginzler C., Vacchiano G., Weber P., Wohlgemuth T., Zweifel R., Dobbertin M. (2013): Driving factors of a vegetation shift from Scots pine to pubescent oak in dry Alpine forests. *Global Change Biology* 19: 229–240.
- [94] Schweizer R., Rodewald R., Liechti K., Knöpfel P. (2014): Des systèmes d'irrigation alpins entre gouvernance communautaire et étatique – Alpine Bewässerungssysteme zwischen Genossenschaft und Staat. Verlag Rüegger, Zürich/Chur. Reihe: Ökologie und Gesellschaft, Band 24.
- [95] Fuhrer J. (2010): Abschätzung des Bewässerungsbedarfs in der Schweizer Landwirtschaft. Abschlussbericht der Studie Bewässerungsbedarf in der Schweiz. Bundesamt für Landwirtschaft: 26 S.
- [96] Scheuchzer P., Walter F., Truffer B., Balsiger J., Chaix O., Kempfer T., Klinke A., Menzel S., Wehse H., Zysser A. (2012): Auf dem Weg zu einer integrierten Wasserwirtschaft. Synthese zum Projekt IWAGO – Integrated Water Governance with Adaptive Capacity in Switzerland. Projekt im Rahmen des NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung» des Schweizerischen Nationalfonds.
- [97] Weber M., Schild A. (2007). Stand der Bewässerung in der Schweiz: Bericht zur Umfrage 2006. BLW, Bern: 17 S.
- [98] Fuhrer J., Jasper K. (2009): Bewässerungsbedürftigkeit in der Schweiz. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz–Tänikon (ART).
- [99] Bundesamt für Statistik (BFS) (2012): Schweizer Landwirtschaft – zwischen Moderne und Tradition: Landwirtschaftliche Betriebszählung: Zusatzerhebung 2010. Medienmitteilung Nr. 0350-1203-20.
- [100] Bichsel Bigler Partner AG (2013): Teilbericht II zur landwirtschaftlichen Strukturverbesserung Seeland West – Landwirtschaftliche Planung: 17 S.
- [101] Fatichi S., Zeeman M. J., Fuhrer J., Burlando P. (2014): Ecohydrological effects of management on subalpine grasslands: from local to catchment scale. *Water Resources Research* 50: 148–164.
- [102] Spiess E., Prasuhn V., Stauffer W. (2011): Einfluss der Winterbegrünung auf Wasserhaushalt und Nitratauswaschung. 14. Gumpensteiner Lysimetertagung: 149–154.
- [103] Bundesamt für Statistik (BFS) (2013): Land Use in Switzerland: Results of the Swiss land use statistics. Neuchâtel: 23 S.
- [104] Maurer M., Chawla F., von Hirn J., Stauer Ph. (2012): Abwasserentsorgung 2015 in der Schweiz. Modulbericht. Eawag, Dübendorf.
- [105] Bannick C., Engelmann B., Fendler R., Frauen-

- stein F., Ginzky H., Hornemann C., Ivonon O., Kirschbaum B., Penn-Bressel G., Rechenberg J., Richter S., Roy L., Wolter R. (2008): Grundwasser in Deutschland. Reihe Umweltpolitik. Bundesministerium für Umwelt, Berlin: 71 S.
- [106] Hürlimann J. (2011): Auswirkungen von Strassenabwasser auf Oberflächengewässer. *gwa* 11: 793–801.
- [107] Braun Ch., Gälli R., Kammer Ch. (2013): Belastung durch Gleisabwasser: Emissionen von Mikroverunreinigungen aus dem Bahnverkehr in Fliessgewässer. *Aqua & Gas* 7/8: 40–49.
- [108] Freiburghaus M. (2012): Statistische Übersicht über die Wasserversorgung der Schweiz 2010. *Aqua & Gas* 3: 54–59.
- [109] Kind E., Müller E., Vogt L., Suter B. (2006): Kieshaushalt Schweiz: Eine ökonomische Betrachtung. Semesterarbeit ETH Zürich.
- [110] Matousek F. (2011): Die Gefährdung von nutzbarem Grundwasser durch die Kiesgewinnung in der Schweiz. Rechtlicher Rahmen, Erfahrungen und Risikobeobachtungen. Studie Dr. von Moos AG: 5 S.
- [111] OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050. OcCC – Organe consultative sur les changements climatiques, ProClim. Bern: 168 S.
- [112] Bundesamt für Statistik (BFS) (2013): Tourismusstatistik 2012. Neuchâtel: 60 S.
- [113] Steiger R. (2010): The impact of climate change on ski season length and snowmaking requirements in Tyrol, Austria. *Climate Research* 43: 251–262.
- [114] Seilbahnen Schweiz (2012): Fakten und Zahlen zur Schweizer Seilbahnbranche: 21 S.
- [115] Rixen Ch., Teich M., Lardelli C., Gallati D., Pohl M., Pütz M., Bebi P. (2011): Winter tourism in the Alps: An assessment of resource consumption, snow reliability, and future snowmaking potential. *Mountain Research and Development* 31(3): 229–236.
- [116] Stöckli V. (2012): Wasserwirtschaft in Davos – eine kurze Bilanz ihrer Nachhaltigkeit. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Alpine Schnee- und Wasserressourcen gestern, heute, morgen. *Forum Wissen* 2012: 37–42.
- [117] de Jong C., Barth T. (2008): Challenges in Hydrology of Mountain Ski Resorts under Changing Climatic and Human Pressures. *ESA Proceedings (Ed.), Surface Water Storage and Runoff: Modeling, In-Situ Data and Remote Sensing*, Geneva.
- [118] de Jong C., Masure P., Barth T. (2008): Challenges of alpine catchment management under changing climatic and anthropogenic pressures. 4th Biennial Meeting of the iEMS.
- [119] Wemple B., Shanley J., Denner J., Ross D., Mills K. (2007): Hydrology and water quality in two mountain basins of the northeastern US: assessing baseline conditions and effects of ski area development. *Hydrological Processes* 21(12): 1639–1650.
- [120] Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) (2002): Kunstschnee und Schneezusätze: Eigenschaften und Wirkungen auf Vegetation und Boden in alpinen Skigebieten. Davos: 11 S.
- [121] Finger D., Hugentobler A., Huss M., Voinesco A., Wernli H., Fischer D., Weber E., Jeannin P.-Y., Kauzlaric M., Wirz A., Vennemann T., Hüsler F., Schädler B., Weingartner R. (2013): Identification of glacial melt water runoff in a karstic environment and its implication for present and future water availability. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 3261–3277.
- [122] Stöckli V., Rixen Ch., Wipf S. (2002): Zusammenfassung des Schlussberichts «Kunstschnee und Schneezusätze: Eigenschaften und Wirkungen auf Vegetation und Boden in alpinen Skigebieten». SLF Davos.
- [123] Bundesamt für Umwelt BAFU (ehem. BUWAL) (1997). SNOMAXTM Mitteilung zur Stoffverordnung (StoV), Nr. 28.
- [124] Schwörer C., Rhyner H., Rixen C., Schneebeil M., Iten B. (2007): Chemische Pistenpräparation – Grundlagenbericht. Davos, Eidgenössisches Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF. vi: 69 S.
- [125] Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG) (2002): Der Wasserzins. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 3. Bern: 28 S.
- [126] Moser D., Pfammatter R., Ribi F., Zysset A. (2009): Überblick über finanzielle Kenngrößen der Schweizer Wasserwirtschaft. Expertenbericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, BAFU. Ernst Basler + Partner. Zollikon: 18 S.
- [127] Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW) (2012): Statistische Erhebungen der Wasserversorgungen in der Schweiz. Betriebsjahr 2011. W15001. Zürich: 35 S.
- [128] Poldervaart P. (2012): Abwasser – Finanzieller Klärungsbedarf. *Umwelt* 2: 12–15.
- [129] Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2012): Mikroverunreinigungen: Spezialfinanzierung für ARA-Ausbau in der Vernehmlassung. (www.bafu.admin.ch/dokumentation/medieninformation/00962/index.html?lang=de&msg-id=44263, abgerufen am 7.4.2014).
- [130] Rebetez M., Reinhard M. (2007): Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004. *Theoretical and Applied Climatology* 91: 27–34.
- [131] Beniston M. (2012): Impacts of climate change on water and associated economic activities in the Swiss Alps. *Journal of Hydrology* 412–413: 291–296.
- [132] Rajczak J., Pall P., Schär Ch. (2013): Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118: 1–17.
- [133] CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate and OcCC, Zurich, Switzerland: 88 S.
- [134] OcCC (2008): Das Klima ändert – was nun? Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz. OcCC – Organe consultative sur les changements climatiques. Bern: 47 S.

- [135] IPCC (2007): Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, USA: 852 S.
- [136] Schär Ch., Vidale P. L., Lüthi D., Frei C., Häberli C., Liniger M. A., Appenzeller C. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427: 332–336.
- [137] Beniston M., Stephenson D. B. (2004): Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change* 44: 1–9.
- [138] Bosshard T., Ewen T., Kotlarski S., Schär Ch. (2009): The annual cycle of the climate change signal – An improved method for use in impact studies. *Geophysical Research Abstracts* 11, EGU: 2009–7095.
- [139] Beniston M., Stoffel M., Hill M. (2011): Impacts of climatic change on water and natural hazards in the Alps: Can current water governance cope with future challenges? Examples from the European «ACQWA» project. *Environmental Science & Policy* 871: 10 S.
- [140] Frei Ch., Schöll R., Fukutome J., Schmidli J., Vidale P. L. (2006): Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 111 (D6): 1–22.
- [141] Steger C. H., Kotlarski S., Jonas T., Schär Ch. (2012): Alpine snow cover in a changing climate: a regional climate model perspective. *Climate Dynamics* 41: 735–754.
- [142] Gander B. (2009): Klimaänderung und Wasserversorgung: Information und Anpassungsstrategien. *gwa* 4: 241–249.
- [143] Zappa M., Luzi B., Fundel F., Jörg-Hess S. (2012): Vorhersage und Szenarien von Schnee- und Wasserressourcen im Alpenraum. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Alpine Schnee- und Wasserressourcen gestern, heute, morgen. *Forum Wissen* 2012: 19–27.
- [144] Beniston M., Keller F., Koffi B., Goyette S. (2003): Estimate of snow accumulation and volume in the Swiss Alps under changing climatic conditions. *Theoretical and Applied Climatology* 76: 125–140.
- [145] Schmidli J., Frei C. (2005): Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. *International Journal of Climatology* 25(6): 753–771.
- [146] Frei Ch., Schär Ch. (2001): Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in Alpine region. *Journal of Climate* 14: 1568–1584.
- [147] Schädler B., Frei Ch., Grebner D., Willi H.-P. (2007): Grundlagen zum Klima. *Wasser Energie Luft* 1: 58–60.
- [148] Hubacher R., Schädler B. (2010): Wasserhaushalt grosser Einzugsgebiete im 20. Jahrhundert. *Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES)*.
- [149] Calanca P., Roesch A., Jasper K., Wild M. (2006): Global warming and the summertime evapotranspiration regime in the Alpine region. *Climate Change* 79: 65–78.
- [150] Schattan P., Zappa M., Lischke H., Bernhard L., Thürig E., Diekkrüger B. (2013): An approach for transient consideration of forest change in hydrological impact studies. *Climate and Land Surface Hydrology. Proceedings of H01, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden. IAHS Publications* 359: 311–319.
- [151] Wipf S., Rixen C. (2010): Winter climate change in arctic and alpine ecosystems: a review of snow manipulation experiments. *Polar Research* 29: 95–109.
- [152] Frey H., Haeberli W., Linsbauer A., Huggel C., Paul F. (2010): A multi-level strategy for anticipating future glacier lake formation and associated hazard potentials. *Hazards and Earth System Sciences* 10(2): 339–352.
- [153] Haeberli W., Schleiss A., Linsbauer A., Künzler, Bütler M. (2012): Gletscherschwund und neue Seen in den Schweizer Alpen: Perspektiven und Optionen im Bereich Naturgefahren und Wasserkraft. *Wasser Energie Luft* 2: 93–102.
- [154] Linsbauer A., Paul F., Haeberli W. (2012): Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop: Application of a robust approach. *Journal of Geophysical Research* 117: 1–17.
- [155] Malard F. (2003): Groundwater-Surface Water Interactions. In: Ward J. V., Uehlinger U. (eds.). *Ecology of a Glacial Floodplain. Kluwer Academic Publishers: 37–56*.
- [156] Freimann R., Bürgmann H., Findlay S. E. G., Robinson C.T. (2013): Bacterial structures and ecosystem functions in glaciated floodplains: contemporary states and potential future shifts. *The International Society for Microbial Ecology Journal: 1–13*.
- [157] Lods-Crozet B., Oertli B., Robinson C.T. (2012): Long-term patterns of chironomid assemblages in a high elevation stream/lake network (Switzerland) – Implications to global change. *Proceedings of the 18th International Symposium on Chironomidae – Fauna norvegica Vol. 31: 71–85*.
- [158] Zah R., Maisch M., Uehlinger U., Rothenbühler C. (2003): Glacial History and Floodplain Evolution. In: Ward J. V., Uehlinger U. (eds.). *Ecology of a Glacial Floodplain. Kluwer Academic Publishers: 17–36*.
- [159] Tobler D., Kull I., Hählen N. (2012): Gefahrenmanagement der Murgänge im Spreitgraben, Gutannen. *Swiss Bulletin für angewandte Geologie* 17(2): 53–61.
- [160] Kipfer R., Livingstone D. M. (2008): Wasserressourcen und Klimawandel. *Eawag News* 65d/September 2008: 8–11.
- [161] Kilchmann A. (2009): Strategische Herausforderungen für Wasserversorgungen. *PUSCH Dossier «Neue Herausforderungen im Wassertschloss Schweiz»: 8–9*.
- [162] Köplin N., Schädler B., Viviroli D., Weingartner R. (2014): Seasonality and magnitude of

- floods in Switzerland under future climate change. *Hydrological Processes* 28: 2567–2578.
- [163] Haeberli W., Hohmann R. (2008): Climate, glaciers and permafrost in the Swiss Alps 2050: scenarios, consequences and recommendations. In: 9th International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska, 29 June 2008 – 3 July 2008: 607–612.
- [164] Figura S., Livingstone D., Kipfer R. (2013). Competing controls on groundwater oxygen concentrations revealed in multidecadal timeseries from riverbank filtration sites. *Water Resources Research* 49: 1–16.
- [165] von Rohr M. R., Hering J. G., Kohler H.-P. E., von Gunten U. (2014): Column studies to assess the effects of climate variables on redox processes during riverbank infiltration. *Water Research* (submitted).
- [166] Huss M., Farinotti D., Bauder A., Funk M. (2008): Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. *Hydrological Processes* 22(19): 3888–3902.
- [167] Huss M., Usselman S., Farinotti D., Bauder A. (2010): Glacier mass balance in the South-Eastern Swiss Alps since 1900 and perspectives for the future. *Erdkunde* 64(2): 119–140.
- [168] Köplin N., Schädler B., Viviroli D., Weingartner R. (2010): How does climate change affect mesoscale catchments in Switzerland? – A framework for a comprehensive assessment. *Advances in Geosciences* 27: 111–119.
- [169] Huss M. (2011): Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe. *Water Resources Research* 47, W07511.
- [170] Karlsson I. B., Sonenborg, Jensen K. H., Refsgaard J. C. (2013): Evaluating the influence of long-term historical climate change on catchment hydrology – using drought and flood indices. *Hydrological and Earth System Sciences* 10: 2373–2428.
- [171] Bundesamt für Umwelt BAFU (2012): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz: Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder. Erster Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012. Bern: 64 S.
- [172] Köplin N., Schädler B., Viviroli D., Weingartner R. (2013): Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change. *Hydrological Processes* 28(4): 2567–2578.
- [173] Hunkeler D. (2014): Groundwater resources under changing climatic conditions. Final Report for NRP 61 Sustainable Water Management. Neuchâtel, 18 S.
- [174] Finger D., Heinrich G., Gobiet A., Bauder A. (2012): Projections for future water resources and their uncertainty in a glacierized catchment in the Swiss Alps and the subsequent effects on hydropower production during the 21st century. *Water Resources Research* 48, W02521.
- [175] Riedl C., Peter A. (2013): Timing of brown trout spawning in Alpine rivers with special consideration of egg burial depth. *Ecology of Freshwater Fish* 22(3): 384–397.
- [177] Weingartner R., Barben M., Spreafico M. (2003). Floods in mountain areas – an overview based on examples from Switzerland. *Journal of Hydrology* 282: 10–24.
- [178] Wehren B., Weingartner R., Schädler B., Viviroli D. (2010): General characteristics of alpine waters. In: Handbook of Environmental Chemistry 6. Bundi U. (ed). Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg: 17–58.
- [179] Jeannin P.-Y. (2014): SWISSKARST Final Report for NRP 61 «Sustainable Water Management». ISSKA.
- [180] Spreafico M., Grasso A. (2013): Feststoffbeobachtung in der Schweiz. In: Spreafico M., Viviroli D. (Hrsg). *Ausgewählte Beiträge zur Abschätzung von Hochwasser und Feststofftransport in der Schweiz. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz* 40: 25–31.
- [181] Rickenmann D., Heimann F., Böckli M., Turowski J., Badoux A., Bieler C. (2014): Geschiebetransport-Simulationen mit sedFlow in zwei Gebirgsflüssen in der Schweiz. (submitted)
- [182] Heimann F. U. M., Rickenmann D., Böckli M., Badoux A., Turowski J. M., Kirchner J. W. (2014): Recalculation of bedload transport observations in Swiss mountain rivers using the model sedFlow. *Earth Surface Dynamics*. (submitted)
- [183] Rickenmann D., Heimann F. U. M., Turowski J. M., Bieler C., Böckli M., Badoux A. (2014): Simulation of bedload transport in the Hasliaare Swiss mountain river in view of increased sediment input due to climate change. Submitted to the International Conference on River Flow 2014, September 3–5 2014, EPFL, Lausanne.
- [176] Junker J., Heimann F. U. M., Hauer Ch., Turowski J., Rickenmann D., Zappa M., Peter A. (2014): Assessing the impact of climate change on brown trout (*Salmo trutta fario*) recruitment. *Hydrobiologia* (submitted).
- [184] Stähli M., Ritter M. (2013): Hydrologische Trends in kleinen voralpinen Einzugsgebieten (Poster). Tag der Hydrologie, 2. – 4. April 2013, Bern.
- [185] Meyer R., Schädler B., Viviroli D., Weingartner R. (2011): Klimaänderung und Niedrigwasser – Auswirkungen der Klimaänderung auf die Niedrigwasserverhältnisse im Schweizer Mittelland für 2021–2050 und 2070–2099. Schlussbericht CCHydro – Modul 4, Universität Bern, Geographisches Institut, Bern.
- [186] Notter B., Staub E. (2009): Lebensraum der Bachforelle um 2050: Schätzung anhand eines GIS-basierten Modells. *gwa* 1: 39–44.
- [187] Dokulil M. T. (2013): Predicting summer surface water temperatures for large Austrian lakes in 2050 under climate change scenarios. *Hydrobiologia*. DOI 10.1007/s10750-013-1550-5

- [188] Livingstone D. M. (2004): Eisbedeckung von Seen und Flüssen: Klimatrends und historische Aufzeichnungen. *Eawag News* 58: 19–22.
- [189] Robinson C. T., Oertli B. (2009). Long-term Biomonitoring of Alpine Waters in the Swiss National Park. *Eco.mont* 1(1): 23–34.
- [190] Delsontro T., McGinnis D. F., Sobek S., Ostrovsky I., Wehrli B. (2010): Extreme methane emissions from a Swiss hydropower reservoir: Contribution from bubbling sediments. *Environmental Science & Technology* 44: 2419–2425.
- [191] Xuan L., Zhongwei G., Zunwei K., Supen W., Yiming L. (2011): Increasing potential risk of global aquatic invader in Europe in contrast to other continents under future climate change. *PLoS ONE* 6(3).
- [192] Sorte C. J. B., Ibáñez I., Blumenthal D. M., Molinari N. A., Miller L. P., Grosholz E. D., Diez J. M., D'Antonio C. M., Olden J. D., Jones S. J., Dukes J. S. (2013): Poised to prosper? A cross-system comparison of climate change effects on native and non-native species performance. *Ecology Letters* 16: 261–270.
- [193] Ofenböck G. (2013): Aquatische Neobiota in Österreich. Stand 2013. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion VII Wasser, Wien.
- [194] Lienert J., Scholten L., Egger Ch., Maurer M. (2014): Structured decision-making for sustainable water infrastructure planning and four future scenarios. *EURO Journal on Decision Processes (EJDP)*, Special Issue on Environmental Decision Making: in press
- [195] Bundesamt für Statistik (BFS) (2010): Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung der Schweiz 2010–2060. Neuchâtel. 84 S.
- [196] Piguet E. (2013): Umweltveränderungen und Migration in Entwicklungsländern. *Fact Sheet Scnat*, Bern, 4 S.
- [197] Aeberhard J. (2012): Massvoller Ausbau der Pumpspeicherung ist nötig. *PUSCH Dossier «Die Rolle der Wasserkraft in der Energiestrategie 2050»*: 14–15.
- [198] Strahm I., Munz N., Leu Ch., Wittmer I., Stamm Ch. (2013): Landnutzung entlang des Gewässernetzes: Quellen für Mikroverunreinigungen. *Aqua & Gas* 5: 36–44.
- [199] Leitinger G., Tasser E., Newesely Ch., Obojes N., Tappeiner U. (2010): Seasonal dynamics of surface runoff in mountain grassland ecosystems differing in land use. *Journal of Hydrology* 385: 95–104.
- [200] Inauen N., Körner Ch., Hiltbrunner E. (2013): Hydrological consequences of declining land use and elevated CO₂ in alpine grassland. *Journal of Ecology* 101: 86–96.
- [201] Alewell C., Bebi P. (2010): Forest Development in the European Alps and Potential Consequences on Hydrological Regime. *Ecological Studies* 212: 111–126.
- [202] Mueller M. H., Weingartner R., Alewell C. (2013): Importance of vegetation, topography and flow paths for water transit times of base flow in alpine headwater catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 1661–1679.
- [203] Lange B., Lüscher P., Germann P. F. (2012): Wurzeln erhöhen das Wasserspeichervermögen. *Wald und Holz* 10: 24.
- [204] Hohenwallner D. et al. (2011): Water Management in a Changing Environment: Strategies against Water Scarcity in the Alps. *Outcomes and Recommendations from the Alp-Water-Scarce Project 2008–2011*. 74 S.
- [205] Raetzo H., Lateltin O. (2003): Massenbewegungen: Rutschungen, Fels- und Bergstürze. In: OcCC (Hrsg.). *Extremereignisse und Klimaänderung: Wissensstand und Empfehlungen des OcCC*. Bern: 73–76.
- [206] Gaudard L., Romero F. (2013): The future of hydropower in Europe: Interconnecting climate, markets and policies. *Environmental Science and Policy* 1276.
- [207] Bundesamt für Energie (BFE) (2013): Elektrizitätsstatistik 2012. (www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00630/index.html?lang=de&dossier_id=00768, abgerufen am 4.2.2014).
- [208] Akademien der Wissenschaften Schweiz (2012): *Zukunft Stromversorgung Schweiz – Kurzfassung*. Bern: 39 S.
- [209] Hänggi P., Weingartner R., Balmer M. (2011): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung in der Schweiz 2012–2050 – Hochrechnung. *Wasser Energie Luft* 103(4): 300–307.
- [210] Bundesrat (2013): *Botschaft zum 1. Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050*, Bern.
- [211] Volken T. (2012): Die Wende in der Energiestrategie. *PUSCH Dossier «Die Rolle der Wasserkraft in der Energiestrategie 2050»*: 4–5.
- [212] Akademien der Wissenschaften Schweiz (2012): *Lösungsansätze für die Schweiz im Konfliktfeld erneuerbare Energien und Raumnutzung – Kurzfassung*. Bern: 19 S.
- [213] Pfammatter R. (2013): *Workshop-Beitrag zu «Hochgebirge: Herausforderungen mit neuen Landschaften»*. 5. Symposium Anpassung an den Klimawandel 30.8.2013, Bern. (www.proclim.ch/4dcgi/proclim/all/Event?2830, abgerufen am 4.2.2014).
- [214] Bundesamt für Energie (BFE) (2011): *Energieperspektiven 2050 – Abschätzung des Ausbaupotenzials der Wasserkraftnutzung unter neuen Rahmenbedingungen*. *Faktenblatt* 10.6.2011.
- [215] Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) 2011. *Klimastrategie Landwirtschaft – Klimaschutz und Anpassungen an den Klimawandel für eine nachhaltige Schweizer Land- und Ernährungswirtschaft*. Bern: 46 S.
- [216] Trnka M., Bartošová L., Schaumberger A., Ruget F., Eitzinger J., Formayer H. (2011): Climate Change and Impact on European Grasslands. *Grassland Science in Europe*: 39–51.

- [217] Fuhrer J., Tendall D., Klein T., Lehmann N., Holzkämper A. (2013): Water demand in Swiss Agriculture – Sustainable Adaptive Options for Land and Water Management to Mitigate Impacts of Climate Change. ART Schriftenreihe 19: 56 S.
- [218] Schneider F. (2013): Exploring water governance arrangements in the Swiss Alps from a perspective of adaptive capacity. Mountain Research and Development 33(3): 225–233.
- [219] Bauder A., Huss M., Gabbi J. (2014). Future glacier evolution in Switzerland. (in preparation).
- [220] Farinotti D., Usselman S., Huss M., Bauder A., Funk M. (2012): Runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. Hydrological Processes 26(13): 1909–1924.
- [221] Farinotti D., Bauder A., Huss M., Juvet G., Widmer F., Boes R. (2011): Future glacier evolution and impact on the runoff regime in the catchment of alpine reservoirs: The Aletsch area, Switzerland. In: Dams in Switzerland – Source for Worldwide Swiss Dam Engineering, Swiss Committee on Dams: 283–289.
- [222] Gaudard L., Gilli M., Romerio F. (2013): Climate change impacts on hydropower management. Water Resources Management 27: 5143–5156.
- [223] Pflieger G., Tonka L. (2013): Assigning, delimiting, synchronising: turning scientific narratives into public problems in the environmental field. Final Report, September 2013.
- [224] Interview mit Fuhrer J. (2012): «Wäre die Wassermenge kontingentiert, würde der Verbrauch deutlich zurückgehen». Aqua & Gas: 10–11.
- [225] Fuhrer J. (2012): Bewässerungsbedarf und Wasserangebot unter heutigen und künftigen Klimabedingungen. Agroscope Reckenholz Tänikon ART.
- [226] Flury C., Zimmermann A., Mack A. (2012): Auswirkungen Agrarpolitik 2014–2017 auf die Berglandwirtschaft. Bericht Forschungsprogramm AgriMontana. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz Tänikon ART, Ettenhausen.
- [227] Huber R., Iten A., Briner S. (2012): Weiterentwicklung des Direktzahlungssystems: Auswirkungen auf die Landnutzung im Berggebiet. Agrarforschung Schweiz 3 (7–8): 354–359.
- [228] Reynard E., Graefe O., Rist S., Schaedler B., Schneider F., Weingartner R. (2013): MONTAN-AQUA. Anticiper le stress hydrique dans les Alpes – Scénarios de gestion de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre (Valais). Résultats finaux et recommandations. Publication Gewässerkunde 600, Bern.
- [229] Fuhrer J., Calanca P. (2012): Klimawandel beeinflusst das Tierwohl bei Milchkühen. Agrarforschung 3: 132–139.
- [230] Brändli U. B. (Hg.) (2010): Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Bern.
- [231] Elkin C., Gutiérrez A. G., Leuzinger S., Manusch C., Temperli Ch., Rasche L., Bugmann H. (2013): A 2°C warmer world is not safe for ecosystem services in the European Alps. Global Change Biology 19(6): 1827–1840.
- [232] Lange B., Lüscher P., Germann P. F., Thormann J.-J., Zürcher K. (2012): Hochwasserschutzwirkung von Tannen-Fichten-Wäldern. Wald und Holz 11: 31–34.
- [233] Steiger R., Stötter J. (2013): Climate Change impact assessment of ski tourism in Tyrol. Tourism Geographies 15(4): 577–600.
- [234] Abegg B. et al. (2007): Climate change impacts and adaptation in winter tourism. In: Agrawala Shardul (Hg.). Climate change in the European Alps: Adapting winter tourism and natural hazards management. OECD-Report, Paris.
- [235] Pütz M., Gallati D., Kytzia S., Elsasser H., Lardelli C., Teich M., Waltert F., Rixen Ch. (2011): Winter tourism, climate change, and snowmaking in the Swiss Alps: Tourists' attitudes and regional economic impacts. Mountain Research and Development 31(4): 357–362.
- [236] Abegg B. (2012): Natürliche und technische Schneesicherheit in einer wärmeren Zukunft. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Alpine Schnee- und Wasserressourcen gestern, heute, morgen. Forum Wissen 2012: 29–35.
- [237] Göggel W. (2012): Revitalisierung Fließgewässer. Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug 1208: 42 S.
- [238] Bundesamt für Umwelt BAFU (2011): Erläuternder Bericht zur Parlamentarischen Initiative Schutz und Nutzung der Gewässer (07.492) – Änderung der Gewässerschutz-, Wasserbau-, Energie- und Fischereiverordnung. Bern: 40 S.
- [239] Hartmann D., Meylan B. (2013): Engpässen rechtzeitig vorbeugen: Wichtigste Ergebnisse der Studie «Wasserversorgung 2015». Aqua & Gas 9: 16–24.

Dank

Die vorliegende Thematische Synthese wurde ermöglicht durch die Bereitschaft zahlreicher Forschenden und Fachpersonen aus der Praxis, Inhalte beizutragen und zu reflektieren. Dazu gehören die Mitglieder der NFP 61-Leitungsgruppe und des Programmbeirates, die NFP 61-Projektteams und die Verantwortlichen der anderen Synthesen: Klaus Lanz (TS2), Sabine Hoffmann (TS3) und Franziska Schmid (TS4). Insbesondere ist der Beitrag von Bruno Schädler und Irmi Seidl zu erwähnen. Daneben haben folgende Personen die Schreib- und Recherchearbeiten unterstützt: Jörg Balsiger, Marco Baumann, Claudia Bieler, Michael Bütler, David Finger, Matthias Freiburghaus, Ludovic Gaudard, Tobias Jonas, Felix Kienast, Manuel Kunz, Karina Liechti, Arnauld Malard, Jan Mazacek, Andreas Rigling, Christopher Robinson, Ursula Schönenberger, Jan Seibert, Patrick Stierli, Peter Waldner und viele mehr.

Anhang

Was ist das NFP 61?

Die Nationalen Forschungsprogramme NFP sollen wissenschaftlich fundierte Beiträge zur Lösung dringender Probleme von nationaler Bedeutung leisten. Sie erfolgen im Auftrag des Bundesrates und werden vom Schweizerischen Nationalfonds durchgeführt. Die NFP sind in der Abteilung IV «Programme» angesiedelt (www.snf.ch).

Das NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung» stellt wissenschaftlich fundierte Grundlagen sowie Werkzeuge, Methoden und Strategien zur Bewältigung der künftigen Herausforderungen in der Wasserwirtschaft bereit. Es verfügte über einen Finanzrahmen von 12 Millionen Franken und die Forschung dauerte von 2010 bis 2013. Sowohl in seinen Vorgaben wie auch bei der Projektevaluation und -durchführung wurden Praxisrelevanz und Einbezug der Akteure stark gewichtet. Nach einem zweistufigen Eingabeverfahren mit internationaler Expertisierung wurden 16 Projekte bewilligt (www.nfp61.ch).

Die 16 Forschungsprojekte des NFP 61

In den Forschungsprojekten wurden die Auswirkungen der zu erwartenden Änderungen des Klimas, der Gesellschaft und der Ökonomie auf den Wasserhaushalt, die hydrologischen Extreme, die Wasserqualität und die Gewässerbiologie mit den damit verbundenen Fragen der Wassernutzung untersucht.

AGWAM: Wasser wird auch für die Schweizer Landwirtschaft knapp

Prof. Dr. Jürg Fuhrer

Steigende Temperaturen und sinkende Niederschläge im Sommer werden dazu führen, dass die Landwirtschaft vermehrt auf Bewässerung angewiesen ist, gleichzeitig aber weniger Wasser zur Verfügung steht. Ausgehend von verschiedenen Szenarien für Klima, Preise und Politik wurde mithilfe von Modellen der Handlungsspielraum der Landwirtschaft ausgeleuchtet. Das Projekt liefert Empfehlungen und Anpassungsstrategien, um negative Umweltfolgen zu vermindern und Konflikte zu vermeiden. ▶ [S. 24](#)

DROUGHT-CH: Sind wir auf Trockenperioden vorbereitet?

Prof. Dr. Sonia Seneviratne

In Zukunft ist mit häufigeren Trockenperioden und Hitzewellen zu rechnen. Das Projekt untersuchte die Risiken von Trockenperioden in der Schweiz und wie man diese vorhersagen kann. Als Basis für Anpassungsstrategien wurde ein Prototyp für eine Informationsplattform «Trockenheit» entwickelt. ▶ [S. 14](#)

FUGE: Gletscherrückgang – noch genügend Wasser für die Wasserkraftproduktion?

Prof. Dr. Martin Funk

Mit verbesserten Methoden wurde das Schmelzen von 50 Schweizer Gletschern untersucht und modelliert. Die bis ins Jahr 2100 prognostizierten Abflüsse sind für Kraftwerke relevant. Zusammen mit Wasserkraftfirmen wurden Anpassungsstrategien für den Betrieb von Wasserkraftwerken entwickelt. ▶ [S. 50](#)

GW-TEMP: Einfluss des Klimawandels auf das Grundwasser

Dr. David M. Livingstone

Durch höhere Wassertemperaturen kann die Grundwasserqualität beeinträchtigt werden. Historische Daten wurden analysiert, um den Einfluss des Temperaturanstiegs auf die Grundwasserqualität abzuschätzen. Mit statistischen Modellen wurden die zukünftigen Grundwassertemperaturen prognostiziert. ▶ [S. 40](#)

GW-TREND: Grundwasserknappheit durch Klimawandel?

Prof. Dr. Daniel Hunkeler

Bei zunehmender Trockenheit kann sich die Menge des vorhandenen Grundwassers verringern. Die Resultate helfen besonders empfindlich auf Klimaänderung reagierende Grundwasserleiter zu identifizieren, Massnahmen zu planen und Überwachungsprogramme zu entwickeln. ▶ [S. 42](#)

HYDROSERV: Nachhaltige Sicherung von Wasserressourcen

Prof. Dr. Adrienne Grêt-Regamey

Hydrologische Ökosystemleistungen wie Trinkwasserversorgung, Hochwasserregulierung, Erholung und Wasserkraftnutzung können durch den Klimawandel unter Druck geraten. Auf der Basis eines verbesserten Verständnisses für die hydrologischen Ökosystemleistungen wurden Massnahmen für die Politik formuliert.

IWAGO: Auf dem Weg zu einer integrativen Wasserpolitik

Prof. Dr. Bernhard Truffer

An Beispielen von verschiedenen Regionen und Kantonen wird gezeigt, welche Regelungsstrukturen und Prozesse eine ganzheitlichere und partnerschaftlichere Vorgehensweise in der Schweizer Wasserwirtschaft und Synergiepotenziale zwischen den Sektoren fördern. Diese Synergiepotenziale wurden in Zusammenarbeit mit Stakeholdern identifiziert. Daraus wurden Strategien für die künftige Entwicklung des Wassermanagements in der Schweiz abgeleitet. ▶ [S. 24](#)

IWAQA: Integriertes Management der Wasserqualität von Fliessgewässern

Dr. Christian Stamm

Gesellschaftliche und wirtschaftliche Veränderungen sowie Änderungen des Klimas wirken sich auf die Gewässerqualität unserer Fliessgewässer aus. Das Projekt bietet Entscheidungshilfen, die negative Auswirkungen auf den ökologischen Zustand der Fliessgewässer abschätzen und minimieren helfen.

▶ [S. 50](#)

MONTANAQUA: Wasserbewirtschaftung in Zeiten von Knappheit und globalem Wandel

Prof. Dr. Rolf Weingartner

Durch die Veränderungen des Wasserangebots und des Wasserverbrauchs durch den Klimawandel und den sozioökonomischen Wandel wird eine konfliktfreie Wasserverteilung insbesondere in trockenen Regionen schwieriger. Das Projekt zeigt am Beispiel der Untersuchungsregion Crans-Montana-Sierre im Wallis, wie in Zusammenarbeit mit den lokalen Verantwortlichen und interessierten Personen Lösungen für eine optimale und ausgewogene Bewirtschaftung und Verteilung der Wasserressourcen ermittelt werden können.

▶ [S. 42 und 50](#)

NELAK: Seen als Folge schmelzender Gletscher: Chancen und Risiken

Prof. Dr. Wilfried Haeberli

Wenn Gletscher schmelzen, können neue Seen entstehen. Um Chancen und Risiken im Umgang mit neuen Seen abzuschätzen, wurden relevante Aspekte der Naturgefahren, der Wasserkraft, des Tourismus und des Rechts untersucht und mit Stakeholdern diskutiert.

▶ [S. 40](#)

RIBACLIM: Von Flüssen gespeistes Trinkwasser: Noch sauber genug?

Prof. Dr. Urs von Gunten

Trinkwasser stammt zu einem Drittel aus Flusswasser, das über die Flussufer ins Grundwasser versickert. Die Prozesse in diesen Uferzonen sind für sauberes Trinkwasser sehr wichtig. Untersucht wurden klimabedingte Veränderungen dieser Infiltrationsprozesse und der Einfluss auf die Grundwasserqualität mithilfe von Feld- und Laborexperimenten. ▶ [S. 40](#)

SACFLOOD: Wie verändert sich die Hochwassergefahr in den Alpen?

Dr. Felix Naef

Durch stärkere Niederschläge dürften Hochwasser zukünftig häufiger auftreten und stärker ausfallen. Damit die Hochwassergefahr besser abgeschätzt und zielgerichtete Massnahmen ergriffen werden können, wurden Zusammenhänge zwischen Niederschlag, der Speicherkapazität des Bodens und dem Abflussverhalten untersucht. ▶ [S. 14](#)

SEDRIVER: Mehr Hochwasser – mehr Sedimenttransport – weniger Fische?

Dr. Dieter Rickenmann

Klimaänderungen verändern den Transport von Sedimenten in Gebirgsbächen. Die Forschenden entwickelten ein Modell, das den Geschiebetransport in Gebirgsflüssen simuliert. Es wurde auch untersucht, welche Auswirkungen die vom Fluss transportierten Sedimente auf die Entwicklung von Bachforellen haben. ▶ [S. 42](#)

SWIP: Langfristige Planung nachhaltiger Wasserinfrastrukturen

Dr. Judit Lienert und Prof. Dr. Max Maurer

Beim Planen der Wasserversorgung und der Abwasserentsorgung spielen ökonomische, ökologische und soziale Aspekte eine Rolle. SWIP entwickelte zusammen mit Stakeholdern Entscheidungshilfen für die langfristige Planung von Infrastrukturen für verschiedene Zukunftsszenarien.

SWISSKARST: Karstwasser, eine Wasserressource für die Zukunft?

Dr. Pierre-Yves Jeannin

In der Schweiz stammen 18% des Trinkwassers aus Karstgrundwasserleitern. Diese wurden mit der im Projekt entwickelten Methode «KARSYS» auf einem Drittel der Landesfläche charakterisiert. Behörden und Wassernutzer nutzen diese Methode, wenn es um die Nutzung und Bewirtschaftung von Karstgrundwasser geht. ▶ [S. 14](#)

WATERCHANNELS: Bewässerungskanäle für die Artenvielfalt und den Tourismus

Dr. Raimund Rodewald

Wasserkanäle bewässern Wiesen in trockenen Alpentälern schon seit vielen Jahrhunderten. Untersucht wurde der Nutzen der Wasserkanäle für die Biodiversität und das Nutzungssystem. In Zukunft muss häufiger mit Trockenheit und Wasserkonkurrenz gerechnet werden. Das Projekt hilft Wasserverteilungsfragen anzugehen, die mit der Nutzung von Wasserkanälen verbunden sind. ▶ [S. 24](#)

Produkte des NFP 61

Es wurden **fünf Synthesen** erstellt: vier Thematische Synthesen und eine Gesamtsynthese. Erstere richten sich an Fachleute bei Bund, Kantonen, Gemeinden, Verbänden, NGOs und privaten Büros. Sie bündeln die wissenschaftlichen Erkenntnisse aus den einzelnen Projekten des NFP 61 und anderen Studien mit Blick auf zentrale Fragestellungen des NFP 61, verbinden die praxisrelevanten Ergebnisse der einzelnen Projekte und ziehen praxistaugliche Folgerungen für einen nachhaltigen Umgang mit der Ressource Wasser.

Thematische Synthese 1

Wasserressourcen der Schweiz: Dargebot und Nutzung – heute und morgen
Astrid Björnsen Gurung und Manfred Stähli

Thematische Synthese 2

Bewirtschaftung der Wasserressourcen unter steigendem Nutzungsdruck
Klaus Lanz, Eric Rahn, Rosi Siber, Christian Stamm

Thematische Synthese 3

Nachhaltige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in der Schweiz: Herausforderungen und Handlungsoptionen
Sabine Hoffmann, Daniel Hunkeler, Max Maurer

Thematische Synthese 4

Nachhaltige Wassergouvernanz: Herausforderungen und Wege in die Zukunft
Franziska Schmid, Felix Walter, Flurina Schneider, Stephan Rist



Mit einem Gesamtsynthesebuch spricht die Leitungsgruppe die oben genannten Fachkräfte, Medien, Politik und die interessierte Bevölkerung an. Die Gesamtsynthese baut auf den 16 Projekten des NFP 61 sowie den vier Thematischen Synthesen auf. Sie fasst die wichtigsten Ergebnisse des NFP 61 in einer leicht lesbaren Form zusammen.

Gesamtsynthese

Nachhaltige Wassernutzung in der Schweiz: NFP 61 weist Wege in die Zukunft
Leitungsgruppe NFP 61



Projektpublikationen

Bis im Sommer 2014 entstanden mindestens 160 wissenschaftliche Publikationen, Dissertationen, eine Interview- und Artikelreihe in «Aqua & Gas», Fachberichte in «Wasser, Energie, Luft», zahlreiche Berichte und andere Veröffentlichungen aus den 16 Projekten (<http://p3.snf.ch/>).

Videos

Die Videos des NFP 61 helfen Brücken zwischen verschiedenen Disziplinen und zwischen Wissenschaft und Gesellschaft zu bauen (siehe www.nfp61.ch, DVD im Gesamtsynthesebuch).

Am Anfang des Programmes wurde für alle Forschungsprojekte ein kurzer Videoclip «Einblick» gedreht. Die Projektleitenden erzählen, was sie wie untersuchen und weshalb diese Forschung wichtig ist für unsere Gesellschaft. Zum Abschluss des Programmes wurden 10 Videomodule «Ausblick» zu den Themen «Schwindende Gletscher», «Wasserressourcen der Zukunft», «Zunehmende Trockenheit», «Wachsende Siedlungen» und «Wassermanagement» gedreht. Forschende berichten, welche Erkenntnisse sie überrascht haben, wie sie mit Akteuren aus der Praxis zusammengearbeitet haben und welche Umsetzungstools nun zur Verfügung stehen. Akteure aus der Praxis erzählen, wie sie die Forschungsergebnisse einschätzen und was sie in ihrem Umfeld nun umsetzen können.

Ausstellungsmodul

Kurze Videoausschnitte zeigen wichtige Erkenntnisse aus dem NFP 61. Mithilfe eines Ausstellungsmoduls in Messen, Museen und Amtsgebäuden können die wichtigsten Botschaften interaktiv vermittelt werden (Anmeldung beim SNF: nfp@snf.ch).



Begleitforschung

Die Projekte des NFP 61 arbeiteten interdisziplinär und setzten transdisziplinäre Methoden ein. Auf Programm- und Projektebene wurden vielfältige Umsetzungsaktivitäten durchgeführt. Der Syntheseprozess begann noch während der Forschungsarbeiten. Zwei Begleitforschungsprojekte untersuchten, welche Methoden wie und mit welchem Erfolg angewendet wurden.

Potenziale und Limitationen transdisziplinärer Wissensproduktion in Forschungsprojekten des NFP 61

Tobias Buser, Flurina Schneider, Stephan Rist
Die Begleitforschung der Universität Bern untersuchte die transdisziplinären Ansätze in den 16 Projekten.

Methoden der inter- und transdisziplinären Wissensintegration im NFP 61-Syntheseprozess

Sabine Hoffmann, Christian Pohl, Janet Hering
Die Begleitforschung von Eawag/td-net untersuchte die Methoden der Wissensintegration in den vier Thematischen Synthesen.

Weitere Informationen: www.nfp61.ch



Als Wasserschloss Europas wird die Schweiz bereits heute durch den Klimawandel, aber auch durch demografische, wirtschaftliche und politische Kräfte merklich beeinflusst. Um auch in Zukunft genügend Wasserreserven von ausreichender Qualität zur Verfügung zu haben, müssen heute entsprechende Weichen gestellt werden.

Die vorliegende Thematische Synthese beschreibt das heutige Wasserdargebot und dessen Nutzung in der Schweiz und skizziert die zukünftigen Rahmenbedingungen aus klimatischer und gesellschaftlicher Sicht. Sie macht deutlich, dass Wasser keine unendliche Ressource darstellt und für zahlreiche Sektoren Anpassungen notwendig werden. In alpinen Gebieten wird sich das zeitliche und räumliche Wasserdargebot, aber auch die damit verbundene Gefahrensituation klimabedingt merklich verändern. Im Mittelland wird mit einer Verminderung der Spätsommerabflüsse gerechnet, wovon auch viele Grundwasserreserven betroffen sind. Stark wirken sich dort auch die wachsenden Nutzungsansprüche und neuen Schadstoffeinträge auf die verfügbare Wassermenge sowie auf die Wasserqualität aus.

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Nutzungsansprüche, die auf engstem Raum auf die Schweizer Gewässer einwirken, muss die nachhaltige Wassernutzung den gesamten Gewässerraum betrachten. Das in dieser Thematischen Synthese zusammengefasste Grundlagenwissen aus den NFP 61-Projekten bietet dazu eine umfassende Ausgangslage.



Diese Publikation wird unterstützt durch den Schweizerischen Nationalfonds im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung».
Diese Publikation ist auf Deutsch und Französisch erhältlich.
Cette publication est disponible en allemand et en français.

ISBN 978-3-9524412-1-3



9 783952 441213 >