NFP 61 – Thematische Synthese 2
im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61
«Nachhaltige Wassernutzung»

Bewirtschaftung der Wasserressourcen unter steigendem Nutzungsdruck

Klaus Lanz, Eric Rahn, Rosi Siber, Christian Stamm

Nachhaltige Wassernutzung
Nationales Forschungsprogramm NFP 61

FNSNF
Schweizerischer Nationalfonds
zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung

NFP 61 – Thematische Synthese 2
im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61
«Nachhaltige Wassernutzung»

Bewirtschaftung der Wasserressourcen unter steigendem Nutzungsdruck

Klaus Lanz, Eric Rahn, Rosi Siber, Christian Stamm

Impressum

Autorenteam:
Dr. Klaus Lanz, International Water Affairs, Evilard; Eawag, Dübendorf
Eric Rahn, Eawag, Dübendorf
Rosi Siber, Eawag, Dübendorf
Dr. Christian Stamm, Eawag, Dübendorf

Projektteam (Konzeptentwicklung und wissenschaftliche Projektbegleitung): Prof. Dr. Jürg Fuhrer (Agroscope); Prof. Dr. Adrienne Grêt-Regamey (ETH Zürich); Prof. Dr. Wilfried Haeberli (Universität Zürich); Dr. Christian Stamm (Eawag); Prof. Dr. Rolf Weingartner (Universität Bern).

Empfohlene Zitierweise: Klaus Lanz; Eric Rahn; Rosi Siber; Christian Stamm (2014): Bewirtschaftung der Wasserressourcen unter steigendem Nutzungsdruck. Thematische Synthese 2 im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung», Bern.

Erarbeitet und publiziert mit Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung».

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, Technische 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, Leipzig; Prof. Bruno Merz, GeoForschungsZentrum, Potsdam; Prof. i.R. (Universität Wien) Franz Nobilis, Ministerialrat im Lebensministerium (Sektion Wasser, Hydrographisches Zentralbüro), Wien.

Programmbeirat: Dr. Christoph Böbner, Dienststelle für Landwirtschaft und Wald, Kanton Luzern; Katharina Dobler (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

Programmkoordinatorin: 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/m^2 (Inhalt), 250 g/m^2 (Umschlag)
Übersetzung: Trad8, Delémont
Bilder Umschlag: Reportair (1–3), Max Maurer, Lisa Rigendinger, Jürg Fuhrer. 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-Projektkürzel vermerkt. Die Zitate widerspiegeln die Meinung der abgebildeten Personen.

Für die erwähnten Forschungsergebnisse sind die jeweiligen Forschungsteams verantwortlich, für die Thematischen Synthesen und die Empfehlungen die Autorenteams, deren Auffassung nicht notwendigerweise mit derjenigen des Schweizerischen Nationalfonds, der Mitglieder der Leitungsgruppe oder des Programmbeirats übereinstimmen muss.

Inhalt

4 Vorwort
6 Zusammenfassung
8 Summary

10 1 – Zielsetzung und methodisches Vorgehen
10 Hintergrund
10 Methodik

13 **2 – Wassernutzung in der Schweiz: Konflikte und Synergien**
13 Teil A – Mengenbewirtschaftung
13 A1 | Mengenbewirtschaftung durch Speicherkraftwerke
17 A2 | Mengenansprüche durch den Gewässerschutz
18 A3 | Mengenbewirtschaftung durch den Hochwasserschutz
20 A4 | Mengenbewirtschaftung durch landwirtschaftliche Bewässerung
25 A5 | Nutzung von Grundwasser und Seen als Trinkwasser
27 A6 | Wärmenutzung von Grundwasser
28 A7 | Weitere Beeinflussungen der Wassermenge
30 A8 | Verstärkung von Mengenkonflikten bei anhaltender Trockenheit
30 Fazit Teil A – Mengenbewirtschaftung
33 Teil B – Wasserqualität
33 B1 | Stoffeinträge in Oberflächengewässer aus Siedlungen
36 B2 | Stoffeinträge in Oberflächengewässer aus Industrie und Gewerbe
36 B3 | Stoffeinträge aus der Landwirtschaft
39 B4 | Ansprüche an chemische Wasserqualität und Trinkwasservorkommen
40 B5 | Thermische Nutzung und Wärmeeinträge
40 B6 | Sonstige Nutzungen mit Einfluss auf die Wasserqualität
42 Fazit Teil B – Wasserqualität
44 Teil C – Hydromorphologie und aquatische Lebensräume
44 C1 | Hydromorphologische Einflüsse von Laufkraftwerken im Mittelland
45 C2 | Hydromorphologische Einflüsse des Hochwasserschutzes
47 C3 | Hydromorphologische Einflüsse der Landwirtschaft
49 C4 | Hydromorphologische Anforderungen des Gewässerschutzes
49 C5 | Einflüsse von Siedlungen und Verkehrsflächen auf See- und Flussufer
50 C6 | Hydromorphologische Auswirkungen der Trinkwasserversorgung
50 Fazit Teil C – Hydromorphologie und aquatische Lebensräume
52 Teil D – Flächennutzungskonflikte
52 D1 | Flächenbedarf der Trinkwasserversorgung
53 D2 | Flächenbedarf von Siedlungen und Verkehr
54 D3 | Flächenbedarf der Landwirtschaft
55 D4 | Flächenbedarf des Gewässerschutzes
55 Fazit Teil D – Flächennutzungskonflikte

57 3 – Wassernutzungen: Risiken und Herausforderungen der Zukunft
57 Alpine Wasserressourcen
58 Trinkwasserversorgung
60 Landwirtschaft
61 Gewässerökologie
64 Trockenperioden

65 4 – Vorbeugen, vermeiden, verhandeln: Werkzeuge für das Konfliktmanagement
65 Vorbeugen: bessere Datenbasis für frühzeitiges Handeln
66 Vermeiden und verhandeln: rationales und transparentes Vorgehen
67 Konfliktbewältigung: faire, robuste, flexible und langfristige Strategien
68 Konfliktprävention: Einbezug der Wasserthematik in andere Handlungs- und Politikfelder

69 Abbildungsverzeichnis
69 Tabellenverzeichnis
69 Verzeichnis der Matrizes
69 Literatur
77 Dank

78 Anhang
78 Was ist das NFP 61?
78 Die 16 Forschungsprojekte des NFP 61
80 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 Rückkoppelungen, die beispielsweise durch die Wasserkraftnutzung, die Flusskorrektionen 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 Forschungsresultate 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 Forschungsresultate 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: Der Klimawandel wird die Abflussmengen in Flüssen und Bächen und damit die saisonale Verfügbarkeit von Wasser deutlich verändern. (DROUGHT-CH).
Mitte: Das rasche Wachstum von Wirtschaft und Bevölkerung verbraucht nicht nur Landschaft, sondern verstärkt auch Flächenkonflikte um Wasser. (Foto Reportair)
Rechts: Verändern sich die Rahmenbedingungen, müssen auch die Wassernutzungen angepasst werden: Forschende im Winterthurer Grundwasserpumpwerk Oberes Linsental. (GW-TEMP)

Dieser im Rahmen des NFP 61 entstandene Bericht beschreibt die Bewirtschaftung der Wasserressourcen in der Schweiz und die daraus resultierenden Nutzungskonflikte und Synergiepotenziale heute und – so weit absehbar – in der Zukunft. Wo immer möglich, stützt er sich auf Erkenntnisse aus den NFP 61-Forschungsprojekten, bezieht darüber hinaus aber auch Ergebnisse anderer Forschungsprojekte, behördliche Fachberichte und sonstige Publikationen ein. Der Bericht fasst damit den Stand des Wissens zum Thema Wasserbewirtschaftung in der Schweiz zusammen.
Um die wesentlichen Synergien und Konflikte identifizieren zu können, wurden sämtliche relevanten Ansprüche an Wasser und Gewässer zusammengestellt. Dabei wurden auch Aktivitäten einbezogen, die nicht primär auf eine Nutzung von Gewässern abzielen, aber dennoch Einfluss auf deren Zustand oder auf andere Nutzungen haben.
Die Einflüsse der verschiedenen Aktivitäten auf Wasser und Gewässer wurden auf Basis von Literatur und Expertengesprächen systematisch entlang der vier Dimensionen Wassermenge, Wasserqualität, Hydromorphologie sowie Flächenbedarf analysiert. Die Resultate wurden in Nutzungsmatrizes zusammengefasst, die jeder Nutzung ihren Effekt auf die Gewässer sowie potenzielle Überlagerungen mit anderen Nutzungen zuordnen. Diese vier Matrizes veranschaulichen die Quintessenz von vier Unterkapiteln, in denen die jeweiligen Nutzungsansprüche und ihre Auswirkungen detailliert dargelegt werden.

Geänderte Bedingungen – neue Herausforderungen

Der Umgang mit den Gewässern der Schweiz ist geprägt von über Jahrzehnte austarierten Nutzungen und Vereinbarungen. Grosse Anstrengungen wurden seit den 1960er- und 1970er-Jahren unternommen, erhebliche Finanzmittel aufgewendet, um die damals bedenklich abnehmende Qualität der Gewässer wieder zu verbessern. Ambitionierte Gesetzesnormen und kompetente Verwaltungen auf Bundes- und Kantonsebene haben dazu beigetragen, dass die Erholung der Gewässer in vielen Bereichen auf einem guten Weg ist.

Doch die Welt steht nicht still: Die für diesen Bericht durchgeführten Analysen zeigen, dass aufgrund von sich rapide wandelnden Rahmenbedingungen die Wasserwirtschaft mit grossen neuen Herausforderungen konfrontiert ist. Zunächst ist dabei an den Klimawandel zu denken, doch zeigte sich im Rahmen der NFP 61-Forschung, dass sozioökonomische Faktoren vielerorts eine weitaus grössere Wirkung entfalten werden. Nachstehend sind die wichtigsten Veränderungsprozesse und die daraus resultierenden Herausforderungen in sieben Punkten zusammengefasst.

- Der Klimawandel wird die Abflussmengen und die saisonale Verfügbarkeit von Wasser deutlich beeinflussen; die entsprechende Anpassung der Wassernutzungen an Trockenheit und höhere Temperaturen kann bestehende Konflikte verschärfen und neue hervorrufen.
- Geänderte gesellschaftliche Wertvorstellungen haben Eingang in die Gewässerschutzgesetze gefunden und erfordern ein Umdenken bei etablierten Nutzungen wie Wasserkraft und Landwirtschaft.
- Das rasche Wachstum von Wirtschaftsaktivitäten und Bevölkerung verstärkt Flächenkonflikte in verschiedenen Bereichen. Dies gilt z.B. für den flächenhaften Schutz von Grundwasservorkommen für die Trinkwasserversorgung gegenüber dem Siedlungswachstum oder für den Konflikt um Gewässerraum und Landwirtschaft.
- Neue oder verstärkte Aktivitäten können Gewässer und aktuelle Nutzungen zusätzlich beeinträchtigen. Das gilt z.B. für den derzeit stark expandierenden Bereich der thermischen Wassernutzung (Wärme, Kühlung) oder die potenzielle Einführung von Fracking oder Tiefengeothermie.
- Anstelle der heutigen Gletscher werden zum Teil neue Seen entstehen. Ob und wie diese künftigen hochalpinen Gewässer genutzt und geschützt werden sollen, kann Gegenstand von neuen Konflikten sein. In jedem Fall müssen Fragen nach Sicherheit und Eigentumsverhältnissen geklärt werden.
- Neue Erkenntnisse über die Funktionen und den Zustand der Gewässer können etablierte Nutzungen infrage stellen und Änderungen der Bewirtschaftung erforder-

lich machen, z.B. in punkto Mikroverunreinigungen.

- Die Rahmenbedingungen ändern sich gebietsübergreifend im ganzen Land und darüber hinaus, angemessene Reaktionen sind nur auf Basis ganzer Einzugsgebiete möglich. Viele der anstehenden Aufgaben lassen sich nicht allein auf Ebene von Gemeinden oder Kantonen bewältigen und sollten regional koordiniert werden.

Trotz grosser Errungenschaften in den vergangenen Jahrzehnten ist die Verwirklichung einer nachhaltigen Wassernutzung weiterhin «work in progress». Dies wird angesichts stetig neuer Rahmenbedingungen auch in Zukunft so bleiben. Die Aufgabe besteht darin, veränderte Bedingungen frühzeitig zu erkennen, Nutzungen gerecht und effizient anzupassen und bei alledem die ökologische Integrität der Gewässer weiter zu verbessern. Der Wasserreichtum der Schweiz – so beruhigend gross er auch sein mag – muss vorausschauend und klug bewirtschaftet werden, um dem Ziel der Nachhaltigkeit näherzukommen. Ziel ist eine Nutzung des Wasserschatzes, die Wohlstand schafft und zugleich die einmaligen Wasserlandschaften der Schweiz für kommende Generationen bewahrt.

Links: Flüsse und Grundwasserströme halten sich nicht an Gemeinde- und Kantonsgrenzen. Eine vorausschauende Bewirtschaftung von Wasserressourcen erfordert regionale Koordination. (IWAGO)
Mitte: Viele Flüsse stehen in intensivem Austausch mit dem Grundwasser: Ihre chemische Qualität ist massgeblich auch für die Reinheit des Trinkwassers. (RIBACLIM)
Rechts: Die unersetzlichen Wasserlandschaften der Schweiz müssen für kommende Generationen bewahrt werden. (SEDRIVER)

«Der Bundesrat und das Parlament haben das Postulat ‹Umgang mit Wasserknappheit in der Schweiz› gutgeheissen. Wir haben nun den Auftrag, die entsprechenden Massnahmen umzusetzen. Deshalb haben wir grosses Interesse an den Erkenntnissen des NFP 61.»

Hugo Aschwanden
Abteilung Wasser BAFU

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

Links: Das Wachstum von Siedlungen und Verkehrsinfrastruktur findet zunehmend auch im Untergrund statt und kann Grundwasserströme beeinträchtigen: Neubausiedlung «Im Lee», Egg (ZH). (SWIP)
Mitte: Wenig Raum für Flüsse: Wo viele Interessen gleichzeitig wirksam sind, ist eine nachhaltige Bewirtschaftung der Wasserressourcen besonders anspruchsvoll. (Foto Reportair)
Rechts: Mit dem Abschmelzen der Gletscher werden sich die Rahmenbedingungen auch für die Wasserkraftgewinnung ändern: Stausee am Griesgletscher. (Foto Lisa Rigendinger)

Summary

This report describes how water and aquatic ecosystems in Switzerland are presently being utilised. It also documents present and – as far as foreseeable – future conflicts and potential synergies resulting from the different uses. The analysis is based wherever possible on knowledge gained by NRP 61 research projects, yet also draws on insights of other research projects, official reports and publications. The report hence lays out the current state of knowledge on water utilisation in Switzerland. To identify the relevant synergies and conflicts, all important demands on water and aquatic ecosystems have been examined. This includes activities that do not originally intend to make use of water or water bodies, but do have an impact on their condition and hence on other water users.
The impact of the various activities on water and aquatic ecosystems was analysed on the basis of literature research and interviews with experts, and framed along the four dimensions water quantity, water quality, hydromorphology and land-use (chapters A to D). The results are summarised in four utilization matrices showing how the various activities (potentially) impact other uses. These matrices epitomise the essence of chapters A to D, in which the impact of different user demands is explored in detail.

Changing conditions – new challenges

Water law and water management in Switzerland are the result of societal agreements that have continually been negotiated over decades. Since the 1960s and 1970s, when water quality had deteriorated to precarious levels, considerable efforts and substantial funds have been invested to improve the situation. Ambitious legislation and competent federal and cantonal authorities have since contributed to paving the way for the recovery of rivers and lakes in many areas.
But the world is not at a standstill: analyses conducted in the context of this report show that the water sector is faced with new challenges due to rapidly changing boundary conditions. This is partly due to climate change, but as NRP 61 research is showing, socio-economic factors often play a much more important role. The key developments and resulting challenges are summarized below:

- Climate change will affect river discharge and seasonal availability of water; societal responses to the respective conditions of drought and higher temperatures may exacerbate existing water conflicts and trigger new ones.
- Social values regarding water use have changed; this is reflected in water-related legislation and requires established users such as hydropower production and agriculture to adjust their practices.
- The rapid growth of economic activities and population intensifies land use conflicts in various sectors. This holds for example for maintaining groundwater protection zones vs. urban development or land needs for river restoration vs. agriculture.
- New or intensified activities can affect aquatic ecosystems and current water uses. Such activities include the rapidly expanding use of groundwater and lakes for the exploitation of thermal energy (heating, cooling) or the potential introduction of fracking and deep geothermal energy systems.
- Today's glaciers will melt and, in some areas, leave behind new lakes. The question if and how these new Alpine water bodies should be used and protected may give rise to new conflicts. In any case, questions relating to risks and ownership will have to be clarified.
- A new understanding of the functioning and state of aquatic ecosystems may question established uses and necessitate adaptation of management, e.g. with regard to micro-pollutants.
- Boundary conditions are changing across regional and national boundaries; adequate responses require action at the scale of catchments. Many of the upcoming challenges are difficult to deal with at local or cantonal scale alone; they call for regional coordination.

Despite great achievements in the past few decades, the implementation of sustainable water management remains "work in progress". In view of the ongoing changes of boundary conditions this will be also the case in the future. The main tasks are to recognize changing conditions early, to adapt uses fairly and efficiently while continuing to improve

the ecological integrity of aquatic ecosystems. Water may seem plentiful in Switzerland, but it needs to be managed with foresight and astuteness if we want to continue working towards sustainability. The overall objective of the management of water and aquatic systems is to generate welfare while preserving the unique aquatic landscapes of Switzerland for future generations.

Links: Am Steingletscher ist infolge der Eisschmelze ein neuer See entstanden. Ob und wie diese neuen Gewässer genutzt werden sollen, ist Gegenstand aktueller Debatten. (NELAK)
Mitte: Auch am Ablauf von Kläranlagen enthält das gereinigte Wasser noch unerwünschte Stoffe wie z.B. Mikroverunreinigungen. Daher wird die Klärtechnik an den wichtigsten Kläranlagen der Schweiz derzeit um weitere Reinigungsschritte ergänzt. (Foto Eawag)
Rechts: Wasserkraftnutzung und ökologische Qualität von Gewässern stehen in direktem Widerspruch. Eine Möglichkeit für die Bewahrung intakter Auenlandschaften wie hier an der Sense ist die Unterteilung der Gewässer in Nutz- und Schutzbereiche. (Foto Eawag)

1 – Zielsetzung und methodisches Vorgehen

Hintergrund

Die Schweizer Wasserwirtschaft ist ein hochentwickeltes, über Jahrzehnte fein austariertes organisatorisches, rechtliches und technisches System. Es sichert eine hohe Qualität der Gewässer, beugt Hochwassern vor und regelt eine Vielzahl von Gewässernutzungen. Ein dichtes Monitoringnetz überwacht Qualität und Menge der Wasserressourcen und den ökologischen Zustand von Flüssen, Seen und Grundwasser.

Durch die Verschärfung von Gesetzen zum Gewässerschutz und den Einsatz beträchtlicher finanzieller Mittel in den vergangenen Jahrzehnten konnten die Reinheit und die ökologische Qualität der Schweizer Gewässer stark verbessert werden. Eine integrale Wasserwirtschaft zielt darauf ab, alle gesellschaftlichen Aktivitäten zur Nutzung des Wassers, zum Schutz des Wassers sowie zum Schutz vor den Gefahren des Wassers in Einklang zu bringen. Angestrebt wird eine nachhaltige Wassernutzung, bei der sowohl die unterschiedlichen Nutzungen als auch die ökologischen und gesellschaftlichen Funktionen des Wassers langfristig gesichert sind.

Der Wasserhaushalt und die Intensität seiner Nutzung werden sich in den kommenden Jahrzehnten aufgrund von Klimawandel, verstärkten menschlichen Aktivitäten und technischem Wandel spürbar verändern. Höhere Temperaturen werden Gletscher abschmelzen und die Schneegrenze ansteigen lassen und klimabedingt werden sich möglicherweise saisonale Niederschlagsmuster verschieben. In diese Wandlungsprozesse greifen potenziell zunehmende Nutzungsansprüche durch das erwartete Wachstum von Bevölkerung, Wirtschaft und Siedlungen ein. Durch die dichtere Nutzung der Landschaft können sich bisher isoliert wirkende Einflüsse auf die Gewässer überlagern und gegenseitig verstärken. Auch veränderte politische Rahmenbedingungen, etwa eine erhöhte Wasserkraftnutzung oder eine umweltverträgliche Lebensmittelproduktion, haben direkt oder indirekt einen Einfluss auf die Gewässer und ihre Nutzung.

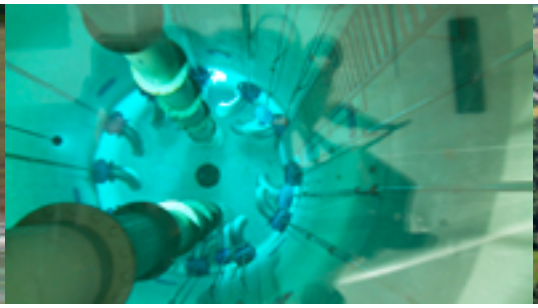
Auf diese Veränderungen der Rahmenbedingungen muss die Bewirtschaftung der Wasserressourcen frühzeitig und vorausschauend reagieren. Der Anpassungsprozess wird dadurch erschwert, dass mehrere Nutzergruppen ihren Umgang mit den Wasserressourcen gleichzeitig verändern werden. In dieser komplexen Situation können neue Konflikte, aber auch zusätzliche Synergien entstehen. Der vorliegende Bericht soll die verschiedenen Akteure – v.a. Fachpersonen in Behörden und Verbänden sowie Forschende – bei der strategischen Planung unterstützen, indem er basierend auf dem Nationalen Forschungsprogramm 61 «Nachhaltige Wassernutzung» (NFP 61) wesentliche Nutzungen und potenzielle Konflikte identifiziert, charakterisiert und exemplarische Lösungsansätze aufzeigt.

Methodik

Die Bewirtschaftung der Wasserressourcen in der Schweiz wurde auf aktuell bestehende und potenzielle zukünftige räumliche Über-

Tabelle 1: Beitrag der NFP 61-Projekte zur Thematischen Synthese TS 2. Die jeweiligen Untersuchungsgebiete sind kartografisch in [1] zusammenfassend dargestellt.

Projekt	Beitrag zur Thematischen Synthese TS 2	Seite
FUGE	Änderung des Wasserkraftpotenzials durch Klimawandel und sozioökonomische Veränderungen	13
NELAK	Entstehung neuer Seen im Gletschergebiet und daraus entstehende gesellschaftliche Ansprüche	14
MONTANAQUA	Nutzungsüberlagerungen bei der Bewirtschaftung alpiner Wasserressourcen	17
HYDROSERV	Einfluss der Landnutzung auf den Hochwasserschutz	19
WATERCHANNELS	Suonenbewirtschaftung und Abgleich des Wasserbedarfs verschiedener Nutzungen	23
AGWAM	Verminderung von Konfliktpotenzialen bei der landwirtschaftlichen Bewässerung	24
	Der Einfluss von Klimawandel und Landbewirtschaftung auf Stoffeinträge im Jahr 2050	37
GW-TREND	Klimawandel und Grundwasserverfügbarkeit angesichts vielfältiger Nutzungsansprüche	26
DROUGHT-CH	Vorhersage von Trockenheitsbedingungen als Voraussetzung zur Vermeidung von Konflikten	30
RIBACLIM	Potenzielle Qualitätsminderungen bei Grundwasser durch höhere Temperaturen	35
IWAQA	Gewässerqualität	38
	Einfluss multipler Stressoren auf Gewässer	48
	Methoden für die optimierte Entscheidungsfindung im Wassermanagement	66
SEDRIVER	Einfluss des Geschiebetransports in alpinen Gewässern auf aquatische Habitate	45



Links: Das Gewässerschutzgesetz strebt die Wiederherstellung eines möglichst naturgemässen Zustands für Fliessgewässer an wie hier am Vorderrhein. Nicht überall ist dieses Ziel ohne Einschränkungen anderer Nutzungen umsetzbar. (Foto ProNatura)
Mitte: Eine zuverlässige Versorgung mit einwandfreiem Trinkwasser ist eine der wichtigsten Maximen der Wasserpolitik: Grundwasserbrunnen. (GW-TEMP)
Rechts: Besonders in Mittelland und in den grossen Flusstälern der Alpen überlagern sich vielfältige Aktivitäten. Auch Gewässer und deren Nutzungen sind immer häufiger eingeschränkt. (Foto Reportair)

lagerungen von Nutzungen und sich daraus ergebende Nutzungskonflikte sowie mögliche Synergiepotenziale untersucht. Ausgangspunkt für den Bericht waren das Konzept des NFP 61 und die Erkenntnisse aus den NFP 61-Forschungsprojekten (siehe Tabelle 1). Um die Überlagerung der wesentlichen wasserrelevanten Aktivitäten umfassend darlegen zu können, wurden darüber hinaus auch Ergebnisse anderer Forschungsprojekte, behördlicher Fachberichte und sonstiger Publikationen beigezogen. Der Bericht fasst damit den Stand des Wissens zum Thema Nutzungsüberlagerungen und sich daraus ergebender Konflikte und Synergien in der Schweiz zusammen.
Zeitlich ist der Horizont des NFP 61 und damit dieses Berichts auf die Mitte des 21. Jahrhunderts ausgerichtet. Zahlreiche Vorgänge (Klimawandel, Planungshorizonte für Infrastrukturen etc.) erfordern aber noch längere Beobachtungszeiträume. Wo thematisch angebracht, dehnt dieser Bericht daher den Betrachtungshorizont bis zum Ende dieses Jahrhunderts aus und blickt auch in die Vergangenheit zurück, um die heutige Situation besser einschätzen zu können.
Die im Rahmen des NFP 61 erarbeiteten und für Nutzungskonflikte relevanten Erkenntnisse wurden auf Basis der entsprechenden Publikationen und Projektzusammenfassungen ausgewertet und durch Experteninterviews vertieft. Die NFP 61-Forschungsprojekte sind auf drei Ebenen in diesen Bericht eingeflossen: erstens bei der Erarbeitung der für die Gesamtschau relevanten Fragestellungen, zweitens als erläuternde und vertiefende Fallstudien in Kapitel 2. Drittens lieferten die Projektergebnisse wichtigen Input für das zusammenfassende Kapitel 3. Weiter sind auch die Arbeiten im Rahmen der drei anderen Thematischen Synthesen berücksichtigt und mit diesem Bericht abgeglichen worden. Wo immer sinnvoll, wurde auf die anderen Syntheseberichte Bezug genommen.

Wassernutzung

Fasst man unter dem Begriff Wassernutzung lediglich Wasserentnahmen aus einem Gewässer, ist eine realistische Beschreibung des Wasserhaushalts in seiner Wechselwirkung mit menschlichen Aktivitäten nicht möglich. Daher wird in diesem Bericht auch der Eintrag von Stoffen und Wärme in die Gewässer den Nutzungen zugerechnet. Zusätzlich werden Eingriffe in die Morphologie von Gewässern, namentlich Querverbauungen, Dämme, Sohlabdichtungen und die damit verbundenen Landgewinne als Gewässernutzung angesehen, einschliesslich der Eingriffe zum Zweck des Hochwasserschutzes. Weiter wird der Zustand der Gewässer von Aktivitäten im Einzugsgebiet beeinflusst, die für sich genommen keine Nutzung von Wasser darstellen, jedoch die Speicherung, den Abfluss und die Qualität des Wassers beeinflussen und so andere Nutzungen beeinträchtigen können. Um den menschlichen Einfluss auf die Gewässer und potenzielle Nutzungskonkurrenzen möglichst vollständig zu erfassen, werden der Begriff Wassernutzung und der Analysehorizont auch auf in der Fläche wirkende Aktivitäten ausgedehnt (siehe Abb. 1).

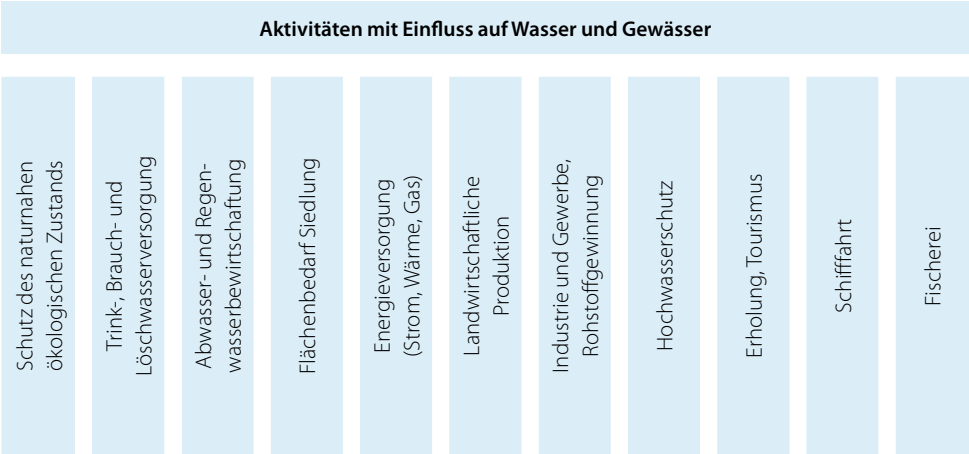


Abb. 1: Vielfalt der gesellschaftlichen Ansprüche an Wasser und Gewässer: Schutzansprüche (naturnaher ökologischer Zustand, Hochwasserschutz), Schutz- und Nutzungsansprüche (Trinkwasser bezüglich Qualität und Quantität) und reine Nutzungsansprüche (Energieversorgung, Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe, Schifffahrt, Siedlung) überlagern sich.

Links: Der zusätzliche Raumbedarf für revitalisierte Gewässer geht fast immer zulasten anderer Nutzungen: Linthebene bei Schänis. (Foto Reportair)
Mitte: Das Wasserangebot für die Stromgewinnung ändert sich, wenn die Schneegrenze steigt und die Gletscher sich zurückziehen. Das Projekt FUGE hat die Zukunftspotenziale der bestehenden Kraftwerke erforscht. Am winterlich verschneiten Griesgletscher.
Rechts: Dass Gewässer neu entstehen, ist eine seltene Erscheinung in einer ansonsten stabilen Landschaft. Umso grösser sind die rechtlichen und administrativen Herausforderungen beim Umgang mit diesen neuen Landschaftselementen: neue Naturgefahren, ungeklärte Eigentumsverhältnisse, konkurrierende Nutzungsinteressen sind zu regeln. Rhonegletscher mit derzeit entstehendem neuem Rhonesee. (NELAK)

«Um die Trinkwasserversorgung dauerhaft sicherzustellen, müssen wir für die Zukunft genügend Standorte behalten, an denen die Grundwassernutzung Priorität hat.»

Daniel Hunkeler
Université de Neuchâtel

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

Nutzungsüberlagerungen, Erfassung von Konflikten und Synergien

Die verschiedenen gesellschaftlich legitimierten Ansprüche an Wasser und Gewässer können sich vielfach räumlich und zeitlich überlagern. Daraus entstehen Zielkonflikte, wenn eine Nutzung nur zulasten einer anderen ausgedehnt werden kann. Synergien treten auf, wenn eine Nutzung davon profitiert, dass eine andere ausgedehnt wird.
Die Identifikation der wichtigsten bestehenden und potenziellen zukünftigen Konflikte und Synergien im Bereich des Schweizer Wassersektors umfasste drei Schritte.

- Erfassung der relevanten Ansprüche an Wasser und Gewässer (Abb. 1). Die Erhaltung eines guten ökologischen Zustands wird hier gleich gewichtet neben andere Ziele wie Stromproduktion oder Trinkwassergewinnung gestellt. Es bestehen allerdings qualitative Unterschiede: Gewässer in gutem ökologischem Zustand sind eine gegebene, begrenzte und zu erhaltende Ressource, während die menschlichen Ansprüche auf Wasser potenziell beliebig wachsen können.
- Nutzungsmatrix mit Konflikten und Synergien: Die Wechselwirkungen der in Abb. 1 dargestellten Ansprüche an Wasser und Gewässer wurden auf Basis von Literaturrecherchen und Expertengesprächen systematisch analysiert. Die Ergebnisse sind ausführlich in Kapitel 2 «Wassernutzung in der Schweiz – Konflikte und Synergien» dargelegt.
  Neben aktuellen Einflüssen wurden teilweise auch die Auswirkungen früherer Aktivitäten einbezogen. Erstens zählen hierzu historische Eingriffe in die Morphologie der Fliessgewässer wie Begradigungen, Hochwasserdämme oder Sohlbefestigungen sowie die damit verbundenen Landgewinne für andere Nutzungen. Zweitens wurden beim Grundwasser solche Vorkommen als übernutzt klassifiziert, deren Nutzung zur Trinkwassergewinnung aufgrund von früheren Stoffeinträgen oder Landnutzungsänderungen nicht mehr ohne Aufbereitung möglich ist.
- Um die Auswertung der Nutzungsmatrix zu erleichtern, wurde die Analyse in vier inhaltliche Dimensionen aufgeteilt: Mengenaspekte – Einflüsse auf die Qualität – hydromorphologische Einflüsse – Flächenkonkurrenzen. Für jede der vier Dimensionen wurde eine eigene Nutzungsmatrix erstellt: Mengenbewirtschaftung Matrix A (S. 32), Wasserqualität Matrix B (S. 43), Eingriffe in die Hydromorphologie Matrix C (S. 51), gewässerrelevante Flächennutzungen Matrix D (S. 56).

Kapitel 2 legt die Ergebnisse der Matrixanalyse in vier Unterkapiteln (A–D) entlang diesen vier Dimensionen dar. In Kapitel 3 «Wassernutzungen: Risiken und Herausforderungen der Zukunft» werden Handlungsfelder und mögliche Massnahmen zusammengefasst, die sich aus der Matrixanalyse ergeben. Kapitel 4 «Vorbeugen, vermeiden, verhandeln: Werkzeuge für das Konfliktmanagement» schliesslich identifiziert Strategien zur Konfliktvermeidung und Konfliktbewältigung.

Datengrundlage

Gegenstand der Untersuchung war im NFP 61 die Gesamtheit des Wasserhaushalts und seiner Nutzungen in der Schweiz. Da sich Nutzungen und Beeinflussungen des Wasserhaushalts in erster Linie auf Ebene der Einzugsgebiete ausdrücken, wurden im NFP 61 meist Einzugsgebiete als Beobachtungsebene gewählt.
Die Ergebnisse der NFP 61-Projekte und anderer Forschungsvorhaben im Wassersektor basieren überwiegend auf regionalen Untersuchungen. Dieser Bericht zielt darauf ab, die Relevanz der Projektergebnisse für Konflikte und Synergien in eine nationale Perspektive einzuordnen.

2 – Wassernutzung in der Schweiz: Konflikte und Synergien

Teil A – Mengenbewirtschaftung

Wasser steht für die verschiedenen Nutzungen und Ansprüche unserer Gesellschaft ohne menschliches Zutun nicht überall und jederzeit im gewünschten Ausmass zur Verfügung. Mengenbewirtschaftung – Regulation, Beschaffung, Beseitigung – ist deshalb ein zentraler Bereich der Aktivitäten des Wassersektors im weiteren Sinn. Ziele sind einerseits der Schutz vor einem Zuviel an Wasser durch Hochwasserschutz und Drainierung landwirtschaftlicher Böden, andererseits Bereitstellung von Wasser in der gewünschten Qualität und Menge zum richtigen Zeitpunkt und am richtigen Ort.

A1 | Mengenbewirtschaftung durch Speicherkraftwerke

Wasserkraft wichtigste Elektrizitätsquelle der Schweiz

Der Wasserkraft kommt in der Schweiz eine überragende Rolle bei der Sicherung der Stromversorgung zu. Bei einem derzeitigen Jahresverbrauch (2012) von circa 65 Terawattstunden pro Jahr (TWh/a) liefert die Turbinierung von Wasser durchschnittlich etwa 55,4% (36 TWh/a) des erzeugten Stroms [2]. Zum gesamten Energiebedarf des Landes trägt die Wasserkraft rund 11% bei (67% werden in Form von Erdgas und Erdöl importiert). Dementsprechend werden die Fliessgewässer der Schweiz ausserordentlich intensiv genutzt. Die in Turbinen genutzte Wassermenge beträgt rund 550 Mia. m^3 pro Jahr, ein Mehrfaches des gesamten jährlichen Abflusses [3]. Rechnerisch wird jeder Kubikmeter Flusswasser rund 14 Mal energetisch genutzt (siehe auch NFP 61 Thematische Synthese 1).

Der Bundesratsbeschluss zur Begrenzung der Laufzeit von Atomkraftwerken von 2011 und die Abschaltung des AKW Mühleberg spätestens 2019 bedeuten, dass zukünftig erhebliche Strommengen eingespart, importiert oder aus anderen inländischen Quellen bereitgestellt werden müssen. Die Wasserkraft steht dabei als erneuerbare Energieform im Mittelpunkt des Interesses [4]. Derzeit in Angriff genommene Neubauten und Erweiterungen werden die Produktion um circa 1% (0,33 TWh/a) erhöhen. Zusätzliche Anlagen könnten bis 2050 nochmals 1,4 bis 3,0 TWh/a, Massnahmen zur Effizienzsteigerung in den Kraftwerken weitere 0,9 bis 1,5 TWh/a bereitstellen. Durch die Vorgaben des Gewässerschutzgesetzes steht diesem Zuwachs eine Minderproduktion von 1,4 bis 2,0 TWh/a für die Einhaltung der Restwassermengen in Bächen und Flüssen gegenüber. Je nachdem, welche Neuanlagen und Renovationen verwirklicht und wie die Restwassermengen festgelegt werden, verbleibt unter dem Strich eine Zunahme der jährlichen Produktionserwartung um 0,6 bis maximal 3,4 TWh [5].

Für all diese Prognosen ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Klimawandel die Wasserverfügbarkeit und die Landschaft im Hochgebirge erheblich verändern kann. Aus diesem Grund haben zwei NFP 61-Projekte (FUGE, NELAK) zentrale Aspekte dieser Problematik untersucht. Das Forschungsprojekt FUGE ist dabei der Frage nachgegangen, wie sich das Wasserdargebot absolut und saisonal verändern wird und welche Konsequenzen dies für die Wasserkraftunternehmen haben könnte (siehe Kasten unten). Das Projekt NELAK hat das Ausmass der Bildung zukünftiger Gletscherseen sowie deren Nutzungspotenzial eingehend untersucht (siehe Kasten S. 14).

Obwohl der Klimawandel eine wesentliche Veränderung im Alpenraum bewirken wird, zeigen die Analysen aus dem NFP 61-Projekt FUGE, dass die Unsicherheiten bezüglich Weiterentwicklung der Wasserkraft stärker von gesellschaftlichen und (internationalen) ökonomischen Randbedingungen geprägt sein werden. Das gleiche gilt auch für die Entwicklung im Bereich der Pumpspeicherkraftwerke (heute 4,4% des Wasserkraftstroms). Pumpspeicher sind für den Ausgleich von Produktionsschwankungen bei anderen Stromquellen (Sonne, Wind) ein wichtiges Element. 2012 wurden in der Schweiz elf Pumpspei-

In diesem Kapitel werden systematisch die relevanten Beanspruchungen von Wasser und Gewässern in der Schweiz charakterisiert und auf mögliche Überlagerungen – Konflikte und Synergien – mit anderen Nutzungen heute und in Zukunft untersucht. Dies geschieht entlang der vier Dimensionen Wassermengen, Wasserqualität, hydromorphologische Einflüsse und Flächenkonflikte, denen je ein Teilkapitel gewidmet ist (siehe Teil A–D dieses Kapitels). Am Ende jedes der vier Abschnitte erfolgt eine spezifische Zusammenfassung.

Wie ändert sich das Wasserkraftpotenzial? Erkenntnisse aus dem NFP 61-Projekt FUGE

Die Wasserkraftwerke werden in den Alpen infolge der Gletscherschmelze etwa noch bis in die 2030er-Jahre von leicht erhöhten Zuflüssen profitieren, müssen sich aber nachfolgend auf mengenmässig und saisonal stark veränderte Abflussregimes einstellen. Das Projekt FUGE unternahm eine umfassende Analyse der Zukunft der Wasserkraft unter geänderten klimatischen und sozioökonomischen Bedingungen. Die erwarteten geringeren Zuflüsse werden vermehrt in Zeiten mit hohem Strombedarf und hohen Strommarktpreisen stattfinden [6]. Durch diese saisonale Verschiebung besteht die Chance, einen Rückgang der Gesamtproduktion wirtschaftlich aufzufangen. Da sich mit der Klimaänderung auch die Stromnachfrage verschiebt (mehr Kühlung im Sommer, weniger Heizung im Winter), könnten Wasserkraftwerke sogar lukrativer werden als heute. Die Forschenden resümieren, dass Vorhersagen über die zukünftige Rolle und Profitabilität der Wasserkraft aufgrund zahlreicher Unwägbarkeiten in der Entwicklung des Stromsystems mit grossen Unsicherheiten behaftet bleiben [7].

Neue Seen als Folge schmelzender Gletscher: Erkenntnisse aus dem NFP 61-Projekt NELAK

Die heute noch vergletscherten Bereiche werden sich im Laufe dieses Jahrhunderts in eine neue Landschaft von Fels, Schutt, Seen und spärlicher Vegetation umformen. Im Projekt NELAK wurden die potenziell in Geländevertiefungen neu entstehenden Seen kartografisch erstmals systematisch sichtbar gemacht und auch auf ihre mögliche Nutzung für die Wasserkraft untersucht.

Eingehend wurden vom Projekt NELAK die Potenziale der hydroelektrischen Nutzung neuer Gletscherseen am Corbassière-Gletscher im Wallis und am Gauli- und am Trift-Gletscher im Berner Oberland evaluiert. Ihre ausgeprägte Höhenlage erlaubt grosse Gefällestufen mit hoher Leistung. Wo eine Kopplung mit tiefer gelegenen Speicherseen möglich ist, lassen sich neue Pumpspeicherkapazitäten schaffen. Am Corbassière-See und an den erwarteten zwei Gauli-Seen würden relativ kleine Staumauern ausreichen, der Triftsee wäre erst durch eine Staumauer von über 100 Metern Höhe optimal nutzbar. Der Leistungsgewinn durch diese Projekte liegt bei einigen hundert Megawatt (Corbassière 500 MW, Gauli/Trift 500 MW) [8].

Rechtlich gesehen sind Gletscherseen gleich wie «kulturunfähiges Land» zu behandeln und stehen jedermann zur nichtkommerziellen Nutzung offen. Sie stehen unter der Hoheit des jeweiligen Kantons (ausser z.B. im Kanton Wallis, der seine Rechte an die Gemeinden delegiert hat). In der Regel sind die neu entstehenden Gletscherseen öffentliche Gewässer. Nur wenn sich ein Privatbesitz von Gletschern nachweisen lässt, kann ein See Privateigentum sein. Normalerweise sind es Kantone oder Gemeinden, die Konzessionen für Wasserrechte an solchen Seen verleihen.

Viele neue Seen entstehen in geschützten Gebieten (z.B. UNESCO-Welterbe Aletsch-Jungfrau), sodass zusätzliche Aspekte bei den Nutzungsüberlegungen beachtet werden müssen: Fragen zu wasserrechtlichen Konzessionen (Umfang, Erneuerung, Heimfall etc.), zum Gewässerschutz (Restwassermengen, Schwall-Sunk, Gewässerraum etc.) sowie zum Natur- und Landschaftsschutz [9]. Und schliesslich ist aus heutiger Sicht nicht abzusehen, in welchem Mass alpine Stauseen in 50 Jahren auch Wasser für andere Nutzungen bereitstellen müssen – etwa für die landwirtschaftliche Bewässerung in den inneralpinen Trockentälern, die Schneebereitung, den für die Gewässerökologie nötigen Mindestabfluss der Fliessgewässer (ausreichende Vorflut für ARA) oder gar die Trinkwasserversorgung [8].

Auch wenn der grösste Teil der 500 bis 600 möglichen Seen im Gletschergebiet heute nur als Geländevertiefung auf Simulationskarten existiert, über Nutzung und Schutz wird bereits intensiv nachgedacht. So ist eine Staumauer am Triftsee bereits fester Bestandteil der Planungen der Kraftwerke Oberhasli [10]. Nicht unterschätzt werden darf auch die Gefahr, die von solchen Seen ausgeht: Hangrutschungen im Uferbereich, die durch den Schwund von Gletschern und Permafrost wahrscheinlicher werden, können Flutwellen mit grossem Gefahrenpotenzial für die Unterlieger auslösen. Schon aus diesem Grund kann man neue Seen im Gletschergebiet nicht sich selber überlassen, sondern muss sie vorausschauend sichern.

cheranlagen mit einer Pumpleistung von insgesamt 1400 Megawatt (MW) betrieben [11]. Mit drei derzeit im Bau befindlichen Neuanlagen (Nant de Drance, Linth-Limmern, Hongrin-Léman) wird die Pumpspeicherkapazität bis ins Jahr 2017 mehr als verdoppelt werden [11]. Ob es sich lohnt, weitere Speicherkraftwerke in Pumpspeicheranlagen umzubauen, hängt von den internationalen Strommärkten und der Entwicklung der Strompreise ab. Derzeit wird ein solcher Ausbau von der Strombranche der Schweiz wegen niedriger Strommarktpreise als nicht profitabel eingeschätzt, mehrere bereits genehmigte Grossprojekte sind einstweilen sistiert [11]. Mögliche Fördermechanismen werden evaluiert [12].

Potenzielle Konflikte und Synergien

Konflikt Wasserkraft/Fliessgewässerökologie

Die Auswirkungen der Gewinnung von Wasserkraftstrom auf Fliessgewässer sind je nach genutzter Technologie sehr unterschiedlich (Laufkraftwerke siehe S. 44). Bei Speicherkraftwerken, die 48,3% des Wasserkraftstroms erzeugen, wird das den Fliessgewässern entnommene Wasser praktisch vollständig zurückgeleitet. Wann die Rückleitung erfolgt, wird in erster Linie durch die Nachfrage nach elektrischer Energie bestimmt. Den Fliessgewässerbereichen zwischen Stausee und Rückleitungsort wird nur noch wenig Wasser zudotiert, ihr hydrologischer Charakter und ihr Geschiebehaushalt ändern sich grundlegend, was erhebliche Auswirkungen auf die aquatischen Lebensgemeinschaften hat. Einige Gewässerabschnitte sind sogar durchgehend von Zuflüssen aus ihrem Einzugsgebiet abgeschnitten, sodass sie verlanden.

Restwassermengen

Die gesetzlichen Regelungen zum Erhalt von Restwassermengen bedeuten Einschränkungen bei der potenziell nutzbaren Wasserkraft. Restwasserstrecken müssen bei laufenden Konzessionen laut GSchG Art. 80 Bst. 1 in dem Mass, wie keine Entschädigungsansprüche wegen verminderter Stromproduktion entstehen, saniert werden. Ordnen die Behörden weitergehende Massnahmen an – etwa

bei Fliessgewässern in besonders geschützten Gebieten –, werden die Nutzniessenden der Wasserkraft für diese Einschränkung entschädigt (Art. 80 Abs. 2 GSchG). Wenn Konzessionen auslaufen, können die Restwassermengen in der neuen Konzession angepasst werden und sind dann entschädigungsfrei.
Das Austarieren von Wasserkraftnutzung und den erforderlichen Restwassermengen ist einer der zentralen Konfliktpunkte der Wasserpolitik in der Schweiz. Insgesamt gibt es landesweit mehr als 1300 Restwasserstrecken, welche etwa 2700 km Flussstrecke ausmachen [13]. Alle Restwasserbereiche im Rahmen bestehender Konzessionen hätten bis Ende 2012 saniert werden sollen. Die Umsetzung durch die Kantone ist bis zum Ablauf der zwanzigjährigen Frist knapp zur Hälfte erfolgt [14]. Bei der Festlegung von Restwassermengen im Rahmen von Neukonzessionierungen gingen die kantonalen Behörden selten über die gesetzlichen Minimalwerte hinaus (Art. 31 Abs. 1 GSchG). Von der in Art. 33 GSchG verankerten Möglichkeit der Abflusserhöhung machten sie in 30% der Fälle Gebrauch, saisonal variable Restwassermengen wurden weniger verfügt [13].

Schwall-Sunk

Die Ökologie von Fliessgewässern wird auch durch die sehr unregelmässige Rückgabe des Wassers in die Flüsse beeinflusst (Schwall-Sunk-Effekt, siehe Bildpaar auf dieser Seite). Dabei fluktuiert der Abfluss zwischen Schwall und Sunk bis zu einem Verhältnis von 30:1 [13]. Durch die plötzlich erhöhte Strömung beim Schwall werden Tiere und Pflanzen mitgerissen und stranden beim nachfolgenden Niedrigwasser (Sunk). Besonders die Fischbrut und Jungfische sind betroffen, denn ihnen fehlen dadurch Nährtiere und geschützte Standorte. Ökologisch stark degradiert ist vor allem die Wasserwechselzone in flachen Uferbereichen, wo sich nur noch wenige Organismen halten können, die ein regelmässiges Trockenfallen tolerieren [15].
Gemäss einem Grobscreening des BAFU sind rund 1000 km Fliessgewässerstrecke durch mehr als 130 Kraftwerke potenziell von Schwallbetrieb beeinflusst. Die Rhone bis Genfersee, der Rhein bis Bodensee und der Ticino sind davon am stärksten betroffen. Die Abflussschwankungen durch Schwall-Sunk werden von den voralpinen Seen weitgehend gedämpft, weshalb primär die alpinen Flüsse betroffen sind [16].
Das 2011 in Kraft getretene revidierte GSchG schreibt die Sanierung von Schwall-Sunk-Effekten bis 2031 vor. In einem ersten Schritt sollen die Kantone bis 2014 Gewässerabschnitte mit hohem ökologischem Potenzial identifizieren, die durch Schwall-Sunk-Betrieb wesentlich beeinträchtigt sind und für eine Sanierung anstehen. Ein Kraftwerksbetrieb mit vermindertem Schwall-Sunk-Geschehen lässt sich etwa durch den Bau von Auffangbecken für das turbinierte Wasser erreichen. Damit wird der Schwall abgepuffert und die Wasserführung im Gewässer verstetigt.

Umstrittene Kleinwasserkraft

Eine Güterabwägung zwischen Stromproduktion und Gewässerökologie zeigt, dass kleine Wasserkraftanlagen im Verhältnis zu ihrem Stromertrag besonders hohe ökologische Einbussen verursachen. Ein Beispiel: die 202 kleinsten von 620 im April 2009 für die kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) angemeldeten Kleinwasserkraftanlagen liefern gerade 6% des Stroms [17]. Da davon auszugehen ist, dass jede solche Anlage einen Gewässerabschnitt beeinträchtigt, ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis aufgrund der geringen Stromausbeute bei Kleinstanlagen besonders ungünstig. Die Kantone wählen ihre Strategie für Kleinwasserkraftgesuche individuell, wie eine Übersicht über kantonale Planungen und Strategien zur Schutz- und Nutzungsabwägung zeigt [18]. Ein Sonderfall sind die Kantone Wallis und Graubünden, wo es keine kantonalen Ausschlusskriterien für Kleinwasserkraft gibt, da die Gewässerhoheit bei den Gemeinden liegt. Eine Möglichkeit, um Ausbau und Auswirkungen der Wasserkraft zu steuern, zeigt der Kanton Bern mit der Wasserstrategie von 2010 auf. Einige Flüsse sind für eine intensive Nutzung vorgesehen, andere werden von jedem Wasserkrafteingriff freigehalten (siehe hierzu auch die Bundesempfehlung zur Erarbeitung kantonaler Schutz- und Nutzungsstrategien im Bereich Kleinwasserkraft) [19].

Andere Konflikte

Auch wenn summarisch betrachtet die Wasserkraft kein Wasserverbraucher ist, entzieht sie vielen Flussabschnitten temporär Anteile ihres natürlichen Abflusses (siehe Abb. 2). Daher hat die Stromgewinnung durch Spei-

Links, Mitte: Die Produktion von Wasserkraft richtet sich nach dem aktuellen Strombedarf. Dies kann heftige Wasserstandsschwankungen hervorrufen (Schwall und Sunk). Das Bildpaar zeigt die Saane im Abstand von 90 Minuten. (Fotos Pro Natura)
Rechts: Kleine Wasserkraftanlagen verursachen im Verhältnis zu ihrem Stromertrag besonders hohe ökologische Einbussen: Kleinwasserkraftwerk Grob bei Buchs (SG).
(Foto TNC Consulting AG)

cherkraftwerke einen wesentlichen Einfluss auf andere Wassernutzungen am Unterlauf. Indem sie Fliessgeschwindigkeit, Temperatur und Abflussdynamik verändern, könnnen die Einleitung von gereinigtem ARA-Abwasser, die Kühlwassernutzung und die Freizeitnutzung (Ufergefahren bei Schwallbetrieb) erschwert oder unmöglich sein. Unmittelbar betroffen ist die Fischerei, da der Fischbestand sowohl durch Schwall-Sunk-Bedingungen als auch durch verminderte Wasserführung (Restwasser) beeinträchtigt ist.

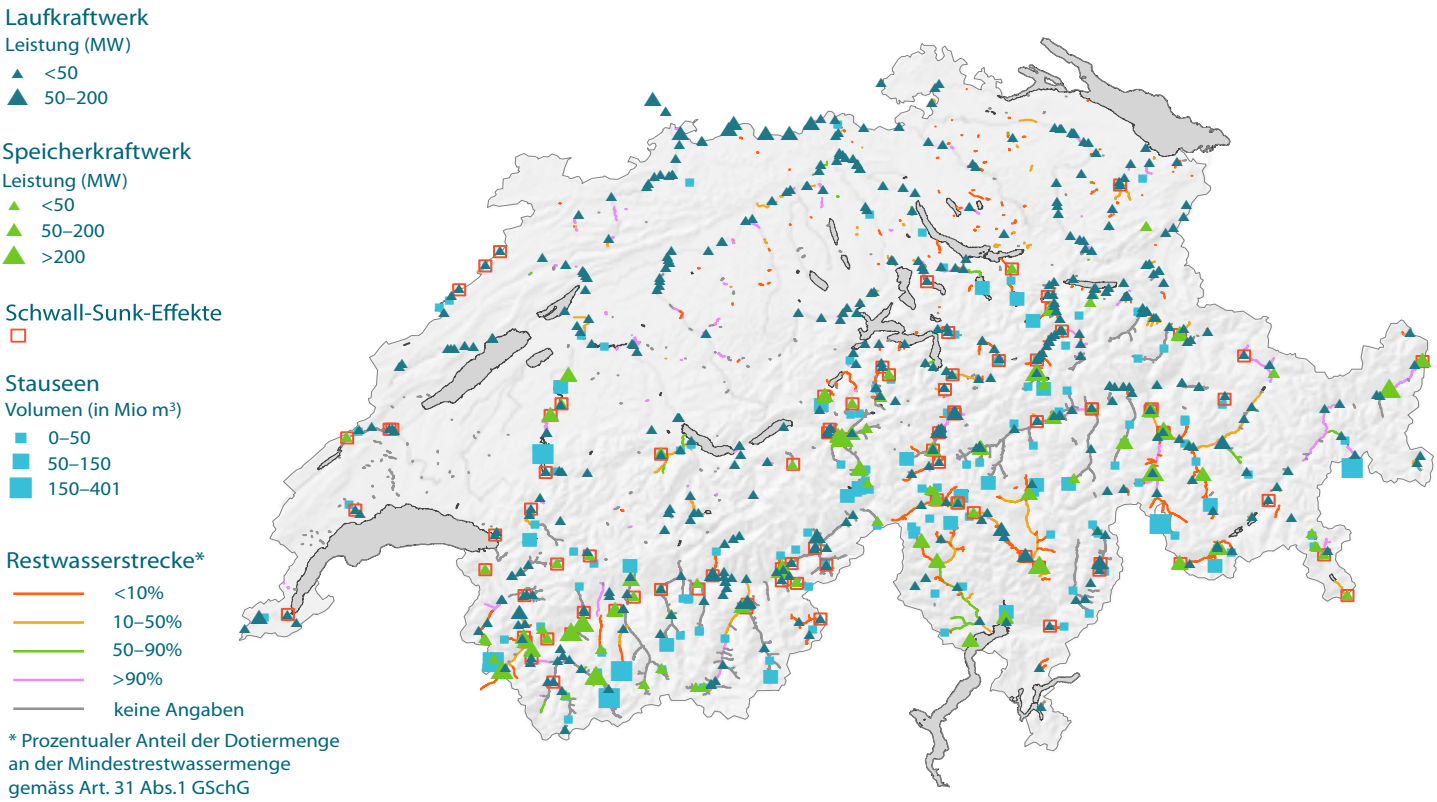
Synergie Wasserkraft/Hochwasserschutz

Speicherseen können auch einen gewissen Beitrag zum Hochwasserschutz leisten. Vor allem im Hochgebirge kontrollieren die Wasserkraftwerke einen erheblichen Teil des Abflusses. So konnten beim Aarehochwasser vom Oktober 2011 rund 6 Mio. m^3 Wasser in Stauseen zurückgehalten werden, entsprechend stieg der Spiegel des Brienzersees um rund 20 Zentimeter weniger stark an [26]. Die Hochwasserspitzen in der Rhone können durch Rückhalt in Speicherseen im besten Fall um 20 bis 25% reduziert werden [27]. Um dies zu ermöglichen, müssen die Stauseepegel vorausschauend niedrig gehalten werden («konservative Seebewirtschaftung») und Hochwassersituationen möglichst früh und zuverlässig prognostiziert werden.
Bei der Bewirtschaftung des Wasserstands der grossen regulierten Seen (alle ausser Boden- und Walensee) müssen die Interessen von Wasserkraft und Hochwasserschutz ebenfalls abgewogen werden. Während es für die Regulierung der meisten Seen Reglemente gibt, welche die jeweiligen Interessen berücksichtigen, stellt sich am grenzüberschreitenden Lago Maggiore die Situation schwieriger dar, da der Abfluss einseitig durch Italien kontrolliert wird.

Weitere Synergien

Prinzipiell kann ein Wasserspeicher im Gebirge sowohl zur Stromgewinnung als auch zur Beschneiung oder für andere Zwecke genutzt werden. In Zermatt stammt der Grossteil des Beschneiungswassers aus den Speicherseen und Wasserfassungen des Elektrizitätswerks Zmutt und der Anlage Grande Dixence [28]. Das NFP 61-Projekt MONTANAQUA hat sehr ausführlich und detailliert die unterschiedlichen Wassernutzungen und die Abhängigkeit von Speichern anhand der Region Crans-Montana analysiert (siehe Kasten S. 17).
Für Trockenperioden wird die Verwendung von Wasser aus Speicherseen auch für die landwirtschaftliche Bewässerung ins Gespräch gebracht. Bereits heute werden z.B. im Domleschg (GR) Bewässerungsanlagen gegen Bezahlung mit Wasser aus dem Stollen der Elektrizitätswerke der Stadt Zürich versorgt. Dadurch werden vor allem in lokalen Bächen die Restwassermengen gesichert. Auch in der Gemeinde Sent im Unterengadin können die Landwirtschaftsbetriebe bei Bedarf eine gewisse Wassermenge des lokalen Kraftwerks nutzen [29]. Und an der trockenen Nordflanke des Rhonetals wird Wasser aus einem Spei-

Abb. 2: Auswirkungen der Wasserkraft auf die Gewässer: Stauhaltung durch Kraftwerke (Lage der Speicher- und Laufkraftwerke über 300 kW) [20]) – Schwall-Sunk-Effekte [21] – Wasserrückhalt in Stauseen [22] – Unterschreitung von Restwassermengen [23]. Hintergrunddaten: [24], [25], [22]; Darstellung: [1].



chersee ausser für Wasserkraft auch für andere Zwecke eingesetzt (siehe Kasten unten). Solche multifunktionellen Nutzungen von Speicherseen dürften bei der Neukonzessionierung von Wasserkraftanlagen – gerade auch in Zusammenhang mit neu entstehenden Seen im Gletscherbereich – in Zukunft häufiger zum Zug kommen.

A2 | Mengenansprüche durch den Gewässerschutz

Aquatische Ökosysteme sind an die lokal gegebenen natürlichen hydrologischen Bedingungen angepasst. In Fliessgewässern sind bestimmte Restwassermengen ökologisch von hoher Bedeutung, aber auch für die Verdünnung und den Abbau von Schadstoffen sowie die Speisung verbundener Grundwasserleiter notwendig. Aus diesen Gründen muss die Wasserentnahme aus den Fliessgewässern kontrolliert erfolgen, und seit 1992 schreibt das Gewässerschutzgesetz für jedes Fliessgewässer die Festsetzung einer Restwassermenge vor. Auch das periodische Auftreten von Hochwasser ist für Fliessgewässer von zentraler Bedeutung, um die Dynamik natürlicher und naturnaher aquatischer Ökosysteme zu erhalten. Bleiben solche Abflussspitzen aus, können Feinsedimente abgelagert und Laich- und Futterplätze von Flusslebewesen zerstört werden. Bei künstlich erzeugten Hochwassern andererseits, welche im Tagesverlauf stark schwanken (Schwall-Sunk-Betrieb bei Wasserkraftwerken), werden die Lebewesen bei Schwall fortgespült und können bei Sunk im Uferbereich stranden.

Über den Wasserinhalt von Seen kann ebenfalls nicht beliebig verfügt werden, denn schon eine Absenkung des Wasserspiegels um wenige Zentimeter kann ökologische Schäden an der Ufervegetation verursachen oder Laichplätze im Flachwasser trockenle-

Alpine Wasserbewirtschaftung in Zeiten von Knappheit und globalem Wandel: Erkenntnisse aus dem NFP 61-Projekt MONTANAQUA

Das NFP 61-Forschungsprojekt MONTANAQUA hat eine Bilanzierung der heutigen und zukünftigen Wasserverfügbarkeit und Wassernachfrage für die alpinen touristischen Gemeinden eines inneralpinen Trockentals im Wallis mit starkem demografischem und touristischem Wachstum unternommen. Sie zeigt exemplarisch, warum die multifunktionelle Nutzung von Speicherseen in Zukunft eine wichtige Option der Wasserwirtschaft werden kann [30].

Das Untersuchungsgebiet umfasste sechs Gemeinden im Berggebiet und weitere fünf in tieferen Lagen. Trotz gesamthaft ergiebiger Wasserressourcen leidet das Gebiet an den Folgen unkoordinierter Wassernutzung. Die Wasserbewirtschaftung ist auf Gemeindeebene organisiert, wobei die Verfügbarkeit bisher als mehr oder weniger konstant und ausreichend vorausgesetzt wurde. Das Wasser stammt aus zwei Einzugsgebieten, eines davon wird durch einen Stausee (Barrage de Tseuzier) hydroelektrisch genutzt. Jahrzehntelang wurde die wasserwirtschaftliche Infrastruktur von den Gemeinden ohne übergreifende Planung ausgebaut, was Ressourcen und Ökologie immer stärker beanspruchte, aber auch hohe Infrastrukturkosten mit sich brachte. Die Forschenden halten einschneidende Änderungen in der regionalen Entwicklungsplanung für nötig.

Vielfältige Interessen melden Wasseransprüche an, die in einer Gesamtplanung koordiniert werden sollten: die Bewässerung über Suonen (Wiesen, Rebberge, Golfplätze) und mit Leitungswasser (Gärten, Rasen), die Wasserkraft, die Beschneiung und die Trinkwasserversorgung. Wegen saisonaler Knappheit wird Wasser aus der ursprünglich nur für die Wasserkraftgewinnung gebauten Barrage de Tseuzier gegen Bezahlung auch für andere Zwecke verwendet (Trinkwasser, Beschneiung, Golfplätze). Schliesslich müssen in den Fliessgewässern die ökologisch notwendigen Restwassermengen verbleiben.

Wassernutzungen in Crans-Montana-Sierre:

- Rund 88% der gesamten genutzten Menge dienen der Elektrizitätsgewinnung (60–80 Mio. m^3/a).
- Bewässerung, Trinkwasser, Beschneiung machen ca. 12% der genutzten Menge aus (10,5–13,5 Mio. m^3/a).
- Innerhalb dieser 12% stellt die Trinkwasserversorgung den grössten Nutzer dar (4,65 Mio. m^3/a), wobei ein grosser Teil des Trinkwassers ebenfalls der Bewässerung dient.
- Der maximale Wasserverbrauch (zum grossen Teil für die Bewässerung) steigt während trockener Jahre stark, die Bewässerungsmengen waren im Trockenjahr 2011 doppelt so hoch wie 2010. Der Druck auf die Wasserressourcen wird im Winter (Touristensaison) und in der zweiten Sommerhälfte (Bewässerung) generell steigen.

Szenarien für die Wasserbilanz der Region um 2050 zeigen, dass ohne Anpassung der Wassernutzungen auch in normalen Jahren regionale Engpässe auftreten können. In Trockenjahren, in denen die Verfügbarkeit ab- und der Verbrauch stark zunehmen, werden sich die Engpässe akzentuieren. Um dem vorzubeugen, müsste bereits heute eine zwischen den Gemeinden koordinierte Wassernutzungsplanung initiiert werden. Dies wird aber von den Gemeinden – wohl auch wegen des weiten Zeithorizonts – nicht unterstützt. Einstweilen hofft man auf eine weitere Ausdehnung des Wasserbezugs («supply management»), wobei die Barrage de Tseuzier oder ein weiterer noch zu bauender Speicher eine entscheidende Rolle spielen.

Links: Hochwasser könnten in Zukunft häufiger auftreten; zugleich nehmen mit dem Wert der Infrastrukturen und Gebäude auch die Schadenssummen zu. (HYDROSERV)
Mitte: Hochwasserschutz lässt sich einerseits durch bauliche Massnahmen betreiben, … (HYDROSERV)
Rechts: … andererseits kann der Wasserrückhalt in der Landschaft auch durch erweiterte Gewässerräume oder Aufforstungen im Einzugsgebiet verbessert werden. Artifizielles Landschaftsbild auf der Basis von Rechenmodellen. (HYDROSERV)

gen. Im Sommer beträgt der Spielraum beispielsweise am Vierwaldstättersee maximal 40 cm [31] und am Thunersee 50 cm [32].
Kleingewässer wie Tümpel folgen einem ganz eigenen Jahresrhythmus mit sommerlicher Austrocknung. Erst dieser natürliche Wechsel der Wasserführung gewährleistet den hohen ökologischen Wert dieser inzwischen sehr seltenen Lebensräume. Aus ökologischer Sicht ist der Erhalt der entsprechenden hydrologischen Dynamik sehr relevant.
Grundwasser muss so bewirtschaftet werden, dass die von ihm gespeisten aquatischen Ökosysteme (Feuchtgebiete, Moore) ausreichend mit Wasser versorgt werden. Über die Empfindlichkeit der Biozönosen im Grundwasser gegenüber einer längeren Absenkung des Wasserspiegels ist bisher wenig bekannt. Da der Pegel mancher Grundwasserleiter auch natürlicherweise saisonal schwankt, ist davon auszugehen, dass die Biozönosen im Untergrund sich teilweise an diese Dynamik anpassen und regenerieren können [33].

Potenzielle Konflikte und Synergien

Konflikte und Synergien durch Restwasseranforderungen

Die Vorgabe von Restwassermengen betrifft einerseits die Wasserkraft (siehe S. 13), aber auch andere Nutzungen wie z.B. die landwirtschaftliche Bewässerung (siehe S. 20). Direkte Entnahmen für die Trinkwasserversorgung finden nur an grossen Flüssen statt, wo normalerweise keine Restwasserprobleme zu erwarten sind. In besonderen Fällen kann auch die Gewinnung von Trinkwasser aus Grundwasser eine Unterschreitung von Restwassermengen hervorrufen (siehe S. 25). Dagegen schützen Restwassermengen die Fischbestände und wirken sich positiv auf die Fischerei aus.

Synergie und Konflikt Revitalisierung/ Hochwasserschutz

Die bedeutendste Synergie ergibt sich mit dem Hochwasserschutz, da gemäss Wasserbaugesetzgebung der Hochwasserschutz naturnah ausgeführt werden muss und den Gewässern ausreichend Raum gewähren soll. Bei Hochwasser können erweiterte Gewässerräume einen Teil des Abflusses vorübergehend zurückhalten und so die Pegel flussabwärts verstetigen. Im Kanton Zürich kommen von den bis 2091 anvisierten 800 km Flussrevitalisierungen rund 400 km auch unmittelbar dem Hochwasserschutz zugute [34]. Es kann jedoch auch zu Konflikten kommen, wenn aufgrund der Revitalisierung der Grundwasserspiegel steigt. Der Grund ist, dass der Grossteil der Siedlungsentwicklung nach den Flussbegradigungen erfolgte und somit auf künstlich abgesenkten Grundwasserspiegeln basiert. Dies führt zum Beispiel im Thurgauer Thurtal dazu, dass bestimmte Flussabschnitte wegen tief liegender Bauten von der Revitalisierung ausgenommen bleiben müssen [35]. Ausserdem gilt der Grundsatz, dass Revitalisierungen nicht zu einer Verminderung der Hochwassersicherheit führen dürfen.

A3 | Mengenbewirtschaftung durch den Hochwasserschutz

Modellierungen des Abflussverhaltens von über 180 mittelgrossen Einzugsgebieten in der Schweiz auf Basis von Klimamodellen weisen darauf hin, dass sich Hochwasserspitzen künftig akzentuieren könnten. Dies hängt vor allem mit der bei höherer Temperatur steigenden Schneefallgrenze zusammen: Wenn in höheren Regionen der Niederschlag vermehrt als Regen fällt, läuft das Wasser rascher oberflächennah ab [36]. In vielen höher gelegenen Einzugsgebieten ohne Gletschereinfluss wird das Abflussregime von nival auf pluvial wechseln, wodurch die Variabilität des Abflusses zu- und die Prognosegenauigkeit abnimmt. Die Hochwassersaison verlängert sich, Extremereignisse könnten häufiger werden [36].
Für den Hochwasserschutz stehen grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten offen, um auf das möglicherweise zunehmende Hochwasserrisiko zu reagieren. Einerseits können wasserbauliche Massnahmen getroffen werden, andererseits könnte die Landnutzung im Einzugsgebiet so verändert werden, dass durch einen verbesserten Wasserrückhalt das Risiko für Hochwässer vermindert wird. Das NFP 61-Projekt HYDROSERV hat die Möglichkeiten und Akzeptanz dieses Ansatzes im Einzugsgebiet der Kleinen Emme untersucht (siehe Kasten S. 19). Obwohl Aufforstungen zugunsten des Hochwasserschutzes von der Bevölkerung akzeptiert werden, zeigten Analysen, dass deren Effekte auf den Wasserrückhalt relativ gering sind. Es wurde deutlich, dass unter den heutigen (agrar-ökonomischen) Bedingungen das theoretisch notwendige Ausmass an Aufforstung nicht realisierbar ist, da die Anreize zur Aufforstung selbst auf margi-

Hochwasserschutz durch Anpassung der Landnutzung?
Erkenntnisse aus dem NFP 61-Projekt HYDROSERV

Massgeblich für politische Entscheidungen zum Hochwasserschutz ist letztlich das öffentliche Schutzbedürfnis gegen Hochwasser. Aufschlussreich ist in diesem Zusammenhang die im Rahmen des Projekts HYDROSERV bearbeitete Fragestellung, ob Nutzungskonflikte im Bereich Hochwasserschutz mittels Zahlungen für Ökosystemdienstleistungen abgeschwächt oder gar gelöst werden können. Dazu wurden verschiedene Optionen für den Umgang mit Hochwassergefahren im Einzugsgebiet der Kleinen Emme (478 km^2) im Kanton Luzern auf ihre Akzeptanz in der Bevölkerung untersucht [37]. Zur Auswahl standen verschiedene Grade der – potenziell hochwasservermindernden – Aufforstung am Oberlauf (Status quo: 35% Wald, Zunahme der Waldfläche um 20%, 40%, 60%), der Siedlungsentwicklung (leichte Abnahme, Status quo, leichte und starke Zunahme) und der Gewässerraumerweiterung (Status quo, baulicher Hochwasserschutz, Flussaufweitung mit Retentionsflächen, baulicher Schutz plus Flussaufweitung). Zusätzlich wurde angegeben, welche jährlichen Pro-Kopf-Beiträge (Steuererhöhungen bzw. Steuersenkungen) die jeweiligen Massnahmen für die betroffene Bevölkerung verursachen würden. Ein Fragebogen mit den verschiedenen Optionen wurde an 3200 Bürgerinnen und Bürger verschickt, woraus 547 auswertbare Antworten resultierten. Rund ein Sechstel der Antwortenden hatte beim letzten Hochwasser 2005 persönliche Schäden erlitten. Deutlich wurde, dass die Bevölkerung durchgehend eine Verbesserung des Hochwasserschutzes wünscht. Welche Massnahmen dafür zu ergreifen sind, ist wesentlich strittiger. Je nach persönlichen Präferenzen reichen diese von flächenintensiven Aufweitungen, Retentionsflächen und Aufforstungen bis zu konventionellen harten Hochwasserbauten ohne Anpassung der Bewirtschaftung im Einzugsgebiet. Die Grundhaltung zum Hochwasserschutz entfernt sich aber offenbar von einer Unterstützung rein technischer Lösungen hin zu Varianten, die den Flüssen – selbst auf Kosten intensiv genutzter Flächen – wieder mehr Raum zugestehen.

Auffällig ist die teilweise extrem hohe Streuung der Präferenzen der antwortenden Personen (siehe Abb. 3). Eine mögliche Erklärung ist laut den Forschenden der generationenübergreifende Zeithorizont von 2100. Die Mehrheit der Befragten wird daher nicht von allen Vorteilen selber profitieren. Tendenziell wird eine hochwasservermindernde Aufforstung des derzeitigen Waldbestandes in entlegenen Gebieten am Oberlauf um 20% bis 40%, aber nicht 60% befürwortet. Weiter ist die befragte Bevölkerung zwar bereit, zusätzliche Kosten für Hochwasserschutzmassnahmen auf sich zu nehmen, die durch ein leichtes Wachstum von Bevölkerung und Siedlungsfläche verursacht werden, nicht aber Mehrkosten infolge starken Siedlungswachstums. Selbst einer Verkleinerung der Siedlungsfläche und einer Verminderung des Wirtschaftswachstums zugunsten des Hochwasserschutzes steht (gemessen an der Zahlungsbereitschaft) gut die Hälfte der Befragten positiv gegenüber.

Zusätzlich untersuchte HYDROSERV die Effektivität von Aufforstungen für den Wasserrückhalt bei Hochwasser und deren Umsetzbarkeit im heutigen Agrarsystem. Analysen mit hydrologischen Modellen zeigten, dass zusätzliche Rückhalteeffekte durch Aufforstungen eher gering und zudem mit grossen Unsicherheiten behaftet sind [38]. Auch ist mit dem heutigen liberalen Agrarsystem in den nächsten Jahren nur eine sehr geringe natürliche Verwaldung zu erwarten [39]. Zusätzliche Anreize zur Aufforstung könnten Zahlungen für Aufforstungsflächen schaffen. Allerdings könnte selbst der höchste, im Rahmen des Projektes als zu rechtfertigen erachtete Beitrag (jährlich 900 CHF/ha) die landwirtschaftlichen Erträge dieser Flächen nicht ersetzen. Mit einer solchen Zahlung liesse sich lediglich eine Zunahme der Waldfläche von ca. 10% realisieren.

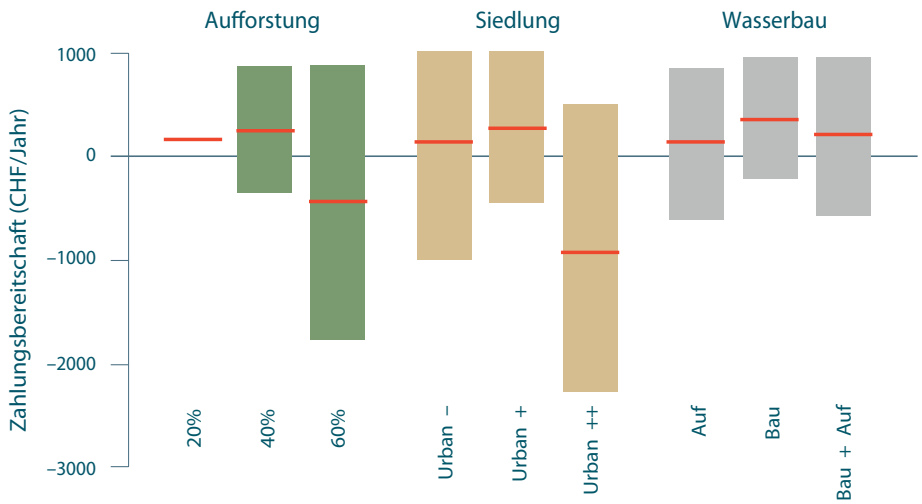


Abb. 3: Im Rahmen von HYDROSERV ermittelte Zahlungsbereitschaft der Bevölkerung für zusätzliche Massnahmen zum Hochwasserschutz pro Jahr und Person in CHF [37]. Abgefragt wurde die Zahlungsbereitschaft für 20%, 40% und 60% mehr Wald als heute, für unterschiedliche Siedlungsentwicklung in den Gefahrenbereichen (Urban –: Siedlungsrückgang, Urban +: leichte Siedlungszunahme, Urban ++: starke Siedlungszunahme) sowie für drei verschiedene wasserbauliche Hochwasserschutzmassnahmen (Auf: Aufweitungen, Bau: Umsetzung eines geplanten Wasserbauprojekts, Bau + Auf: Kombination des geplanten Wasserbauprojekts mit Aufweitungen). Die heutige Situation bildet die Referenz mit einer Zahlungsbereitschaft von 0 CHF (Datenquelle HYDROSERV) [37].

Links: In einigen Gebieten der Schweiz übersteigt der Wasserbedarf der Landwirtschaft die in den Bächen verfügbaren Wassermengen schon heute: intensive landwirtschaftliche Nutzung in der Broye. (Foto Reportair)
Mitte: Bei der Bewässerung mit Sprinklern verdunstet ein grosser Teil des Wassers, bevor es den Pflanzen zugute kommen kann. (AGWAM)
Mitte: Wie viel Wasser Landwirte benötigen, hängt von der Wahl der Kulturen, aber auch von der Bodenbearbeitung ab. (Foto Jürg Fuhrer)

nalen Ertragsflächen im Vergleich zu landwirtschaftlichen Ertragsmöglichkeiten zu gering ausfallen würden. Daher werden auch zukünftig bauliche Massnahmen (inkl. Retentionsflächen) im Zentrum stehen, die aber durch ein sektorenübergreifendes Landnutzungsmanagement ergänzt werden sollten. Dieses Kapitel befasst sich mit dem Einfluss solcher Massnahmen auf die Wassermenge. Die hydromorphologischen Auswirkungen des Hochwasserschutzes werden ab S. 45 beschrieben.

Flussbaumassnahmen
Die Bauwerke und Massnahmen des Hochwasserschutzes entfalten nicht nur bei Hochwasser ihre Wirkung, sondern auch bei normalen Flusspegeln. Ob sie sich positiv oder negativ auf die verfügbaren Wassermengen auswirken, hängt von deren Ausgestaltung ab. Die Schaffung von Retentionsräumen im Rahmen von Revitalisierungen und generell die Aufweitung von Flüssen verlangsamen die Abflüsse und erhöhen den Wasserrückhalt in der Fläche. Umgekehrt bewirken technische Massnahmen zur Abflussbeschleunigung (Einengung, Begradigung) tendenziell eine Absenkung der Flusssohle und des Grundwasserspiegels und verringern damit die in der Landschaft gespeicherte Wassermenge.

Entlastungsstollen
Zum Schutz von besonders hochwassergefährdeten Siedlungsgebieten werden auch unterirdische Stollen erstellt, die im Hochwasserfall das Wasser an den gefährdeten Bereichen vorbeileiten. So wurde nach wiederholten schweren Überschwemmungen des Lyssbachs im bernischen Seeland ein 2,5 km langer Tunnel gebaut. Der Stollen kann bis zu 65,8 m^3 Wasser pro Sekunde unter der Stadt Lyss durchführen, das Eineinhalbfache des Jahrhunderthochwassers vom Sommer 2007. Unvermeidlicher Nebeneffekt eines solchen Stollens ist eine deutliche Abflussbeschleunigung und Verlagerung der Hochwasserspitzen flussabwärts. In der Folge reicht in der Alten Aare, in die der Lyssbachstollen schliesslich entwässert, bei Hochwasser die Abflusskapazität nicht mehr aus, sodass zusätzliche Hochwasserschutzmassnahmen notwendig werden. Im Rahmen des Natur- und Hochwasserschutzprojekts Alte Aare sind daher umfangreiche zusätzliche Hochwassermassnahmen vorgesehen [40].

Seeregulierung
Mit Ausnahme von Bodensee und Walensee sind sämtliche grösseren Schweizer Seen künstlich reguliert. Diese Regulierungen bieten u.a. die Möglichkeit, durch frühzeitiges Absenken des Wasserspiegels Speichervolumen für vorhergesagte Hochwasser zu schaffen. Allerdings sind die Handlungsspielräume bei den Seepegeln in der Regel sehr eng, da zahlreiche zum Teil widersprüchliche Ansprüche zu erfüllen sind (Natur- und Landschaftsschutz, Tourismus, Fischerei, Grundwasser, Stromproduktion). Die Regulierung des Wasserstands der grossen Seen unterliegt daher vielfältig austarierten Reglementen, die nicht nur die Seen selber, sondern auch den Hochwasserschutz an den Gewässern unterhalb einbeziehen.

Potenzielle Konflikte und Synergien

Konflikt Hochwasserschutz/ Trink- und Brauchwasser
Die meisten Flusstäler im Mittelland und in den Alpen sind unter anderem durch Hochwasserschutzbauten in ihrem hydrologischen Charakter stark verändert. Die Flusssohlen und damit die Grundwasserstände sind durch Hochwasserschutzdämme und Begradigungen deutlich abgesunken. Infolge des Baus von Wehren im Rahmen der 1. Thurkorrektion 1879 z.B. tiefte sich die Flusssohle bis 1921 um bis zu 4,8 Meter ein. Die Folgen für das Grundwasser wurden schon früh deutlich: 1909 wurde festgestellt, dass im Bereich ausgeprägter Sohlenerosion Grundwasseraufstösse und Sodbrunnen versiegten [41].

A4 | Mengenbewirtschaftung durch landwirtschaftliche Bewässerung

Der überwiegende Teil der landwirtschaftlichen Produktion in der Schweiz kommt heute ohne künstliche Bewässerung aus (95% der Fläche). Lediglich in den inneralpinen Trockentälern gibt es eine lange Tradition der Wiesen- und Flurbewässerung. Sie macht landesweit den grössten Anteil der Bewässerung aus [42], [43]. Im Mittelland wird vor allem dort bewässert, wo ein grosses Potenzial für Ackerbau und Spezialkulturen wie Freilandgemüse vorhanden ist und die Niederschläge den Bedarf der Kulturen nicht zu jeder Zeit decken (siehe Abb. 4). Die eingesetzte Technologie entspricht aber in vielen Fällen nicht dem bestmöglichen Stand einer effizienten

Technik, d.h.der Wasserverbrauch ist höher als nötig.
Zu den Kulturen, die heute regelmässig bewässert werden, gehören nebst Wiesen im inneralpinen Raum Gemüsekulturen, Beeren- und Obstanlagen, Kartoffeln, Reben und Getreide, während die Bewässerung von Zuckerrüben seltener nötig oder wirtschaftlich ist. Gemäss der Zusatzerhebung der Landwirtschaftlichen Betriebszählung des Bundesamtes für Statistik wurden im Jahr 2010 insgesamt 36183 ha landwirtschaftliche Nutzfläche bewässert [43]. Dies entspricht 59,3% der Fläche, die mit der vorhandenen Infrastruktur potenziell bewässert werden könnte (61 022 ha) und 3,4% der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche. Besonders hoch ist der Anteil bewässerter Flächen im Obstbau: Laut Angaben von Agroscope werden bei Äpfeln, die drei Viertel der Obstflächen ausmachen, 60% der Kulturen bewässert. Dabei gibt es grosse regionale Unterschiede: Während im Thurgau nur 5–10% der Obstkulturen bewässert werden, sind es im Genferseegebiet über 90% [44]. Abb. 4 macht die Schwerpunkte der Bewässerung in der Schweiz deutlich: Im Mittelland dominieren Gemüsebau und Erdbeeren, im Alpengebiet die Wiesenbewässerung, im Wallis und in der Waadt zusätzlich Obst und Reben.
Wo bewässert wird, geschieht dies entweder zur Ertragsteigerung (z.B. Wiesen in Trockengebieten), zur Ertragssicherung (Ackerkulturen, Freilandgemüse) oder zur Steigerung von Ertrag und Qualität (z.B. Weinbau, Obstbau). Auch Kulturen unter Regendächern werden bewässert (z.B. Tafelkirschen). Häufig werden grössere Wassermengen eingesetzt, als die Kulturen für ihr Wachstum benötigen. Mit effizienten Technologien wie etwa der Tropf- oder Unterkronenbewässerung lässt sich der Wassereinsatz bei gleichbleibendem Ertrag wesentlich vermindern. Bei Tröpfchenbewässerung werden etwa bei Kern- und Steinobst unter Regendächern lediglich rund 40 bis 80 mm pro Saison benötigt [45].

Wasserentnahmen für die Bewässerung

Von den Betrieben, die ihre Kulturen bewässern, verwenden 37,1% Wasser aus Bächen, Flüssen und Seen, 30,0% Grundwasser, 24,6% Leitungswasser und 8,3% Wasser anderer Herkunft [43]. Beim Grundwasser sollen Entnahmen, die längerfristig die Neubildung übersteigen, laut Artikel 43 GSchG unterbleiben. Dies kann allerdings nur gewährleistet werden, wenn die Kantone die Wasserentnahmen der Landwirtschaft überwachen. Die Meldung der genutzten Wassermengen durch die Landwirtschaftsbetriebe ist zwar in den meisten Kantonen Pflicht, wird aber von den kantonalen Behörden in der Regel nicht eingefordert. Kürzlich hat der Kanton Thurgau eine flächendeckende Erhebung der landwirtschaftlichen Wasserentnahmen in Angriff genommen [46]. In den Bergkantonen Graubünden und Wallis obliegt die Bewilligung und Überwachung den Gemeinden. Einige Kantone machen zusätzliche Auflagen, der Kanton Schaffhausen etwa verlangt bei Entnahmen aus dem Grundwasser generell Tropfbewässerung [47]. Bei Wasserentnahmen aus Flüssen müssen die Restwassermengen gesichert sein. Allerdings können die Kantone gemäss Artikel 32 Bst. d GSchG «in Notsituationen», d.h.bei Trockenheit, die Restwassermengen zugunsten der landwirtschaftlichen Bewässerung tiefer ansetzen. Um negative Umweltauswirkungen in diesen Situationen zu vermeiden, prüft das BLW unter anderem, wie sich trockenheitsbedingte Notsituationen in der Landwirtschaft durch Ertragsausfallversicherungen am besten abdecken und zugleich die Gewässer vor übermässigen Entnahmen schützen lassen [48]. Bei grossen Seen (Genfersee, Neuenburgersee, Bodensee) geht man bisher von einer praktisch unbegrenzten Nutzbarkeit für die Bewässerung aus. So wurde etwa ein Bewässerungsprojekt mit Entnahmen aus dem Neuenburgersee durch den Kanton Freiburg bewilligt und durch den Bund subventioniert, ohne dass die Auswirkungen auf den See in längeren Trockenperioden bekannt sind [49]. Die Entnahmemengen dieses Projekts werden nicht konkretisiert, es handelt sich aber um eine deutliche Ausweitung des Wasserangebots, denn die potenzielle Bewässerungsfläche konnte von 260 ha auf 792 ha verdreifacht werden.
Der zukünftige landwirtschaftliche Wassereinsatz wird durch Klima, Agrarpolitik und Marktbedingungen bestimmt werden. Einerseits steigt der potenzielle Wasserbedarf der Kulturen bei erhöhten Temperaturen aufgrund der stärkeren Verdunstung (siehe Abb. 5). Bei gleichbleibenden oder gar abnehmenden Niederschlägen im Sommer und besonders bei Sommerdürren führt dies zu Bodenwasserdefiziten und damit zu erhöhtem Zusatzwasserbedarf. Andererseits können auch Qualitätsanforderungen des Marktes vermehrte Bewässerung nach sich ziehen (z.B. Kartoffeln für die Chipsproduktion, die gleichbleibende Bodenfeuchte benötigen).
Wie sich die bewässerte Fläche zukünftig entwickelt, hängt auch von der Nachfrage nach bewässerungsintensiven einheimischen Produkten ab. Bleibt der heutige Eigenversorgungsgrad für landwirtschaftliche Produkte bestehen, so würde allein aufgrund des vom Bundesamt für Statistik erwarteten Bevölkerungswachstums von heute 8 auf bis zu 11 Millionen im Jahr 2050 der Produktionsbedarf und damit je nach Produktionsweise der Wasserbedarf kräftig steigen.
Die Rolle von Gewächshäusern bei der Nachfrage nach Bewässerungswasser ist derzeit schwierig abzuschätzen, dürfte aber in Zukunft zunehmen, denn Gewächshauskulturen sind ganz von künstlicher Wasserzufuhr abhängig. Die Anbaufläche von Gemüse unter Glas ist in den vergangenen Jahren kontinuierlich gewachsen (2011: 1043 ha) [50]. Im Gemüsebau werden je nach Kultur zwischen 200 und 500 mm Wasser benötigt.

«Zuerst denkt man, Bewässerung ist die Lösung: Wenn der Wasserbedarf steigt, dann bewässert man eben, um die Erträge zu sichern. Aber das kann nicht funktionieren, weil wir in Zukunft weniger Wasser haben werden. Es kommt darauf an, die Landwirtschaft weniger wasserbedürftig zu machen. Das verfügbare Wasser muss effizienter genutzt werden.»

Jürg Fuhrer
Acroscope

Mehr dazu im AGWAM unter www.nfp61.ch

Abb. 4: Regionale Bedeutung der Bewässerung und wichtigste bewässerte Kulturen. Die Einfärbung der Kantone entspricht dem Prozentsatz der bewässerten landwirtschaftlichen Nutzfläche. Die Balken geben die hochgerechneten kantonalen Bewässerungsflächen nach Kulturart an, die Zahl darüber die Gesamtfläche bewässerter Kulturen in Hektar im jeweiligen Kanton [51]. Zudem ist die räumliche Verteilung von Suonen/Bisses eingefügt [52]. Hintergrunddaten: [53]; Darstellung: [1].

Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche (%)

- 0,0–1,0
- 1,1–3,0
- 3,1–6,0
- 6,1–28,9

Bewässerte Fläche nach Kulturart

2900

- Getreide
- Mais
- Kartoffeln
- Zuckerrüben
- Gemüse/Erdbeeren
- Obst
- Reben
- Grünland

Suone/Bisse

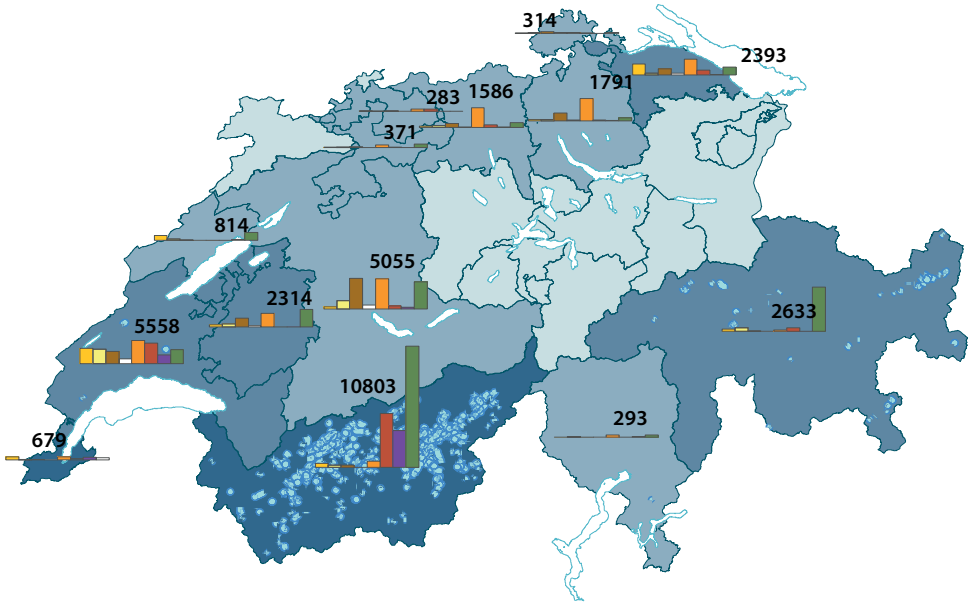
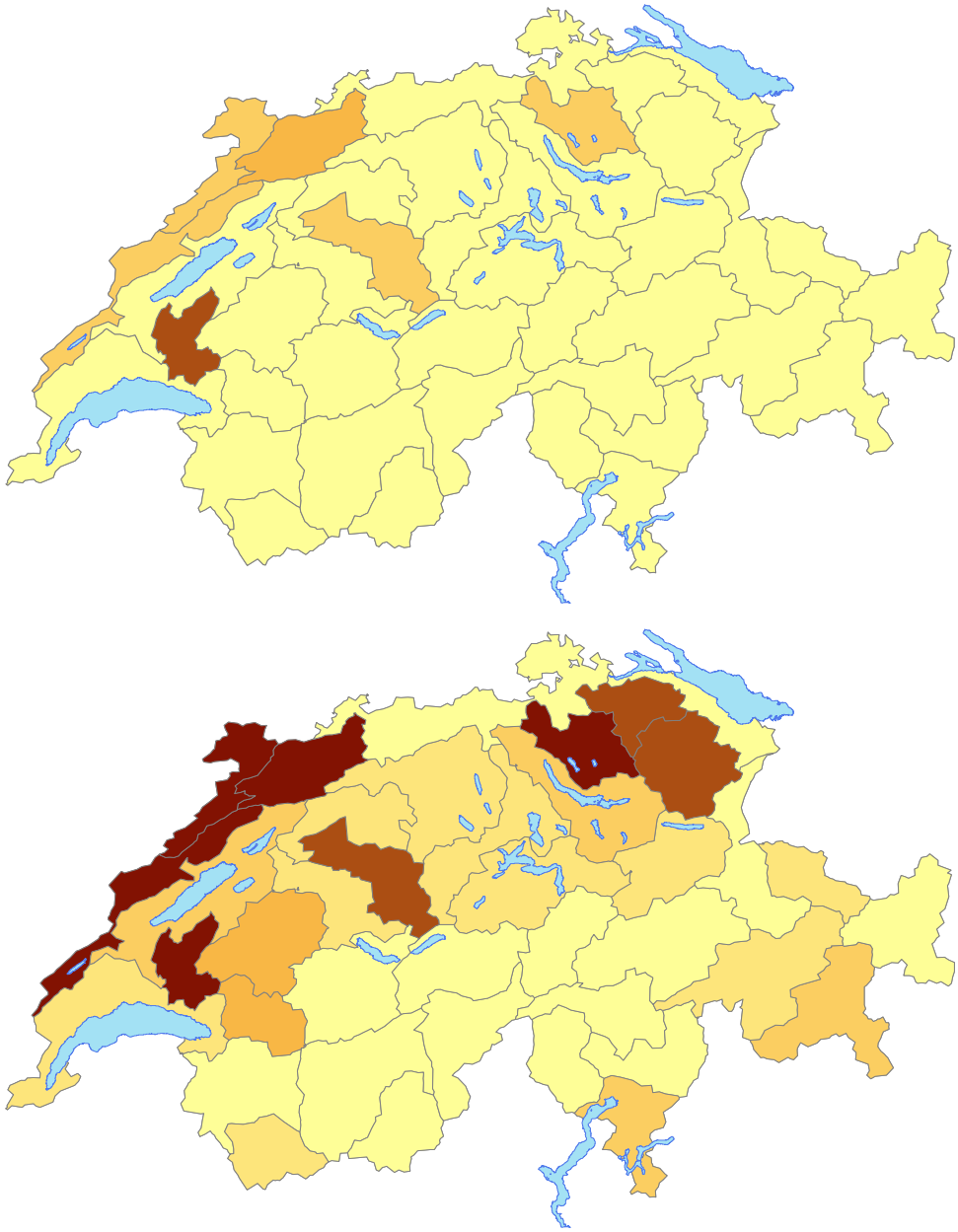


Abb. 5: Einfluss der Witterungsbedingungen auf den landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarf in Schweizer Flusseinzugsgebieten: potenzieller Bewässerungsbedarf in den Sommermonaten (JJA) in Prozent des Dargebots (Abflussvolumen Flüsse); oben für die Periode 1981–2010, unten für das Jahr 2003. Bei der Berechnung wurde davon ausgegangen, dass die Restwassermengen (Q347) nicht für die Bewässerung zur Verfügung stehen und die Bewässerungseffizienz 70% beträgt [54].

Bedarf vs. Dargebot (%)1981–2010 (oben) bzw. 2003 (unten)

- <1
- 1–2
- 2–5
- 5–10
- 10–15
- 15–25
- >25



Die Erfahrung des Trockenjahrs 2003 und des trockenen Frühjahrs 2011 hat verschiedene Entwicklungen in Gang gesetzt, deren Auswirkungen noch schwer abzuschätzen sind. In Erwartung höherer Temperaturen und häufigerer Trockenphasen empfiehlt die Agrarberatung, künftig angepasste Kulturen und Sorten zu verwenden. Weiter sollen Ackerbaumethoden zur Anwendung kommen, die Wasserverluste mindern und so Feuchtigkeit im Boden bewahren sollen. Hinzu kommt, dass Landwirtschaftsbetriebe zunehmend auf profitablere Kulturen mit durchgehendem Bewässerungsbedarf setzen. Bewässerungsintensive Kulturen werden teilweise auch dadurch bevorzugt, dass ihr Anbau über Versorgungssicherheitsbeiträge bzw. Einzelkulturbeiträge gestützt wird [55].

Regional befinden sich verschiedene grössere Wasserbeschaffungssysteme ausschliesslich für die Landwirtschaft in Planung oder bereits im Bau (Broye/Neuenburgersee, Syndicat d'Arrosage de Nyon et Environs/Genfersee, Furttal/Limmat, Seeland/Aare, Thurgau/Bodensee). Der Kanton Waadt schlägt vor, das Bewässerungswasser künftig auch den Seen (Neuenburgersee, Genfersee) zu entziehen [56].

Das Potenzial zur Verminderung des Wassereinsatzes durch effiziente Technologien sollte bei jeder Investition in Bewässerungsinfrastruktur, aber auch bei der Vergabe entsprechender Entnahmekonzessionen ausgeschöpft werden [47]. In Gebieten mit häufiger Trockenheit und bei nachgewiesenen, überdurchschnittlichen Ertragseinbussen unterstützt der Bund mit der Strukturverbesserungsverordnung (SVV) fixe Bewässerungseinrichtungen zur Ertrags- und Qualitätssicherung. Bundeszuschüsse für die Bewässerung sind auch möglich, um das inländische Angebot für Obst, Gemüse, Kartoffeln und weitere Spezialkulturen auf die aktuelle Nachfrage auszurichten. Bedingung ist wiederum der Einsatz energie- oder wassersparender Bewässerungstechnologien.

Sonderfall Wiesenbewässerung

In den inneralpinen Trockentälern Graubündens und des Wallis sind Wasserkonflikte zwischen Landwirtschaft, Trinkwasserversorgung, Wasserkraft und ökologisch erforderlichen Restwassermengen bereits seit Langem Realität [57]. In zahlreichen Regionen Graubündens gelten Wiesen als bewässerungsbedürftig, doch fehlen Angaben, ob das benötigte Wasser nachhaltig aus den lokalen Gewässern bereitgestellt werden kann [58]. Im Unterengadin beschloss die Gemeinde Sent aufgrund der Erfahrung von 2003 den Aufbau eines neuen Bewässerungssystems. Die Nachbargemeinde Ftan möchte die bewässerten Flächen nach Möglichkeit verdoppeln [57]. Wie die alpine Bewässerungswirtschaft auf eine zukunftsfähige Basis gestellt werden könnte, war eine der Forschungsfragen des NFP 61-Projekts WATERCHANNELS (siehe Kasten).

Um die Diskussion um eine nachhaltige Nutzung von Wasser in der Landwirtschaft im

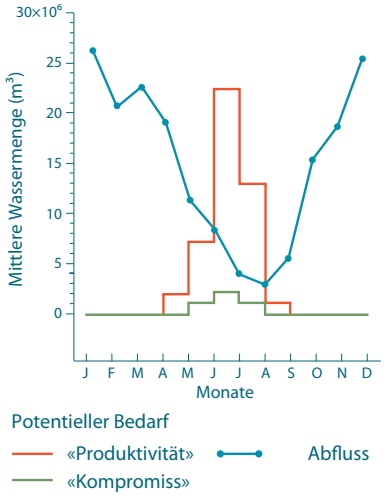
Suonen als Kulturgut und Wasserbewirtschaftung: Erkenntnisse aus dem NFP 61-Projekt WATERCHANNELS

Einen Sonderfall der landwirtschaftlichen Wasserbeschaffung stellt die seit Jahrhunderten etablierte Suonenwirtschaft im Wallis dar. In höheren Lagen gefasste, oft gletschergespeiste Bergbäche werden über Kanäle, Tunnels und Leitungen (Suonen, französisch bisses) auf die trockenen Hänge des Rhonetals geleitet und dort hauptsächlich für die Wiesenbewässerung eingesetzt. Diese uralten Wasserleitungssysteme wurden traditionell von Genossenschaften unterhalten und bewirtschaftet.

Das Projekt WATERCHANNELS hat eingehend untersucht, wie die Suonenbewirtschaftung auf aktuelle gesellschaftliche Ansprüche reagieren kann. Einerseits kann die traditionelle Wiesenbewässerung als Wasserverschwendung betrachtet werden, die durch sparsamere Beregnungssysteme ersetzt werden sollte. Andererseits gerät die intensive Wiesenbewässerung in Widerspruch zum ökologisch gewünschten Erhalt von Trockenwiesen. Schliesslich sind auch Wasserkraftunternehmen an der Nutzung von Suonenwasser interessiert.

Es zeigte sich, dass sich durch die intensivere Nutzung der Landschaft zunehmende Konflikte beim Betrieb der Suonen ergeben, die mit dem traditionellen genossenschaftlichen Management allein nicht zu bewältigen sind. Um Nutzungskonkurrenzen zu minimieren, schlägt das Forschungsprojekt den Suonenverantwortlichen vor, ihre Organisationsstruktur zu erneuern und mit den lokalen Landwirtinnen und Landwirten und Natur- und Heimatschutz sowie Tourismus zu kooperieren. Einerseits sollte die Wiesenbewässerung effizienter werden, denn dies ist die Grundlage des Erhalts der offenen Wasserkanäle als Kulturgut. Aus ökologischer Sicht sollte die Wiesenbewässerung auf ein Nebeneinander von intensiv bewässerten, traditionell berieselten Wiesen und nicht bewässerten Trockenwiesen ausgerichtet werden [59].

Es ist davon auszugehen, dass das in Suonen verfügbare Wasser mit dem Klimawandel stark zurückgehen kann, wie dies bereits im Hitzesommer 2003 deutlich wurde. Die Wasserrechte der Suonenbetreibenden beruhen meist auf uralten, längst untergegangenen Rechtsordnungen, bleiben aber als ehehafte Rechte intakt. Oft setzen sie unabhängig vom Abfluss der Suonen fixe Nutzungsmengen fest, wodurch bei Trockenheit das Wasser für andere Zwecke knapp wird – etwa für die Gewinnung von Wasserkraft oder als Restwasser in Bächen. In diesem Zusammenhang steht die Klärung komplexer rechtlicher Fragen an.



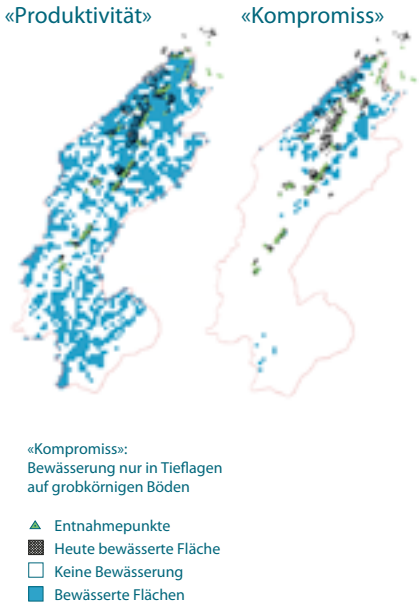


Abb. 6: Abhängigkeit des Wasserbedarfs von der Art der Landnutzung am Beispiel der Broye-Region: a) auf Produktivität ausgerichtete Strategie; b) auf einen Kompromiss zwischen Ertrag und Umweltwirkungen ausgerichtete Strategie. **Oben:** Wasserverbrauch der beiden Strategien und lokal verfügbare Wassermenge; **unten:** Kartenvergleich der in der Broye-Region 2050 potenziell zu bewässernden Flächen [60]

Klimawandel und Wasserbedarf in der Schweizer Landwirtschaft – Optionen für einen nachhaltigen Umgang mit Land und Wasser:
Erkenntnisse aus dem NFP 61-Projekt AGWAM

Gegenstand des Projekts AGWAM war es zum einen, Empfehlungen für den Umgang mit Wasser in der Landwirtschaft unter verschiedenen Szenarien für Klima, Marktpreise und Politik auszuarbeiten. Zum anderen wurden Regulierungsoptionen zum Erhalt von Rentabilität und zur Einhaltung von Umweltstandards erarbeitet (siehe Kasten S. 37). Alle Untersuchungen wurden für die Broye-Region und das Einzugsgebiet des Greifensees durchgeführt, zwei Regionen, die sich in Klima und Landnutzung deutlich unterscheiden [60].

Der rechnerisch ermittelte Bewässerungsbedarf eines Szenarios, bei dem sich die Landwirtschaft einseitig auf maximale «Produktivität» ausrichtet, wird um 2050 im Einzugsgebiet der Broye die verfügbare Menge an Flusswasser übersteigen. Diesem Mangel kann mit technischen Lösungen wie dem Bau von Speicherteichen oder der Zuführung von Wasser aus grösseren Distanzen begegnet werden. Als Beispiele seien hier die bereits bestehenden Wasserentnahmen aus dem Broye-Kanal zur Bewässerung von Gemüse im Raum Galmiz oder jene aus dem Neuenburgersee für die Bewässerung von Kartoffelkulturen auf dem Plateau bei Forel und Rueyres-les-Prés genannt. Allerdings verursachen solche Bauvorhaben einerseits hohe Investitions- und Betriebskosten, andererseits hat eine vermehrte Bewässerung negative Umweltwirkungen: Sie erhöht Bodenerosion und Treibhausgaspotenzial. Übermassige Bewässerung fördert auch die Nitratauswaschung, während optimale Bewässerung eine Verringerung bewirken kann [61]. Ausserdem gefährden zusätzliche Wasserentnahmen die Gewässerökologie vor allem kleinerer Gewässer, da die Verminderung des Volumens eine zusätzliche Temperaturerhöhung bewirkt [62]. Eine Intensivierung der Bewässerung durch zusätzliche Wasserbeschaffungssysteme sollte deshalb auf Standorte mit günstigen Boden- und Geländebedingungen beschränkt bleiben und Wasserentnahmen sollten nur aus grösseren Gewässern erfolgen. Im Broyegebiet empfiehlt sich eine Konzentration der intensiven, bewässerten Produktion in den günstigsten Lagen des Einzugsgebiets (um Payerne), während die Hügelregion hauptsächlich für die Graswirtschaft und, je nach Bodentyp, für einzelne, nicht bewässerte Ackerkulturen geeignet ist.

Alternative Möglichkeiten für robuste und nachhaltige Anpassungsstrategien liefert das Projekt AGWAM mithilfe einer modellgestützten, multikriteriellen Optimierung der regionalen Landnutzung. Aufgrund von veränderten Gewichtungen der einzelnen landwirtschaftlichen Funktionen (Produktion, Umweltziele) können die Organisation der Landnutzung, d.h., was wo angebaut wird, und die Art der Bewirtschaftung (Rotation, Bodenbearbeitung, Düngung etc.) einer reduzierten Wasserverfügbarkeit angepasst werden. Im Gegensatz zu einer eindimensional auf Produktivität ausgerichteten Strategie wird bei Implementierung einer Kompromissstrategie, die neben der Produktion auch Umweltziele berücksichtigt, der Gebietsabfluss in der Broye-Region nicht überschritten (Abb. 6). Das bedeutet, dass mit geeigneten Massnahmen das Risiko von Wasserknappheit und Konflikten mit anderen Wassernutzungen oder der Gewässerökologie vermindert werden kann. Bei dieser Strategie müsste allerdings ein Teil des heutigen Ackerlands durch Grasland ersetzt werden, wobei zwar die Biomasseproduktion hoch bleibt, die Produktion von Nahrungsmitteln – ausgedrückt in Energieeinheiten – aber sinkt.

Die Ergebnisse sind typisch für eine «trockene» Region im Mittelland, können aber nicht beliebig auf andere Regionen übertragen werden. Dazu sind Ausgangsbedingungen, strategische Ziele und mögliche Zielkonflikte zwischen verschiedenen landwirtschaftlichen Funktionen (sog. Trade-offs) regional zu verschieden.

Derzeit ermutigen niedrige Wasserpreise und grosszügige Entnahmekonzessionen die Betriebe noch zu intensiver Bewässerung. Dies geht so lange gut, wie genügend Wasser vorhanden ist. Bei Trockenheit aber, wenn Entnahmeverbote an den Flüssen und Bächen drohen, bedeutet sie ein hohes Einkommensrisiko (z.B. beim Kartoffelanbau). Modellrechnungen zeigen, dass die Einführung von betriebsbezogenen Wasserkontingenten (Quota) oder höheren Wasserpreisen den Einsatz von Wasser für die Bewässerung stark vermindern würde. Die Betriebe würden darauf mit einem geänderten Kulturenmix und einer bedarfsgerechten, effizienten Bewässerungstechnik reagieren (Abb. 7). Diese Strategie würde das Einkommensrisiko der Landwirtschaftsbetriebe und zugleich die Auswirkungen auf die Gewässer mindern – eine echte Win-win-Situation.

Bei Klimaextremen – sprich bei ausgeprägten Trockenphasen oder Hitzewellen – reichen allerdings Effizienzgewinne allein nicht aus, denn dann ist auch für die reduzierte Bewässerung nicht mehr genügend Wasser verfügbar. Für solche Extremereignisse sind Versicherungsprodukte wie z.B. indexbasierte Versicherungen für trockenheitsbedingte Ertragseinbussen im Gespräch. Eine erste solche Versicherung kann in der Schweiz seit Januar 2014 abgeschlossen werden [63]. Sie schützt die Landwirtinnen und Landwirte vor Erwerbsausfällen und bewahrt indirekt die trockenheitsgestressten Gewässer vor fortgesetzten Wasserentnahmen.

‚Spannungsfeld mit anderen Ansprüchen an die vorhandenen Wasserressourcen auf eine solide wissenschaftliche Grundlage zu stellen, untersuchte das NFP 61-Projekt AGWAM, wie Landnutzung und Bewirtschaftung sich optimal an einen zunehmenden, klimabedingten Wassermangel anpassen können (siehe Kasten S. 24). Dabei zeigte sich, dass die sozioökonomischen und agrarpolitischen Rahmenbedingungen eine wesentlich grössere Rolle spielen als der Klimawandel.

Potenzielle Konflikte und Synergien

Konflikt Landwirtschaft mit Trinkwasser und Gewässerökologie

Konflikte mit der Trinkwasserversorgung und der Gewässerökologie treten vor allem in längeren Trockenphasen auf. Einerseits fördern Landwirtschaftsbetriebe mit eigenen Pumpen Grundwasser aus Vorkommen, die auch von der öffentlichen Wasserversorgung genutzt werden. Andererseits geben einige Wasserversorger Trinkwasser direkt an die Landwirtschaft ab.

Wie ausgeprägt solche Konkurrenzen werden können, lässt sich derzeit nicht verlässlich abschätzen. Dies liegt einerseits daran, dass bei zahlreichen Grundwasservorkommen die nachhaltig nutzbaren Fördermengen bisher nicht quantifiziert wurden (siehe auch NFP 61 Teilsynthesen 1 und 3). Da zugleich die von der Landwirtschaft entnommenen Mengen nicht bekannt sind, besteht in punkto Übernutzung vor allem in Trockenzeiten erhebliche Unsicherheit.

Der Hitzesommer 2003 zeigte z.B. im Kanton Aargau, dass trotz Wasserentnahmeverboten aus Oberflächengewässern die Wiederauffüllung flussgespeister Grundwasserspeicher zwei Jahre dauerte. Erst im Frühling 2006 wurden wieder normale Frühjahrespegel verzeichnet [64]. Die starke Beanspruchung von Fliessgewässern in Trockenzeiten wird auch durch Modellrechnungen des NFP 61-Projekts AGWAM bestätigt: Abb. 5 zeigt, dass im Vergleich zu einem Normaljahr der Bewässerungsbedarf in einem Trockenjahr wie 2003 wesentlich höher ist und in vielen Einzugsgebieten grosse Teile des Abflusses beansprucht [54].

Verbote von Wasserentnahmen waren in der letzten Zeit aber nicht auf das Jahr 2003 beschränkt. Im trockenen Frühjahr und Frühsommer 2011 waren die Landwirtinnen und Landwirte im Jura und an vielen Mittellandflüssen (z.B. Kanton Solothurn) ebenfalls mit Entnahmeverboten konfrontiert [65]. Auch im Juli 2006 und von Juli bis Dezember 2010 kam es in den Kantonen Freiburg und Waadt zu Verboten von Wasserentnahmen.

In einigen Kantonen sind die Gemeinden Bewilligungsbehörde für Entnahmen der Landwirtschaft aus den Gewässern. Dies erhöht die Gefahr mangelnder Koordination und übermässiger Entnahmen, wenn mehrere Gemeinden gleichzeitig Pumpbewilligungen für das gleiche Gewässer aussprechen. Zum Beispiel kann laut der geplanten Neufassung des Wassergesetzes der Kanton Zürich die Gemeinden «bei akutem Wassermangel ermächtigen, … vorübergehende Wasserentnahmen aus Gewässern zu Bewässerungszwecken zu bewilligen» [66].

A5 | Nutzung von Grundwasser und Seen als Trinkwasser

Selbst bei steigenden Bevölkerungszahlen wird bisher davon ausgegangen, dass in den nächsten Jahrzehnten keine wesentliche Zunahme des häuslichen Wasserverbrauchs zu erwarten ist. Dies wird vor allem mit dem Einspareffekt durch wassersparende Haushaltsgeräte erklärt, der den Mehrverbrauch infolge des Bevölkerungswachstums aufwiegt. Offen ist indessen, ob in Zukunft zusätzliche Nutzungen aus dem Trinkwassernetz bedient werden könnten bzw. sollten; üblich ist zum Teil die landwirtschaftliche Bewässerung aus dem Netz (rund ein Viertel des Bewässerungswassers wird von der öffentlichen Versorgung bereitgestellt, siehe S. 20). Bewässerung im grossen Stil würde allerdings einen starken Ausbau der Leitungskapazitäten erfordern, was seitens der Wasserversorger aus Kosten- und Betriebsgründen (lange Standzeiten mit hygienischen Problemen ausserhalb der Bewässerungssaison) unerwünscht ist.

Regional spielen auch die Bewässerung von Golfplätzen sowie im Gebirge die Beschneiung aus dem Trinkwassernetz eine zunehmende Rolle. Zu bedenken ist, dass es im wirtschaftlichen Interesse von Wasserversorgern liegen kann, ihre Anlagen durch zusätzliche Lieferungen besser auszulasten und höhere Einnahmen zu erzielen, und es ist nicht auszuschliessen, dass Trinkwasserversorger ihre Kapazitäten für solche Nutzungen ausbauen.

Die Annahme konstanten Wasserverbrauchs

Links: Wie die traditionelle alpine Bewässerungslandwirtschaft mit Suonen auf eine zukunftsfähige Basis gestellt werden kann, wurde im Projekt WATERCHANNELS untersucht.
Mitte: Kartoffeln werden in erster Linie bewässert, damit sie möglichst ebenmässig wachsen – eine wichtige Voraussetzung etwa für die Produktion von Chips. (AGWAM)
Rechts: Die Einführung von betrieblichen Wasserkontingenten oder fixen Wasserpreisen würde den Einsatz von Bewässerungswasser deutlich reduzieren. (AGWAM)

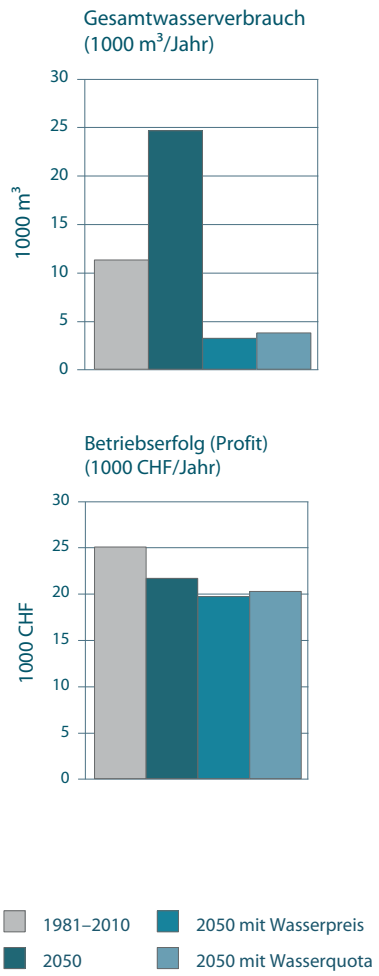


Abb. 7: Wasserverbrauch und Profit eines Ackerbaubetriebs in der Broye-Region unter heutigem Klima (1981–2010), Klimawandel (2050) ohne Massnahmen, mit höherem Wasserpreis und mit Wasserquota [60]. (AGWAM)

Links: Die ergiebigsten Grundwasservorkommen der Schweiz befinden sich in den grossen Flusstälern. (Foto Reportair)
Mitte: Das Projekt GW-TREND hat untersucht, wie sich Trockenphasen auf die Talgrundwasserleiter im Emmental auswirken und wie viel Wasser dort für die Trinkwasserversorgung entnommen werden kann.
Rechts: Die Seen der Schweiz spielen für die Versorgung mit Trinkwasser eine zunehmend wichtige Rolle: Seewasserwerk Moos (ZH). (Foto Reto Oeschger)

muss aber nicht notwendig auf alle Zeit richtig sein. Neue Verbrauchsmuster oder zusätzliche Bedürfnisse müssen bei der Planung der Trinkwasserinfrastruktur weiter genau beobachtet werden (siehe auch NFP 61 Thematische Synthese 3). Das NFP 61-Projekt MONTANAQUA (siehe Kasten S. 17) dokumentierte zum Beispiel, dass in trockenen Sommern und bei höheren Temperaturen die Bewässerung privater Gärten und Rasenflächen einen erheblichen Mehrverbrauch hervorrufen kann. Viele Kantone haben allerdings rechtliche Instrumente, solche Nutzungen in Trockenphasen zu unterbinden.

Das Trinkwasser der Schweiz wird zu 80% aus Grundwasser (ca. 39,2% aus Quellen, 40,6% aus Pumpwerken) und zu 20% aus Seen gewonnen [67]. Die ergiebigsten Grundwasserleiter befinden sich in den grossen Flusstälern in Lockergesteinen und stehen in hydraulischer Verbindung mit den Fliessgewässern [68]. Wie stark das entnommene Grundwasser mit Flusswasser angereichert ist, ist nur in Einzelfällen bekannt.

Grundwassernutzung

Eine genaue Abschätzung der dauerhaft nutzbaren Grundwassermenge erweist sich noch immer als schwierig. Um adäquate Konzessionen für Wasserentnahmen zu erteilen und vor allem in Trockenphasen eine Übernutzung zu verhindern, ist eine detaillierte Bilanzierung von grosser Wichtigkeit. So hat beispielsweise eine Studie im Auftrag des Amts für Umwelt des Kantons Solothurn aufgezeigt, dass die vergebenen Konzessionen das nachhaltig nutzbare Grundwasserdargebot stellenweise deutlich übersteigen [69]. Die flussgespeisten Grundwasservorkommen im Kanton Bern wurden im Rahmen des NFP 61-Projekts GW-TREND auf die heute und in Zukunft nachhaltig verfügbaren Mengen untersucht (siehe Kasten unten).

Dass Grundwasser nicht überall in der gewünschten Menge und Qualität vorhanden ist, zeigt auch der verbreitete Einsatz der künstlichen Grundwasseranreicherung. Die Stadt Basel versorgt sich ausschliesslich mit Grundwasser, das mit infiltriertem Rheinwasser vermehrt wird. Auch der Kanton Zürich setzt in seiner strategischen Trinkwasserpla-

Verfügbarkeit von Grundwasser heute und unter Klimawandelbedingungen: Erkenntnisse aus dem NFP 61-Projekt GW-TREND

Das Projekt GW-TREND ist dem Einfluss des Klimawandels auf die Neubildung und Verfügbarkeit von Grundwasser nachgegangen. Die Phase im Sommer, in der wegen Verdunstung und Verbrauch durch die Vegetation kein Grundwasser gebildet wird, dürfte sich im Mittelland infolge höherer Temperaturen markant verlängern (Mai bis Oktober statt Juni bis August). Solange die Niederschläge in den Wintermonaten wie derzeit prognostiziert zunehmen, sollte sich das so entstehende Grundwasserdefizit über das ganze Jahr gesehen wieder auffüllen. Im Spätsommer und Herbst sind aber deutlich tiefere Grundwasserstände zu erwarten, was vor allem bei Vorkommen mit geringer Speicherkapazität die Nutzbarkeit vermindern kann [70].

Für die aus Sicht der Trinkwasserversorgung besonders bedeutenden Talgrundwasserleiter ist die Speisung aus Flusswasser wichtiger als die Versickerung von Niederschlägen. Verschiebt sich – wie erwartet – das Abflussregime der Flüsse im Mittelland und in den Voralpen hin zu geringerer sommerlicher Wasserführung, ist auch die Neubildung des damit verbundenen Grundwassers durch Infiltration vermindert. Je stärker ein Grundwasserleiter von Flussinfiltration abhängt, desto spürbarer wird er auf einen verminderten Abfluss reagieren. Wie sich dies konkret auf die Verfügbarkeit von Trinkwasser auswirkt, wird von vielen Faktoren beeinflusst und lässt sich nur im Einzelfall bestimmen [71].

Umgekehrt sind viele Fliessgewässer von exfiltrierendem Grundwasser abhängig. Schon heute trocknen Flussabschnitte im Tösstal und im Fricktal und im obersten Emmental bei niedrigem Grundwasserstand vorübergehend aus. Wo Flusswasser ungehindert ins Grundwasser infiltriert, können hohe Grundwasserentnahmen in Trockenperioden den Basisabfluss weiter vermindern. Oftmals ist allerdings die Infiltration durch kolmatierte Flusssohlen eingeschränkt, sodass die Wassermengen im Fluss erhalten bleiben. Eine detaillierte Darlegung der Grundwasserverhältnisse in der Schweiz bei fortschreitendem Klimawandel findet sich in NFP 61 Thematische Synthese 3.

nung vermehrt auf Anreicherungsanlagen in Rheinnähe (Weiacher Hard, Rafzerfeld, Rheinau) [72]. Hier sollen in Zukunft laut Entwurf des kantonalen Richtplans mehrere 100 000 m^3/d an Trinkwasser gewonnen werden können, womit selbst ein vorübergehender Ausfall des Zürichsees überbrückt werden könnte. Viele weitere Anlagen in allen Teilen der Schweiz sind in Betrieb bzw. in der Planung (siehe z.B. Kanton AG) [73]. Aus den Trinkwasserstatistiken ist diese Entwicklung nicht ablesbar, da durch künstliche Infiltration gewonnenes Grundwasser bisher nicht von anderem Grundwasser unterschieden wird.

Trinkwasser aus Seen

Wo Trinkwasser aus Seen entnommen wird, sind die Mengen relativ zu Abfluss und Volumen der Seen unter Normalbedingungen vernachlässigbar. In lang anhaltenden Trockenphasen kann sich die Trinkwassergewinnung allerdings spürbar auf den Wasserstand auswirken. Der Abfluss regulierter Seen kann nicht beliebig gedrosselt werden, ohne die Restwassermengen im Unterlauf zu unterschreiten. In solchen Situationen kann es zur Senkung des Seespiegels kommen, was nur in engen Grenzen mit der Uferökologie und anderen Nutzungen (z.B. Schifffahrt) vereinbar ist. Im Trockensommer 2003 konnte z.B. der Seespiegel des Zürichsees nicht gehalten werden. Das Gleiche galt für den Luganersee. Auch Seen bieten also keine unbegrenzten Vorräte, sondern müssen vorsorgend bewirtschaftet werden.

Potenzielle Konflikte und Synergien

Konflikt Trinkwasser/Landwirtschaft

Beim Leitungswasser hat die Trinkwasserversorgung in Bezug auf andere Nutzungen eine starke Stellung, insbesondere auch gegenüber der landwirtschaftlichen Bewässerung. Die Bewässerung aus dem Trinkwassernetz ist auch deshalb nur begrenzt möglich, weil die Leitungsquerschnitte des Verteilnetzes für hohe Spitzenverbräuche nicht ausreichen.

Konflikt Trinkwasser/Gewässerökologie

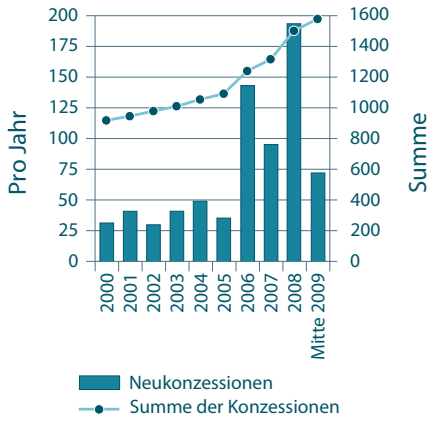
Die für die Trinkwasserversorgung nötigen Wassermengen werden den Gewässern sehr gleichmässig und dezentral entnommen und sind normalerweise nicht gross genug, um andere Wassernutzungen oder die Ökologie ernsthaft einzuschränken. Auch müssen Trinkwasserentnahmen aus dem Grundwasser so gestaltet werden, dass negative Einflüsse auf grundwassergespeiste Ökosysteme ausbleiben. Vielfach wird davon ausgegangen, dass 20% der natürlichen Neubildung nachhaltig nutzbar sind [68]. Praktiker verweisen aber darauf, dass eine fallweise Abklärung nötig ist. Gemäss Art. 29 GSchG müssen bei Wasserentnahmen aus mit Fliessgewässern verbundenen Grundwasservorkommen die Restwassermengen eingehalten werden [74]. Eine Ausnahme sind Quellen, wo für Trinkwasserentnahmen bis 80 l/sec keine Restwassermengen eingehalten werden müssen (Art. 30 Bst. c GSchG) und die daher in der Regel vollständig gefasst sind. Historisch gesehen hat die Fassung hunderter Quellen für die Trinkwasserversorgung eine erhebliche Veränderung der Gewässerlandschaft verursacht. Das Wasser vieler dieser Quellen speiste ursprünglich Quellbiotope und kleine Bäche, die infolge der Nutzung heute verschwunden sind. Insofern steht auch die Trinkwasserversorgung in Konkurrenz mit dem Wasserbedarf aquatischer Ökosysteme.

A6 | Wärmenutzung von Grundwasser

Grundwasser mit seiner ganzjährig fast konstanten Temperatur eignet sich im Winter auch als Wärmequelle für Heizungen. Dabei wird Wasser über eine Bohrung dem Grundwasserleiter entnommen, mit Wärmetauschern abgekühlt und über eine zweite Bohrung oder durch Versickerung im Abstrom in den gleichen Grundwasserkörper zurückgeleitet. Von vielen Kantonen wird die Grundwasserwärmenutzung als erneuerbare, CO_2-freie Energieform aktiv gefördert. Dementsprechend haben solche Nutzungen in den vergangenen Jahren stark zugenommen und können einen substanziellen Teil der Grundwasserförderung ausmachen (siehe Abb. 8 und 9). Im Kanton St. Gallen zum Beispiel machten Wärmenutzungen 2012 etwa 12% der mittels Grundwasserfassungen geförderten Gesamtmenge aus [75], im Kanton Bern sogar doppelt so viel. Mit 1600 Konzessionen für Wärmepumpenanlagen zur Heizung und Warmwasserbereitung machte sie dort die Mehrheit der Brauchwasserkonzessionen aus. Insgesamt wurden 20 Mio. m^3 Grundwasser für Heizzwecke eingesetzt (gegenüber rund 100 Mio. m^3 Trinkwasser) [76] und so eine Wärmeleistung von 90 MW erzeugt [77].

Mehrere Kantone erachten die thermische Nutzung von Grundwasser als unverträglich mit der Gewinnung von Trinkwasser. Sie befürchten eine potenzielle Verschlechterung der Grundwasserqualität. Auch das BAFU gibt zu bedenken, dass «bei Defekten im System oder bei Unfällen mit wassergefährdenden Flüssigkeiten Schadstoffe über die Rückgabeanlage unbemerkt ins Grundwasser gelangen» können [78]. Daher ist zum Beispiel im Kanton Zürich die Wärmenutzung des Grundwassers in den Schutzzonen S1, S2 und S3 und in ausgeschiedenen Gewässerschutzarealen nicht erlaubt [79].

Damit besteht eine direkte Mengenkonkurrenz zwischen Trinkwassergewinnung und Wärmeentnahme. Die meisten Kantone versuchen, solche Konflikte durch eine langfristig angelegte Wärmenutzungsplanung und die Konzentration auf wenige grössere Anlagen zu umgehen [79]. Der Kanton Bern beabsichtigt, die Zunahme der Grundwasserwärmenutzung zu begrenzen. Zukünftig soll Grundwasser nur noch dort für die Wärmegewinnung genutzt werden, «wo es reichlich zur Verfügung steht und wo keine Trinkwasserfas-



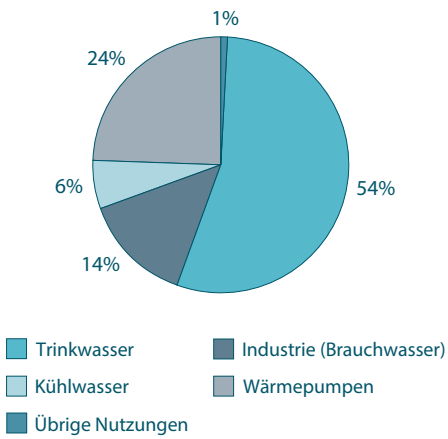


Abb. 8 (oben): Zunahme von Wärmepumpen im Kanton Bern 2000–2009 [80].
Abb. 9 (unten): Für die Wärmenutzung konzessionierte Grundwassermengen im Kanton Bern. Sie betrugen 2008 rund 30% der Trinkwasserkonzessionen [80].

sungen gefährdet werden» [77]. In der Energievision des Kantons Bern heisst es allerdings auch: «Erneuerbare Energie aus Wasserkraft und die Nutzung der Erdwärme stärken den Wirtschaftsstandort und erfüllen wesentliche Umweltziele» [81]. Die Abwägung zwischen energie- und wasserwirtschaftlichen politischen Zielsetzungen wird beim Grundwasser also auch in Zukunft Gesprächsstoff bieten.

A7 | Weitere Beeinflussungen der Wassermenge

Mengenbewirtschaftung durch Industrie und Gewerbe

Eine zuverlässige und preisgünstige Wasserversorgung ist auch für die produzierende Industrie und das Gewerbe wichtig. Der Wasserbedarf ist in der Chemie-, der Metall- und der Papierindustrie traditionell am höchsten, hinzu kommen die Kehrichtverbrennungsanlagen als wichtige Verbraucher (z.B. für Rauchgaswäsche und Kühlung).

Derzeit fehlt es an einer systematischen behördlichen Erfassung des industriellen Wassergebrauchs. Laut SVGW verfügen die Kantone «nur in Ausnahmefällen über vollständige Angaben zu den Entnahmemengen» [82]. Die für 2006 publizierten Zahlen stammen aus einer Umfrage des SVGW und beruhen auf einer Selbstdeklaration der Industrie. Neuere Zahlen sind nicht verfügbar [83].

Der Strukturwandel in der Industrie und das Verschwinden wasserintensiver Branchen zeigen sich in stark veränderten Wasserverbrauchsmustern. Gegenüber 1972 ist der Wasserverbrauch der meisten Branchen markant zurückgegangen, lediglich die chemische Industrie nutzt aufgrund ihres starken Wachstums heute deutlich mehr Wasser (siehe Abb. 10) [82].

Industriebetriebe beziehen ihr Wasser nur zum Teil von den öffentlichen Trinkwasserversorgern, den Rest fördern sie aus eigenen Brunnen oder Flusswasserfassungen («Eigenversorgung»). In den letzten 30 Jahren haben viele Betriebe von Trinkwasser auf Eigenversorgung umgestellt. Im untersuchten Zeitraum von 1972 bis 2006 kam es zudem zu einer ausgeprägten Umlagerung des industriellen Wasserbezugs weg von Grund- und Quellwasser (–29%) hin zu Oberflächenwasser (+34%), sodass 2006 fast dreimal mehr Oberflächen- als Grundwasser genutzt wurde [82].

Überraschend ist, dass 2006 laut SVGW in der Schweiz «mehr Wasser privat gewonnen wurde als durch die öffentliche Wasserversorgung (rund 25% mehr)», überwiegend (64%) aus Oberflächengewässern (siehe NFP 61 Thematische Synthese 1) [82]. Das Kühlwasser der Kernkraftwerke ist dabei nicht berücksichtigt. Folglich ist ein grosser Teil der industriellen Wasserentnahmen den Behörden nicht quantitativ bekannt (nur Höchstmengen aus Konzessionen). Dies gilt sogar für trinkwasserfähiges Grund- und Quellwasser, wovon mindestens ein Drittel für andere Zwecke als die öffentliche Wasserversorgung genutzt wird. Hier spielt neben der Industrie auch die Landwirtschaft eine Rolle [82].

Aktuellere Zahlen für den industriellen Wasserverbrauch liegen nur für den Kanton Basel-Landschaft vor. Demnach sind die industriell-gewerblichen Entnahmen aus dem Trinkwassernetz zwischen 1995 und 2012 um rund ein Viertel zurückgegangen. Im gleichen Zeitraum hat die Eigenförderung von Grundwasser, die überwiegend durch die Industrie erfolgt, um 27% zugenommen. Gesamthaft ist der Wassereinsatz der Industrie aus dem Trinkwassernetz und aus eigenen Brunnen zwischen 1995 und 2012 um rund 20% gestiegen. Im Kanton Basel-Landschaft wird heute mehr Grundwasser aus privaten Brunnen gefördert als für die öffentliche Wassergewinnung [84].

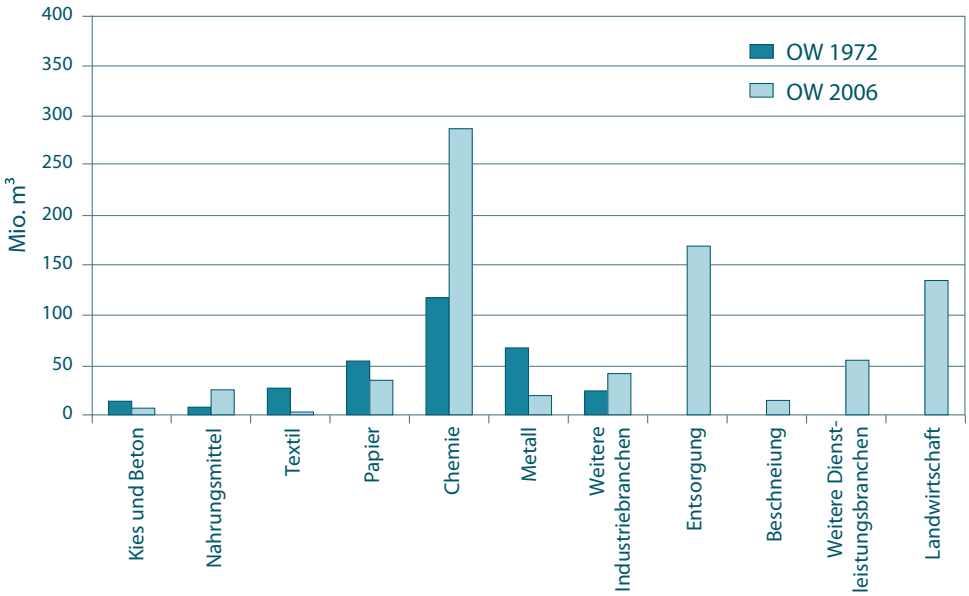


Abb. 10: Eigenversorgung der Industrie aus Oberflächenwasser (OW) 1972 und 2006 [82].

Links: Der ursprünglich für die Stromgewinnung gebaute Tseuzier-Stausee bei Crans-Montana wird inzwischen auch für die Trinkwasserversorgung und die Pistenbeschneiung genutzt. (MONTANAQUA)
Mitte: Die Beschneiung erfolgt lange vor Beginn der Skisaison von Oktober bis Dezember, wenn der Abfluss in den Bächen besonders niedrig ist. Zur Wasserspeicherung werden daher wie hier in der Lenzerheide Beschneiungsteiche in den Skigebieten gebaut. (Foto Reportair)
Rechts: Sind die für ein intensiv genutztes alpines Einzugsgebiet typischen Nutzungsmuster vereinbar mit dem erwarteten zukünftigen Dargebot? Dieser Frage ging das Projekt MONTANAQUA am Beispiel der Wassernutzung in der Region Crans-Montana-Sierre nach. (MONTANAQUA)

Mengenbewirtschaftung durch die Beschneiung

Schweizweit betrachtet ist die Wassermenge für die Beschneiung von untergeordneter Bedeutung. Beschneiungen erfolgen allerdings sehr lokal und gerade dann, wenn in alpinen Bächen die Wasserführung am geringsten ist. Beschneit wird stets vorsorglich, also unabhängig von natürlichem Schneefall, in der Regel ab Oktober, damit die Pisten an Weihnachten (oder vielfach schon Anfang Dezember) zuverlässig befahrbar sind. In der Schweiz werden derzeit rund 40% der Pisten künstlich beschneit, umfangreiche weitere Ausbauten sind in Planung. St. Moritz plant den Bau eines grossen Speichersees und die Fassung der Gebirgsbäche im Skigebiet Corviglia [85].
Ein gesamthafter Überblick über sonstige Planungen ist nicht verfügbar, doch sind weitere Projekte gerade in Skistationen in mittleren Lagen zu erwarten (z.B. Schwende AI, 2012) [86]. In Zermatt, wo bereits 70% der Pisten beschneit werden können, strebt man in den nächsten Jahren eine Vollbeschneiung an.

Potenzielle Konflikte und Synergien

Konflikte mit Restwassermengen

Nutzungskonflikte um Wasserressourcen sind besonders in den inneralpinen Trockentälern im Wallis und in Graubünden wahrscheinlich, aber mangels Daten schwer zu identifizieren. Da die Beschneiung vollständig auf lokale Vorkommen angewiesen ist, werden die grössten Probleme im Bereich der Restwassermengen erwartet [87]. Um einen übermässigen Wasserentzug aus alpinen Quellen und Bächen in den wasserarmen Monaten zu vermeiden, setzt man vielerorts auf den Bau von Speicherseen im Skigebiet [85].

Potenzielle Konflikte mit der Trinkwasserversorgung

Die für die Beschneiung eingesetzten Mengen sind im Vergleich zum lokalen Trinkwasserbedarf nicht unerheblich. Das NFP 61-Forschungsprojekt MONTANAQUA zeigte für das Skigebiet Crans-Montana, dass im Jahr 2010 für die Beschneiung eine Wassermenge in der Grössenordnung von 5 bis 10% des Trinkwasserbedarfs verwendet wurde [88].
Die eingesetzten Mengen sind in anderen Gebieten noch grösser: In Davos wurden in der Wintersaison 2006/2007 rund 600 000 m^3 Wasser für die Kunstschneebereitung eingesetzt, etwa 21,5% des Jahresverbrauchs an Trinkwasser, in Scuol 36,2% [89].

Mengenbewirtschaftung durch Golfplätze

2013 gab es in der Schweiz rund 100 Golfplätze. Die Gesamtfläche hat seit Ende der 1980er-Jahre von 832 ha auf 3141 ha zugenommen [90]. Die Bewässerungsbedürftigkeit kann zwischen den einzelnen Golfplätzen stark variieren. Wo das Wasser der Trinkwasserversorgung entnommen wird, können die benötigten Mengen einen bedeutenden Teil des Verbrauchs ausmachen. Für einen typischen Golfplatz im Mittelland wurde ein Bedarf von 35 000 m^3/a bei einem mittleren Bezug von 500 m^3/d in den Sommermonaten abgeschätzt. Während der Bewässerungssaison entspricht dies dem Haushaltsverbrauch von rund 2000 Einwohnern [91].
Solche Wassermengen können nur von grösseren Wasserversorgern oder Verbünden bereitgestellt werden, die über eine genügend grosse Infrastruktur und ergiebige Vorkommen verfügen. Besonders in trockenen Regionen kann die Bewässerung von Golfplätzen an Grenzen der lokalen Wasserverfügbarkeit stossen und in heissen und trockenen Jahren Konflikte mit der Trinkwasserversorgung oder Restwassermengen hervorrufen. Um dies vorsorglich zu vermeiden, wäre bei Golfplätzen grundsätzlich auch eine Verwendung gereinigten Abwassers möglich.

Einfluss von Tiefbauten, Strassen- und Tunnelbau

Mit der zunehmend dichteren Nutzung weiter Teile der Schweiz werden Verkehrswege und Gebäude zunehmend im Untergrund erstellt. Vielfach ragen solche Bauten (Tunnel, Tiefgaragen oder Lagerräume) ins Grundwasser und können dort den Grundwasserstrom behindern. Dies hat wiederum Einfluss auf die Verfügbarkeit von Grundwasser im Abstrom. Meist lässt sich die Durchlässigkeit durch eine Kiesschüttung um die Bauten herum gewährleisten. In den meisten Kantonen sind solche Massnahmen bereits Bestandteil von Bauvorschriften. Bestehende Bauwerke im Untergrund bereiten dagegen grössere Probleme: Als Beispiel sei der St. Johanntunnel in Basel genannt, der als kilometerlange Grundwasserbarriere erhebliche Stau- und Ableitungseffekte verursacht [92].

Links: Bleibt der Niederschlag längere Zeit aus, fallen auch in der Schweiz manche Fliessgewässer trocken. Besonders betroffen sind Flüsse, in deren Einzugsgebiet weder Gletscher noch Seen liegen wie zum Beispiel die Töss oder die obere Emme. (DROUGHT-CH)
Mitte: Um die Wasserversorgung bei längeren Trockenzeiten sicher zu machen, sollen in Zukunft alle Gemeinden aus zwei unabhängigen Wasservorkommen beliefert werden können: kleines Wasserreservoir. (DROUGHT-CH)
Rechts: 2013 gab es in der Schweiz rund 100 Golfplätze. Die Gesamtfläche hat sich seit Ende der 1980er-Jahre von 832 ha auf 3141 ha verdreifacht. (MONTANAQUA)

A8 | Verstärkung von Mengenkonflikten bei anhaltender Trockenheit

Dass Trockenheit und hohe Temperaturen auch in einem wasserreichen Land wie der Schweiz unangenehme Folgen nach sich ziehen können, haben der heisse Sommer 2003 und das niederschlagsarme Frühjahr 2011 spürbar werden lassen. Da Hitzewellen und ein Rückgang der sommerlichen Niederschläge bei zunehmendem Klimawandel auch für die Schweiz erwartet werden, widmete sich das NFP 61-Projekt DROUGHT-CH dem besseren Verständnis von Trockenperioden und deren Auswirkungen (siehe Kasten). Ein Rückgang der Wassermengen – auch wenn er nur temporär auftritt – führt unweigerlich zu verstärkter Konkurrenz zwischen verschiedenen Nutzungen. Je nach Ausmass der Knappheit sind nicht mehr alle Ansprüche zu befriedigen und gegebenenfalls müssen Mechanismen zur Priorisierung vitaler Wassernutzungen in Kraft gesetzt werden. Entscheidend dafür sind zuverlässige Trockenheitsprognosen.

Fazit Teil A Mengenbewirtschaftung

Wasser wird in der Schweiz intensiv genutzt und bewirtschaftet. In Matrix A sind die Ergebnisse von Teil A «Mengenbewirtschaftung» zusammengefasst und in Anmerkungen kurz erläutert. An erster Stelle steht die Wasserkraft, welche die Wasserressourcen zur Gewinnung von Strom in hohem Mass fasst, turbiniert und in zum Teil sehr unregelmässiger Weise in die Fliessgewässer zurückleitet. Daraus resultieren vor allem im Berggebiet ökologische Beeinträchtigungen der Gewässer durch mangelnde Restwassermengen und flussabwärts

Wie reagiert die Schweiz auf Trockenheit?
Erkenntnisse aus dem NFP 61-Projekt DROUGHT-CH

Um frühzeitig auf Trockenheit reagieren zu können, sind möglichst langfristige Prognosen über Ausmass und Dauer von reduzierter Wasserverfügbarkeit entscheidend. Im Rahmen des Projekts DROUGHT-CH wurde daher in Zusammenarbeit mit interessierten Nutzern u.a. die Basis für eine «Informationsplattform Trockenheit» geschaffen. Für mittelfristige Trockenheitsvorhersagen ist der Zustand der Wasserspeicher relevanter als Niederschläge und Abflüsse. Wegen der trägen Reaktion der Speicher ist z.B. die Vorhersage von Niedrigwasser in Flüssen über deutlich längere Zeiträume (>20 Tage) möglich als die Vorhersage von Hochwassern, welche stark von Niederschlägen geprägt sind [93]. Die wichtigsten Speicher sind Bodenfeuchte, Grundwasser, Schnee und Eis, deren präzise und flächendeckende Erfassung sich im Aufbau befindet [94]. Das Projekt konnte zeigen, dass eine Vorhersage der Bodenfeuchte für etwa zwei Wochen im Voraus sehr gut möglich ist. Ziel ist es, diese Vorhersagen auf der nationalen Trockenheitsplattform www.drought.ch verfügbar zu machen.
Umfragen und Workshops im Rahmen von DROUGHT-CH zeigten ein grosses Bedürfnis nach Trockenheitsprognosen bei Bauern, aber auch anderen wasserabhängigen Aktivitäten wie Wasserkraft und Schifffahrt [95]. Eine Befragung von Obstbauern ergab, dass bessere Trockenheitsprognosen sowie tagesaktuelle Daten zu Verdunstung und Bodenfeuchte hilfreich wären, um die Bewirtschaftung der Kulturen frühzeitig anpassen zu können. Damit aber die Nutzer überhaupt auf Trockenheit reagieren können, müssen auch Handlungsoptionen wie zum Beispiel Einrichtungen zur Wasserspeicherung geschaffen werden.
Die Forschenden weisen darauf hin, dass die sichere Früherkennung von Trockenheitsereignissen weiterhin hoch komplex ist. Das auf einen niederschlagsarmen Winter folgende Frühjahr 2011 verdeutlichte erneut, dass der Füllstand der Wasserspeicher für die Entwicklung von Trockenheit entscheidend ist. Wäre es im Frühjahr 2003 ähnlich trocken gewesen wie 2011, wären die Auswirkungen dieses Hitzesommers weit gravierender gewesen. Daraus folgt auch, dass die Bedingungen von 2003 in Bezug auf Trockenheit bei Weitem nicht die schlimmste anzunehmende Situation darstellten. Dies gilt bei heutigen Klimabedingungen und erst recht in der Zukunft und wird auch durch historische Aufzeichnungen belegt (siehe Exkurs Trockenheit S. 31). Das Projekt DROUGHT-CH hat nicht nur grosse Fortschritte im Verständnis von Trockenheit in der Schweiz gemacht, sondern auch in den betroffenen Kreisen ein Bewusstsein für die Möglichkeit solcher Extremereignisse geschärft.

durch Schwall-Sunk-Effekte. Zweitens nimmt die landwirtschaftliche Bewässerung in einigen Regionen erhebliche Wassermengen in Anspruch. Die Entnahmen sind vor allem für kleine und mittlere Fliessgewässer in den Voralpen und im Mittelland beträchtlich und können in Trockenphasen in Konflikt mit Restwassermengen kommen. Über den mengenmässigen Einfluss der Landwirtschaft auf das Grundwasser ist bisher wenig bekannt.
Schliesslich erweist sich die hohe Siedlungsdichte im Mittelland mit ihren vielfältigen Nutzungsansprüchen und Beeinflussungen von Wasser als starker Treiber. Trinkwasser- und Wärmegewinnung kommen immer häufiger in Konkurrenz zueinander. Wo eine Ausdehnung des Wasserbezugs oder der Ersatz problematischer Grundwasserfassungen nötig wird, finden sich in der Nähe häufig keine nutzbaren Vorkommen mehr. Damit wird das nutzbare Grundwasser wegen konkurrierender Flächennutzungen verknappt (siehe Teil D ab S. 52).
Nicht nur im intensiv genutzten Mittelland wirken sich menschliche Aktivitäten weit stärker aus als der Klimawandel, sondern sogar in Teilen des Berggebiets. Im NFP 61-Projekt MONTANAQUA (siehe Kasten S. 17) wurde ein alpines Einzugsgebiet im Wallis auf Verfügbarkeit und Nutzung seiner Wasserressourcen untersucht. Zwar wird der Klimawandel das Dargebot von Wasser in Trockenjahren spürbar vermindern, bedeutender für die Wasserbilanz sind jedoch sozioökonomische Prozesse. Dies ist eine zentrale Erkenntnis des NFP 61.

Exkurs Trockenheit: Wie lange funktioniert die Schweiz ohne Regen?
In den vergangenen Jahrhunderten hat Trockenheit in der Schweiz immer wieder grosse Schäden verursacht. Für den Zeitraum 1500–1995 sind 24 Dürresommer dokumentiert. In 13 Jahren zog sich die Trockenheit über sechs Monate hin. Besonders schwierig waren die Bedingungen im 17. und 18. Jahrhundert, als mehrfach zwei Dürresommer aufeinander folgten, 1660–1662 waren es sogar drei Trockenjahre in Folge [96].
Zur Abschätzung des Ausmasses ausgeprägter und lang anhaltender Trockenphasen sind historische Aufzeichnungen instruktiv. 1540 waren selbst grosse Flüsse wie der Rhein stark reduziert, kleinere Gewässer wie Wiese und Suhre schon im Juli gänzlich ausgetrocknet. Die durch Seen gepufferten oder gletscherwassergespeisten Flüsse blieben als letzte zuverlässige Wasserquellen erhalten [96].
Im Jahr 2011 blieb infolge eines milden und niederschlagsarmen Winters im Frühsommer in wichtigen Flüssen der durch Schneeschmelze bedingte Anstieg aus, sodass in vielen Bächen und Flüssen Entnahmeverbote ausgesprochen werden mussten. Weil aber im Mai Niederschläge einsetzten und der Juli kühl und verregnet war, entspannte sich die Situation.
Was aber wäre, wenn einem milden, trockenen Winter wie 2011 ein heisser, trockener Sommer wie 2003 folgen würde? Berichte über den Dürresommer im Schweizer Mittelland von 1947 vermitteln eine Ahnung davon. Den Bauern fehlte der zweite Schnitt ihrer Wiesen und es kam zu einem Mangel an Futtergras. Kartoffeln und Getreide lieferten nur geringe Erträge. Die landwirtschaftlichen Einkommensverluste im Jahr 1947 wurden auf rund 300 Mio. CHF geschätzt (rund ein Sechstel des Gesamtertrags) [96].
Die Auswirkungen einer anhaltenden Trockenheit skizziert das Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS) in einem Szenario mit «grosser Ereignisintensität» [97]. Es beruht auf einer Ausgangssituation ähnlich wie 2011. Unter diesen Bedingungen ist bereits ab Mai mit kritischen Situationen zu rechnen, die wichtigsten Grundwasserspiegel sind zu dieser Zeit bereits signifikant gesunken. Für den weiteren Verlauf geht das BABS-Szenario von kürzeren Hitzewellen und fünf regenlosen Monaten aus. Folgende Auswirkungen auf die Gewässer und ihre Nutzungen sind laut BABS zu erwarten:

- Stark sinkende Fluss- und Seepegel mit Beeinträchtigungen der aquatischen Ökosysteme, Fischsterben in vielen Flüssen und Seen.
- Nicht mehr alle landwirtschaftlichen Nutzflächen können ausreichend bewässert werden. Ernteausfälle spätestens ab September, viele Landwirtschaftsbetriebe sind in ihrer Existenz bedroht.
- Um bis zu 25% eingeschränkte Stromproduktion der Flusskraftwerke, bis zu 10% weniger Stromproduktion bei den Speicherkraftwerken.
- Rheinschifffahrt ab Mitte August eingestellt.
- Quellschüttungen nehmen signifikant ab, die Lage einzelner Trinkwasserversorgungen wird ab August schwierig.

Die aus historischen Ereignissen abzuleitende Erkenntnis, dass auch die regen- und schneereiche Schweiz schon nach wenigen niederschlagsarmen Monaten von folgenreicher Trockenheit betroffen wäre, wurde vom NFP 61-Projekt DROUGHT-CH bestätigt. Das oben zitierte Szenario entspricht einer «grossen Ereignisintensität», denkbar ist laut BABS auch eine «extreme Ereignisintensität» zum Beispiel infolge flächendeckender Trockenheitsperioden in zwei aufeinander folgenden Jahren (wie historisch 1718/1719 und 1723/1724). Für solche extremen Ausnahmesituationen fehlt jede erlebte Erfahrung. Trotzdem müssen Gesellschaft, Verwaltung und Wirtschaft der Schweiz auf solche Bedingungen adäquat reagieren können.

«Ich bin sicher, dass die ‹Informationsplattform Trockenheit› sehr wichtig ist für die Projekte der AGRIDEA zur Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel. Einen zweiten Einsatzbereich sehe ich in den landwirtschaftlichen Schulen.»

Bettina Marbot
AGRIDEA

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

Matrix A – Potenzielle Konflikte und Synergien der Mengenbewirtschaftung

Kapitel	Wirkt auf … / Gesellschaftlicher Anspruch	Wasserkraft	Gewässerschutz	Hochwasserschutz[a]	Landwirtschaft	Trinkwasserversorgung	Tourismus (Beschneiung)
A1	Wasserkraft		1	2	3	neutral	4
A2	Gewässerschutz	5/6		7	8	9	neutral
A3	Hochwasserschutz	10	11		12	12	neutral
A4	Landwirtschaft	neutral	13/14	15		13	13
A5	Trinkwasserversorgung	neutral	14	neutral	13		13
A6	Tourismus (Beschneiung)	4	13	neutral	13	13	

Synergie · Bedeutender Konflikt · Konflikt · Konflikt und Synergie

Als bedeutende Konflikte sind solche Situationen gekennzeichnet, die längere Flussstrecken oder grosse Wassermengen betreffen oder andere Interessen weitverbreitet stark beeinträchtigen.

Konflikte bzw. Konkurrenzen sind in der Regel lokal oder regional bzw. saisonal, verstärkt bei Trockenheit und hohen Temperaturen.

(a) Hochwasserschutz ist kein Wasserverbraucher. In dieser Spalte wird daher der Einfluss auf die Wirksamkeit des Hochwasserschutzes angegeben. Umgekehrt ist der Hochwasserschutz seinerseits mengenrelevant, d.h., er kann die Wasserverfügbarkeit für andere Nutzer indirekt beeinträchtigen (siehe Zeile A3).

(1) Wasserkraft ist Hauptkonkurrent bezüglich Restwassermengen in Flüssen, ausserdem in Bezug auf Schwall-Sunk-Effekt.
(2) Wegen Stauhaltung verminderte Hochwasserspitzen, andererseits grosse Einbussen potenzieller Wasserkraftstromerzeugung durch Wasserrückhalt in Seen bei Hochwasser.
(3) Landwirtschaft könnte bei Trockenheit aus Stauseen gegebenenfalls mehr Wasser erhalten. Verstetigung des Abflusses → gleichmässigeres Dargebot.
(4) Wasserkraft und Kunstschneebereitung: Konkurrenz oder kombinierte Nutzung (für kombinierte Nutzung gibt es Beispiele: Zermatt).
(5) In revitalisierten Bereichen ist die Nutzung von Wasserkraft eingeschränkt.
(6) Restwasseranforderungen und Schwall-Sunk-Sanierung mindern Wasserkraftnutzung.
(7) Revitalisierung und Hochwasserschutz wirken in die gleiche Richtung.
(8) Restwasseranforderungen mindern verfügbare Bewässerungsmenge.
(9) Revitalisierungen erhöhen den Wasserrückhalt in flussgespeistem Grundwasser und damit die Verfügbarkeit von Trinkwasser. Wegen Qualitätsproblemen sind Revitalisierungen nicht immer kompatibel mit Trinkwasserfassungen (siehe Seite 41).
(10) Bei konservativer Seebewirtschaftung zugunsten des Hochwasserschutzes kann die Stromproduktion beeinträchtigt werden (z.B. Bielersee und unterliegende Flusskraftwerke).
(11) Verbauungen, die den Abfluss beschleunigen, verunstetigen den Abfluss.
(12) Verbauungen, die den Abfluss beschleunigen, vermindern die Grundwasserneubildung und damit die Verfügbarkeit für Trinkwassergewinnung und Landwirtschaft.
(13) Direkte Konkurrenz um Mengen (Fliessgewässer, Grundwasser).
(14) Landwirtschaftliche Entnahmen können zur Absenkung des Grundwasserspiegels führen und ökologische Schäden an grundwasserabhängigen Ökosystemen verursachen. Quellfassungen beseitigen natürliche Feuchtstandorte.
(15) Drainagen können ggf. den Abfluss beschleunigen und Hochwasserspitzen erhöhen.

Teil B – Wasserqualität

Die chemische, physikalische und biologische Beschaffenheit des Wassers bestimmt, für welche Nutzungen es zur Verfügung steht und wie es sich auf die aquatischen Ökosysteme auswirkt. Chemische und biologische Beeinträchtigungen der Wasserqualität ergeben sich als Nebeneffekte anderer Nutzungen. Physikalische Veränderungen können direkt beabsichtigt sein, wenn Wärme gezielt dem Wasser zugeführt oder entzogen wird. Konflikte aufgrund der Wasserqualität können sich zwischen einem Nutzungsanspruch ergeben, der auf eine bestimmte Wasserqualität angewiesen ist, und einem anderen, der diese Qualität mindert.

In diesem Kapitel werden – nach Nutzungsarten gegliedert – relevante Stoffeinträge in Oberflächen- und Grundwasser sowie deren Wirkung auf andere Wassernutzungen und die aquatischen Lebensräume beschrieben. Dabei wird auch der Austausch von thermischer Energie durch Kühl- und Wärmenutzung einbezogen.

B1 | Stoffeinträge in Oberflächengewässer aus Siedlungen

Siedlungen beeinflussen die Gewässerqualität in erheblichem Ausmass (zur Siedlungswasserwirtschaft siehe ausführlicher auch NFP 61 Thematische Synthese 3 «Nachhaltige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in der Schweiz»). Die stofflichen Einträge in Oberflächengewässer erfolgen in erster Linie über Kläranlagen, während ein kleinerer Teil der aus Siedlungen stammenden Stofffracht auf anderen Wegen in die Gewässer gelangt. Drei Eintragspfade spielen eine Rolle:

- Wenn in Siedlungsgebieten, die über eine Mischkanalisation entwässert werden (70% der Schweizer Siedlungsfläche), bei starkem Regen das Kanalsystem die Regenmengen nicht fassen kann, wird ein Teil des Abwassers ungereinigt in Flüsse «entlastet». Für den Eintrag von Schadstoffen sind die bei Trockenwetter abfliessenden Mengen massgeblich: Circa 3,5% des jährlichen häuslichen Abwasservolumens gelangen via Mischwasserentlastung direkt in Fliessgewässer [98], [99].
- Wo Regenwasser über ein separates Kanalsystem gesammelt wird (30% der Siedlungsfläche), gelangen Stoffe wie Bauchemikalien (z.B. Biozide oder Schwermetalle, die z.B. aus Gebäudehüllen ausgewaschen werden) auch via Regenwassereinleitung in die Oberflächengewässer.
- Etwa 10% der in Siedlungsgebieten diffus eingetragenen Chemikalien gelangen nach Abschätzungen der Kantone zudem durch Versickerung ins Grundwasser [100]. Ein grosser Teil der ins Grundwasser eingetragenen Mikroverunreinigungen dürfte auf undichte Gebäudeanschlussleitungen zurückgehen: Es wird geschätzt, dass in der Schweiz 50% der privaten Liegenschaftsentwässerungen undicht sind [101], [102]. Untersuchungen über das Ausmass der Einträge ins Grundwasser sind aber rar.

Öffentliche Kanalisationen und Abwasserreinigungsanlagen (ARA) stellen die wichtigsten Instrumente dar, um die Belastung der Gewässer durch Siedlungsabwasser zu minimieren. Der seit den 1960er-Jahren mit grossem Aufwand gestartete Aufbau der ARAs erfasste im Jahr 2000 beinahe alle (97%) der Haushalte [103]. Der Wiederbeschaffungswert der Kläranlagen liegt heute bei 13,.6 Mrd. CHF, hinzu kommen 66,4 Mrd. CHF für die öffentliche Kanalisation (siehe auch NFP 61 Thematische Synthese 3) [104].

Ursprünglich wurden die Abwasserreinigungsanlagen darauf ausgelegt, Pathogene zurückzuhalten und organisches Material abzubauen. Später kam die Elimination von Stickstoff und Phosphor sowie unpolaren Chemikalien (Sorption am Klärschlamm) dazu. Ohne den Bau von Kläranlagen wäre vermutlich die Gewinnung einwandfreien Trinkwassers aus flusswassergespeisten Grundwasservorkommen heute vielerorts nicht mehr möglich. Auch die Seen profitieren stark von der Elimination von Nährstoffen durch die ARAs.

Abwasser enthält eine Vielzahl von Stoffen aus unterschiedlichsten Anwendungen. Schätzungen zufolge befinden sich in der Schweiz etwa 30 000 verschiedene Substanzen in der täglichen Anwendung [105]. Ein grosser Teil davon wird von den heutigen Kläranlagen vollständig abgebaut oder zurückgehalten, doch bestimmte Substanzen sind persistent und gelangen in die Gewässer.

Durch die 2014 verabschiedete technische Nachrüstung von Kläranlagen (Ozonung, Aktivkohle) wird deren Reinigungsleistung stark erhöht [106]. Der Ausbau erfolgt bei jenen rund 100 Kläranlagen, die die höchste Reduktion von Mikroverunreinigungen versprechen: erstens bei sehr grossen Kläranlagen, zweitens bei solchen im Einzugsgebiet von Seen. Weiter sollen ARAs aufgerüstet werden, die im Fliessgewässer einen Abwasseranteil von mehr als 10% verursachen.

Die Einträge der Mikroverunreinigungen lassen sich mit der Nachrüstung der Kläranlagen nicht gänzlich vermeiden. Bei Regenwetter gelangt ein Teil der Abwasserfrachten über Mischwasserüberläufe weiterhin ungereinigt in die Flüsse. Zudem widersetzen sich einige Chemikalien auch der neuen Reinigungstechnologie [107]. Dies wird als unbefriedigend erachtet, sodass das BAFU über weitergehende Massnahmen an der Quelle nachdenkt, wie sie sich beim Phosphatverbot in Waschmitteln bewährt haben. Hilfreich wäre für die Behörden auch ein Chemikalienregister der in Produktion und Konsumprodukten eingesetzten Stoffe, anhand dessen sie kritische Substanzen schneller ersehen und mit in der Umwelt festgestellten Belastungen abgleichen könnten.

Links: Wie stark die Gewässer durch landwirtschaftliche Schadstoffe belastet werden, hängt stark von den Anbaumethoden ab: Der Biolandbau verzichtet beispielsweise auf synthetische Pflanzenschutzmittel. (Foto Felix Luder)
Mitte: Der Bau von Kläranlagen seit den 1970er-Jahren hat die Wasserqualität der Flüsse und Seen grundlegend verbessert. Um auch mit persistenten Schadstoffen aus Haushalten und Industrie fertig zu werden, soll die Klärtechnologie aber weiter verbessert werden. Forschende in der Kläranlage Mönchaltorf (ZH). (SWIP)
Rechts: Auch Haus- und Schrebergärten kommen als Quelle von Schadstoffen wie Pflanzenschutzmitteln und Nitrat infrage. (Foto Reportair)

Potenzielle Konflikte und Synergien

Konflikte mit der Trinkwasserversorgung

Ein erheblicher Teil des Trinkwassers in der Schweiz stammt aus Wasserressourcen, deren Qualität von ARAs beeinflusst werden kann. Erstens sind dies von Flüssen gespeiste Lockergesteinsgrundwasserleiter in Tallagen, zweitens Seen (20% der Trinkwasserversorgung) [108] und drittens mit Flusswasser künstlich angereicherte Grundwasservorkommen (z.B. Basel, Genf, Zürich). In solchen Vorkommen gilt Mikroverunreinigungen und Pathogenen aus dem Ablauf von Kläranlagen besonderes Augenmerk.

In den Gewässern und im Trinkwasser sind Mikroverunreinigungen laut GSchV generell unerwünscht. Um Einträge in die Gewässer vorsorglich zu vermeiden, wird deren Herkunft und Verbleib eingehend untersucht. So analysierte eine Studie des Kantons Bern die Aare und ihre Zuflüsse oberhalb Berns, aus denen sich die Trinkwasservorkommen der Stadt Bern speisen. Unterhalb von Kläranlagen wurden Pharmaka und deren Abbauprodukte gefunden, und zwar erwartungsgemäss umso mehr, je geringer die Wasserführung des jeweiligen Flusses bzw. je höher der Anteil an Abwasser war [109].

In der Agglomeration Liestal im Kanton Basel-Landschaft wird ebenfalls kommunales Abwasser unterhalb der Stadt in die Ergolz eingeleitet. Die Mengen sind für ein kleines Fliessgewässer erheblich, bei Trockenwetter kann das Abwasser bis zu 40% der Wasserführung ausmachen. Unterhalb der ARA Liestal infiltriert Ergolzwasser in den darunterliegen-

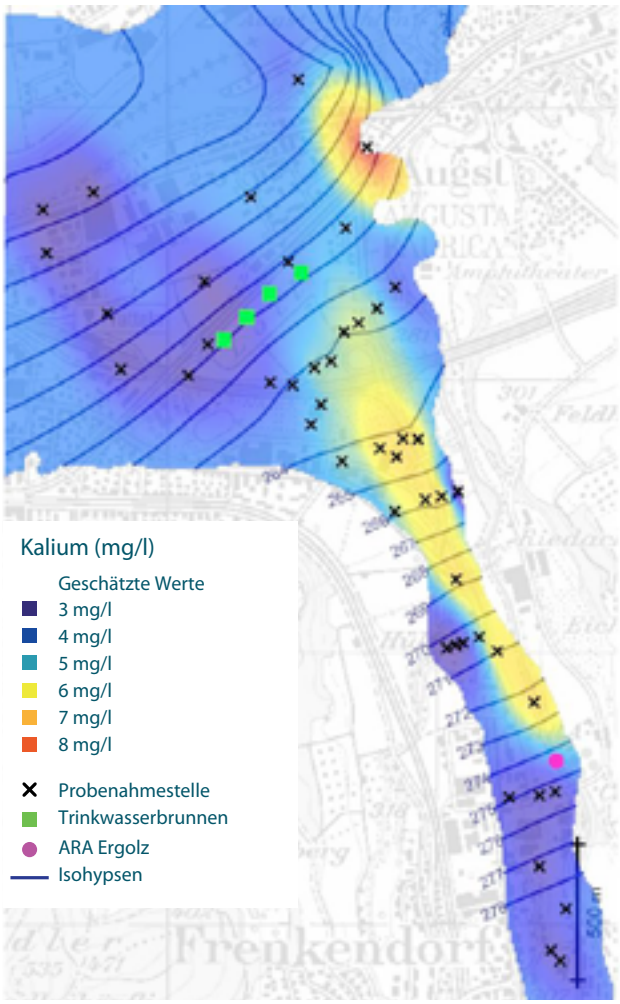


Abb. 11: Abwasserbeeinflussung des Grundwassers durch die Untere Ergolz (BL), illustriert anhand von Kaliumkonzentrationen [110]. (Grafik Dominik Bänninger, AUE BL)

den Lockergesteinsgrundwasserleiter. Weniger als zwei Kilometer flussabwärts befinden sich vier bedeutende Trinkwasserfassungen (siehe Abb. 11).
Im ARA-Ablauf und in der Ergolz wurden 285 Chemikalien gefunden [110]. 20 bis 25% der Stoffe konnten auch im Grundwasser nachgewiesen werden. Die meisten von ihnen werden über längere Strecken im Grundwasserleiter transportiert und gelangen bis an die Trinkwasserbrunnen. Als Sofortmassnahme wurde der Auslauf der ARA vorübergehend flussabwärts verlegt, wo die Ergolz die lokalen Trinkwasservorkommen kaum noch beeinflusst. Zukünftig wird die ARA Liestal aus diesem Grund eine vierte Reinigungsstufe erhalten [110].
Die Befunde der Untersuchungen in den Kantonen Bern und Basel-Landschaft sind charakteristisch für Trinkwasservorkommen mit hohen Flusswasseranteilen. Die im Rohwasser gefundenen Konzentrationen an Mikroverunreinigungen liegen typischerweise zwischen 0,01 und 0,1 µg/l, vereinzelt aber auch über dem vom Bundesamt für Gesundheit festgelegten Vorsorgewert für genotoxische Substanzen von 0,1 µg/l [110].
Welche zusätzlichen qualitativen Auswirkungen auf die Trinkwassergewinnung aus flussgespeistem Grundwasser sich durch höhere Flusstemperaturen infolge des Klimawandels ergeben könnten, wurde vom NFP 61-Projekt RIBACLIM untersucht (siehe Kasten unten). Etwa ein Drittel des Trinkwassers in der Schweiz stammt aus flussnahen Grundwasserfassungen, deren Qualität massgeblich durch die Infiltration von Flusswasser bestimmt ist.

Konflikte mit der Gewässerökologie

Rund 700 kommunale und regionale Kläranlagen gibt es in der Schweiz und ihre Abläufe beeinflussen etwa 4800 km Fliessstrecke [106]. Je kleiner die betroffenen Flüsse und je höher der Anteil an Abwasser, desto höher sind die gemessenen Konzentrationen an Nähr- und Schadstoffen. Wo der Abwasseranteil am Niedrigwasserabfluss über 10% liegt (rund 1400 km Fliessstrecken), werden Mengen nachgewiesen, die einen erheblichen Stressfaktor für aquatische Organismen darstellen [106]. Ob die für die Gewässerökologie relevanten Stoffe aus Haushalten oder industriell-gewerblichen Anwendungen stammen, lässt sich derzeit oft nicht entscheiden.
Wie komplex die Klärung von gewässerökologischen Zusammenhängen ist, zeigte schon das schweizweite Forschungsprojekt Fischnetz, das von 1998 bis 2003 verschiedenen möglichen Ursachen des Fischrückgangs in den Fliessgewässern auf den Grund ging. Dabei wurde unter anderem der Hypothese nachgegangen, die Lebensbedingungen der Fische könnten durch Chemikalien beeinträchtigt sein. Die Forschenden kamen zu

Links: Die Nutzung von Grundwasservorkommen als Trinkwasser erfordert neben technischem Verständnis strategische Überlegungen mit einem Planungshorizont von mehreren Jahrzehnten. (GW-TEMP)
Mitte: Wie sich Mikroverunreinigungen im Fluss bei der Infiltration ins Grundwasser verhalten, lässt sich mit Säulenexperimenten im Labor nachverfolgen. (RIBACLIM)
Rechts: Die grossen Talflüsse stehen für die Menschen unsichtbar mit einem unterirdischen Grundwasserstrom in dauerndem Austausch. Weil dabei auch Schadstoffe ins Grundwasser – die wichtigste Trinkwasserressource der Schweiz – gelangen können, muss die Flusswasserqualität dauernd überwacht werden. (RIBACLIM)

Kann sich der Klimawandel auf die Grundwasserqualität auswirken? Erkenntnisse aus dem NFP 61-Forschungsprojekt RIBACLIM

Niedrige Wasserstände und höhere Wassertemperaturen in den Flüssen sind erwartete Auswirkungen des Klimawandels. Sinkt der Abfluss, nehmen der Anteil der Kläranlagenabläufe und die Schadstoffkonzentration in den Fliessgewässern zu – und wirken sich indirekt auf infiltriertes Grundwasser aus. Eine höhere Wassertemperatur hat auch Einfluss auf die Qualität des Grundwassers, denn beim Durchdringen der Flusssohle wird der enthaltene Sauerstoff (durch Reaktion mit organischem Material) schneller aufgebraucht. Normalerweise ist im Flusswasser genügend Nitrat als Oxidationsmittel vorhanden, sodass erst bei lang anhaltender hoher Temperatur der Abbau organischer Substanz zu einer Reduktion und einer Mobilisierung von Mangan und Eisen führt. Gelöste Mangan(II)- und Eisen(II)ionen bilden beim Fördern des Grundwassers in Kontakt mit Luftsauerstoff braune Flocken, welche Brunnenfilter verstopfen können und eine Aufbereitung des Trinkwassers nötig machen. In normalen Sommern wird dies in der Schweiz nicht beobachtet, im Hitzesommer 2003 trat ein solcher Effekt allerdings an einigen Förderbrunnen auf. Das Forschungsprojekt RIBACLIM kam zu dem Schluss, dass auch in Zukunft nur bei lang anhaltenden Hitzewellen mit einer Mobilisierung von Mangan und Eisen und zusätzlichen Aufbereitungskosten für die Wasserversorger zu rechnen ist [111]. Eine Notwendigkeit zur Installation weiterer Aufbereitungsschritte – so die Autorenschaft – besteht derzeit nicht [112].

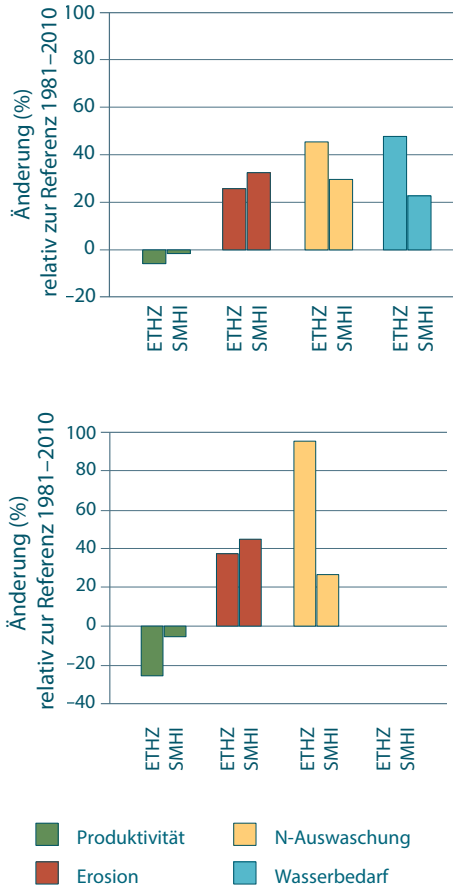


Abb. 12: Auswirkung des Klimawandels (Szenarien ETHZ-CLM und SMHI) auf die landwirtschaftlichen Funktionen Produktivität (grün), Erosion (rot), N-Auswaschung (beige) und Wasserbedarf (blau). Aggregierte Ergebnisse für die Broye-Region **(oben)** und das Greifenseegebiet **(unten)** [124].

dem Schluss, dass zumindest unterhalb von Kläranlagen und Mischwasserentlastungen der Eintrag von Schadstoffen bedeutsam für die Fischpopulationen war. Auch hohe Pestizidkonzentrationen aus der Landwirtschaft wurden als mögliche Teilursache des beobachteten Fischrückgangs identifiziert [113].
Auch heute noch sind die Auswirkungen von Mikroverunreinigungen auf die Gewässerökologie nur in Ansätzen bekannt. Dies hat nicht zuletzt mit der erwähnten Stoffvielfalt zu tun. Durch die grosse Zahl nachgewiesener Stoffe, aber auch den Einfluss anderer relevanter Faktoren (Nährstoffe, Temperatur, Morphologie) ist es bis heute nur schwer möglich, den ökologischen Zustand eines Fliessgewässers mit der Belastung an Schadstoffen zu korrelieren.

B2 | Stoffeinträge in Oberflächengewässer aus Industrie und Gewerbe

Historisch haben sich Gewerbe und Industrie stets am Wasser angesiedelt. Ihr Interesse galt einerseits der Wasserkraft, andererseits der Verfügbarkeit von Wasser für die Produktion und den Abtransport von Produktionsabfällen. Während es bis in die 1960er-Jahre nur geringe Auflagen für die Reinigung von industriellem Abwasser gab, ist der Eintrag infolge der Gewässerschutzgesetzgebung seither stark zurückgegangen. Industrie- und Gewerbebetriebe müssen dafür sorgen, dass

- «so wenig abzuleitendes Abwasser anfällt und so wenig Stoffe, die Gewässer verunreinigen können, abgeleitet werden, als dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist;
- nicht verschmutztes Abwasser und Kühlwasser getrennt von verschmutztem Abwasser anfällt;
- verschmutztes Abwasser weder verdünnt noch mit anderem Abwasser vermischt wird, um die Anforderungen einzuhalten» [114].

Mit Ausnahme der Grossindustrie leiten Industrie und Gewerbe ihr Abwasser in kommunale Kläranlagen ein. Der Abwasseranteil industriell-gewerblicher Herkunft wird teilweise in den ARA-Jahresberichten angegeben, aber von den Kantonen meist nicht summarisch publiziert. Bekannt ist, dass von abwasserrelevanten Betrieben in den Kantonen Bern und Solothurn eine Schmutzstofffracht (CSB) von rund 340 000 Einwohnergleichwerten in ARAs geleitet wurde [115]. Hinzu kommen die behandelten Abwässer einer einstelligen Zahl grosser Direkteinleiter, die über eigene Kläranlagen verfügen. Über die gesamthafte chemische Belastung der Schweizer Gewässer ist bisher nur ein unzureichendes Bild verfügbar. Neue analytische Methoden wie sie z.B. an der Rheinüberwachungsstation in Basel eingesetzt werden, können hier zukünftig wertvolle Daten liefern und auch allfälligen Handlungsbedarf im industriell-gewerblichen Bereich konkretisieren [116].

Potenzielle Konflikte und Synergien

Konflikt mit Trinkwasserversorgung und Gewässerökologie

Der Kenntnisstand über die von Industrie und Gewerbe in die Kanalisation eingeleiteten Chemikalien ist gering. Häufig kann auf die Verursacher von kritischen Einleitungen nur aus der Analyse von Abwasserproben oder Klärschlamm zurückgeschlossen werden. Angesichts der enormen Anzahl verschiedener Stoffe im Abwasser ist dies aber nur für einzelne Stoffe möglich.
Die Trinkwasserversorgung kann auf zweierlei Weise von industriellen Einleitungen betroffen sein, entweder durch Infiltration von Flusswasser mit hoher Abwasserfracht ins Grundwasser oder bei der Gewinnung von Seewasser unterhalb industrieller oder kommunaler ARAs. So fand der Kanton St. Gallen bei einer Messkampagne 2012 im Zürichsee auffällige Konzentrationen von Mikroverunreinigungen, die höchstwahrscheinlich auf industrielle Anwendungen zurückgehen [117], [118].
Für den Genfersee, aus dem fast das gesamte Trinkwasser der Stadt Genf stammt, spielt die Industrie im Wallis eine entscheidende Rolle. Seit 2004 ist bekannt, dass erhebliche Mengen zum Teil unbekannter Chemikalien mit dem Abwasser verschiedener industrieller Einleiter über die Rhone in den See gelangen. Der Kanton Wallis hat eine Verordnung verabschiedet, nach der nur noch eine Höchstmenge von 200 Gramm einer Substanz pro Tag in die Umwelt gelangen darf [119]. Die chemische Industrie im Einzugsgebiet hat daraufhin die Beseitigung ihrer Abwässer neu organisiert und zum Teil auf die Verbrennung von Produktionsabfällen umgestellt. Die Verordnung ist seit 2012 in Kraft und die Jahresfracht an Pharmarückständen in der Rhone oberhalb des Genfersees hat sich zwischen 2008 und 2012 von 2400 kg auf 400 kg vermindert [119].

B3 | Stoffeinträge aus der Landwirtschaft

Der mit der landwirtschaftlichen Produktion einhergehende Einsatz an Nährstoffen, Pflanzenschutzmitteln (PSM) und Pharmazeutika (in der Tierhaltung) kann auf vielfältige Weise zu Belastungen der Gewässer führen. Für Seen sind insbesondere Phosphateinträge bedeutsam, da sie zur Eutrophierung beitragen. Fliessgewässer werden sowohl durch Nährstoff- (N, P) als auch PSM-Einträge beeinflusst. Auch wenn von den eingesetzten PSM nur 0,01 bis 1% in Oberflächengewässer gelangen, können die erreichten Konzentrationen ökotoxikologisch relevante Werte erreichen. Grundwasser ist vor allem durch einzelne persistente Pflanzenschutzmittel, ihre Umwandlungsprodukte und Nitrat beeinflusst.

Abhängigkeit vom Produktionssystem

Landwirtschaftliche Aktivitäten unterscheiden sich erheblich in ihren Auswirkungen auf die Wasserqualität. Beim Ackerbau dominieren in der Regel Pestizideinträge in Oberflächen- und Grundwasser, Nitratauswa-

schung und Erosion; der Obst- und Rebbau ist oft mit Insektizid- und Fungizidbelastungen verknüpft; und auf Grünland gelangen je nach Tierbestand Phosphor, Stickstoff und auch Schwermetalle wie Kupfer und Zink und gegebenenfalls Pharmazeutika aus der Gülle in die Gewässer.

Ein entscheidender Faktor sind Anbaumethoden und Bodenbearbeitung: Biolandbau, integrierte und konventionelle Produktion unterscheiden sich im Ausmass der Gewässerbelastung. Zusätzlich spielen spezifische standortgebundene Faktoren wie Hangneigung, Bodenbedeckung und hydraulische Verbindung zum jeweiligen Gewässer eine wichtige Rolle.

Das NFP 61-Projekt AGWAM hat gezeigt, dass die politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen einen grösseren Einfluss auf die landwirtschaftliche Nutzung und damit die Stoffflüsse ausüben als der bis 2050 zu erwartende Klimawandel (siehe Kasten unten). Die Daten von IWAQA deuten ebenfalls darauf hin, dass das Klimasignal verglichen mit den gesellschaftlichen Einflussmöglichkeiten wie z.B. dem Direktzahlungssystem an die Landwirtinnen und Landwirte vergleichsweise schwach ist (siehe Kasten S. 38). Dennoch ist das Klima nicht bedeutungslos: Einerseits zeichnet sich ab, dass das Risiko für Nitratauswaschung und Erosion durch verstärkte Winterniederschläge weiter zunehmen wird. Andererseits ist es nicht unwahrscheinlich, dass klimabedingt neue Schadorganismen in der Schweizer Landwirtschaft auftauchen und neue Strategien im Pflanzenschutz erfordern [120]. Im November 2013 lancierten mehrere schweizerische Umweltverbände einen Vorstoss für eine umfassende Bundesstrategie zur Senkung des Pestizideinsatzes [121]. Derzeit entscheidet der Bund, ob ein Programm zur Pestizidreduktion lanciert werden soll, wie es mehrere Mitgliedstaaten der EU bereits umsetzen [122].

Potenzielle Konflikte und Synergien

Konflikt mit der Trinkwasserversorgung

Die Trinkwasserversorgung kann durch das Auftreten landwirtschaftlicher Hilfsstoffe in ihren Vorkommen betroffen sein. Dabei hängt es von den Substanzeigenschaften der Stoffe ab, in welchem Umfang sie ins Grundwasser vordringen können. Wenig sorbierende und hinreichend langlebige Stoffe werden häufiger im Grundwasser nachgewiesen.

Im nationalen Grundwasserüberwachungsnetz NAQUA wurden 2011 an 55% der Messstellen Wirkstoffe von Pflanzenschutzmitteln oder deren Abbauprodukte (Metaboliten) gefunden. Am auffälligsten waren die Metaboliten einiger Herbizide, die den Anforderungswert der GSchV von 0,1 µg/l an 20% der Messstellen überstiegen. Neu gilt für die Konzentration dieser Stoffe im Trinkwasser seit Anfang 2014 laut Fremd- und Inhaltsstoffverordnung (FIV) ein Höchstwert von 10 µg/l. Unter den PSM-Wirkstoffen werden vor allem Herbizide nachgewiesen, der Grenzwert der FIV von 0,1 µg/l an 2% der NAQUA-Messstellen überschritten [123]. Auch erhöhte Konzentrationen von Nitrat im Grundwasser gehen überwiegend auf landwirtschaftliche Aktivitäten zurück. Während 2011 die Nitratkonzentration an 16% der NAQUA-Messstellen über dem Anforderungswert der GSchV von 25 mg/l lag, überschritten in ackerbaulich genutzten Gebieten mehr als 60% der Messstellen diesen Wert. 16% lagen gar über dem Toleranzwert für Trinkwasser von 40 mg/l, konnten also für die Trinkwasserversorgung nicht genutzt werden [125].

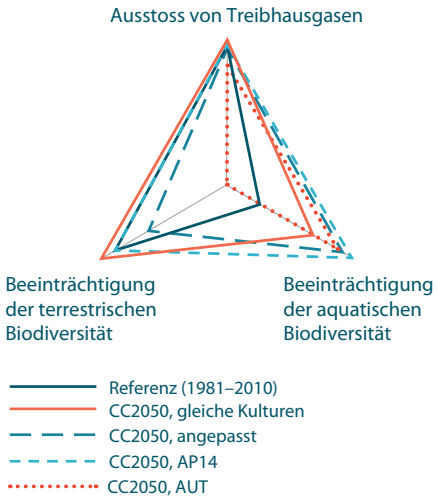
Konflikt mit der Gewässerökologie

An einigen Seen des Mittellands wurden der Öffentlichkeit die Folgen übermässigen Nährstoffeinsatzes in der Landwirtschaft bereits in den 1970er- und 1980er-Jahren bewusst. Neben der Belastung durch Abwasser führten eine hohe Nutztierdichte und die Aus-

Wie wirkt sich der Klimawandel auf die Umweltwirkungen der Landwirtschaft aus? Erkenntnisse aus dem NFP 61-Projekt AGWAM

Modellrechnungen im Rahmen des Projekts zeigen, dass infolge des Klimawandels um das Jahr 2050 in der Broye-Region (VD/FR) Umweltwirkungen und Wasserbedarf deutlich zunehmen und zugleich die landwirtschaftliche Produktivität zurückgeht. In der feuchteren Greifenseeregion (ZH) erhöht der Klimawandel ebenfalls die Umweltwirkungen (Erosion, Nährstoffauswaschung), allerdings ohne dass es zu einer Steigerung der Bewässerung kommt (Abb. 12). Der Rückgang der Produktivität ist am Greifensee noch ausgeprägter, allerdings nicht infolge Trockenheit, sondern vor allem wegen höherer Temperaturen.

Auf Ebene von Einzelbetrieben wäre zur Profitmaximierung unter dem Einfluss des Klimawandels eine Umstellung im Anbaumix, in der Düngung und in der Bewässerungsintensität nötig. Dadurch würden aber auch die Umweltwirkungen (bezogen auf die Produktionsmenge) zunehmen – u.a. mit negativen Folgen für die aquatische Biodiversität (Abb. 13 oben). Ein typischer Ackerbaubetrieb in der Broye-Ebene würde vermehrt Winterkulturen anbauen, welche von Direktzahlungen profitieren (z.B. Winterraps), dafür weniger Mais. Trotz Wasserknappheit bleibt die Bewässerung von Spezialkulturen wie Kartoffeln und Zuckerrüben profitabel. Erst bei tieferen Preisen (EU-Niveau) wird der Anbau von Kartoffeln unwirtschaftlich (Abb. 13 unten). Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass Preisniveau und Direktzahlungen (AP14) den Anbaumix stärker beeinflussen als der Klimawandel.



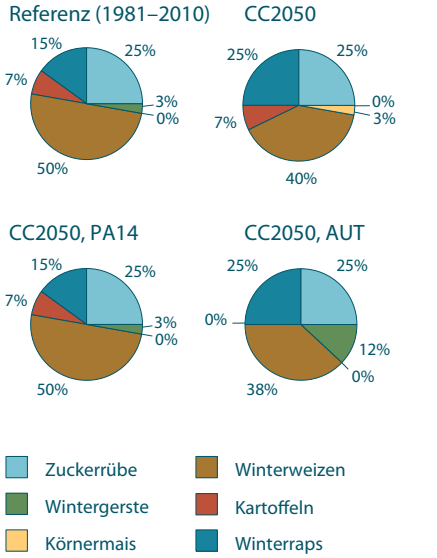


Abb. 13: Ackerbaubetrieb in der Broye-Ebene unter verschiedenen Klima-, Preis- (EU-Niveau, Österreich) und Politikszenarien (Direktzahlungen gemäss Agrarpolitik 2014–2017):
(oben) Umweltwirkungen pro MJ produzierter Energie (Ausstoss an Treibhausgasen, Beeinträchtigung der aquatischen und der terrestrischen Biodiversität);
(unten) Flächenanteile der angebauten Kulturen [60].

Einflüsse der Landnutzung auf Qualität und Nutzbarkeit von Fliessgewässern: Erkenntnisse aus dem NFP 61-Projekt IWAQA

Der Eintrag von Stoffen in Oberflächengewässer wird einerseits durch Landnutzung und -bewirtschaftung, andererseits durch die klimatischen Bedingungen (z.B. Auftreten von Starkniederschlägen) beeinflusst. Doch welche Faktoren wirken sich stärker aus? Um den relativen Einfluss von Klimaänderung und sozioökonomischen Veränderungen auf die zukünftige Wasserqualität und den ökologischen Zustand von Fliessgewässern abzuschätzen, wurde im Rahmen des Projekts IWAQA eine Modellkette entwickelt, die die Prozesse von der Klimaveränderung bis zu den Auswirkungen auf die Gewässerökologie miteinander verknüpft.

Vier sozioökonomische Szenarien (Tabelle 2) und acht Handlungsalternativen (plus deren Kombination, siehe Tabelle 3) wurden in einem typischen Einzugsgebiet des Mittellandes (Mönchaltorfer Aa, Region Greifensee) getestet. Die heutige Situation wurde anhand bestehender Daten untersucht, ergänzt durch solche aus einer Feldstudie.

Es zeigt sich, dass die Vorhersageunsicherheiten schon unter heutigen Bedingungen gross sind. Dies liegt insbesondere an Unsicherheiten beim Niederschlag oder dem Einsatz von Chemikalien (Ort, Zeitpunkt, Mengen). Vorhersagen werden zudem durch mangelndes Wissen über die Ökologie zahlreicher Arten erschwert.

Trotz dieser Einschränkungen zeigen die Modellergebnisse klar auf, dass der zukünftige Gewässerzustand hauptsächlich durch die menschlichen Aktivitäten in den Einzugsgebieten bestimmt wird. Der Klimawandel übt nur einen begrenzten Einfluss aus, wobei diese Veränderungen v.a. auf erhöhte Temperaturen zurückzuführen sind (Abb. 14).

Aus Managementsicht bedeuten die Ergebnisse, dass Massnahmen, die heute zur Verbesserung des ökologischen Zustands beitragen, auch die meisten der erwarteten zukünftigen Probleme mindern können. Die Modelle zeigen auch, dass dies nicht für alle Parameter gilt: Ein klimabedingtes Ansteigen der mittleren Wassertemperatur in den Fliessgewässern und die entsprechenden ökologischen Folgen werden kaum zu verhindern sein. Zwar lassen sich die Maximaltemperaturen durch eine angemessene Uferbestockung abpuffern, die Durchschnittswerte können aber kaum beeinflusst werden.

Tabelle 2: Beschreibung der von IWAQA verwendeten sozioökonomischen Szenarien. [126]

	Einkommen	Bevölkerung	Siedlung
Status quo	+0,4%/Jahr	Wie heute	Wie heute
Boom	+4%	+730%	+300%
Doom	–1,5%	–20%	–
2000 W	+2%	+20%	+5%

Tabelle 3: Übersicht über die von IWAQA untersuchten Massnahmen.

Massnahmen	Bereich	Beabsichtigte Wirkung
Verbot von Bioziden in Fassaden	Siedlung	Verminderung Biozideintrag
Vergrösserung von Regenrückhaltebecken	Siedlung	Weniger Abwasserentlastungen
Erhöhung von versickerungsfähigen Belägen	Siedlung	Geringere Abflussbildung
Rückhalt von Dachwasser	Siedlung	Geringere Abflussbildung
Aufrüstung von Kläranlagen	Siedlung	Geringere Stoffeinträge
Umstellung auf Biolandbau	Landwirtschaft	Geringere Stoffeinträge
Vollständige Uferbestockung	Landwirtschaft	Geringere Stoffeinträge, Beschattung
Umstellung auf extensives Grasland	Landwirtschaft	Geringere Stoffeinträge
Kombination aller Massnahmen	Siedlung u. Landwirtschaft	Geringere Stoffeinträge, Beschattung

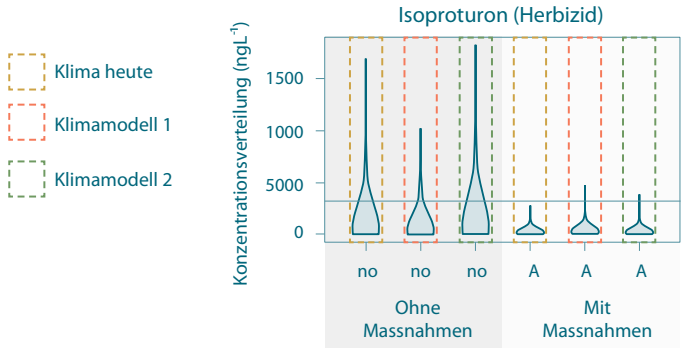


Abb. 14: Beispielhafte Darstellung der Wirkung von Klima und dem Ergreifen weitergehender Gewässerschutzmassnahmen auf die zu erwartenden Herbizidkonzentrationen im Jahr 2050 (no: keine Massnahmen, A: alle untersuchten Massnahmen berücksichtigt).

bringung der dabei anfallenden Gülle zu hohen Phosphoreinträgen in Seen. In Seen wie Baldeggersee und Sempachersee kam es zu Algenblüten, die im Tiefenbereich Sauerstoff zehrten und zu Fischsterben führten. Seit Mitte der 1980er-Jahre wurden durch den Bau von Kläranlagen, durch seeinterne Massnahmen wie Belüftung und durch externe Massnahmen im Bereich der Landwirtschaft substanzielle Verbesserungen des Seezustands erreicht. Die Phosphorkonzentration ist in beiden Seen seit mehreren Jahren unter dem Zielwert von 30 mg/m^3 geblieben. Weiterhin sind die Einträge in einige Seen noch zu hoch; die Seen müssen weiter belüftet werden [127]. Durch PSM-Einträge sind v.a. kleine Fliessgewässer im Mittelland, die den überwiegenden Teil des Gewässernetzes ausmachen, betroffen. Eine umfassende Untersuchung von fünf mittleren Fliessgewässern im Jahr 2012 zeigte, dass die Gewässer weit höher belastet waren als bisher bekannt [128]. Von 288 messbaren Wirkstoffen wurden 104 in den Gewässern nachgewiesen. Für zahlreiche Herbizide und einige Fungizide und Biozide wurden Konzentrationen über dem numerischen Anforderungswert von 0,1 µg/l gemessen. Die Summe der gemessenen Konzentrationen aller Pestizide lag in 78% der Proben höher als 1 µg/l. Da es sich um zweiwöchige Mischproben und damit um mittlere Konzentrationen handelte, müssen die Maximalkonzentrationen in diesen mittelgrossen Gewässern zeitweise um ein Vielfaches höher gewesen sein. Für kleinere Gewässer gilt dies in verstärktem Mass [128]. Für die Gewässerökologie massgeblich sind ökotoxikologische Wirkschwellen. In 70% der Proben wurden die chronischen Qualitätskriterien (englisch environmental quality standards, EQS) für mindestens eine Substanz überschritten, bei fast der Hälfte sogar für zwei Wirkstoffe. Selbst wenn man nur die Ökotoxizität der jeweils ökologisch wirksamsten Substanz berücksichtigt, wiesen zwei Drittel der Gewässerproben ein ökotoxisches Potenzial auf [129]. Erschwerend kommt hinzu, dass Oberflächengewässer auch durch erodiertes Bodenmaterial beeinträchtigt werden, welches als Feinsediment den Lebensraum für Fische und Invertebraten im Sedimentbereich massgeblich verschlechtert.

B4 | Ansprüche an chemische Wasserqualität und Trinkwasservorkommen

Die Schweizer Gesetzgebung schützt die Gewässer, die von ihnen abhängigen Lebensräume und im Besonderen die Trinkwasservorkommen vor Stoffeinträgen. Die ökologischen Zielanforderungen sind in Anhang 1 der Gewässerschutzverordnung (GSchV) festgelegt, die physikalisch-chemischen Ziele für die Wasserqualität in Anhang 2. Angestrebt wird ein naturnaher Zustand, die Abwesenheit künstlicher, langlebiger Stoffe im Wasser, den Schwebstoffen und den Sedimenten und generell die Vermeidung von Gewässerverunreinigungen durch menschliche Tätigkeiten.

Im Gewässerschutz lassen sich verschiedene historische Phasen unterscheiden. Ging es am Anfang um den Schutz vor bakteriellen Verunreinigungen des Trinkwassers, rückten in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts Nährstoffeinträge in den Mittelpunkt, die Probleme sowohl für Trinkwasser (Nitratgehalt) als auch für die ökologische Qualität von Seen (Phosphat, Eutrophierung) mit sich brachten. Diese Einträge haben sich aufgrund der Abwasserreinigung, des Phosphatverbots in Waschmitteln und strengerer ökologischer Auflagen in der Landwirtschaft spürbar reduziert. Bei einigen Seen im Mittelland sind sie allerdings weiterhin problematisch. In ihrer Bedeutung für Gewässer und Trinkwasserversorgung erst seit einigen Jahren sichtbar wird die Belastung der Wasservorkommen mit sogenannten Mikroverunreinigungen. Diese (synthetischen organischen) Stoffe gelangen etwa aus Industrie, Gewerbe und Haushalten in die Gewässer oder als Pestizide aus der Landwirtschaft. Erst durch die Verbesserung der chemischen Analytik kann die Anwesenheit vieler dieser Stoffe in der Umwelt nachgewiesen werden.
Heute ist eine Vielzahl von Stoffeinträgen in die Gewässer unter Beobachtung, wobei ein grosser Teil bereits durch technische oder gesetzliche Massnahmen geregelt ist. Der Nachweis von Mikroplastik in den Gewässern bis hin zu den Meeren zeigt jedoch, dass der Gewässerschutz immer wieder mit neuen Aspekten konfrontiert werden wird [130].

Hoher Schutz für das Trinkwasser

Trinkwasservorkommen im Untergrund, gleich ob bereits genutzt oder nur für spätere Nutzung vorgesehen, sind besonders geschützt und durch Anhang 2, 22 GSchV an die Qualitätsanforderungen für Trinkwasser gekoppelt. Demnach dürfen im Grundwasser bestimmte Höchstkonzentrationen nicht überschritten werden, namentlich 25 mg/l Nitrat und 0.1 µg/l für Pestizidwirkstoffe. Für genotoxische Substanzen im Trinkwasser hat das Bundesamt für Gesundheit (BAG) 2012 einen Vorsorgewert von ebenfalls 0,1 µg/l festgelegt [131]. Eine neue bedeutende Ausnahme hat das BAG 2014 nach dem Konzept der thresholds of toxicological concern (TTC-Konzept) für sogenannte «nicht-relevante Metaboliten» von Pflanzenschutzmitteln eingeführt [132]. Danach gilt für organische Verbindungen, für die keine ausreichende Datenbasis zur Toxizität vorliegt, laut Fremd- und Inhaltsstoffverordnung (FIV) neu ein humantoxikologisch begründeter Trinkwasserhöchstwert von 10 µg/l (statt 0,1 µg/l).

Grundwasser als Lebensraum schützen

Neuerdings zeigt sich, dass nicht nur die Lebewesen in Fliessgewässern von Schadstoffen betroffen sind, sondern auch die im Grundwasser. Inzwischen konnten rund 2000 Arten von Kleinlebewesen wie Strudelwürmer, Rädertierchen oder Wassermilben identifiziert werden, die in Grundwasserleitern leben und

«Die erste meiner drei Visionen für das Wasser ist die Reduktion von Mikroverunreinigungen in unseren Gewässern: es braucht eine Diskussion, welche Chemikalien verwendet werden. Die zweite Vision ist eine grossräumigere Organisation der Wasserversorgung, denn aus einer übergeordneten Sicht kann man lokale Probleme besser lösen. Die dritte Vision ist, dass man Wasser nicht mehr als Transportmittel für menschliche Exkremente benutzt, sondern dezentrale Systeme schafft, in denen das nicht nötig ist.»

Urs von Gunten
Eawag

Mehr dazu im RIBACLIM unter www.nfp61.ch

durch ihre Stoffwechselprozesse zur Qualitätsverbesserung des Trinkwassers beitragen [133]. Dieser unterirdische Lebensraum ist nominell ebenfalls durch die Gewässerschutzverordnung geschützt (Ziel naturnahe und standortgerechte Biozönose), allerdings ist noch unklar, ob weitere Schutzmassnahmen erforderlich sind.

B5 | Thermische Nutzung und Wärmeeinträge

Oberflächen- und Grundwasser wird in der Schweiz seit Langem in grossem Umfang zur Kühlung verwendet. Den heute mit Abstand grössten Kühlbedarf haben thermische Kraftwerke: Die fünf hiesigen Atomkraftwerke entnehmen zu diesem Zweck Flusswasser aus Aare und Rhein. Mengenmässig ist dies neben der Wasserkraft die bedeutendste Nutzung von Wasser in der Schweiz. 2006 waren es 1643 Mio. m^3 oder 42% der landesweiten Wassernutzung (exkl. Wasserkraft) [82].
Auch für Industrieanlagen und Gebäude wird Wasser zur Kühlung eingesetzt. Bisher wurde dafür überwiegend Flusswasser verwendet. Die chemische Industrie erhöhte ihren Kühlwasserbezug aus Flüssen zwischen 1972 und 2006 um das 2,5-Fache [82]. Inzwischen zeichnet sich wegen immer höherer Flusstemperaturen eine Verlagerung der industriellen Prozess- und Gebäudekühlung auf Grundwasser ab [82]. Bei steigenden Sommertemperaturen infolge des Klimawandels dürfte der Bedarf an Grundwasser für die Gebäudekühlung weiter ansteigen. Auch Seewasser kommt für diese Zwecke infrage, wenn kühles Wasser unterhalb der Sprungschicht entnommen wird. Die Stadt Zürich prüft beispielsweise im Rahmen ihrer Strategie der 2000-Watt-Gesellschaft seewasserbasierte Kühlungskapazitäten von rund 800 GWh/a [134].

Potenzielle Konflikte und Synergien

Grundwassererwärmung

Mehrere Kantone berichten von einem steigenden Bedarf an Kühlwasser (z.B. BE, SG, ZH) und spürbaren Einflüssen auf das Grundwasser. So gab es im Jahr 2010 im Kanton Bern 210 Kühlwasserkonzessionen [80]. In der Wassernutzungsstrategie des Kantons heisst es: «Die raumplanerische Einteilung in Industrie- und Gewerbezonen hat eine räumliche Konzentration dieser Nutzung zur Folge, wodurch vermehrt mit negativen Auswirkungen auf das Grundwasser (Erwärmung) gerechnet werden muss. Vor allem grössere Industrie- und Dienstleistungsbetriebe benötigen sowohl Grund- als auch Oberflächenwasser für die betriebliche Kühlung.» [135]

Konflikt mit der Flussökologie

Bei hohen Flusswassertemperaturen kann die Kühlung der Atomkraftwerke durch die zusätzliche Erwärmung der Flüsse die aquatischen Ökosysteme gefährden. So musste im Hitzesommer 2003 das Kraftwerk Beznau die Stromproduktion drosseln, um die Erwärmung der Aare innerhalb der gesetzlichen Grenze zu halten [136]. Mittelfristig wird sich diese Beeinträchtigung durch den geplanten Ausstieg aus der Atomkraft auflösen.

Konflikte zwischen Unter- und Oberliegern

Zusätzlich bestehen Konflikte zwischen Ober- und Unterliegern: Da die GSchV absolute Obergrenzen für Wassertemperaturen festschreibt, wird das Potenzial durch die Nutzungen der Oberlieger beeinträchtigt. Eine kantonsübergreifende Koordination besteht bis heute nicht. Diese Nutzungskonflikte dürften sich durch die klimabedingte Erwärmung weiter akzentuieren.

Wärmenutzung Seen

Die in grossen Seen enthaltenen Wärmemengen sind erheblich. Die Nutzung von Seewasserwärme bietet Möglichkeiten zur Beheizung von Wohn- und Geschäftsgebäuden über Fernwärmenetze. An einigen Seen sind kleinere Systeme bereits in Betrieb. Angesichts des rechnerisch nutzbaren Wärmepotenzials von Schweizer Seen und der energiepolitischen Weichenstellung hin zu erneuerbaren Quellen ist damit zu rechnen, dass entsprechende Projekte an mehreren Seen in den Fokus genommen werden. So prüft die Stadt Zürich die Machbarkeit einer Massnahme, die dem See Wärme in der Grössenordnung eines Viertels der Leistung eines Atomkraftwerks entziehen soll (300 GWh/a) [137]. Dazu müssten dem See 5 m^3/s an Wasser entnommen werden, fast das Vierfache der Pumpmengen der Stadtzürcher Wasserversorgung (1,3 m^3/s). Lässt sich die in Seewasser gebundene Wärme ohne schädliche ökologische oder hydrologische Nebenwirkungen entziehen, zeichnet sich mittelfristig eine weitere gesellschaftlich bedeutende Wassernutzung ab. Seen sind aber schon heute Gegenstand vielfältiger Nutzungen und Ansprüche, sodass ein hoher Koordinationsbedarf besteht. Durch Seeregulierungen, Wassereinleitungen und -entnahmen, Kühlwassernutzung und Wärmeentzug dürfen im Gewässer die natürlichen Temperaturverhältnisse, die Nährstoffverteilung sowie die Lebens- und Fortpflanzungsbedingungen für Organismen insbesondere in den Ufer- und Flachwasserbereichen nicht nachteilig verändert werden.

B6 | Sonstige Nutzungen mit Einfluss auf die Wasserqualität

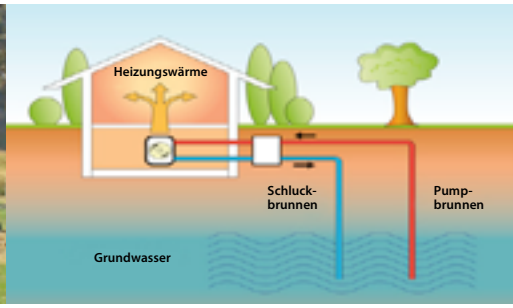
Qualitative Folgen von Revitalisierungen

Seitens der Wasserversorger gibt es mitunter Vorbehalte gegen Renaturierungen in Flussbereichen mit Grundwasserfassungen. Qualitätsprobleme können auftreten, wenn Flusswasser ohne genügend lange Bodenpassage an die Fassungspumpen gelangt. Von der Wasserversorgung Winterthur (Töss, Stadtwerke Winterthur) konnte gezeigt werden, dass der Konflikt zwischen Revitalisierung und Trinkwassergewinnung bei sorgfältigem Vorgehen lösbar ist.

«Wir haben Modelle oder mathematische Beschreibungen verwendet, um Aussagen über die Entwicklung eines Gewässers in den nächsten Jahren und Jahrzehnten machen zu können. Wir interessieren uns für Massnahmen, die es ermöglichen, den guten Zustand der Gewässer auch in Zukunft zu erhalten oder weiter zu verbessern.»

Christian Stamm
Eawag

Mehr dazu im IWAQA unter www.nfp61.ch



Links: Wenn die Kanalisation durch starke Regenfälle überlastet ist, müssen Teile des Abwassers ungereinigt in die Flüsse geleitet werden. (IWAQA)
Mitte: In der unmittelbaren Umgebung von Grundwasserfassungen sind potenziell wasserschädigende Aktivitäten wie das Ausbringen von Gülle verboten. (GW-TREND)
Rechts: Bei der Wärmenutzung von Grundwasser müssen dessen schützende Deckschichten durchbohrt werden, wodurch das Risiko von Verschmutzungen steigt. Die Behörden genehmigen solche Heizsysteme normalerweise nur dort, wo das Grundwasser nicht der Trinkwasserversorgung dient.
(Grafik: arahan – Fotolia.com)

Indem gezielt einzelne Abschnitte direkt oberhalb der Fassungen von der Revitalisierung und Aufweitung ausgenommen wurden, liess sich an den Töss-nahen Fassungen eine genügend lange Bodenpassage und somit eine hohe Trinkwasserqualität sicherstellen [138]. Die jahrelange Begleitforschung der Stadtwerke Winterthur an der Töss zeigte, dass «natürliche Gewässer in der Regel eine höhere Infiltrationsleistung in den Grundwasserträger zeigen als kanalisierte. Gelungene Revitalisierungsprojekte beeinflussen die Ergiebigkeit eines Grundwassergewinnungsgebiets positiv. Im Zeichen drohenden Klimawandels stellt dies künftig sehr wohl einen positiven Aspekt für Wasserversorgungen dar» [138].
In anderen Fällen liessen sich die Befürchtungen der Wasserversorger nicht vollständig ausräumen. In einer SVGW-Umfrage zu Revitalisierungsmassnahmen berichteten sechs von achtzehn Wasserversorgern mit Erfahrungen zu Revitalisierungsprojekten von qualitativen oder quantitativen Änderungen, sieben sahen keine Folgen für die Versorgung, die restlichen fünf Versorgungsbetriebe konnten keine Angaben über mögliche Konsequenzen machen [139].

Stoffeinträge durch den Strassen- und Schienenverkehr

National-, Kantons- und Gemeindestrassen sowie die Trassees, Bahnhöfe und Betriebsgelände der Eisenbahnen nehmen bezogen auf die Gesamtfläche der Schweiz zwar nur wenig Raum ein, in Agglomerationen und engen Tallagen beanspruchen sie aber einen grossen Teil der Fläche. Sowohl von motorbetriebenen Strassenfahrzeugen als auch vom Eisenbahnverkehr gelangen Schadstoffe in die Gewässer.
Strassenbürtige Stoffe sind Schwermetalle wie Cadmium, Blei, Kupfer, Zink, Platin, Palladium und Rhodium sowie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe und der Benzinzusatzstoff Methyltertiärbutylether (MTBE). Sie stammen aus Brems-, Kupplungs- und Pneuabrieb sowie aus Schmiermitteln, Katalysatoren und Treibstoffen [140]. Beim öffentlichen Verkehr ist der Einsatz von Herbiziden zur Freihaltung des Gleisbetts von Bedeutung – die SBB setzen dafür etwa 2 Tonnen Glyphosat pro Jahr ein –, aber auch der Abrieb von Kupfer aus Fahrdrähten von Trams, Trolleybussen und Lokomotiven [141].
Kritisch sind die entsprechenden Stoffeinträge vor allem dort, wo die Verkehrswege nahe an Fluss- oder Seeufern verlaufen und Schadstoffe mit dem Regenwasser direkt in die Gewässer gelangen. Wie eine Studie zum Zürichsee zeigt, ist die Einleitung von Strassenabwasser vor allem für die Uferzone ökologisch von Belang. Durch eine Optimierung der Strassenentwässerung und der Strassenreinigung lassen sich diese Einträge vermindern [142].

Stoffeinträge über den Luftpfad

Leicht flüchtige Stoffe gelangen aus verschiedensten Anwendungen in die Atmosphäre, werden mit dem Niederschlag ausgewaschen und gelangen so in Böden, Grundwasser und Oberflächengewässer. Der relative Beitrag dieses Eintragspfades ist unklar, sollte aber bei flüchtigen Substanzen mit hoher Persistenz (z.B. fluorierte Stoffe), besonders wenn sie in hohen Mengen in Haushaltsprodukten angewendet werden, weiter abgeklärt werden.

Unkonventionelles Erdgas (Fracking)

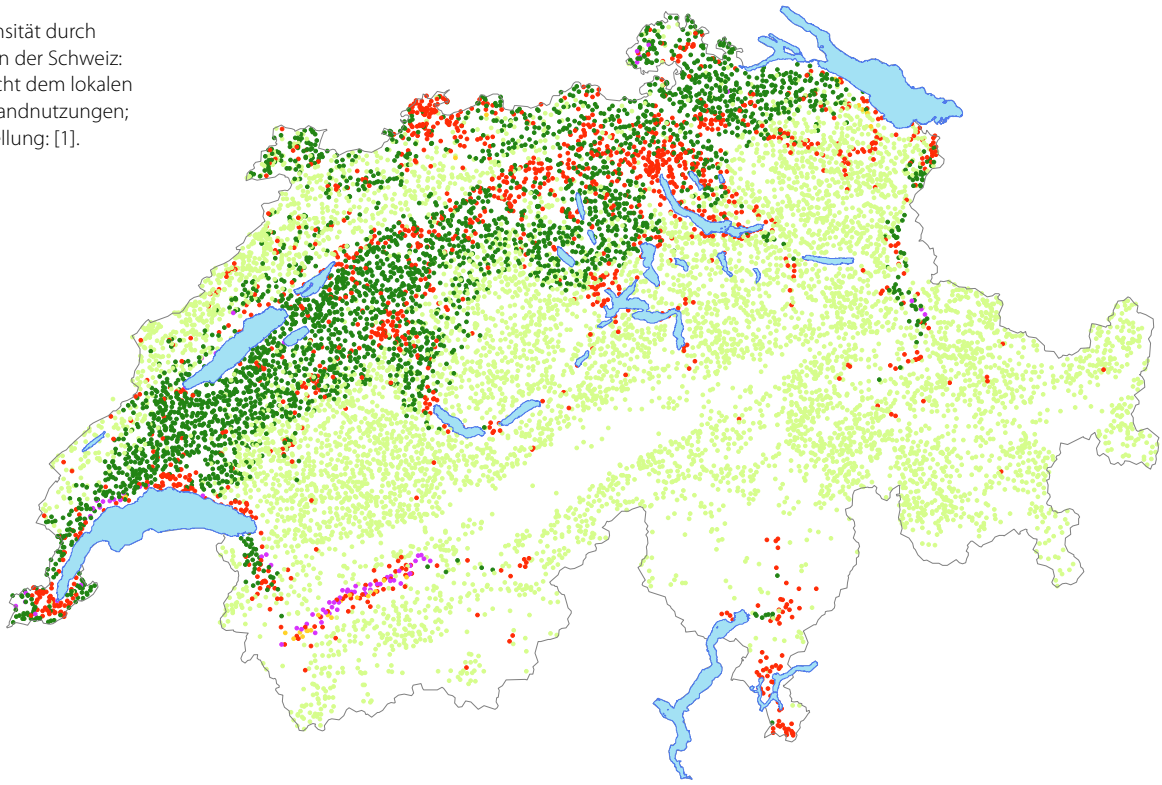
Eine Prognose für die künftige Nutzung unkonventioneller Erdgasvorkommen in der Schweiz ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich. Die potenziellen Vorkommen sind ungenügend erforscht, werden aber aufgrund der regionalen Geologie im Vergleich zu anderen europäischen Ländern oder gar den USA als begrenzt erachtet. Potenzielle Vorkommen werden allenfalls unter den dicht besiedelten Regionen des Mittellandes zwischen Genfersee und Bodensee vermutet [143]. Erfahrungen aus den USA zeigen, dass verschiedene wasserbezogene Probleme auftreten können: erheblicher Wasserbedarf für die Gasgewinnung, Gasbelastung von Grund- und Trinkwasser, Probleme bei der Aufbereitung des stark salinen, mit toxischen und teils radioaktiven Schwermetallen belasteten Prozesswassers bis hin zur Radiumanreicherung im Sediment der als Vorfluter dienenden Bäche [144].

Fazit Teil B
Wasserqualität

Die chemische Wasserqualität wird durch zahlreiche Nutzungen beeinflusst (siehe Matrix B). In vielfacher Hinsicht haben sich die Bemühungen der Vergangenheit zur Verbesserung der Wasserqualität äusserst positiv ausgewirkt. Dennoch werden Nähr- und Schadstoffe teilweise in unerwünscht hohen Konzentrationen in Gewässern nachgewiesen. Das Ziel gemäss GSchV, die Gewässer von «künstlichen, langlebigen Stoffen» freizuhalten, wird mit der aktuellen Praxis nicht umfassend erreicht. Als gezielte Gegenmassnahme werden in näherer Zukunft rund 100 Kläranlagen technisch weiter ausgebaut, um organische Mikroverunreinigungen in wesentlich höherem Mass aus dem Abwasser zu eliminieren als bisher. Andererseits gibt es auch Bestrebungen, den qualitativen Schutz zurückzunehmen. So hat das BAG 2013 für Abbauprodukte von Pestiziden im Trinkwasser aus humantoxikologischer Sicht einen hundertfach höheren Grenzwert eingeführt als für Pestizide selber. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu beachten, dass Anforderungen an die Wasserqualität z.T. auf unterschiedlichen gesetzlichen Grundlagen basieren, die verschiedene Ziele (z.B. unbeeinträchtigte Ökosysteme oder menschliche Gesundheit) verfolgen. Daraus können sich widersprüchliche Anforderungen an die Wasserqualität ergeben. Aktuell gilt dies z.B. im Bereich der PSM und deren Metaboliten [145]. In der Gesamtschau ergibt sich, dass bisher die einfach umsetzbaren Gewässerschutzmassnahmen realisiert werden, da sie wirtschaftlich für die einzelnen Akteure tragbar und technisch gut realisierbar sind, etwa die geplante Sanierung und Aufrüstung von Kläranlagen. Diese Massnahmen decken aber nicht alle Problemfelder ab. Handlungsbedarf besteht im Bereich der diffusen Stoffeinträge aus Landwirtschaft und Siedlung, aber auch von gewerblichen und industriellen Einleitern, die bis heute vergleichsweise schlecht erfasst sind. Je stärker sich die verschiedenen menschlichen Aktivitäten auf der Fläche konzentrieren, desto wahrscheinlicher werden Konflikte mit dem gesellschaftlichen Anspruch auf sauberes Wasser. Abb. 15 verdeutlicht, dass im dicht besiedelten Mittelland und den alpinen Haupttälern Landwirtschaft und Siedlung einen hohen Nutzungsdruck auf die Gewässer und deren Qualität ausüben.

In Matrix B sind die Ergebnisse von Teil B «Wasserqualität» zusammengefasst und in Anmerkungen kurz erläutert.

Abb. 15: Flächennutzungsintensität durch Landwirtschaft und Siedlung in der Schweiz: Die Dichte der Punkte entspricht dem lokalen Flächenanteil der jeweiligen Landnutzungen; Daten: [146]; [90]; [147]. Darstellung: [1].



Matrix B – Nutzungsüberlagerungen und potenzielle Konflikte bezüglich Wasserqualität

Kapitel	Wirkt auf … / Gesell-schaftlicher Anspruch	Ökologie Flüsse	Ökologie Seen	Grundwasser	Trinkwasser
B1	Siedlung	1	1	2	3
B2	Industrie/ Gewerbe	4	4	4	4
B3	Landwirtschaft	5	5	5	5
B4	Kühlung/ Wärmeeintrag	6	7	8	8

Bedeutender Konflikt Konflikt

- Als bedeutende Konflikte sind solche Situationen gekennzeichnet, die längere Fliessstrecken oder grosse Wassermengen betreffen oder andere Interessen weitverbreitet stark beeinträchtigen.
- Konflikte bzw. Konkurrenzen sind in der Regel lokal oder regional bzw. saisonal, verstärkt bei Trockenheit und hohen Temperaturen.

(1) Deutliche Verbesserung vor allem bei Nährstoffen gegenüber den 1970er-Jahren, aber weiterhin Eintrag unerwünschter Mikroverunreinigungen.
(2) Durch Infiltration von Flusswasser werden Mikroverunreinigungen auch im Grundwasser nachgewiesen.
(3) Flusswasserqualität durch ARA stark verbessert, Trinkwasser wird entweder direkt durch ARAs beeinflusst (bei Entnahme von Seewasser) oder indirekt via Infiltration ins Grundwasser.
(4) Generelle Qualitätsverbesserung der in die Flüsse und die Kanalisation gelangenden Abwässer, aber weiterhin unerwünschte Mikroverunreinigungen aus der Produktion in Flüssen, Grundwasser, Trinkwasser und Seen.
(5) Einträge von Pestiziden und Nährstoffen in Flüsse, Seen und Grundwasser.
(6) Hoher Eintrag von Wärme durch Kühlung von Kernkraftwerken, saisonal limitierend für Flussökologie wie auch Stromerzeugung.
(7) Nutzung von Seewasser für Kühlzwecke kann zur Erwärmung führen.
(8) Die Nutzung von Grundwasser zur Kühlung kann zu einer unerwünschten Erwärmung führen.

Teil C – Hydromorphologie und aquatische Lebensräume

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen von Nutzungen diskutiert, die Gewässer durch hydromorphologische Eingriffe und Bauwerke verändern.

C1 | Hydromorphologische Einflüsse von Laufkraftwerken im Mittelland

Die Wasserkraft verursacht in der Schweiz zusammen mit dem Hochwasserschutz die bedeutendsten Eingriffe in die Hydromorphologie. Der Grossteil der Fliessgewässer wird für die Stromgewinnung genutzt, sei es durch Aufstau und/oder Wasserentnahmen (siehe Abb. 2).

Eingriffe in die natürliche Flussmorphologie

Veränderungen der natürlichen Hydromorphologie der für Wasserkraft genutzten Flüsse sind eine unvermeidliche Begleiterscheinung von Stauwehren. In unmittelbarer Umgebung von Wehren sind meist zusätzliche Umbauten von Ufern und Sohle nötig [148]. Die stärksten Auswirkungen auf die Hydromorphologie der Fliessgewässer sind normalerweise unterhalb des Stauwehrs zu verzeichnen: Die starke Strömung des aus den Turbinen austretenden Wassers führt flussabwärts infolge des Geschiebeentzugs im Staubecken zu starken erosiven Angriffen an Ufer und Flusssohle. Um diesen Effekten zu begegnen, werden oftmals weite Uferstrecken unterhalb von Stauwehren hart verbaut. Der Geschiebeabtrag an der Sohle wird durch Sohlschwellen oder harte Verbauungen verhindert.

Stauwehre können damit die aquatischen Lebensräume mehrere Kilometer flussauf- und flussabwärts verändern. So wurde beim Neubau des Rheinkraftwerks Rheinfelden der Fluss im Unterlauf um bis zu 12 Meter abgetieft, indem auf einer Länge von 1,8 km ein Kanal von 100 Meter Breite in das Flussbett gebaggert wurde. Diese Baumassnahme soll einerseits den Abfluss des Wassers verbessern, aber auch ein höheres Gefälle schaffen und so die Stromausbeute vergrössern [149].

Potenzielle Konflikte und Synergien

Stauwehre und Fischgängigkeit

Im Mittelland ist bei der Wasserkraftnutzung aus ökologischer Sicht die Unterbrechung des Flusskontinuums durch Stauwehre am folgenreichsten. In solchen Flüssen sind die Fische vom Zugang zu Futter-, Schutz- und Laichplätzen abgeschnitten. Fischarten wie Lachs, Nase und Aal, die in ihrem Lebenszyklus weite Strecken zurücklegen, können sich nicht mehr natürlich fortpflanzen. So stellt ein 6 Meter hohes Wehr an der untersten Töss im Kanton Zürich für 11 von 23 Fischarten ein unüberwindbares Aufstiegshindernis dar [150].

In jüngerer Zeit werden grosse Anstrengungen unternommen, den Fischen den Aufstieg durch Rampen, Umgehungsgerinne und Fischtreppen zu ermöglichen, so z.B. auch am neuen Rheinkraftwerk Rheinfelden.

Eine besondere Herausforderung ist die Wanderung der Fische flussabwärts, besonders bei grossen Flusskraftwerken. Der Abstieg ist aber für den Bestand vieler Fischarten ebenso wichtig wie der Aufstieg. Da die Fische stets der stärksten Strömung folgen, gelangen sie oft in die Turbinen und verenden. Zwar lassen sie sich durch Rechen von den Turbinen fernhalten, dies resultiert aber in einer verminderten Stromausbeute.

Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich arbeitet daher mit Fischbiologen der Eawag an einer Optimierung von Position und Form solcher Rechen, um die Wanderfische in das Umgehungsgewässer abzudrängen und die Stromgewinnung möglichst wenig zu beeinträchtigen [151]. Für Kraftwerksneubauten ist die freie Fischwanderung durch Art. 9 BGF vorgeschrieben [152].

Geschiebehaushalt

Jedes Querbauwerk in einem Fliessgewässer bedeutet einen Eingriff in die natürliche Dynamik von Geschiebeabtrag (Erosion), Geschiebetransport und Ablagerung (Auflandung). Durch die verschiedensten Baumassnahmen haben die meisten Flüsse im Alpenraum und im Mittelland einen stark veränderten Geschiebehaushalt. Neben dem Hochwasserschutz (siehe S. 45) und Materialentnahmen ist die Stromgewinnung mittels Wehren und Staustufen Hauptursache für eine gestörte Geschiebedynamik. Neben diesen menschlichen Eingriffen können sich zukünftig auch klimabedingte Veränderungen im Geschiebehaushalt einstellen (siehe Kasten S. 45).

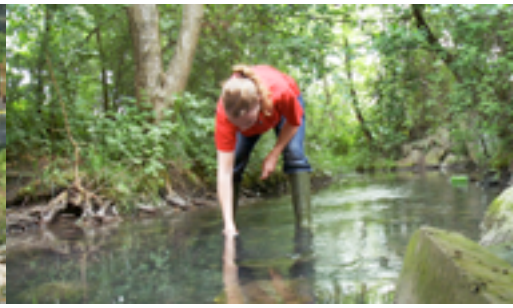
Flusswehre können flussabwärts innerhalb von wenigen Jahren eine bedeutende Eintiefung der Flusssohle verursachen. Im Staubereich werden Kies, Sand und Feinsediment abgelagert und die Flusssohle mit grossen Mengen an Feinmaterial zugedeckt (kolmatiert). Unterhalb des Stauwehrs hingegen fehlt es an Geschiebematerial und damit an Laichgründen für kieslaichende Fischarten und generell an Lebensräumen für strömungsliebende Fisch-, aber auch Insektenarten [150].

Temperaturänderungen

Im Staubereich von Laufwasserkraftwerken ist die Strömung stark vermindert und die Wassertemperatur kann im Sommer auf über 15 Grad ansteigen. Die Lebensbedingungen für Fische und andere Lebewesen verändern sich grundlegend gegenüber den ursprünglich sauerstoffreichen und kühlen Flüssen (Äschenregion). Grosse Flussabschnitte ändern ihren ökologischen Charakter, die Artenzusammensetzung spiegelt dies wider.

Zukünftige Entwicklungen

Die Inhaber bestehender Wasserkraftwerke sind laut Art. 83a GSchG dazu verpflichtet, die Fischgängigkeit und den Geschiebetransport an Flusskraftwerken bis 2031 zu sanieren. Bis 2014 müssen die Kantone dazu eine Sanierungsplanung vorlegen. Die Kosten der Sanierungsmassnahmen werden den Wasser-



kraftbetrieben nach Art. 15abis EnG aus einer Abgabe auf den Stromverbrauch erstattet, die seit 2012 in Höhe von 0,1 Rappen pro kWh erhoben wird. In den kommenden 20 Jahren steht 1 Mrd. CHF für solche Sanierungen zur Verfügung.

Der Bundesrat plant im Rahmen der Energiestrategie 2050 unter anderem mit einer höheren Stromausbeute aus Laufkraftwerken [153]. Zum Teil soll dies durch Aus- und Umbau bestehender Kraftwerke geschehen, also mit Höherstau und Austiefungen flussabwärts, zum anderen Teil durch Neubauten von Laufkraftwerken an heute noch nicht genutzten Flussabschnitten. In einer Studie für das Bundesamt für Energie über die Wirkung der 2013 in Planung befindlichen Grosswasserkraftwerke betrafen 16 von 25 analysierten Projekten Laufkraftwerke [154]. In den meisten Fällen wird eine Produktionserhöhung angestrebt (19 von 25 Projekten). Würden alle 25 Ausbauprojekte verwirklicht, würde eine Mehrproduktion von 2617 GWh pro Jahr resultieren, wovon 82% auf Neubauten entfallen [154]. 8 Projekte befinden sich bereits in der Projektierungsphase, die anderen sind weniger weit fortgeschritten.

Deutlich wird dadurch, dass die Eingriffe in die Flussmorphologie weiter zunehmen könnten. Der Fokus der Wasserkraftunternehmen liegt auf der Steigerung und Flexibilisierung der Stromproduktion. Doch werden auch Projekte erwähnt, die einen Zusatznutzen für andere Bereiche haben. So sollen 8 Projekte Schwall-Sunk-Effekte vermindern und 2 den Hochwasserschutz verbessern.

C2 | Hydromorphologische Einflüsse des Hochwasserschutzes

Hochwasser sind in der Schweiz seit Menschengedenken die häufigsten und schadensreichsten Naturereignisse. Der Begriff «Wassernot» wird vor allem in den Berggebieten von jeher nicht mit Dürre, sondern mit Überschwemmungen verbunden. Ein beeindruckendes Zeugnis der Verwüstungen und des menschlichen Leids durch Hochwasser liefert Jeremias Gotthelfs historische Erzählung «Die Wassernoth im Emmenthal am 13. August 1837».

Kampf gegen das Wasser

Seit Jahrhunderten stemmen sich die Menschen deshalb gegen die Macht des Wassers. Schon 1714 wurde das Wasser der Kander in den Thunersee umgeleitet, und in den dreihundert Jahren seither wurden zahllose weitere Flussanpassungen (Korrektionen) vorgenommen [155]. Mit Querbauwerken und Kanalisierung versucht man, Wasser und Geschiebe zu kontrollieren und Überschwemmungen durch Dammbauten und die Nutzung von Seen als Rückhaltebecken zu verhindern.

So beeindruckend und wichtig die Gesamtheit des Hochwasserschutzwerks Schweiz ist, so darf dennoch nicht vergessen werden, wie gross die Nebenwirkungen der Eingriffe auf den Wasserhaushalt und die Fliessgewässerökosysteme sind.

Um diese Auswirkungen zu minimieren, soll der Schutz gegen Hochwasser heute möglichst gewässerverträglich erfolgen (Art. 4, Abs. 2 Wasserbaugesetz). Gemäss WBG soll der Hochwasserschutz naturnah ausgeführt wer-

Links: In der Schweiz sollen in den kommenden 80 Jahren Flussstrecken von rund 4000 km Länge revitalisiert werden. Die Neugestaltung der Thur bei Neunforn (TG) ist ein wichtiges Pilotprojekt und liefert Forschung und Praxis wesentliche Erkenntnisse über Revitalisierungsfolgen. (Foto Patricia Fry)
Mitte: Flüsse transportieren je nach Gefälle und Wasserführung Geröll, Kies, Sand und Feinsedimente. Diese stetige Geschiebeverlagerung ist auch für Flusslebewesen von entscheidender Bedeutung. (SEDRIVER)
Rechts: Werden einem Bach für die Bewässerung grosse Wassermengen entnommen, kann die Wassertemperatur überdurchschnittlich ansteigen. Dies verschlechtert die Lebensbedingungen im Gewässer und ist bei der Bewilligung von Entnahmen zu berücksichtigen. (AGWAM)

Geschiebehaushalt im Klimawandel:
Erkenntnisse aus dem NFP 61-Projekt SEDRIVER

Im Rahmen des Projekts SEDRIVER wurde untersucht, wie sich der Geschiebetransport in alpinen Gewässern unter verschiedenen Rahmenbedingungen ändert. Dazu wurde das Simulationsprogramm sedFlow in Flüssen entwickelt [156]. Es berücksichtigt neue Ansätze zur Berechnung der Geschiebeverlagerung in steilen Gerinnen alpiner Einzugsgebiete. Mit diesem Programm konnte die Situation an der Kleinen Emme im Kanton Luzern unter verschiedenen Klimaszenarien simuliert werden und Voraussagen über die potenziellen Folgen für die Flusslebewesen gemacht werden. Infolge höherer Abflüsse im Winter dürften sich Erosion und Geschiebetransport verstärken, während im Sommer mit längeren Trockenperioden und vermindertem Abfluss eine grössere Habitatvielfalt mit günstigeren Lebensbedingungen vor allem für junge Bachforellen erwartet wird [157].

Links: Je stärker die Ufervegetation ein Gewässer beschattet, desto besser ist es in Hitzephasen gegen übermässige Erwärmung geschützt. Die Broye im Kanton Waadt. (AGWAM)
Mitte: Querverbauungen gehören zu den aus ökologischer Sicht folgenreichsten Eingriffen in Fliessgewässer, z.B. an der Töss (ZH). (Foto Andri Bryner, Eawag)
Rechts: Revitalisierungen wie hier an der Thur bei Neunforn werten nicht nur die Gewässerökologie auf, sondern tragen auch zum Hochwasserschutz bei, indem sie neue Retentionsräume schaffen. (Foto Patricia Fry)

den und den Gewässern ausreichenden Raum gewähren.
Diese Prinzipien gehen in die gleiche Richtung wie das am 1. Januar 2011 in Kraft getretene revidierte Gewässerschutzgesetz (GSchG), mit dem der Gesetzgeber folgende Ziele verfolgt: «die Förderung von Revitalisierungen (Wiederherstellung der natürlichen Funktionen eines verbauten, korrigierten, überdeckten oder eingedolten oberirdischen Gewässers mit baulichen Massnahmen) sowie Sicherung und extensive Bewirtschaftung des Gewässerraums» [158]. Revitalisierungen sollen aber nicht flächendeckend, sondern überwiegend an Gewässerabschnitten realisiert werden, bei denen ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis zu erwarten ist. Dabei gelten Massnahmen als vorrangig, die zugleich der Gewässerökologie und dem Hochwasserschutz zugute kommen (Art. 41d Abs. 1 Bst. c GSchV).

Potenzielle Konflikte und Synergien

Aufgrund der wasserbaulichen Eingriffe der Vergangenheit weisen viele Gewässerabschnitte heute keinen natürlichen Verlauf mehr auf und dementsprechend fehlen auch intakte aquatische Lebensräume und eine standortgerechte Ufervegetation [159]. Viele Gewässerabschnitte können ihre natürlichen Funktionen nicht mehr in der vom WBG geforderten Weise erfüllen, denn infolge Dammbau und anschliessender Sohlenerosion sind die angrenzenden Auenwälder und damit die Quervernetzung mit den Lebensräumen ihrer Umgebung verloren gegangen. Dadurch wird die Artenvielfalt stark eingeschränkt, vielen Lebewesen fehlen Brut- und Laichplätze wie auch Nahrungsquellen.

Sohlschwellen und Fischgängigkeit

Nicht dem Hochwasserschutz selber, sondern der Bekämpfung seiner unerwünschten Folgen dienen die meisten Querbauwerke in den Flüssen. Weil die Strömung infolge verengter Querschnitte und begradigter, steilerer Abschnitte vor allem bei hoher Wasserführung stark beschleunigt ist, graben sich die Flüsse immer tiefer in die Sohle ein. Um die Eintiefung – und damit das Absinken des Grundwasserspiegels in der Umgebung – zu begrenzen, wurden Zehntausende Sohlschwellen in die Flüsse eingebaut. Rund 101 000 Sohlschwellen und Wehre (höher als 50 cm) zählte das BAFU in einer schweizweiten Bestandsaufnahme von 2010 [160]. Schon kleine Hindernisse (>25 cm) unterbinden die Aufwärtswanderung von Cypriniden (Karpfenartigen), ab 70 cm Höhe sind auch Salmoniden (Lachsfische) blockiert. Querverbauungen gehören zu den aus ökologischer Sicht folgenreichsten Eingriffen in Fliessgewässer, denn sie verhindern den Aufstieg wandernder Fische in ihre Laichgebiete und damit den Bestand dieser Arten. Stark verbaut sind vor allem kleinere Fliessgewässer im Voralpengebiet zwischen 600 und 1200 m ü. M. [160]. Beispielsweise sind im Kanton Zürich derzeit 50% der Fliessgewässer stark beeinträchtigt, künstlich oder eingedolt und mit 27 000 künstlichen Schwellen und Querwerken verbaut. Der Kanton sieht grossen Revitalisierungsbedarf, denn nur 31% der Fliessgewässer sind aktuell natürlich oder naturnah [161].
Ein zweites unerwünschtes Resultat des flussbaubedingten Absinkens der Flusssohle ist, dass an der Einmündung von Seitenbächen bis zu mehrere Meter hohe Schwellen entstehen. Diese Abstürze verhindern die Fischwanderung bzw. den Rückzug in die Zuflüsse und gelten als weiterer wichtiger Faktor beim Rückgang der Fischpopulationen.
Zahlreiche Pilotprojekte versuchen, die Durchgängigkeit von Fliessgewässern wiederherzustellen. Der Bau von Fischtreppen (z.B. Kraftwerk Reichenau am Alpenrhein) oder die fischgängige Anbindung der Mündung des Liechtensteiner Binnenkanals in den Rhein sind wegweisende Entwicklungen (weitere Beispiele sind Reppisch, Ron [LU], Önz [BE], Kander). Viele Querbauwerke konnten rückgebaut werden, allerdings wurden sie zur Stabilisierung der Flusssohle häufig durch Blockrampen ersetzt, deren ökologischer Nutzen vor allem bei hohem Gefälle (und grosser Fliessgeschwindigkeit) nicht immer gegeben ist [162].

Geschiebehaushalt

Vielfach ist bei Fliessgewässern der Geschiebehaushalt stark gestört, woran Massnahmen des Hochwasserschutzes entscheidenden Anteil haben. Harte Uferverbauungen verringern den Eintrag von Geschiebe in Gewässer, Geschiebesammler reduzieren die Menge weiter, Schwellen und andere Querbauwerke halten ebenfalls Material zurück. Feinsedimente und organisches Material können sich auf der Gewässersohle ablagern und bei nied-

riger Wasserführung eine Kolmation der Sohle bewirken. Im Resultat schädigen diese Prozesse den Lebensraum von Fischen und anderen Wassertieren und können die Infiltration ins Grundwasser beeinträchtigen [163].
Ein illustratives Beispiel für den Einfluss des Hochwasserschutzes auf den Geschiebehaushalt ist die Thur. Als ausgeprägter Wildfluss mit schnell auflaufenden Hochwassern wurde sie in ihrem Oberlauf schon früh stark verbaut. Das Gleiche gilt für ihre Zuflüsse Sitter, Urnäsch, Glatt und Necker. Da sich Flussbaumassnahmen am Oberlauf auf den Geschiebehaushalt am gesamten Unterlauf auswirken, haben die fünf beteiligten Kantone (AI, AR, SG, TG, ZH) eine gemeinsame Strategie für einen ausgeglichenen Geschiebehaushalt der Thur ausgearbeitet und vereinbart, wieder mehr Geschiebe aus der Sitter in die Thur zu führen [164]. Ziel ist es, im Zusammenspiel mit der im Thurgauer Thurabschnitt geplanten Aufweitung des Flusses den Geschiebehaushalt zu stabilisieren und gleichzeitig die aquatischen Lebensräume aufzuwerten.

Synergie Hochwasserschutz/ Revitalisierung

Dass Synergien zwischen Revitalisierung und Hochwasserschutz bedeutsam sein können, veranschaulichen Zahlen aus dem Kanton Zürich. Das zuständige AWEL hat von insgesamt 3620 km Gewässerstrecken im Kanton 800 km für eine Revitalisierung priorisiert. Auf 400 km Flussstrecken lässt sich die Revitalisierung mit Hochwasserschutzmassnahmen kombinieren, die restlichen 400 km sind Revitalisierungsprojekte ohne spezifischen Nutzen für den Hochwasserschutz [34]. Der Bedarf für harte Verbauungen sollte sich umso mehr verringern, je grössere Retentionsräume durch Revitalisierungen bereitgestellt werden können.

C3 | Hydromorphologische Einflüsse der Landwirtschaft

Drainage von Agrarflächen

In vielen Teilen der Schweiz wären landwirtschaftliche Böden ohne menschliche Eingriffe zumindest saisonal zu nass, um eine intensive landwirtschaftliche Nutzung zu ermöglichen. Seit den 1930er-Jahren wurden grossflächig Drainagesysteme installiert, damit die Böden einen saisonal möglichst ausgeglichenen Wasserhaushalt aufweisen. Infolgedessen wurde die Gewässermorphologie vor allem in den Quellgebieten kleinerer Bäche und entlang der Flüsse durch Meliorationen, Eindolungen und den Bau von Drainagen stark verändert [165]. Laut einer Umfrage des Bundesamts für Landwirtschaft bei den Kantonen von 2008 sind insgesamt rund 192 000 ha landwirtschaftliche Flächen drainiert. Dies entspricht etwa 4,7% der Landesfläche und knapp einem Fünftel (18,1%) der landwirtschaftlichen Nutzfläche und etwa 71% vom offenen Ackerland [166]. Der Grossteil (80%) der drainierten Flächen befindet sich in der Talzone, 12% befinden sich in der Hügelzone und der Bergzone I und 8% in den Bergzonen II bis IV und im Sömmerungsgebiet. Nicht überall reicht das natürliche Gefälle für das Abfliessen des Drainagewassers aus, auf 11% der Flächen (21 000 ha) wird es über Pumpwerke oder Wasserhebeanlagen abgeführt. Der Wiederbeschaffungswert der Drainageanlagen beträgt 4 bis 5 Mrd. CHF [167]. Laut BLW-Umfrage von 2008 sind 35,5% der Drainagen (68 400 ha) in schlechtem Zustand [166].

Intensive Bewirtschaftung der Uferbereiche

Im Landwirtschaftsgebiet sind 48% von insgesamt knapp 7000 km Bach- und Flussstrecken ökomorphologisch in einem schlechten Zustand. Bei rund der Hälfte der Fliessgewässer wird der Uferbereich zu intensiv genutzt oder es ist eine nicht gewässergerechte Ufervegetation vorhanden. Der Raumbedarf ist bei 75% der Bäche einseitig oder beidseitig nicht erfüllt, oder die Bäche sind eingedolt [168].

Potenzielle Konflikte und Synergien

Konflikte mit der Gewässerökologie

Drainagen bewirken eine grundlegende Veränderung der Landschaft und zählen zu den bedeutendsten und folgenreichsten Eingriffen in den Wasserhaushalt. Obwohl die mit Drainagen verbundene Entwässerung der Böden – wie beabsichtigt – viele aquatische Lebensräume verändert oder gänzlich beseitigt hat, wird sie heute kaum noch als Eingriff in die Ökologie wahrgenommen. Von über 250 000 Hektaren ursprünglicher Moorflächen gingen in den letzten 200 Jahren in der Schweiz durch Entwässerung, aber auch Torfabbau und Kultivierung mehr als 90% verloren [169].
Die Folgen der mancherorts flächendeckenden Drainierung werden vor allem sichtbar im

Links: Die Geologie im Einzugsgebiet eines Flusses bestimmt Art und Menge des Geschiebes in seinem Verlauf. Hochwasserverbauungen, Staustufen und Kiesentnahmen haben vielen Gewässern ihre charakteristische Geschiebedynamik genommen. (SEDRIVER)
Mitte: Seit den 1930er-Jahren wurden in der Schweiz grosse Auen- und Feuchtflächen durch Drainagen trockengelegt und für die Landwirtschaft erschlossen. Mit dem Wasser verschwanden die auf feuchte Verhältnisse angewiesenen Tier- und Pflanzenarten. (IWAGO)
Rechts: Flüsse als Störfaktor bei der Landnutzung: Wie hier an der Arbogne (FR) wirkt bei vielen Fliessgewässern der landwirtschaftliche Einfluss bis in den unmittelbaren Uferbereich. (Foto Reportair)

Links: Selbst an künstlichen Gewässern wie dem Hagneckkanal, der die Aare in den Bielersee umleitet, lassen sich durch Aufweitungen und Flachwasserzonen ökologische Verbesserungen erzielen. (Foto Reportair)
Mitte: Der Alpenrhein ist stark durch Hochwasserschutz und menschliche Nutzung in seiner Morphologie beeinträchtigt. Wegen der vielfältigen Nutzungsinteressen ist seine Revitalisierung ein stark umstrittenes Vorhaben. (Foto Reportair)
Rechts: Seeufer wie hier am Walensee sind begehrte Lagen für Wohn- und Freizeitimmobilien. Weitere Abschnitte werden von der Verkehrsinfrastruktur beansprucht. (Foto Reportair)

Verlust und in der Gefährdung von Tier- und Pflanzenarten, die auf dauernde oder temporäre Feuchtigkeit angewiesen sind. Wasserabhängige Tier- und Pflanzenarten in der Schweiz sind auf der Liste der gefährdeten Arten überproportional vertreten [170]. Aus Sicht der Biodiversität könnte es daher sinnvoll sein, analog zur Revitalisierung von Fliessgewässerräumen auch Feuchtwiesen oder Quellen zu revitalisieren. Für solche Massnahmen kommen insbesondere Standorte infrage, die für die Landwirtschaft von geringem Wert oder bereits aufgegeben sind. An geeigneten Standorten würde es für die Wiedervernässung ausreichen, auf eine Reparatur oder Erneuerung von Drainagen zu verzichten.
Die intensive Nutzung von Bach-, Fluss- und Seeufern oft bis in unmittelbare Nähe der Gewässer erhöht einerseits die Wahrscheinnlichkeit von Schad- und Nährstoffeinträgen von landwirtschaftlichen Flächen (siehe S. 36), andererseits fehlt es den Fliessgewässern an natürlicher Ufervegetation. Neben einer unzureichenden Beschattung der Wasseroberfläche und einer verstärkten Erwärmung des Wassers fehlt vielfach die Vernetzung mit dem Umland, sodass die Gewässer ihre ökologische Korridorfunktion verlieren.
Diese hydromorphologischen Veränderungen wirken nicht isoliert auf die aquatischen Lebensräume ein. Oftmals sind sie kombiniert mit Beeinträchtigungen der Wasserqualität und auch einem veränderten Sedimenthaushalt. Wie sich derartige Überlagerungen von Einflussfaktoren auf diese Lebensräume auswirken könnten, war ein Forschungsthema im NFP 61-Projekt IWAQA (siehe Kasten unten).

Einflussfaktoren für den ökologischen Zustand von Fliessgewässern: Erkenntnisse aus dem NFP 61-Projekt IWAQA
Zahlreiche Einflussfaktoren bestimmen den ökologischen Zustand der Fliessgewässer. Das Projekt IWAQA untersuchte deren gemeinsame Wirkung – im Feld und mittels Modellrechnungen.
Im Feld hat IWAQA analysiert, wie ähnlich sich die Artenzusammensetzungen an verschiedenen Stellen im Gewässernetz sind, wenn auch die Umweltbedingungen ähnlich sind [171]. In den zwei untersuchten Gebieten Gürbe und Mönchaltorfer Aa wurden sehr unterschiedliche Zusammenhänge festgestellt. Durch die Korrelation verschiedener Einflussfaktoren in der Gürbe ergaben sich klare räumliche Muster der Artenzusammensetzung. Ganz anders in der Mönchaltorfer Aa, wo die Einflussfaktoren in verschiedensten Kombinationen auftraten. Deren Wechselspiel konnte aus den Felddaten alleine nicht ermittelt werden.
Um das Verständnis weiterzuentwickeln, wie verschiedene Faktoren gemeinsam Lebensgemeinschaften in Fliessgewässern beeinflussen, wurde im Rahmen von IWAQA ein ökologisches Modell entwickelt [172]. Es berücksichtigt die wichtigsten Umweltfaktoren, die sich auf die verschiedenen Arten auswirken. Mit diesem Modell ist es nun möglich, den Einfluss verschiedener Stressoren auf die Zusammensetzung der Artengemeinschaft zu untersuchen. Das Modell wurde im Einzugsgebiet der Glatt angewendet und ohne Kalibrierung des Modells können 74% Übereinstimmung zwischen beobachteter und simulierter taxonomischer Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft erzielt werden [173]. Die Modellvorhersagen deuten darauf hin, dass im untersuchten Gewässer z.B. Abflussgeschwindigkeit und Insektizidbelastung wichtige Einflussgrössen sind. Zudem unterstreichen die Modellergebnisse die Wichtigkeit der Interaktion zwischen den Wasserlebewesen durch Konkurrenz um Nahrung und Räuber-Beute-Beziehung. Insgesamt zeigen die Modellrechnungen sehr klar, dass verschiedene Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind. Das passt zu Felduntersuchungen aus Hessen (Deutschland), wo kürzlich gezeigt werden konnte, dass die Artenzusammensetzung stark durch Abwasser beeinflusst ist und dieser Einfluss durch eine schlechte Gewässermorphologie weiter verstärkt wird [174]. Das Projekt IWAQA hat hierzu Werkzeuge für ein vertieftes Verständnis geliefert. Diese sollten im Zuge der Revitalisierung und des Ausbaus der Kläranlagen praxisrelevant vertieft werden.

C4 | Hydromorphologische Anforderungen des Gewässerschutzes

In diesem Kapitel werden hydromorphologische Aspekte in und an den Gewässern abgehandelt, in Teil D die flächenrelevanten Aspekte von Revitalisierungen.

Die Anforderungen an die Hydromorphologie von Oberflächengewässern sind in Anhang 1 GSchV definiert. Gemäss Ziffer 1 Abs. 2 soll die Morphologie naturnahen Verhältnissen entsprechen und «die Selbstreinigungsprozesse, den natürlichen Stoffaustausch zwischen Wasser und Gewässersohle sowie die Wechselwirkung mit der Umgebung uneingeschränkt gewährleisten». Ziel ist die Verbesserung des ökologischen Zustands der Fliessgewässer mit Tier- und Pflanzenarten, die «typisch sind für nicht oder nur schwach belastete Gewässer des jeweiligen Gewässertyps».

Das GSchG strebt für die nächsten Jahrzehnte eine erhebliche Verbesserung der Gewässermorphologie an. Bis 2031 sollen Geschiebehaushalt und Fischgängigkeit der Fliessgewässer saniert werden. Bis 2091 ist die Revitalisierung von 4000 km Fliessgewässern vorgesehen (das gesamte Gewässernetz umfasst rund 65 000 km). Zudem soll gemäss Wasserbaugesetz der Hochwasserschutz naturnah ausgeführt werden und den Gewässern ausreichend Raum gewähren. Gemeinsam mit einer Verbesserung der Wasserqualität werden diese Massnahmen die aquatische Ökologie deutlich verbessern und die Gewässer als Erholungsraum aufwerten.

Die Lebensvoraussetzungen für Fische sollen nach den Vorgaben des Bundesgesetzes über die Fischerei (BGF) verbessert werden. Wichtige Ziele sind eine freie Fischwanderung flussauf- und flussabwärts sowie eine natürliche Fortpflanzung. Neue Wehre, Regulieranlagen oder Verbauungen erfordern daher eine fischereirechtliche Bewilligung der Kantone, bei bestehenden Anlagen können Massnahmen nur angeordnet werden, wenn sie wirtschaftlich tragbar sind (Art. 10 BGF).

Potenzielle Konflikte und Synergien

Konflikt mit der Wasserkraft

Rechtlich ist das Verhältnis zwischen Revitalisierungen und Wasserkraft nicht explizit geregelt, über entsprechende Konflikte muss fallweise entschieden werden. In der Regel ist ein Ausbau der Wasserkraftnutzung an revitalisierten Flussstrecken nicht möglich. Es sind aber Fälle denkbar, etwa bei künstlichen Schwellen, in denen ein bestehendes Hindernis für die Stromproduktion genutzt und der Flussabschnitt trotzdem revitalisiert und durchgängig gemacht wird. Insgesamt wird der weitere Ausbau der Wasserkraftnutzung durch Revitalisierungen nur marginal eingeschränkt. Denn das ökologische Potenzial von Revitalisierungen ist bei flachen Flussstrecken am grössten, jenes der Wasserkraft bei möglichst grossem Gefälle. Die Kantone werden also bei der Planung von Revitalisierungen Steilstrecken meiden.

Synergie mit dem Hochwasserschutz

In vielen Fällen wird durch Revitalisierungsprojekte der Hochwasserschutz verbessert (siehe S. 45). Solche Projekte sind nach Art. 41 Bst. d GSchV vorrangig. Andererseits dürfen Revitalisierungen nur dort durchgeführt werden, wo sie die Hochwassersicherheit nicht beeinträchtigen.

C5 | Einflüsse von Siedlungen und Verkehrsflächen auf See- und Flussufer

Siedlungen

Historisch haben sich Städte und Dörfer fast ausschliesslich an Flüssen entwickelt, die als Transportwege, Mühlenstandort und Vorfluter für gewerbliche Abwässer interessant waren. Die Nähe zum Wasser brachte stets auch Hochwassergefahren mit sich, die entsprechenden baulichen Abwehrmassnahmen folgten und bestimmen heute in den meisten Städten den Charakter der Flussufer als betonierte Rampen. In Siedlungsräumen vorhandene Kleingewässer (Teiche, Tümpel, Bäche) wurden meist trockengelegt, kanalisiert oder eingedolt.

In den letzten 30 Jahren ist es jedoch zu einer gewissen Gegenbewegung und zu einer beträchtlichen Anzahl von Freilegungen einst eingedolter Stadtbäche gekommen [175]. Flussrevitalisierungen sind im Siedlungsraum wegen der Infrastruktur nur eingeschränkt möglich, doch lässt sich durch eine verbesserte Zugänglichkeit und Einfügung in den urbanen Raum oder durch ein Aufbrechen befestigter Sohlen und Uferverbauungen sowie das Entfernen von künstlichen Hindernissen das Gewässer ökologisch deutlich aufwerten.

Verkehrswege

Verkehrswege folgen häufig Gewässerläufen oder Flussebenen. Sie verändern die Gewässerökologie einerseits durch die Einwaschung von Feinsediment. Zum anderen – und dies dürfte der bedeutendere Aspekt sein – sind Strassen und Schienentrassees eine wesentliche Ursache für die Befestigung und Verbauung von Fluss- und Seeufern. Vielfach wurden in der Vergangenheit Bahntrassees direkt an Seeufern auf eigens aufgeschüttetem Land gebaut, ohne auf die aquatischen Lebensräume am Ufer Rücksicht zu nehmen.

Stark veränderte Seeufer

In weiten Bereichen der Schweizer Seen ist der ursprüngliche Charakter des Ufers kaum noch zu erkennen. Besonders seichte Seeflächen wurden zur Gewinnung von Land für Siedlungen und Verkehrswege aufgeschüttet. Am Zürichsee etwa ist heute über die Hälfte des Zürcher Seeufers stark beeinträchtigt oder verbaut, 90% sind künstlich aufgeschüttet. Jedoch ist in grossen Abschnitten beachtenswertes ökologisches Aufwertungspotenzial vorhanden [176]. Die Planung einer zukunftsfähigen Seeufergestaltung ist angesichts der Vielfalt von Ansprüchen und Nutzungen

eine erhebliche Herausforderung. Der Kanton Zürich hat in einem jahrelangen Verfahren eigens ein Leitbild «Zürichsee 2050» erarbeitet, das möglichst einvernehmliche Lösungen ermöglichen soll.

C6 | Hydromorphologische Auswirkungen der Trinkwasserversorgung

Die Quellfassungen der Trinkwasserversorgung bestehen schon seit vielen Jahrzehnten, zum Teil seit Jahrhunderten. Dass an diesen Quellfassungen einst Quellbiotope oder Feuchtwiesen existierten, ist längst vergessen. Doch auch die Fassung von Quellen für die Versorgung mit Trinkwasser bedeutet eine hydromorphologische Beeinträchtigung und einen ökologischen Verlust. Angesichts des dramatischen Rückgangs vor allem wasserabhängiger Tiere und Pflanzen in der Schweiz scheint es bedenkenswert, gefasste Quellen, die nicht mehr für die Trinkwasser- und Brauchwasserversorgung benötigt werden, aktiv freizulegen und zu revitalisieren. So könnten ohne grossen Aufwand frühere Feuchtstandorte vernässt und wiederbelebt werden.

Fazit Teil C
Hydromorphologie und aquatische Lebensräume

Die Schweizer Gewässer sind durch Hochwasserschutzmassnahmen, Laufkraftwerke, landwirtschaftliche Meliorationen, Verkehrswege und dichte Bebauung fast überall ökomorphologisch stark verändert und ökologisch beeinträchtigt (siehe Matrix C). Ein grosser Teil dieser Nutzungen ist praktisch irreversibel, das gilt besonders für Siedlungs- und Gewerbebauten sowie Wasserkraftwerke. Andere Eingriffe, in erster Linie Flussbegradigungen und Hochwasserbauten der Vergangenheit, können zum Teil im Zug von Revitalisierungen zurückgenommen oder bei Unterhaltsarbeiten naturnäher gestaltet werden.

Mit den Zielen des revidierten Gewässerschutzgesetzes zur Renaturierung und Vergrösserung des Gewässerraums sowie zur Sanierung des Geschiebehaushalts sind die Weichen für eine substanzielle Verbesserung des hydromorphologischen Zustands der Fliessgewässer gestellt. In ähnlicher Richtung wirkt die Anforderung an den Hochwasserschutz, der gemäss Wasserbaugesetz naturnah ausgeführt werden und mit Revitalisierungen der Fliessgewässer verknüpft werden soll.

Eine zweite offene Frage ist die Zukunft der Wasserkraft. Neue grosse Laufkraftwerke, wie sie derzeit geplant werden, würden erhebliche zusätzliche Eingriffe in die Gewässermorphologie nach sich ziehen. Als noch folgenreicher könnte sich die Kleinwasserkraft erweisen, die nach Planungen des Bundesrates ebenfalls zur Energiewende beitragen soll. Die Energiedichte kleiner Gewässer ist gering, sodass eine sehr grosse Anzahl von hydroelektrischen Anlagen nötig wäre, um auch nur einen Bruchteil der heute nuklear erzeugten Elektrizität zu ersetzen. Jede dieser Anlagen unterbricht das Kontinuum eines aquatischen Lebensraums mit Verschlechterungen des Gewässerzustands.

Matrix C – Nutzungsüberlagerungen und potenzielle Konflikte bezüglich Hydromorphologie und aquatischer Lebensräume

Kapitel	Wirkt auf … / Gesellschaftlicher Anspruch	Morphologie	Fischgängigkeit	Geschiebe/ Sediment	Temperatur
C1	Wasserkraft	1	2	3	4
C2	Hochwasserschutz[a]	5	6	7	neutral
C3	Landwirtschaft	8	neutral	9	10
C4	Siedlung	11	neutral	neutral	12
C5	Verkehrswege	13	neutral	14	15

Bedeutender Konflikt Konflikt

- Als bedeutende Konflikte sind solche Situationen gekennzeichnet, die längere Fliessstrecken oder grosse Wassermengen betreffen oder andere Interessen weitverbreitet stark beeinträchtigen.
- Konflikte bzw. Konkurrenzen sind in der Regel lokal oder regional bzw. saisonal, verstärkt bei Trockenheit und hohen Temperaturen.

(a) Betrachtet werden hier harte Ufer- und Längsverbauungen. Revitalisierungen zugunsten des Hochwasserschutzes wirken hingegen synergistisch, indem sie aquatische Lebensräume aufwerten.

(1) Harte Ufer- und Sohlverbauungen an und unterhalb von Staustufen.
(2) Unterbrechung der Fischwanderung flussaufwärts und besonders flussabwärts durch Wehre und Staustufen.
(3) Störung des Geschiebehaushalts an Stauwerken: Rückhalt oberhalb, Erosion unterhalb.
(4) Erwärmung in Staubereich.
(5) Begradigungen, Längsverbauungen entlang Fliessgewässern, Sohlverbau etc.
(6) Sohlschwellen unterbrechen die Fischwanderung.
(7) Rückhalt an Sohlschwellen und Geschiebesammlern, Erosion unterhalb.
(8) Meliorationen und Gewässerbegradigungen haben viele Feuchtgebiete trockengelegt.
(9) Bearbeitungsbedingte Erosion, Abwaschung von Feinsediment in Gewässer.
(10) Bearbeitung bis dicht an die Ufer und geringe Beschattung durch mangelnde Ufervegetation führen zu Erhöhung von Flusstemperaturen im Sommer.
(11) Verbauung von Ufern im urbanen Bereich, Eindolung von Bächen.
(12) Wesentlich erhöhte Temperatur der Regenwasserabflüsse im Sommer.
(13) Einengung von Flüssen für Verkehrswege, auch stark an Seeufern, verengte Durchlässe unter Brücken.
(14) Einwaschung von Feinsediment von Strassen in Gewässer.
(15) Im Sommer stark erhöhte Temperatur des von Strassen und Plätzen ablaufenden Wassers.

Teil D – Flächennutzungskonflikte

Flächenkonflikte stellen einen bisher vernachlässigten Aspekt der Konfliktsituationen im Wasserbereich dar. Viele der in den vorangehenden Kapiteln unter Mengenbewirtschaftung, Stoffeinträgen und Eingriffen in die Hydromorphologie behandelten Nutzungen und Ansprüche an Gewässer sind mit einem bestimmten Flächenbedarf verbunden. Da die Fläche in der Schweiz eine sehr begrenzte Ressource darstellt, wird ein Teil der Problematik erst dann erkennbar, wenn Flächenaspekte ausdrücklich einbezogen werden.

D1 | Flächenbedarf der Trinkwasserversorgung

Die Trinkwasserversorgung in der Schweiz wird von den Städten und Gemeinden verantwortet und ist daher überwiegend dezentral organisiert. Dazu werden zum Schutz einer einwandfreien Grundwasserqualität grosse Flächen benötigt, auf denen möglichst wenige potenziell gewässerbelastende Aktivitäten stattfinden, vorzugsweise Waldgebiete oder deren Abstrombereich. In der Schweiz liegen 50% aller Grundwasserschutzzonen in Wäldern, deren Fläche und räumliche Verteilung nach Waldgesetz erhalten werden sollen [90]. Viele andere Schutzzonen sind durch Landwirtschaft, Siedlungs- und Strassenbau unter Druck, d.h., sie lassen sich nur sichern, wenn diese Aktivitäten begrenzt werden können.

Auch in der Umgebung von Seen gibt es Nutzungseinschränkungen, vor allem für die Landwirtschaft (z.B. Baldeggersee, Sempachersee), die in erster Linie auf die Verminderung von Stoffeinträgen zur Verbesserung der Seeökologie abzielen [177]. Wo Seen als Trinkwasserreservoirs genutzt werden, kommen diese Massnahmen auch der öffentlichen Wasserversorgung zugute (siehe S. 36).

Potenzielle Konflikte und Synergien

Konflikt Trinkwasser/Landwirtschaft

Ein Drittel der Grundwasserschutzzonen liegt in Landwirtschaftsflächen, sie machen rund 6% der Landwirtschaftsfläche aus [90]. Hier gelten Bewirtschaftungsvorschriften, die den Eintrag von Mikroorganismen, Nährstoffen und Pestiziden in die Fassungen begrenzen sollen. Flächenmässig ist die Landwirtschaft der bedeutendste Einflussfaktor für die Qualität des Grundwassers (siehe Abb. 16).

Konflikt Trinkwasser/ Siedlungsentwicklung

Abbildung 16 zeigt auch, dass die für die Trinkwassergewinnung wichtigen ergiebigen Talgrundwasserleiter besonders stark von Siedlungen beeinflusst werden. Knapp 10% der Grundwasserschutzzonen liegen in Siedlungsflächen, und wo Schutzzonen überbaut werden, kommt es zur Aufgabe von Grundwasserfassungen. Die Ausweisung neuer Schutzzonen erweist sich als schwierig, denn die Flächen über vielen infrage kommenden Grundwasservorkommen sind bereits anderweitig genutzt bzw. verplant und lassen sich nicht gesetzeskonform schützen.

Bisher liegen jedoch keine landesweiten oder kantonalen Übersichten über die in den vergangenen Jahrzehnten wegen Siedlungswachstum aufgegebenen Grundwasserfassungen vor. Um konkretere Anhaltspunkte zu erhalten, hat der SVGW im Januar 2014 in Zusammenarbeit mit dem Autorenteam dieser Thematischen Synthese eine Umfrage bei den Wasserversorgungsunternehmen zur Auswirkung von Interessenskonflikten auf die Wassergewinnung durchgeführt. Von 201 teilnehmenden Wasserversorgern berichten 76 von der Aufgabe von Grund- oder Quellwasserfassungen in den letzten 20 Jahren. Bei 41 Unternehmen steht die Schliessung einer Fassung in den nächsten Jahren bevor.

14 Versorgungsunternehmen gaben an, dass Trinkwasserfassungen als Folge von Siedlungswachstum aufgegeben wurden, 12 nennen dies als Grund für bevorstehende Schliessungen von Fassungen. In 18 dieser 26 Fälle sind Versorger von Städten oder Gemeinden über 10 000 Einwohner in stark wachsenden

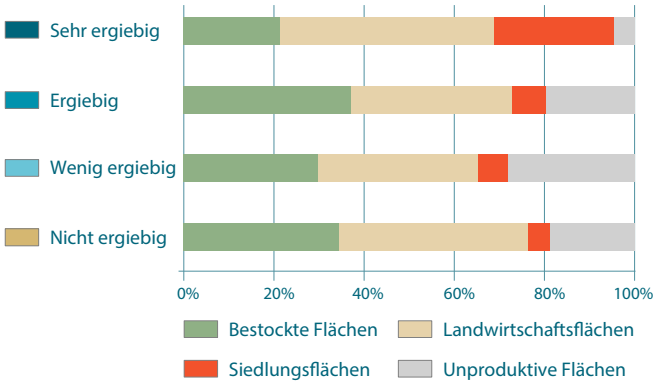


Abb. 16: Landnutzung über Grundwasservorkommen von unterschiedlicher Ergiebigkeit: Die Karte links zeigt die Verteilung der Ergiebigkeitsklassen [178], die Abbildung rechts die Landnutzung im Bereich der jeweiligen Klassen [90]. Darstellung: [1].

Regionen des Mittellands und der grossen Alpentäler betroffen. Mengenmässig fällt der Verdrängungseffekt durch Siedlungswachstum gemäss der Umfrage sehr unterschiedlich ins Gewicht: Die Angaben reichen von 1% bis 60% der jeweiligen Trinkwasserabgabe in der Vergangenheit bzw. von <1% bis 95% für die bevorstehenden Fälle [179]. Die Durchschnittswerte (Median) liegen bei 15% (7%) in der Vergangenheit und 26% (10%) für die zu erwartenden Aufgaben von Fassungen. Die Situationen sind damit sicherlich sehr stark lokal geprägt.

Andere Fassungen wurden aufgegeben, weil die rechtskonforme Gewinnung von Trinkwasser wegen Schutzzonenkonflikten mit Strassenbauprojekten (N = 6), mit der Landwirtschaft (N = 8) und in einem Fall mit einem neu erschlossenen Industriegebiet nicht mehr möglich war. Weitere Gründe für die Aufgabe von Trinkwasserfassungen waren kantonale Vernetzungsstrategien (N = 5), Revitalisierungsprojekte (N = 4), Restwasseranforderungen in einem Naturschutzgebiet, Altlasten und Bergbahnbau (je N = 1) und sonstige nicht weiter spezifizierte Schutzzonenprobleme (N = 9). In mehreren Fällen wurden (kleinere) Gewinnungsanlagen wegen schlechter Qualität, geringer Ergiebigkeit oder hoher Wasserhärte aufgegeben (N = 19).

Nicht überall lassen sich alternative Grundwasservorkommen in Ortsnähe erschliessen, weil wegen anderer Nutzungen keine Schutzzonen bewilligt werden können oder die betreffenden Grundwasserströme bereits stark genutzt sind. Als Ersatzmassnahmen für die aufgegebenen Fassungen wurde am häufigsten die Vernetzung mit benachbarten Gewinnungsgebieten oder einem grossräumigen Verbund erwähnt.

Die Ergebnisse zeigen, dass es in dicht besiedelten Regionen zumindest lokal zu Konkurrenzsituationen zwischen Trinkwassergewinnung und Siedlungswachstum kommt. In der Umfrage hielt mehr als die Hälfte der Unternehmen (53%) eine stärkere rechtliche Stellung von Trinkwasserschutzzonen gegenüber anderen Interessen für angebracht, 60% befürworteten eine stärkere öffentliche Aufmerksamkeit für die Belange des Trinkwasserschutzes.

D2 | Flächenbedarf von Siedlungen und Verkehr

Wo Städte und Gemeinden Wohn- oder Industriegebiete erweitern oder neu schaffen wollen, sind vitale wirtschaftliche Interessen involviert und stellen die im Planungsgebiet existierenden Flächennutzungen infrage. Öffentlich wahrgenommen wird vor allem der Druck auf die Landwirtschaft. Wie auf S. 52 ausgeführt, wird aber nicht nur Kulturland überbaut, sondern zum Teil auch für den Trinkwasserschutz benötigte Flächen. Wie stark sich die Landnutzung in Grundwasserschutzzonen in den vergangenen Jahrzehnten zuungunsten der Trinkwassergewinnung gewandelt hat, wird auch durch die Arealstatistik belegt. Zwischen 1979/1985 und der neuesten Erhebung von 2004/2009 nahm in den Schutzzonen die Siedlungsfläche um 16% zu [90].

Die Unvereinbarkeit von Bebauung und Grundwassernutzung ist auch eine Frage von bereits eingetretener oder potenzieller Verschmutzung. Die Ursachen der Belastung des städtischen Untergrunds mit chemischen Stoffen sind wenig untersucht. Einerseits werden in Wohnquartieren, auf Industriearealen und Verkehrsflächen vielfältige Stoffe eingesetzt, andererseits dürften auch aus undichten Kanalisationen Verunreinigungen ins Grundwasser gelangen. Im urbanen Raum lässt sich Grundwasser daher meist nur dann als Trinkwasser verwenden, wenn es mit gereinigtem Flusswasser ergänzt oder aufbereitet wird. So wird im Wasserwerk in der Zürcher Hard Limmatwasser künstlich versickert, um den Zustrom von möglicherweise belastetem Grundwasser aus dem Stadtgebiet in die Förderbrunnen zu unterbinden – letztlich erfolgt die Trinkwasserversorgung also überwiegend aus Flusswasser.

Konflikt Hochwasserschutz/Siedlung

Wie viel Schaden ein Hochwasser anrichtet, hängt vor allem von den Sach- und Gebäudewerten im Überschwemmungsgebiet ab. Ziel des Hochwasserschutzes ist es, Schäden so weit wie möglich zu vermeiden – entweder durch Abwehr- und Schutzmassnahmen gegen das Wasser oder durch ein Freihalten möglichst grosser zusammenhängender Flächen, die bei Extremereignissen als Retentionsraum dienen können. Werden solche Flächen für das Siedlungswachstum beansprucht, hat

Links: Kommen gute Verkehrsanbindung und Stadtnähe zusammen, bedrängt das Siedlungswachstum sogar Schutzzonen für die Trinkwasserversorgung. (Foto Reportair)
Mitte: Besonders gefragt ist ebenes Land in den grossen Alpentälern. Hier befinden sich im Untergrund zugleich ergiebige Trinkwasservorkommen, deren Schutz gegen andere Interessen immer schwieriger durchzusetzen ist (Urner Reusstal). (Foto Reportair)
Rechts: Der Ausbau der Verkehrsinfrastruktur geniesst in der Schweiz hohe Priorität. Die Folgen für Landschaft und Gewässer erschliessen sich oft erst aus der Vogelperspektive. (Foto Reportair)

dies doppelt unerwünschte Folgen: Einerseits gehen Retentionsflächen verloren, andererseits müssen die neu errichteten Gebäude durch zusätzliche teure Hochwasserschutzbauten vor Schäden bewahrt werden. Daher sollte die weitere Raumplanung anhand von Gefahrenkarten kritische Überbauungen vermeiden und ausreichende Retentionsflächen sichern, wie dies beispielsweise in Österreich mit dem nicht-baulichen Hochwasserschutz praktiziert wird [180].

D3 | Flächenbedarf der Landwirtschaft

Der wachsende Bedarf an intensiv nutzbaren landwirtschaftlichen Flächen wurde im 19. und 20. Jahrhundert durch Meliorationen auf Kosten der Flüsse und Feuchtgebiete gedeckt. Das Ausmass der Umgestaltung ist beeindruckend: So entstanden zum Beispiel zwischen Brig und Genfersee durch zwei Korrektionen zwischen 1850 und 1900 grosse Flächen urbaren Agrarlandes, während mehr als 100 km aktive Flussschleifen verloren gingen [181]. Auch viele Tümpel, Teiche und ähnliche für Amphibien überlebenswichtige Kleingewässer wurden in der Vergangenheit entwässert. In den Voralpen und im höheren Berggebiet wurden ab dem 19. Jahrhundert viele moorige oder feuchte Standorte entwässert und für den Ackerbau oder die Beweidung verfügbar gemacht. Die von Flüssen abgeschnittenen und trockengelegten Talabschnitte sind weit grösser als die Bereiche, die mit der Revitalisierung nach Gewässerschutzgesetz den Flüssen in Zukunft wieder überlassen werden sollen (siehe Abb. 17). Heute besteht das Bedürfnis hauptsächlich im Erhalt ertragreicher Böden, insbesondere der Fruchtfolgeflächen. Diese Zielsetzung steht im Konflikt mit anderen Flächenansprüchen wie Siedlungswachstum und – in geringerem Ausmass – der Gewässerrevitalisierung (siehe unten).

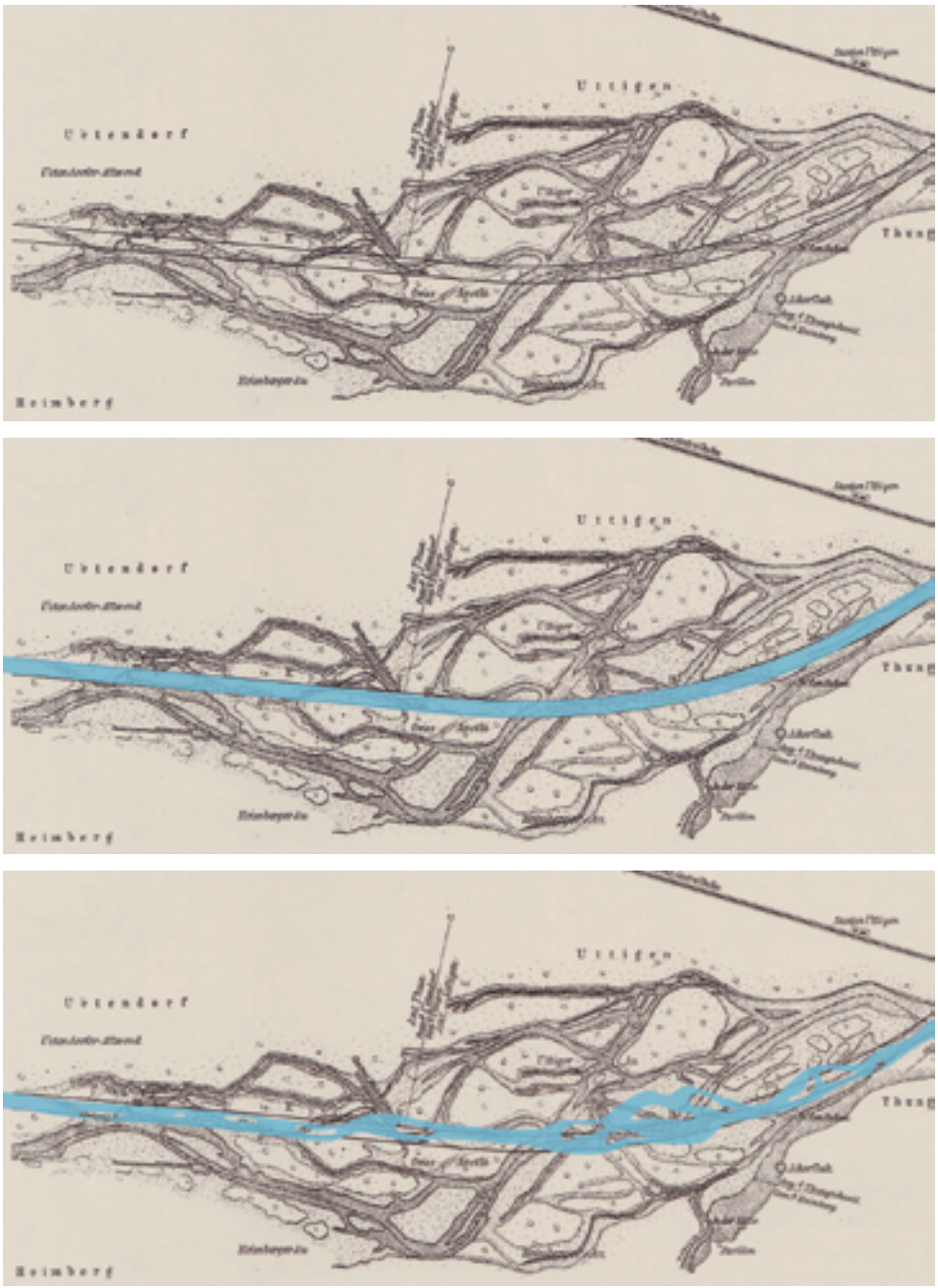


Abb. 17: Historischer Flussraumvergleich am Beispiel der Aare zwischen Thun und Bern [182]. Die Aare im 19. Jahrhundert **(oben)**, die Aare heute **(Mitte)**, die Aare mit dem Projekt «Aarewasser» **(unten)**.

Da die wesentlichen Auswirkungen der landwirtschaftlichen Flächennutzung qualitativer und ökomorphologischer Art sind, werden sie schwerpunktmässig in Teil B ab S. 36 und Teil C ab S. 47 besprochen.

D4 | Flächenbedarf des Gewässerschutzes

Die in Teil C ab S. 49 besprochenen Massnahmen zur Verbesserung der Gewässermorphologie (Geschiebehaushalt, Fischgängigkeit, Gewässerraum) werden ergänzt durch Pläne zu einer Revitalisierung von Flussbereichen. Diese erheben – wie aktuell etwa am Alpenrhein, an der Rhone oder bei der dritten Thurgauer Thurkorrektion – Ansprüche auf zusätzlichen Raum für die Fliessgewässer. Es geht um Flächen, die vor Jahrzehnten durch Längsverbauungen vom Fluss abgeschnitten oder durch Drainagen trockengelegt wurden und heute überwiegend landwirtschaftlich genutzt sind. Daher gehen Revitalisierungen häufig mit Einschränkungen agrarischer Nutzungen einher. Mitunter gibt es auch Überschneidungen von Revitalisierungsflächen mit geplanten Industrie- oder Siedlungszonen. Verglichen mit anderen Ansprüchen ist der zusätzliche Flächenbedarf für die Gewässer moderat. Pro Jahr wurden in den vergangenen 25 Jahren durchschnittlich 2300 ha an Agrarland überbaut [90]. Das ist mehr als die gesamte in den nächsten Jahrzehnten für Revitalisierungen vorgesehene Landwirtschaftsfläche (siehe Abb. 18). Die laut GSchG zur Extensivierung vorgesehenen landwirtschaftlichen Flächen von rund 20 000 ha entsprechen nur einem Drittel der Fläche, die allein zwischen 1941 und 1944 durch Meliorationen von Feuchtflächen gewonnen wurden [165].

Fazit Teil D Flächennutzungskonflikte

Zwei Flächenkonflikte sind für die Wasserwirtschaft der Schweiz besonders bedeutsam. Zum einen kann die Siedlungsentwicklung im Konflikt mit der Nutzbarkeit der unterirdischen Wasservorkommen als Trinkwasser stehen. Hinzu kommt die Konkurrenz um Grundwasser als Ressource für die Wärmenutzung. Häufig wird bei Konflikten mit diesen urbanen Ansprüchen zuungunsten der Wasserversorgung entschieden und Grundwasserschutzzonen und damit die lokale Trinkwassergewinnung aufgegeben. Die aufgrund solcher Konflikte für die Trinkwasserversorgung möglicherweise entstehenden Engpässe werden von den Wasserversorgern bisher nur wenig kommuniziert. Auch bei den Kantonen gibt es keinen Überblick darüber, wie viele Grundwasserfassungen in den letzten Jahrzehnten aufgrund von Nutzungskonflikten aufgegeben wurden und welche Nutzungen dabei den Ausschlag gaben. Eine solche Übersicht wäre aber für die systematische Planung der Wasserversorgung entscheidend. Denn die Anzahl der Orte, an denen qualitativ unbelastete und mengenmässig ergiebige Grundwasservorkommen neu erschlossen werden können, ist stark begrenzt und nimmt weiter ab.
Zum anderen erfordert die Erweiterung der Gewässerräume nach GSchG Eingriffe in die bestehenden Nutzungen der Flusslandschaft. Stark betroffen ist die Landwirtschaft, die im Zug von Revitalisierungen Flächen abtreten und sich von Fluss- und Bachufern zurückziehen soll. Dies kann zu grossen Landeinbussen für einzelne Bauern führen, vermindert aber den Gesamtbestand an landwirtschaftlicher Nutzfläche nur wenig.

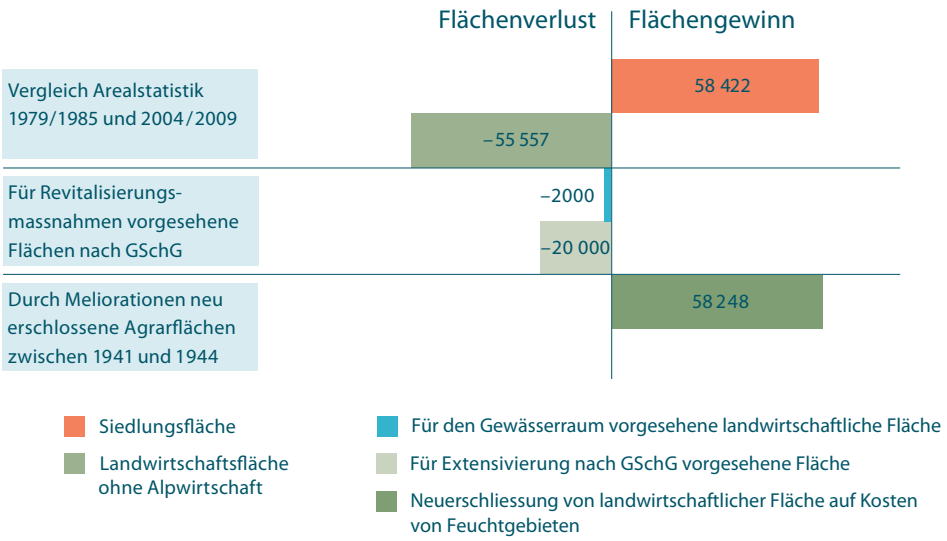


Abb. 18: Ausgewählte Landnutzungsänderungen in Vergangenheit und Zukunft: Die in den letzten 25 Jahren durchschnittlich jedes Jahr neu überbaute Agrarfläche (rund 2300 ha) [90] ist grösser als die gesamte in den nächsten Jahrzehnten für Revitalisierungen benötigte Fläche (2000 ha) [183]. Für die Extensivierung vorgesehen sind 20 000 ha flussnahes Land [183], etwa ein Drittel der allein zwischen 1941 und 1944 neu gewonnenen Agrarflächen [165].

Matrix D – Flächennutzungskonflikte

Kapitel	Wirkt auf … / Gesell-schaftlicher Anspruch	Trinkwasser-versorgung	Siedlung und Verkehrsflächen	Landwirtschaft	Gewässerschutz
D1	Trinkwasser-versorgung		1/2	3	4
D2	Siedlung und Verkehrsflächen	5			6
D3	Landwirtschaft	7			8
D4	Gewässerschutz	9	10	11	

Bedeutender Konflikt · Konflikt · Synergie und Konflikt · Flächenkonkurrenz ohne Wasseraspekt

- Als bedeutende Konflikte sind solche Situationen gekennzeichnet, die längere Fliessstrecken oder grosse Wassermengen betreffen oder andere Interessen weitverbreitet stark beeinträchtigen.
- Konflikte bzw. Konkurrenzen sind in der Regel lokal oder regional bzw. saisonal, verstärkt bei Trockenheit und hohen Temperaturen.

(1) Strengere Bauvorschriften in Grundwasserschutzzonen und -arealen sowie Uferbereichen.
(2) Einschränkung des Strassenbaus in Grundwasserschutzzonen und -arealen sowie Uferbereichen.
(3) Trinkwasserschutzzonen und der Gewässerraum an Fluss- und Seeufern bedeuten Nutzungsbeschränkungen für die Landwirtschaft.
(4) Grundwasserfassungen in Flussauen können mit einer Revitalisierung des entsprechenden Flussabschnitts in Konflikt stehen.
(5) Siedlungsbau schliesst die Nutzung des Grundwassers als Trinkwasser rechtlich aus. Bei Ausdehnung der Siedlungsfläche werden Schutzzonen aufgehoben, Fassungen geschlossen und durch andere Wasserressourcen ersetzt.
(6) In bebauten Gebieten sind Revitalisierungen nur sehr eingeschränkt oder gar nicht möglich.
(7) Intensive Landwirtschaft und Trinkwasserschutz schliessen sich auf der gleichen Fläche aus.
(8) Landwirtschaftliche Nutzung steht Revitalisierungen im Weg.
(9) Normalerweise wirken sich Gewässerschutzmassnahmen positiv auf die Trinkwasservorkommen aus. Vereinzelt gibt es Konflikte zwischen flussnahen Trinkwasserfassungen und Revitalisierung/Auenschutz.
(10) Revitalisierungen und Gewässerraumanforderungen stehen mit der Ausweitung von Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen in Konflikt. Dagegen werten urbane Gewässeraufweitungen und Ausdolungen den städtischen Raum auf und verbessern Stadtklima und Lebensqualität.
(11) Revitalisierungen beanspruchen häufig landwirtschaftliche Nutzflächen.

3 – Wassernutzungen: Risiken und Herausforderungen der Zukunft

Die Herausforderungen lassen sich einerseits räumlich verorten («Alpine Wasserressourcen», S. 57), da im Alpenraum klimatisch und sozioökonomisch bedingte Veränderungen mit sehr spezifischen Konstellationen anstehen. Andererseits bestehen Herausforderungen bezüglich Nutzungen oder gesellschaftlichen Ansprüchen an Wasser und Gewässer («Trinkwasserversorgung», S. 58, «Landwirtschaft», S. 60, und «Gewässerökologie», S. 61), welche aus der Gesamtschau der Matrizes in Kapitel 2 zentrale Konfliktzonen darstellen. Schliesslich zeigen sich unter dem Thema «Trockenperioden» (S. 64) klimabedingte Herausforderungen, die fast alle Nutzungsansprüche an die Gewässer betreffen.

Alpine Wasserressourcen

In den alpinen Bereichen der Schweiz ist Wasser ein prägendes Element und die Menschen sind seit Jahrhunderten mit Überfluss im Wechsel mit Mangel konfrontiert. Seit mindestens 700 Jahren sind Anstrengungen der Alpenbevölkerung nachweisbar, das unregelmässige Wasser zu bewirtschaften: beredtes Beispiel dafür sind die Suonen im Wallis und der Terrassenfeldbau z.B. im Engadin. Das NFP 61-Projekt WATERCHANNELS hat aufgezeigt, dass die althergebrachten Nutzungsstrategien im 21. Jahrhundert nicht mehr ausreichen, um eine zielführende Bewirtschaftung dieser Bewässerungssysteme zu gewährleisten.
Die Frage der Aufteilung und Nutzung von Wasserressourcen im alpinen Raum betrifft vor allem die Wasserkraft, die heute gut die Hälfte des schweizerischen Stromverbrauchs bzw. 11% des Energiebedarfs sicherstellt. In der Folge sind fast alle grösseren Fliessgewässer der Schweiz durch Wasserkraftanlagen beeinflusst, entweder durch Entnahmen, durch Schwall-Sunk-Effekte oder durch künstlichen Aufstau. Mit der Gewässerschutzgesetzgebung von 1992, die im Jahr 2011 revidiert und erweitert wurde, sollen die Folgen dieser Eingriffe nach und nach vermindert werden. Zugleich werden der Klimawandel sowie politische und ökonomische Prozesse die Rahmenbedingungen der Wasserkraft in Zukunft erheblich verändern.

Starker Einfluss des Klimawandels

Bei gletschergespeisten Stauseen wird erwartet, dass die anfallende Wassermenge wegen der Gletscherschmelze noch bis in die 2030er Jahre leicht zunehmen wird. Spätestens ab den 2040er-Jahren wird die sommerliche Gletscherschmelze mengenmässig deutlich zurückgehen. Für die Zuflüsse zum Mauvoisin-Reservoir im Wallis zum Beispiel wird eine sukzessive Abnahme um etwa 25% bis 2100 prognostiziert [184]. Das NFP 61-Projekt FUGE hat sich mit den Folgen des Klimawandels für die Produktion und die wirtschaftlichen Erträge der Wasserkraft befasst. Selbst in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts sind trotz zurückgehender alpiner Abflüsse aus heutiger Sicht keine Einbussen bei der Stromproduktion zu befürchten (siehe S. 13). Eine besondere Situation wird sich mit der Bildung neuer Seen im Gebiet einiger heutiger Gletscher einstellen. Modellierungen im Rahmen des NFP 61-Projekts NELAK ergaben, dass das Gesamtvolumen der anstelle der Gletscher neu entstehenden Seen ca. 3% des Gletschervolumens von 2011 entsprechen könnte. Nicht in allen Fällen ist gewiss, ob tatsächlich Seen entstehen, denn es lässt sich nicht zuverlässig vorhersagen, wo sich gegebenenfalls Abflussrinnen bilden. Durch den Bau von Staumauern liesse sich das Volumen solcher Seen vergrössern und für die Speicherung und Gewinnung von Elektrizität nutzen (siehe S. 13).

Starker Einfluss der politischen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen

Neben dem Klimawandel bestimmen auch politische und gesellschaftliche Entscheidungen, wie sich der Energiesektor weiterentwickelt. So könnte die Nutzung hoch gelegener Stauseen für die Speicherung in- und ausländischen Stroms aus unregelmässigen Quellen (Wind, Sonne) die Ertragslage der Wasserkraftwerke sogar verbessern. Für eine langfristige Voraussage sind allerdings die Unwägbarkeiten vor allem politischer und wirtschaftlicher Natur noch zu gross [185], [186].

Zusätzliche Ansprüche an alpine Wasserressourcen

Zunehmend sind es nicht nur Wasserkraftunternehmen, die Interesse an der Nutzung alpiner Gewässer anmelden. Dies gilt besonders in trockenen inneralpinen Tälern und in Regionen mit hoher Bevölkerungsdichte oder stark ausgeprägtem Tourismus. Das NFP 61-Projekt MONTANAQUA, das die Wasserbewirtschaftung in der Region Crans-Montana-Sierre im Wallis untersucht hat, kommt zum Schluss, dass Speicherseen, die ursprünglich für die Gewinnung von Wasserkraft gebaut wurden, in der Zukunft vermehrt Wasser auch für andere Nutzungen bereitstellen werden müssen. Während Wasserkraftwerke mit bestehenden Konzessionen hierfür entschädigt werden, könnte bei neuen Kraftwerken oder Neukonzessionierungen eine andere Nutzungsaufteilung vereinbart werden (siehe S. 13).
Eine Neuverteilung alpiner Wasserressourcen ist vor allem dort naheliegend, wo Gletscher ganz abschmelzen und damit deren sommer-

Das NFP 61 hat sich zum Ziel gesetzt, wissenschaftlich fundierte Grundlagen, Methoden und Strategien sowie Lösungen für die künftigen Herausforderungen im Bereich der Nutzung der Wasserressourcen zu erarbeiten und den Umgang mit Nutzungskonflikten aus einer umfassenden Perspektive zu überprüfen. Zudem sollten Vorschläge für effiziente Managementsysteme für die nachhaltige Vorsorge in der Wassernutzung entwickelt werden.

Ziel der vorliegenden Synthese war es, die zahlreichen Nutzungsüberlagerungen sowie die sich daraus ergebenden Konflikte und Synergien umfassend zu untersuchen, möglichen Handlungsbedarf herauszuarbeiten und Lösungsstrategien vorzuschlagen. In Kapitel 2 wurden die Konflikte und Synergien entlang der vier Dimensionen Wassermenge, Wasserqualität, Hydromorphologie und Flächenbedarf systematisch dargelegt.

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der verschiedenen Dimensionen vereint und daraus gesamthafte Herausforderungen abgeleitet. Diese lassen sich in fünf übergreifenden Themenbereichen zusammenfassen, die einen Grossteil der Konflikte und Synergien aus den Matrizes im vorangehenden Kapitel aufgreifen.

Alpine Wassernutzung im Umbruch.
Für hochgelegene Seen müssen neue Nutzungskonzepte ausgehandelt werden.
Links: Der neu entstandene See unterhalb des Steingletschers ist von grossem landschaftlichem Reiz. (Foto Patricia Fry)
Mitte: Die Lage des ebenfalls noch jungen Triftsees dagegen hat Planungen für eine Staumauer ausgelöst. (NELAK)
Rechts: Dass auch eine Kombination verschiedener Nutzungen denkbar ist, zeigt das Beispiel des Tseuzier-Stausees nahe Crans Montana. (MONTANAQUA).

liche Wasserspende verloren geht. Flussabwärts liegende Nutzer könnten dann im Sommer und Herbst auf das Speichervolumen von Stauseen angewiesen sein. Dies betrifft potenziell sowohl die Trinkwasserversorgung, die Landwirtschaft als auch die Verdünnung von ARA-Abwasser durch ausreichenden Abfluss. Auch als Rückhaltebecken für den Hochwasserschutz könnten Speicherseen zukünftig stärker herangezogen werden. Diese zusätzlichen Ansprüche müssen frühzeitig mit der energetischen Nutzung der alpinen Ressourcen abgeglichen und rechtlich abgesichert werden.
Die Stromversorgung ist für Bevölkerung, Industrie und Politik von zentraler Bedeutung. Ob die Gesellschaft zu ihrer Optimierung auch Abstriche beim Schutz der Gewässer und des Wasserhaushalts in Kauf nehmen würde, ist ungewiss. Nimmt zum Beispiel die Nachfrage nach Strom weiter zu – was durch zusätzliche Verbraucher wie Elektroautos und Wärmepumpen zu erwarten ist –, so könnten sich auch die Auswirkungen auf die Gewässer verstärken. Entscheidend ist daher eine gute öffentliche Kommunikation, damit die verschiedenen gesellschaftlichen Ansprüche sachgerecht gegeneinander abgewogen werden können.

Mögliche Massnahmen

Im alpinen Raum wird bedingt durch den Klimawandel der Schweizer Wassersektor vor neue Herausforderungen gestellt werden, die in der Vergangenheit nicht gegeben waren. Daraus ergeben sich zusätzliche neue Aufgaben, die anzugehen sind:

- Klärung der rechtlichen Situation neu entstehender Seen und breit abgestützte Diskussion über die möglichen zukünftigen Nutzungen des Wassers und der entstehenden Landschaften (Wasserkraft, Tourismus etc.).
- Die aktuelle Aufteilung des Wassers muss mittelfristig neu diskutiert werden, da bestehende Rechte (Wasserkonzessionen) auslaufen und zur Disposition stehen.
- Neue (flexible) Nutzungskombinationen sollten ins Auge gefasst werden, insbesondere bei der Bewirtschaftung und Schaffung neuer Wasserspeicher. Dem Thema Trockenheit (siehe S. 64) sollte dabei ausdrücklich Rechnung getragen werden.

Trinkwasserversorgung

Die Trinkwasserversorgung in der Schweiz geht von der Zielsetzung aus, der Bevölkerung Wasser «nach Anwendung einfacher Aufbereitungsverfahren» zur Verfügung stellen zu können. Als Ressource dafür soll in erster Linie Grundwasser dienen, zu dessen Reinhaltung das System des planerischen Grundwasserschutzes geschaffen wurde. Dieses geht davon aus, dass Grundwasser durch seine Überdeckung mit Erdschichten normalerweise vor Verschmutzung geschützt ist und daher praktisch überall in einwandfreier Qualität zur Verfügung steht. Auf besonders gefährdeten Flächen – wie den Zuströmbereichen nutzbarer Grundwasservorkommen – gilt eine Bewilligungspflicht für Aktivitäten, die dem Wasser schaden können. Diese Bestimmungen sind vom Vorsorgeprinzip geprägt, wonach der Eintrag unerwünschter Stoffe in die Trinkwasservorkommen von vornherein vermieden werden soll. Wo sich potenziell wassergefährdende Aktivitäten nicht einschränken lassen, kann daher keine Schutzzone bewilligt und kein Trinkwasser gewonnen werden.
In der jüngeren Vergangenheit ist die Schweiz in Bezug auf Einkommen, Konsum, Wohnfläche und Bevölkerungszahl stark gewachsen, und dieses Wachstum hält unvermindert an. Fläche und Landschaft hingegen bleiben konstant und werden kontinuierlich umverteilt. Diese Neuallokation des Bodens hat tiefgreifende Folgen auch für die Gewinnung von Trinkwasser. Da die Siedlungsfläche bevorzugt in Talebenen ausgebaut wird, wo sich die ergiebigsten Grundwasservorkommen befinden, kommt es zu einer direkten Konkurrenz zwischen Trinkwassergewinnung und Siedlungserweiterung (siehe S. 52).

Grundwasser unter Druck

Lange Zeit konnten Städte und Gemeinden auf reichliche Vorräte sauberen Grundwassers in wenig genutzten Gebieten ihres Umlands zurückgreifen. Der zunehmende Nutzungsdruck auf die Landschaft setzt aber vor allem im dicht besiedelten Mittelland dieser Strategie Grenzen und es kommt lokal zur Aufgabe von Grundwasserfassungen, die zur Überbauung anstehen.
Im Rahmen dieses Berichts wurden in Zusammenarbeit mit dem SVGW belastbare Hinweise zusammengetragen, dass die Ausdehnung der bebauten Flächen die Trinkwasserver-

sorgung strukturell unter Druck setzt. Eine Umfrage des SVGW bei den Wasserversorgern ergab, dass vor allem in mittelgrossen Städten im Mittelland und in den grossen Alpentälern Trinkwasserfassungen dem Siedlungswachstum weichen mussten. Weitere Schliessungen stehen in den nächsten Jahren an. Die Wasserversorger berichten von Schwierigkeiten, Ersatzfassungen zu etablieren, da andere Nutzungen eine Ausweisung von Schutzzonen verhindern. Wegen der Zuständigkeit der Gemeinden für die Wasserversorgung wird der Verdrängungsprozess durch neue Siedlungsgebiete sowie die quantitative Bedeutung für die Trinkwassergewinnung derzeit allerdings weder von den Kantonen noch von der Bundesverwaltung systematisch erfasst.
Ein weiterer rasch zunehmender Zugriff auf Grundwasservorkommen resultiert aus deren Nutzung für Gebäudeheizungen. Als erneuerbare Energie wird die Grundwasserwärmenutzung von den Kantonen gefördert. Es besteht aber die Befürchtung, dass durch die Vielzahl neuer Bohrungen die Schutzfunktion der Bodenschichten geschwächt wird und das Risiko einer Verschmutzung des Grundwassers steigt. Um diesem Risiko zu begegnen, bewilligen einige Kantone keine Wärmenutzung in Grundwasserschutzzonen und -arealen oder beschränken die Nutzung auf wenige grössere Anlagen. Dennoch entsteht durch Grundwasserentnahmen für die thermische Nutzung eine zusätzliche Konkurrenz zur Gewinnung von Trinkwasser.

Klimawandel als Faktor

Weitere Erschwernisse entstehen den Trinkwasserversorgern potenziell durch den Klimawandel. Das NFP 61-Projekt GW-TREND hat festgestellt, dass besonders kleine und stark flusswasserabhängige Grundwasserleiter in den Sommermonaten zukünftig weniger ergiebig sein werden (siehe S. 25). Zudem wird befürchtet, dass sich eine starke Erwärmung der Gewässer auch qualitativ auf die Trinkwassergewinnung in Flusstälern auswirken kann.
Unter normalen Sommerbedingungen sind auch in Zukunft neben Sauerstoff genügende Mengen an Nitrat vorhanden, um die Freisetzung von Eisen und Mangan aus dem Untergrund zu verhindern. Bei längeren Hitzewellen wie 2003 indessen ist die Rücklösung und anschliessende Ausfällung dieser Metalle an den Brunnenfassungen nicht auszuschliessen. Ergebnisse aus dem NFP 61-Projekt RIBACLIM deuten aber darauf hin, dass solche Situationen auch in Zukunft eher selten auftreten dürften (siehe Kasten S. 35).
Der Klimawandel macht sich auch indirekt durch neue Verbrauchsmuster konkurrierender Nutzer bemerkbar. So konnte das NFP 61-Projekt AGWAM (siehe Kasten S. 24) zeigen, dass die Landwirtschaft – je nach Ausrichtung der Agrarpolitik – in steigendem Mass Anspruch auf Wasser erheben könnte, auch auf bisher durch Trinkwasserversorger genutzte Vorkommen. Gewerbe und Industrie haben ihre Eigenförderung von Grundwasser in den letzten Jahren ebenfalls deutlich gesteigert, vor allem für die Gebäude- und Prozesskühlung (siehe S. 28, 40).

Verschmutzungsrisiken

Ein erheblicher Teil der Wasserversorgung in der Schweiz hängt von flusswassergespeisten Grundwasservorkommen und damit von der Wasserqualität der Fliessgewässer ab. Diese wird – ausser durch diffuse Stoffeinträge – massgeblich durch die Abläufe von Kläranlagen bestimmt. Durch die praktisch flächendeckende Behandlung des häuslichen und industriellen Abwassers in Kläranlagen hat sich die Qualität der Fliessgewässer in den letzten Jahrzehnten stark verbessert. Mit zusätzlichen Reinigungsstufen bei 100 wichtigen Kläranlagen soll der Stoffeintrag in die Flüsse in den nächsten Jahren nochmals vermindert und die Qualität des flusswassergespeisten Grund- und Trinkwassers weiter verbessert werden. Die Schweiz nimmt eine Vorreiterrolle bei der Nachrüstung von Kläranlagen ein, die Ergebnisse werden auch im Ausland mit Interesse verfolgt. Schwieriger zu begrenzen sind diffuse Stoffeinträge in die Gewässer aus Landwirtschaft und Verkehr sowie undichten und bei Regen überlasteten Kanalisationen. Hier sind vor allem Massnahmen an der Quelle der Verschmutzung wirksam.

Mögliche Massnahmen

Die Trinkwasserversorgung muss also gleichzeitig auf Nutzungskonflikte infolge gesellschaftlicher Aktivitäten und auf den Klimawandel reagieren. Dazu sind mehrere potenzielle Strategien denkbar, die z.T. auch heute schon zur Anwendung kommen und die sich teilweise ergänzen:

- Bessere raumplanerische Sicherung wich-

Trinkwasserversorgung vor grossen Herausforderungen
Links: Die nutzbaren Mengen an Grund- und Quellwasser könnten durch den Klimawandel reduziert werden. Wasserfassung im Urserental. (Foto Daniel Küry)
Mitte: Durch intelligente Vernetzung sollen für alle Wasserversorgungen mindestens zwei unabhängige Bezugsquellen verfügbar sein. (GW-TREND)
Rechts: Die Qualität der flussabhängigen Trinkwasservorkommen soll durch eine höhere Reinigungsleistung der Kläranlagen weiter verbessert werden (Inneres eines Wasserreservoirs). (GW-TREND)

tiger Grundwasservorkommen, um der Sicherung der lokalen Wasserversorgung den gebührenden Stellenwert neben anderen gesellschaftlichen Interessen zu verschaffen. Dazu gehört auch eine systematische Erfassung der Verdrängung von Grundwasserfassungen für andere Nutzungen wie Siedlungsentwicklung.

- Überregionale Verteilung aus ergiebigen Grundwasservorkommen. Diese sind allerdings im Mittelland vielfach nicht im notwendigen Mass vorhanden. Alternativ wäre die Überleitung von Wasser aus Seen oder neuen grossen Grundwasseranreicherungsanlagen denkbar. Nachteilig sind dabei die hohen Infrastrukturkosten.
- Beibehalt der bestehenden Strukturen und verstärkte Aufbereitung von belasteten Rohwasserressourcen. Zwar bedeutet eine routinemässige Aufbereitung den Abschied von der Zielsetzung naturreinen Trinkwassers, andererseits kommen damit auch bisher als qualitativ zweitrangig geltende Vorkommen als Trinkwasserressourcen infrage (Karstwasser, Seen, Flusswasser via künstliche Grundwasseranreicherung). Auch der Konflikt zwischen Grundwasserfassungen und Siedlungsentwicklung liesse sich vermindern, wenn überbaute Grundwasservorkommen mithilfe der Aufbereitung weitergenutzt würden.
- Vermeidung von Stoffeinträgen durch strikte Einschränkung von Nutzungen, aber auch durch chemiepolitische Massnahmen bezüglich häufig auftretender Substanzen (z.B. persistente Chemikalien). Dieser Weg stösst einerseits auf Widerstände anderer Interessen und erfordert eine Stärkung des Grund- und Trinkwasserschutzes gegenüber anderen Aktivitäten, andererseits sind mit diesem Ansatz angesichts der Vielzahl an Stoffen erhebliche praktische Schwierigkeiten verbunden.
- Anhebung von Grenzwerten für das Trinkwasser auf humantoxikologisch begründete Grenzwerte. Bisher gelten für Trinkwasser strenge Einzelstoffgrenzwerte, die mit dem Ziel eingeführt wurden, die Anwesenheit unerwünschter Chemikalien im Trinkwasser vorsorglich auszuschliessen (Vorsorgeprinzip). In Kombination mit dem planerischen Grundwasserschutz soll so sichergestellt werden, dass Grundwasser auf Dauer ohne weitergehende Aufbereitung als Trinkwasser dienen kann. Eine Anhebung der Grenzwerte auf humantoxikologisch begründete Werte wäre gleichbedeutend mit der Aufgabe des Vorsorgeprinzips.
- Bessere Kenntnis über die Verwendung umweltrelevanter Chemikalien durch ein Chemikalienregister, das die in Produkten enthaltenen chemischen Stoffe mengenmässig erfasst.

Grundlegende Weichenstellungen wie der Umgang mit dem Vorsorgeprinzip und dem planerischen Grundwasserschutz sind entscheidend für die Zukunft der Trinkwasserversorgung in der Schweiz. Wie in Zeiten wachsenden Drucks auf die Nutzbarkeit der Trinkwasservorkommen mit diesen Prinzipien weiter verfahren wird, ist eine gesellschaftliche Grundfrage, über die in einem politischen Prozess entschieden werden muss.

Landwirtschaft

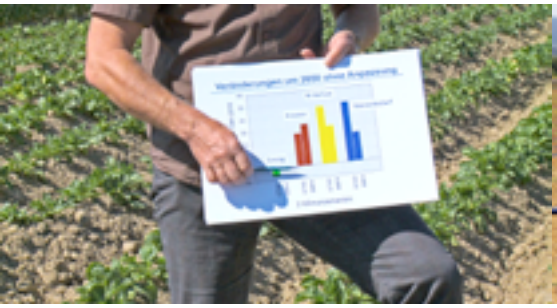
Die Landwirtschaft ist in der Schweiz nach wie vor die wichtigste Flächennutzung. Ihre Aktivitäten – stark moderiert durch staatliche Auflagen und Direktzahlungen – prägen die Landschaften und mit ihnen den Landschaftswasserhaushalt. Der engen Verflechtung von Agrarproduktion und Ökologie trägt die Bundesverfassung explizit Rechnung, indem sie die Multifunktionalität der Schweizer Landwirtschaft festschreibt (Bundesverfassung Art. 104). Die Produktion von Nahrungsmitteln wie auch der Beitrag zum Erhalt der natürlichen Lebensgrundlagen sind gleichermassen gesellschaftliche Ziele der Landwirtschaft.

Der Hitzesommer 2003 hat ins Bewusstsein gerufen, dass auch in der Schweiz Wasser ein begrenzender Faktor für die Agrarproduktion sein kann – erst recht unter den künftigen Bedingungen des Klimawandels. Das NFP 61-Projekt AGWAM konnte zeigen, dass ohne Gegenmassnahmen der potenzielle Wasserbedarf in Zukunft die Gesamtabflüsse in gewissen Regionen übersteigen würde. AGWAM hat dokumentiert, wie sich der Wasserbedarf durch die Wahl der Kulturen und Bewirtschaftungsweisen, aber auch durch die regionale Verteilung der Produktion positiv beeinflussen lässt.

Für die Landwirtschaft wäre eine konzeptionelle Unterscheidung zwischen «normalen» Klimawandeljahren und extremen Trockenperioden hilfreich. Erstere lassen sich durch eine Anpassung der Bewirtschaftung abfedern und agrarökonomisch verkraften. In extremen Trockenperioden hingegen wird sich die Agrarproduktion nicht überall in vollem Mass aufrechterhalten lassen, auch nicht durch zusätzliche Bewässerung. Dafür reichen in einigen Regionen der Schweiz die Wasserressourcen nicht aus.

Um die Landwirtinnen und Landwirte bei extremer Trockenheit vor Einkommensverlusten und die Gewässer vor übermässigen Entnahmen zu schützen, sind Strategien und Konzepte nötig, die über die heutige Praxis hinausgehen (siehe S. 61). Zum Beispiel könnte die Bewässerung in aussergewöhnlichen Trockenzeiten zurückgefahren und dadurch verursachte Ertragseinbussen durch eine Dürreversicherung kompensiert werden. Entscheidend ist es, den Übergang von «normaler» zu «extremer» Trockenheit frühzeitig zu erkennen, wofür das NFP 61-Projekt DROUGHT-CH wichtige Grundlagen für bessere Trockenheitsprognosen bereitstellt (siehe S. 30).

Neben der Wassermenge ist die Beeinträchtigung der Wasserqualität durch die landwirt-



Landwirtschaft und Wasser
Links: In vielen Regionen kann die Landwirtschaft ihren Wasserbezug nicht weiter steigern, da sonst die Umweltauswirkungen das akzeptable Ausmass übersteigen. (AGWAM)
Mitte: Als Gegenmassnahme lässt sich die verwendete Menge zum Beispiel durch Tröpfchenbewässerung deutlich senken. (Foto Jan Béguin)
Rechts: Für die Landwirtinnen und Landwirte kommt es darauf an, dass sie ihr Einkommen auch mit weniger Wasser sichern können. (AGWAM)

schaftliche Produktion auch zukünftig ein Thema. Ergebnisse aus AGWAM deuten z.B. darauf hin, dass das Risiko der Nitratauswaschung klimabedingt zunehmen wird. Zudem befindet sich die Schweizer Landwirtschaft in einem steten Wandel. Durch strengere Gesetze und verbesserte Produktion ist der Einsatz an Düngemitteln seit den 1970er-Jahren zurückgegangen und hat sich seit Mitte der 1990er-Jahre auf konstantem Niveau eingependelt.
Andererseits führen steigende Anforderungen von Grossverteilern und Konsumentinnen und Konsumenten an Aussehen und Qualität der Produkte zu Intensivierung und Spezialisierung. Diese Entwicklung geht tendenziell mit einem höheren Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden einher (vor allem bei Spezialkulturen), sodass ohne eine massgebliche Verbesserung der Ressourceneffizienz eine erneute Zunahme von Stoffeinträgen in die Gewässer zu erwarten ist.

Mögliche Massnahmen
In der Anpassungsstrategie Klimawandel des Bundes heisst es, dass sich die Praktiken der Landwirtschaft auf ein verändertes Klima einstellen sollen, etwa durch standortangepasste Produktion, Verbesserung der Wasserrückhaltung der Böden, Verringerung der Verdunstungsverluste, trockenheitstolerante Kulturen und Sorten und vor allem durch die Art der Bewässerung («Die Bewässerung orientiert sich am Wasserdargebot und erfolgt sparsam und effizient.»). Wird auch das Thema der Wasserqualität einbezogen, lassen sich für eine landwirtschaftliche Produktion im Einklang mit den Wasserressourcen verschiedene Massnahmen identifizieren:

- Beurteilung von landwirtschaftlichen Anreizsystemen und Regulationen anhand einer konsistenten Gesamtbetrachtung der Ziele der multifunktionalen Landwirtschaft. Das NFP 61 (SWIP, IWAQA, AGWAM) hat dazu methodisches Rüstzeug geliefert, welches direkt anwendbar ist.
- Vermeidung gesetzlicher und wirtschaftlicher Sachzwänge, die automatisch eine zusätzliche Intensivierung der Agrarproduktion nach sich ziehen.
- Stärkung der Resilienz gegen Trockenheit z.B. durch
  i Anpassung von Bodenbearbeitung, Fruchtfolgen und Sorten auf trockenere Anbaubedingungen,
  ii effizienteres und auf das Dargebot ausgerichtetes Bewässerungsmanagement (Sicherstellung der Kopplung an nachhaltig verfügbare Wassermengen, Erhebung von Verbrauchsmengen, Vorschriften für effiziente Bewässerungssysteme, betriebseigene Wasserspeicherkapazitäten, Verbesserung von Trockenheitsvorhersagen etc.).
- Umfassendes Massnahmenpaket zur Verminderung der Einträge von Pflanzenschutzmitteln, Nährstoffen und Feinsediment in Gewässer (Züchtung und Einsatz resistenter Sorten, Verbot kritischer Substanzen, Rückhalt von Stoffen in Einzugsgebieten durch Unterbrechen der Konnektivität etc.).

In der Gesamtschau stellt sich die Frage, was die Schweizer Landwirtschaft heute und in Zukunft leisten kann und soll. Die Ansprüche des Gewässerschutzes an die landwirtschaftliche Produktion sind vielfältig. Sie sind aus einer intensiven gesellschaftlichen Abwägung der Ziele Agrarproduktion und Gewässerschutz hervorgegangen. Aufgrund veränderlicher klimatischer und sozioökonomischer Rahmenbedingungen bleibt diese Abwägung auch in Zukunft ein dynamischer Prozess. Für diese Aufgabe hat das NFP 61 wichtige Diagnose- und Planungsgrundlagen bereitgestellt.

Gewässerökologie

Fliessgewässer und Seen sind Gegenstand und Betroffene verschiedenster gesellschaftlicher Aktivitäten. Sie werden dabei in ihrer Menge, Qualität und hydromorphologischen Integrität verändert und in ihrem Raumbedarf eingeengt. Die verschiedenen Beanspruchungen und Einflüsse wirken individuell, können sich aber gegenseitig verstärken. Die heute vorhandenen Beeinträchtigungen sollen mit der neuen Gewässerschutzgesetzgebung vermindert werden (Revitalisierung, Schwall-Sunk, Geschiebehaushalt, Fischgängigkeit, Gewässerraum, Ausbau der Kläranlagen).

Gewässerökologie durch Klimawandel und menschliche Aktivitäten unter Druck
Links: Verändert sich mit steigender Frostgrenze der Geschiebehaushalt der alpinen Gewässer, hat dies auch Auswirkungen auf die Laichplätze von Fischen wie der Bachforelle. (SEDRIVER)
Mitte: Kleinere Flüsse wie die Broye können sich bei starken Wasserentnahmen in den Sommermonaten übermässig erwärmen. (Foto Broye source de vie)
Rechts: Da sich die Larven der Blauflügel-Prachtlibellen während rund zehn Monaten in der Vegetation von Fliessgewässern entwickelt, ist die Art auf eine gleichbleibende Wasserführung angewiesen. (Foto Daniel Küry)

Der Mengenaspekt

Den grössten mengenmässigen Einfluss auf die Gewässer hat die Wasserkraft, indem sie alpine Fliessgewässer umleitet und aufstaut und das Wasser nach Turbinierung verzögert und mitunter einem anderen Flussgebiet zurückgibt.
Die daraus resultierenden Restwasser- und Schwall-Sunk-Probleme sollen durch das Gewässerschutzgesetz von 2011 abgemildert werden. Angesichts der Erfahrung mit der Umsetzung der Sanierungsauflagen des Gewässerschutzgesetzes von 1991 ist es dabei wichtig, die Beseitigung der wasserkraftbedingten Defizite frühzeitig anzugehen, damit sie innerhalb der Fristen (bis 2031) bewältigt werden können. Für die Finanzierung der erforderlichen Massnahmen steht rund 1 Mrd. CHF aus Konsumentenabgaben auf Strom bereit.
Zusätzliche Mengenprobleme treten in Schweizer Gewässern in längeren Trockenperioden auf, einerseits wegen der geringen Aufenthaltszeit des Wassers in flussgespeisten Grundwasserleitern, andererseits wegen z.T. bedeutender Entnahmen. Betroffen sind vor allem kleine und mittlere Gewässer ohne Gletscher oder grössere Seen im Einzugsgebiet. Wird solchen Fliessgewässern Wasser entzogen – entweder direkt oder indirekt durch Förderung verbundenen Grundwassers –, so können die für Wasserlebewesen nötigen Restwassermengen unterschritten werden. Nutzniessende der Entnahmen sind in erster Linie die Landwirtschaft, in geringerem Mass die öffentliche Trinkwasserversorgung und die Eigenförderung der Industrie.

Mögliche Massnahmen im Bereich Wassermengen

- Kataster der für den Abfluss relevanten Nutzer (inkl. Grundwasserentnahmen) und koordinierte Konzessionierung von Entnahmen auf Ebene von Einzugsgebieten unter Einhaltung der Restwassermengen.
- Rückmeldung ökologisch relevanter Messwerte aus der Routineüberwachung an die für Wasserentnahmen zuständige Bewilligungsbehörde.
- Erfassung der von den relevanten Nutzern effektiv entnommenen Mengen, kontinuierlicher Abgleich mit verfügbarem Abfluss.
- Frühzeitige Begrenzung von Entnahmen bei anhaltender Trockenheit aufbauend auf der «Informationsplattform Trockenheit», die im Rahmen des NFP 61-Projekts DROUGHT-CH entwickelt wurde.

Der Qualitätsaspekt

Vielfältige gesellschaftliche Aktivitäten verursachen Emissionen verschiedenster Stoffe. Diese Stoffeinträge sind umso grösser, je intensiver die Landnutzung ist. Die Folgen: Die Wasserqualitätsziele werden nicht überall erreicht, insbesondere in kleineren oder stark mit Abwasser belasteten Gewässern kommt es zu unerwünscht hohen Stoffkonzentrationen. Auch wenn bestimmte Stoffeinträge aus heutiger Sicht unvermeidlich scheinen, sollte weiter auf Abhilfe bzw. Alternativen gesonnen werden.
Ein Schwerpunkt der schweizerischen Gewässerschutzpolitik ist dabei die Optimierung der Reinigungstechnik an den 100 wichtigsten Kläranlagen des Landes. Die weitergehende Aufbereitung des in die Flüsse gelangenden Kläranlagenabwassers kommt nicht nur der Trinkwasserqualität zugute (siehe S. 58), sondern auch den Flusslebewesen und der aquatischen Biodiversität. Ein weiteres Arbeitsfeld ist die Vermeidung von Stoffeinträgen an der Quelle. Die NFP 61-Projekte AGWAM und IWAQA zeigen auf, wie durch Anpassungen der Landnutzung die Gewässerqualität ganzer Einzugsgebiete positiv beeinflusst werden kann.
Neue Aktivitäten wie die Entnahme sehr grosser Seewassermengen zur Wärmenutzung sind derzeit noch nicht abschliessend zu beurteilen, angesichts der Vielzahl anderer Ansprüche einschliesslich der empfindlichen Seeökologie aber sorgfältig abzuwägen. Das gleiche gilt für die infolge wärmerer Sommer zunehmende Nutzung von Grundwasser und Seen für die Gebäude- und Prozesskühlung (siehe S. 40). Die dadurch verursachte Erwärmung der Gewässer wird überlagert und verstärkt durch klimatisch bedingt höhere Wassertemperaturen. Diese können im Jahresdurchschnitt schon ohne menschlichen Einfluss mehrere Grad Celsius betragen und deutliche Veränderungen der Gewässerökologie nach sich ziehen (Projekt IWAQA). Zum Beispiel kann das Vorkommen der Bachforelle in der Schweiz reduziert werden [187].

Mögliche Massnahmen im Bereich Wasserqualität

- Aktionsprogramm zur Senkung diffuser Stoffeinträge (Pestizide, Nährstoffe, erodiertes Bodenmaterial etc.). Dabei muss der Vermeidung ein grosses Gewicht zukommen, da eine End-of-Pipe-Lösung wie bei der erfolgreichen Strategie Micropoll im Bereich der Kläranlagen nicht möglich ist.
- Vermeidung besonders problematischer Chemikalien möglichst an der Quelle (persistente Stoffe, grosse Mengen).
- Verstärkte Dokumentation und Überwachung des Einsatzes von Chemikalien (z.B. Einrichtung eines Registers von in der Produktion verwendeten und in Produkten enthaltenen Chemikalien, «Chemikalienregister» nach schwedischem Vorbild).
- Vermehrte Nutzung von Vermeidungs- und Rückhaltestrategien in der industriellen Produktion (Recycling, Verdampfung, abwasserfreie Produktion).
- Förderung der Uferbeschattung an kleinen Gewässern zur Reduzierung von Temperaturextremen.
- Vertiefte Folgenabschätzung des Austauschs grosser Wärmemengen an Seen.

Der Aspekt Hydromorphologie

Die Schweizer Gewässer sind in der Vergangenheit zugunsten von Landgewinnung, Hochwasserschutz und Wasserkraft begradigt, eingeengt und verbaut worden. Mehr als 100 000 Querbauwerke höher als 50 cm behindern die Wanderung aquatischer Lebewesen und verändern den Geschiebehaushalt mit weitreichenden Folgen etwa für die Fortpflanzung von Fischen. Durch das neue Gewässerschutzgesetz sollen Geschiebehaushalt und Fischgängigkeit bis 2031 saniert werden. In der nahen Zukunft könnten allerdings infolge der nationalen Energiestrategie weitere Flüsse durch verstärkte Wasserkraftnutzung in ihrer morphologischen Integrität beeinträchtigt werden (für Ausbaupläne siehe S. 44). Es scheint daher angemessen, energie- und wasserwirtschaftliche Strategien gesamthaft aufeinander abzustimmen und nicht sektoral zu behandeln.

Beim Hochwasserschutz muss sich die Gesellschaft infolge des Rückgangs des Permafrosts im Gebirge auf zunehmende Geschiebemobilisierung und Murgänge einstellen. Insgesamt werden in der Schweiz Häufigkeit und Intensität von Hochwassern in der Zukunft mindestens gleich bleiben. In der dicht besiedelten und genutzten Landschaft im Mittelland und den grossen alpinen Flusstälern gibt es enorme Sachwerte, die durch Überschwemmungen in Mitleidenschaft gezogen werden können. Daher sollte in hochwassergefährdeten Bereichen keine neue Bebauung bewilligt werden, um das Schadenpotenzial gering zu halten und um dem Wasser ausreichende Retentionsflächen zu bieten.

Das Gewässerschutzgesetz von 2011 sieht für die nächsten 80 Jahre eine Revitalisierung von 4000 km Flussstrecken vor. Ein Teil dieser naturnahen Umgestaltung wird auch die Hochwassersicherheit verbessern. Ein gesamthafter Blick auf ganze Flussgebiete erleichtert integrale Lösungen und verhindert, dass Hochwasserprobleme durch Schutzmassnahmen flussabwärts verlagert werden.

Mögliche Massnahmen im Bereich Hydromorphologie

- Rückbau nicht mehr benötigter Wanderungshindernisse im Zug von Bau- oder Unterhaltsarbeiten an Flüssen.
- Vermeidung neuer Siedlungs- und Gewerbebauten in Überschwemmungsgebieten, um Sachzwänge für weitere Hochwasserschutzmassnahmen zu minimieren, ggf. punktueller Rückzug von schwierig zu schützenden Flächen.
- Berücksichtigung naturnaher Flussbaumethoden.
- Hochwasserschutzprojekte mit stark abflussbeschleunigender Wirkung (z.B. harte Verbauungen, Hochwasserentlastungsstollen) einzugsgebietsweise planen und finanzieren, um die Verschiebung von Schadenspotenzialen flussabwärts zu minimieren.
- Kleinwasserkraftwerke wegen ungünstiger Kosten-Nutzen-Verhältnisse in punkto Gewässerschutz möglichst vermeiden.

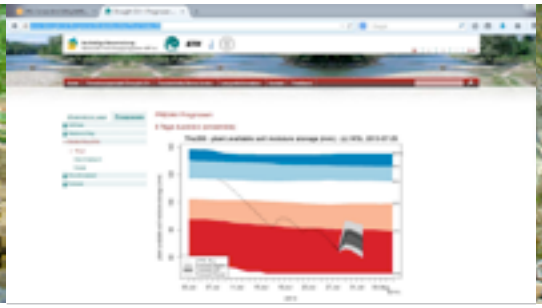
Der Flächenaspekt

Der Schutz des Gewässerraums entlang von Flüssen ist durch das Gewässerschutzgesetz 2011 neu definiert und gesichert worden. Der Raumplanung kommt in diesem Bereich eine grosse Bedeutung zu: Ein Schutz landwirtschaftlicher Flächen vor Überbauung könnte auch zum Schutz der aquatischen Lebensräume beitragen, indem der Druck auf freie Flächen generell abnehmen würde.

Historisch wurden auch in der Schweiz Quellmoore, Feuchtwiesen, sumpfige Auen und Tümpel einseitig als Hindernisse betrachtet, die es zu beseitigen galt. Heute weiss man, dass gerade diese Landschaftselemente von grosser Bedeutung für die Artenvielfalt sind. Sie sind allerdings nur noch in sehr geringer Zahl erhalten, eine Wiederbelebung etwa durch Aufhebung nicht mehr benötigter Quellfassungen oder Drainagen wird bisher kaum angegangen. Hier besteht Flächenbedarf für die Wiedervernässung von Kleingewässern.

Mögliche Massnahmen im Bereich Flächennutzung

- Stärkung des Gewässerraums in der Raumplanung.
- Verringerung des Siedlungsdrucks auf Freiflächen (Landwirtschaft und naturnahe Lebensräume wie Gewässer).
- Aktionsprogramm für die Wiedervernässung von Standorten, an denen Quellfassungen und Drainagen aufgelassen werden.



Herausforderung Trockenheit
Links: Das Jahr 2003 hat gezeigt, dass sich auch die Schweiz gegen Wasserengpässe in Trockenphasen noch besser wappnen muss. So könnten den Landwirten bei anhaltender Trockenheit Einkommensverluste durch eine Dürreversicherung ausgeglichen werden. (DROUGHT-CH)
Mitte: Durch frühzeitige Erkennung und Kommunikation von aufkommender Trockenheit könnte die Wasserentnahme aus Fliessgewässern eingeschränkt werden. (DROUGHT-CH)
Rechts: Durch vorausschauende Planung lassen sich kritische Wasserstände wie im Jahr 2003 vermeiden. (DROUGHT-CH)

Trockenperioden

Der Hitzesommer 2003 und nochmals das trockene Frühjahr 2011 mit ihren empfindlich spürbaren Wassermangelproblemen haben gezeigt, dass schon wenige Monate ohne nennenswerten Regen die Verfügbarkeit von Wasser auch in der Schweiz stark beeinträchtigen können. Engpässe gab es 2003 vor allem für die Landwirtschaft, im breiten Bewusstsein ist jener Sommer aber in erster Linie als Hitzesommer, nicht als Trockenphase geblieben.
Der Wassermangel war beträchtlich: Kleinere Flüsse und Bäche verzeichneten Niedrigpegel oder trockneten gar aus, und selbst ein grosses Fliessgewässer wie die Limmat führte zeitweise nur deshalb genügend Wasser, weil ihr Abfluss aus dem Vorrat des Zürichsees alimentiert wurde. In der Folge konnte der Seepegel nicht gehalten werden und sackte um einige Zentimeter ab. Auch die Grundwasservorkommen gingen vielerorts stark zurück.
Der Sommer 2003 war jedoch bei Weitem nicht die schlimmste Trockenheit in der Schweizer Geschichte. Historisch belegt sind mehrere Ereignisse mit mehrjähriger Trockenheit (siehe S. 31), wie sie im 20. Jahrhundert nicht einmal annähernd vorgekommen sind [96]. Die damaligen meteorologischen Verhältnisse lassen sich aus den Berichten ableiten: Sie waren weitaus gravierender als in den Trockenjahren 1947 oder 2003. Nichts spricht dagegen, dass ähnlich extreme Trockenphasen in der Schweiz auch zukünftig wieder eintreten können.
Der Klimawandel mit steigenden Temperaturen und potenziell verminderten sommerlichen Niederschlägen – in letztem Punkt sind die Prognosen nicht eindeutig – dürfte die Wahrscheinlichkeit von extremen Trockenereignissen erhöhen. Daher war es eine Aufgabenstellung des NFP 61, Möglichkeiten zur Früherkennung von Trockenheitsbedingungen zu untersuchen. Das NFP 61-Projekt DROUGHT-CH ging vor allem der Entwicklung der für Trockenheit entscheidenden Wasserspeicher auf den Grund. Zudem wurde eine Informationsplattform für Trockenheit geschaffen (www.drought.ch), die es Wasserversorgern, Landwirtschaft und anderen betroffenen Sektoren ermöglichen soll, sich entsprechend zu informieren und vorzubereiten. Das Projekt GW-TREND untersuchte die Anfälligkeit von Grundwasservorkommen auf höhere Temperaturen und Trockenperioden.
Die Schweiz ist – das machen die Untersuchungen deutlich – derzeit nicht optimal für lange Trockenphasen gerüstet. Viele Folgen lassen sich dank moderner Technologie und internationaler Vernetzung heute besser verkraften als im 18. Jahrhundert. Trotzdem könnte die Situation bei anhaltender Trockenheit kritisch werden, z.B. für die Landwirtschaft: In der Regel gehen die Bauern davon aus, dass die Wasservorkommen für die Bewässerung ihrer Kulturen jederzeit ausreichen. Die Jahre 2003 und 2011 und teilweise 2006 haben aber gezeigt, dass bei längerer Trockenheit der landwirtschaftliche Bedarf regional schon bald die verfügbaren Mengen übersteigt [188].

Mögliche Massnahmen

Aus dem Vorgesagten ergibt sich, dass für trockenheitsbedingte Nutzungskonflikte Politik und Verwaltung Dispositive schaffen sollten (siehe auch NFP 61 Thematische Synthese 4 für die entsprechenden Gouvernanzaspekte). Massnahmen wie die folgenden können dazu beitragen, Wasserkonflikte zu vermeiden, die Gewässerfunktionen zu erhalten und die vitalen Wassernutzungen, allen voran die Trinkwasserbereitstellung, auch in langen Trockenphasen zu sichern:

- Strategische Vernetzung im Bereich der Trinkwasserversorgung. Dieser Prozess hat als Reaktion auf die Ereignisse von 2003 bereits eingesetzt.
- Eine zuverlässige Vorhersage von Dürrebedingungen sollte es ermöglichen, die landwirtschaftliche Bewässerung vorsorglich zurückzufahren.
- Bei anhaltender Trockenheit sollten Einkommensverluste für die Landwirtschaft durch eine Versicherung ausgeglichen werden.
- Für ausgeprägte Trockensituationen sollten – speziell in empfindlichen Gebieten – frühzeitig Prioritäten für die diversen Wassernutzungen ausgehandelt werden. Im Rahmen von NFP 61 hat das Projekt MONTANAQUA die Notwendigkeit dazu klar aufgezeigt.
- Weiter sollte abgewogen werden, inwiefern Wasser in künstlichen Speichern als Notvorrat für andere Nutzungen bereitgestellt werden kann.

4 – Vorbeugen, vermeiden, verhandeln: Werkzeuge für das Konfliktmanagement

In vielen Situationen ist das etablierte Management schon heute erfolgreich und zielführend. Verschiedene NFP 61-Projekte wie MONTANAQUA, AGWAM, WATER-CHANNELS, NELAK, IWAQA oder SWIP zeigen jedoch, dass in Zukunft zusätzliche Herausforderungen auf den Schweizer Wassersektor zukommen, die neue (methodische) Ansätze erfordern. Dabei gilt die Leitlinie, dass die notwendigen Entscheide rational, gesellschaftlich transparent und nachvollziehbar zu fällen sind. Die Praxis hat auf diese Situation bereits reagiert, indem z.B. das Konzept des integrierten Einzugsgebietsmanagements (IEM) breit abgestützt als Vorgehensweise gefördert wird. Die Ergebnisse verschiedener NFP 61-Projekte liefern u.a. methodische Werkzeuge, um IEM besser handhabbar zu machen.

Vorbeugen: bessere Datenbasis für frühzeitiges Handeln

Wer rational und vorausschauend entscheiden will, braucht Kenntnisse. Die Recherchen zum vorliegenden Bericht – vertieft ist das auch in der NFP 61 Thematischen Synthese 1 dargelegt – haben gezeigt, dass in der Schweiz zwar viele Informationen verfügbar sind, aber in bestimmten Bereichen dennoch wichtige Daten fehlen. Während über den hydrologischen Zustand der Gewässer gute Kenntnisse bestehen, hat man zu gewissen Nutzungen wie Wasserentnahmen durch die Landwirtschaft aus Fliessgewässern und Grundwasser nur grobe Schätzungen. Auch über den chemischen und biologischen Zustand wissen wir in vielen Gewässern nur wenig – für manche Entscheidungen zu wenig. Es bestehen z.B. kaum Datensätze, die es erlauben, den Zusammenhang zwischen chemischer Belastung und ökologischem Zustand von Fliessgewässern über längere Zeiträume zu analysieren [189]. Dies erschwert fundierte und rationale Entscheidungen.

Eine bessere Datenlage ist zukünftig vor allem deshalb nötig, weil durch das Zusammenrücken der Nutzungen auf der intensiv bewirtschafteten Landesfläche vielfältige Überlagerungen entstanden sind. Wo einst jede Nutzung für sich allein planen konnte, kommt es nun zu gegenseitiger Beeinflussung. An solchen Schnittstellen können Nutzungskonkurrenzen und Nutzungskonflikte entstehen, die durch ein zusätzliches Monitoring von Gewässerzustand und Nutzungen frühzeitig erkennbar werden.

Der Bedarf nach umfassenderen Daten ist ein Nebeneffekt des erhöhten Konfliktpotenzials. Der zusätzliche Aufwand – der durch intelligente Monitoringstrategien möglichst klein gehalten werden sollte – ist als externalisierter Kostenfaktor der zunehmenden Nutzungsintensität von Landschaft und Gewässern zu betrachten.

Mehrere Forschungsprojekte im Rahmen des NFP 61 haben wesentlich zur Verbesserung der Datengrundlage und zu einem vertieften Verständnis von Nutzungsüberlagerungen im Wasserbereich beigetragen (NELAK, SWISS-KARST, AGWAM, MONTANAQUA, GW-TREND). Es hat sich aber auch gezeigt, dass bei der Erfassung von Nutzungen und deren Auswirkungen zusätzlicher Bedarf an wasserrelevanten Daten besteht.

Nützlich wäre die Erfassung folgender zusätzlicher Aspekte:

- effektiv für die Bewässerung genutzte Wassermengen;
- Wassernutzung durch Industrie und Gewerbe;
- Identität und Mengen eingesetzter Chemikalien (Industrie, Gewerbe, Haushaltsprodukte);
- Konkurrenzierung der Trinkwassernutzung von Grundwasser durch Flächenansprüche von Siedlung, Industrie und Verkehr;
- Konkurrenzierung der Trinkwassernutzung von Grundwasser durch Wärmenutzung und Kühlung;
- langfristige Entwicklung des ökologischen Zustands von Gewässern anhand von aussagekräftigen biologischen Indikatoren.

Prognose von Extremereignissen

Die Vorhersage für verschiedene Naturgefahren wie Überschwemmungen oder Murgänge ist schon lange etabliert und wird laufend weiter verbessert. Das NFP 61-Projekt DROUGHT-CH hat gezeigt, dass auch lang anhaltende Trockenphasen in der Schweiz stärker beachtet werden sollten. Historische Dokumente belegen für die vergangenen 500 Jahre weit intensivere Extremereignisse als sie im 20. Jahrhundert aufgetreten sind. Auch wenn die Eintretenswahrscheinlichkeit gering ist, die Schweizer Wasserwirtschaft muss auch solche Situationen zuverlässig bewältigen können (siehe S. 30, 64).

Um die Vulnerabilität bei Trockenheit zu vermindern, kommt es darauf an, Trockenperioden bzw. eintretende Dürrebedingungen möglichst frühzeitig zu erkennen. Die Schaffung eines entsprechenden Monitoring- und Früherkennungssystems und der öffentlichen Internet-Informationsplattform www.drought.ch waren Schwerpunkte des NFP 61-Projekts DROUGHT-CH. Von besonderer Wichtigkeit ist die Bestimmung des Zeitpunkts, um von gewöhnlichen Trockenbedingungen auf ein Notstandsregime umzuschalten.

In Kapitel 2 wurden die Nutzungsansprüche auf die Gewässer und Wasserressourcen der Schweiz dokumentiert, in Kapitel 3 der sich daraus ergebende Handlungsbedarf und mögliche Massnahmen aufgezeigt. Das starke Wachstum von Bevölkerung und Wirtschaft deutet darauf hin, dass sich die Nutzungen in Zukunft weiter intensivieren werden.

Dieses Kapitel legt dar, welche prozeduralen Anpassungen im Wassermanagement der Schweiz möglich sind, um auch unter solchen Bedingungen Konflikte zu vermeiden bzw. aufzulösen.

Welche Folgen sich für die übergeordnete Wasserpolitik ergeben, ist Gegenstand der NFP 61 Thematischen Synthese 4.

«Klar ist, dass das Ziel ein effizienter Gewässerschutz sein muss. Meines Erachtens müssen sich dazu die Gemeinden einzugsgebietsweise organisieren..»

Eric Mennel
Amt für Umwelt, Kanton Freiburg, Gemeinderat Givisiez

Mehr dazu im IWAGO unter www.nfp61.ch

Dieser Umschaltpunkt ist sowohl für die Gewässer als auch für die Nutzer von grosser Wichtigkeit. Es wäre zum Beispiel der Zeitpunkt, ab dem eine landwirtschaftliche Dürreversicherung den Bauern Ernteverluste ausgleichen würde, um zu verhindern, dass trotz niedriger Fluss- und Grundwasserpegel weiter intensiv bewässert wird. Auch die Bewirtschaftung der Speicherseen im Gebirge müsste sich bei extremer Trockenheit allenfalls von der Wasserkraft zu anderen Nutzungen verschieben.

Vermeiden und verhandeln: rationales und transparentes Vorgehen

Zeigt ein Abgleich der Nutzungen mit der Belastbarkeit der genutzten Gewässer eine Überschreitung von Nutzungsgrenzen an oder schränkt ein Nutzer die Möglichkeiten eines anderen ein, so müssen Massnahmen zur Korrektur der Situation erarbeitet werden. Bei der Suche nach Lösungsansätzen empfiehlt sich ein dreistufiges Vorgehen: a) Steigerung der Nutzungseffizienz, b) Koordination der Nutzungen, c) Priorisierung der Nutzungen.

a) Nutzungseffizienz: Bei der Nutzung von Wasser lassen sich häufig bedeutende Effizienzpotenziale heben. Für den Landwirtschaftsbereich hat das NFP 61-Projekt AGWAM entsprechende Spielräume beispielhaft aufgezeigt. Verbesserungen sind aber auch im industriell-gewerblichen Bereich möglich, etwa durch wassersparende Prozesse und Maschinen oder durch Kreislaufsysteme.

b) Koordination: Genügen Effizienzmassnahmen nicht, lassen sich Konflikte durch zeitliche oder räumliche Koordination entschärfen. Auf der zeitlichen Ebene lässt sich z.B. der sommerliche Wasserbezug aus Gewässern durch Wasserspeicherung vermindern. Auf der räumlichen Ebene können besonders wasserintensive oder gewässerbelastende Aktivitäten dorthin verlagert werden, wo andere Wassernutzungen nicht berührt werden. Beispiele sind die Anpassung der landwirtschaftlichen Strukturen an die verfügbare Wassermenge wie in den AGWAM-Modellen für die Broye-Region oder die Wassernutzungsstrategie des Kantons Bern, die einige Flüsse für die Wasserkraftnutzung bereitstellt, andere dafür von hydroelektrischen Anlagen freihält.

c) Priorisierung unter Einbezug der relevanten Akteure: Wenn Effizienz- und Koordinationsmassnahmen keine hinreichende Entlastung bringen, muss eine Priorisierung der Nutzungen angegangen werden. Da hierbei oftmals in bestehende Rechte und Gewohnheiten eingegriffen werden muss, kommt es darauf an, die den jeweiligen Nutzungen zugrunde liegenden gesellschaftlichen Ziele transparent zu machen und gegeneinander abzuwägen. Im Rahmen verschiedener NFP 61-Projekte (SWIP, IWAQA, HYDROSERV) wurden Methoden erarbeitet, die derartige Aushandlungsprozesse zielgerichtet unterstützen können. Verfahren wie die multi-kriterielle Entscheidungsunterstützung (MCDA) machen sichtbar, weshalb unterschiedliche Akteure verschiedene Massnahmen bevorzugen. Wie die Erfahrungen in IWAQA oder SWIP

Abgleich widersprüchlicher Ziele im Wassermanagement: Erkenntnisse aus dem NFP 61-Projekt IWAQA

Der Eintrag von Stoffen in Oberflächengewässer wird massgeblich durch verschiedene Landnutzungen beeinflusst. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Projekts IWAQA eine spezifische Methode weiterentwickelt, die die verschiedenen Ziele des Wassermanagements bezüglich Wasserqualität und ökologischen Zustands kohärent bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt. Diese Methode – die sogenannte multikriterielle Entscheidungsunterstützung (MCDA, aus dem Englischen für Multi-criteria Decision Analysis; siehe Abb. 19) – ist generell auf Managementfragen im Wassersektor anwendbar und auch geeignet, Unsicherheiten bei Vorhersagen zukünftiger Entwicklungen in die Entscheidungsfindung einzubeziehen.

Kernelemente der Methode sind einerseits die ausdrückliche Formulierung der angestrebten Managementziele, andererseits die klare Trennung zwischen der objektiven Erfassung des Zustands (bzw. der Prognose des zukünftigen Zustands) und der Bewertung dieses Zustands. Das dem Verfahren zugrunde liegende Bewertungsverfahren erlaubt es, verschiedene oft widersprüchliche Managementziele nachvollziehbar zusammenzufassen und gegeneinander abzuwägen.

Im Rahmen von IWAQA wurde zur Beurteilung der Gewässerqualität das etablierte System des Modul-Stufen-Konzepts von Bund und Kantonen (http://www.modul-stufen-konzept.ch) in den MCDA-Ansatz integriert. Das Verfahren kann in dieser Form – auch mit einer entsprechenden Software – auf weitere Gewässer der Schweiz angewendet werden. Es ist ein allgemeines Verfahren, mit dem Massnahmen im Bereich des Wassermanagements beurteilt werden können (siehe auch das NFP 61-Projekt SWIP und die Thematische Synthese 3).

Grundsätzlich erlaubt es das Verfahren, widersprüchliche Ziele in unterschiedlichsten Arten von Entscheidungsprozessen zu behandeln. Es kann daher auch zum Einsatz kommen, wenn die gegenseitigen Auswirkungen verschiedener Politikbereiche (z.B. Wasser-, Energie oder Landwirtschaftspolitik) untersucht und diskutiert werden sollen.

gezeigt haben, kann durch einen MCDA-Prozess der sachliche Dialog zwischen Akteuren erheblich erleichtert werden (siehe Kasten S. 66).

Um zu einem sachlich richtigen und einvernehmlichen Abschluss eines Entscheidungsprozesses zu kommen, sind eine gute Datengrundlage und eine professionelle Prozessführung nötig. Noch sind gut ausgebildete Fachpersonen rar, die die im NFP 61 (weiter-)entwickelten Verfahren in der Praxis anwenden können. Entsprechende Ausbildungen sind angesichts der Vielschichtigkeit von Wasserkonflikten sehr wünschenswert. Denn manche Konfliktkonstellationen sind ohne die professionelle Anwendung von transparenten und nachvollziehbaren Methoden und Verfahren kaum aufzulösen.

Konfliktbewältigung: faire, robuste, flexible und langfristige Strategien

Der Wassersektor ist stärker als viele andere gesellschaftliche Bereiche auf Langfristigkeit ausgelegt (z.B. Lebensdauer der Trinkwasser- und Abwasserinfrastruktur 50 bis 100 Jahre, Wasserkraftkonzessionen 80 Jahre). Viele der heutigen Entscheidungen werden sich jahrzehntelang bewähren müssen, selbst wenn sich die Rahmenbedingungen ändern. Technische, organisatorische und rechtliche Ansätze sollten daher einerseits anpassungsfähig und flexibel, andererseits aber auch unter unterschiedlichen Bedingungen erfolgreich anwendbar («robust») sein.
Folgende Kriterien sind zu beachten:

a) Weitestgehende Einbeziehung potenziell veränderlicher Randbedingungen: Dies können dauerhafte Veränderungen (Klimawandel, Demografie, geopolitische Entwicklungen) sein oder vorübergehende Extremereignisse (z.B. Hochwasser, Trockenheit), auch die eventuelle Verschiebung gesellschaftlicher Prioritäten in der Zukunft ist zu berücksichtigen. Bei langfristigen Projekten mit breit formulierten Szenarien sollte nicht nur mit Wunschvorstellungen geplant, sondern auch unerwünschte und ungünstige Entwicklungen sollten einbezogen werden (für Beispiele siehe SWIP, IWAQA oder die Trockenheitsszenarien des Bundesamts für Bevölkerungsschutz, siehe Seite 30). Um dies zu erreichen, sollten die Planungen über den Erfahrungshorizont der heutigen Generation hinausgehen und den zeitlichen Bezugsrahmen auch auf historische Ereignisse ausdehnen;

b) Sachzwänge wo möglich vermeiden, Handlungsspielräume möglichst weitgehend erhalten: Angesichts intensiv genutzter Gewässer in der Schweiz ist es von entscheidender Bedeutung, keine zusätzlich erschwerenden Rahmenbedingungen zu schaffen. Sachzwänge können durch politische Weichenstellungen ausgelöst werden (nur sektoral orientierte Zielvorgaben), durch neue Produkte (z.B. Nanopartikel) oder zusätzliche Nutzungen (z.B. Kühlungsbedarf des IT-Bereichs);

c) Generationengerechtigkeit: Diese Zielsetzung umfasst zum einen den dauerhaften Erhalt ökologisch intakter Gewässersysteme, zum anderen, späteren Generationen eigenen Entscheidungsspielraum zu belassen. Das gilt für technische Weichenstellungen (z.B. Kanalisation mit Mischsystem oder Trennsystem) ebenso wie für bauliche Eingriffe: Beim Bau von Staudämmen oder Siedlungen ist zu bedenken, dass die damit einhergehenden Veränderungen des Wasserhaushalts dauerhaft sein werden;

d) Vorsorgeprinzip und Frühwarnsysteme: Entscheidungen mit einem langen Zeithorizont sind stets mit Unsicherheit verbunden, müssen aber gleichwohl getroffen werden. Bereiche, in denen es an Wissen (noch) fehlt, erfordern dabei besondere

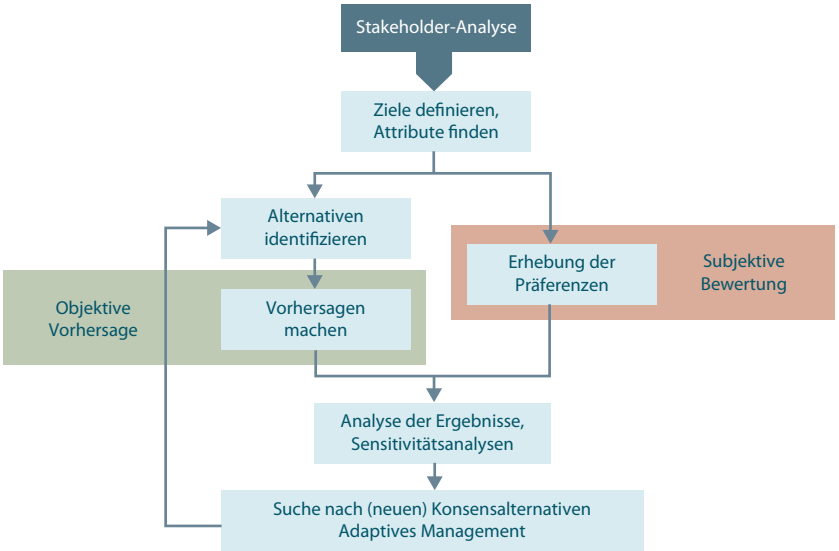


Abb. 19: Schematischer Ablauf der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung [190] wie sie im Projekt IWAQA verwendet wurde. Ein wichtiges Merkmal des Verfahrens ist die klare Unterscheidung zwischen objektiven Vorhersagen und subjektiven Bewertungen.

Kommunizieren, verhandeln und einigen
Links: Gegenseitiges Verstehen von Interessen und Positionen aller Akteure untereinander erleichtert die Konsensfindung. (Workshop DROUGHT-CH)
Mitte: Oftmals lassen sich trotz Meinungsverschiedenheiten Lösungen erarbeiten, die mehreren Zielen gleichzeitig genügen. (Workshop AGWAM)
Rechts: Um Wasser und Gewässer angemessen zu schützen, sollte das Thema Wasser frühzeitig in alle relevanten Politikfelder eingebracht werden. (Workshop SWIP)

Aufmerksamkeit. Je grösser die Ungewissheit, desto grösser sollte auch die Vorsicht sein. Als Beispiel seien Chemikalien mit unbekanntem Umweltverhalten genannt: Toleriert man ihre Verwendung und stellen sie sich dann als schädlich heraus, lassen sie sich aus den Gewässern nur schwer und über lange Zeiträume zurückholen;

e) Analyse der Auswirkungen früherer Weichenstellungen zur Optimierung heutiger Entscheidungen, etwa bezüglich Infrastrukturen (Pfadabhängigkeit). Dies ist umso wichtiger, je länger eine Weichenstellung Bestand haben soll und je weitreichender ihre Auswirkungen sind.

Konfliktprävention: Einbezug der Wasserthematik in andere Handlungs- und Politikfelder

Die vorliegende Analyse von Konflikt- und Synergiepotenzialen bei der Wassernutzung in der Schweiz zeigt, dass am häufigsten die gesellschaftlichen Ziele betreffend Wasserqualität und Gewässerökologie infrage gestellt sind, während andere Wassernutzungen bisher weniger Einschränkungen erfahren. Dieser Trend zeigt sich etwa bei der raumplanerischen Abstimmung von Trinkwasserschutz und Siedlungsentwicklung oder bei landwirtschaftlichen und industriellen Aktivitäten. Auch energiepolitische Zielsetzungen haben grosses gesellschaftliches Gewicht – nicht nur bezüglich Wasserkraft, sondern zunehmend auch bei der thermischen Nutzung der Gewässer –, welche Gewässerschutzaspekte in den Hintergrund rücken lassen.

Dieses Kapitel hat Grundlagen für eine ausgewogene prozedurale Berücksichtigung sämtlicher wasserwirtschaftlicher und gewässerökologischer Aspekte beschrieben. Allerdings stossen die Verfahren zu einer rationalen Güterabwägung dort an Grenzen, wo die Gewichtung zugunsten eines gesellschaftlichen Anspruchs durch spezifische Politiken (z.B. Landwirtschafts- oder Energiepolitik) einseitig vorgegeben ist. Aus diesen Gründen sind prozedurale Ansätze unbedingt dadurch zu unterstützen, dass das Thema Wasser in seiner ganzen Breite frühzeitig in alle relevanten Handlungs- und Politikfelder eingebracht wird. In der Vergangenheit hat z.B. der einseitige Fokus auf die Gewinnung erneuerbarer Energien auf Ebene einzelner Kantone dazu geführt, dass Wärmesonden in grossem Stil gefördert wurden, ohne andere Ansprüche wie z.B. Trinkwassergewinnung hinreichend zu berücksichtigen. Derartige Probleme sollten zukünftig vermieden werden. Der Einbezug der verschiedenen Ansprüche an Wasser und Gewässer in die Raumplanung (Sicherung von Grundwasserschutzzonen etc.) ist ein Weg dorthin.

Wasser ist ein Identitätsmerkmal der Schweiz, ein Eigenwert, ein nationales Asset. Dieser Bericht legt dar, dass es im Fokus vielfältiger Nutzungsinteressen steht und der Nutzungsdruck voraussichtlich weiter zunehmen wird. Die Weichen, wie mit dieser Situation umzugehen ist, sind in einigen Bereichen schon gestellt. Es bedarf aber weiterer Schritte, um den Erfolg dauerhaft zu sichern. Häufig wird die Schweiz metaphorisch als Wasserschloss bezeichnet – ein Bild, welches unerschöpflichen Überfluss und grenzenlose Nutzbarkeit suggeriert. Dieser Synthesebericht, basierend auf den NFP 61-Projekten und umfangreichem weiterem Material zur Schweizer Wasserwirtschaft, zeigt auf, dass die verschiedenen Räume im Wasserschloss sehr ungleichmässig mit Wasser versorgt werden. Diese Ungleichgewichte können sich angesichts veränderlicher Rahmenbedingungen zukünftig noch verschärfen. Das Wasser und die Gewässer in der Schweiz brauchen noch sorgfältigere Pflege und neue Impulse im Management, damit sie den Menschen auch in Zukunft Nahrung, Erholung und wirtschaftlichen Nutzen bringen können.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Vielfalt der gesellschaftlichen Ansprüche an Wasser und Gewässer.
Abb. 2: Auswirkungen der Wasserkraft auf die Gewässer.
Abb. 3: Im Rahmen von HYDROSERV ermittelte Zahlungsbereitschaft der Bevölkerung für den Hochwasserschutz.
Abb. 4: Regionale Bedeutung der Bewässerung und wichtigste bewässerte Kulturen.
Abb. 5: Einfluss der Witterungsbedingungen auf den landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarf.
Abb. 6: Jahresgang des durchschnittlichen, monatlichen Wasserbedarfs für die Bewässerung unter zwei verschiedenen Strategien der Landnutzung.
Abb. 7: Wasserverbrauch und Profit eines Ackerbaubetriebs in der Broye-Region unter Klimawandel (2050).
Abb. 8: Zunahme von Wärmepumpen im Kanton Bern 2000–2009.
Abb. 9: Für die Wärmenutzung konzedierte Grundwassermengen im Kanton Bern.
Abb. 10: Eigenversorgung der Industrie aus Oberflächenwasser 1972 und 2006.
Abb. 11: Abwasserbeeinflussung des Grundwassers durch die Untere Ergolz (BL), illustriert anhand von Kaliumkonzentrationen.
Abb. 12: Auswirkung des Klimawandels auf verschiedene landwirtschaftliche Funktionen von Ackerbaubetrieben in der Broye-Ebene.
Abb. 13: Kulturmix und Umweltauswirkungen eines Ackerbaubetriebs in der Broye-Ebene unter verschiedenen Klima-, Preis- und Politikszenarien.
Abb. 14: Beispielhafte Wirkung von Klima und weitergehenden Gewässerschutzmassnahmen auf die zu erwartenden Herbizidkonzentrationen im Jahr 2050 für ein IWAQA-Untersuchungsgebiet.
Abb. 15: Flächennutzungsintensität durch Landwirtschaft und Siedlung in der Schweiz.
Abb. 16: Landnutzung über Grundwasservorkommen von unterschiedlicher Ergiebigkeit.
Abb. 17: Historischer Flussraumvergleich am Beispiel der Aare zwischen Thun und Bern.
Abb. 18: Ausgewählte Landnutzungsänderungen in Vergangenheit und Zukunft.
Abb. 19: Schematischer Ablauf der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beitrag der NFP 61-Projekte zur Thematischen Synthese TS 2.
Tabelle 2: Beschreibung der im Rahmen von IWAQA verwendeten sozioökonomischen Szenarien.
Tabelle 3: Übersicht über die von IWAQA untersuchten Massnahmen.

Verzeichnis der Matrizes

Matrix A: Potenzielle Konflikte und Synergien der Mengenbewirtschaftung
Matrix B: Nutzungsüberlagerungen und potenzielle Konflikte bezüglich Wasserqualität
Matrix C: Nutzungsüberlagerungen und potenzielle Konflikte bezüglich Hydromorphologie und aquatischer Lebensräume
Matrix D: Flächennutzungskonflikte

Literatur

[1] Rahn, E. et al. (2014): Räumliche Analyse von Nutzungsüberlagerungen im Schweizer Wassersektor – GIS-Auswertungen im Rahmen der Thematischen Synthese 2 «Bewirtschaftung der Wasserressourcen unter steigendem Nutzungsdruck» des Nationalen Forschungsprogramms 61. Eawag-Report, Dübendorf (http://library.eawag.ch/eawag-publications/openaccess/Eawag_08139.pdf).

[2] BFE (2012): Stand der Wasserkraftnutzung in der Schweiz. Bundesamt für Energie, Januar 2012.

[3] Blanc, P. et al. (2013): Factsheet Wasser in der Schweiz. Akademie der Wissenschaften, Bern (http://www.scnat.ch/downloads/Factsheet_Wasser_d_web.pdf, abgerufen 14.03.2014).

[4] Walter, F. et al. (2013): Nachhaltiger Ausbau der Wasserkraft. Bericht zuhanden des Bundesamts für Energie. Bern (http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/27057.pdf, abgerufen 25.03.2014).

[5] BFE (2012): Wasserkraftpotenzial der Schweiz (per 2050). Bundesamt für Energie, Juni 2012.

[6] Gaudard, L. et al. (2013): Climate change impacts on hydropower management. Water Resource Management 27, 5143–5156.

[7] Gaudard, L. et al. (2013): The future of hydropower in Europe: Interconnecting climate, markets and policies. Environmental Science & Policy 37, March 2014, 172–181 (http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2013.09.008).

[8] NELAK (2013): Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge – Chancen und Risiken. Formation des nouveaux lacs suite au recul des glaciers en haute montagne – chances et risques. Forschungsbericht NFP 61. Haeberli, W., Bütler, M., Huggel, C., Müller, H., Schleiss, A. (Hrsg).

[9] Bütler, M. (2013): Rechtliche Aspekte. In: NFP 61 NELAK Schlussbericht, 53–116.

[10] Biasiutti, G. (2013): Referat Vernehmlassung Berner Energiestrategie Januar 2013, BVE (http://www.bve.be.ch/bve/de/index/energie/energie.assetref/content/dam/documents/portal/Medienmitteilungen/de/2013/01/2013-01-25-referat-biasiutti-de.pdf, abgerufen am 31.01.2014).

[11] SWV (2012): Pumpspeicherwerke sichern Netzstabilität. Faktenblatt Pumpspeicherung (http://www.swv.ch/?uuid=f49dca11-c22f-4ab1-8655-79002717c600&mode=live&open=true).

[12] Frontier Economics und SwissQuant (2013): Bewertung von Pumpspeicherkraftwerken in der Schweiz im Rahmen der Energiestrategie 2050. Studie im Auftrag des Bundesamts für Energie, Dezember 2013 (http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/33124.pdf, abgerufen 21.02.2014).

[13] Uhlmann, V. et al. (2007): Die Sicherung angemessener Restwassermengen – wie wird das Gesetz vollzogen? Wasser Energie Luft, 99, 4, 307–310.

[14] BAFU (2013): Restwassersanierung nach Art. 80 ff. GSchG: Stand Ende 2012 und Entwicklung seit Mitte 2011. Bern (http://www.bafu.admin.ch/gewaesserschutz/01284/01290/12509/index.html?lang=de&download=NHzLpZeg7t,lnp6I0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCHdIN5g2ym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A-, abgerufen 14.03.2014).

[15] Meile, T. et al. (2005): Synthesebericht Schwall-Sunk. Erkenntnisse aus dem Rhone-Thur-Projekt. Eawag, WSL, LCH-EPFL, VAW-ETHZ. 48 Seiten (http://www.rivermanagement.ch/schwall-sunk/docs/synthese.pdf, abgerufen 14.03.2014).

[16] Bruder, A. (2013): Bewertung von Massnahmen zur Beseitigung wesentlicher Beeinträchtigungen durch Schwall und Sunk. Eawag, Studie im Auftrag des BAFU (http://www.bafu.admin.ch/gewaesserschutz/04851/index.html?lang=de, abgerufen am 14.03.2014).

[17] BAFU (2009): Monitoring BAFU der geförderten Kleinwasserkraft (Energiegesetz); Analyse der Anmeldungen für die kostendeckende Einspeisevergütung (KEV, Stand 22.4.2009).

[18] WA 21, BAFU, BFE (2012): Übersicht über kantonale Strategien und Werkzeuge zur Nutzung der Wasserkraft (http://wa21.ch/images/content/c%20wk/WA21%20WerkzeugeStrategien%200712.pdf, abgerufen 14.03.2014).

[19] BAFU, BFE, ARE (2011): Bundesempfehlung zur Erarbeitung kantonaler Schutz- und Nutzungsstrategien. Bern.

[20] BFE (2013): Statistik der Wasserkraftanlagen (WASTA) 2013, BFE (Bundesamt für Energie)

[21] BAFU (2001): Kraftwerkszentralen mit Schwall-Sunk-Betrieb, Grundlagenstudie im Auftrag des BAFU, Limnex AG, Juli 2001.

[22] Swisstopo (2011): swisstopo (Art. 30 GeoIV): 5704 000 000 / Vector200©2011 (reproduziert mit Bewilligung von swisstopo / JA100119).

[23] Eawag (2011): Restwasserstrecken: Wasserkraftnutzung und Restwasser – Restwasserstrecken und Sanierungsbedarf ©Eawag 2011/(http://www.eawag.ch/repository/surf/restwasser/index.html, abgerufen 13.05.2014).

[24] Swisstopo (2003): swisstopo (Art. 30 GeoIV): 5704 000 000 / DHM25©2003 (reproduziert mit Bewilligung von swisstopo / JA100119).

[25] Swisstopo (2008): swisstopo (Art. 30 GeoIV): 5704 000 000 / Vector25©2008 (reproduziert mit Bewilligung von swisstopo / JA100119).

[26] Walther, H.-J. (2012): Abflussregulierung und Entscheidungsfindung im Betrieb – Sicht Wasserkraftbetreiber. Vortrag an der SWV-KOHS-Tagung 2012, Olten (http://www.swv.ch/?uuid=08223a11-0efd-4c8f-be0a-aad9e433481c&mode=live&open=true, abgerufen am 14.03.2014).

[27] Biedermann, R. et al. (1996): Speicherkraftwerke und Hochwasserschutz. Wasser Energie Luft, Heft 10, 1996. Baden.

[28] Zermatt Inside (2012): Beschneien auf Knopfdruck? (http://inside.zermatt.ch/2012/6/12.pdf, abgerufen 15.05.2014).

[29] Marbot, B. et al. (2013): Wiesenbewässerung im Berggebiet. Agroscope, Zürich.

[30] Reynard, E. et al. (2014): Interdisciplinary assessment of complex regional water systems and their future evolution: how socioeconomic drivers can matter more than climate. Wires Water (in print).

[31] Aufsichtskommission Vierwaldstättersee (o. J.): Die Seeregulierung (http://www.4waldstaettersee.ch/04.5_seeregulierung.html, abgerufen am 14.03.2014).

[32] Wehren, B. (o. J.): Seekoten und ihre Bedeutung – Oberlandseen. AWA Bern. (http://www.bve.be.ch/bve/de/index/wasser/wasser/wasserregulierung/oberlandseen.assetref/content/dam/documents/BVE/AWA/de/GWR_Reg/GWR_Seepegel_und_ihre_Bedeutung_BeO.pdf, abgerufen 24.02.2014).

[33] Hunkeler, D. et al. (2006): Biozönosen im Grundwasser – Grundlagen und Methoden der Charakterisierung von mikrobiellen Gemeinschaften. Umwelt-Wissen Nr. 0603, Bundesamt für Umwelt, Bern, 113 Seiten.

[34] Kanton Zürich (2013): Vernehmlassungsbericht WsG, 64 (https://www.ewp.zh.ch/vd/appl/awa/vnl/databases/vnl.nsf/vw-alldocuments/FD1EC1526C63F59AC1257B0B002FDD07/$File/121218_Vernehmlassungsbericht_WsG.pdf, abgerufen 13.05.2014).

[35] Baumann, M. et al. (2009): Einsatz des neuen Grundwassermodells im Rahmen der 2. Thurgauer Thurkorrektion. In: Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft, Band 63, 189–200.

[36] Köplin, N. et al. (2014): Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change. Hydrological Processes, No. 28, 2567–2578 (http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9757).

[37] Ryffel, A. et al. (in review): Land use trade-offs for flood protection: A choice experiment with visualizations. Ecosystem Services (submitted).

[38] Pappas, C. et al. (2013): Sensitivity analysis of a process-based ecosystem model: Pinpointing parameterization and structural issues, J. Geophys. Res. Biogeosci., 118, 505–528 (http://dx.doi.org/10.1002/jgrg.20035).

[39] Celio, E. et al. (2014): Modeling land use decisions with Bayesian networks: Spatially explicit analysis of driving forces on land use change. Environmental Modelling & Software 52: 222–233.

[40] Regierungsrat des Kantons Bern (2013); Vortrag zur Regierungsratssitzung vom 23.10.2013 (http://www.gr.be.ch/etc/designs/gr/media.cdwsbinary.DOKUMENTE.acq/11491f50e64343218417c92f3f4aa0c8-332/4/PDF/2013.1374-Vortrag-D-71600.pdf, abgerufen 02.05.2014).

[41] Baumann, M. (2009): Die Thur und das Thurtal. In: Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft, Band 63, 17–27.

[42] Weber, M. et al. (2007): Stand der Bewässerung in der Schweiz. Bundesamt für Landwirtschaft. Bern.
[43] Bundesamt für Statistik (2012): Landwirtschaftliche Betriebszählung, Zusatzerhebung 2010. Neuchâtel.
[44] Monney, P. (o. J.): Bewässerung von Obst bäumen. Agroscope Webseite. (http://www.agroscope.admin.ch/extension-obst/05946/06112/index.html?lang=de& print_style=yes)
[45] Kantonale Fach- und Zentralstellen für Obstbau et al. (2012): Anbauempfehlung für die Region Nordwestschweiz. (http://www.liebegg.ch/pdf/1330616097-anbau_empf_nwch2012.pdf), S. 46.
[46] Amt für Umwelt Kanton Thurgau (2013): Entwicklung von Instrumenten zur Früherkennung und von Lösungsansätzen für die Thurgauer Land- und Ernährungswirtschaft beim Umgang mit Wasserknappheit. Projekt im Rahmen der BAFU-Pilotprogramms «Anpassung an den Klimawandel».
[47] Kanton Schaffhausen (2009): Wasserwirtschaftsplan, Art. 2.3.4 (Erhaltung und Nutzung von Grundwasservorkommen). Schaffhausen.
[48] Kapphan I. et al. (2012): Climate change, weather insurance design, and hedging effectiveness. Geneva Papers of Risk and Insurance Issues and Practice, Special Issue: Climate Change and Insurance 37, 286–317.
[49] Beguin, J. (2007): Irrigation dans la Broye fribourgeoise: trois exploitants agricoles se jettent à l'eau. Geomatik Schweiz 7, 346–349.
[50] http://www.gemueseschweiz.ch/grossesmoos.html (abgerufen 31.03.2014) .
[51] BFS (2012): Landwirtschaftliche Betriebszählung Zusatzerhebung 2010, Neuchâtel.
[52] Swisstopo (2011): swisstopo (Art. 30 GeoIV): 5704 000 000 / swissTLM3D©2011 (reproduziert mit Bewilligung von swisstopo / JA100119).
[53] Swisstopo (2011): swisstopo (Art. 30 GeoIV): 5704 000 000 / swissBOUNDARIES3D, (reproduziert mit Bewilligung von swisstopo / JA100119).
[54] Fuhrer, J. et al. (2014): Bewässerungsbedarf und Wasserdargebot unter Klimawandel: eine regionale Defizitanalyse. AgrarForschung, im Druck.
[55] Bundesamt für Landwirtschaft (2014): Verordnung über Einzelkulturbeiträge im Pflanzenbau (Einzelkulturbeitragsverordnung, EKBV) vom 23. Oktober 2013 (Stand am 1. Januar 2014).
[56] Canton de Vaud (2012): Rapport «circonstancié» en complément à la réponse du Conseil d'Etat aux trois objets parlementaires (postulat Olivier Epars et consorts contre l'assèchement estival des cours d'eau; postulat Marc-André Bory et consorts pour un plan pour la gestion de l'eau durant les périodes de sécheresse; interpellation Epars sur la sauvegarde de nos rivières) (http://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/eau/fichiers_pdf/Rapport_Epars-Bory_long_comp.pdf, abgerufen 31.03.2014).
[57] Marbot, B. et al. (2013): AgriMontana: Wiesenbewässerung im Berggebiet. Agroscope (http://www.suissemelio.ch/files/aktuell/2013/Wiesenbewaesserung2013.pdf, abgerufen am 30.03.2014).
[58] Göpfert, R. (2007): Ermittlung der Bewässerungsbedürftigkeit landwirtschaftlicher Nutzflächen im Kanton Graubünden (https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/dvs/alg/dokumentation/meliorationen/Dokumentliste%20Meliorationen/Bericht_Bewaesserung.pdf, abgerufen am 30.03.2014).
[59] Rodewald, R. (2013): Thesen für ein nachhaltiges Steuerungsmodell für Suonen, in: Schweizer, R. (2013): Des systèmes d'irrigation alpins entre gouvernance communautaire et étatique. Rüegger Verlag Zürich, 387–409.
[60] Fuhrer, J. et al. (2013): Water demand in Swiss Agriculture – Sustainable Adaptive Options for Land and Water Management to Mitigate Impacts of Climate Change. ART Schriftenreihe 19, 2013, 56 Seiten.
[61] Prasuhn, V. et al. (2014): Grundwasserqualität und Bewässerung. Aqua & Gas No. 4, 54–58.
[62] Tendall, D. M. et al. (2014): Impacts of River-Water Consumption on Aquatic Biodiversity in Life Cycle Assessment – a proposed method, and a case study for Europe. Environ Sci Technol No. 48(6), 3236–3244 (http://dx.doi.org/10.1021/es4048686).
[63] Schweizer Hagel (2014): APV+ (http://hagel.ch/fileadmin/customer/Schweizer_Hagel/Produkte/APV%2B/APVplus.pdf, abgerufen 12.05.2014).
[64] Kanton Aargau, Departement für Bau, Verkehr und Umwelt (2010): Auswirkungen des Klimawandels auf die Aufgabenbereiche des Departements Bau, Verkehr und Umwelt. Statusbericht (https://www.ag.ch/media/kanton_aargau/bvu/dokumente_2/umwelt__natur___landschaft/naturschutz_1/nachhaltigkeit_1/statusbericht_klimawandel_bvu_maerz_2010_normale_aufloesung.pdf, abgerufen am 19.12.2013).
[65] Amt für Umwelt des Kantons Solothurn (2012): Bericht zum Trockenjahr 2011 (http://www.so.ch/fileadmin/internet/bjd/bumaa/pdf/wasser/fb-12-05.pdf, abgerufen am 29.04.2014).
[66] Wassergesetz Kanton Zürich, Entwurf vom 18.12.2012, § 65 Abs. 1.
[67] SVGW (2011): Factsheet Trinkwasserstatistik Schweiz 2010.
[68] Sinreich, M. et al. (2012): Grundwasserressourcen in der Schweiz: Abschätzung von Kennwerten. Aqua & Gas No. 9, 16–28.
[69] Amt für Umwelt des Kantons Solothurn (2010): Hydrogeologie Wasseramt – Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung des Grundwassers.

[70] Möck, C. et al. (2014): Hydrogeological modeling of climate change impacts on a small-scale aquifer, in preparation.
[71] Käser, D. et al. (2014): Contribution of alluvial groundwater to the outflow of mountainous catchments, in preparation.
[72] Kanton Zürich (2014): Kantonaler Richtplan, Kapitel 5, Versorgung/Entsorgung, Zürich (Stand 18.03.2014) (http://www.are.zh.ch/internet/baudirektion/are/de/raumplanung/kantonaler_richtplan/richtplan/_jcr_content/contentPar/downloadlist_5/downloaditems/43_1397641412817.spooler.download.1397640129849.pdf/KRP_Kap5.pdf, abgerufen 02.05.2014), dazu auch Karte unter http://www.are.zh.ch/internet/baudirektion/are/de/raumplanung/kantonaler_richtplan/richtplan.html, abgerufen 02.05.2014).
[73] BVU (2007): Leitbild Wasserversorgungen Aargau. Bericht des Departements Bau Verkehr Umwelt des Kantons Aargau (https://www.ag.ch/media/kanton_aargau/bvu/dokumente_2/umwelt__natur___landschaft/ressourcennutzung_1/trinkwasser_1/afu_leitbild_wasserversorgungen_ag.pdf, abgerufen 17.02.2014).
[74] Schürch, M. et al. (2008): Schadenspotenzial und Verletzlichkeit von Grundwasser – Fallbeispiele bei Hochwasser und Starkniederschlägen. gwa No. 6, 459–469.
[75] Kanton St. Gallen (2012): Grundwasserstrategie Kap. 2.3.1.b.
[76] Kanton Bern (2010): Wasserversorgungsstrategie 2010, 9 (http://www.bve.be.ch/bve/de/index/direktion/ueber-die-direktion/dossiers/wasserstrategie.assetref/content/dam/documents/BVE/AWA/de/Wasserstrategie/Wasserversorgungsstrategie_d.pdf, abgerufen 10.05.2014).
[77] Kanton Bern (2010): Wassernutzungsstrategie, 16, (http://www.bve.be.ch/bve/de/index/wasser/wasser/wasserkraft/Wassernutzungsstrategie.assetref/content/dam/documents/BVE/AWA/de/Wasserstrategie/Wassernutzungsstrategie_d_0611.pdf, abgerufen 02.05.2014).
[78] BAFU (2009): Wärmenutzung aus Boden und Untergrund. Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute im Bereich Erdwärmenutzung. Bern (http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01042/index.html?lang=de&download=NHzLpZig7t,lnp6I0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCGdoF,fmym162dpYbUzd,Gpd6emK2Oz9aGodetmqaN19XI2ldvoaCVZ,s-.pdf, abgerufen 15.05.2014).
[79] Kanton Zürich (2010): Energienutzung aus Untergrund und Grundwasser. Planungshilfe der Baudirektion des Kantons Zürich.
[80] Kanton Bern (2010): Wassernutzungsstrategie, 11, (http://www.bve.be.ch/bve/de/index/wasser/wasser/wasserkraft/Wassernutzungsstrategie.assetref/content/dam/documents/BVE/AWA/de/Wasserstrategie/Wassernutzungsstrategie_d_0611.pdf, abgerufen 02.05.2014).
[81] Kanton Bern (2010): Wassernutzungsstrategie, 17, (http://www.bve.be.ch/bve/de/index/wasser/wasser/wasserkraft/Wassernutzungsstrategie.assetref/content/dam/documents/BVE/AWA/de/Wasserstrategie/Wassernutzungsstrategie_d_0611.pdf, abgerufen 02.05.2014).
[82] Freiburghaus, M. (2009): Wasserbedarf der Schweizer Wirtschaft. gwa No. 12, 1001–1009.
[83] Gander-Kunz, Y. (2013): Regionalisierung Kennzahlen Wassernutzung, Beilage 6. Bericht im Auftrag des BAFU.
[84] Statistisches Amt des Kantons Basel-Landschaft (2013): Wassergewinnung im Kanton Basel-Landschaft 1995–2012 (http://www.statistik.bl.ch/stabl_data/stabl_generator/titel.php?thema_id=3&unterthema_id=7&titel_id=52&modular=0) sowie Wasserverbrauch nach Verbraucherkategorie im Kanton Basel-Landschaft 1995–2012 (http://www.statistik.bl.ch/stabl_data/stabl_generator/titel.php?thema_id=3&unterthema_id=7&titel_id=53&modular=0, beide abgerufen 12.05.2014).
[85] Mountains.ch: Naturspeichersee Corviglia, Projektbeschreibung (http://www.mountains.ch/projekte/speichersee-corviglia/, abgerufen 31.03.2014.
[86] Genossenschaft Schnee-Horn, Schwende AI (http://www.schnee-horn.ch/index.php/de/, abgerufen 31.03.2014).
[87] Hahn F. (2004): Künstliche Beschneiung im Alpenraum: Ein Hintergrundbericht. alpMedia / Dezember 2004. Schaan, Liechtenstein: CIPRA International (International Commission for the Protection of the Alps). (http://www.cipra.org/de/alpmedia/publikationen/2709, abgerufen 31.03.2014).
[88] Reynard, E. et al. (2010): Water Use in Dry Mountains in Switzerland. The Case of Crans-Montana-Sierre Area. In: Neményi, M., und Heil, B.: The Impact of Urbanization, Industrial, Agricultural and Forest Technologies on the Natural Environment. Budapest, 2012.
[89] Rixen, C. et al. (2011): Winter Tourism and Climate Change in the Alps: An Assessment of Resource Consumption, Snow Reliability, and Future Snowmaking Potential. Mountain Research and Development, 31(3), 229–236.
[90] BFS (2004): Arealstatistik NOAS04.
[91] Gemeinde Hausen am Albis, ZH (2011): Teiländerung Zonenplan Golfpark Zugersee. Planungsbericht nach Art. 47 RPV. (http://cms3-hausen.backslash.ch/documents/Be110816_Planungsbericht_BZO_nach_RPV_47Hausen_Version11.pdf, abgerufen am 18.03.2014).

[92] Epting, J. et al. (2012): Thermal management of an urban GWB. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 1851–1869, 2013.
[93] Fundel, F. et al. (2013): Monthly hydrometeorological ensemble prediction of streamflow droughts and corresponding drought indices. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 395–407 (http://dx.doi.org/10.5194/hess-17-395-2013).
[94] Zappa, M. (2012): Vorhersage und Szenarien von Schnee- und Wasserressourcen im Alpenraum. Forum für Wissen, 19–27. ISSN 1021–2256
[95] Kruse, S. et al. (2010): Informationsbedarf zur Früherkennung von Trockenheit in der Schweiz – Die Sicht potenziell betroffener Nutzergruppen. Wasser Energie Luft No. 102, Heft 4, 305–308.
[96] Pfister, C. et al. (2000): Dürresommer im Schweizer Mittelland seit 1525. In: Schorer, M. (2000): Trockenheit in der Schweiz, Workshopbericht, OcCC, Bern.
[97] Bundesamt für Bevölkerungsschutz (2013): Gefährdungsdossier Trockenheit. Bern.
[98] Staufer, P. et al. (2012): Diffuse Einträge aus Siedlungen. In: Aqua & Gas No. 11, 42–50.
[99] Staufer, P. et al. (2012): Mikroverunreinigungen aus diffusen Quellen: Faktenblatt «Diffuse Mikroverunreinigungs-Emissionen aus Siedlungen (DIMES)». Studie im Auftrag des Bundesamts für Umwelt. Eawag, Dübendorf (http://www.eawag.ch/forschung/sww/schwerpunkte/urbane_einzugsgebiete/dimes/DIMES_Faktenblatt.pdf, abgerufen 15.05.2014).
[100] SVGW (2012): Jahrbuch 2012 – Gas und Wasser. Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Zürich.
[101] BAFU (2013): Abwasserentsorgung 2025. Bericht des Bundesamts für Umwelt, Bern (http://www.eawag.ch/forschung/sww/schwerpunkte/infrastrukturen/uebersichtsstudie_2025/schriftenreihe_21.pdf, abgerufen 02.05.2014).
[102] Staufer, P. et al. (2012): Diffuse Einträge aus Siedlungen. Aqua & Gas No. 11, 2–10.
[103] Gugerli, D. (2000): Wir wollen nicht im Trüben fischen. Gewässerschutz als Konvergenz von Bundespolitik, Expertenwissen und Sportfischerei (1950–1972). Schweizer Ingenieur und Architekt, Jg. 118, No.13, 9–15 (http://www.tg.ethz.ch/dokumente/pdf_files/Klaeranlagen_SIA.pdf, abgerufen 31.03.2014).
[104] Maurer, M. et al. (2006): Zustand, Kosten und Investitionsbedarf der schweizerischen Abwasserentsorgung. Schlussbericht. Dübendorf.
[105] Beer, M. (2011): «… Nichts ist ohne Gift.» Aqua & Gas No. 3, 11.
[106] Strahm, I. (2012): Organische Spurenstoffe in ARA. Eliminierungsmassnahmen in Kläranlagen – Abschätzung von Nutzen und Kosten. Aqua & Gas No. 11, 80–86.
[107] Götz, C.W. et al. (2010): Mikroverunreinigungen. Beurteilung weitergehender Abwasserreinigungsverfahren anhand Indikatorsubstanzen. GWA 90, 4, 325–333.
[108] Freiburghaus, M. (2012) Statistische Übersicht über die Wasserversorgung in der Schweiz 2010. Aqua & Gas No. 3, 54–59.
[109] Ochsenbein, U. et al (2012): Mikroverunreinigungen in Aaretalgewässern – ein Risiko? Aqua & Gas No. 11, 68–79.
[110] Auckenthaler, A. et al. (2012): Spurenstoffe in Fliessgewässern. Auswirkungen aufs Grundwasser – Fallbeispiele aus dem Kanton Basel-Landschaft. Aqua & Gas No. 11, 60–66.
[111] Diem, S. et al. (2013): NOM degradation during river infiltration: effects of the climate variables temperature and discharge. Water Res. Nov 1, No. 47(17), 6585–6595 (http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.08.028).
[112] Diem, S. et al. (2013): Qualität des Uferfiltrats. Einfluss der klimabestimmten Variablen Temperatur und Abfluss. Aqua & Gas, No. 11, 14–21.
[113] Projekt Fischnetz (2004): Dem Fischrückgang auf der Spur. Schlussbericht. Eawag, Dübendorf (http://www.fischnetz.ch/content_d/publ/Publications/Kurz_Schlussbericht/schlussbericht_deutsch.pdf, abgerufen 13.05.2014).
[114] Anhang 3.2 Ziffer 1, Abs. 2 GSchV.
[115] VOKOS (2010): Sachplan Siedlungsentwässerung 2010 der Kantone Bern und Solothurn(http://www.bve.be.ch/bve/de/index/direktion/ueber-die-direkti-on/dossiers/wasserstrategie.assetref/content/dam/documents/BVE/AWA/de/Wasserstrategie/Sachplan%20Siedlungsentwässerung%20VOKOS_d.pdf).
[116] Ruff, M. (2013): 20 Jahre Rheinüberwachung. Aqua & Gas No. 5, 16–25.
[117] Amt für Umwelt und Energie des Kantons St. Gallen. (2013): Spurenstoffe im Abwasser – Suche nach relevanten Emissionsquellen, Ergebnisse der Messkampagne 2012 (http://www.umwelt.sg.ch/home/Themen/wasser/Mikroverunreinigungen/_jcr_content/Par/downloadlist/DownloadListPar/download_6.ocFile/AFU%20St.Gallen%20-%20Spurenstoffe%20im%20Abwasser%20-%2020130704.pdf, aufgerufen 09.08.2013).
[118] Götz, C. W. (2014): Suche nach gewerblichen und industriellen Emissionsquellen im Kanton St. Gallen. Aqua & Gas No. 3, 44–51.
[119] Chèvre, N. et al. (2013): Suivi de la pollution du Léman. Aqua & Gas No. 5, 26–34.
[120] BAFU (2014): Ausbreitung von Schadorganismen, Krankheiten und gebietsfremden Arten (http://www.bafu.admin.ch/klimaanpassung/11529/11550/11619/index.html?lang=de, abgerufen 16.05.2014).
[121] WWF et al. (2013): Umweltorganisationen fordern nationalen Plan zur Pestizidreduktion (http://www.wwf.ch/de/aktuell/medien/medienmitteilungen/?1757/Umweltorganisationen-fordern-nationalen-Plan-zur-Pestizidreduktion, abgerufen 05.02.2014).

[122] Schweizer Parlament (2012): Postulat Moser 12.3299 – Aktionsplan zur Risikominimierung und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln (http://www.parlament.ch/d/suche/seiten/geschaefte.aspx?gesch_id=20123299, abgerufen 31.03.2014).
[123] BAFU-Webseite zu Pflanzenschutzmitteln im Grundwasser (http://www.bafu.admin.ch/grundwasser/07500/07563/07579/index.html?lang=de, abgerufen am 05.05.2014).
[124] Fuhrer, J. et al. (2013): Water demand in Swiss Agriculture – Sustainable Adaptive Options for Land and Water Management to Mitigate Impacts of Climate Change. ART Schriftenreihe 19, 2013, 56 Seiten.
[125] BAFU-Webseite zu Nitrat im Grundwasser (http://www.bafu.admin.ch/grundwasser/07500/07563/07577/index.html?lang=de, abgerufen am 05.05.2014).
[126] Scholten, L. et al. (2014): Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis. Water Res., 2014, 49, 1, 124 –143.
[127] Lovas, R. (2012): Zustand des Sempachersees 2011. Umwelt und Energie (uwe) Kanton Luzern (http://www.sempachersee.ch/pdf/Seezustand%202011.pdf, abgerufen 13.05.2014).
[128] Moschet, C. et al. (2014): How A Complete Pesticide Screening Changes the Assessment of Surface Water Quality. Environmental Science & Technology 48, 10, 5423–5432 (http://dx.doi.org/10.1021/es500371t).
[129] Wittmer, I. et al. (2014): Schweizer Fliessgewässer mit vielen Pestiziden belastet. Aqua & Gas No. 3, 32–43.
[130] Dubaish, F. et al. (2013): Suspended Microplastics and Black Carbon Particles in the Jade System, Southern North Sea. Water Air and Soil Pollution No. 8, 224(2) (http://dx.doi.org/10.1007/s11270-012-1352-9).
[131] Bundesamt für Gesundheit BAG (2012): Umgang mit nicht geregelten Fremdstoffen im Trinkwasser. Bern.
[132] Brüschweiler, B. (2010): Fas TTC-Konzept. Beurteilungsmethode von Kontaminanten unbekannter Toxizität im Trinkwasser, gwa No. 4, 295–303 (www.eawag.ch/forschung/cc/ccdw/kompendium/.../TTC_Konzept.pdf, abgerufen 16.05.2014).
[133] Stein, H. et al. (2012): Stygoregions – a promising approach to a bioregional classification of groundwater systems. Nature Scientific Reports (http://dx.doi.org/10.1038/srep00673).
[134] Wüest, A. (2012): Potential zur Wärmeenergienutzung aus dem Zürichsee. Machbarkeit. Wärmeentzug (Heizen) und Einleitung von Kühlwasser. Studie im Auftrag des AWEL Kanton Zürich.
[135] Kanton Bern (2010): Wassernutzungsstrategie, 10.
[136] BUWAL, BWG und MeteoSchweiz (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369 (http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/554.pdf, abgerufen 16.05.2014).
[137] Schmid, F. (2013): Konzept Energieversorgung der Stadt Zürich mit Fokus auf die Energienutzung aus Gewässern und aus dem Erdreich. Vortrag Cercl'eau Tagung 2013 in La Neuveville (http://www.cercleau.ch/files/9113/7276/5734/Vortrag_Felix_Schmid_Cercle_deau_2013_06_13_2.pdf, abgerufen 25.03.2014).
[138] Buchs, U.: Revitalisierung von Fliessgewässern – eine Chance für Wasserversorgungen. Aqua & Gas No. 3, 30–34.
[139] SVGW-Mitteilungen (2013): Umfrage zu Revitalisierungsmassnahmen (http://www.svgw.ch/index.php?id=267&tx_ttnews[tt_news]=380&cHash=01ac32233a26a74bfa7355c6369931bf, abgerufen 11.05.2014).
[140] AquaPlus (2011): Strassenabwasser in der Schweiz. Literaturstudie im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (www.aquaplus.ch/download/aquaplus_strassenabwasser.pdf, abgerufen 28.02.2014).
[141] Staufer, P. et al. (2012). Mikroverunreinigungen aus diffusen Quellen: Faktenblatt «Diffuse Mikroverunreinigungs-Emissionen aus Siedlungen (DIMES)», Studie im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, Eawag, Dübendorf (www.eawag.ch/forschung/sww/schwerpunkte/.../DIMES_Faktenblatt.pdf, abgerufen 28.02.2014).
[142] AWEL (2009): Belastung des Zürichsees durch die Strassenentwässerung. Zürich (http://www.awel.zh.ch/dam/baudirektion/awel/wasserwirtschaft/abwasserentsorgung/saba/Zsee_Bericht_Strassenabwasser.pdf.spooler.download.1306131725955.pdf/Zsee_Bericht_Strassenabwasser.pdf, abgerufen 16.05.2014).
[143] Eawag-Infoblatt (2013): Schiefergas – Wissenswertes zum Hydraulic Fracturing (Fracking). Dübendorf (http://www.eawag.ch/medien/publ/fb/doc/fb_fracking_d.pdf, abgerufen 10.6.2014).
[144] Vengosh, A. et al. (2013): Impacts of Shale Gas Wastewater Disposal on Water Quality in Western Pennsylvania. Environ. Sci. Technol., 2013, 47 (20), 11849–11857 (http://dx.doi.org/10.1021/es402165b).
[145] Junghans, M. (2012): Qualitätskriterien für Pflanzenschutzmittel. Aqua & Gas No. 11, 2012, 16–22.
[146] BAFU (2012a): Einzugsgebietsgliederung Schweiz EZGG-CH©2012, Bern.
[147] Swisstopo (2008): swisstopo (Art. 30 GeolV): 5704 000 000 / Vector25©2008 (reproduziert mit Bewilligung von swisstopo / JA100119).
[148] Fust, A. et al. (2013): Neubau Kraftwerk Rheinfelden. Wasser Energie Luft No. 1, 1.
[149] Fust, A. et al. (2013): Neubau Kraftwerk Rheinfelden. Wasser Energie Luft No. 1, 2.
[150] Eawag (2011): Eawag Faktenblatt Wasserkraft und Ökologie (http://www.eawag.ch/medien/publ/fb/doc/fs_wasserkraft_oekologie_dt.pdf, abgerufen 16.05.2014).

[151] Bös, T. et al. (2012): Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken. Eawag, Kastanienbaum. 177 Seiten.
[152] Bundesgesetz über die Fischerei (BGF) (www.admin.ch/ch/d/sr/9/923.0.de.pdf).
[153] BFE (2013): Botschaft zum ersten Massnahmenpaket des Bundesrates. Bern, 4. September 2013.
[154] BFE (2013): Perspektiven für die Grosswasserkraft in der Schweiz. Bern 12.12.2013 (http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/33285.pdf, abgerufen 16.05.2014).
[155] Vischer, D. L. (2003): Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz – von den Anfängen bis ins 19. Jahrhundert. Berichte des BWG, No. 5, Bern.
[156] Heimann, F. et al. (2014): Recalculation of bedload transport observations in Swiss mountain rivers using the model sedFlow. Earth Surface Dynamics (in preparation).
[157] Junker, J. et al. (2014): Assessing the impact of climate change on brown trout (Salmo trutta fario) recruitment, (submitted).
[158] BAFU (2012): Revitalisierung Fliessgewässer – Strategische Planung, Bern, 9.
[159] BAFU (2009): Strukturen der Fliessgewässer in der Schweiz (http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01075/index.html?lang=de&download=NHzLpZig7t,lnp6I0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCGdoJ3gmym162dpYbUzd,Gpd6emK2Oz9aGodetmqaN19XI2IdvoaCVZ,s-.pdf, abgerufen 16.05.2014).
[160] FOEN (2010): Core indicator: Structure of watercourses. Bundesamt für Umwelt, Bern (http://www.bafu.admin.ch/umwelt/indikatoren/08605/12323/index.html?lang=en, abgerufen 16.05.2014).
[161] Kanton Zürich (2013): Vernehmlassungsbericht WsG, 28.
[162] Weibel, D. et al. (2012): Effectiveness of different types of block ramps for fish upstream movement, Aquatic Sciences (http://www.fishecology.ch/publikationen/pub_12/Weibel_et_Peter_AquaticSci_2012.pdf, abgerufen 16.05.2014).
[163] Kanton Zürich (2013): Vernehmlassungsbericht WsG, 30.
[164] Kantone Appenzell Innerrhoden, Appenzell Ausserrhoden, St. Gallen, Thurgau und Zürich, Bundesamt für Umwelt (2007): Die Thur: Geschiebehaushalt Thur und Einzugsgebiet – Bericht zu Zielen und Massnahmen.
[165] Ewald, K. C. (2010): Die ausgewechselte Landschaft. ISBN: 978-3-258-07622-5, Haupt-Verlag Bern.
[166] BLW (2008): Umfrage zum Stand der Drainagen in der Schweiz, Bern.
[167] Béguin, J. (2010): Landwirtschaftliche Drainagen der Schweiz: quo vadis? Präsentation Suissemelio-Konferenz Olten.
[168] Zeh, W. et al. (2009): Strukturen der Fliessgewässer in der Schweiz. Zustand von Sohle, Ufer und Umland (Ökomorphologie); Ergebnisse der ökomorphologischen Kartierung. Stand: April 2009. Umwelt-Zustand Nr. 0926. Bundesamt für Umwelt, Bern. 100 Seiten.
[169] Grünig, A. (2007): Moore und Sümpfe im Wandel der Zeit. Forum Biodiversität Schweiz Hotspot No. 15, 4/5. (http: //www.biodiversity.ch/downloads/HOTSPOT_15_2007dtWEB.pdf, abgerufen 31.3.2014).
[170] Cordillot, F. et al. (2011): Gefährdete Arten in der Schweiz. Synthese Rote Listen, Stand 2010. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand No. 1120, 11 Seiten.
[171] Robinson, C.T. et al. (2014): Spatial relationships between land-use, habitat, water quality and lotic macroinvertebrates in two Swiss catchments. Aquatic Sciences 76 (http://dx.doi.org/10.1007/s00027-014-0341-z).
[172] Schuwirth, N. et al. (2013): Bridging the gap between theoretical ecology and real ecosystems: modeling invertebrate community composition in streams. Ecology, 94, 368–379.
[173] Schuwirth, N. et al. (in prep.): How to predict macroinvertebrate communities in streams: Application of the model Streambugs to the Glatt catchment on the Swiss Plateau.
[174] Bunzel, K. M. et al. (2013): Effects of organic pollutants from wastewater treatment plants on aquatic invertebrate communities. Water Research 47, 597–606.
[175] Mühlethaler, B. (2011): Renaissance der kleinen Bäche. In: Umwelt No. 3, 32–35, Hrsg. BAFU, Bern.
[176] Denzler, L. et al. (2012): Die Interessen kumulieren am Seeufer. In: TEC 138, No. 37, 20–26.
[177] Gemeindeverband Sempachersee (o. J.): Phosphorprojekt am Sempachersee (http://www.sempachersee.ch/phosphorprojekt.html, abgerufen 16.05.2014).
[178] BAFU (2012): Ergiebigkeit der Schweizer Grundwasservorkommen. GIS-Daten bezogen bei M. Sinreich, BAFU. Siehe Sinreich, M. et al. (2012): Grundwasserressourcen der Schweiz – Abschätzung von Kennwerten. Aqua & Gas 9, 16–28.
[179] Lanz, K. et al. (2014): Flächenkonkurrenz zwischen Siedlungswachstum und Trinkwassergewinnung. Eawag-Auswertung einer Umfrage des SVGW bei den Wasserversorgern (http://library.eawag.ch/eawag-publications/openaccess/Eawag_08122.pdf).
[180] Habersack, B. et al. (2010): Neue Ansätze im integrierten Hochwassermanagement: Floodplain Evaluation Matrix FEM, flussmorphologischer Raumbedarf FMRB und räumlich differenziertes Vegetationsmanagement. In: Österreichische Abfall- und Wasserwirtschaft, Jg. 62, 15–21 (http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00506-009-0153-x.pdf, abgerufen am 04.05.2014).
[181] Peter, A. et al. (2004): Die Rhone als Lebensraum für Fische. Wasser Energie Luft No. 11/12, 326–330.
[182] http://www.aarewasser.ch/31223/Gesamtkonzept/Vision/content.asp

[183] BAFU (2012): Revitalisierung Fliessgewässer. Strategische Planung (http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01642/index.html?lang=de&download=NHzLpZig7t,lnp6I0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCGfHt4gmym162dpYbUzd,Gpd6emK2Oz9aGodetmqaN19XI2IdvoaCVZ,s-.pdf, abgerufen 16.05.2014).
[184] Terrier, S. et al. (2011): Optimized and adapted hydropower management considering glacier shrinkage scenarios in the Swiss Alps. Proceedings of the International Symposium on Dams and Reservoirs under Changing Challenges – 79th Annual Meeting of ICOLD, Swiss Committee on Dams, Lucerne, Switzerland (Schleiss, A. and Boes, R. M., Eds), Taylor & Francis Group, London, 497–508.
[185] Gaudard, L. et al. (2013): Climate change impacts on hydropower management. Water Resources Management 27: 5143–5156.
[186] BFE (2013): Bewertung von Pumpspeicherkraftwerken in der Schweiz im Rahmen der Energiestrategie 2050. Bern 12.12.2013 (http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/33124.pdf, abgerufen am 13.12.2013).
[187] Notter, B. et al. (2009): Lebensraum der Bachforellen um 2050. gwa, 39–44.
[188] Fuhrer, J. et al. (2014): Bewässerungsbedarf und Wasserdargebot unter Klimawandel: eine regionale Defizitanalyse. AgrarForschung, im Druck.
[189] Zobrist, J. et al. (2011): 77 Jahre Untersuchungen an der Glatt. gwa No. 9, 315–327.
[190] Schuwirth, N. et al. (2012): Methodological aspects of multi-criteria decision analysis for policy support: A case study on pharmaceutical removal from hospital wastewater. European Journal of Operational Research No. 220, 472–483.

Dank

Dieser Bericht wurde durch zahlreiche Personen tatkräftig unterstützt. Das Konzept des Berichts wurde massgeblich durch die weiteren Personen des Projektteams, Jürg Fuhrer, Adrienne Grêt-Régamey, Wilfried Haeberli und Rolf Weingartner, mitgeprägt. Sie haben durch kritisches Lesen und eigenes Schreiben den Text teilweise mitgestaltet. Der Austausch mit den anderen Thematischen Synthesen (Astrid Björnsen-Gurung [WSL], Sabine Hofmann [Eawag] und Franziska Schmid [Uni Bern]) war über die ganze Zeit sehr fruchtbar. Inhaltlich konnten wir auch von wertvollen Diskussionen mit Hugo Aschwanden (BAFU), Marco Baumann (Kt. Thurgau), Christian Leu (BAFU), Benjamin Meylan (BAFU) und Bruno Schädler (Uni Bern) profitieren. Der SVGW (Markus Biner, Urs Kamm, Anton Kilchmann) hat verdankenswerterweise die Umfrage bei den Wasserversorgungsbetrieben zum Thema Flächenkonflikte ermöglicht.

Verschiedene weitere Personen haben den umfangreichen Bericht gegengelesen und kritisch kommentiert. Dafür möchten wir uns insbesondere bei Martin Bieri (Pöyry Switzerland), Andri Bryner (Eawag), Karin Ingold (Uni Bern, Eawag), Roger Pfammatter (SWV), Christine Weber (Eawag), Bernhard Wehrli (Eawag), Martin Würsten (VSA, Kt. Solothurn) und Luca Vetterli (Pro Natura) bedanken. Janet Hering (Eawag) hat nicht nur den Bericht sorgfältig gelesen und kommentiert, sondern auch dazu beigetragen, dass der gesamte Ablauf der Berichterstellung erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Dietrich Borchardt, Bernd Hansjürgens, Christian Leibundgut und Bruno Merz haben als Mitglieder der NFP 61-Leitungsgruppe das gesamte Projekt begleitet und wertvollen Input geliefert. Barbara Flückiger (SNF) ist uns ebenfalls über die gesamte Projektdauer mit Rat und Tat zur Seite gestanden. Zahlreiche weitere Kolleginnen und Kollegen innerhalb und ausserhalb der Eawag haben die Arbeit am Bericht durch Anstösse und Diskussionen bereichert.

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, 37

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.30

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.13

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.

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. 26

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 zu den hydrologischen Ökosystemleistungen wurden Massnahmen für die Politik formuliert. ▸ S. 19

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.

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.38, 48, 67

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. 17

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. 14

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. 35

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 Speicherfähigkeit des Bodens und dem Abflussverhalten untersucht.

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. 45

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 stammt 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.

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. 23

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, 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.

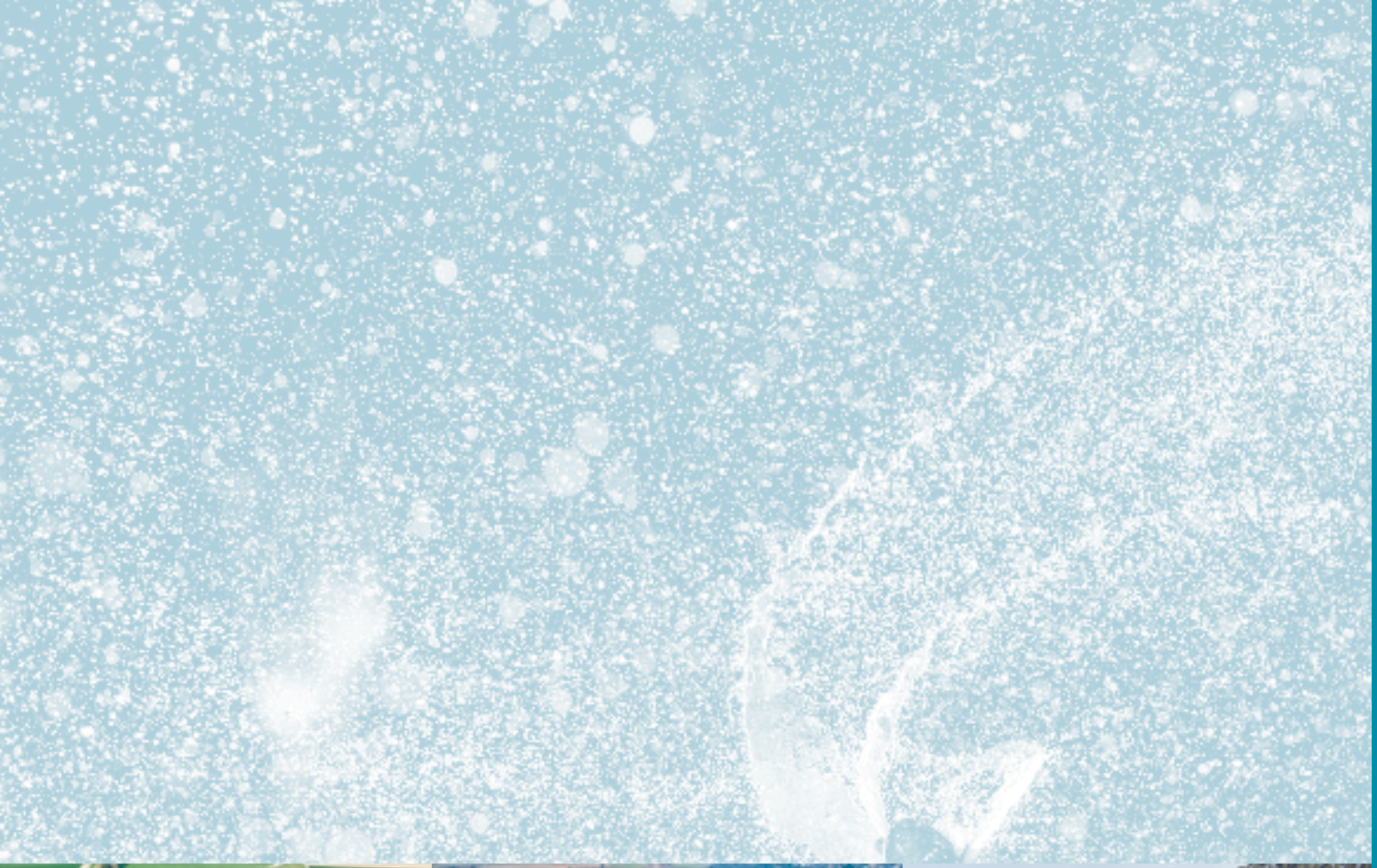
Ausstellungsmodul
Kurze Videoausschnitte zeigen wichtige Erkenntnisse aus dem NFP 61. Mithilfe eines Ausstellungsmoduls in Messen, Museen und Amtsgebäuden können die wichtigsten Botschaften interaktiv vermittelt werden (Anmeldung beim SNF: nfp@snf.ch).

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 der Eawag/td-net untersuchte die Methoden der Wissensintegration in den vier Thematischen Synthesen.

Weitere Informationen: www.nfp61.ch



Der Umgang mit den Gewässern der Schweiz ist geprägt von über Jahrzehnte austarierten Nutzungen und Vereinbarungen. Grosse Anstrengungen wurden seit den 1960er und 1970er-Jahren unternommen, erhebliche Finanzmittel aufgewendet, um die damals bedenklich abnehmende Qualität der Gewässer wieder zu verbessern. Ambitionierte Gesetzesnormen und kompetente Verwaltungen auf Bundes- und Kantonsebene haben dazu beigetragen, dass die Erholung der Gewässer in vielen Bereichen auf einem guten Weg ist.

Doch die Welt steht nicht still: Die im Rahmen dieses Berichts durchgeführten Analysen zeigen, dass aufgrund von sich rapide wandelnden Rahmenbedingungen die Wasserwirtschaft mit grossen neuen Herausforderungen konfrontiert ist. Zunächst ist dabei an den Klimawandel zu denken, doch zeigte sich im Rahmen der NFP 61-Forschung, dass sozioökonomische Faktoren vielerorts eine weitaus grössere Wirkung entfalten werden.

Trotz grosser Errungenschaften in den vergangenen Jahrzehnten ist die Verwirklichung einer nachhaltigen Wassernutzung weiterhin «work in progress». Dies wird angesichts stetig neuer Rahmenbedingungen auch in Zukunft so bleiben. Die Aufgabe besteht darin, veränderte Bedingungen frühzeitig zu erkennen, Nutzungen gerecht und effizient anzupassen und bei alledem die ökologische Integrität der Gewässer weiter zu verbessern.

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 978-3-9524412-3-7

Thematische Synthese 2

Bewirtschaftung der Wasserressourcen unter steigendem Nutzungsdruck

NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung»