NFP 61 – Thematische Synthese 3
im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61
«Nachhaltige Wassernutzung»

Nachhaltige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in der Schweiz

Herausforderungen und Handlungsoptionen

Sabine Hoffmann, Daniel Hunkeler, Max Maurer

Nachhaltige Wassernutzung
Nationales Forschungsprogramm NFP 61

FNSNF
Schweizerischer Nationalfonds
zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung

NFP 61 – Thematische Synthese 3
im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61
«Nachhaltige Wassernutzung»

Nachhaltige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in der Schweiz
Herausforderungen und Handlungsoptionen

Sabine Hoffmann, Daniel Hunkeler, Max Maurer

Impressum

Autorenteam:
Dr. Sabine Hoffmann, Eawag, Dübendorf
Prof. Dr. Daniel Hunkeler, CHYN, Universität Neuenburg
Prof. Dr. Max Maurer, Eawag, Dübendorf

Empfohlene Zitierweise: Sabine Hoffmann; Daniel Hunkeler; Max Maurer (2014): Nachhaltige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in der Schweiz: Herausforderungen und Handlungsoptionen. Thematische Synthese 3 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

FNSNF
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: Daniel Hunkeler, Max Maurer (2×), SWIP, Max Maurer, GW-TREND. 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 Abgrenzung
10 Zielsetzung
10 Abgrenzung
10 Vorgehen und Aufbau

12 2 System Siedlungswasserwirtschaft (SWW)
12 System SWW
12 Wasserversorgung in der Schweiz
14 Abwasserentsorgung in der Schweiz
15 Wasserressourcen

20 3 Ziele einer nachhaltigen SWW
21 Hohe Generationengerechtigkeit
21 Guter Gewässerschutz
22 Gute Wasserversorgung
22 Sichere Abwasserentsorgung
23 Hohe soziale Akzeptanz
23 Geringe Kosten
23 Effiziente Ressourcennutzung

24 4 Herausforderungen einer nachhaltigen SWW
24 Klimawandel
39 Alternde Infrastrukturen
40 Bevölkerungs-, Wirtschafts- und Siedlungsentwicklung
42 Institutionelle Rahmenbedingungen
42 Andere Herausforderungen

44 5 Handlungsoptionen einer nachhaltigen SWW
45 Handlungsoptionen Infrastrukturen
49 Handlungsoptionen Wasserressourcen
51 Handlungsoptionen Wissen

53 6 Abschätzung der Konsequenzen

57 Endnoten
58 Abbildungsverzeichnis
58 Tabellenverzeichnis
58 Literatur
65 Teams
65 Dank

66 Anhang I
66 Vorgehen
67 Abschätzung der Konsequenzen (Auswertung)

80 Anhang II
80 Was ist das NFP 61?
80 Die 16 Forschungsprojekte des NFP 61
82 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

Zielsetzung und Abgrenzung Diese Thematische Synthese 3 (TS 3) ist Teil des Nationalen Forschungsprogramms (NFP 61) «Nachhaltige Wassernutzung» des Schweizerischen Nationalfonds. Sie untersucht die aktuellen und künftigen Herausforderungen einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft (SWW) in der Schweiz. Dabei fokussiert sie auf die Analyse der kausalen Zusammenhänge (DPSIR-Ansatz), die Formulierung von Nachhaltigkeitszielen, die Erarbeitung von Handlungsoptionen sowie die Abschätzung von deren Auswirkungen. Die Siedlungswasserwirtschaft wird dabei als System betrachtet und im Kontext von Grund- und Oberflächenwasserressourcen analysiert. Erstere dienen als Quellen für Trinkwasser, letztere als Senken für Abwasser. Eine quantitative Übersicht über die Wasserressourcen der Schweiz ist in der Thematischen Synthese 1 (TS 1) zusammengestellt, Nutzungskonflikte werden in der Thematischen Synthese 2 (TS 2) diskutiert und Gouvernanzfragen in der Thematischen Synthese 4 (TS 4) behandelt.

System der Siedlungswasserwirtschaft Die technischen Anlagen der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung stellen mit ca. 230 Mrd. CHF Wiederbeschaffungswert und mit ca. 5 Mrd. CHF Jahreskosten eine der bedeutendsten Infrastrukturen der Schweiz dar. Verglichen mit diesen Zahlen sind die durchschnittlichen Nutzungskosten für 1000 Liter Wasser von CHF 3.70 günstig.
Neben den technischen Anlagen sind auch die Gewässer ein zentrales Element der Schweizer Siedlungswasserwirtschaft. Etwa 36% des Trinkwassers stammen aus Lockergesteinsgrundwasserleiter, die häufig mit Fliessgewässern im Austausch stehen und via Pumpbrunnen genutzt werden, 48% aus Quellen in Kluft- und Karstgrundwasserleiter und 16% aus Seen.

Nachhaltigkeitsziele Sieben Fundamentalziele mit insgesamt 44 Unterzielen charakterisieren den Begriff «Nachhaltigkeit». Viele der Unterziele finden sich in der schweizerischen Gesetzgebung wieder und wurden im NFP 61-Forschungsprojekt SWIP für die langfristige Planung der Wasserinfrastruktur entwickelt. Neben Kosten-, Qualitäts- und Schutzzielen sind auch explizit Ziele einer nachhaltigen Entwicklung wie Generationengerechtigkeit, soziale Akzeptanz und Ressourceneffizienz berücksichtigt. Diese Ziele dienen der Einschätzung der Handlungsoptionen bezüglich deren Nachhaltigkeit.

Herausforderungen Der Einfluss des Klimawandels auf Gewässer, insbesondere Grundwasser, sowie Wasserversorgung und Abwasserentsorgung war eine zentrale Fragestellung vieler NFP 61-Forschungsprojekte. Die Resultate sind sehr aufschlussreich. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich sozioökonomische Veränderungen wie Siedlungs- oder Bevölkerungsentwicklung oder alternde Infrastrukturen sehr viel stärker auf das System Siedlungswasserwirtschaft auswirken als der Klimawandel. Ein unmittelbarer klimabedingter Handlungsbedarf konnte damit nicht abgeleitet werden.
Trockenperioden werden mit dem Klimawandel zunehmen. Diese haben nur einen geringen Einfluss auf die mittlere direkte Grundwasserneubildung. Jedoch ändert sich mit zunehmenden Trockenperioden die saisonale Verteilung der Grundwasserneubildung (NFP 61 GW-TREND). Wie einzelne Grundwasserleiter und Quellen auf zunehmende Trockenperioden reagieren, ist lokal stark unterschiedlich und sollte im Rahmen einer Wasserressourcenbewirtschaftungsplanung standortspezifisch untersucht werden (siehe auch Handlungsoptionen Infrastrukturen-1 und Wasserressourcen-2).
Zunehmende Trockenperioden wirken sich ebenfalls auf die Wasserführung von Fliessgewässern aus. Insbesondere in dicht besiedelten Gebieten ist damit zu rechnen, dass die Zielvorgaben für Gewässer in Zukunft nicht mehr eingehalten und damit Massnahmen im Bereich der Abwasserentsorgung ausgelöst werden können (siehe auch Handlungsoption Infrastrukturen-6).
Wassertemperaturen werden mit dem Klimawandel steigen. In von Flüssen gespeisten Aquiferen wird je nach Emissionsszenario eine erhöhte Grundwassertemperatur um 1 °C bis 2,5 °C bis 2099 prognostiziert (NFP 61 GW-TEMP). Höhere Grundwassertemperaturen bei gleichzeitig höheren Konzentrationen partikulären organischen Materials führen zu einer Abnahme der Sauerstoffkonzentration in Uferfiltrationszonen (NFP 61 RIBACLIM). Die Sauerstoffkonzentration im Grundwasser wird ebenfalls von lokalen Faktoren wie Hochwasserereignissen oder Pumpmengen beeinflusst (NFP 61 GW-TEMP).
In Oberflächengewässern wirken sich steigende Temperaturen insbesondere auf Extremwerte aus. So wurde für den Rhein ein Anstieg der Jahresmittelwerte um 1,9 °C für den Zeitraum 2070–2100 prognostiziert, für das 95. Perzentil der Höchsttemperaturen sogar ein Anstieg um 2,8 °C. Die entsprechenden Prognosen für die Broye, einen Zufluss des Rheins mit saisonalem Abflussregime, betragen 1,9 °C bzw. 2,7 °C (NFP 61 AGWAM, IWAQA).
In Seen bewirken höhere Temperaturen eine verstärkte Stratifikation und eine entsprechend geringere Durchmischung und niedrigere Sauerstoffkonzentration. Letzteres begünstigt das massenhafte Auftreten von Blaualgen (Cyanobakterien).

Starkniederschläge werden mit dem Klimawandel tendenziell zunehmen. Diese haben einen direkten Einfluss auf die Anzahl von Mischwasserentlastungen und damit auf den Eintrag von Schadstoffen in die Gewässer (NFP 61 IWAQA).
Dagegen wird die hydraulische Leistungsfähigkeit der Entwässerungssysteme nicht primär durch den Klimawandel, sondern vielmehr durch die Klimavariabilität bestimmt (NFP 61 SWIP). In Karstgebieten können Starkniederschläge zu einer plötzlichen Vergrösserung oder Verkleinerung des Quelleinzugsgebiets und damit zu einer Zu- oder Abnahme von Quellschüttungen führen (NFP 61 SWISSKARST).
Alternde Infrastrukturen führen zu einer höheren Ausfallwahrscheinlichkeit und zu einer stärkeren Umweltbeeinträchtigung. Um die Sanierung alternder Infrastrukturen langfristig planen zu können, wurden entsprechende Zerfallsmodelle entwickelt, welche den Zustand der Netze für die spezifischen Schweizer Bedingungen wiedergeben können (NFP 61 SWIP).
Die **Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung** zeigte in den meisten NFP 61-Forschungsprojekten einen dominanten Einfluss auf das System Siedlungswasserwirtschaft. Ein zentraler Punkt ist dabei weniger die Versiegelung, welche den Grundwasserhaushalt nur unwesentlich beeinflusst, sondern vielmehr a) die stoffliche Belastung der Oberflächengewässer durch die Einleitung von gereinigtem und ungereinigtem Abwasser sowie b) der erhöhte Siedlungsdruck in Grundwasserschutzzonen (siehe auch Thematische Synthese 2 des NFP 61).

Handlungsoptionen und deren Wirkung

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurden Handlungsoptionen identifiziert. Diese sind in Tabelle 4 auf S. 44 zusammengefasst und lassen sich in die drei Bereiche «Infrastrukturen», «Wasserressourcen» und «Wissen» unterteilen. Die Handlungsoptionen sind dabei nicht als Handlungsempfehlungen zu verstehen, sondern zeigen vielmehr die Spannbreite von Stossrichtungen auf, um den Herausforderungen einer nachhaltigen Wasserversorgung und Abwasserentsorgung begegnen zu können.

Viele der Handlungsoptionen, wie z.B. eine verbesserte, robuste Redundanz der Wasserversorgung («zweites Standbein»), lehnen sich an bestehende Forderungen an. Sie wurden in einem Workshop mit Expertinnen und Experten des NFP 61 diskutiert und vor dem Hintergrund ihrer Forschungsergebnisse und ihres Expertenwissens ergänzt. So sollte bei der Erschliessung neuer Wasserbezugsorte nicht nur auf die Vulnerabilität der Wasserressourcen bezüglich Verunreinigungen, sondern auch auf deren Resilienz gegenüber zukünftigen Trockenperioden geachtet werden. Die im Rahmen des NFP 61-Forschungsprojekts SWISSKARST erarbeiteten Konzepte bilden hier eine wertvolle Grundlage.
Die Handlungsoptionen wurden abschliessend von den NFP 61-Expertinnen und -Experten auf die Erreichung der Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft qualitativ bewertet. Die Ergebnisse der Bewertungen sind in Tabelle 5 auf S. 54 zusammengefasst. Die Ergebnisse legen nahe, dass die fünf Fundamentalziele «Hohe Generationengerechtigkeit», «Guter Gewässerschutz», «Gute Wasserversorgung», «Sichere Abwasserentsorgung» sowie «Effiziente Ressourcennutzung» durch viele der Handlungsoptionen gut, die Fundamentalziele «Hohe soziale Akzeptanz» und «Geringe Kosten» dagegen nicht immer erreicht werden. Eine Ausnahme bildet hier der Bereich «Wissen» mit einer Reihe von robusten «no-regret»-Handlungsoptionen.
Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die sieben Fundamentalziele unterschiedliche, zum Teil gegensätzliche Ansprüche an eine nachhaltige Siedlungswasserwirtschaft widerspiegeln. Diese können zu Interessenkonflikten, z.B. zwischen Schutz und Nutzung oder zwischen guter Wasserversorgung und sicherer Abwasserentsorgung und anderen Nutzungen, führen, die sich nicht auf einfache Art lösen, jedoch durch geeignete Verfahren mindern lassen. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Verständigung auf übergeordnete Ziele unter Einbezug aller betroffenen Sektoren und Akteure (auf lokaler, kantonaler und nationaler Ebene) ein erster, entscheidender Schritt in Richtung nachhaltiger Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in der Schweiz ist. Die Thematische Synthese 3 bildet hier eine wertvolle Grundlage, um diesen partizipativen Verständigungsprozess transparent zu strukturieren.

▶ Alternde Infrastrukturen und sozioökonomische Veränderungen wie Siedlungs- oder Bevölkerungsentwicklung wirken sich sehr viel stärker auf das System Siedlungswasserwirtschaft aus als der Klimawandel.

Links und Mitte: SWIP; rechts: Max Maurer

Summary

Aims and delimitation

The thematic synthesis 3 is part of the National Research Programme "Sustainable Water Management" (NRP 61) of the Swiss National Science Foundation. It analyses the current and future challenges to sustainable urban water management in Switzerland. In so doing, it focuses on causal links (DPSIR framework), the definition of sustainability targets, potential courses of action as well as the evaluation of their effectiveness.

Urban water management is seen as a system and analysed in the context of groundwater and surface water resources. The former function as drinking water sources, the latter as sinks for wastewater. A quantitative overview of water resources is presented in thematic synthesis 1, user conflicts are discussed in thematic synthesis 2 and questions of governance are dealt with in thematic synthesis 4.

Urban water management as a system

With a replacement value of around CHF 230 billion and annual costs of around CHF 5 billion, the technical installations of water supply and wastewater disposal represent one of the most significant infrastructures in Switzerland. Compared to these figures, the average price of 1,000 litres of water at CHF 3.70 is cheap.

Alongside the technical installations, natural water bodies are also a key element of Swiss urban water management. About 36% of drinking water is drawn via pumping wells from unconsolidated aquifers which often interact with rivers, 48% is drawn from karstified and fissured aquifers and 16% from lakes.

Sustainability targets

Seven key targets and 44 subordinate targets characterise "sustainability". Many of the subordinate targets are reflected in Swiss laws and were defined in the context of the NRP 61 project SWIP, with a view to the long-term planning of water infrastructures. Alongside the cost, quality and protection targets, there are also explicit targets to do with sustainable development, such as justice between various generations, social acceptance and resource efficiency. The purpose of these targets is to assess possible courses of action in terms of their sustainability.

Challenges

The impact of climate change on water bodies, in particular groundwater, water supply and wastewater disposal was an important question in many projects of NRP 61. The results are quite revealing. In brief, they show that socio-economic changes such as settlement and population development as well as aging infrastructures have a greater impact on the urban water economy than climate change. No immediate need for action related to climate change was identified.

Water scarcity during dry summers is likely to occur more frequently as a result of climate change but this will have limited influence on the annual average replenishment of groundwater. The more frequent drought periods imply, however, that the seasonal distribution of groundwater replenishment is changing (NRP 61 GW-TREND). Local conditions influence how aquifers and springs react to droughts; as a basis for local water resource planning, the effects should be analysed case by case (see courses of action "Promotion of water management planning" and "Promotion of second foothold").

The increased frequency of droughts will also affect the discharge levels of rivers. Particularly in densely populated areas, water quality targets will probably not be met; this could trigger measures in the wastewater sector (see courses of action "Promotion of modernised or consolidated wastewater treatment plants").

Water temperatures will rise due to climate change. Aquifers that are fed by rivers will see water temperatures rising between 1.0°C and 2.5°C until 2099 (NRP 61 GW-TEMP). Higher groundwater temperatures in combination with greater concentration of organic particles are likely to lead to lower oxygen concentration in riverside infiltration zones. This can slow down the depletion of pollutants and favour the dissolution of iron and manganese (NRP 61 RIBACLIM). The oxygen concentration in groundwater is also dependent on local factors such as floods and pumping activities (NRP 61 GW-TEMP).

In surface water, the rising temperatures are particularly pronounced in the extreme values. While the average annual temperatures of the Rhine are predicted to rise by 1.9°C between 2070-2100, the rise on the 95th percentile reaches 2.8°C. The corresponding predictions for the Broye, a tributary of the Rhine with a seasonal discharge regime, are 1.9°C and 2.7°C (NRP 61 AGWAM, IWAQA).

In lakes, the higher temperatures will lead to greater stratification, i.e. water levels will mix less and oxygen concentration will drop. The latter will favour invasive growth of blue-green algae (cyanobacteria).

Heavy precipitation events are likely to occur more frequently due to climate change. This will directly impact the number of combined wastewater overflows and the introduction of pollutants into water bodies (NRP 61 IWAQA). However, the hydraulic performance of drainage systems will not be primarily affected by climate change but by climate variability (NRP 61 SWIP). In karst areas, heavy precipitation can cause the catchment area to expand or shrink suddenly, which, in turn, can lead to rapid changes in spring discharge (NRP 61 SWISSKARST).

Aging infrastructures have a higher default probability which leads to greater environmental risk. To plan the long-term replacement of aging infrastructures, researchers have developed decay models which allow them to assess the state of infrastructures in specific Swiss conditions (NRP 61 SWIP).
Most research projects of NRP 61 identify the **population and settlement development** as the key factor influencing the urban water economy. Urbanisation leads to the pollution of surface water due to the introduction of purified and non-purified wastewater and pressure on groundwater protection zones; this is more significant than the effect of urbanisation on groundwater balances (see also thematic synthesis 2 of NRP 61).

Courses of action and their impact

To meet these challenges, various courses of action were identified. These are summarised in table 4 on page 44 and can be divided into three areas: infrastructures, water resources, knowledge. The courses of action are not recommendations, instead they illustrate the wide range of approaches developed to meet the challenges of sustainable water supply and wastewater treatment.
Some courses of action such as the improved and more robust water supply (alternative water source) are linked to existing concepts. They were discussed in the context of a workshop with experts of NRP 61 and complemented with research results and expert knowledge. For example, when developing new water sources, both the risk of pollution and the resilience to droughts need to be considered. Concepts elaborated within the scope of the NRP 61 project SWISSKARST are an invaluable basis for making such decisions.
In conclusion, the courses of action were rated by experts of NRP 61 with regard to their qualitative contribution to the target of sustainable water management. The results are summarised in table 5 on page 54. They show that many of the options contribute significantly to the key targets "intergenerational equity", "good water supply", "good water protection", "safe wastewater disposal" and "efficient resource use". But not all options contribute to the remaining key targets "high social acceptance" and "low costs". An exception is the area "knowledge" in which there are a number of robust "no-regret" courses of action.

The seven key targets reflect different and, in parts, contradictory demands on sustainable water management. The demands can lead to conflicts of interests, e.g. protection vs. use or safe wastewater treatment vs. other uses. These conflicts cannot be avoided but it is possible to diminish them with suitable processes. The results suggest that all sectors and actors involved (local, cantonal and federal) have to agree on overarching targets in the first place if we are to make a first and decisive step towards sustainable water supply and wastewater treatment in Switzerland. The thematic synthesis 3 provides an important basis for structuring this participatory communication process transparently.

▶ Bei einer Abnahme der Wasserführung infolge zunehmender Trockenperioden ist davon auszugehen, dass insbesondere in kleineren Gewässern die numerischen Anforderungen der GSchV unterhalb von Abwassereinleitstellen häufiger überschritten werden.

Links und Mitte: DROUGHT-CH; rechts: Foto Adriano Joss

1 Zielsetzung und Abgrenzung

Zielsetzung

Die Thematische Synthese 3 «Nachhaltige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in der Schweiz – Herausforderungen und Handlungsoptionen» (TS 3) ist Teil des Nationalen Forschungsprogramms (NFP 61) «Nachhaltige Wassernutzung» des Schweizerischen Nationalfonds. Die TS 3 untersucht die aktuellen und künftigen Herausforderungen einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft (SWW) in der Schweiz. Dabei fokussiert sie auf

- die Analyse der kausalen Zusammenhänge dieser Herausforderungen,
- die Formulierung von Zielen einer nachhaltigen SWW,
- die Erarbeitung von Handlungsoptionen sowie
- die Abschätzung der Auswirkungen dieser Handlungsoptionen.

Die Siedlungswasserwirtschaft wird dabei im Kontext von Grund- und Oberflächenwasserressourcen betrachtet, die als Quellen für Trinkwasser und Senken für Abwasser dienen. Die TS 3 generiert damit drei wechselseitig voneinander abhängige Wissensarten: Systemwissen, Zielwissen und Handlungswissen (siehe Abb. 1) [1].

Um diese Fragen zu beantworten, integriert die Thematische Synthese die wissenschaftlichen Ergebnisse von mindestens sieben NFP 61-Einzelprojekten (siehe dazu Abb. 2 und Anhang II) mit inhaltlichem Fokus: Grundwasser (GW-TREND, GW-TEMP, SWISSKARST, RIBACLIM), Wasserinfrastrukturen (SWIP), Oberflächengewässer (IWAQA) und Bewässerung (AGWAM). Wissen aus anderen nicht NFP 61-Quellen wird punktuell einbezogen, um ein Gesamtbild zu erhalten.

Abgrenzung

Es ist nicht das Ziel der TS 3, eine explizite Bewertung möglicher Handlungsoptionen vorzunehmen, sondern vielmehr deren Auswirkungen bez. der Erreichung der Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft qualitativ abzuschätzen. Wie diese Ziele zu gewichten sind, d.h., welche Wichtigkeit den einzelnen Zielen beigemessen wird, wird der Leserschaft überlassen. Es werden damit keine konkreten Handlungsempfehlungen abgeleitet, sondern vielmehr Entscheidungsgrundlagen für eine nachhaltige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in der Schweiz erarbeitet.

Vorgehen und Aufbau

Abb. 2 illustriert schematisch das Vorgehen und den Aufbau der Thematischen Synthese 3. Eine detaillierte Darstellung des Vorgehens findet sich im Anhang I. Der Syntheseberichtist inhaltlich wie folgt strukturiert: Kapitel 2 führt in das System Siedlungswasserwirtschaft ein, grenzt das System ab und beschreibt den Ist-Zustand der Wasserressourcen und -infrastrukturen in der Schweiz. Kapitel 3 definiert Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft. Kapitel 4 identifiziert aktuelle und künftige Herausforderungen einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft und analysiert mithilfe des DPSIR-Ansatzes (Abkürzung für Drivers, Pressures, State, Impact, Responses) deren zugrundeliegende kausale Zusammenhänge. Kapitel 5 identifiziert Handlungsoptionen und Kapitel 6 schätzt die Auswirkungen der verschiedenen Handlungsoptionen bez. der Erreichung der Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft ab.

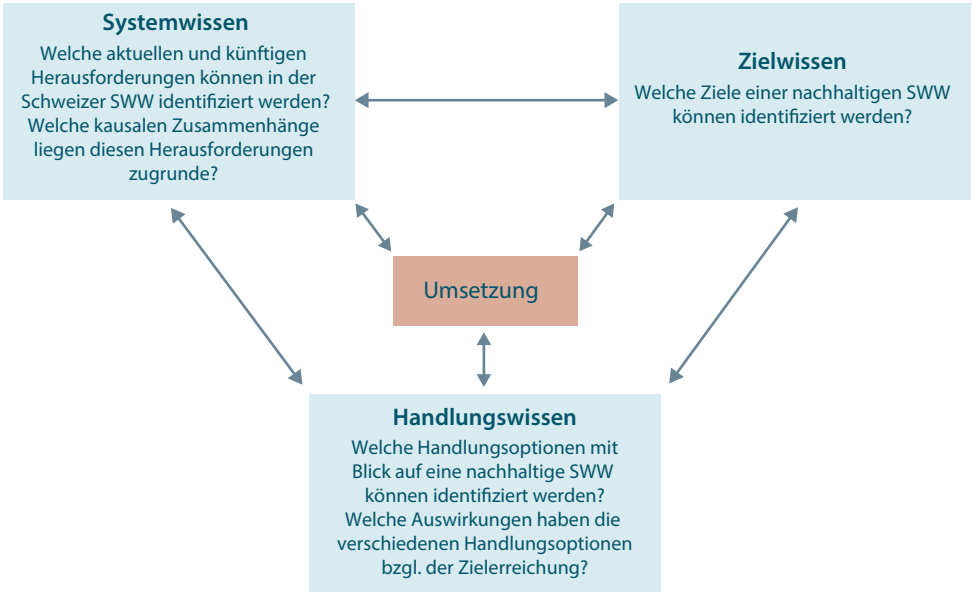


Abb. 1: Ziel-, System- und Handlungswissen im Rahmen der TS 3.

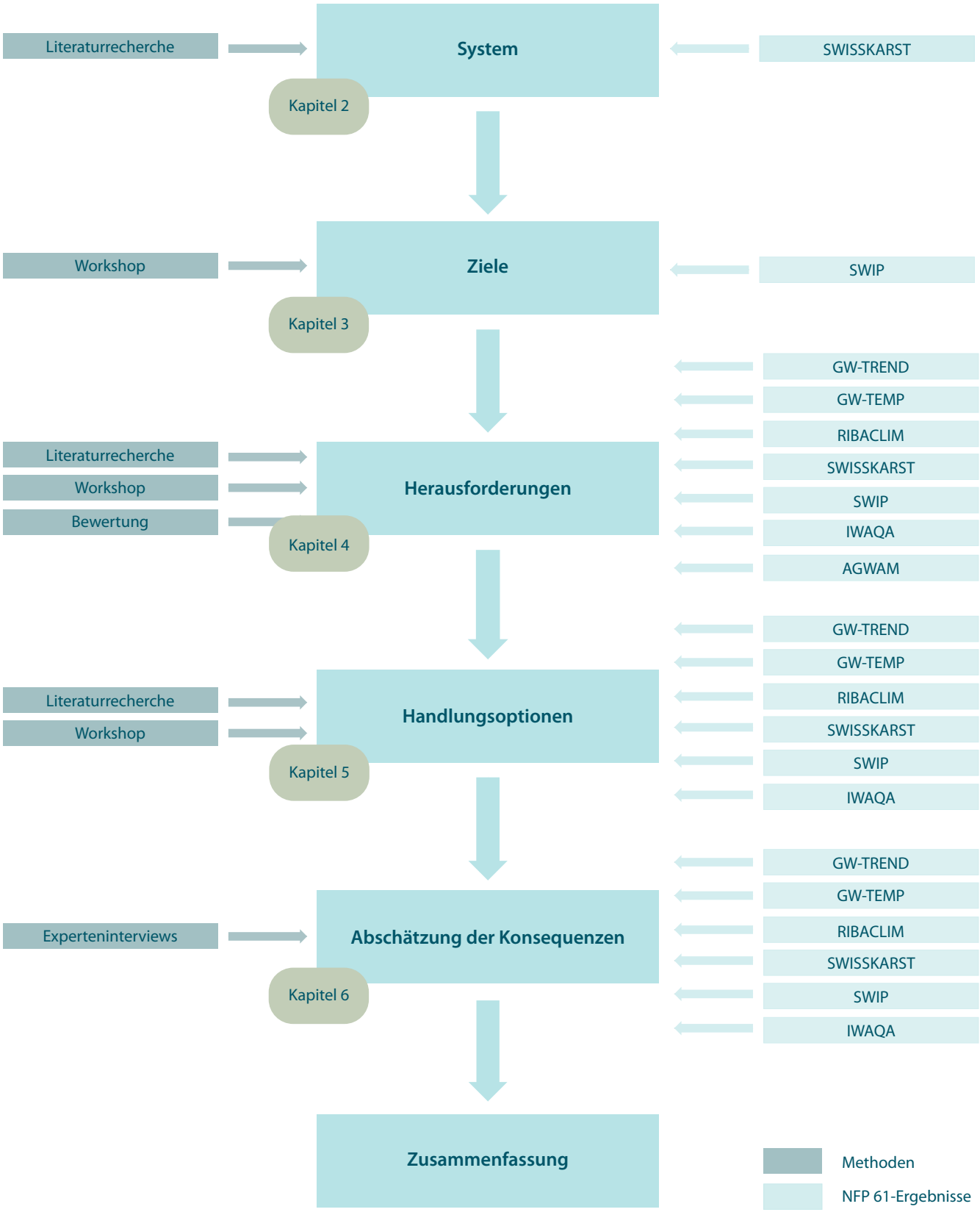


Abb. 2: Schematische Darstellung des Vorgehens und des Aufbaus der Thematischen Synthese 3 «Nachhaltige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in der Schweiz – Herausforderungen und Handlungsoptionen» (siehe auch Anhang I).

2 System Siedlungswasserwirtschaft (SWW)

Das folgende Kapitel führt in das System Siedlungswasserwirtschaft im Kontext von Grund- und Oberflächenwasserressourcen ein, grenzt das System ab und beschreibt den Ist-Zustand der Wasserressourcen und -infrastrukturen in der Schweiz.

System SWW

Siedlungswasserwirtschaft wird in der TS 3 als System verstanden und im Kontext von Grund- und Oberflächenwasserressourcen analysiert. Erstere dienen als Quellen für Trinkwasser, letztere als Senken für Abwasser. Entsprechend werden nicht nur Herausforderungen und Handlungsoptionen im Bereich Wasserinfrastrukturen, sondern auch im Bereich Wasserressourcen diskutiert. Mögliche direkte und indirekte Auswirkungen stehen dabei im Vordergrund. Solche Auswirkungen wurden in mehreren NFP 61-Forschungsprojekten untersucht. Andere Einflussfaktoren wie z.B. Landwirtschaft oder Hochwasserschutz, die ebenfalls einen Einfluss auf Grund- und Oberflächenwasserressourcen haben, werden in der Thematischen Synthese 2 des NFP 61 diskutiert.

Wasserversorgung in der Schweiz

Kennzahlen

In der Schweiz stellen rund 3000 öffentliche Wasserversorgungen 954 Mio. m^3 Trinkwasser pro Jahr zur Verfügung [2].[1] Dies entspricht knapp 2% der jährlichen Niederschlagsmenge [3] (siehe auch Kasten 1). Rund 84% des Trinkwassers stammen dabei aus Grundwasser und der Rest aus Seewasser. Um die in der Lebensmittelgesetzgebung festgelegten Anforderungen an die Trinkwasserqualität sicherzustellen, wird Seewasser immer mehrstufig aufbereitet [4]. 41% des Grundwassers werden hingegen direkt, d.h. ohne jede Aufbereitung, 32% nach einfacher Aufbereitung und 27% nach zwei- oder mehrstufiger Aufbereitung in das rund 59 000 km lange öffentliche Leitungsnetz eingespeist [4]. Laut SVGW waren im Jahr 2011 7,92 Mio. Einwohnerinnen und Einwohner an eine Versorgung angeschlossen [2]. Dies entspricht einem Anschlussgrad von 99,3% [2].

Viele Gewerbe- und Industriebetriebe verfügen über eigene Fassungen zur Gewinnung von Grund- und Oberflächenwasser. Eine umfassende Darstellung des gesamten Wasserverbrauchs in der Schweiz, inkl. Eigenförderung durch Gewerbe und Industrie, findet sich in der Thematischen Synthese 1 des NFP 61 wieder.

Jährliche Kosten und Wiederbeschaffungswert

Die Betriebs- und Kapitalkosten der Wasserversorgungen belaufen sich auf rund 1,5 Mrd. CHF pro Jahr [2] (siehe auch Tabelle 1). Dies entspricht mittleren Betriebs- und Kapitalkosten von CHF 1,59 pro Kubikmeter gewonnenen Trinkwassers. Der Wiederbeschaffungswert der öffentlichen Infrastruktur der Schweizer Wasserversorgungen liegt bei 50 bis 55 Mrd. CHF (siehe auch Tabelle 1). Wird der Wiederbeschaffungswert der privaten Infrastrukturen (Sanitärinstallationen, gebäudeinterne Leitungen, Hausanschlüsse) von 60,6 Mrd. CHF mitberücksichtigt [5], so liegt der Wert der gesamten Schweizer Wasserversorgungsinfrastruktur bei 115 Mrd. CHF oder rund 15 300 CHF pro Einwohnerin und Einwohner.

Laut SVGW [2] werden jährlich knapp 800 Mio. CHF oder umgerechnet 1,5–1,6% des gesamten Wiederbeschaffungswerts in die öffentlichen Wasserversorgungen investiert (609 Mio. CHF in Leitungen, 188 Mio. CHF in Anlagen). Die geschätzten Investitionen belaufen sich damit auf 99 CHF pro Kopf und Jahr.

Wasserabgabe und Wasserpreis

Seit rund 30 Jahren ist der spezifische Wasserverbrauch in der Schweiz rückläufig. Im Jahr 1981 lag der mittlere Wasserverbrauch noch bei über 500 Liter pro Kopf und Tag, während er im Jahr 2011 bei rund 325 Liter pro Kopf und Tag lag [2]: 58% entfallen dabei auf Haushalte und 21% auf Gewerbe und Industrie. Bei den übrigen 21% handelt es sich um «Wasserverluste» (14%), den Gebrauch für öffentliche Zwecke und Brunnen (5%) sowie den Eigenverbrauch von Wasserversorgungen (2%) [2]. Mit einem mittleren Wasserverbrauch von 189 Liter pro Kopf und Tag weisen die Haushalte damit den grössten Wasserverbrauch auf [2]. Der durchschnittliche Wasserpreis (aus Grundgebühr und Mengenpreis) für 1000 Liter liegt dabei bei CHF 1,90 im Einfamilienhaus und CHF 1,60 im Mehrfamilienhaus [3].

Alter, Zustand und Sanierungsbedarf

Gemäss [6] liegen nur punktuell Informationen über Alter, Zustand und Sanierungsbedarf der Wasserversorgungsinfrastruktur vor – ein Rückschluss auf die gesamte Schweiz ist daher nicht möglich. Die vom SVGW geschätzten jährlichen Investitionen in die Wasserversorgungsinfrastruktur in Höhe von 800 Mio. CHF legen allerdings den Schluss nahe, dass zumindest die grösseren Wasserversorgungen, die von der SVGW-Statistik erfasst werden, kontinuierlich in ihre Infrastrukturen investieren [2]. Inwieweit dies auch für kleinere Wasserversorgungen gilt (ca. 90%), ist weitgehend unbekannt [6]. Fachleute gehen davon aus, dass diese in naher Zukunft einen stark erhöhten Investitionsbedarf verzeichnen werden [6].

KASTEN 1 | Der durch die öffentliche Wasserversorgung gedeckte Wasserbedarf in der Schweiz

Während im Landes- und Jahresdurchschnitt der Wasserbedarf nur knapp 2% der jährlichen Niederschlagsmenge entspricht, variiert der Bedarf räumlich stark. Dies kann veranschaulicht werden, indem der Wasserbedarf als Wassersäule in mm/Jahr auf die Fläche umgerechnet wird (siehe auch Abb. 3). Die berechneten Werte können mit dem lokalen Wasserdargebot in Bezug gebracht werden. So entspricht beispielsweise die direkte Grundwasserneubildung durch Versickerung von Niederschlag im Mittelland typischerweise 300–400 mm/Jahr. Nimmt man an, dass die Hälfte davon in nutzbare Grundwasservorkommen versickert und davon 20% genutzt werden können, entspricht dies einem Dargebot durch lokale direkte Grundwasserneubildung von 30 bis 40 mm/Jahr. In vielen Regionen des Mittellandes ist der Wasserbedarf höher. Entsprechend sind diese Regionen auf den Import von Wasser via Fliessgewässer aus dem alpinen und voralpinen Raum angewiesen, das häufig via Uferfiltration genutzt wird.

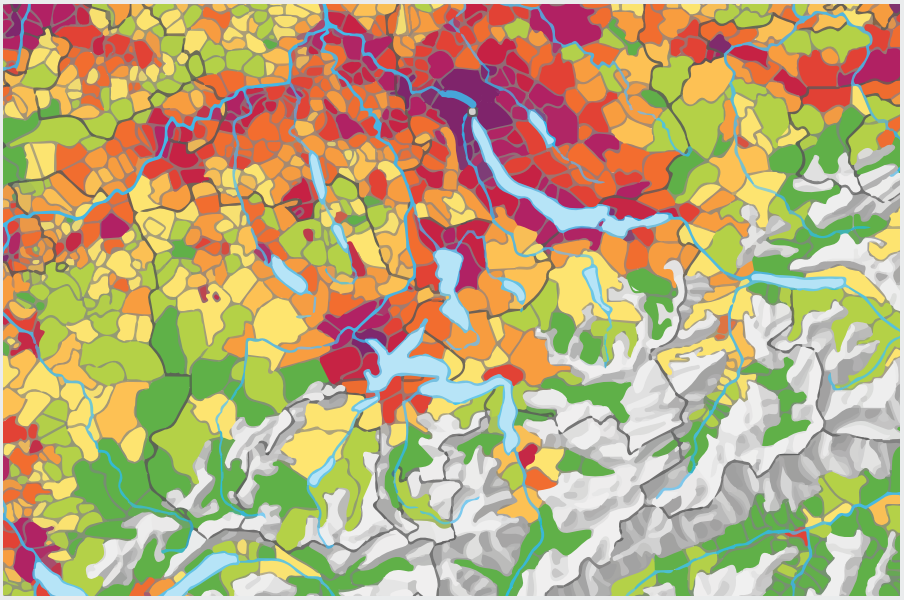


Abb. 3: Wasserbedarf in mm/Jahr, der durch die öffentliche Wasserversorgung gedeckt wird, berechnet auf Grundlage von Bevölkerungsdichte und mittlerem Pro-Kopf-Verbrauch (Ausschnitt aus der Schweiz).

Tab. 1: Übersicht über Wiederbeschaffungswert, Jahreskosten und Investitionen der Schweizer Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsinfrastruktur.

		Wiederbeschaffungswert (Mrd. CHF)	Jahreskosten (Mrd. CHF/a)	Investitionen (Mio. CHF/a)
Wasserversorgung				
Öffentliche Anlagen		15–20	1,5	188
Öffentliche Leitungen	59 000 km	35		609
Private Infrastrukturen		60,6	1,2	?
Total		**110–115,6**	**2,7**	**797**
Abwasserentsorgung				
Zentrale ARA	839	13,6	1	254
Öffentliche Kanalisation	49 110 km	66,4	1,2	535
Liegenschaftsentwässerung	42 000 km	34–40	1–1,2	?
Total		114–120	3,2 –3,4	789
Wasserinfrastrukturen total		224–236	5,9–6,1	

▶ Das Leitungsnetz der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in der Schweiz umfasst rund 59 000 km öffentliche Wasserleitungen und rund 49 000 km öffentliche Abwasserleitungen. Jedes Jahr werden rund 1350 km öffentliche Wasser- und Abwasserleitungen ersetzt.

Links: SWIP; Mitte und rechts: Fotos Max Maurer

«Die Leitungen haben eine lange Lebensdauer. Das bedeutet, dass eine Generation sie baut und die nächste sie nutzt. Eine weitere Generation wechselt sie aus, repariert und saniert sie. Wir sind in dieser Generation.»

Max Maurer
Co-Projektleiter SWIP
Eawag

Mehr dazu im SWIP unter www.nfp61.ch

Abwasserentsorgung in der Schweiz

Kennzahlen

Die Ableitung des Abwassers erfolgt über rund 49 000 km öffentliche Kanalisation [7]. Diese besteht zu 70% aus Mischkanalisation, die Regenwasser zusammen mit dem stetig fliessenden Schmutzwasser als Mischwasser den Abwasserreinigungsanlagen (ARA) zuführt, und zu 30% aus Trennkanalisation. Letztere leitet Schmutz- und Regenwasser in getrennten Kanälen ab. Schmutzwasser wird den zentralen ARA zugeführt, während Regenwasser meist direkt in Gewässer eingeleitet wird. Eine Besonderheit stellen Mischwasserentlastungen dar, welche bei starken Regenfällen Mischwasser direkt in die Gewässer ableiten [11].

Rund 839 zentrale ARA mit mehr als 100 Einwohnerwerten[2] reinigen ca. 1400 Mio. m^3 Abwasser pro Jahr [7]. Laut VSA/KI [7] waren im Jahr 2010 insgesamt 7,5 Mio. Einwohnerinnen und Einwohner an eine zentrale ARA angeschlossen [7]. Dies entspricht einem Anschlussgrad von 96,7% [7]. Der Abwasseranfall liegt im Durchschnitt bei 511 Litern Abwasser pro Kopf und Tag. Der grösste Anteil wird in wenigen grossen ARA behandelt: So reinigen 74 ARA (9%) mit mehr als 50 000 Einwohnerwerten rund 47% des täglichen Abwasseranfalls, während 555 ARA (66%) mit weniger als 10 000 Einwohnerwerten nur rund 16% des Abwasseranfalls behandeln [7].

Neben den zentralen ARA und der öffentlichen Kanalisation ergänzen mehr als 3000 Kleinkläranlagen mit weniger als 100 Einwohnerwerten [8], etwa 42 000 km Liegenschaftsentwässerungen und rund 1 700 000 Hausanschlüsse das Netzwerk der Schweizer Abwasserentsorgung [9].

Jährliche Kosten und Wiederbeschaffungswert

Laut Hochrechnungen des VSA [7] liegt der Wiederbeschaffungswert der öffentlichen Abwasserinfrastruktur bei rund 80 Mrd. CHF (siehe auch Tabelle 1). Wie bei der Wasserversorgung liegt das Hauptkapital der Schweizer Abwasserentsorgung in Form von Kanalisation im Untergrund. Wird der Wiederbeschaffungswert der rund 42 000 km Liegenschaftsentwässerungen und der rund 1 700 000 Hausanschlüsse von insgesamt 34 bis 40 Mio. CHF mitberücksichtigt [9], [5], so liegt der Wert der gesamten Schweizer Abwasserinfrastruktur bei rund 120 Mrd. CHF oder 16 000 CHF pro Einwohnerin und Einwohner.

Die jährlichen Betriebs- und Kapitalkosten der Abwasserentsorgung betragen insgesamt 2,2 Mrd. CHF (siehe auch Tabelle 1). Pro Jahr werden 790 Mio. CHF in die öffentliche Abwasserinfrastruktur investiert [7]. Laut VSA/KI [7] ist «das Investitionsvolumen (…) bedeutend, wenn auch der Vergleich mit den kalkulatorischen Abschreibungen zeigt (414 Mio. CHF Abwasserreinigungsanlage, 839 Mio. CHF Kanalisation), dass die Investitionen tiefer sind als der betriebswirtschaftliche Werteverlust». Gleichzeitig stehen Investitionen in den Ausbau von rund 100 der 839 ARA an. Der Ausbau mit weitergehenden Verfahren zur Elimination von Mikroverunreinigungen wird mit etwa 1,2 Mrd. CHF veranschlagt [10]. Dies erhöht die jährlichen Kosten für die Abwasserreinigung um ca. 10–15%.

Abwassermenge, Abwasserfracht und Abwasserpreis

Die Abwasserentsorgung erfasst rund 2 Mrd. m^3 Abwasser pro Jahr. Mit geschätzten 10 Mrd. Tonnenkilometer stellt sie damit eines der grössten Transportunternehmen in der Schweiz dar. Davon gelangen 1,4 Mrd. m^3 jährlich in die ARA. Diese Menge setzt sich aus 45% Haushalts- und Industrieabwasser, 40% Fremdwasser[3] und 15% Niederschlagswasser zusammen [8]. Obwohl das Niederschlagswasser mit nur 15% den kleinsten Anteil an der jährlichen Abwassermenge hat, variiert dieser Anteil stark. Bei mittleren und starken Regen stellt es den grössten Anteil der Abwassermenge dar [8]. Da in der Regel nur der doppelte Trockenwetteranfall des Abwassers über die ARA geleitet wird, wird bei starken und längeren Regen zusätzliches Mischwasser direkt in die Gewässer entlastet [11].

Laut Hochrechnungen des VSA/KI [7] betragen die mittleren Schmutzstofffrachten im Zulauf der ARA 490 180 Tonnen organische Schmutzstoffe (CSB),[4] 40 874 Tonnen Stickstoff und 6433 Tonnen Phosphor pro Jahr (siehe auch Tabelle 2). Die mittlere Reinigungsleistung der ARA beträgt im Durchschnitt 92% für organische Schmutzstoffe (CSB), 47% für Stickstoff und 89% für Phosphor [7].[5] Tendenziell nimmt die Reinigungsleistung mit der Grösse der ARA zu [7]. Dies gilt insbesondere für die Elimination von Stickstoff [7].

Der durchschnittliche Abwasserpreis für das Sammeln, Transportieren und Reinigen von 1000 Liter Abwasser (in den 300 einwohnerreichsten Schweizer Gemeinden mit mehr als 5000 Einwohnerinnen und Einwohnern) liegt bei CHF 1.80 [12], [8].

Alter, Zustand und Sanierungsbedarf

Gemäss Maurer et al. [8] liegen nur punktuell Informationen über Alter, Zustand und Sanierungsbedarf der Schweizer Abwasserentsorgungsinfrastruktur vor – ein Rückschluss auf die gesamte Schweiz ist nur sehr bedingt möglich.

Eine Studie von Maurer und Herlyn [9], die den Zustand von insgesamt 4500 km öffentlicher Kanalisation, d.h. rund 10% der Gesamtkanalisation erfasst, legt allerdings den Schluss nahe, dass ca. 23% der öffentlichen Kanalisation substanzielle Schäden aufweisen (VSA Schadensklasse 0 bis 2). Einer Studie des Kantons Zürich zufolge, die den Zustand von 8700 m Liegenschaftsentwässerungen in 8 Züricher Gemeinden untersuchte, sind rund zwei Drittel der untersuchten Hausanschlussleitungen sanierungsbedürftig [13]. Die geschätzten Kosten für die Sanierung im Kanton ZH belaufen sich auf 1 Mrd. CHF [13]. Fachleute gehen davon aus, dass zwischen 50% und 80% aller Hausanschlussleitungen in der Schweiz in einem sanierungsbedürftigen Zustand sind [8].

Über den Zustand der zentralen ARA ist nur wenig bekannt. Da bei den ARA die Leistung im Vordergrund steht und diese kontinuierlich von den Kantonen überwacht wird [8], ist im Bereich der Abwasserreinigung nicht mit einem erhöhten Sanierungsbedarf zu rechnen.

Wasserressourcen

In diesem Abschnitt werden wichtige Kennzahlen zu Menge und Qualität der Trinkwasserressourcen in der Schweiz präsentiert. Ein detaillierter Überblick kann der Thematischen Synthese 1 des NFP 61 entnommen werden.

Niederschlag, Oberflächenwasser

Die Schweiz ist ein niederschlagsreiches Land mit 1431 mm/Jahr Niederschlag. Dies entspricht einem Wasservolumen von rund 60 km^3. Etwa ein Drittel des Niederschlags verdunstet (siehe auch Abb. 4). Der resultierende Nettoabfluss von 41 km^3 besteht aus 58% Regenwasser, 40% Schneeschmelze und 2% Gletscherschmelze [14].[6] Etwa die Hälfte des Nettoabflusses stammt aus Grundwasserleitern. Diese Menge entspricht etwa dem in einer BAFU-Studie [15] abgeschätzten nachhaltig nutzbaren Grundwasserdargebot von 18,6 km^3/Jahr. Mit den neuen Daten des NFP 61-Projekts SWISSKARST zu Karstgrundwasserleitern erhöht sich diese Zahl auf 20–23 km^3/Jahr (Tabelle 3).

Qualität des Oberflächenwassers

Mit dem Ausbau der kommunalen Abwasserreinigung ab den 60er-Jahren hat sich die Qualität der Oberflächengewässer stark verbessert. Trotz des Ausbaus blieb jedoch die Phosphorbelastung der Seen, die aus dem Abwasser und der Landwirtschaft stammt, bis Mitte der 80er-Jahre erhöht. Erst durch die konsequente Einführung der Phosphorelimination in allen kommunalen ARA (dritte Reinigungsstufe) oberhalb von Seen und das Verbot von phosphathaltigen Textilwaschmitteln 1986 konnten die Phosphatgehalte in mittleren und grösseren Seen Ende der 80er-Jahre schrittweise verbessert werden. Durch die Einführung der Stickstoffelimination in den ARA

▶ Fachleute gehen davon aus, dass zwischen 50 und 80 Prozent aller Hausanschlussleitungen in der Schweiz in einem sanierungsbedürftigen Zustand sind. Darüber hinaus weisen etwa 23 Prozent der öffentlichen Kanalisation substanzielle Schäden auf.

Links und Mitte: Fotos Max Maurer; rechts: SWIP

Parameter	Zulauffrachten	Ablauffrachten	Reinigungsleistung
CSB (t/a)	490 180	37 003	92%
N (t/a)	40 874	21 106	47%
P (t/a)	6 433	724	89%

Tab. 2: Zu- und Ablauffrachten sowie Reinigungsleistung der ARA von CSB, P und N für die gesamte Schweiz (extrapolierte Daten) [7].

«Quellen wie die Doubs-Quelle gibt es viele. Aber die genaue Anzahl und die Menge an Wasser, die von diesen Quellen stammt, sind immer noch nicht bekannt, obwohl wir nun einen Teil quantifiziert haben.»

Pierre-Yves Jeannin
Projektleiter SWISSKARST

Mehr dazu im SWISSKARST unter www.nfp61.ch

in den 90er-Jahren wiederum konnten die Gesamtstickstoffgehalte in den Gewässern verbessert werden. Die Ökologisierung der Landwirtschaft ab den 90er-Jahren verstärkte den positiven Trend abnehmender Phosphor- und Stickstoffbelastungen. Um die in Oberflächengewässern häufig nachgewiesenen organischen Mikroverunreinigungen zu reduzieren, werden in den kommenden Jahren 100 der 839 ARA mit weitergehenden Verfahren zur Elimination von Mikroverunreinigungen ausgestattet [18].

Grundwasserressourcen

Die Grundwasservorkommen in der Schweiz können vereinfachend in drei Haupttypen unterteilt werden, die unterschiedlichen geologischen Situationen entsprechen [19]: a) Lockergesteinsablagerungen, meist Kiese und Sande, b) geklüftete Festgesteine und c) verkarstete Kalksteine. Für die Wasserversorgung werden meist relativ oberflächennahe Grundwasservorkommen mit einer geringen Aufenthaltszeit im Untergrund genutzt, teilweise aber auch Grundwässer mit einem Alter von mehreren Jahrzehnten.

Wichtige Lockergesteinsgrundwasserleiter befinden sich in Schotterebenen der mittelländischen und alpinen Flusstäler. Diese Grundwasservorkommen werden durch infiltrierendes Flusswasser, versickernden Niederschlag und Hangzufluss gespiesen. Ausserhalb der Täler treten Lockergesteinsgrundwasserleiter in Form von Moränen oder Hochterrassenschotter auf. Diese Vorkommen weisen meist eine geringe räumliche Ausbreitung auf.

Im tieferen Untergrund des Mittellandes und der Alpen befinden sich meist geklüftete Festgesteine. Im Mittelland handelt es sich dabei häufig um Sandsteine und Konglomerate der Molasse, während im alpinen Raum geklüftete kristalline Gesteine wie Granite und Gneise verbreitet sind. Grundwasser fliesst in diesen Gesteinen durch ein Netzwerk von Klüften und speist dabei meist kleinere Quellen.

Karstgrundwasserleiter dominieren im Jura und sind auch in den Alpen weit verbreitet. Wasser zirkuliert in Karstgrundwasserleitern rasch durch ein Netzwerk von Hohlräumen und leitet dabei das Wasser zu oft grösseren Quellen. Das Netzwerk ist von weniger durchlässigen Zonen umgeben, in denen Wasser während Wochen und Monaten gespeichert ist und so zum Basisabfluss beiträgt. Karstgrundwasserleiter reagieren meist sehr rasch auf Niederschlagsereignisse.

Bislang waren die Grundwasservorkommen in Karstgrundwasserleitern weniger genau bekannt als jene der Lockergesteine. Im NFP 61-Projekt «Grundlagen zu einer nachhaltigen Bewirtschaftung des Karstwassers in der Schweiz» wurde eine neue Methode entwi-

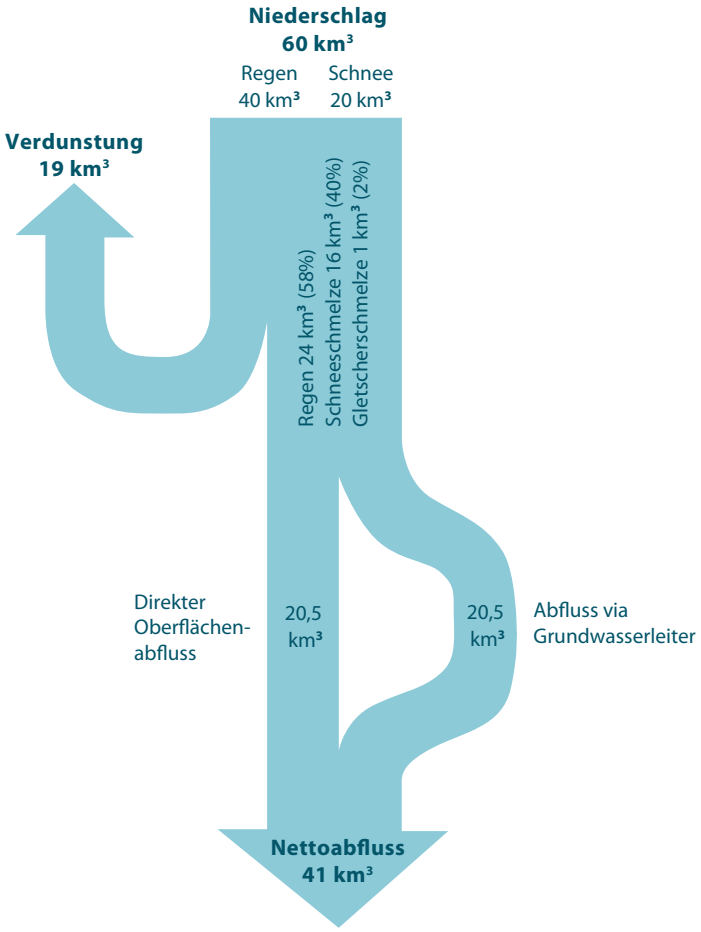


Abb. 4: Jährlicher Wasserhaushalt der Schweiz (Zahlen aus [14], [16], [17]).

ckelt, um das Grundwasservorkommen in Karstgrundwasserleitern genauer zu quantifizieren (SWISSKARST [20]) (siehe auch Kasten 2). Die Ergebnisse des Projekts weisen darauf hin, dass das Karstwasserdargebot in der Schweiz bei 6 bis 9 km³/Jahr liegt statt bei 3,79 km³/Jahr nach Sinreich et al. [15].

Eine vom BAFU erstellte Studie bietet einen Überblick über die Wassermengen in diesen drei Grundwasserleitertypen [15]. Dabei wird zwischen dem gesamten Volumen und dem nachhaltig nutzbaren Dargebot unterschieden. Das Grundwasservolumen entspricht der gesamten Menge an Wasser, das einer potenziellen Grundwassernutzung zugänglich ist. Beim nachhaltig nutzbaren Grundwasserdargebot handelt es sich «um diejenige Wassermenge, welche dem Untergrund über einen längeren Zeitraum jährlich im Mittel entnommen werden kann», ohne dass es zu einer «nennenswerten Abnahme des Grundwasservolumens sowie keinen ökologischen Auswirkungen kommt» [15]. Diese Menge ist kleiner als die Rate der Grundwasserneubildung, da ein Teil des Grundwassers Ökosysteme versorgt und den Basisabfluss von Fliessgewässern sicherstellt.

Beim Grundwasservolumen (Tabelle 3) dominieren die Karst-, vor Kluft- und Lockergesteinsgrundwasserleitern [15]. Obwohl die Lockergesteinsgrundwasserleiter das kleinste Grundwasservolumen enthalten, tragen sie am meisten zum Grundwasserdargebot bei (10,5 km³/Jahr). Der Grossteil davon resultiert aus Grundwasservorkommen innerhalb von Talsohlen mit ihrem Potenzial induzierter Flusswasserinfiltration (Tabelle 3). Bei den Vorkommen ausserhalb von Talsohlen sind die drei Grundwasserleitertypen in etwa gleich stark vertreten [15].

Die gesamte Grundwasserentnahme (1,3 km³/Jahr) entspricht – im jährlichen Mittel – etwa 6% des Grundwasserdargebots von 20 bis 23 km³/Jahr (siehe auch Tabelle 3). Jedoch kann das Grundwasserdargebot in Abhängigkeit der meteorologischen Bedingungen saisonal stark variieren. Der genutzte Grundwasseranteil kann daher zeitweise höher liegen als der Anteil des verfügbaren Grundwasserdargebots. Insbesondere während Trockenperioden stellt sich daher die Frage, in welchem Verhältnis Grundwassernutzung und Grundwasserdargebot stehen.

Qualität des Grundwassers

Die Grundwasserqualität wird in der Schweiz von Bund und Kantonen sowie Wasserversorgern erfasst. Die Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA deckt dabei die verschiedenen Landesregionen, die unterschiedlichen hydrogeologischen Verhältnisse und Bodennutzungen ab [21]. Das Modul SPEZ liefert mit

«Nachdem SWISSKARST nun abgeschlossen ist, stellen wir uns von Bundesseite die Frage, ob es nicht sinnvoll wäre, diese Methode auf die ganze Schweiz anzuwenden.»

Ronald Kozel
Abteilung Hydrologie BAFU

Mehr dazu im SWISSKARST unter www.nfp61.ch

KASTEN 2 | SWISSKARST-Methode zur kartografischen Darstellung von Karstgrundwasserleitern

Der KARSYS-Ansatz basiert auf bestehenden Daten (1). Ein 3-D-Modell der Geologie wird zuerst konstruiert (2), worin Quellen und Grundwasserkörper verortet werden (3). Daraus kann ein hydrogeologisches Modell (4), mit Hauptfliessrichtungen und Grenzen der Einzugsgebiete abgeleitet werden. Aus dem 3-D-Modell können verschiedene Karten zur Unterstützung praxisorientierter Projekte extrahiert werden. Im Rahmen des NFP 61 wurden 200 Karstsysteme dokumentiert (30% der Schweizer Karstfläche) (SWISSKARST [20]).

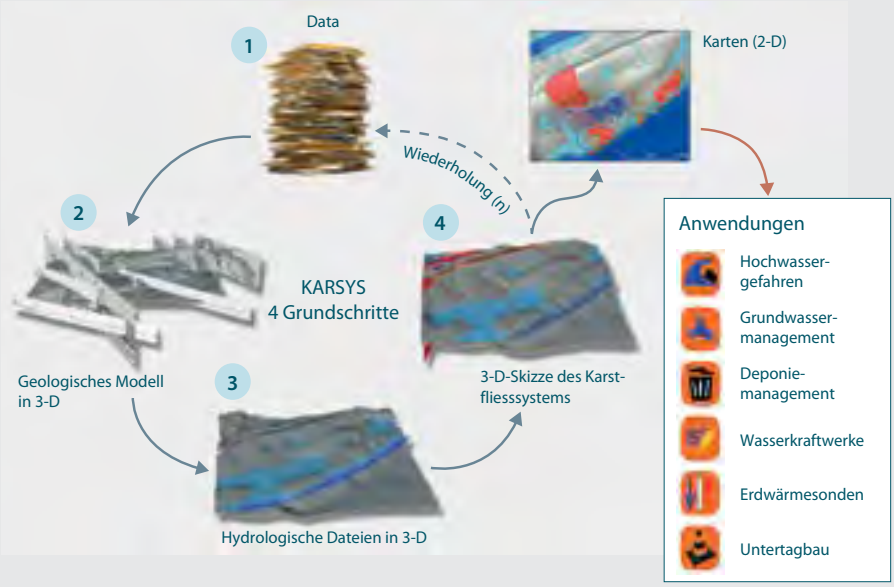


Abb. 5: SWISSKARST-Methode zur kartografischen Darstellung von Karstgrundwasserleitern.

▶ Substanzen aus der Landwirtschaft gehören zu den am häufigsten nachgewiesenen anthropogenen Stoffen im Grundwasser. In flussnahen Pumpwerken werden teilweise auch pharmazeutische Stoffe nachgewiesen.

Links: AGWAM; Mitte: RIBACLIM; rechts: GW-TEMP

seinen rund 500 Messstellen landesweit repräsentative Daten zum Auftreten von Schadstoffen im Grundwasser der Schweiz. Das Modul TREND zielt zusätzlich mit 50 bundeseigenen Messstellen auf ein generelles Verständnis von Faktoren und Prozessen, die die kurz- und langfristige Entwicklung der Grundwasserqualität beeinflussen [152].

Substanzen aus der Landwirtschaft gehören zu den am häufigsten nachgewiesenen anthropogenen Stoffen. Erhöhte Nitratkonzentrationen im Vergleich zum natürlichen Hintergrund treten verbreitet auf. So wurden 2011 an 16% der NAQUA-Messstellen Konzentrationen über dem Qualitätsziel der Gewässerschutzverordnung (25 mg/l) gemessen [152]. Pflanzenschutzmittel und deren Abbauprodukte wurden 2011 an mehr als der Hälfte der Messstellen nachgewiesen [152]. Auch hier handelt es sich meist um Standorte mit intensiver Landwirtschaft. Die Abbauprodukte treten dabei meist häufiger und in höheren Konzentrationen auf als die Ausgangssubstanzen [152]. Bislang gibt es noch keine einheitliche Grundlage zur Beurteilung von Abbauprodukten im Grundwasser.

Neben Stoffen aus der Landwirtschaft finden sich auch Spuren flüchtiger aromatischer Kohlenwasserstoffe. Diese stammen meist aus belasteten Standorten. Halogenierte Kohlenwasserstoffe (Tetrachlorethen, Trichloroethen) treten dabei am häufigsten auf. 2011 wurde an rund 25% der Messstellen mindestens ein solcher Stoff gefunden und an 5% der Messstellen wurde das Qualitätsziel der Gewässerschutzverordnung (1 µg/l) überschritten [152]. Methyl-tert-butylether (MTBE) wurde ebenfalls regelmässig nachgewiesen (10% der Messstellen). Monocyclische aromatische Kohlenwasserstoffe wurden an 2% der Messstellen nachgewiesen, wobei das Qualitätsziel (1 µg/l) fast nie überschritten wurde. Diese Resultate widerspiegeln die hohe Persistenz von halogenierten im Vergleich zu monocyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen in den meist aeroben Grundwasserleitern. Insbesondere in flussnahen Pumpwerken werden teilweise auch andere organische Verbindungen wie pharmazeutische Stoffe im ng/l-Bereich nachgewiesen. Diese Stoffe gelangen meist via ARA in die Oberflächengewässer und via Uferfiltration in flussnahe Pumpwerke. Im Unterschied zu chemischen Stoffen werden mikrobielle Verunreinigungen im Rahmen von NAQUA nicht systematisch erfasst. In einer Pilotstudie an den TREND-Messstellen traten bakterielle Verunreinigungen am häufigsten im Karst (rund 70% der Proben) auf, gefolgt von Kluftgrundwasserleitern (rund 50%) und Lockergesteinsgrundwasserleitern (rund 7%). Hingegen konnte Erbmaterial von Viren in allen Grundwasserleitertypen mit einer ähnlichen Häufigkeit (35 bis 50%) nachgewiesen werden. Protozoen traten weniger häufig auf und konnten am häufigsten (rund 20% der Proben) in Karstgrundwasservorkommen nachgewiesen werden. Diese Resultate illustrieren die höhere Filterwirkung von Lockergesteinsablagerungen im Vergleich zu Karstgrundwasserleitern.

Tab. 3: Grundwasservolumen und nachhaltig nutzbares Grundwasserdargebot in der Schweiz [15].
* Fläche unter Molasseabdeckung bis 1000 m Tiefe.
** Das Grundwasserdargebot in Karstgrundwasserleitern wurde im Zuge des NFP 61-Forschungsprojekts SWISSKARST von 3,79 auf 6–9 km³/Jahr revidiert. Entsprechend erhöht sich das Total aller Grundwasserleiter von 18,6 [15] auf 20–23 km³/Jahr.

	Fläche in km²	Grundwasservolumen in km³	Grundwasserdargebot in km³/Jahr
Lockergesteinsgrundwasserleiter			
Total ausserhalb/innerhalb Talsohlen	11 651	10,7	2,96/7,56
Sehr ergiebig	1 088	4,6	–/2.71
Ergiebig	1 713	1,6	0,02/3,74
Weniger bis nicht ergiebig	8 850	4,5	2,94/1,11
Kluftgrundwasserleiter			
Weniger bis nicht ergiebig	33 289	19,8	3,68
Karstgrundwasserleiter			
Ergiebig	795+3 300*	120	6–9**
Total alle Grundwasserleiter		150	20–23

Nutzung der Wasserressourcen

Häufige Gewässernutzungsarten im Schweizer Mittelland sind in Abb. 6 dargestellt. Nicht dargestellt sind Quellen, aus denen 48% des Trinkwassers stammen. Grosse Mengen an Wasser sind in Tälern mit alpinen Flüssen zu finden (Abb. 6a). In diesen Tälern wird Trinkwasser aus Seen und Pumpwerken im ländlichen und teils auch im urbanen Raum gewonnen. Urbane Gebiete liegen vielerorts in den gleichen Schotterebenen, in welchen auch grössere Flüsse ins Grundwasser infiltrieren. In diesen Gebieten wird Grundwasser gefördert, das mit Infiltratwasser angereichert ist. In grösseren Städten (Zürich, Basel, Genf) wird zudem Grundwasser künstlich angereichert. Grundwasservorkommen in voralpinen Tälern werden teils intensiv genutzt (Abb. 6b). Dabei wird Wasser zum Teil im voralpinen Raum gefasst und über längere Distanzen ins Mittelland transportiert. Einige Lockergesteinsgrundwasserleiter entlang des Juras oder in Juratälern profitieren von einer Zufuhr von Wasser aus Karstgrundwasserleitern und können deshalb besonders ergiebig sein (Abb. 6c). Das gefasste Wasser an Karstquellen ist jedoch oft mit Schadstoffen belastet und muss daher für die Trinkwasserversorgung aufbereitet werden. Kleinere Täler innerhalb des Mittellandes profitieren nicht von einer externen Zufuhr von Wasser und verfügen nur über begrenzte Wasserressourcen (Abb. 6d).

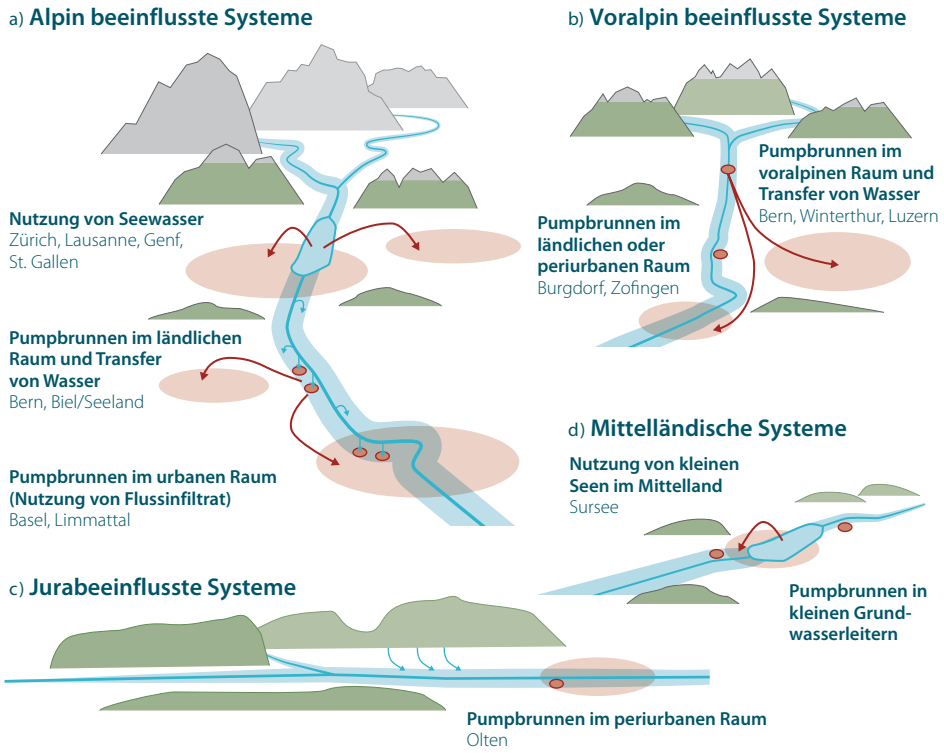


Abb. 6: Häufige Arten der Gewässernutzung grösserer Wasserversorgungen im Schweizer Mittelland: a) alpin beeinflusste, b) voralpin beeinflusste, c) jurabeeinflusste und d) mittelländische Systeme.
Quellen, aus denen 48% des Trinkwassers in der Schweiz stammen, sind nicht dargestellt. Hellblau: ergiebige Grundwasservorkommen in Wechselwirkung mit Fliessgewässern oder Karstgrundwasservorkommen. Hellrote Kreise: Siedlungsgebiete; kleine dunkelrote Kreise: Pumpbrunnen.

3 Ziele einer nachhaltigen SWW

Im folgenden Kapitel werden Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft formuliert. Die Formulierung erfolgte auf der Grundlage der Ergebnisse des NFP 61-Forschungsprojekts «Langfristige Planung nachhaltiger Wasserinfrastrukturen». Lienert et al. (SWIP [22]) identifizierten in einem mehrstufigen und partizipativen Verfahren Ziele einer guten Wasserver- und Abwasserentsorgung. Für den vorliegenden Bericht wurden diese Ziele bezüglich Aspekten einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft in zwei Workshops[7] mit Expertinnen und Experten des NFP 61 ergänzt. Das Resultat ist in Abb. 7 dargestellt.

Viele der Ziele finden sich in der schweizerischen Gesetzgebung wieder und orientieren sich an der vom Bundesrat verabschiedeten Strategie Nachhaltige Entwicklung 2012–2015 [23]. Aufbauend auf den drei Kernzielen einer nachhaltigen Entwicklung «Intergenerationelle Gerechtigkeit», «Intragenerationelle Gerechtigkeit» und «Ökologische Integrität» [24] wurden insgesamt sieben Fundamentalziele formuliert (siehe auch Abb. 7). Diese Fundamentalziele sind in Unterziele gegliedert und als Zielhierarchie dargestellt [25]. Die Zielhierarchie dient als Grundlage für die Beurteilung der in Kapitel 5 beschriebenen Handlungsoptionen. Diese sieben Fundamentalziele charakterisieren, was Expertinnen und Experten des NFP 61 unter dem Begriff «Nachhaltigkeit» verstehen, und spiegeln unterschiedliche Ansprüche an eine nachhaltige Siedlungswasserwirtschaft wider. Neben Kosten-, Qualitäts- und Schutzzielen sind auch explizit Ziele einer nachhaltigen Entwicklung wie Generationengerechtigkeit, soziale Akzeptanz und Ressourceneffizienz berücksichtigt. Diese unterschiedlichen, zum Teil gegensätzlichen Ansprüche können zu Interessenkonflikten führen, sei es zwischen Schutz und Nutzung oder zwischen guter Wasserversorgung und sicherer Abwasserentsorgung und anderen Nutzungen. Grundsätzlich lassen sich diese Konflikte nicht auf einfache Art lösen, aber durch geeignete Verfahren mindern [26]. Hierzu zählen:

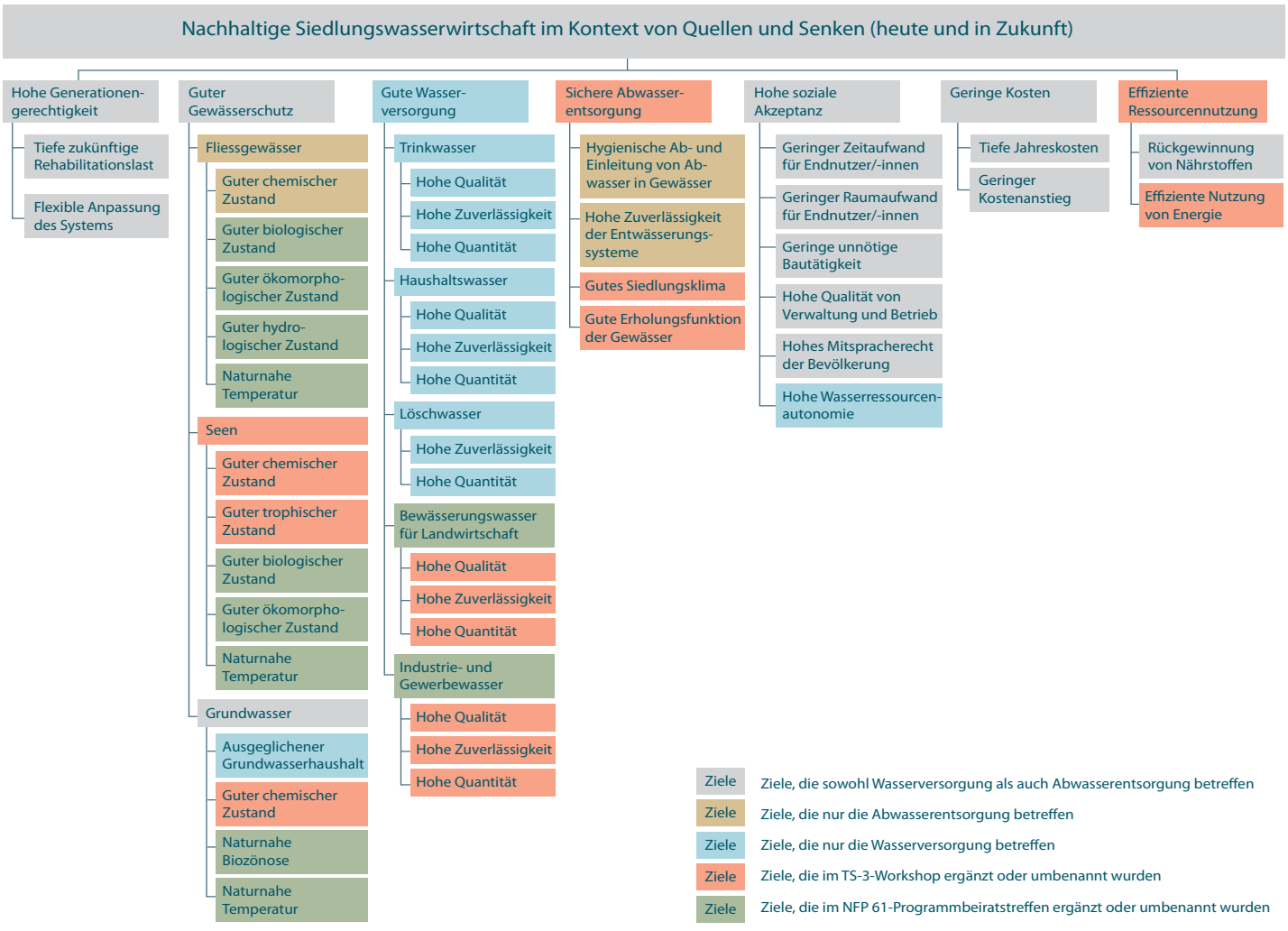


Abb. 7: Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft im Kontext von Quellen und Senken (siehe auch [22]).

- eine transparente und partizipative Interessenabwägung, d.h. eine Abwägung verschiedener Ziele und ihrer «Trade-offs» gegeneinander und eine Identifizierung von Kompromisslösungen,
- eine mittel- und langfristige Planung (siehe auch Handlungsoptionen Infrastrukturen-3, Wasserressourcen-2 und Wasserressourcen-5) und
- eine integrale und regionale Betrachtung (siehe auch Handlungsoption Wasserressourcen-3).

Die Verfahren werden im Kapitel 5 beschrieben. Die Auswirkungen der Handlungsoptionen bez. der Erreichung der Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft werden im Kapitel 6 qualitativ abgeschätzt. Welche Gewichtung die einzelnen Ziele erhalten sollen, wird der Leserschaft überlassen. Damit erfolgt in diesem Bericht auch keine Priorisierung der dargestellten Handlungsoptionen.

Hohe Generationengerechtigkeit

Ziel einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft ist es, kommenden Generationen eine **tiefe zukünftige Rehabilitationslast** aufzuerlegen.
Hintergrund: Die Wasserinfrastrukturen in der Schweiz zeichnen sich durch lange Lebenserwartungen aus: So liegt die typische Lebenserwartung von Leitungen zwischen 50 und 100 Jahren [153]. Um die Leistungen der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung langfristig sicherzustellen, sollten im Mittel jährlich etwa 1–2% des Wiederbeschaffungswertes in die Rehabilitation der Infrastrukturen investiert werden. Liegen die effektiven Investitionen tiefer als der theoretische Investitionsbedarf, verschiebt die heutige Generation die finanzielle Last auf zukünftige Generationen (SWIP [22]).
Gleiches gilt für die langfristige Sicherung der in der Schweiz verfügbaren Wasserressourcen: Werden die Wasserressourcen in Quantität und Qualität beeinträchtigt, verlagert die heutige Generation die Last für die Bereitstellung von Trinkwasser in ausreichender Quantität und einwandfreier Qualität auf zukünftige Generationen (z.B. höhere Aufbereitungskosten für qualitativ beeinträchtigte Wasserressourcen).
Ziel einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft ist es, eine **flexible Anpassung des Systems** zu gewährleisten.
Hintergrund: Die Struktur der Wasserver- und Abwasserentsorgungssysteme beeinflusst deren Flexibilität gegenüber zukünftigen Veränderungen (z.B. sinkende oder steigende Bevölkerungszahlen, abnehmender Wasserverbrauch etc.): Zentrale Systeme – wie die netzgebundenen Infrastrukturen in der Schweiz – zeichnen sich durch eine geringe Flexibilität gegenüber zukünftigen Veränderungen aus [27]. Um die Leistungen der heutigen Wasserver- und Abwasserentsorgung langfristig zu erhalten, sollten diese Systeme so gestaltet werden, dass sie sich veränderten (ökonomischen, ökologischen und sozialen) Rahmenbedingungen flexibel anpassen können [28]. Flexibilität sollte auch im Bereich der Wasserressourcen erhalten bleiben. Werden die Standorte, an denen eine Wassernutzung möglich ist, zunehmend eingeschränkt (z.B. durch Überbauung von Flusstälern), bleibt bei zunehmendem Bedarf und auftretenden Problemen bezüglich Menge und Qualität nur wenig Raum für die Beschaffung von Ersatzwasser.

Guter Gewässerschutz

Ziel einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft ist es, Fliessgewässer in einem **guten hydrologischen und ökomorphologischen Zustand** zu belassen und einen **ausgeglichenen Grundwasserhaushalt** zu gewähren.
Hintergrund: Durch die Entnahme von Grundwasser wird der Grundwasserspiegel abgesenkt. Dies kann während Trockenperioden die Versorgung von Fliessgewässern und Ökosystemen (z.B. Feuchtgebiete) mit Grundwasser beeinträchtigen. Auch bei gefassten Quellen ist während bzw. nach Trockenperioden die Restwassermenge für Fliessgewässer und andere Ökosysteme reduziert (siehe auch Thematische Synthese 2 des NFP 61). Auf Siedlungsflächen wird Niederschlagswasser abgeleitet, was dort die Grundwasserneubildung vermindert und, zusammen mit der Abwassereinleitung, die Dynamik von Fliessgewässern beeinflusst.

Ziel einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft ist es, keine Beeinträchtigungen des **chemischen und biologischen Zustands** von Fluss-, See- und Grundwasser zu verursa-

▸ Im Projekt SWIP wurden in einem mehrstufigen und partizipativen Verfahren Ziele einer guten Wasserver- und Abwasserentsorgung identifiziert.

Alle Fotos: SWIP

«Der limitierende Faktor ist häufig nicht die vorhandene Menge an Grundwasser, sondern der Konflikt mit anderen Nutzungen. Darum müssen wir aufpassen, dass wir in Zukunft genügend Standorte haben, an denen die Grundwassernutzung Priorität hat, sodass wir bei Problemen an einem Standort das Grundwasser an einem anderen Ort noch nutzen können.»

Daniel Hunkeler
Universität Neuenburg
Projektleiter GW-TREND

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

▶ Der Unterhalt der unterirdischen Infrastrukturen ist aufwendig und erfordert einen sorgfältigen Planungsprozess.

Alle Fotos: SWIP

chen und **naturnahe Wassertemperaturen** zu erhalten.
Hintergrund: Mit dem geklärten Abwasser und Meteorwasser aus Siedlungsflächen gelangen Stoffe (Nährstoffe, Schadstoffe) in die Gewässer. Diese können den chemischen, biologischen und trophischen Zustand der Gewässer beeinträchtigen und die Nutzung der Gewässer erschweren. Durch die Nutzung von Gewässern zu Kühl- und Heizzwecken kann die Gewässertemperatur verändert werden. Bei unsachgemäss durchgeführten Bohrungen z.B. für Wärme- und Kältenutzung kann der natürliche Schutz des Grundwassers geschwächt werden.

Gute Wasserversorgung

Ziel einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft ist es, Wasser für unterschiedliche Nutzungen (Trink-, Haushalts-, Lösch-, Bewässerungs-, Industrie- und Gewerbewasser) in **einwandfreier hygienischer, mikrobiologischer, chemischer, physikalischer und ästhetischer Qualität**[8] und ohne oder mit geringer – möglichst naturnaher – Aufbereitung zur Verfügung zu stellen. Je nach Verwendungszweck (Trink-, Haushalts-, Bewässerungs- oder Industrie- und Gewerbewasser) sind die Anforderungen an die Wasserqualität unterschiedlich.
Hintergrund: Wasser kann aus unterschiedlichen Gründen in seiner Qualität beeinträchtigt sein (SWIP [22]). Die Wasserqualität hängt von der Qualität des Rohwassers (See-, Grund- und Quellwasser) und dessen allfällig notweniger Aufbereitung, aber auch vom Zustand der Anlagen und Leitungen ab (SWIP [22]). Diffuse Schadstoffquellen (z.B. Landwirtschaft) und Punktquellen (z.B. Altlasten) im Einzugsgebiet von Wasserfassungen können die Qualität des Rohwassers beeinträchtigen. Gleiches gilt für Verstösse gegen Schutzzonenvorschriften sowie Starkniederschläge und Hochwasserereignisse [29], [30] (siehe auch Kapitel 4).

Ziel einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft ist es, für die verschiedenen Nutzungen **genügend Wasser zuverlässig und mit genügend Druck** zur Verfügung zu stellen. Je nach Verwendungszweck (Trink-, Haushalts-, Lösch-, Bewässerungs- oder Industrie- und Gewerbewasser) sind auch hier die Anforderungen unterschiedlich.
Hintergrund: Die Versorgung mit genügend Wasser kann aus unterschiedlichen Gründen eingeschränkt sein. Zum Beispiel können anhaltende Trockenperioden infolge reduzierter Wasserdargebote aus Grundwassersystemen mit kleiner Speicherkapazität und erhöhten Bedarfsspitzen (z.B. gleichzeitiges Füllen aller privaten Schwimmbecken) zu Versorgungsengpässen (Druck und Kapazität) führen. Zudem können auch technische Ausfälle von Anlagen oder Leitungen (z.B. Leitungsbruch) Versorgungsunterbrüche zur Folge haben (SWIP [22]).

Sichere Abwasserentsorgung

Ziel einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft ist es, eine **hygienische Ab- und Einleitung von Abwasser** in die Gewässer sicherzustellen.
Hintergrund: Abwasser enthält Krankheitserreger (Bakterien, Viren etc.), deren Art und Anzahl vom allgemeinen Gesundheitszustand der Bevölkerung abhängt [31]. Kommen Menschen in direkten oder indirekten Kontakt mit Abwasser, besteht die Gefahr einer Erkrankung [32]. Letztere können Krankheiten wie Magen-Darm-Erkrankungen etc. und letztendlich Seuchen auslösen. Um die Gefahr einer Ansteckung zu vermeiden, sollte die Siedlungswasserwirtschaft eine hygienische Entsorgung des Abwassers sicherstellen (SWIP [22]).

Ziel einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft ist es, eine **hohe Zuverlässigkeit des Entwässerungssystems** zu gewährleisten.
Hintergrund: Die Abwasserleitungen im Untergrund müssen als Ganzes funktionieren [27]. Sind die Leitungen beschädigt oder schlecht unterhalten, können sie einstürzen oder verstopfen (z.B. durch Pflanzenwurzeln oder Schuttablagerungen). Dies kann zu Rückstau in Abwasserleitungen und somit zu Überschwemmungen führen. Auch intensive Niederschlagsereignisse können infolge hydraulischer Überlastung des Entwässerungssystems zu Rückstau führen. Um Siedlungen vor Überschwemmungen zu schützen, sollten Zustand und Kapazität der Entwässerungssysteme gut (Zustand) bzw. ausreichend (Kapazität) sein.

Ziel einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft ist es, ein **gutes Siedlungsklima** und eine **gute Erholungsfunktion der Gewässer** sicherzustellen.
Hintergrund: Siedlungen und insbesondere Städte weisen ein gegenüber dem Umland verändertes Lokalklima auf. Der hohe Anteil versiegelter Flächen, der relativ geringe Grünflächenanteil, die Abwärme durch Gebäude, Verkehr und Industrie sowie die schlechte Durchlüftung führen in Städten u.a. zu höheren Durchschnittstemperaturen und niedrigeren Luftfeuchtigkeiten [33]. Bereits heute kann dieser sog. Wärmeinseleffekt zur Erhöhung von innerstädtischen Temperaturen um bis zu 10 °C im Vergleich zum Umland führen [34, 35].

Hohe soziale Akzeptanz[9]

Ziel einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft ist es, einen **geringen Zeit- und Raumaufwand** für Bau, Unterhalt und Betrieb von Wasserver- und Abwasserentsorgungssystemen durch die Endnutzerinnen und Endnutzer sicherzustellen (SWIP [22]).
Hintergrund: Dezentrale Wasserver- und Abwasserentsorgungssysteme werden oft direkt bei den Endnutzerinnen und Endnutzern installiert (z.B. im Keller oder Garten). Oft sind sie auch für Unterhalt und Betrieb der Systeme verantwortlich. Zentrale Systeme – wie die netzgebundenen Infrastrukturen – hingegen werden von Spezialisten betrieben und gewartet. Die Endnutzerinnen und Endnutzer müssen für Unterhalt und Betrieb keine Zeit aufwenden. Auch müssen sie keinen Raum auf ihrem Privatgrund zur Verfügung stellen.

Ziel einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft ist es, eine **geringe unnötige Bautätigkeit** zu gewährleisten (SWIP [22]).
Hintergrund: Verschiedene Netzinfrastrukturen teilen sich derzeit den unterirdischen Raum (Gas-, Elektrizitäts- und Wärmeversorgung, Wasserver- und Abwasserentsorgung, Verkehr und Telekommunikation). Arbeiten die verschiedenen Sektoren bei der Planung von Bau und Unterhalt der verschiedenen Infrastrukturen zusammen, können unnötige Bautätigkeiten, die Lieferunterbrüche, Staub und Lärm verursachen und den Verkehr beeinträchtigen, vermieden werden.

Ziel einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft ist es, eine **hohe Qualität des Managements** von Wasserver- und Abwasserentsorgungssystemen, ein **hohes Mitbestimmungsrecht der Bevölkerung** in Entscheidungsprozessen sowie eine **hohe Wasserressourcenautonomie** sicherzustellen (SWIP [22]).
Hintergrund: Die Qualität des Managements von Wasserver- und Abwasserentsorgungssystemen ist für die soziale Akzeptanz unterschiedlicher Infrastruktursysteme entscheidend. Gleiches gilt für die Einbindung der Bevölkerung in die Planung der Systeme (IWAQA [36]) und die Autonomie der Gemeinden bez. der für die Wasserversorgung genutzten Trinkwasserressourcen (SWIP [22]).

Geringe Kosten

Ziel einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft ist es, **tiefe Jahreskosten** sowie einen **geringen Kostenanstieg** zu gewährleisten.
Hintergrund: Die Jahreskosten setzen sich zusammen aus Betriebskosten (Personal- und Sachkosten) und Kapitalkosten (Abschreibungen und Zinsen). Netzgebundene Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastrukturen sind geprägt durch hohe Kapitalkosten. Für die Abschreibung der Infrastrukturen sollte ein auf die Lebensdauer basierter Ansatz gewählt werden. Ein starker Kostenanstieg übersetzt sich in vielen Gebührenmodellen in einen starken Gebührenanstieg, wofür es oft schwierig ist, die nötige Unterstützung der Entscheidungsträger zu gewinnen [37] [38] [8].

Effiziente Ressourcennutzung

Ziel einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft ist es, die **Rückgewinnung von Nährstoffen** aus Abwasser zu gewährleisten.
Hintergrund: Abwasser enthält wertvolle Nährstoffe wie z.B. Stickstoff und Phosphor. Um knapper werdende natürliche Ressourcen – wie z.B. Phosphor – zu schonen, sollte die Abwasserentsorgung so gestaltet werden, dass wertvolle Nährstoffe zurückgewonnen und wiederverwertet werden können (SWIP [22]).

Ziel einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft ist es, eine **effiziente Nutzung von Energie** sicherzustellen.
Hintergrund: Abwasser enthält auch thermische und chemische Energie: Diese Wärmeenergie kann mittels Wärmetauscher und Wärmepumpen für Kühl- oder Heizzwecke genutzt werden [154]. Die im Abwasser enthaltene chemische Energie kann in Biogas und anschliessend in Elektrizität oder Wärme umgewandelt werden. Um den Verbrauch natürlicher Ressourcen (v.a. fossiler Brennstoffe) zu reduzieren, kann die Abwasserentsorgung so gestaltet werden, dass die im Abwasser enthaltene Energie effizient genutzt wird. Gleiches gilt für die Wasserversorgung: Auch hier kann die Gewinnung, Aufbereitung und Verteilung des Wassers so gestaltet werden, dass eine effiziente Energienutzung gewährleistet wird [39], [40].

4 Herausforderungen einer nachhaltigen SWW

In diesem Kapitel werden aktuelle und künftige Herausforderungen einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft in der Schweiz[10] diskutiert und deren zugrundeliegende kausale Zusammenhänge analysiert. Die Analyse erfolgt mithilfe des DPSIR-Ansatzes (Drivers, Pressures, State, Impact, Responses) [41]. Der Ansatz erlaubt es, die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Einflussgrössen, die auf das System Siedlungswasserwirtschaft einwirken, unter dem Blickwinkel der Kausalität zu analysieren. Die Analyse dient als Grundlage für die nachfolgende Ableitung von Handlungsoptionen für eine nachhaltige Siedlungswasserwirtschaft in der Schweiz (siehe auch Kapitel 5).

Die Identifizierung der Herausforderungen erfolgte im Rahmen eines Workshops mit Expertinnen und Experten des NFP 61. Die Herausforderungen wurden individuell von den Expertinnen und Experten und den Mitgliedern der Begleitgruppe nach ihrer Wichtigkeit bewertet. Die Bewertung diente als Grundlage für die Priorisierung der zu analysierenden Entwicklungen (siehe auch Anhang I). Hierzu zählen: Klimawandel, insbesondere zunehmende Trockenperioden, steigende Wassertemperaturen, zunehmende Starkniederschläge und Hochwasserereignisse sowie alternde Infrastrukturen, Bevölkerungs-, Siedlungs- und Wirtschaftsentwicklungen und Veränderungen der institutionellen Rahmenbedingungen. Wissenslücken bestanden zu Beginn des NFP 61 bezüglich der Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserressourcen und Gewässer, insbesondere Grundwasser, sowie Wasserversorgung und Abwasserentsorgung. Ziel des NFP 61 war es, hier einen Beitrag zu leisten, um diese Wissenslücken zu schliessen.
Die nachfolgend präsentierten Ergebnisse des NFP 61 zeigen auf, dass sich mittelfristig, d.h. in den nächsten 20 bis 40 Jahren, sozioökonomische Veränderungen wie Siedlungs-, Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklungen sehr viel stärker auswirken werden als der Klimawandel. Dieser ist langfristig und als Randbedingung einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft von Bedeutung [42].

Klimawandel

Zunehmende Trockenperioden

a) Auswirkung auf die Grundwassermenge

Höhere Temperaturen zusammen mit geringeren Sommerniederschlägen werden den Wasserhaushalt von Oberflächengewässern und Grundwasser beeinflussen. Es stellt sich dabei die Frage, ob dies generell oder nur in Extremjahren mit ausgesprochen langen Trockenperioden wie im Jahr 2003 eine Herausforderung darstellt.
Das NFP 61-Forschungsprojekt «Groundwater resources under changing climatic conditions» untersuchte die Auswirkungen des Klimawandels auf oberflächennahe Grundwasservorkommen (GW-TREND [43] [44] [45]). Letztere spielen für die Trinkwasserversorgung eine wichtige Rolle. Der Schwerpunkt lag dabei auf Grundwasservorkommen im Mittelland, die nicht durch grosse alpine Flüsse beeinflusst sind (siehe auch Abb. 6). Dabei wurde sowohl das Verhalten unterschiedlicher Typen von Grundwasserleitern in der Vergangenheit analysiert als auch deren zukünftiges Verhalten modelliert (siehe auch Kasten 3). Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Quantifizierung von Modellunsicherheiten gelegt, die a) in der Unsicherheit verschiedener globaler und regionaler Klimamodelle und b) in der Unsicherheit der Beschreibung von Infiltrationsprozessen begründet sind (GW-TREND [44]).
Das Forschungsprojekt untersuchte in einem ersten Schritt, wie der Klimawandel auf die Grundwasserneubildung wirkt. Diese erfolgt durch: a) direkte Grundwasserneubildung aufgrund von Versickerung von Niederschlag (GW-TREND [43]) und indirekte Grundwasserneubildung aufgrund von b) Infiltration von Flusswasser oder c) unterirdische Zuflüsse (GW-TREND [46]). Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass sich – abgesehen von Extremjahren – die direkte Grundwasserneubildung im jährlichen Mittel nur wenig ändern wird (GW-TREND [43]). Die relativ geringen Änderungen lassen sich damit erklären, dass im Sommer schon heute nur wenig direkte Grundwasserneubildung stattfindet und entsprechend höhere Temperaturen und geringere Niederschläge einen begrenzten Einfluss auf die Grundwasserneubildung haben. Zudem wird die Abnahme der Grundwasserneubildung im Sommerhalbjahr durch zusätzliche Niederschläge im Winterhalbjahr kompensiert. Die geringen Änderungen liegen in einem ähnlichen Bereich wie Unterschiede in der Grundwasserneubildung aufgrund verschiedener Kulturfolgen (GW-TREND [45]).
Während sich die direkte Grundwasserneubildung im jährlichen Mittel nur wenig verändern wird, ändert sich die saisonale Verteilung (GW-TREND: [43]) (siehe auch Kasten 3). So wird sich die Periode mit geringer oder ohne direkte Grundwasserneubildung um ein bis zwei Monate verlängern. Erwartet werden Perioden mit geringer Grundwasserneubildung von Mai bis Oktober, was deutlich länger als die heute übliche Situation ist (Juni bis August). Die Verlängerung der Periode mit geringer Grundwasserneubildung lässt sich damit erklären, dass die höhere Evapotranspiration zu einem höheren Bodenfeuchtedefizit

KASTEN 3 | Wie wirkt sich der Klimawandel auf die direkte Grundwasserneubildung aus?

Im Rahmen des NFP 61-Forschungsprojekts «GW-TREND» wurde mittels mathematischer Modellierung die zukünftige direkte Grundwasserneubildung abgeschätzt. Dabei wurde die Neubildung für eine 30-jährige Kontrollperiode (1980–2009) mit der Neubildung für drei zukünftige Perioden – zentriert um die Jahre 2035, 2060 und 2085 – verglichen (GW-TREND [43]). Um die Unsicherheiten der Klimaprojektionen zu berücksichtigen, wurden zehn unterschiedliche Klimamodelle des europäischen Projekts ENSEMBLES verwendet. Abb. 8 zeigt die Resultate für den Standort Wohlenschwil, Aargau. Dargestellt ist die mittlere monatliche Grundwasserneubildung in mm/Jahr.

Die Voraussagen für unterschiedliche Klimamodelle schwanken relativ stark. Trotzdem lässt sich eine Veränderung in der jahreszeitlichen Verteilung der Grundwasserneubildung feststellen. In den Perioden 2035 und 2060 nimmt die Neubildung aufgrund höherer Niederschläge im Dezember, Januar und Februar und in der späteren Periode 2085 auch im März und April zu. Im Gegenzug sinkt im August, September und Oktober die Neubildung aufgrund einer höheren Evapotranspiration. Es kommt also zu einer ungleichmässigeren jahreszeitlichen Verteilung, die vor allem bei Grundwassersystemen mit kleiner Speicherkapazität (oberflächennahe Karst- und Lockergesteinsvorkommen) zu tieferen Grundwasserspiegeln und bei Quellen zu tieferen Schüttungen im Spätsommer führen kann. Das jährliche Mittel nimmt je nach Klimamodell leicht zu oder ab, je nachdem, ob die Zunahme im Winter oder die Abnahme im Spätsommer überwiegt. Wie stark Grundwassersysteme und Quellen auf eine längere Periode mit geringer Neubildung reagieren, hängt demnach vom Speichervermögen des zugehörigen Grundwasserleiters ab (siehe auch Kasten 4).

Ein Vergleich mit 2003 zeigt (Abb. 8, rosa Linie), dass dieses Jahr eine sehr geringe Neubildung während des Sommers aufweist. Dies stellt eine Extremsituation dar und ist nicht repräsentativ für die mittleren zukünftigen Bedingungen.

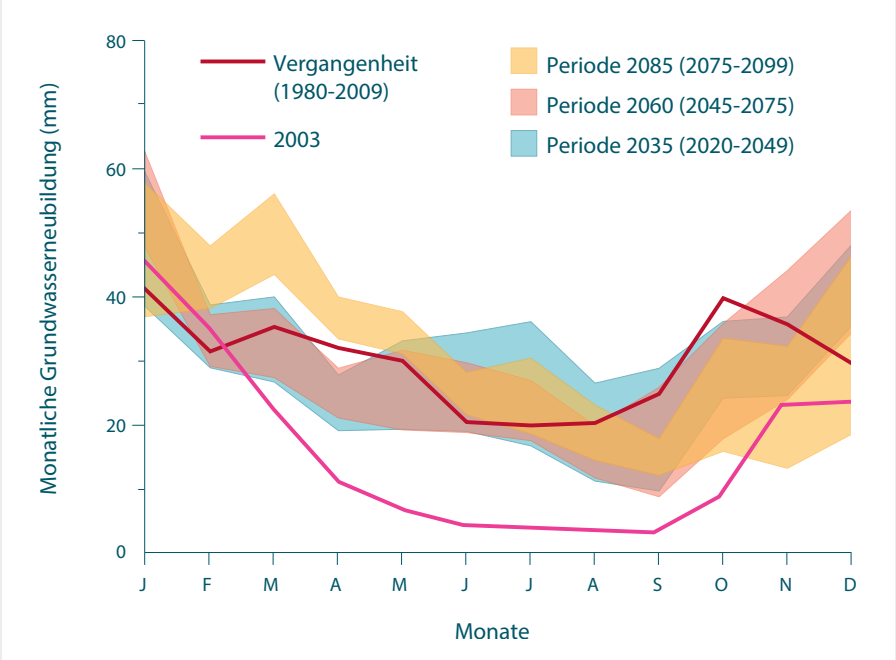


Abb. 8: Veränderung der direkten Grundwasserneubildung. Mittlere monatliche Werte für die Periode 1980–2009 (dunkelrote Linie) und für die zukünftigen Perioden 2035, 2060 und 2085. Zum Vergleich ist auch die berechnete Grundwasserneubildung im Jahr 2003 dargestellt (rosa Linie).

▶ Während sich die direkte Grundwasserneubildung im jährlichen Mittel nur wenig verändern wird, ändert sich die saisonale Verteilung. Die Periode mit geringer oder ohne direkte Grundwasserneubildung wird sich um ein bis zwei Monate verlängern.

Alle Fotos: GW-TREND

führt. Letzteres muss zunächst ausgeglichen werden, bevor die Grundwasserneubildung einsetzt.

Das NFP 61-Forschungsprojekt «Towards a sustainable management of Karst in Switzerland» untersuchte die Auswirkung des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung in Karstsystemen des Juras und der Voralpen. Auch hier zeigt sich nur eine geringe Veränderung der mittleren direkten Grundwasserneubildung (SWISSKARST [47]).

Obwohl viele Karstquellen in der Schweiz bedeutende Einzugsgebiete umfassen, werden sich zunehmende Trockenperioden auf die Schüttungen auswirken. So zeigte die Analyse von Leerlaufkurven, dass viele Karstquellen im Jura nach 6 Monaten ohne direkte Grundwasserneubildung eine geringere Schüttung aufweisen werden (1 bis 3 l/s pro km^2) als unter heutigen Bedingungen (3 bis 5 l/s pro km^2). Die minimale Schüttung wird demnach im Vergleich zu heute abnehmen, wobei die meisten Quellen nicht komplett versiegen werden (SWISSKARST [47]). Da viele Quellen jedoch für einige Flüsse die Hauptwasserressource darstellen, werden diese Flüsse in Zukunft mit ca. 2–3 Mal weniger Quellwasser gespiesen als heute (SWISSKARST [47]).

In den Alpen werden Karstquellen unterschiedlich auf Trockenperioden reagieren: So werden die sommerlichen Schüttungen von Karstsystemen mit Einzugsgebieten unterhalb 1800 m ü.M. eher versiegen. Karstsysteme oberhalb 1800 m ü.M. unterliegen heute einer langen und strengen Wintertrockenperiode. Diese wird in Zukunft kürzer und weniger stark ausgeprägt sein. Auch die Sommertrockenperiode wird kürzer (September). Die Schüttungen dieser Systeme sollten daher im Sommer mindestens gleich gross sein wie in heutigen Wintertrockenperioden [48]. Diese Aussage bedarf jedoch weiterer Untersuchungen, um vollständig belegt zu werden.

Im Vergleich zu Quellen sind die Auswirkungen von Trockenperioden auf die Bodenfeuchte und die damit verbundenen landwirtschaftlichen Kulturen direkter. Grundwasserleiter reagieren im Unterschied zum Boden deutlich träger und können eine ungleichmässigere Verteilung in der Grundwasserneubildung ausgleichen (GW-TREND [43]). Jedoch muss bez. der Bewirtschaftung des Grundwassers als Trinkwasserressource beachtet werden, dass mit anhaltender Trockenperiode der Wasserbedarf signifikant ansteigen kann.

Der Klimawandel führt auch zu einer Verschiebung der Abflussregime der Flüsse [49]: Flüsse mit einem maximalen Abfluss im Sommer (glazio-nivales Regime) werden in Zukunft nur noch vereinzelt auftreten. Im Mittelland wird ein neuer Regimetyp (pluvial de transition) mit einem ausgeprägten Abflussminimum im August und zwei Maxima im Januar und im März auftreten [49]. In Fliessgewässern der Voralpen und Alpen wird sich die Niedrigwasserperiode vom Winter in den Spätsommer verschieben. Die Verschiebung des Abflussregimes der Flüsse wirkt sich auf die Grundwasserneubildung durch Flussinfiltrat aus.

Talgrundwasserleiter hängen vielerorts von der Grundwasserneubildung durch Infiltration von Flusswasser ab (RIBACLIM [50], [51]). Dies gilt insbesondere bei einer hohen Dynamik der Abflüsse (RIBACLIM [52], [53]), die zu einem regelmässigen Aufbruch der Flusssohle führt. Die Speisung erfolgt dabei meist natürlicherweise, kann aber durch Pumpbrunnen in Flussnähe lokal erhöht werden (induzierte Infiltration) (RIBACLIM [54], [55]). Grundwasserleiter in Wechselwirkung mit alpinen Fliessgewässern aus vergletscherten Gebieten werden erst in ferner Zukunft durch geringere Abflüsse im Sommer betroffen sein [49]. In den nächsten Jahrzehnten werden diese Flüsse aufgrund der Gletscherschmelze weiterhin einen hohen Abfluss in den Sommermonaten aufweisen. Auch nach Rückgang der Gletscher wird der Niedrigwasserabfluss grosser alpiner Flüsse immer noch um ein Vielfaches grösser sein als der Grundwasserabfluss.

Hingegen können durch Infiltration von Flusswasser in Grundwasserleiter Fliessgewässer in voralpinen und unvergletscherten, alpinen Gebieten mit einer guten Durchlässigkeit der Flusssohle streckenweise trockenlaufen (GW-TREND [46]). Ein Austrocknen von Flussabschnitten tritt schon unter heutigen klimatischen Bedingungen – beispielsweise im obersten Emmental, im Tösstal oder im Fricktal – auf.

In stärker kolmatierten Flüssen oder in Flüssen mit einem Niedrigwasserabfluss, der grösser als die Abflusskapazität des Grundwasserleiters ist, bleibt der Oberflächenabfluss erhalten. Die natürliche oder induzierte Infiltration kann jedoch stark und nicht linear mit dem Wasserstand abnehmen. So trägt beispielsweise der Hagneckkanal im Seeland bei niedrigeren Abflüssen kaum zur Grundwasserneubildung bei (GW-TREND [56]).

Nimmt die Infiltration von Flusswasser stark ab oder versiegt ein Fluss streckenweise, hängt die Grundwassermenge zunehmend vom gespeicherten Wasser oder von Randzuflüssen ab. Inwiefern die Grundwasserverfügbarkeit für eine Förderung mittels Pumpbrunnen gewährleistet bleibt, hängt davon ab, wie rasch sich die Talgrundwasserleiter entleeren und inwiefern solche Systeme durch Zuflüsse aus tieferen, langsam reagierenden Grundwassersystemen gestützt werden. Dabei muss beachtet werden, dass die gespeicherte Wassermenge nicht nur zur Trinkwassernutzung dient, sondern oft auch grundwasserabhängige Ökosysteme versorgt oder weiter talabwärts zum Basisabfluss der Fliessgewässer beiträgt.

Wie viel gespeichertes Wasser entnommen werden kann, hängt dabei ab von a) der Mächtigkeit des Grundwasserleiters, b) der Platzierung und der Tiefe der Pumpbrunnen und c) der räumlichen und zeitlichen Variation der Wasserqualität. Bei grösseren Talgrundwasser-

KASTEN 4 | Wie wirken sich Trockenperioden auf unterschiedliche Grundwasserleiter aus?

Die Hitzewelle 2003 und das Jahr 2011 mit einem trockenen Frühjahr und Herbst geben wichtige Hinweise auf die Reaktion von unterschiedlichen Grundwasserleitern auf Trockenperioden, wie hier für ausgewählte Beispiele dargestellt ist (GW-TREND [155]). Die meteorologischen Bedingungen in jeder Region sind dabei mit einem Trockenheitsindex dargestellt, der sowohl Niederschläge als auch die Evapotranspiration berücksichtigt (Palmer Drought Severity Index). Innerhalb eines Tales kann die Reaktion auf Trockenperioden stark variieren, wie das Beispiel Emmental aufzeigt. Im oberen Teil des Tales (E1) sinkt der Grundwasserspiegel bei Trockenheit rasch und stark ab sobald die Infiltration von Flusswasser in den Grundwasserleiter zurückgeht. Die sinkenden Grundwasserstände breiten sich aber nicht durch das ganze Tal aus. Im mittleren Talteil (E2) bleiben die Grundwasserstände aufgrund der grossen Menge an Wasser, das verzögert durch das Haupttal und die Seitentäler zufliesst, stabil. Hingegen nehmen auch in flacheren Talabschnitten im Mitteland die Grundwasserstände stark ab, wie im unteren Emmental (E3) und im unteren Wiggertal (W1) beobachtet werden kann. Das Absinken kann auf eine geringe Infiltration in den wahrscheinlich stärker kolmatierten Flussabschnitten zurückgeführt werden. Sowohl im oberen wie im unteren Emmental/Wiggertal erholen sich die Grundwasserstände bei einsetzenden Niederschlägen rasch wieder. Flüsse mit steileren voralpinen Einzugsgebieten führen bei Niederschlag rasch wieder eine grosse Menge an Wasser und speisen die Grundwasserleiter effizient.

Anders sieht die Reaktion des Gäu-Grundwasserleiters aus, der vor allem durch direkte Grundwasserneubildung und tiefen Zufluss aus dem Jura gespeist wird. Das System reagiert träge auf Trockenperioden, und Effekte von aufeinanderfolgenden Trockenphasen summieren sich auf (G1). So wurde der tiefste Wasserstand nicht 2003, sondern 2011 nach mehreren Jahren mit unterdurchschnittlichen Niederschlägen erreicht. Einsetzende Niederschläge führen weniger rasch zu einer Erholung, da zuerst eine grössere Menge von Wasser zur Deckung des Bodenfeuchtedefizits benötigt wird, bevor die direkte Grundwasserneubildung wieder einsetzt.

Quellen können sehr unterschiedlich auf Trockenperioden reagieren, wie für zwei Beispiele illustriert ist. Die Molassequelle Alberswil reagiert kaum auf Trockenperioden, während in der Quelle Freienstein, die teils aus Deckenschottern gespeist wird, die Schüttung rasch und anhaltend abnimmt. Die Deckenschotter speichern Wasser weniger lang als die relativ gering durchlässige Molasse. Das Wiederauffüllen durch direkte Grundwasserneubildung dauert wiederum aufgrund des Bodenfeuchtedefizits, das sich während Trockenperioden in tiefen Höhenlagen akkumuliert, länger als bei gewissen Talgrundwasserleitern.

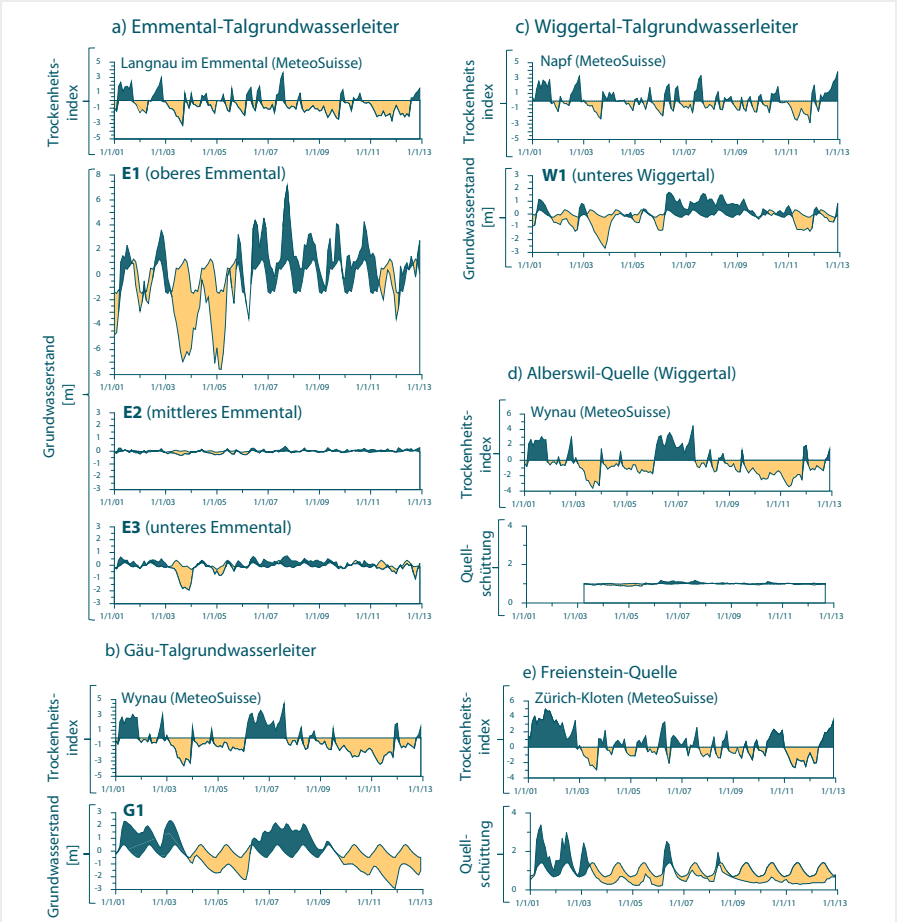
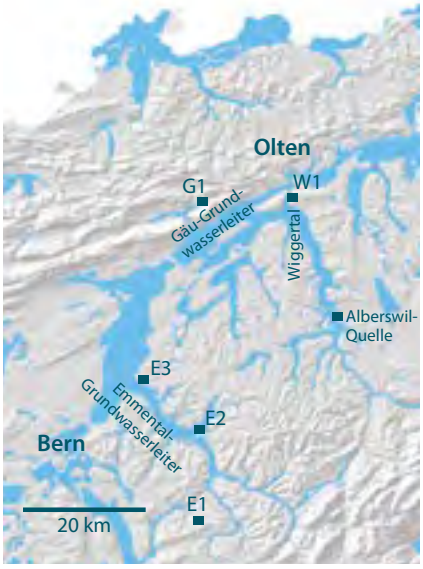


Abb. 9: Auswirkung von Trockenperioden auf unterschiedliche Grundwasserleiter. Abweichung von mittleren monatlichen Bedingungen. Quellschüttungen sind mit der langjährigen mittleren Schüttung normiert (dimensionslos). Gelb entspricht einem Wasserdefizit, blau überdurchschnittlich nassen Bedingungen. Der Trockenheitsindex berücksichtigt sowohl Niederschläge als auch Evapotranspiration.



▶ Während Trockenperioden kann ungenügend verdünntes Abwasser die Wasserqualität von Fliessgewässern negativ beeinträchtigen. Gleichzeitig können fotochemische Abbauprozesse zu einer erhöhten Selbstreinigung von Fliessgewässern führen.

Links: DROUGHT-CH; Mitte und rechts: RIBACLIM

leitern, die nicht direkt an Fliessgewässer oder Ökosysteme (z.B. Auenwälder) angebunden sind, haben tiefere Grundwasserstände keinen direkten Einfluss auf die Ökosysteme (z.B. Gäu-Grundwasserleiter). Aber selbst kleinere Grundwasservorkommen im Voralpengebiet können ein beträchtliches dynamisches Speichervolumen aufweisen (GW-TREND [46]). Aufgrund der grösseren regionalen Gradienten funktioniert der Zufluss zu Pumpbrunnen auch bei einer geringen Speisung der Grundwasservorkommen während mehrerer Monate.

b) Auswirkung auf die Grundwasserqualität

Trockenperioden können sich unterschiedlich auf die Grundwasserqualität auswirken (RIBACLIM [51, 54]). Für Systeme, die vor allem von direkter Grundwasserneubildung abhängen, nimmt die Belastung mit kurzlebigen Schadstoffen wie z.B. mikrobiellen Verunreinigungen ab, da der Eintrag von aussen zum Erliegen kommt. Trockenperioden können aber Nachwirkungen haben: Während Trockenperioden kann es aufgrund der hohen Evapotranspiration und teils geringerer Nährstoffaufnahme durch Pflanzen zu einer Aufkonzentration der Bodenlösung kommen. Bei nachfolgenden nassen Perioden und steigendem Grundwasserspiegel wird dann die aufkonzentrierte Bodenlösung ins Grundwasser ausgewaschen. So wurde in den feuchteren Jahren nach 2003 vielerorts ein Anstieg der Nitratkonzentration beobachtet. Während Trockenperioden kann es auch zur Bildung von Rissen in der Bodenzone kommen, die den präferenziellen Transport von Schadstoffen begünstigen. Allerdings gibt es bislang kaum gesicherte Erkenntnisse zu diesem Thema.

Bei Systemen mit Infiltration von Flusswasser hängt die Grundwasserqualität von der Entwicklung der Wasserqualität des Fliessgewässers und der Infiltrationsrate des Flusswassers ab (RIBACLIM [52]). Eine ungenügende Verdünnung gereinigten Abwassers und/oder belasteten exfiltrierenden Grundwassers kann während Trockenperioden die Wasserqualität von Fliessgewässern negativ beeinträchtigen. Eine Beeinträchtigung der Grundwasserqualität konnte jedoch nicht nachgewiesen werden (RIBACLIM [57]) (siehe auch Abschnitt c).

KASTEN 5 | Führen fotochemische Prozesse zu einer erhöhten Selbstreinigung von Oberflächengewässern (RIBACLIM)?

Sulfonamid-Antibiotika werden in der Human- und Tiermedizin weitverbreitet eingesetzt. In Gewässern können sie zu unerwünschten Effekten führen (z.B. ökotoxikologische Effekte [59] oder Selektion von Antibiotikaresistenzgenen in der Umwelt [60], [61], [62]. Für den kontinuierlichen Eintrag dieser Substanzen in die Oberflächengewässer sind ARA der wichtigste Eintragspfad. Sie gelangen jedoch auch über diffuse Einträge aus der Landwirtschaft oder der Fischzucht in die Oberflächengewässer.

Sulfonamid-Antibiotika sind lichtempfindlich: Sie gehen unter dem Einfluss von Tageslicht fotochemische Reaktionen ein, die zu ihrem Abbau führen. Im Rahmen des NFP 61-Forschungsprojekts RIBACLIM wurden zwei Vertreter dieser Antibiotika, nämlich Sulfadiazin und Sulfamethoxazol, ausgewählt und deren fotochemische Abbauraten in Wasser unter umweltähnlichen Bedingungen untersucht [58].

Bei einer Wasserqualität und einer Flussgrösse ähnlich der Thur werden Sulfadiazin in ≈3,5 und Sulfamethoxazol in ≈13 Tagen um die Hälfte abgebaut. Diese durchschnittlichen Halbwertszeiten können sich bei schönem Sommerwetter und geringem Abfluss um ein Vielfaches reduzieren, während im Winter die fotochemische Selbstreinigung praktisch zum Erliegen kommt. Für Trimethylphenol, eine sehr gut untersuchte Leitsubstanz in der Fotochemie von Oberflächenwasser [63], sind die Abbauzeiten etwa zweimal kürzer als bei Sulfadiazin. Aus früheren Studien sind Schadstoffe bekannt, wie z.B. das weit verbreitete Biozid Triclosan [64], die sehr viel schneller fotochemisch abgebaut werden als die obigen Verbindungen (Halbwertszeit ≈30 min, [64]). Allerdings ist eine grosse Anzahl Schadstoffe resistent gegenüber fotochemischem Abbau. Hierzu zählen das Herbizid Metolachlor und dessen Metaboliten Metolachlor-OXA und -ESA [65]. Demzufolge muss die fotochemische Selbstreinigung eines Oberflächengewässers als ein sehr selektiver Prozess angesehen werden.

Gleichzeitig können fotochemische Abbauprozesse zu einer erhöhten Selbstreinigung von Fliessgewässern führen (RIBACLIM [58]) (siehe auch Kasten 5).

c) Auswirkung auf die Abwasserentsorgung

Je höher der Abwasseranteil in Fliessgewässern, desto weniger werden die mit dem gereinigten Abwasser eingeleiteten Schadstoffe verdünnt. In Fliessgewässern mit höherem Abwasseranteil sind demzufolge auch höhere Konzentrationen an Schadstoffen zu erwarten [8].

Abb. 10 zeigt die Verdünnung des Abwassers in Fliessgewässern von insgesamt 742 ARA (>500 Einwohnerinnen und Einwohner) in der Schweiz im Jahr 2011. Die linke Abbildung zeigt, dass über 40% der ARA ihr gereinigtes Abwasser in Gewässer mit einem Abwasseranteil von mehr als 5% (d.h. einem Verdünnungsverhältnis von 1:20 und kleiner) einleiten. Bei einer Zunahme der Bevölkerung und gleichzeitiger Abnahme der Wasserführung (oder bei einer Veränderung der Abflussregime infolge zunehmender Trockenperioden) ist davon auszugehen, dass insbesondere in kleineren Gewässern die numerischen Anforderungen der Gewässerschutzverordnung und die ökotoxikologisch basierten Qualitätskriterien unterhalb von Abwassereinleitstellen häufiger überschritten werden (siehe auch [66]). Dies kann dazu führen, dass der Eliminationsgrad von Schadstoffen in ARA verschärft oder Anlagen aufgehoben und an grössere Gewässer mit höherem Verdünnungsgrad verlegt werden müssen (siehe auch Handlungsoption Infrastrukturen-6).

Bereits heute werden im Zuge der Revision des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) und der Gewässerschutzverordnung (GSchV) ARA, die in Gewässer mit niedrigem Verdünnungsgrad einleiten, mit einem zusätzlichen Verfahren zur Elimination von Mikroverunreinigungen ausgerüstet (siehe auch Handlungsoption Infrastrukturen-6).[11] Sollten in Zukunft numerische Zielvorgaben auch für organische Spurenstoffe definiert werden, kann dies dazu führen, dass der Klimawandel sich verstärkend auf den Ausbau der Reinigungsleistung von ARA auswirkt. Abb. 10 deutet ebenfalls an, dass der Wärmeeintrag durch ARA in Fliessgewässer substanziell sein kann – insbesondere wenn Abwasser im Sommer zur Gebäudekühlung verwendet wird (siehe auch [8]). Bei einer Zunahme der Wassertemperaturen und gleichzeitiger Abnahme der Wasserführung ist davon auszugehen, dass die Kapazität der Gewässer zur Wärmeaufnahme abnimmt [68]. Dies gilt insbesondere für kleinere Fliessgewässer mit hohem Abwasseranteil (siehe auch Handlungsoption Infrastrukturen-6).

Steigende Temperaturen

a) Auswirkungen höherer Temperaturen auf flussnahes Grundwasser

Die Klimamodelle sagen für die nächsten Jahrzehnte eine Zunahme der Lufttemperatur voraus. Im Sommer ist in Flüssen ohne Gletscher oder nach Abschmelzen der Gletscher nicht nur mit einem tieferen Abfluss, sondern auch mit erhöhten Wassertemperaturen zu rechnen. Historische Daten zeigen, dass Flusstemperaturen in allen Höhenlagen der Schweiz in den letzten Jahrzehnten zugenommen haben [69]. Der Anstieg erfolgte aber nicht kontinuierlich, sondern lässt sich zum grössten Teil auf einen abrupten Temperatursprung in den späteren 1980er-Jahren zurückführen, der mit einer grossskaligen Änderung des Klimaregimes der nördlichen Hemisphäre in Verbindung steht [69], [70].

Temperaturen im flussnahen Grundwasser spiegeln, abgedämpft und zeitlich verzögert, die Temperaturschwankungen des Flusses wider. Höhere Temperaturen im Fluss können zu höheren Temperaturen im Grundwasser führen, was insbesondere im Sommer die Grundwasserqualität beeinträchtigen kann (GW-TEMP [71]).

Im NFP 61-Forschungsprojekt «Response of Swiss groundwaters to climatic forcing and climate change: analysis of the historical instrumental record» wurde untersucht, ob bereits ein Anstieg der Grundwassertemperatur in Datensätzen aus den vergangenen Jahrzehnten nachgewiesen werden kann. Die Resultate dieses Projektes lassen vermuten, dass die Grundwassertemperatur von Aquiferen, die von Flüssen gespeist werden,

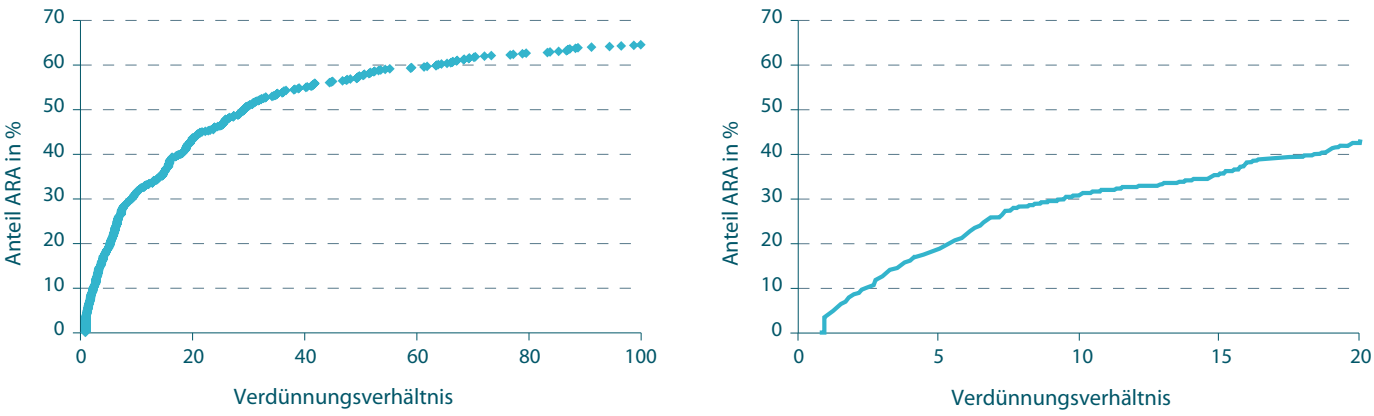


Abb. 10: Kumulativer Anteil der 742 ARA mit mehr als 500 Einwohnerinnen und Einwohner in der Schweiz im Jahr 2011, welche in Fliessgewässer mit einem Abwasseranteil von mehr als 1% (Verdünnungsverhältnis von 1:100 und kleiner) (linke Abbildung) bzw. von mehr als 5% (Verdünnungsverhältnis von 1:20 und kleiner) (rechte Abbildung) einleiten [67].

stark auf den Klimawandel reagieren wird (GW-TEMP [72]). In diesem Aquifertyp, welcher ca. 25% zur Trinkwasserversorgung der Schweiz beiträgt, stieg die Grundwassertemperatur in den letzten 30–50 Jahren im gleichen Rahmen wie die regionale Lufttemperatur an. Detaillierte Untersuchungen von fünf Aquiferen im Schweizer Mittelland zeigten für die Periode 1980–2000 einen Anstieg von 0,5 bis 0,7 °C pro Jahrzehnt (GW-TEMP [72]) (siehe auch Kasten 6). Diese Zunahme ist ähnlich wie die Zunahme der Flusstemperaturen und nur geringfügig kleiner als die Zunahme der regionalen Lufttemperaturen. Letztere stieg in der gleichen Periode im Mittel um 0,7 °C pro Jahrzehnt an. Die Analyse zeigte aber auch , dass der Temperaturanstieg nicht kontinuierlich, sondern sprunghaft stattfand. Vor allem in den späteren 1980er-Jahren stieg die Grundwassertemperatur in allen Aquiferen abrupt und stark an (GW-TEMP [72]). Dieser Anstieg spiegelt den von Hari et al. [69] bereits

KASTEN 6 | Lässt sich bereits eine Veränderung der Grundwassertemperatur feststellen?

Die Zunahme der Luft- und Flusswassertemperaturen in der Schweiz hat auch die Grundwassertemperatur in von Flüssen gespeisten Aquiferen stark ansteigen lassen. Allerdings hat die Erwärmung nicht kontinuierlich stattgefunden, sondern war die Folge eines starken und sprunghaften Anstiegs Ende der 1980er-Jahre. Der Sprung in der Lufttemperatur war eine Folge der abrupten Änderung des Klimas in grossen Teilen der nördlichen Hemisphäre Ende der 1980er-Jahre, die auf eine Änderung des Verhaltens der Arktischen Oszillation zurückgeführt wird. Die Beispiele zeigen, dass die Grundwassertemperatur in flussgespeisten Aquiferen rasch und stark auf grossskalige Klimaphänomene reagiert.

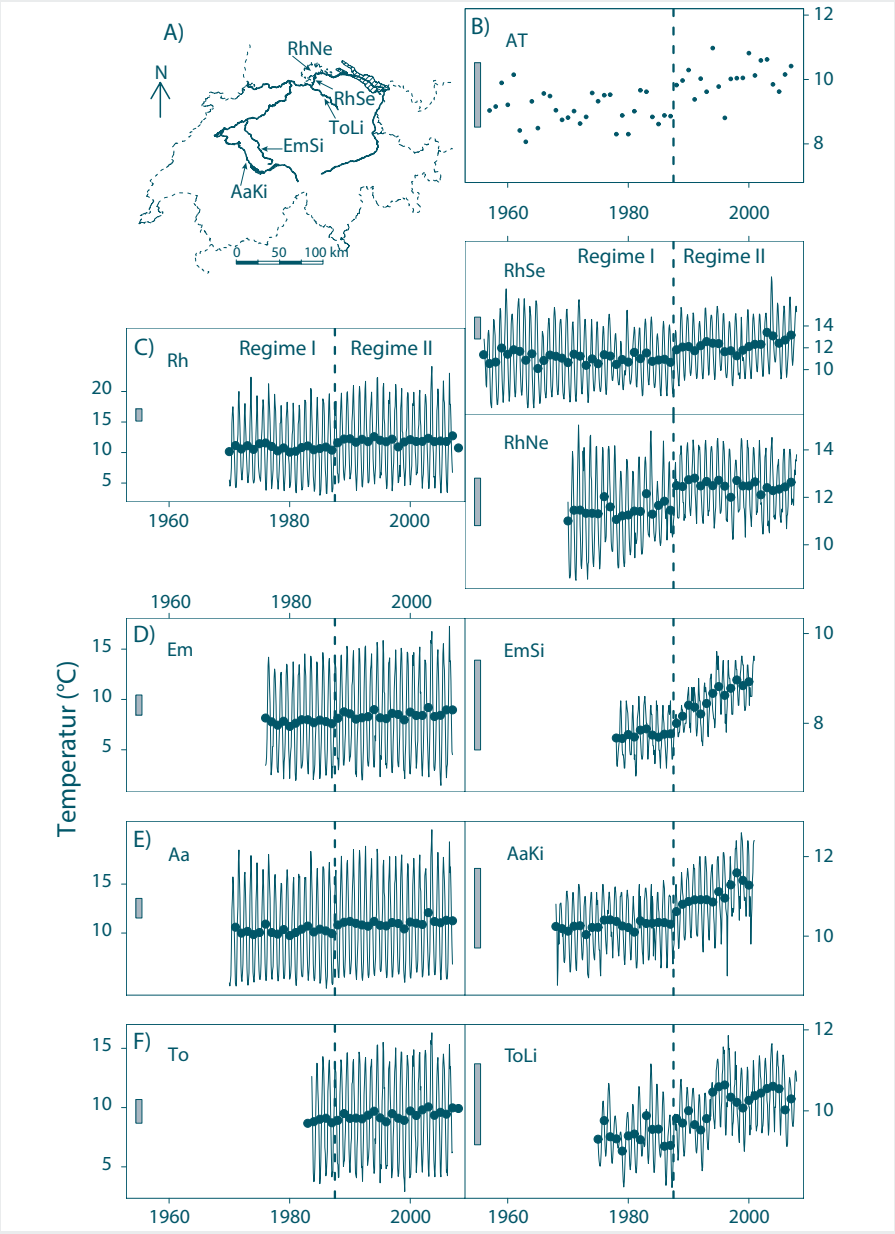


Abb. 11: A) Karte der Messstellen. B) Jahresmittel der Lufttemperatur. C–F) Monatsmittel (Linien) und Jahresmittel (Punkte) gemessener Flusswassertemperaturen (links) bzw. Grundwassertemperaturen (rechts). Regime I (bis und mit 1987) wird von Regime II (nach 1988) jeweils durch eine senkrechte, gestrichelte Linie getrennt. Um den Vergleich der verschiedenen Messreihen zu vereinfachen, zeigt das graue Rechteck auf der linken Seite jeder Abbildung eine Temperaturdifferenz von 2 °C an (GW-TEMP [72]).

nachgewiesenen, sprunghaften Anstieg der Luft- und Flusstemperaturen wider. Als Ursache wird eine abrupte Änderung des Klimas in grossen Teilen der nördlichen Hemisphäre vermutet [73], die teilweise auf eine Änderung des Verhaltens der Arktischen Oszillation zurückgeführt wird [74].

In dem NFP 61-Folgeprojekt «Prediction of the impact of climate change on groundwater temperature and temperature-related groundwater quality indicators» wurden verschiedene statistische Modelle erstellt, um anhand der regionalen Lufttemperatur die Monatsmittel der Grundwassertemperatur in den gleichen Aquiferen vorherzusagen (GW-

KASTEN 7 | Lässt sich schon eine Veränderung der Sauerstoffkonzentration im Grundwasser feststellen?

Das Beispiel eines Pumpwerks der Wasserversorgung Winterthur im Linsental an der Töss illustriert verschiedene Prozesse, die im Text erwähnt werden. Die Abbildung zeigt, wie die Fluss- und Grundwassertemperaturen in der Vergangenheit angestiegen sind. Bedingt durch den Temperaturanstieg ist die Sauerstoffkonzentration kontinuierlich gesunken. Erhöhte Pumpraten aufgrund eines Pumptestes 2009 und die dadurch verursachte grössere und schnellere Infiltration von sauerstoffreichem Flusswasser ins Grundwasser haben zu einem plötzlichen und starken Anstieg der Sauerstoffkonzentration zwischen 2008 und 2009 geführt. Die hohe Pumprate 2003 hatte allerdings keinen Einfluss auf die Sauerstoffkonzentration im Grundwasser. Es scheint, dass eine grössere und schnellere Infiltration von sauerstoffreichem Flusswasser aufgrund erhöhter Pumpmengen nur stattgefunden hat, weil die starken Abflussereignisse von 2007 und 2008 die Kolmation der Flusssohle ausgewaschen haben.

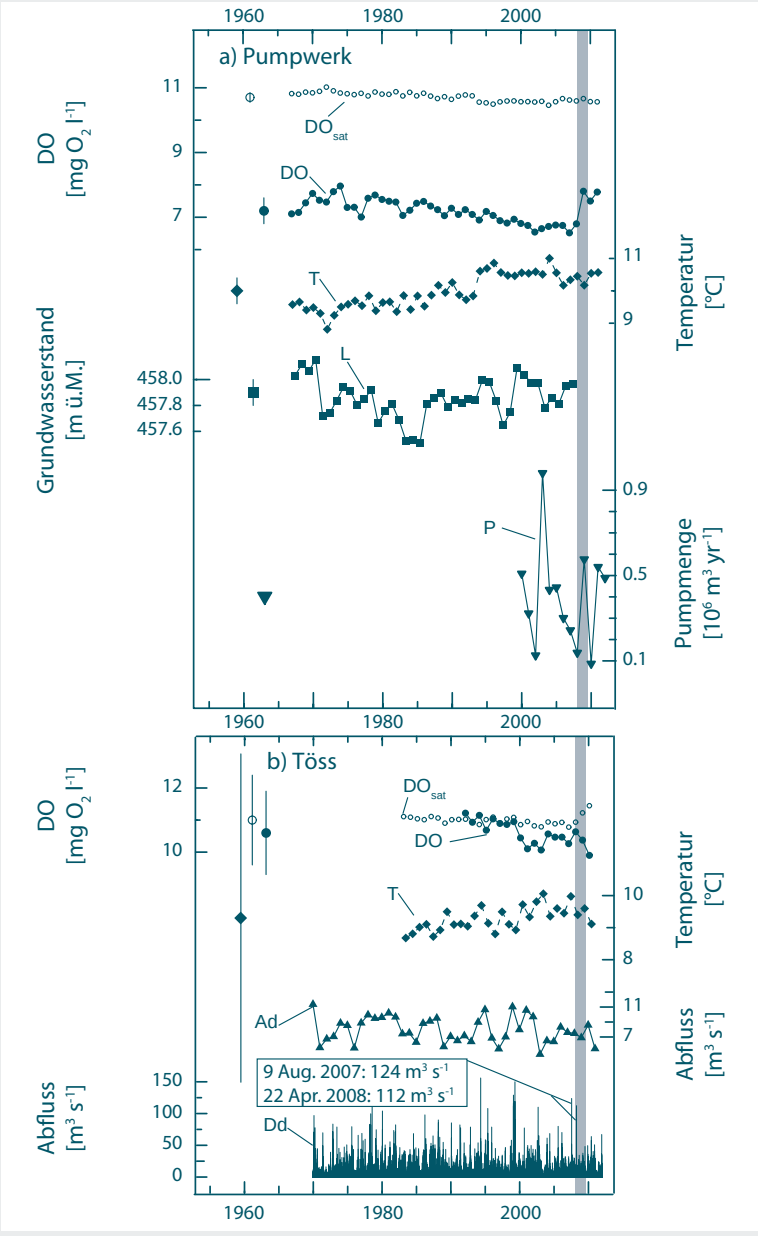
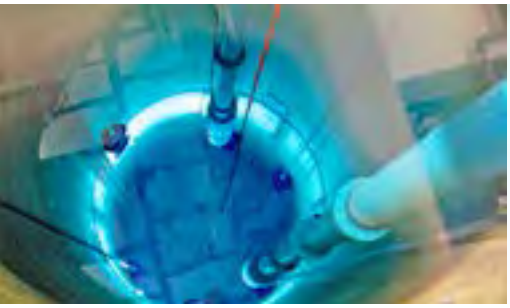


Abb. 12: Zeitreihen verschiedener Variablen a) von einem Pumpwerk der Wasserversorgung Winterthur im Linsental an der Töss und b) der Töss. Die Abbildung zeigt Jahresmittelwerte der Sauerstoffkonzentration (DO), der Temperatur (T), der aus der Temperatur berechneten Sauerstoffsättigungskonzentration (DOsat), des Grundwasserstandes (L) und der Abflussrate (Ad). Ausserdem zeigt die Abbildung die Jahressumme der gepumpten Grundwassermenge (P) und die Tagesmittelwerte der Abflussrate (Dd). Die Symbole und Linien auf der linken Seite der Abbildungen zeigen die Mittelwerte und Amplituden der Zeitreihen. Die grau schattierte Fläche hebt den Zeitpunkt des Sprunges in der Sauerstoffkonzentration zwischen 2008 und 2009 hervor (GW-TEMP [77]).



▶ Historische Messungen zeigen, dass die Grundwassertemperatur von Aquiferen, die von Flüssen gespeist werden, stark auf den Klimawandel reagiert. In diesem Aquifertyp stieg die Grundwassertemperatur in den letzten 30 bis 50 Jahren im gleichen Rahmen wie die regionale Lufttemperatur an.

Links: Foto Max Maurer; Mitte und rechts: GW-TEMP

TEMP [75], [76]). Die Resultate der Modellierung zeigten, dass bis zum Ende des Jahrhunderts eine Erwärmung des Grundwassers im Vergleich zur Kontrollperiode 1980–2009 zu erwarten ist. Je nach Emissionsszenario (A1B, A2 und RCP3PD) erhöht sich die Grundwassertemperatur in den von Flüssen gespeisten Aquiferen bis 2099 um ca. 2,5 °C (Szenario A2) bzw. max. 1 °C (Szenario RCP3PD) (GW-TEMP [75], [76]). Die Vorhersagen zur saisonalen Entwicklung der Grundwassertemperatur waren nicht ganz eindeutig. Jedoch liess sich feststellen, dass in den Sommer- und Herbstmonaten tendenziell mit einer stärkeren Erwärmung zu rechnen ist.

Für die gleichen Aquifere wiesen historische Messungen der Sauerstoffkonzentration im Grundwasser einen der Erwärmung entgegengesetzten langfristigen Rückgang auf (GW-TEMP [77]). Der Rückgang der Sauerstoffkonzentration ist auf eine Zunahme der mikrobiellen Aktivität in der hyporheischen Zone infolge zunehmender Fluss- und Grundwassertemperaturen zurückzuführen (GW-TEMP [77], RIBACLIM [54]).

Die Sauerstoffkonzentration im Grundwasser wird jedoch nicht nur von der mikrobiellen Aktivität in der hyporheischen Zone bestimmt, sondern auch von lokalen hydrologischen Faktoren (RIBACLIM [52], [51]). Insbesondere kann das Zusammenspiel einzelner Hochwasserereignisse, welche der Kolmatierung des Flussbettes entgegenwirken, hoher Pumpmengen und langfristig hoher Abflüsse die Sauerstoffkonzentration im Grundwasser positiv beeinflussen (siehe auch Kasten 7). Unter der Annahme, dass Hochwasserereignisse immer mit einer gewissen Häufigkeit auftreten, wird auch eine langfristige Abnahme der Sauerstoffkonzentration im Grundwasser immer wieder von kurzfristigen Zunahmen unterbrochen. Diese wirken einem langfristigen, abnehmenden Trend entgegen, sodass eine Situation andauernder

KASTEN 8 | Müssen Enteisenungs- und Entmanganungsverfahren in Trinkwasserfassungen installiert werden?

Im Rahmen des NFP 61-Forschungsprojekts «Riverbank filtration under climate change scenarios» wurde anhand von Felduntersuchungen und Säulenexperimenten die Dynamik der Redoxprozesse während der Uferfiltration und deren Abhängigkeit von den klimabestimmten Variablen Temperatur und Abfluss untersucht (RIBACLIM [51, 57]). Partikuläres organisches Material (POM) wurde als wichtigster Elektronendonor für die Zehrung des gelösten Sauerstoffs (DO) unter Sommerbedingungen identifiziert. Sowohl die DO- als auch die errechnete POM-Zehrung wiesen eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit auf. Bei erhöhten Abflussraten war die DO-Zehrung vermutlich aufgrund eines zusätzlichen Eintrags von POM ins Flussbett höher (RIBACLIM [52]).

Am Feldstandort an der Thur (Niederneunforn) war DO der wichtigste Elektronenakzeptor für den Abbau von natürlichem organischem Material (NOM) (RIBACLIM [52]). Im Sommer wurde der DO nahezu vollständig gezehrt, es konnte jedoch keine Denitrifikation nachgewiesen werden. Analog sind auch die meisten von Flüssen gespeisten Aquifere in der Schweiz unter heutigen Sommerbedingungen (sub)oxisch. Nitrat puffert das Redoxsystem, bevor sich Mn(III/IV)- und Fe(III)-reduzierende Verhältnisse ausbilden. Zurzeit besteht dementsprechend keine Notwendigkeit für die Anwendung oder die Installation von Enteisenungs- und Entmanganungsverfahren (RIBACLIM [52]). Während zukünftiger Hitzewellen könnte ein erhöhter Umsatz von POM jedoch zu einer vollständigen Zehrung von DO und Nitrat führen, was eine Freisetzung von Mn(II) und Fe(II) nach sich ziehen könnte. Da die Quelle, die Qualität und die Quantität des POM und dessen Eintrag in das Flussbett nur sehr schwer zu erfassen sind, ist es nahezu unmöglich, direkte Interventionsstrategien zu planen und umzusetzen (RIBACLIM [51]). Die Autoren empfehlen daher ein Langzeitmonitoring der Redoxbedingungen bei Uferfiltrationssystemen (Sauerstoff, Nitrat, DOC), die durch einen direkten hydraulischen Anschluss des Flusses ans Grundwasser sowie durch ein Einzugsgebiet ohne Rückhaltebecken charakterisiert sind. Ein solches Langzeitmonitoring würde es erlauben, adäquate Massnahmen zum richtigen Zeitpunkt und unter Berücksichtigung der ortsspezifischen hydrogeologischen Verhältnisse zu ergreifen (RIBACLIM [51]) (siehe auch Handlungsoption Wissen-2).

Hypoxie nicht zu erwarten ist (GW-TEMP [77], [71]).

Das NFP 61-Forschungsprojekt «Riverbank filtration under climate change scenarios» untersuchte die möglichen Auswirkungen des Klimawandels (höhere Temperaturen und gleichzeitig niedrigere Abflüsse) auf die Qualität von flussnahem Grundwasser (RIBACLIM: [50, 52–54]) (siehe auch Kasten 8). Niedrige Abflüsse im Sommer können zu einer geringeren Verdünnung gereinigten Abwassers aus ARA und damit zu erhöhten Schadstoffkonzentrationen in Pumpbrunnen führen. Höhere Wassertemperaturen bei gleichzeitig höheren Konzentrationen an organischem Kohlenstoff können wiederum zu einer stärkeren Sauerstoffzehrung in den Gewässern und den Flusssedimenten führen. Die dadurch induzierten sauerstoffarmen Bedingungen können einerseits den Schadstoffabbau verlangsamen und andererseits die Auflösung von Eisen- und Manganmineralien begünstigen – beides unerwünschte Effekte für die Wasserversorgung.

Sowohl in Felduntersuchungen (mit Schwerpunkt Wasserfassungen entlang der Thur) als auch in Säulenexperimenten wurde im Rahmen des NFP 61-Forschungsprojekts gezeigt, dass die wichtigsten Einflussfaktoren für die Sauerstoffzehrung die Temperatur und das partikuläre organische Material sind (RIBACLIM [52], [54], [57]). In Säulenexperimenten konnte nachgewiesen werden, dass gelöstes organisches Material eine untergeordnete Rolle für die Sauerstoffzehrung spielt (RIBACLIM [57]). Es wurde ebenfalls gezeigt, dass sich mit einer Zunahme des Abflusses bis zu einer bestimmten Grenze (ca. 50 m^3/s) die Sauerstoffzehrungsraten vervierfachen können (RIBACLIM [54]). Dies ist vermutlich auf einen erhöhten Eintrag von partikulärem organischem Material in das Flussbett zurückzuführen (RIBACLIM [52, 54]). Unter extremen Bedingungen (Niedrigwasser und hohe Temperaturen, Hochwasser und hohe Temperaturen) wurde an einer Messstelle in Flussnähe eine vollständige Zehrung von Sauerstoff festgestellt. Gleichzeitig wurden nur geringfügige Veränderungen in der Nitratkonzentration gemessen. Nitrat wirkte somit im Infiltrationsgebiet als Redoxpuffer, der die Ausbildung Mangan- oder Eisenoxid-reduzierender Bedingungen verhinderte (RIBACLIM [52]). Dies wurde in Säulenexperimenten bestätigt (RIBACLIM [57]): Hohe Temperaturen führten hier zur Bildung von Nitrit und Ammonium (Teildenitrifikation). Wurde Nitrat als Redoxpuffer entfernt, wurde vor allem Mangan aus natürlichem Manganoxid freigesetzt. Obwohl in Felduntersuchungen nur geringfügige Veränderungen in der Nitratkonzentration gemessen wurden, kann die Bildung kleiner Mengen Nitrit nicht ausgeschlossen werden. Letzteres stellt aufgrund seiner hohen Toxizität ein Wasserqualitätsproblem dar (RIBACLIM [54], [57]).

b) Auswirkungen höherer Temperaturen in flussfernem Grundwasser

Die Temperatur von Grundwasser, das durch Versickerung von Niederschlag angereichert wird, schwankt in der Regel nur wenig (<3 °C) um die mittlere Oberflächentemperatur. Entsprechend wird erwartet, dass die Grundwassertemperatur mit der Klimaerwärmung langsam ansteigt. Im Gegensatz zu flussnahem Grundwasser liegen in der Schweiz kaum lange Zeitreihen von diesem Grundwassertyp vor. Verfügbare Daten und internationale Studien (z.B. [78], [79]) weisen jedoch darauf hin, dass die Erwärmung flussfernen Grundwassers gedämpft und zeitverzögert stattgefunden hat und stattfinden wird.

In Karstsystemen konnte zwischen 1989 und 2012 eine Temperaturerhöhung von ca. 0,5 °C festgestellt werden [80], [81]. Die Analyse der Temperatur des unterirdischen Flusses Milandrine im Kanton Jura zeigte, dass sich die jährlichen Schwankungen der Lufttemperatur nicht in der Wassertemperatur des Flusses widerspiegeln (Abb. 13). Das Karstsystem dämpft und verzögert diese jährlichen Schwankungen. Allerdings verändert sich die mittlere Wassertemperatur parallel zur mittleren Lufttemperatur. Ähnliche Tendenzen sind in anderen Karstquellen zu beobachten [80]. Analog zum Grundwasser (siehe auch Kasten 7) konnte in Karstgewässern eine leichte Abnahme der Sauerstoffkonzentration festgestellt werden. Diese Abnahme ist jedoch als unkritisch zu bewerten.

Darüber hinaus konnte in Karstsystemen ein deutlicher Anstieg der Calcium- und Carbonatkonzentrationen (Ca^{2+} und HCO_3^-) sowie der elektrischen Leitfähigkeit festgestellt werden. Sehr wahrscheinlich ist dies auf die beobachtete Zunahme der mittleren Jahrestemperaturen zurückzuführen, die die biologische Aktivität der Böden erhöht und verlängert.

▶ Zurzeit besteht keine Notwendigkeit Enteisenungs- und Entmanganungsverfahren in Trinkwasserfassungen zu installieren.

Links: RIBACLIM; Mitte: Foto Andreas Scholtis, Amt für Umwelt Kanton Thurgau. GW-TREND; rechts: Foto Max Maurer

Daneben konnte eine Abnahme der Chlorid- und Sulfatkonzentrationen (Cl^- und SO_4^{2-}) beobachtet werden. Die Beziehung zum Klimawandel ist hier unklar.

c) Auswirkungen höherer Temperaturen auf Fliessgewässer

Steigende Wassertemperaturen können einen Stressfaktor für aquatische Lebewesen darstellen: Höhere Wassertemperaturen führen zu geringeren Sauerstoffkonzentrationen und können eine Verstärkung ökotoxikologischer Effekte ([65], [82]) sowie eine Überschreitung des Temperaturtoleranzbereiches einiger Wasserlebewesen zur Folge haben [83], [84]. So führt zum Beispiel ein Anstieg der Wassertemperatur zu einer Verschiebung des Lebensraums von Bachforellen in höhere Gebiete. Zusätzlich wird bei Forellen die Wahrscheinlichkeit einer proliferativen Nierenerkrankung erhöht («proliferative kidney disease», PKD) [69]. Falls Barrieren den Bewegungsspielraum einschränken, oder es im Einzugsgebiet keine kälteren Oberläufe gibt, kann ein Anstieg der Wassertemperatur zu einer Verkleinerung des Lebensraums von Bachforellen führen.

Wassertemperaturen werden jedoch nicht nur von der Sonneneinstrahlung, sondern auch von der Abflussmenge beeinflusst [85], [86]. Besonders wenn Niedrigwasser- und Hitzeperioden gleichzeitig auftreten, kann dies negative Auswirkungen für die Ökosysteme haben [84]. Im Rahmen der NFP 61-Forschungsprojekte IWAQA und AGWAM wurden die Wassertemperaturen von Fliessgewässern unter verschiedenen Klima- und Managementszenarien für das Einzugsgebiet der Broye modelliert (AGWAM, IWAQA [87], IWAQA [88]). Die Ergebnisse der Modellierung unter Verwendung von zwei simulierten Wetterzeitreihen für eine Kontrollperiode (1981–2010) und eine Referenzperiode (2036–2065) sind für vier Standorte in Abb. 14 dargestellt.

Die Ergebnisse der Studie zeigen für die vier Standorte eine ganzjährige Zunahme der Tagesmittelwerte der Wassertemperatur. Diese Zunahme geht mit dem Anstieg der Lufttemperatur einher, der im Sommer bei geringen Niederschlägen besonders ausgeprägt ist (im Mittel 4,5 °C zwischen Juni und August). Dies führt im Sommer zu einer mittleren Wassertemperatur von 23 °C (AGWAM, IWAQA [87]).

Die Ergebnisse bestätigen frühere Prognosen von weltweit ansteigenden Wassertemperaturen: Danach sind die grössten Temperaturanstiege durch erhöhte Einstrahlung bei Flüssen mit saisonalem Abflussregime zu erwarten. Während Niedrigwasserperioden weisen diese die höchsten Wassertemperaturen auf [84]. So wurde für den Rhein ein Anstieg der Jahresmittelwerte um 1,9 °C für den Zeitraum 2070–2100 prognostiziert, für das 95. Perzentil der Höchsttemperaturen sogar ein Anstieg um 2,8 °C [84]. Die entsprechenden Prognosen für die Broye, einem Zufluss des Rheins mit saisonalem Abflussregime, betragen 1,9 °C bzw. 2,7 °C (AGWAM, IWAQA [87]) (siehe auch Kasten 9).

Abb. 15 gibt für zwei Standorte im Einzugsgebiet der Broye die Häufigkeitsverteilung simulierter Wassertemperaturen für einen Zeitraum von 20 Jahren für die Kontrollpe-

KASTEN 9 | Uferbestockung – eine wirksame Massnahme, um zunehmenden Wassertemperaturen entgegenzuwirken (AGWAM)?

Im Rahmen des NFP 61-Forschungsprojekts «Water demand in Swiss agriculture and sustainable adaptive options for land and water management to mitigate impacts of climate change» wurden die Auswirkungen verschiedener Massnahmen auf die Wassertemperatur von Fliessgewässern modelliert. Eine dieser Massnahmen ist die Beschattung von Fliessgewässern (AGWAM, IWAQA [87]). Hierbei wurde angenommen, dass durch Aufstockung der Ufervegetation der prozentuale Anteil der Beschattung eines Flusses mit der Breite der Broye (ca. 12 m) bei ca. 50% liegt.

Die Ergebnisse der Modellierung zeigen, dass die Beschattung von Fliessgewässern den durch den Klimawandel bedingten Anstieg der Wassertemperaturen deutlich vermindern würde. Laut Modellprognosen würde im Juli und August der Anstieg der Wassertemperatur an der Mündung der Broye um 2 °C geringer ausfallen als ohne zusätzliche Uferbestockung – an einem grösseren Zufluss im Tiefland sogar um 2,6 °C. Die Wassertemperaturen an höher gelegenen Standorten würden hingegen durch zusätzliche Aufstockung der Ufervegetation weniger stark beeinflusst, da sie bereits jetzt eine grössere Beschattung aufweisen. Ein vollständiger Ausgleich zunehmender Wassertemperaturen durch eine Uferbestockung ist jedoch nicht möglich (AGWAM, IWAQA [87]).

Die Ergebnisse zeigen ebenfalls, dass Uferbestockung auch effektiv ist, um Maximaltemperaturen zu mindern (siehe auch Abb. 15). Auch hier reicht jedoch eine Aufstockung der Ufervegetation nicht aus, um die Auswirkungen des Klimawandels vollständig auszugleichen. Besonders an kleineren Gewässern mit geringerer Breite werden mit einer Uferbestockung nicht nur Maximaltemperaturen abgefedert, sondern ebenfalls der Bewuchs von Wasserpflanzen vermindert [92] und der Eintrag organischen Materials erhöht. Letzteres stellt eine wichtige Nahrungsquelle für wirbellose Kleinlebewesen dar. Für grössere Gewässer können Massnahmen, die andere Stressfaktoren reduzieren, helfen, den Einfluss des Klimawandels auf die Gewässerorganismen und -ökosysteme zu verringern. Hierzu zählt die Verbesserung der Hydromorphologie [93], [94].

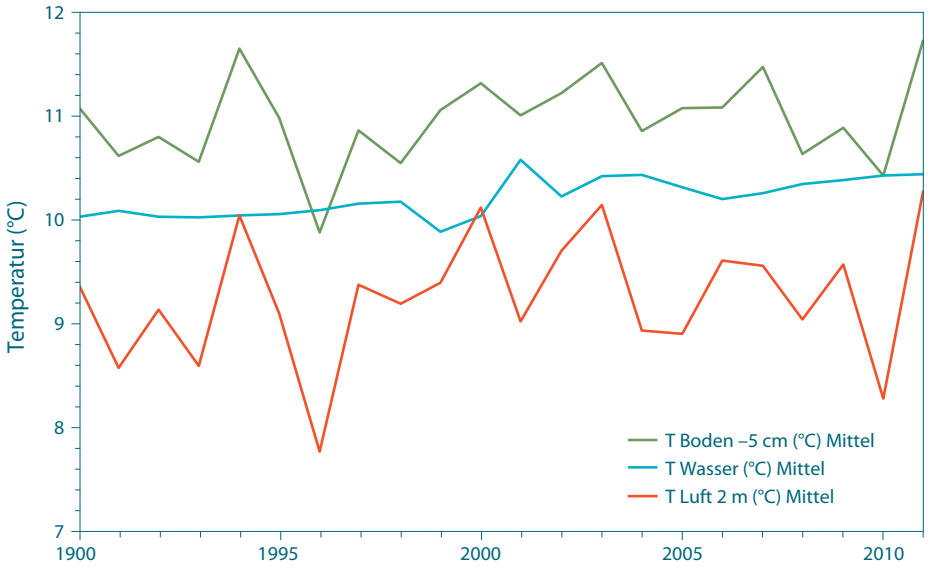


Abb. 13: Mittlere Jahrestemperatur des unterirdischen Flusses Milandrine im Kanton Jura. Die Wassertemperatur steigt parallel zur Lufttemperatur und liegt zwischen Luft- und Bodentemperaturen (–5 cm). Meteorologische Jahresschwankungen sind gedämpft und verzögert [80].

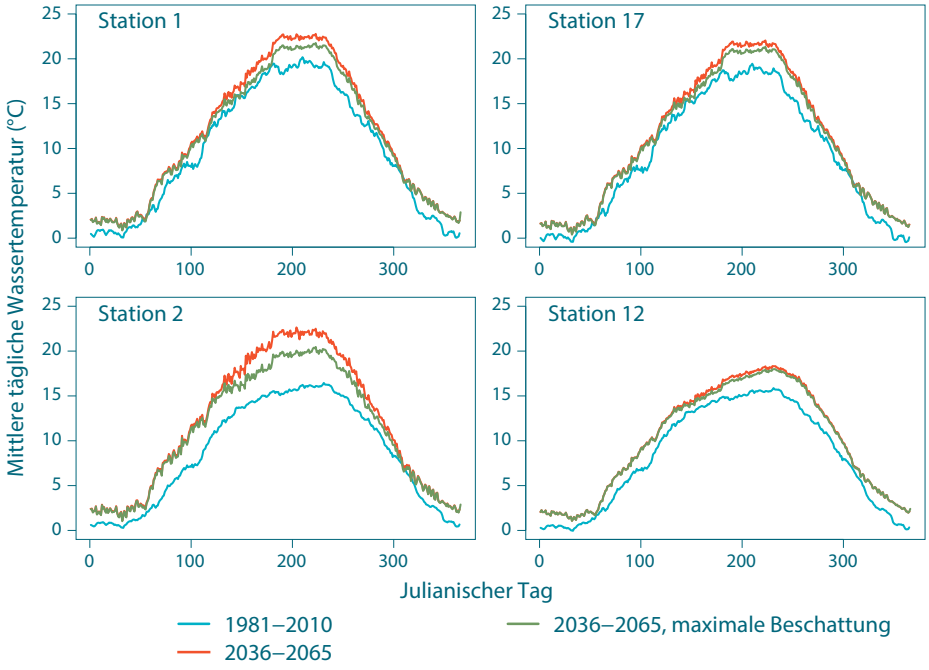


Abb. 14: Mittlere tägliche Wassertemperaturen (gemittelt über einen Simulationszeitraum von 20 Jahren) für eine Auswahl an Standorten im Einzugsgebiet der Broye. Station 1: Mündung; Station 2: grösster Zufluss im Tiefland; Station 12: mittelgrosser Zufluss; Station 17: Hauptgerinne im Oberlauf. Blaue Linie: heutiges, simuliertes Klima für die Kontrollperiode (1981–2010); rote Linie: zukünftiges, simuliertes Klima für die Referenzperiode (2036–2065); grüne Linie: zukünftiges, simuliertes Klima für die Referenzperiode (2036–2065) mit zusätzlicher Beschattung (AGWAM, IWAQA [87]).

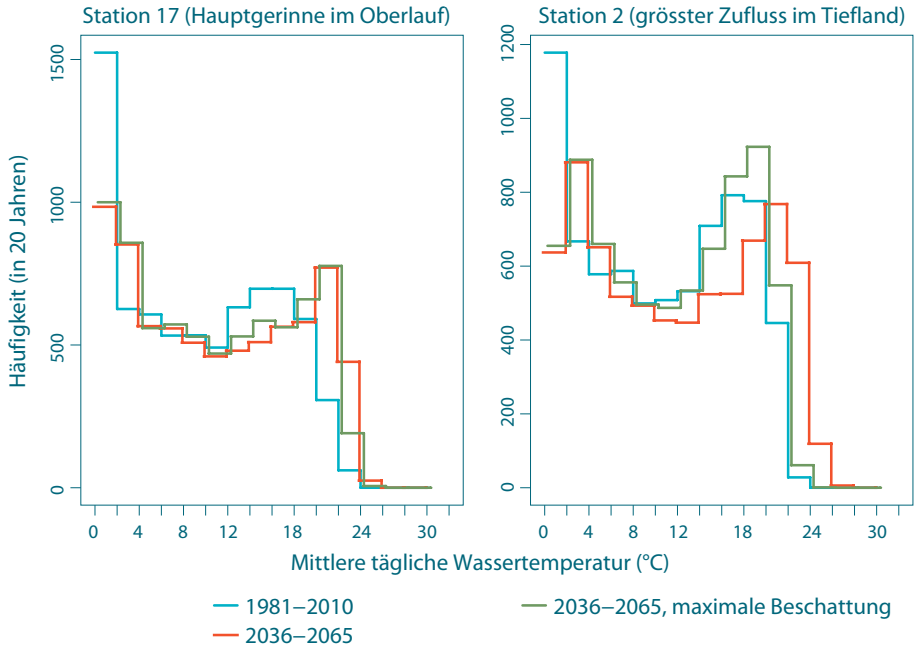


Abb. 15: Häufigkeitsverteilung simulierter Wassertemperaturen für einen Zeitraum von 20 Jahren (2-°C-Intervalle) für ausgewählte Szenarien und für zwei Standorte im Einzugsgebiet der Broye. Station 17: Hauptgerinne im Oberlauf; Station 2: grösster Zufluss im Tiefland; blaue Linie: heutiges, simuliertes Klima für die Kontrollperiode (1981–2010), rote Linie: zukünftiges, simuliertes Klima für die Referenzperiode (2036–2065); grüne Linie: zukünftiges, simuliertes Klima für die Referenzperiode (2036–2065) mit zusätzlicher Beschattung (AGWAM, IWAQA [87]).

riode (1981–2010) und die Referenzperiode (2036–2065) wieder. Die Analyse der Häufigkeitsverteilung zeigt, dass unter zukünftigen Klimaszenarien höhere Temperaturen häufiger vorkommen und Maximaltemperaturen auf über 26 °C ansteigen können.

Um die Auswirkungen zunehmender Wassertemperaturen auf die Artenzusammensetzung von wirbellosen Kleinlebewesen vorhersagen zu können, wurde im Rahmen des NFP 61-Forschungsprojekts «Integrated management of river water quality» das Modell «Streambugs» entwickelt, das Toleranzbereiche für Wassertemperaturen berücksichtigt (IWAQA [89]). Die Ergebnisse der Modellierung für das Einzugsgebiet der Glatt deuten an, dass im Bereich der prognostizierten Temperaturänderungen für die Referenzperiode (2036–2065) (IWAQA [88]) der Einfluss der Temperatur auf die Artenzusammensetzung gering ist (IWAQA [90]). Dieses Resultat ist aber sehr unsicher, da zurzeit für die Temperaturtoleranzbereiche von wirbellosen Kleinlebewesen nur sehr grobe und unzulängliche Informationen verfügbar sind [91].

d) Auswirkungen höherer Temperaturen auf Seen

Der Wärmehaushalt eines Sees wird vorwiegend von nur vier meteorologischen Grössen bestimmt: Lufttemperatur, Bewölkungsgrad, relative Feuchte und Windstärke. Wegen des grossen Einflusses der Lufttemperatur auf den Wärmehaushalt von Seen spiegelt sich weltweit der gegenwärtig stattfindende, langfristige, globale Anstieg der Lufttemperatur in einem langfristigen Anstieg der Temperaturen von Seen wider [95]. In der Schweiz sind langfristig steigende Wassertemperaturen in mehreren Seen bekannt: Im Zürichsee, zum Beispiel, welcher die Stadt Zürich und Teile der Zürcher Agglomeration mit Trinkwasser versorgt, ist die mittlere Seetemperatur zwischen den 1950er- und 1990er-Jahren durchschnittlich um ca. 0,016 °C pro Jahrzehnt gestiegen [96]. Dabei ist die Temperatur im oberen Teil der Wassersäule wesentlich stärker angestiegen als im unteren Teil, sodass die thermische Stabilität des Sees seit den 1950er-Jahren stark gestiegen ist. Als Folge davon hat sich seit den 1950er-Jahren die Sommerstratifikationsperiode im Zürichsee um ca. 2–3 Wochen verlängert und die Periode der Homothermie im Winterhalbjahr um etwa gleich viel verkürzt [96]. Die Frühjahrszirkulation wird dadurch teilweise unterdrückt und die Versorgung des Tiefenwassers mit Sauerstoff beeinträchtigt [97], [98], [99].

Im Jahr 2003 erlebte Mitteleuropa den heissesten Sommer seit dem Beginn regelmässiger meteorologischer Messungen vor etwa 150 Jahren. In der Schweiz übertraf die im Sommer 2003 gemessene mittlere Lufttemperatur den langjährigen Mittelwert um mehr als 5 °C [100]. Die Folgen des Hitzesommers 2003 für den Zürichsee waren eine ungewöhnlich hohe thermische Stabilität und eine ebenfalls ungewöhnlich tiefe Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser [101]. Laut Modellprognosen wird in der Periode 2071–2100 jeder zweite Sommer mindestens so warm wie der Sommer 2003 [100]. In Kombination mit den Auswirkungen milderer Winter [99] lässt sich deshalb anhand der historischen Daten vermuten, dass die Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenwasser des Zürichsees künftig im Allgemeinen tiefer liegen werden als heute. Modellrechnungen [102] unterstützen diese Aussage: Laut den Modellprognosen wird ein weiterer Anstieg der Lufttemperatur eine Zunahme der Wassertemperatur in allen Schichten des Zürichsees hervorrufen. Da sich die oberen Schichten stärker erwärmen werden als die unteren, wird zusätzlich die Häufigkeit und Intensität von Mischungsereignissen abnehmen, was eine Verschlech-

KASTEN 10 | Beeinträchtigt das massenhafte Auftreten von Blaualgen (Cyanobakterien) die Wasserversorgung aus Seewasser?

Aus Sicht der Wasserversorgung ist das massenhafte Auftreten von Blaualgen problematisch, da die Gefahr besteht, dass Cyanotoxine oder Geschmacks- und Geruchsstoffe in die Wasserfassungen der Seewasserwerke gelangen können. Diese Stoffe können abhängig von der Wachstumsphase der Cynobakterien entweder intrazellulär oder extrazellulär vorliegen [106], [107]. Überwiegt die intrazelluläre Fraktion, gilt es, die intakten Zellen abzutrennen und eine Beschädigung der Zellen möglichst zu vermeiden, da sonst intrazelluläre Toxine oder Geschmacks- und Geruchsstoffe durch z.B. oxidative Verfahren freigesetzt werden können [107]. Überwiegt die extrazelluläre Fraktion, können Cyanotoxine und Geschmacks- und Geruchsstoffe durch oxidative Verfahren entfernt werden. Die Effizienz des Verfahrens hängt dabei von der Reaktivität der Stoffe mit den ausgewählten chemischen Oxidationsmitteln ab [108], [109]. Ozon und ozonbasierte Prozesse der weitergehenden Oxidation sind für diese Substanzen am breitesten einsetzbar. Alternativ können Cyanotoxine und Geschmacks- und Geruchsstoffe durch Aktivkohle entfernt werden [110].

Die Wasserversorgung aus Seewasser in der Schweiz stützt sich auf ein Multibarrierensystem ab, bei dem die Abtrennung von Partikeln (Membranen, Schnell- und Langsam-Sandfiltration), ozonbasierte Verfahren (Ozonung, Ozon/Wasserstoffperoxid) und adsorptive Verfahren basierend auf Aktivkohle (Aktivkohlefiltration, Pulveraktivkohle) zum Einsatz kommen. Diese Prozesskombinationen sind generell in der Lage, Cyanotoxine und Geschmacks- und Geruchsstoffe zu entfernen, im Einzelfall ist allenfalls eine geringfügige Optimierung notwendig.

terung der Versorgung des Tiefenwassers mit Sauerstoff nach sich ziehen dürfte. Allerdings wird die Situation im Winter stark vom künftigen Verhalten der Nordatlantischen Oszillation abhängen, welche einen bedeutenden Einfluss auf das Klima und damit auf die Seen Mitteleuropas ausübt [103], [104].
Zusätzlich zu den schlechteren Sauerstoffbedingungen im Tiefenwasser begünstigt wärmeres Oberflächenwasser das massenhafte Auftreten von Blaualgen (Cyanobakterien), welche toxische Substanzen (Cyanotoxine) oder Geschmacks- und Geruchsstoffe produzieren können. Ein vermehrtes Vorkommen von Blaualgen nach ungewöhnlich milden Wintern ist in mehreren europäischen Seen – auch in Zürichsee, Walensee und Bodensee – bereits beobachtet worden [105] (siehe auch Kasten 10).

Zunehmende Starkniederschläge/ zunehmende Hochwasserereignisse

a) Auswirkungen auf die Siedlungsentwässerung

Für die Siedlungsentwässerung sind zwei Arten von Niederschlägen massgebend: Starkniederschläge im Bereich von Minuten mit hohen Intensitäten (40–100 mm pro Stunde) und Starkniederschläge von längerer Dauer (einige Stunden bis mehrere Tage) und geringerer Intensität (100–400 mm pro Tag). Die ersten dominieren die hydraulische Entwässerungskapazität der Kanalisation. Die zweiten beeinflussen die Menge an ungereinigtem Abwasser, die in die Gewässer entlastet wird. Verschiedene Klimamodelle sagen insgesamt eine Tendenz zu zunehmenden Starkniederschlägen voraus [111]. Es wird davon ausgegangen, dass sich diese Zunahme negativ auf die Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen auswirkt [112].
Das NFP 61-Forschungsprojekts «Langfristige Planung nachhaltiger Wasserinfrastrukturen» untersuchte den Einfluss des Klimawandels auf die hydraulische Leistungsfähigkeit ausgewählter Entwässerungssysteme in der Schweiz (SWIP [113]). Der Fokus lag dabei auf der Analyse des Überstauverhaltens der Entwässerungssysteme, d.h. des Rückstaus als Folge von kurzen Starkniederschlägen mit hoher Intensität. Hierzu wurden zukünftige, von globalen und regionalen Klimamodellen vorhergesagte Änderungen der Niederschlagscharakteristika in die für die Siedlungsentwässerung relevanten räumlichen und zeitlichen Skalen übertragen (SWIP [113]). Dies erfolgte unter Verwendung verschiedener Klimamodelle mittels «statistischen Downscalings». Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Quantifizierung von Unsicherheiten gelegt, die in a) der natürlichen Variabilität des Klimas [114], b) der Unsicherheit verschiedener globaler und regionaler Klimamodelle [114] und c) der Unsicherheit verschiedener Downscaling-Verfahren begründet sind.
Die Ergebnisse der Analyse des Überstauverhaltens zweier Entwässerungssysteme unter Verwendung von drei unterschiedlichen Regenreihen (gemessen und simuliert für eine Kontrollperiode [1981–2010] und simuliert für eine Referenzperiode [2036–2065]) sind in Abb. 16 dargestellt. Die Ergebnisse gelten nur für die im Forschungsprojekt betrachtete Fallstudienregion «Mönchaltorfer Aa» im Kanton Zürich. Erste Ergebnisse eines Folgeprojektes deuten darauf hin, dass die Resultate sehr wahrscheinlich auf die ganze Schweiz übertragen werden können.
Die Ergebnisse zeigen für die Fallstudienregion, dass

- das eigentliche Klimasignal gegenüber der natürlichen Klimavariabilität und der Unsicherheit der Modelle vernachlässigbar ist (SWIP [113]).
- die prognostizierte Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen grossen Unsicherheiten unterliegt. Diese Unsicherheit ist v.a. in der natürlichen Variabilität des Klimas und in geringerem Masse in der Unsicherheit globaler und regionaler Klimamodelle oder der Unsicherheit verschiedener Downscaling-Verfahren begründet (SWIP [113]).
- die Bemessung der Entwässerungssysteme mittelfristig (bis ins Jahr 2050) nicht an den Klimawandel anzupassen ist (SWIP [115]).

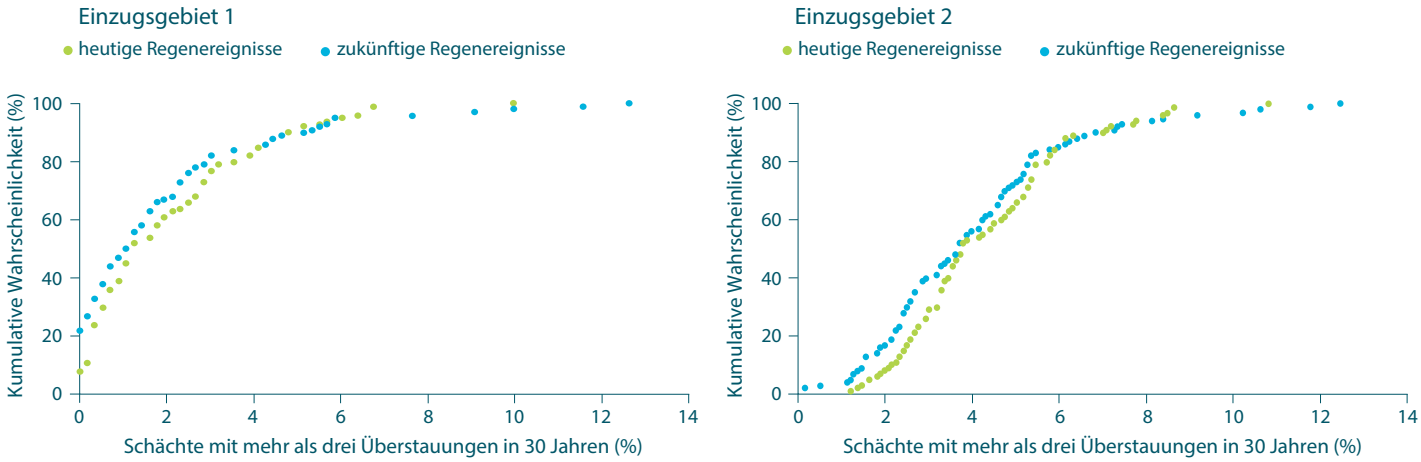
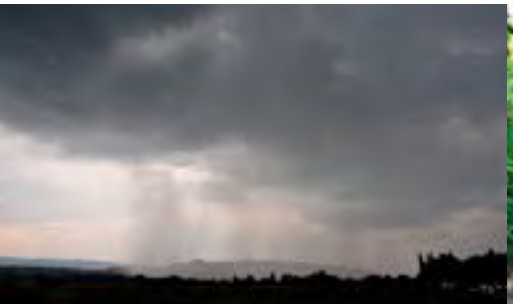


Abb. 16: Kumulativer Anteil der Kanalisationsschächte, an denen das Bemessungskriterium von max. drei Überstauereignissen (Rückstau über Schachtdeckelniveau) im simulierten Zeitraum von 30 Jahren nicht erfüllt wird. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf zwei Entwässerungssysteme im jetzigen (linke Abbildung) und im ausgebauten Zustand (rechte Abbildung) unter Verwendung von i) 100 Realisationen von 30-jährigen simulierten Regenreihen für eine Kontrollperiode (1981–2010) (grün) und ii) 100 Realisationen von 30-jährigen simulierten Regenreihen für eine Referenzperiode (2036–2065) (blau). Letztere basieren auf den Ergebnissen der 10 ENSEMBLE-Modellketten (SWIP [115]).



▶ Starkniederschläge werden mit dem Klimawandel tendenziell zunehmen. Diese haben einen direkten Einfluss auf die Anzahl von Mischwasserentlastungen und damit auf den Eintrag von Schadstoffen in die Gewässer.

Links: Foto Philippe Gyarmati; Mitte: Foto Max Maurer; rechts: GW-TEMP

Die Ergebnisse legen nahe, dass die natürliche Variabilität des Klimas selbst unter stationären klimatischen Bedingungen beträchtlich ist und sich diese Variabilität in den Prognosen zur hydraulischen Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen widerspiegelt. Damit ist die Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen in Zukunft nicht primär durch den Klimawandel, als vielmehr durch die Klimavariabilität bestimmt.

Die Bedeutung der natürlichen Klimavariabilität unterstreicht die Forderung verschiedener Autoren [114, 112], von der aktuellen Bemessungspraxis, die auf einzelnen gemessenen Regenreihen beruht, zu einer Praxis basierend auf stochastischen Regenreihen überzugehen. Allerdings ist die Verwendung stochastischer Regenreihen zur Bemessung von Siedlungsentwässerungssystemen mit einem zusätzlichen Simulations- und Rechenaufwand verbunden (SWIP [113]). Die Ergebnisse des NFP 61-Forschungsprojekts stellen hier einen zentralen Ausgangspunkt dar, um – auf der Grundlage weiterer Untersuchungen – spezifische Empfehlungen für die Bemessung von Entwässerungssystemen abzuleiten.

Der Einfluss des Klimawandels auf die Entlastung von Mischwasser in Fliessgewässer (Mischwasserentlastung) wurde im Rahmen des NFP 61-Forschungsprojekts «Integriertes Management der Wasserqualität von Fliessgewässern» untersucht. Es ist davon auszugehen, dass mit einer Zunahme von Starkregenereignissen eine vermehrte Entlastung von ungereinigtem und wärmerem Abwasser in die Oberflächengewässer einhergeht (IWAQA [88]). Diese führt nicht nur zu einer abrupten Temperaturzunahme und einem erhöhten Schadstoffeintrag (stoffliche Belastung), sondern auch zu einem sprunghaften Anstieg der Wassermenge in Fliessgewässern (hydraulische Belastung). Insbesondere in kleineren Gewässern kann dies zu einer Zunahme des Geschiebetriebs führen – mit negativen Auswirkungen für die Gewässerökosysteme (siehe auch S. 40).

b) Auswirkungen auf das Grundwasser

Starkniederschläge können auch die Grundwasserqualität und die Grundwasserneubildung beeinflussen [21]. Da die meisten genutzten Grundwasservorkommen in der Schweiz oberflächennahe sind, können Starkniederschläge durch den Transport von Schadstoffen von der Oberfläche in Grundwasserleiter rasch zu einer Beeinträchtigung der Grundwasserqualität führen. Flussnahe Grundwasserfassungen sind dabei besonders betroffen. Aufgrund der hohen hydraulischen Gradienten während Hochwasserereignissen und dem Aufbruch von Kolmationsschichten kann belastetes Flusswasser rascher in Grundwasserfassungen gelangen. Dabei kann insbesondere eine mikrobielle Belastung des geförderten Grundwassers auftreten. Anhaltende Niederschläge können auch zu einer Auswaschung von Schadstoffen aus der Bodenzone führen, die via präferenzieller Fliesspfade ins Grundwasser gelangen.

Das Auftreten von belastetem Wasser während Starkniederschlägen ist ein bekanntes Phänomen in Karstquellen. Allerdings führen Starkniederschläge nicht zwingend zu einer Verschlechterung der Grundwasserqualität. Aufgrund der hohen Infiltrationsmenge kann es auch zu einer Verdünnung von belastetem Wasser kommen [116]. Schadstoffe können nicht nur von der Oberfläche ins Grundwasser gelangen, sondern auch durch einen rasch ansteigenden Grundwasserspiegel mobilisiert werden. Dies kann beispielsweise im Bereich von Altlasten mit einer belasteten ungesättigten Zone oder bei Schäden von Tanks im Untergrund der Fall sein.

Starkniederschläge können nicht nur das Grundwasser gefährden, es kann umgekehrt auch von Grundwasser eine Gefährdung ausgehen [21]. In tief liegenden Zonen von Flusstälern kann Grundwasser in Kellergeschosse von Gebäuden eindringen oder gar die Landoberfläche erreichen. Entsprechend können tiefer liegende Zonen, die nicht direkt durch übertretende Oberflächengewässer betroffen sind, überflutet werden.

In Karstgebieten führen Starkniederschlagsereignisse zu einem raschen Anstieg von Grundwasserständen und Quellschüttungen. Steigen die Grundwasserstände höher als üblich, führt dies v.a. a) zur Flutung von Trockentälern, b) zur Aktivierung von neuen, unbekannten Überlaufquellen und c) zu Sackungen und Rutschungen. Das Schadenspotenzial dieser drei Aspekte ist an vielen Orten bedeutend.

Bezogen auf Quellschüttungen konnte das NFP 61-Forschungsprojekt «Towards a sustainable management of karst water in Switzerland» zeigen, dass während starker Hochwas-

▶ Wasserleitungen und Abwasserkanäle haben eine sehr lange, aber beschränkte Lebensdauer. Im Projekt SWIP wurden generische Modelle entwickelt, die eine Prognose über den künftigen Zustand der Infrastrukturen auch mit unvollständigen Datensätzen erlauben.

Links und Mitte: SWIP; rechts: Foto Max Maurer

serereignisse unterirdische Schwellen aktiviert werden. Diese Aktivierung kann sowohl zu einer plötzlichen Vergrösserung als auch zu einer Verkleinerung des Quelleinzugsgebiets und demnach zu einer Zu- oder Abnahme der Quellschüttung führen (SWISSKARST [117], [118]). Um angepasste Schutzmassnahmen in Karstgebieten planen zu können, sollten solche Schwellen umfassend charakterisiert werden (siehe auch Handlungsoption Wissen-5).

Alternde Infrastrukturen

Wasserleitungen und Abwasserkanäle haben eine sehr lange, aber beschränkte Lebensdauer. Neben biochemisch-physikalischen Prozessen führen vor allem externe Einflüsse wie Bodensetzungen, mechanische Belastungen etc. mit der Zeit zu einer Verschlechterung ihres Zustands (SWIP [119]). Dies kann eine erhöhte Ausfall- und Störungsrate zur Folge haben (SWIP [22]). Treten Schäden wie Risse oder Brüche an öffentlichen oder privaten Abwasserkanälen auf, ist die hygienische Ableitung des Abwassers nicht mehr gewährleistet: Die Infiltration von Grundwasser in die Kanalisation reduziert deren Entwässerungskapazität. Dies kann bei Regen zu einer Zunahme von Überstauereignissen und Mischwasserentlastungen und damit zu erhöhten stofflichen und hydraulischen Belastungen der Gewässer führen. Gleichzeitig vermindert sich mit der Infiltration von Grundwasser und der damit einhergehenden Verdünnung der Schmutzstoffkonzentrationen die Reinigungsleistung von ARA [8]. Die Exfiltration von Abwasser in den ungesättigten Boden wiederum führt zu einer potenziellen Verschmutzung des Grundwassers [8], [120]. Liegen Abwasserleitungen entgegen der gesetzlichen Anforderungen in Schutzzone 2, können Sickerverluste zu einer Verunreinigung des Trinkwassers führen – wie das Beispiel von La Neuveville zeigt [121].

Treten Schäden wie Risse oder Brüche an öffentlichen oder privaten Wasserleitungen auf, erhöhen sich die Wasserverluste aus dem Verteilnetz. Gleichzeitig nimmt die Anreicherung von Grundwasser zu. Rostbeulen, Abplatzungen oder Leckstellen wiederum erhöhen die Gefahr einer Wiederverkeimung des Trinkwassers im Leitungsnetz. Bei Unterdruck, z.B. als Folge von Druckstössen, können Schadstoffe ins Leitungsnetz eindringen und damit die Lebensmittelsicherheit von Trinkwasser gefährden.

Um die Sanierung alternder Infrastrukturen langfristig planen und den Erneuerungsbedarf von Wasserleitungen und Abwasserkanälen abschätzen zu können, sind zuverlässige Prognosen über den künftigen Zustand der Infrastrukturen erforderlich [124]. Derzeit stehen hierfür verschiedene Prognosemodelle zur Verfügung. Die Kalibrierung dieser Modelle ist jedoch oft mithilfe der in der Schweizer Praxis vorhandenen Datensätze nicht möglich (limitierter Informationsgehalt, fehlende Datenhistorie) (SWIP [123], [124]). Dies gilt insbesondere für viele kleinere Gemeinden. Oft liegen hier keine und nur relativ kleine Datensätze vor, die oft nur kurze Zeiträume abdecken (SWIP [125]). Zudem wurden Datensätze im Zuge von Sanierungen gelöscht oder überschrieben (SWIP [125]); d.h., es sind nur Datensätze von Leitungen vorhanden, die noch im Betrieb sind, hingegen fehlen Datensätze von Leitungen, die in der Vergangenheit bereits ersetzt wurden (SWIP [124], [126]).

Um dieser Herausforderung zu begegnen, wurden im NFP 61-Forschungsprojekt «Langfristige Planung nachhaltiger Infrastrukturen» generische Modelle entwickelt, die eine Prognose über den künftigen Zustand der Infrastrukturen auch mit unvollständigen Datensätzen erlauben (SWIP [119], [37], [125]). Die Modelle berücksichtigen den in der Vergangenheit erfolgten Ersatz von Leitungen und verringern dadurch die systematische Überschätzung der Lebensdauer von noch im Betrieb befindlichen Leitungen (SWIP [124], [126]). Zudem werden Probleme mit der Kalibrierung der Modelle infolge unvollständiger

«Im Rahmen der Finanzplanung der Gemeinden ist es wichtig, zu wissen, in welchem Zustand die Leitungen sind und mit welcher Wahrscheinlichkeit die Infrastrukturbauten in den nächsten Jahren zu erneuern sind. Hier nützt mir das Zerfallsmodell von SWIP. Ich kann ohne grossen Aufwand eine zuverlässige Beratung machen.»

Alex Benz
Hunziker Betatech

Mehr dazu im SWIP unter www.nfp61.ch

KASTEN 11 | Wasserverluste in Karstgebieten
Wasserverluste aus dem Verteilnetz stellen insbesondere in Karstregionen ein Risiko dar: Die Fliesswege bis zu einem Karsthohlraum werden vergrössert und erodiert, bis die Bodenbedeckung abstürzt. Viele solche abrupte Abstürze, die oft mit einer Versickerungsstelle verbunden sind, wurden dokumentiert (siehe auch [122]).

▶ Im Projekt SWIP wurden in einem partizipativen Verfahren Zukunftsszenarien erarbeitet, um Unsicherheiten in Bezug auf die künftigen sozioökonomischen Entwicklungen im Planungsprozess berücksichtigen zu können. Mithilfe von Interviews wurden Ziele einer nachhaltigen Wasserinfrastruktur identifiziert.

Links und Mitte: Fotos Max Maurer; rechts: SWIP

Datensätze mittels Bayes'scher Inferenz überwunden. Hierfür werden lokal verfügbare Datensätze entweder mit subjektivem Expertenwissen oder mit Zustandsdaten anderer Netze kombiniert (SWIP [124], [126], [119]). Die Kombination ermöglicht eine differenzierte Schätzung a) der Überlebenskurven unterschiedlicher Wasserleitungen (SWIP [126]) und Abwasserkanäle (SWIP [124]) und damit b) des künftigen Zustands von Wasserleitungen und Abwasserkanälen.

Angesichts des hohen Wiederbeschaffungswerts netzgebundener Infrastrukturen werden oben beschriebene Prognosemodelle verstärkt in Entscheidungsprozesse integriert. Im NFP 61-Forschungsprojekt SWIP wurden die Modelle mit einer multikriteriellen Entscheidungsanalyse und einer Szenarioanalyse kombiniert, um verschiedene Sanierungsstrategien unter verschiedenen Zukunftsszenarien bewerten zu können (SWIP [127], [38]). Dabei wurden die den Akteuren wichtigen Ziele einer nachhaltigen Wasserinfrastruktur berücksichtigt und gegeneinander abgewogen (SWIP [22]) (siehe auch Handlungsoption Infrastrukturen-3).

In einer separaten Studie wurden verschiedene Sanierungsstrategien alternder Wasserinfrastrukturen miteinander verglichen [37]. Dabei wurden solche Ziele berücksichtigt, die durch den Zustand der Infrastrukturen direkt beeinflusst werden. Hierzu zählen die Ziele «Hohe Generationengerechtigkeit», «Hohe Zuverlässigkeit» und «Geringe Kosten». Dabei wurden verschiedene Präferenzen bezüglich der drei Ziele angenommen (siehe auch Kapitel 3). Die Analyse der Fallstudie ergab, dass eine proaktive Sanierungsstrategie, die auf einem jährlichen Ersatz von 1,5–2% der Leitungen beruht, eine unter allen vier Zukunftsszenarien robuste und gegenüber einer ausschliesslich reaktiven Sanierungsstrategie empfehlenswerte Strategie ist (SWIP [37]).

Bevölkerungs-, Wirtschafts- und Siedlungsentwicklung

a) Bevölkerungsentwicklung

Bevölkerungszahl und Altersstruktur haben einen entscheidenden Einfluss auf den Wasserverbrauch und die zu behandelnde Abwassermenge und Abwasserfracht. Eine Zunahme der Bevölkerung geht in der Regel mit einer Zunahme des Wasserverbrauchs und der zu behandelnden Abwasserfracht einher [11]. Dagegen kann eine Veränderung der Bevölkerungsstruktur mit einer Zu- oder Abnahme des Wasserverbrauchs und der zu behandelnden Abwassermenge verbunden sein [6]. Gemäss Abegglen und Siegrist [66] erhöht sich z.B. mit zunehmendem Durchschnittsalter der Medikamentenkonsum, was zu einer zunehmenden stofflichen Belastung der Gewässer führen kann.[12] Diese Entwicklungen werden durch die zukünftigen Veränderungen des einwohnerspezifischen Wasserverbrauchs überlagert [128]. Dieser hängt von der Nutzung von Einsparpotenzialen infolge technischer Neuerungen (z.B. WC-Spülungen, Waschmaschinen etc.) ab.

Nimmt der Wasserverbrauch substanziell ab, kann dies zu temporären Problemen in der Abwasserableitung führen. Mit abnehmendem Trockenwetterabfluss in der Kanalisation sinkt die Schleppkraft, was zu Ablagerungen und Verstopfungen im Kanalnetz, Geruchsbildung («angefaultes Abwasser») und zur Bildung korrosiver Substanzen wie Schwefelwasserstoff führen kann (z.B. Scheitelkorrosion) [129], [8]. Die durch eine verringerte Schleppkraft bedingte Zunahme von Ablagerungen und Verstopfungen im Kanalnetz kann wiederum zu erhöhten Schadstofffrachten bei Mischwasserentlastungen führen [128], [129].

b) Wirtschaftsentwicklung

Auch die wirtschaftliche Entwicklung hat einen entscheidenden Einfluss auf den Wasserverbrauch und damit den zu behandelnden Abwasseranfall. Nach SVGW [2] entfallen gegenwärtig knapp 21% des täglichen öffentlichen Trinkwasserverbrauchs auf Industrie und Gewerbe. Es kann davon ausgegangen werden, dass mit einer Zunahme von Industrie und Gewerbe (d.h. mit einer positiven wirtschaftlichen Entwicklung) der Wasserverbrauch und damit der Abwasseranfall steigt [129]. Jedoch werden diese Entwicklungen durch die Nutzung von Einsparpotenzialen wie die Optimierung wasserrelevanter Prozesse, die Wiederverwendung von Brauchwasser oder ähnlichen Einsparpotenzialen überlagert. Eine direkte Kopplung von Wirtschaftswachstum und Wasserverbrauch, resp. Abwasseranfall, ist daher nur bedingt möglich.

Mit 1% ist der Anteil der Landwirtschaft am täglichen Trinkwasserverbrauch insgesamt gering [130]. Es ist nicht zu erwarten, dass sich

zukünftige Veränderungen in diesem Bereich substanziell auf die Wasserversorgungen auswirken.[13] Jedoch erhöht sich mit zunehmender Bewässerung der Druck auf die Wasserressourcen, aber nicht auf die Infrastrukturen der Siedlungswasserwirtschaft (siehe auch Thematische Synthese 2 des NFP 61).

c) Siedlungsentwicklung

Siedlungen mit einer höheren Bevölkerungsdichte weisen in der Regel eine höhere Bodenversiegelung auf [8]. Damit sinkt der Anteil Niederschlag, welcher versickert. Gleichzeitig wird mehr Niederschlagswasser über die Kanalisation abgeleitet. Dies führt insbesondere bei Extremniederschlägen zu einer hydraulischen Überlastung der Entwässerungssysteme mit Überflutung von Kellern, Strassen, Flächen etc. in der Folge. Da diffuse Schadstoffeinträge aus Siedlungen v.a. über Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungen erfolgen [131], nimmt mit der schnellen Ableitung des Niederschlags auch die stoffliche und hydraulische Belastung der Gewässer zu. In stark verdichteten Gebieten mit einem hohen Anteil an kanalisierter Siedlungsfläche ist die Beeinträchtigung kleiner und mittlerer Gewässer besonders hoch [131].

Eine Zunahme der Versiegelung in städtischen Gebieten geht in der Regel auch mit einer Abnahme der Vegetationsfläche und damit der Verdunstung einher. Die Abnahme

KASTEN 12 | Wie wirkt sich die Siedlungsentwicklung auf die Trinkwassergewinnung aus?

Nach Lanz et al. (2014) [81] werden die ergiebigsten Grundwasservorkommen in der Schweiz stark von Siedlungen beeinflusst (siehe auch Thematische Synthese 2 des NFP 61). Hierzu zählen die für die Trinkwassergewinnung bedeutenden Talgrundwasserleiter im Mittelland und in den alpinen Haupttälern. Im Jahre 2004 lagen rund 10% der Grundwasserschutzzonen in Siedlungsflächen, wobei der Anteil an Siedlungsflächen in Schutzzonen zwischen 1979 und 2004 um 16% zunahm. Eine Umfrage bei den Wasserversorgungsunternehmen ergab, dass die Überbauung von Grundwasserschutzzonen in der Vergangenheit immer wieder zur Aufgabe von Grundwasserfassungen geführt hat (Lanz et al. 2014). Sie wird auch als ein Grund für die Aufgabe weiterer Fassungen in der Zukunft (d.h. in den kommenden 5 bis 10 Jahren) angeführt [81]. Die Ausscheidung neuer Schutzzonen kann sich dabei als schwierig erweisen: Die Flächen über vielen für die Trinkwassergewinnung infrage kommenden Grundwasservorkommen sind bereits anderweitig genutzt bzw. verplant oder lassen sich nicht rechtskonform schützen. Der Sicherstellung einer genügend grossen Anzahl an Standorten für die Trinkwassergewinnung, um sich zukünftigen klimatischen und gesellschaftlichen Veränderungen flexibel anpassen zu können, werden damit Grenzen gesetzt (siehe auch Handlungsoption Wasserressourcen-1).

KASTEN 13 | Wie wirkt sich die Zersiedelung auf die Wasserbilanz von Talgrundwasserleitern aus?

Viele Talgrundwasserleiter im Mittelland hängen stark von importiertem Wasser aus dem Voralpen- oder Alpenraum ab (siehe auch Abb. 6). Veränderungen in der lokalen direkten Grundwasserneubildung infolge zunehmender Zersiedelung haben damit nur einen relativ kleinen Einfluss auf die Wasserbilanz. Um den Einfluss zunehmender Zersiedelung auf die Grundwasserneubildung zu quantifizieren, wurden auf der Grundlage von Wasserbilanzen kantonaler Fachstellen die Zuflüsse in drei Talgrundwasserleiter im Mittelland abgeschätzt. Die drei Talgrundwasserleiter hängen unterschiedlich stark von der direkten Grundwasserneubildung ab (siehe auch Abb. 17). Als «worst case»-Szenario wurde angenommen, dass in den überbauten Flächen keine Grundwasserneubildung stattfindet, was zu einer Abnahme der Zuflüsse in die Grundwasserleiter von 1 bis 8% führt. Die Zersiedelung hat demnach einen relativ geringen Einfluss auf die Wasserbilanz der Talgrundwasserleiter. Hingegen erhöht sie den Druck auf die Schutzzonen (siehe auch Kasten 12 und Thematische Synthese 2 des NFP61).

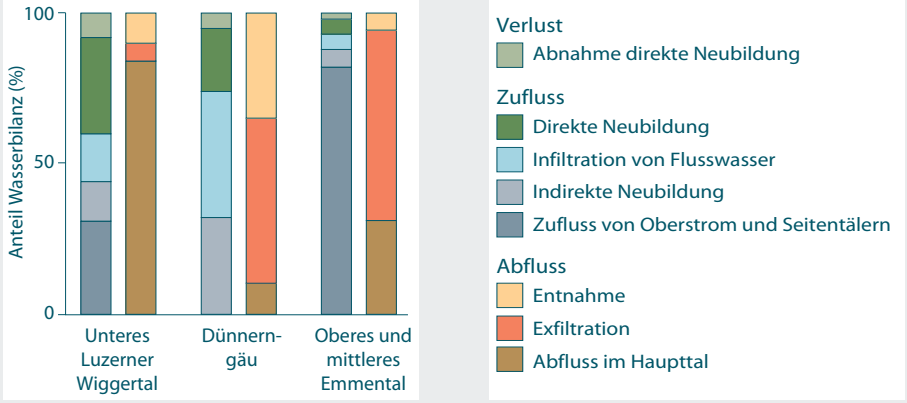


Abb. 17: Auswirkung von Oberflächenversiegelung auf die Wasserbilanz von drei Talgrundwasserleitern.

der Verdunstung kann wiederum zu einer Zunahme der Lufttemperatur und zu einer Abnahme der Luftfeuchtigkeit führen und damit das Stadtklima negativ beeinträchtigen.

Institutionelle Rahmenbedingungen

In der Siedlungswasserwirtschaft setzen sich neue Technologien – nicht zuletzt bedingt durch die lange Lebensdauer der Infrastrukturen – nur zögerlich durch [8]. Entscheidende Auslöser für technische Innovationen sind sich ändernde, oftmals verschärfende gesetzliche Anforderungen an die Wasserver- und Abwasserentsorgung [8]. Die Ausdehnung der Gewässerschutzanforderungen auf organische Spurenstoffe im Zuge der Revision des Gewässerschutzgesetzes und der Gewässerschutzverordnung ist ein Beispiel.
Neben sich ändernden gesetzlichen Anforderungen sind auch sich ändernde gesellschaftliche Anforderungen Auslöser für Veränderungen. Hierzu zählt u.a. der Anspruch einer erhöhten Ver- und Entsorgungssicherheit (siehe auch Handlungsoption Infrastrukturen-1) oder der Anspruch einer regionalen und integralen Betrachtung von Wasserver- und Abwasserentsorgung – idealerweise auf Ebene natürlicher oder technischer Einzugsgebiete (siehe auch Handlungsoption Wasserressourcen-3 und Thematische Synthese 4 des NFP 61).
Sich verändernde gesellschaftliche Anforderungen an die Wasserver- und Abwasserentsorgung spiegeln sich auch im zunehmenden Druck zu mehr Effizienz und Transparenz der Leistungserbringung wider [34]. Dies umfasst auch den zunehmenden Anspruch transparenter Kosten- und Leistungsstrukturen, die die Verknüpfung zwischen den gewünschten Leistungen und den damit verbundenen Kosten herstellt [133]. Nach Vollenweider [134] ist diese Verknüpfung wegen fehlender Instrumente wie z.B. Leistungskennzahlen vielerorts nicht möglich. Der zunehmende Druck zu mehr Transparenz in der Leistungserbringung und der Kosten- und Leistungsstrukturen ist eng verknüpft mit einem zunehmenden Anspruch einer besseren Leistungsbeurteilung und Erfolgskontrolle [133] (siehe auch Handlungsoption Infrastrukturen-2).

Andere Herausforderungen

Eine weitere Herausforderung stellen mögliche Sabotageakte an Trinkwasserversorgungen dar. Gemäss SVGW [135] wurden in der Vergangenheit vereinzelt Drohungen gegen Wasserversorgungen in der Schweiz ausgesprochen, zur Ausführung ist es aber bisher nicht gekommen. Beispiele aus Nachbarländern zeigen jedoch, dass Trinkwasserversorgungen in den letzten Jahren mehrmals Ziel versuchter Sabotageakte waren [135].
Da Wasserversorgungen über weite Strecken offene Systeme sind, sind sie erhöhten Gefahren gegenüber mutwilligen, externen Eingriffen ausgesetzt [135]. Allgemein gilt: Je zentraler ein Element im System, umso grösser ist sein Einfluss auf das Gesamtsystem. Solche zentralen Elemente sind Wasserfassungen, För-

«Ich denke, die wichtigsten Schritte in die Zukunft sind mehr Zusammenarbeit mit Nachbargemeinden und Kanton.»

Ernst Meili
Technischer Leiter,
Wasserversorgung Egg

Mehr dazu im SWIP unter www.nfp61.ch

KASTEN 14 | Horizontale und vertikale Fragmentierung des Wassersektors (SWIP)
Im Rahmen des NFP 61-Forschungsprojekts «Langfristige Planung nachhaltiger Infrastrukturen» untersuchten Lienert et al. (SWIP [132]) die Rolle verschiedener Akteure in der Planung von Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastrukturen im Kanton Zürich. Hierzu kombinierten sie eine klassische Akteursanalyse mit einer sozialen Netzwerkanalyse. Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen eine starke horizontale und vertikale Fragmentierung des Wassersektors (SWIP [132]): So ist die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Sektoren, insbesondere zwischen den Wasserver- und Abwasserentsorgungssektoren, nur sehr schwach ausgeprägt (horizontale Fragmentierung). Einigen Akteuren – wie dem Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) im Kanton Zürich – kommt eine zentrale Schnittstellenfunktion als Vermittler zu; sie interagieren mit vielen anderen Akteuren und vernetzen damit Sektoren, die ohne ihr Interagieren nicht oder nur lose verbunden wären.
Die Zusammenarbeit zwischen Akteuren unterschiedlicher Entscheidungsebenen (lokal, kantonal und national) ist ebenfalls schwach ausgeprägt (vertikale Fragmentierung). So interagieren lokale Akteure – wie Ingenieure und Gemeinden – vor allem mit lokalen, aber weniger mit kantonalen oder nationalen Akteuren. Wie dem AWEL kommt den Tiefbauämtern der Gemeinden eine integrierende Funktion zu, da sie beide Sektoren (Wasserver- und Abwasserentsorgung) vertreten (SWIP [132]).
Obwohl die Ergebnisse des Forschungsprojekts eine starke horizontale und vertikale Fragmentierung des Schweizer Wassersektors bestätigen, konnten sie ebenfalls aufzeigen, dass an einigen zentralen Stellen eine Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Sektoren und Entscheidungsebenen stattfindet – vor allem dank einzelner Akteure, die das Netzwerk zusammenhalten (siehe auch Handlungsoption Wasserressourcen-4). Eine stärkere Zusammenarbeit zwischen den Sektoren sowie zwischen den lokalen, kantonalen und nationalen Entscheidungsebenen wäre aus Sicht der Akteure aber nötig, um den zukünftigen Herausforderungen einer nachhaltigen Wasserver- und Abwasserentsorgung begegnen und die regionale und integrale Betrachtung auf Einzugsgebietsebene sowie die mittel- und langfristige, strategische Planung verbessern zu können (SWIP [132]).

derungs- und Aufbereitungsanlagen, Reservoirs sowie Transport- und Hauptleitungen [135]. Nicht alle diese Elemente sind gegenüber Sabotageakten gleich gefährdet. Gefährdet bezüglich mutwilligen, externen Eingriffen ist die Wasserversorgung insbesondere nach einer allfälligen Aufbereitung [135]. Deshalb ist nicht nur die Sicherheit von Wasserfassungen und Aufbereitungsanlagen, sondern auch die Sicherheit des eigentlichen Verteilnetzes von zentraler Bedeutung [135].

Obwohl man sich gemäss SVGW [135] nicht hundertprozentig gegen Sabotageakte schützen kann, gilt es, planerische, organisatorische, bauliche und betriebliche Massnahmen zu ergreifen, um das Machbare umzusetzen [135]. Die Empfehlungen des SVGW «Sabotageschutz von Trinkwasserversorgungen» bieten hier für die einzelnen Wasserversorgungen ein wichtiges Hilfsmittel für die individuelle Festlegung notwendiger Massnahmen [135] (siehe auch Handlungsoption Infrastrukturen-4).

▶ Eine stärkere Zusammenarbeit zwischen den Sektoren sowie zwischen den lokalen, kantonalen und nationalen Entscheidungsebenen ist nötig, um den zukünftigen Herausforderungen einer nachhaltigen Wasserver- und Abwasserentsorgung begegnen zu können.

Links: Foto Katrin Simonett; Mitte: SWISSKARST; rechts: Foto Patricia Fry

5 Handlungsoptionen einer nachhaltigen SWW

Im folgenden Kapitel werden Handlungsoptionen abgeleitet, um den zuvor analysierten Herausforderungen einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft zu begegnen. Die Herleitung erfolgte zunächst auf der Grundlage der in Kapitel 4 analysierten kausalen Zusammenhänge.

Die Handlungsoptionen wurden dann im Rahmen eines Workshops mit Expertinnen und Experten des NFP 61 diskutiert und vor dem Hintergrund ihrer Forschungsergebnisse und ihres Expertenwissens ergänzt (siehe auch Anhang I, Vorgehen). Hierbei wurde zwischen Handlungsopti-

Tab. 4: Einflussmatrix: Welchen Herausforderungen kann mit welchen Handlungsoptionen und unter Federführung welcher Akteure begegnet werden?

■ Einfluss von Handlungsoption auf Herausforderung

■ Unter Federführung von...

× In Zusammenarbeit mit...

			Herausforderungen								Akteure					
			Zunehmende Trockenperioden	Steigende Wassertemperaturen	Zunehmende Starkniederschläge	Zunehmende Hochwasserereignisse	Alternde Infrastrukturen	Bevölkerungs-, Siedlungs- und Wirtschaftsentwicklung	Institutionelle Rahmenbedingungen	Andere Herausforderungen	Bund	Kantone	Gemeinden	Betreiber	Verbände	Forschung
		Handlungsbedarf Ja/Nein	Ja	Ja/ Nein	Ja/ Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja						
Handlungsoptionen	Infrastrukturen	Förderung eines «zweiten Standbeins»	■							■	■	×		×	×	
		Förderung eines umfassenden Infrastrukturmanagements			■		■	■			×	■	■	×	×	
		Verbesserung der mittel- und langfristigen Planung	■			■	■	■				■		×	×	
		Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Notlagen	■		■	■					×	■	■	×	×	
		Förderung flexibler Infrastrukturen	■				■	■				×		×	■	×
		Förderung der Aufrüstung und/ oder Zusammenlegung von ARAs	■								■	×		×	×	
		Förderung von Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)						■				■	×		×	×
	Wasserressourcen	Verbesserung im Vollzug des planerischen Grundwasserschutzes						■	■		×	■	×		×	
		Förderung einer Wasserressourcen-Bewirtschaftung(splanung)	■	■				■	■		×	■	×			
		Regionale und integrale Betrachtung					■	■	■		×	■	×			
		Verbesserung der Koordination					■		■		■	■				
		Verbesserung der Raumplanung						■	■		×	■	×			
	Wissen	Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen	■	■	■	■	■				■	×	×	×	×	×
		Monitoring	■	■	■	■					■	×	×	×	×	×
		Verbesserung der Wissensintegration, Förderung des Wissens- und Erfahrungsautauschs	■	■	■	■	■	■	■	■	■	×	×	×	×	×
		Prüfung des Potentials natürlicher und künstlicher Wasserspeicher	■			■					×	■	■		×	×
		Verbesserung des Prozessverständnisses	■								×	×			×	■

onen in den Bereichen «Infrastrukturen», «Wasserressourcen» und «Wissen» unterschieden. Die Auswirkungen dieser Handlungsoptionen bez. der Erreichung der Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft (siehe auch Kapitel 3) werden im nachfolgenden Kapitel 6 qualitativ abgeschätzt.

Die hier abgeleiteten Handlungsoptionen sind nicht als Handlungsempfehlungen zu verstehen. Sie zeigen vielmehr die mögliche Spannbreite von Stossrichtungen auf, um den Herausforderungen einer nachhaltigen Wasserversorgung und Abwasserentsorgung begegnen zu können. Mit welchen der hier abgeleiteten Handlungsoptionen welcher Herausforderung begegnet werden kann und welcher Akteur federführend für die Umsetzung der Handlungsoptionen ist, ist in Tabelle 4 zusammenfassend dargestellt.

Handlungsoptionen Infrastrukturen

Infrastrukturen–1: Förderung eines «zweiten Standbeins»

Die Förderung eines «zweiten Standbeins»*[14] geschieht heute vor allem unter Berücksichtigung der Empfindlichkeit von Wasserressourcen gegenüber Verunreinigungen [16, 26, 136]. Zusätzlich sollte in Zukunft aber auch deren Empfindlichkeit gegenüber Trockenperioden bedacht werden. Um eine robuste Redundanz zu erreichen, sollten die voneinander unabhängigen Wasserressourcen unterschiedlich oder mit einer anderen zeitlichen Verzögerung auf Trockenperioden reagieren. Die Erschliessung neuer Wasserbezugsorte sollte dabei auf einer regionalen Analyse des Verhaltens von Grundwasserleitern bei Trockenperioden aufbauen wie für Fallbeispiele im NFP 61-Forschungsprojekt GW-TREND aufgezeigt wurde (siehe auch Handlungsoption Wissen-5). Sie sollte ebenfalls auf einer Analyse der lokalen und regionalen Risikosituationen beruhen, um eine Beeinträchtigung der Grundwasserqualität durch Starkniederschlags- oder Hochwasserereignisse zu vermeiden [30] (siehe auch Handlungsoption Infrastrukturen-4).

Infrastrukturen–2: Förderung eines umfassenden Infrastrukturmanagements

Ein umfassendes Infrastrukturmanagement gewährleistet den langfristigen Erhalt der Leistungsfähigkeit der Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsinfrastrukturen [17, 26]. Dabei ist es das Ziel, die Bewirtschaftung, Erweiterung und Erneuerung der Infrastrukturen so zu steuern, dass mit optimalem Ressourceneinsatz und minimalen Risiken die definierten Leistungen langfristig erfüllt werden [137]. Ein umfassendes Infrastrukturmanagement umfasst a) die Inventarisierung der Infrastrukturen inkl. Alter, Anschaffungs- und Wiederbeschaffungswerten, Eigentumsverhältnissen etc., b) die Beurteilung des Zustands der Infrastrukturen, c) die Massnahmenplanung und -koordination, d) die Finanz- und Gebührenplanung, e) die Erarbeitung einer Infrastrukturstrategie, f) die Festlegung von Leistungszielen und Schlüsselindikatoren und g) die Sicherstellung der Fort- und Nachführung [137]. Die Förderung eines umfassenden Infrastrukturmanagements kann z.B. auf dem von der Wasser-Agenda 21 in Auftrag gegebenen und in Zusammenarbeit mit Bund, Kantonen und Fachverbänden erarbeiteten «Handbuch kommunales Infrastrukturmanagement» aufbauen [137].

Infrastrukturen–3: Verbesserung einer mittel- und langfristigen Planung

Eine mittel- und langfristige Planung der Infrastrukturen (siehe auch SVGW [138]) ermöglicht die Optimierung der Wasserver- und Abwasserentsorgung in Bezug auf die im Forschungsprojekt «Langfristige Planung nachhaltiger Infrastrukturen» (SWIP [22]) entwickelten und in Kapitel 3 zusammengestellten Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft. Da insbesondere netzgebundene Infrastrukturen Planungshorizonte von 50 und mehr Jahren aufweisen, gilt es, die mit der Planung der Infrastrukturen verbundenen Unsicherheiten zu berücksichtigen und transparent in den Entscheidungsprozess einzubeziehen [139]. Besonders relevant sind dabei die Unsicherheiten aufgrund begrenzter Datenverfügbarkeit oder die Unsicherheiten in Bezug auf zukünftige sozioökonomische Entwicklungen. Die mittel- und langfristige Planung der Infrastrukturen sollte auf der Wasserressour-

▶ Die Handlungsoptionen wurden im Rahmen eines Workshops mit Expertinnen und Experten des NFP 61 diskutiert.

Alle Fotos: Patricia Fry

«Wir haben gesehen, dass die Entscheidungsanalyse eine grosse Hilfe ist, wenn es darum geht, komplexe Entscheidungen zu treffen. Dabei ist es wichtig, die subjektiven Präferenzen und Meinungen der Akteure zusammen mit den objektiven Daten in den Entscheidungsprozess einzubeziehen.»

Judit Lienert
Co-Projektleiterin SWIP
Eawag

Mehr dazu im SWIP unter www.nfp61.ch

KASTEN 15 | SWIP-Ansatz zur langfristigen Planung nachhaltiger Infrastrukturen

Im Rahmen des NFP 61-Forschungsprojekts «Langfristige Planung nachhaltiger Infrastrukturen» wurden Instrumente und Methoden entwickelt, um die langfristige Planung für Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsinfrastrukturen zu verbessern. Die entwickelten Instrumente und Methoden unterstützen den Übergang von einem problembasierten «Reparieren» zum vorausschauenden Planen der Infrastrukturen. Zusammenfassend umfasst der SWIP-Ansatz zur langfristigen Planung nachhaltiger Infrastrukturen folgende Schritte (SWIP [22]):

1 **Entscheidungsproblem und Systemgrenzen definieren.** In diesem ersten Schritt wird zunächst das Entscheidungsproblem definiert. Mithilfe einer Akteurs- und Netzwerksanalyse werden anschliessend diejenigen Akteure identifiziert, die eine Rolle im Planungsprozess von Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsinfrastrukturen spielen. Dieser Schritt beinhaltet auch die Erarbeitung von Zukunftsszenarien, um Unsicherheiten in Bezug auf die künftigen sozioökonomischen Entwicklungen in dem Planungsprozess berücksichtigen zu können («Boom», «Doom», «Lebensqualität» und «Status quo»).
2 **Ziele definieren.** In diesem zweiten Schritt werden wichtige Ziele einer guten Wasserversorgung und sicheren Abwasserentsorgung identifiziert und alle Teilziele mithilfe von sog. «Attributen» (Indikatoren) operationalisiert. Die Operationalisierung dient der nachfolgenden Abschätzung, wie gut eine Handlungsalternative das jeweilige Teilziel erfüllt (siehe auch Schritt 4).
3 **Alternativen entwickeln.** In diesem dritten Schritt werden Handlungsalternativen (Handlungsoptionen) mithilfe eines sog. «morphologischen Kastens» (strategy generation table) generiert. Diese unterscheiden sich hinsichtlich verschiedener Ausprägungen: Organisationsstruktur, finanzieller Strategie, geografischer Ausdehnung, Unterhalt und Betrieb sowie Wasser- und Abwassertechnologie und bilden ein breites Spektrum unterschiedlicher (zentraler bis dezentraler) Alternativen zur Wasserversorgung und Abwasserentsorgung.
4 **Konsequenzen abschätzen.** In diesem vierten Schritt wird für jede Handlungsalternative abgeschätzt, wie gut das jeweilige Teilziel bzw. Attribut unter den verschiedenen Zukunftsszenarien erreicht wird. Die Abschätzung der Konsequenzen erfolgt mittels Experteneinschätzungen oder Modellberechnungen.
5 **Präferenzen erheben.** In diesem fünften Schritt werden mithilfe von Interviews die unterschiedlichen «subjektiven Präferenzen» der im Planungsprozess involvierten Akteure erhoben. Die Erhebung der Präferenzen gibt Aufschluss über die Wichtigkeit, die die verschiedenen Akteure den unterschiedlichen Zielen einer guten Wasserversorgung und sicheren Abwasserentsorgung beimessen (siehe Abb. 18).
6 **Prognosen mit Präferenzen kombinieren.** In diesem Schritt werden die «subjektiven Präferenzen» der Akteure mit den «objektiven Prognosen» der Modelle oder der Expertinnen und Experten verknüpft, um die Handlungsalternativen zu identifizieren, die sich als besonders gut für die verschiedenen Akteure und besonders robust unter verschiedenen Zukunftsszenarien erweisen. Die Verknüpfung erhöht die Transparenz der Entscheide und unterstützt eine kritische Analyse der Ursachen unterschiedlicher Bewertungen durch die im Planungsprozess involvierten Akteure. Die kritische Analyse wiederum kann die Generierung neuer, konsensfähigerer Alternativen stimulieren, die in einem nachfolgenden demokratischen Entscheidungsprozess grössere Chancen auf eine Umsetzung haben [140] (IWAQA [36], SWIP [22]).
7 **Umsetzung, Monitoring und Überprüfung.** Dieser Schritt war nicht Ziel des Forschungsprojekts. Im Rahmen von Nachfolgeprojekten soll die Lücke zwischen theoretischer und praktischer Anwendung jedoch geschlossen werden (www.eawag.ch/swip).

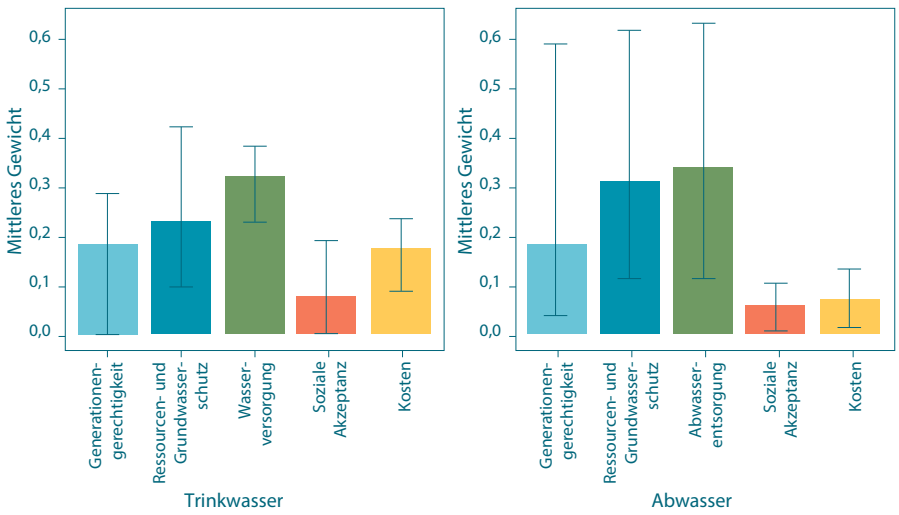


Abb. 18: Mittlere Gewichte für je zehn Akteure aus dem Trink- und Abwassersektor für die fünf Hauptziele. Farbige Kästen stehen für das mittlere Gewicht von über zehn Akteuren, die Fehlerbalken für die Abweichung zwischen den mittleren Gewichten der individuellen Akteure (SWIP [125]).

cen-Bewirtschaftungsplanung (siehe auch Handlungsoption Wasserressourcen-2) und der Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Notlagen (siehe auch Handlungsoption Infrastrukturen-4) beruhen.

Im Rahmen des NFP 61-Forschungsprojekts «Langfristige Planung nachhaltiger Infrastrukturen» wurden Instrumente und Methoden entwickelt, um die mittel- und langfristige Planung unter Berücksichtigung von Unsicherheiten (infolge begrenzter Daten und zukünftiger Entwicklungen) und unter Einbezug von Akteuren der Siedlungswasserwirtschaft zu optimieren (siehe auch Kasten 15).

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts zeigen, dass mit a) der Berücksichtigung bestehender Unsicherheiten, b) der Verwendung relevanter Zukunftsszenarien und c) dem Einbezug unterschiedlicher Akteure in den Planungs- und Entscheidungsprozess robuste Handlungsoptionen identifiziert werden können (siehe auch Abb. 19).

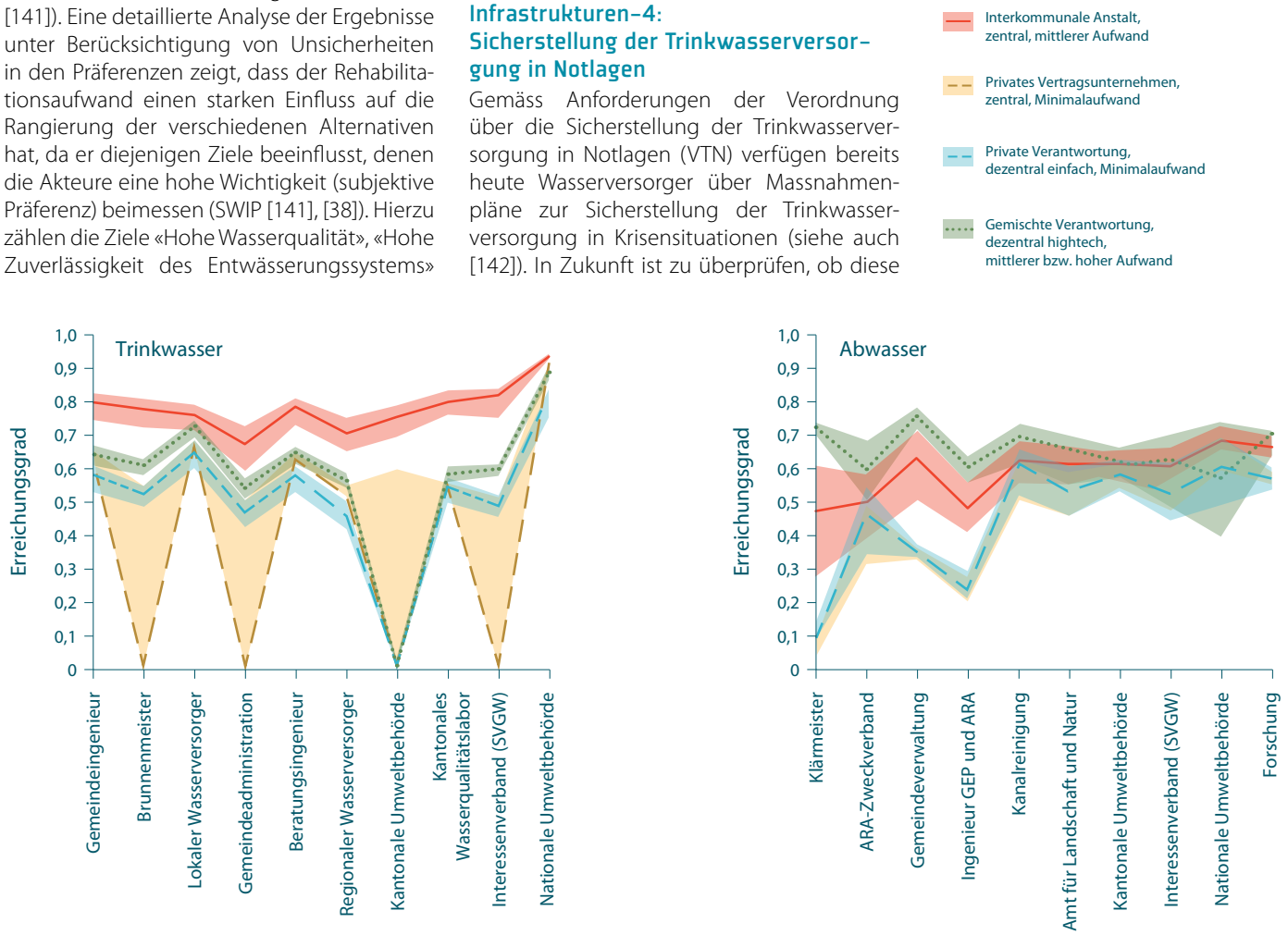
Die Ergebnisse der multikriteriellen Entscheidungsanalyse für Trinkwasser sind in Abb. 19 beispielhaft für die Fallstudie dargestellt. Im Szenario «Status quo» schnitt die Alternative A1 (interkommunale Anstalt, zentrale Versorgung, mittlerer Sanierungsaufwand) am besten ab (siehe rote Kurve in Abb. 19, Trinkwasser). Sie erzielte bei allen zehn Akteuren die höchsten Werte (zwischen 0,7 und 0,95; die Werte reichen von 0 = keines der Ziele erreicht zu 1 = alle Ziele vollständig erreicht) (SWIP [141]). Eine detaillierte Analyse der Ergebnisse unter Berücksichtigung von Unsicherheiten in den Präferenzen zeigt, dass der Rehabilitationsaufwand einen starken Einfluss auf die Rangierung der verschiedenen Alternativen hat, da er diejenigen Ziele beeinflusst, denen die Akteure eine hohe Wichtigkeit (subjektive Präferenz) beimessen (SWIP [141], [38]). Hierzu zählen die Ziele «Hohe Wasserqualität», «Hohe Zuverlässigkeit des Entwässerungssystems» und «Tiefe zukünftige Rehabilitationslast». Im Mittel schnitten daher diejenigen Alternativen am besten ab, die eine verlässliche Trinkwasserhygienisierung und ein proaktives Rehabilitationsmanagement (≥1% jährlicher Ersatz gemäss Zustand der Leitungen) vorsehen.

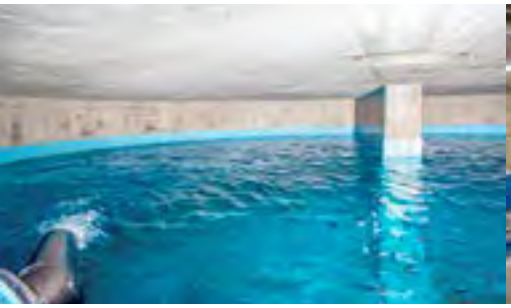
Die Ergebnisse für Abwasser sind ebenfalls in Abb. 19 dargestellt. Im Szenario «Status quo» – aber auch in allen anderen hier nicht dargestellten Szenarien – schnitt die Alternative 4 (gemischte Verantwortung, dezentrale Hightech-Abwasserentsorgung, hoher Sanierungsaufwand [siehe grüne Kurve in Abb. 19, Abwasser]) im Mittel am besten ab (SWIP [141]). *«Die stark voneinander abweichenden Werte der lokalen Akteure lassen sich mit deren individuellen Präferenzen begründen. So haben der Klärwerkmeister (Nr. 1) und der lokale Ingenieur (Nr. 4) dem Ziel ‹Hohe Generationengerechtigkeit› ein besonders hohes Gewicht beigemessen (Details in SWIP: Zheng et al. in prep.). Je höher der Rehabilitationsaufwand bei einer Alternative ausfiel und je höher die Flexibilität war, desto besser schnitten die Alternativen ab. Anderen Akteuren, z.B. dem Vertreter des kantonalen Umweltschutzamtes (Nr. 6), waren hingegen die Ziele ‹Guter chemischer Zustand der Gewässer› und ‹Geringe Verunreinigung des Grundwassers› besonders wichtig. Da die Alternativen für diese Ziele jedoch sehr ähnlich abschnitten, gab es kaum Unterschiede in der Bewertung»* (SWIP [141]).

Infrastrukturen–4: Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Notlagen

Gemäss Anforderungen der Verordnung über die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Notlagen (VTN) verfügen bereits heute Wasserversorger über Massnahmenpläne zur Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Krisensituationen (siehe auch [142]). In Zukunft ist zu überprüfen, ob diese

Abb. 19: Rangierung von vier von insgesamt elf Alternativen für den Trinkwasser- und Abwassersektor im Fallstudiengebiet «Mönchaltorfer Aa» für zehn Akteure im Szenario «Status quo». Die Linien verbinden die Mittelwerte (Median), die Farbflächen stellen den Unsicherheitsbereich dar. Dieser ist auf die Unsicherheit der Attributprognosen zurückzuführen. 0 = schlechtester Wert, Ziele nicht erreicht; 1= bester Wert, alle Ziele vollständig erreicht. Die Alternativen A1 bis A4 werden detaillierter in SWIP [141] beschrieben.





▶ Im Projekt SWIP wurden Instrumente und Methoden entwickelt, um die langfristige Planung für Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsinfrastrukturen zu verbessern.

Alle Fotos: Max Maurer

«Regionale Ansätze sind häufig interessant. Vereinzelt kann es in ländlichen Regionen Sinn machen, dezentrale Lösungen zu prüfen. Wir tun dies in einer kleinen Gemeinde, wo man vielleicht schon vor 30 Jahren besser dezentrale Lösungen aufgebaut hätte. Dort möchten wir dann gerne die Gemeindeleute einbeziehen.»

Martin Würsten
Leiter Amt für Umwelt
Kanton Solothurn

Mehr dazu im SWIP unter www.nfp61.ch

auch bei anderen, nicht in der VTN definierten Risikosituationen genügen. Dazu gehören neben Starkniederschlags- und Hochwasserereignissen [30], Stromausfällen und Stör- und Unfällen auch lang anhaltende Trockenperioden mit ausserordentlichem Wasserbedarf (z.B. für Bewässerung, Kühlung und Löscheinsätze) sowie Wassermangel infolge versiegender Quellen, sinkender Grund- und Seewasserspiegel oder sinkender Abflussraten [26]. Entsprechende Überwachungs-, Alarm- und Bereitschaftsdispositive ermöglichen den Wasserversorgern, in solchen Krisensituationen die richtigen Entscheidungen zu treffen und ausserordentliche Ereignisse zu bewältigen [26], [17], [136]. In Verbindung mit Vorsorgemassnahmen für den Sabotageschutz (siehe auch [135]) bilden entsprechende Dispositive ein solides Fundament zur Sicherstellung der Trinkwasserversorgung auch in Krisensituationen (siehe auch [143]).

Infrastrukturen–5: Förderung von flexiblen Infrastrukturen

Angesichts der geringen Anpassungsfähigkeit der heutigen netzgebundenen Infrastrukturen sind flexiblere Lösungen anzustreben [28]. Diese sollten sich in die bestehenden Systeme integrieren, um in der Zukunft neue Handlungsoptionen zu eröffnen [28]. Beispiele für solche Optionen sind der Einsatz moderner Brandschutzkonzepte in Randquartieren (SWIP [125]), die separate Erfassung und Behandlung von Urin (siehe auch Kasten 16) oder der zentrale Betrieb dezentraler Anlagen.

Infrastrukturen–6: Förderung einer Aufrüstung oder Zusammenlegung von Abwasserreinigungsanlagen (ARA)

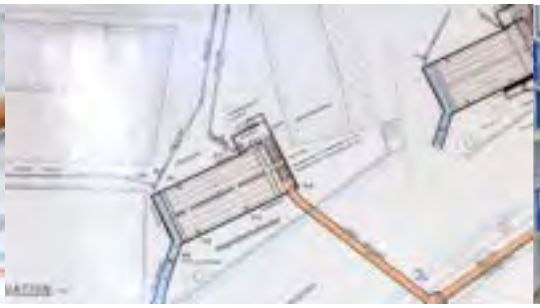
Die geringere Wasserführung der Fliessgewässer infolge zunehmender Trockenperioden und sich verändernder Abflussregime kann zu ungenügenden Verdünnungen von gereinigtem Abwasser führen [16]. Vor diesem Hintergrund kommt der Leistung und dem Standort von ARA eine neue Bedeutung zu. Kleinere Anlagen zeigen oft schlechtere Reinigungsleistungen und sind spezifisch teurer als grössere Anlagen [7]. Durch die gezielte Zusammenlegung von ARA können ausgewählte Fliessgewässer von konstanten ARA-Einleitungen befreit und die Gewässerqualität langfristig verbessert werden (siehe auch [145]).[15]
Jedoch sollte vor einer Zusammenlegung abgeklärt werden, ob bei geringer Wasserführung die Wasserbilanz kleinerer Einzugsgebiete beeinträchtigt wird, wenn eine ARA-Einleitung in grössere Fliessgewässer ausserhalb des Einzugsgebietes geplant ist. Anlagen, welche in Gewässer einleiten, die direkt oder indirekt (via Uferfiltration) als Trinkwasserressourcen genutzt werden [66], benötigen besonders viel Aufmerksamkeit bei der Einzugsgebietsplanung.
Die neuen Gewässerschutzvorschriften zur Elimination von Mikroverunreinigungen in ARA bieten hier eine gute Handhabe, um entsprechende Massnahmen planen und umsetzen zu können [66].

Infrastrukturen–7: Förderung von Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)

Massnahmen, welche bei Regenwetter die Abwasserableitung reduzieren oder verzögern, werden international unter dem Begriff

KASTEN 16 | Separate Erfassung und Behandlung von Urin

Urin macht weniger als 0,5% der Abwassermenge aus. Er enthält aber über 75% des Stickstoffs, 50% des Phosphors und einen grossen Teil der Hormone und Pharmazeutika, die insgesamt in ARA anfallen [27]. Urin trägt damit substanziell zur Belastung der ARA bei [144]. Nach Maurer [28] lässt sich die Technologie sehr flexibel in die bestehende Infrastruktur integrieren. Mit einer gezielten Bewirtschaftung des Urins könnten im Mischsystem auch bei Regen Belastungsspitzen in den ARA ausgeglichen werden [27]. Mit einer Abtrennung und separaten Behandlung von Urin wiederum könnte die Nährstoffelimination in ARA aufgehoben und – als positiver Nebeneffekt – die Nährstoffe nach einer angemessenen Aufbereitung als Dünger in der Landwirtschaft ausgebracht werden [27].



«Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)» zusammengefasst. Ziel dieser Massnahmen ist es, a) die maximale Wassermenge in der Kanalisation und im nachfolgenden Fliessgewässer zu vermindern, b) die Dauer des Abfliessens zu verlängern und dadurch c) mehr Mischwasser einer Reinigung zuzuführen [11]. Die Massnahmen sind allerdings nicht geeignet, um die Auswirkungen von Extremereignissen – wie kurze sehr intensive oder anhaltende Starkregenereignisse – zu mindern.

Viele intelligent integrierte SUDS-Massnahmen führen darüber hinaus zu einer Begrünung von Siedlungen, welche im Sommer die Auswirkungen höherer Lufttemperatur und niedrigerer Luftfeuchtigkeit mindern, das Stadtklima verbessern und die Lebensqualität anheben. Hier bedarf es einer intensiveren Zusammenarbeit von Städteplanern, Architekten und Verantwortlichen für die Siedlungsentwässerung.

Handlungsoptionen Wasserressourcen

Wasserressourcen-1: Verbesserung im Vollzug des planerischen Grundwasserschutzes

Trinkwasserfassungen lassen sich nur mit rechtsgültig ausgeschiedenen Grundwasserschutzzonen dauerhaft schützen [136]. Die Gewässerschutzgesetzgebung verpflichtet die Kantone seit 1971, rund um Fassungen von öffentlichem Interesse verbindliche Grundwasserschutzzonen auszuscheiden, im zugehörigen Reglement die erforderlichen Schutzmassnahmen festzulegen und für deren Einhaltung zu sorgen [136]. In vielen Kantonen ist die gesetzlich erforderliche Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen noch nicht abgeschlossen [17] oder bereits ausgeschiedene Schutzzonen, insbesondere solche, welche vor Inkrafttreten der neuen Gewässerschutzverordnung (1998) und der Wegleitung Grundwasserschutz (2004) ausgeschieden wurden, entsprechen nicht mehr den rechtlichen Anforderungen an Grundwasserschutzzonen.

Um auch künftig über Trinkwasser in der benötigten Qualität und Quantität zu verfügen, sollten für alle bestehenden Fassungen von öffentlichem Interesse rechtskonforme Grundwasserschutzzonen definitiv ausgeschieden und bereits ausgeschiedene Schutzzonen regelmässig überprüft werden. Zur Sicherstellung der künftigen Trinkwasserversorgung sollten darüber hinaus die notwendigen Standorte durch Grundwasserschutzareale gesichert werden [17]. Um sich zukünftigen klimatischen und gesellschaftlichen Veränderungen (z.B. zunehmender oder abnehmender Wasserverbrauch etc.) flexibel anpassen zu können, sollte eine genügend grosse Anzahl an Standorten erhalten bleiben (siehe auch Thematische Synthese 2 des NFP 61).

Wasserressourcen-2: Förderung einer Wasserressourcen-Bewirtschaftung(splanung)

Eine Planung der Bewirtschaftung der Wasserressourcen auf Einzugsgebietsebene ermöglicht die langfristige Sicherung eines Gleichgewichts zwischen Wasserdargebot und Wasserbedarf [26], [16], [17]. Dies beschränkt sich nicht nur auf die öffentliche Wasserversorgung (für den Trink-, Brauch- und Löschwasserbedarf), sondern umfasst im Sinne eines sektorenübergreifenden Ansatzes alle relevanten Schutz- und Nutzungsinteressen [26].

Um die Bewirtschaftung der Wasserressourcen planen zu können, sollte zunächst die Situation der aktuell und künftig nachhaltig nutzbaren Wasserressourcen (Quantität und Qualität) und der aktuell und künftig angestrebten Wassernutzungen – idealerweise auf Einzugsgebietsebene – analysiert werden [26] (siehe auch Handlungsoption Wissen-1). Dies setzt verbesserte Kenntnisse der verfügbaren Wasserressourcen und deren Verhalten unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen voraus. Letzteres gilt insbesondere für Grundwasser (siehe auch Handlungsoption Wissen-5). Die im Rahmen der NFP 61-Forschungsprojekte entwickelten Konzepte bilden hier eine wertvolle Grundlage (SWISSKARST [20]).

Auf der Grundlage dieser Situationsanalyse sollten Risikogebiete mit einem potenziellen Ungleichgewicht zwischen Wasserdargebot und -bedarf identifiziert werden [26]. Insbesondere für diese Risikogebiete sollte anschliessend eine Planung der Wasserressourcenbewirtschaftung unter Einbezug aller betroffenen Akteure und Interessen erfolgen, um aktuelle und künftige Nutzungskonflikte zu vermeiden, zu lösen oder – falls erforderlich – die richtigen Prioritäten zu setzen [26]. Die

▶ Die entwickelten Instrumente und Methoden unterstützen den Übergang von einem problembasierten «Reparieren» zum vorausschauenden Planen der Infrastrukturen.

Links und Mitte: Fotos Max Maurer; rechts: SWIP

▶ Die Analyse der aktuell und künftig nachhaltig nutzbaren Wasserressourcen sollten Grundlage für die Vergabe von Konzessionen für die aktuell und künftig angestrebten Wassernutzungen sein. Dies impliziert die Überprüfung der Wasserentnahmen durch die zuständigen Bewilligungsbehörden.

Links und Mitte: Fotos Max Maurer;
rechts: Foto Daniel Hunkeler

«Die Zusammenarbeit der verschiedenen Sektoren Abwasser und Trinkwasser ist sehr wichtig. Was eine Seite liefert, muss die andere entsorgen. Wo die Trinkwasserleitung ist, ist wahrscheinlich auch die Abwasserleitung. Durch mehr Zusammenarbeit könnten wir Geld sparen und effizienter werden. Es ist wichtig, dass wir offen sind gegenüber der anderen Branche, denn am Schluss sitzen wir im gleichen Boot.»

Thomas Bodmer
Stv. techn. Leiter Wasserversorgung, Klärwerkmeister Mönchaltorf

Mehr dazu im SWIP unter www.nfp61.ch

Wasserressourcen-Bewirtschaftungsplanung unterstreicht die in der Thematischen Synthese 4 des NFP 61 entwickelten Vorschläge einer stärkeren Integration und Koordination der Gewässerbewirtschaftung.
Die Analyse der aktuell und künftig nachhaltig nutzbaren Wasserressourcen sollte ebenfalls Grundlage für die Vergabe von Konzessionen für die aktuell und künftig angestrebten Wassernutzungen sein. Letzteres impliziert auch die Überprüfung der Wasserentnahmen durch die zuständigen Bewilligungsbehörden (siehe auch Thematische Synthese 2 des NFP 61).

Wasserressourcen-3: Regionale und integrale Betrachtung

Die Herausforderungen, denen sich eine nachhaltige Siedlungswasserwirtschaft heute und in Zukunft stellen muss, sind regional sehr unterschiedlich. Entsprechend sollten auch die Lösungen den regionalen Situationen angepasst werden. Dort, wo Gegensätze zwischen relevanten Schutz- und Nutzungsinteressen oder Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Sektoren in einer Region bestehen oder in Zukunft bestehen könnten, sollten die Herausforderungen aus einer integralen Sicht angegangen werden [146], [147].
Diese regionale und integrale Betrachtung setzt eine Analyse der Situation und eine Festlegung des Einzugsgebiets voraus [146]. Im Rahmen der Situationsanalyse sollten ausgehend von den sektoralen Herausforderungen die Wechselwirkungen, Abhängigkeiten, Konflikte und Synergien zwischen den Sektoren untersucht und daraus der Koordinationsbedarf innerhalb und zwischen den Sektoren abgeleitet werden [146], [147] (siehe auch Handlungsoption Wasserressourcen-4). Dabei sollten auch die Ziele, die auf regionaler Ebene erreicht werden sollen, festgelegt werden.
Die Festlegung der Einzugsgebiete, in denen sich diese Zusammenhänge abspielen, sollte sich primär an natürlichen Einzugsgebieten (z.B. der oberirdischen und unterirdischen Gewässer) oder technischen Einzugsgebieten (z.B. der Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastrukturen einer Region) orientieren und nur ergänzend an politisch-administrativen Räumen [146], [147]. Die Situationsanalyse und die Festlegung dieser funktionalen Räume bilden die Grundlage für die Wasserressourcen-Bewirtschaftungsplanung, die als Teil eines integrierten Einzugsgebietsmanagements (IEM) zu sehen ist [26] (siehe auch Thematische Synthese 4 des NFP 61).
Beispiele aktueller und künftiger Nutzungskonflikte sind die zunehmenden Wärmeeinleitungen in die Gewässer (Grundwasser und Oberflächengewässer). Da sich die Wassertemperaturen insbesondere der Seen und Fliessgewässer sowie des flussnahen Grundwassers den zunehmenden Lufttemperaturen anpassen werden, werden sich die Konflikte durch die zunehmende thermische Nutzung der Gewässer verstärken (siehe auch Thematische Synthese 2 des NFP 61). Die aktuellen und künftigen Konflikte sollten im Rahmen einer Wasserressourcen-Bewirtschaftungsplanung auf Einzugsgebietsebene mittel- und langfristig gelöst werden. Gleiches gilt für den zunehmenden Siedlungsdruck im Bereich der Grundwasserschutzzonen, aktuelle und künftige Konflikte zwischen Hochwasserschutz, Revitalisierung und Trinkwassernutzung oder Nutzungskonflikte zwischen landwirtschaftlicher Produktion und Trinkwasserversorgung (siehe auch Handlungsoptionen Wasserressourcen-1 und Wasserressourcen-5, Thematische Synthese 2 des NFP 61 und Kasten 12).

Wasserressourcen-4: Verbesserung der Koordination

Auf Bundesebene sind das Bundesamt für Umwelt (BAFU) (Wasserressourcen) und das Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (BLV) (Trinkwasser) für das Thema Wasserversorgung und das Bundesamt für wirtschaftliche Landesversorgung (BWL) für das Thema Notwasserversorgung zuständig. Involviert ist ausserdem das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), wenn es a) um den Schutz der Wasserressourcen vor Beeinträchtigung (Nährstoffe, Pestizide etc.) und b) um die Nutzung der Wasserressourcen z.B. zur Bewässerung geht. Diese Aufteilung der Zuständigkeiten kann zu Inkonsistenzen und Widersprüchen führen [17]. Auf Bundesebene sollten daher die horizontale Koordination der verschiedenen Bundesämter verbessert, einheitliche Standpunkte entwickelt und diese gegenüber anderen Akteuren vertreten werden [136]. Auf kantonaler Ebene ergibt sich teilweise ein analoger Koordinationsbedarf (siehe auch Thematische Synthese 4 des NFP 61 und [147]).

Wie die Ergebnisse des NFP 61-Forschungsprojekts «Langfristige Planung nachhaltiger Infrastrukturen» gezeigt haben (SWIP [132]; siehe auch Kasten 14), sollte unter Berücksichtigung der bestehenden Zuständigkeiten im Bereich der Wasserver- und Abwasserentsorgung ebenfalls die vertikale Koordination zwischen Bund, Kantonen, Gemeinden und Wasserver- und Abwasserentsorgern verbessert werden (siehe auch Thematische Synthese 4).

Wasserressourcen–5: Verbesserung der Raumplanung

Das Raumplanungsrecht fordert eine sektorenübergreifende Abstimmung raumwirksamer Tätigkeiten, wenn diese einander ausschliessen, behindern, bedingen oder ergänzen (Raumplanungsverordnung [RPV], Art. 2). Raumwirksam sind Tätigkeiten, welche die Nutzung des Bodens oder die Besiedlung des Landes verändern oder dazu bestimmt sind, die jeweilige Nutzung oder Besiedlung zu erhalten (RPV, Art. 1 Abs. 1). Im Sinne der RPV sollten die Anliegen der Wasserressourcenbewirtschaftung vorausschauend mit anderen raumplanerischen Interessen abgestimmt und in den Richt- und Nutzungsplänen verankert werden. Um aktuelle und künftige Interessenkonflikte möglichst zu vermeiden, zu lösen oder – falls erforderlich – die richtigen Prioritäten zu setzen (z.B. zunehmender Siedlungsdruck in Grundwasserschutzzonen), sollten unterschiedliche Schutz- und Nutzungsinteressen frühzeitig identifiziert und durch die zuständigen Behörden des Gewässerschutzes (inkl. Trinkwasserschutzes etc.) und der Raumplanung gegeneinander abgewogen werden. Dies schliesst auch die Identifizierung aktueller und künftiger Naturgefahren (z.B. Hochwassergefahr in Karstregionen) ein.
Da sich die Nutzung des Raums schon länger nicht mehr nur auf die Erdoberfläche beschränkt (viele Versorgungssysteme wie z.B. die Wasserver- und Abwasserentsorgung liegen im Untergrund), sollte die Raumplanung in Zukunft verstärkt dreidimensional erfolgen (Tiefenplanung) und damit eine sektorenübergreifende Abstimmung raumwirksamer Tätigkeiten auch im Untergrund gewährleisten [148]. Die Nutzung des Untergrundes für die Trinkwassergewinnung sollte dabei einen hohen Stellenwert einnehmen.

Handlungsoptionen Wissen

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserver- und Abwasserentsorgung werden heute verstärkt diskutiert. Gleiches gilt für die Alterung der Wasser- und Abwasserinfrastrukturen. Dennoch sind in manchen Bereichen die Wissensgrundlagen noch nicht ausreichend, um konkrete Massnahmen festlegen zu können. Auch sind die neuen Herausforderungen, die sich aus dem globalen Wandel und dem Klimawandel ergeben, noch nicht ausreichend in die Wissensbestände integriert und kommuniziert worden. Die nachfolgenden Handlungsoptionen zielen daher darauf ab, Wissenslücken zu schliessen und Unsicherheiten zu reduzieren, um so die Voraussetzungen zu schaffen, Massnahmen besser planen und umsetzen zu können.

Wissen–1: Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen

Messnetze erfassen heute die für eine zuverlässige Wasserressourcenbewirtschaftung erforderlichen Daten vielfach nur punktuell [26] (siehe auch Handlungsoption Wasserressourcen-2). Dabei sind flächendeckende Übersichten zum Wasserdargebot und -bedarf einer Region (Quantität, Qualität) Voraussetzung, um im Rahmen einer langfristigen Wasserressourcen-Bewirtschaftung(splanung) die geeigneten Massnahmen planen und umsetzen zu können [26]. Gleiches gilt für die mittel- und langfristige Planung von Wasserinfrastrukturen. Hier erschweren die kleinräumigen Strukturen der Wasserver- und Abwasserentsorgung sowie die fehlenden Vorgaben auf Bundesebene eine flächendeckende Übersicht über die qualitativen, quantitativen, finanziellen und organisatorischen Aspekte der Wasserversorgung [136] und Abwasserentsorgung [8].
Um Wasserressourcen und -infrastrukturen langfristig bewirtschaften zu können, müssen Daten zum Zustand der Wasserressourcen (Quantität, Qualität) und der Wasserver- und Abwasserentsorgungen und deren Infrastrukturen systematisch erhoben, aktualisiert und verfügbar gemacht werden. Die Antwort zum Postulat Walter [26] weist diese Rolle den Kantonen zu. Bei konzessionierten privaten Wasserversorgungen (Industrie, Gewerbe, Landwirtschaft) sollten die Kantone darüberhinaus sicherstellen, dass die Entnahmemengen [26] sowie der Zustand der Wasserinfrastrukturen erfasst und gemeldet werden. Gleiches gilt für private Abwasserentsorgungen wie Liegenschaftsentwässerungen, Versickerungs-, Industrie- und Vorbehandlungsanlagen [8].

Wissen–2: Monitoring

Manche klimabedingten Veränderungen, wie z.B. eine veränderte Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen (Starkniederschlag, Hoch- und Niedrigwasser etc.), sind erst nach langer Zeit nachweisbar. Auch Landnutzungsänderungen wirken sich oft nur langsam auf Wassermengen und -qualität aus. Es besteht daher die Gefahr, dass Veränderungen zu spät erkannt oder falsch eingeschätzt werden [16]. Um Veränderungen frühzeitig erkennen und geeignete Massnahmen rechtzeitig einleiten zu können (z.B. Auswirkungen steigender Wassertemperaturen auf die Grundwasserqualität), sollten bestehende Monitoringsysteme weitergeführt sowie Datenreihen entsprechend archiviert und verfügbar gemacht werden. Sofern mit diesen Systemen wichtige klimabedingte Veränderungen nicht erkannt

werden können, sollten die Verbesserung des Monitorings oder der Aufbau neuer Systeme geprüft werden. Dies gilt insbesondere für das Monitoring von Quellen. Fehlende Datenreihen erschweren hier oft die Abschätzung der Empfindlichkeit dieser Systeme gegenüber klimabedingten Veränderungen.
Forscherinnen und Forscher der NFP 61-Forschungsprojekte GW-TEMP [149] und RIBA-CLIM [51] empfehlen u.a. ein Langzeitmonitoring der Redoxbedingungen von Uferfiltrationssystemen, «die durch einen direkten hydraulischen Anschluss des Flusses ans Grundwasser sowie durch ein Einzugsgebiet ohne Rückhaltebecken charakterisiert sind. Langzeitdaten erlauben, adäquate Massnahmen zum richtigen Zeitpunkt und unter Berücksichtigung der ortspezifischen hydrogeologischen Verhältnisse zu ergreifen» (RIBA-CLIM [51]).
Neben dem Aufbau und Betrieb langfristiger Monitoringsysteme sollte auch die Umsetzung von Qualitätssicherungssystemen für Wasserversorgungen – z.B. nach HACCP-Grundsätzen (Hazard Analysis and Critical Control Points) – verbessert werden (siehe z.B. auch SVGW [150]). Neue Sensorentwicklungen erlauben es, aussagekräftigere Parameter (z.B. Feinpartikelgehalt) kontinuierlich zu messen und gemessene Daten automatisch zu übertragen, sodass Wasserversorgungen rascher auf mögliche Gefahren reagieren können.

Wissen–3: Verbesserung der Wissensintegration, Förderung des Wissens- und Erfahrungsaustauschs

Auf kantonaler, regionaler und lokaler Ebene sind bereits viele Daten zu den Wasserressourcen und -infrastrukturen vorhanden. Diese werden aber nicht systematisch zusammengeführt, harmonisiert und ausgewertet.
In den meisten Fällen besteht darüber hinaus keine gesetzliche Pflicht, Daten auszutauschen [26]. Um die Wissens- und Entscheidungsgrundlagen zu verbessern und Massnahmen einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft auf eine solide, konsistente Grundlage zu stellen, sollte die Integration bereits vorhandener Daten- und Wissensbestände mit Bezug auf eine spezifische Fragestellung verbessert werden (z.B. Daten- und Wissensbestände der Schweizer Kantonschemiker und Wasserversorger bez. Trinkwasser oder der Kantonalen Umweltschutzämter bez. Gewässer). Dem Bund kommt hier in Absprache mit den nationalen Fachverbänden (SVGW, VSA) eine koordinierende Rolle hinsichtlich der übergreifenden Zusammenführung und Abstimmung von Daten- und Wissensbeständen zu.
Um sicherzustellen, dass neue Erkenntnisse und Erfahrungen in der Forschung den Weg in die Praxis finden und gleichzeitig offene, praxisrelevante Fragestellungen von der Forschung aufgenommen werden, ist ein enger Austausch zwischen Forschung und Praxis von zentraler Bedeutung [16]. Zwar verlangen die in Kapitel 4 beschriebenen Herausforderungen vorwiegend Lösungen auf nationaler, regionaler und lokaler Ebene. Dennoch ist es wichtig, dass die Akteure der Schweizer Siedlungswasserwirtschaft von den Erkenntnissen und Erfahrungen anderer Länder profitieren und gleichzeitig ihre Erkenntnisse und Erfahrungen anderen Ländern zur Verfügung stellen [16]. Ihre Beteiligung am internationalen Wissens- und Erfahrungsaustausch ist daher zu fördern.

Wissen–4: Prüfung des Potenzials natürlicher und künstlicher Wasserspeicher

Natürliche und künstliche Wasserspeicher (insbesondere für Trink-, Brauch- und Löschwasser, Beschneiung und Bewässerung) können durch entsprechendes Speichermanagement einen Beitrag zur Bewältigung von Trockenperioden leisten [26]. Die Kenntnisse über Potenziale der natürlichen und künstlichen Speicherung samt den damit verbundenen technischen, ökologischen und ökonomischen Aspekten (inkl. Anreicherung von Grundwasser, Mehrzwecknutzung von Speichern etc.) sind allerdings oft noch unzureichend und daher in einer gesonderten Studie zu prüfen.
Dies schliesst auch die Nutzung natürlicher und künstlicher Wasserspeicher zur Bewältigung von Hochwasserereignissen ein [16], [55]. Mit der Prüfung werden die Grundlagen gelegt, um zu einem späteren Zeitpunkt allfällige, weitergehende Massnahmen zur Bewältigung von Wassermengenproblemen festlegen zu können [16].

Wissen–5: Verbesserung des Prozessverständnisses in ausgewählten Bereichen

Um mit Massnahmen zielgerichtet den Herausforderungen einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft begegnen zu können, ist es unerlässlich, bestehende Unsicherheiten zu reduzieren und Wissenslücken weiter zu schliessen [16] (siehe auch Handlungsoption Wissen-2). Voraussetzung hierfür ist oft die Verbesserung des Prozessverständnisses von hydro(geo)logischen Systemen. So bestehen weiterhin Unsicherheiten und Wissenslücken hinsichtlich des Verhaltens von Grundwasserleitern während lang anhaltender Trockenperioden und deren Interaktionen mit urbanen Infrastrukturen oder hinsichtlich des Verhaltens von Karstgrundwasserleitern während Hochwasserereignissen. Das Prozessverständnis sollte daher durch gezielte Studien in diesen Bereichen vertieft werden.

6 Abschätzung der Konsequenzen

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen der in Kapitel 5 identifizierten Handlungsoptionen qualitativ abgeschätzt. Für jede Handlungsoption wurde dabei geprüft, ob die in Kapitel 3 beschriebenen Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft durch die jeweilige Handlungsoption positiv (+), negativ (–), positiv und negativ (+/–) oder nicht (o) beeinflusst werden.

Dies erfolgte im Rahmen von Interviews durch Expertinnen und Experten des NFP 61. Jede Handlungsoption wurde dabei individuell von drei Expertinnen und Experten bewertet (siehe auch Anhang I, Vorgehen). Für die Ziele, für die im Rahmen des NFP 61-Forschungsprojekts «Langfristige Planung nachhaltiger Infrastrukturen» Attribute definiert wurden (SWIP [22]), erfolgte die Bewertung über das jeweilige Attribut.[16] Für alle anderen Ziele, für die keine Attribute festgelegt wurden, erfolgte die Bewertung über die Einschätzung der positiven oder negativen Veränderung gegenüber dem Status quo der gegenwärtigen Zielerreichung. Die Einschätzung erfolgte unter Berücksichtigung der regionalen Unterschiede in der Schweiz.

Die Ergebnisse der Experteneinschätzung wurden anschliessend ausgewertet und dem Team der Thematischen Synthese zurückgespiegelt. Allfällige Diskrepanzen zwischen den individuellen Bewertungen der drei Expertinnen und Experten (pro Handlungsoption) oder zwischen den Expertinnen und Experten und dem Syntheseteam wurden anschliessend diskutiert und bereinigt. Die Bewertungen wurden abschliessend aggregiert, um eine Gesamteinschätzung bez. der Auswirkungen der Handlungsoptionen auf der Ebene der Fundamentalziele zu erhalten (siehe auch Tabelle 5). Eine detaillierte Beschreibung der Auswirkungen der Handlungsoptionen auf Ebene der Unterziele findet sich in Anhang I, Auswertung. Die beschriebenen Auswirkungen entsprechen dem heutigen besten Wissen der Expertinnen und Experten des NFP 61.

Mit welchen Handlungsoptionen lassen sich die Fundamentalziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft gut erreichen?

Die Ergebnisse der Experteneinschätzung hinsichtlich der Auswirkungen der verschiedenen Handlungsoptionen auf die Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft (siehe auch Tabelle 5) legen nahe, dass die fünf Fundamentalziele «Hohe Generationengerechtigkeit», «Guter Gewässerschutz», «Gute Wasserversorgung», «Sichere Abwasserentsorgung» sowie «Effiziente Ressourcennutzung» durch viele der hier identifizierten Handlungsoptionen gut erreicht werden (+). Ausnahmen bilden hier die Handlungsoptionen «Förderung der Aufrüstung und/oder Zusammenlegung von ARA», «Förderung eines zweiten Standbeins» und «Förderung von Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)» (siehe auch Anhang I, Auswertung).

Nach Einschätzung der Expertinnen und Experten des NFP 61 vermindert die Zusammenlegung von ARA die flexible Anpassung der Anlagen gegenüber zukünftigen Veränderungen (sinkende oder steigende Bevölkerungszahlen etc.). Das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» lässt sich daher – im Gegensatz zu den Fundamentalzielen «Guter Gewässerschutz» und «Sichere Abwasserentsorgung» – mit dieser Handlungsoption nur schwer erreichen (–). Gleiches gilt für das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcennutzung» (+/–). So lässt sich mit der Zusammenlegung von ARA die Rückgewinnung von Nährstoffen zwar verbessern (+), jedoch nimmt der Energieverbrauch oft zu (–). Letzteres gilt oft auch für die Bereitstellung zusätzlicher, voneinander unabhängiger Wasserressourcen («Förderung eines zweiten Standbeins») (siehe auch Anhang I, Auswertung).

Mit der Förderung von Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) verbessert sich der chemische und biologische Zustand der Fliessgewässer und Seen (+), da mehr Mischwasser einer Reinigung zugeführt wird. Gleichzeitig verschlechtert sich der chemische Zustand des Grundwassers, da mit der Versickerung unbehandelten Regenwassers die stoffliche Belastung des Grundwassers zunimmt. Das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» lässt sich daher mit dieser Handlungsoption nur bezogen auf Fliessgewässer und Seen (+), nicht aber bezogen auf Grundwasser erreichen (–) (siehe auch Anhang I, Auswertung).

Grundsätzlich sind mit der Umsetzung der hier aufgeführten Handlungsoptionen finanzielle Aufwendungen verbunden. So müssen z.B. für die Bereitstellung von voneinander unabhängigen Wasserressourcen («Förderung eines zweiten Standbeins») zusätzliche Leitungen und Kapazitäten zur Verfügung gestellt werden, die dem Fundamentalziel «Geringe Kosten» entgegenwirken (–). Gleiches gilt für die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Notlagen (–). Andere Handlungsoptionen wiederum – wie z.B. die «Förderung einer mittel- und langfristigen Planung» oder die «Verbesserung im Vollzug des planerischen Gewässerschutzes» – wirken sich kurzfristig negativ (–), jedoch langfristig positiv (+) auf das Fundamentalziel «Geringe Kosten» aus (siehe auch Anhang I, Auswertung).

Das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» wird durch einige der Handlungsoptionen nur teilweise (+/–) erreicht. Nach Einschätzung der Expertinnen und Experten

«Es hat sich gezeigt, dass die derzeitigen Infrastrukturen als Handlungsoption gut abschneiden. Wir konnten aber zeigen, dass bestimmte Anpassungen zu einer besseren Leistung führen. Solche Verbesserungen sind z.B. eine stärkere Zusammenarbeit mit anderen Gemeinden, aber auch anderen Infrastruktursektoren und vor allem ein vorausschauendes Erneuerungsmanagement.»

Lisa Scholten
Doktorandin Eawag SWIP

Mehr dazu im SWIP unter www.nfp61.ch

Tab. 5: Auswirkungen der Handlungsoptionen bez. der Erreichung der Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft.

+	positive Veränderung
–	negative Veränderung
+/–	positive und negative Veränderung
o	keine Veränderung
?	keine Einschätzung möglich

	Handlungsoptionen	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
		Hohe Generationengerechtigkeit (1)	Guter Gewässerschutz (2)	Gute Wasserversorgung (3)	Sichere Abwasserentsorgung (4)	Hohe soziale Akzeptanz (5)	Geringe Kosten (6)	Effiziente Ressourcennutzung (7)
Infrastrukturen	Förderung eines «zweiten Standbeins»	+	+	+	o	+/–	–	+/–
	Förderung eines umfassenden Infrastrukturmanagements	+	+	+	+	+/–	+/–	+
	Verbesserung der mittel- und langfristigen Planung	+	+	+	+	+	+/–	+
	Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Notlagen	+	o	+	o	+/–	–	o
	Förderung flexibler Infrastrukturen	+	+	+/o/–	+	+/–	+/–	+
	Förderung der Aufrüstung und/oder Zusammenlegung von ARA	–	+	o	+	+/–	+/–	+/–
	Förderung von Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)	+	+/–	o	+	+/–	+/–	+
Wasserressourcen	Verbesserung im Vollzug des planerischen Grundwasserschutzes	+	+	+	o	+	+/–	+
	Förderung einer Wasserressourcen-Bewirtschaftung(splanung)	+	+	+	o	+/o	?	o
	Regionale und integrale Betrachtung	+	+/o	+/o	+/o	+	+/–	o
	Verbesserung der Koordination	+/o	+/o	+/o	+/o	+	+/–	o
	Verbesserung der Raumplanung	+	+	+	+/o	+/–	+/–	o
Wissen	Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen	o	+	+	+	+	+	o
	Monitoring	o	+	+	+	+	+/–	o
	Verbesserung der Wissensintegration, Förderung des Wissens- und Erfahrungsaustauschs	o	+	+	+	+	+	+
	Prüfung des Potenzials natürlicher und künstlicher Wasserspeicher	o	+	+	o	o	o	o
	Verbesserung des Prozessverständnisses	o	+	+	+	o	+	o

des NFP 61 nimmt z.B. mit der Förderung eines umfassenden Infrastrukturmanagements oder der Zusammenlegung von ARA die Einbindung der Bevölkerung in Entscheidungsprozesse ab. Das Ziel eines hohen Mitspracherechts wird daher mit diesen Handlungsoptionen nicht erreicht (–). Jedoch lässt sich dieses Ziel mit der Förderung flexibler Infrastrukturen oder der Förderung von Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) erfüllen (+). Endnutzerinnen und Endnutzer werden hier oft in die Planung z.B. dezentraler ARA oder lokaler SUDS (Grünflächen, Regenrückhalteräume etc.) einbezogen. Die Ziele eines «Geringen Zeitaufwands» und eines «Geringen Raumaufwands» lassen sich jedoch mit diesen Handlungsoptionen nicht erreichen (–), da viele dieser Systeme bei den Endnutzerinnen und Endnutzern installiert werden und letztere oft für den Betrieb und Unterhalt der Systeme mitverantwortlich sind.

Die Diskussion der Ergebnisse macht deutlich, dass «Trade-offs», also das Abwägen verschiedener Ziele gegeneinander und das Identifizieren von Kompromisslösungen, zentrale Elemente transparenter Entscheidungsprozesse sind. Dies spiegelt sich auch in den Einschätzungen der Expertinnen und Experten bezüglich der Auswirkungen der Handlungsoptionen einer regionalen und integralen Betrachtung wider.

Je nachdem, welche Trade-offs in der regionalen und integralen Abwägung verschiedener Ziele bestehen, kann sich (muss aber nicht) die Handlungsoption positiv auf die Ziele eines guten Gewässerschutzes, einer guten Wasserversorgung sowie einer sicheren Abwasserentsorgung auswirken (siehe auch Anhang I, Auswertung). Grundsätzlich erhöht sich jedoch mit einer regionalen und integralen Betrachtung die Spannbreite möglicher Optionen, sodass oft eine der lokalen Situation angepasste Kompromisslösung identifiziert werden kann.

Welche der sieben Fundamentalziele sind wichtig?

Die sieben Fundamentalziele umfassen neben Kosten-, Qualitäts- und Schutzzielen auch explizit Ziele einer nachhaltigen Entwicklung wie Generationengerechtigkeit, soziale Akzeptanz und Ressourceneffizienz. Welche der sieben Fundamentalziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft nun wichtig sind, hängt von den subjektiven Präferenzen der Akteure ab. Für die Fallstudienregion Mönchaltorfer Aa konnte gezeigt werden, dass den lokalen Akteuren eine gute Wasserversorgung und eine sichere Abwasserentsorgung am wichtigsten waren, gefolgt von einem guten Gewässerschutz und einer hohen Generationengerechtigkeit (SWIP [141], siehe auch Abb. 18). Hingegen spielten hohe soziale Akzeptanz und geringe Kosten (v.a. im Falle von Abwasserinfrastrukturen) eine eher untergeordnete Rolle (SWIP [141]). Ob diese Ergebnisse für die gesamte Schweiz gelten, ist zu prüfen. Eine erste Umfrage unter 250 Personen aus der Schweizer Bevölkerung und 65 Mitarbeitenden der Eawag legt jedoch nahe, dass die Präferenzen insgesamt sehr ähnlich sind [151].

Grundsätzlich ist jedoch festzuhalten, dass die sieben Fundamentalziele unterschiedliche, zum Teil gegensätzliche Ansprüche an eine nachhaltige Siedlungswasserwirtschaft widerspiegeln. Diese können zu Interessenkonflikten, z.B. zwischen Schutz und Nutzung oder zwischen guter Wasserversorgung und sicherer Abwasserentsorgung und anderen Nutzungen, führen, die sich nicht auf einfache Art lösen, jedoch durch geeignete Verfahren mindern lassen [26]. Hierzu zählen:

- Eine transparente und partizipative Interessenabwägung, d.h. eine Abwägung verschiedener Ziele und ihrer Trade-offs gegeneinander. Dies setzt voraus, dass die Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft vorgängig identifiziert und die Wichtigkeit, die verschiedene Akteure diesen Zielen beimessen, transparent erhoben und dargestellt werden (siehe auch SWIP [141]). Die hier und in SWIP [22] formulierten Ziele einer nachhaltigen Wasserversorgung und Abwasserentsorgung stellen eine wichtige Grundlage dar, um einen solchen transparenten und partizipativen Prozess zu strukturieren.
- Eine mittel- und langfristige Planung, die sich an den – vorgängig als wichtig identifizierten – Zielen einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft orientiert und die Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in Bezug auf diese Ziele optimiert. Da insbesondere netzgebundene Infrastrukturen Planungshorizonte von 50 und mehr Jahren haben, gilt es, die mit der Planung verbundenen Unsicherheiten zu berücksichtigen und transparent in den Entscheidungsprozess einzubeziehen.
- Eine regionale und integrale Betrachtung, die – unter Abwägung verschiedener Ziele gegeneinander – die Identifizierung einer der lokalen Situation angepassten Kompromisslösung ermöglicht.

Ausblick: Wie weiter?

Um Missverständnissen vorzubeugen: Die Analyse hat gezeigt, dass es nicht um eine zentralistische Steuerung des Systems Siedlungswasserwirtschaft geht, sondern vielmehr um eine Verständigung auf übergeordnete Ziele einer nachhaltigen Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in der Schweiz, an denen sich unterschiedliche Sektoren und Akteure (auf lokaler, kantonaler und nationaler Ebene) zu orientieren hätten.

Erste Schritte in diese Richtung wären:

- Die Identifizierung von Zielen einer nachhaltigen Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in der Schweiz unter Einbezug aller betroffenen Akteure. Die hier formulierten Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft bilden eine wichtige Grundlage, um diesen partizipativen Prozess transparent zu strukturieren (Kapitel 3).
- Die Erarbeitung von Handlungsalternativen auf der Grundlage einer fundierten Analyse des Systems Siedlungswasserwirtschaft. Die hier identifizierten Herausforderungen und Handlungsoptionen einer nachhaltigen Wasserversorgung und Abwasserentsorgung bilden eine zentrale Grundlage, um diesen Prozess zu gestalten (Kapitel 4 und 5).
- Die Abschätzung der Konsequenzen der Handlungsoptionen bez. des Erreichens der Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft. Die hier abgeschätzten Auswirkungen der verschiedenen Handlungsoptionen bilden eine wichtige Grund-

- Den lokalen Akteuren in der Fallstudienregion Mönchaltorfer Aa war eine gute Wasserversorgung und sichere Abwasserentsorgung am wichtigsten, gefolgt von einem guten Gewässerschutz und einer hohen Generationengerechtigkeit.

Links: SWIP; Mitte: IWAQA; rechts: SWIP

«Die Basis denkt in erster Linie an das Funktionieren der Kanalisation. Erst in zweiter Linie ans Finanzielle.»

Thomas Bodmer
Stv. techn. Leiter Wasserversorgung, Klärwerkmeister Mönchaltorf

Mehr dazu im SWIP unter www.nfp61.ch

▸ Die Verständigung auf übergeordnete Ziele unter Einbezug aller betroffenen Sektoren und Akteure ist ein erster, entscheidender Schritt in Richtung nachhaltige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung.

Links: Foto Patricia Fry; Mitte: SWIP; rechts: MONTANAQUA

lage, um diese Abschätzung vorzunehmen (Kapitel 6 und Anhang I, Auswertung).

- Die Bewertung und Rangierung der Handlungsalternativen bez. des Erreichens der Ziele, die den Akteuren wichtig sind («subjektive Präferenzen»). Dies setzt voraus, dass die subjektiven Präferenzen, d.h. die Wichtigkeit, die unterschiedliche Akteure den verschiedenen Zielen beimessen, transparent erhoben und dargestellt werden (SWIP [141]).
- Die Identifizierung konsensfähiger Kompromisslösungen unter Einbezug aller betroffenen Akteure. Dies setzt eine Analyse der Ursachen der unterschiedlichen Bewertung der Handlungsalternativen durch die verschiedenen Akteure voraus (IWAQA [36]).

Die hier skizzierten Schritte in Richtung nachhaltiger Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in der Schweiz setzen in jedem Fall eine fundierte Analyse des Entscheidungsproblems voraus. Sie können je nach analysiertem Entscheidungsproblem auf lokaler, kantonaler oder nationaler Ebene unter der Federführung von Bund (BAFU), Kantonen, Gemeinden oder Verbänden (VSA, SVGW) durchgeführt werden.

Endnoten

[1] Die Hochrechnungen des SVGW basieren auf den erhobenen Daten von 359 (von insgesamt rund 3000) Wasserversorgungen im Betriebsjahr 2011. Mit den untersuchten Wasserversorgungen wurden 58% der angeschlossenen Bevölkerung erfasst.

[2] Der Einwohnerwert beschreibt die durchschnittliche Schmutzfracht einer Person [8].

[3] Als Fremdwasser wird Wasser bezeichnet, das stetig fliesst, aber nicht mit Schmutzstoffen belastet ist: Bach-, Drainage-, Kühlwasser, laufende Brunnen, überlaufende Quellwasserspeicher etc. [11].

[4] Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) ist ein Summenparameter, der ausdrückt, wie viel Sauerstoff zur vollständigen Oxidation der organischen Stoffe erforderlich ist [11].

[5] Im Vergleich zu 2005 sind die Reinigungsleistungen der ARA für organische Schmutzstoffe (CSB), Stickstoff (N) und Phosphor (P) um durchschnittlich 2–3% gestiegen [7]. Laut VSA/KI [7] ist dies «darauf zurückzuführen, dass (zwischen 2005 und 2009) kleinere, weniger leistungsfähige ARA aufgehoben und an grössere ARA angeschlossen wurden. Bestehende Anlagen wurden zudem teilweise modernisiert und deren Reinigungsleistung verbessert» [7].

[6] Diese Anteile werden sich mit dem Klimawandel infolge steigender Temperaturen stark verändern.

[7] 1. Workshop Thematische Synthese 3 mit NFP 61-Expertinnen und -Experten am 3. 3. 2013; 2. Workshop Thematische Synthese 3 mit Vertreterinnen und Vertretern des NFP 61-Programmbeirats, der Leitungsgruppe und des Leitungsbüros (Programmbeiratstreffen, 12. 4.).

[8] Die ästhetische Qualität bezieht sich v.a. auf Geruch, Geschmack, Färbung und Trübung des Wassers.

[9] Unterziele, die die soziale Akzeptanz betreffen, aber schon unter anderen Fundamentalzielen beschrieben wurden, werden hier nicht mehr berücksichtigt. Aus methodischen Gründen sollten Ziele nicht redundant sein, d.h., nicht denselben Aspekt abbilden [25]. Selbstverständlich ist die soziale Akzeptanz grösser, wenn andere Fundamentalziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft, wie z.B. die Versorgung mit gutem Trinkwasser, erfüllt sind. Um eine mehrfache Zählung derselben Ziele zu vermeiden, werden jedoch unter dem Fundamentalziel soziale Akzeptanz nur noch Aspekte aufgeführt, die nicht schon unter anderen Fundamentalzielen aufgelistet wurden.

[10] Herausforderungen werden hier im Sinne zukünftiger Entwicklungen, die auf das System Siedlungswasserwirtschaft einwirken, verstanden.

[11] 101 von insgesamt 839 ARA mit mehr als 100 Einwohnerwerten werden mit einem weitergehenden Verfahren zur Elimination organischer Spurenstoffe ausgebaut. 12 ARA werden ausgebaut, weil mehr als 80 000 Einwohnerinnen und Einwohner (bzw. Einwohnerwerte) angeschlossen sind, 11 ARA, weil mehr als 24 000 Einwohnerinnen und Einwohnern angeschlossen sind und in Seen einleiten, und 78 ARA, weil mehr als 8000 Einwohnerinnen und Einwohner angeschlossen sind und in ein Fliessgewässer mit einem kumulativen Abwasseranteil von >10% (d.h. einem Verdünnungsverhältnis von 1:10 und kleiner) einleiten.

[12] Gleichzeitig erhöht sich durch die höheren Schmutzstoffkonzentrationen die Reinigungsleistung von ARA.

[13] Es zu erwarten, dass die landwirtschaftlichen Wasserbezüger Überkapazitäten (z.B. in der Nacht) der Wasserversorgung nutzen. Damit fallen lediglich Grenzkosten an, die bei Wasserversorgungen ohne Aufbereitung und wenig Pumpleistung gering sind.

[14] Der Begriff «zweites Standbein» impliziert, dass teilweise auch mehr als zwei Wasserbezugsorte benötigt werden, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Dabei sollten Wasserversorgungen über unterschiedliche Wasserbezugsorte aus voneinander unabhängigen Ressourcen verfügen, um eine sichere Versorgung mit Trink-, Brauch- und Löschwasser zu gewährleisten. Bei einem Ausfall einer Ressource, z.B. durch Verschmutzung oder Trockenheit, können so mindestens der mittlere tägliche Trink- und Brauchwasserbedarf und der Löschwasserbedarf gedeckt werden.

[15] Die physische Zusammenlegung von ARA beinhaltet auch die betriebliche Fusionierung. In der Regel führt dies zu professionelleren Strukturen [145] und damit zu besseren Reinigungsleistungen.

[16] Attribute können als Indikatoren verstanden werden. Sie beschreiben, wie gut ein Ziel erreicht wird.

[17] Workshop Thematische Synthese 3 mit NFP 61-Expertinnen und -Experten am 3. März 2013.

[18] Workshop Thematische Synthese 3 mit NFP 61-Expertinnen und -Experten am 18. November 2013.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Ziel-, System- und Handlungswissen im Rahmen der TS 3.

Abb. 2: Darstellung des Vorgehens, der berücksichtigten NFP 61-Forschungsprojekte und des Aufbaus der TS 3.

Abb. 3: Wasserbedarf, der durch die öffentliche Wasserversorgung gedeckt wird.

Abb. 4: Jährlicher Wasserhaushalt der Schweiz.

Abb. 5: SWISSKARST-Methode zur kartografischen Darstellung von Karstgrundwasserleitern.

Abb. 6: Häufige Arten der Gewässernutzung grösserer Wasserversorgungen im Schweizer Mittelland.

Abb. 7: Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft.

Abb. 8: Veränderung der zukünftigen direkten Grundwasserneubildung.

Abb. 9: Auswirkung von Trockenperioden auf unterschiedliche Grundwasserleiter.

Abb. 10: Kumulativer Anteil der ARA, welche in Fliessgewässer mit einem Abwasseranteil von mehr als 1% bzw. 5% einleiten.

Abb. 11: Veränderung der gemessenen Grundwassertemperatur über die Zeit

Abb. 12: Veränderung der gemessenen Sauerstoffkonzentration im Grundwasser über die Zeit.

Abb. 13: Mittlere Jahrestemperatur des unterirdischen Flusses Milandrine im Kanton Jura.

Abb. 14: Mittlere tägliche Wassertemperaturen für eine Auswahl an Standorten im Einzugsgebiet der Broye.

Abb. 15: Häufigkeitsverteilung simulierter Wassertemperaturen für einen Zeitraum von 20 Jahren für ausgewählte Szenarien und für zwei Standorte im Einzugsgebiet der Broye.

Abb. 16: Kumulativer Anteil der Kanalisationsschächte, an denen das Bemessungskriterium heute und in der Zukunft nicht erfüllt wird.

Abb. 17: Auswirkung der Oberflächenversiegelung auf die Wasserbilanz von drei Talgrundwasserleitern.

Abb. 18: Mittlere Gewichte für je zehn Akteure aus dem Trink- und Abwassersektor für fünf Hauptziele einer guten Wasserver- und Abwasserentsorgung.

Abb. 19: Rangierung von vier Alternativen für den Trinkwasser- und Abwassersektor im Fallstudiengebiet Mönchaltorfer Aa für zehn Akteure im Szenario «Status quo».

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Übersicht über Wiederbeschaffungswert, Jahreskosten und Investitionen der Schweizer Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsinfrastruktur.

Tab. 2: Zu- und Ablauffrachten sowie Reinigungsleistung der ARA von CSB, P und N für die gesamte Schweiz.

Tab. 3: Grundwasservolumen und nachhaltig nutzbares Grundwasserdargebot in der Schweiz.

Tab. 4: Einflussmatrix: Welchen Herausforderungen kann mit welchen Handlungsoptionen und unter Federführung welcher Akteure begegnet werden?

Tab. 5: Auswirkungen der Handlungsoptionen bez. der Erreichung der Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft.

Tab. 6: Die für die Bewertung der Herausforderungen verwendeten Kriterien und Ausprägungen.

Tab. 7: Ergebnisse der Bewertung der Herausforderungen einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft durch die Expertinnen und Experten des NFP 61 und die Mitglieder der Begleitgruppe.

Literatur

[1] CASS, ProClim- (1997): Forschung zu Nachhaltigkeit und globalem Wandel – Wissenschaftspolitische Visionen der Schweizer Forschenden. ProClim-, Forum für Klima und Global Change. Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften, Bern.

[2] SVGW (2012): Statistische Erhebungen der Wasserversorgungen in der Schweiz. Betriebsjahr 2011. Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Zürich. 1–36.

[3] Freiburghaus M. (2012): Statistische Übersicht über die Wasserversorgung in der Schweiz 2010. Aqua & Gas 3: 54–59.

[4] Freiburghaus M. (2012): Aufbereitung von Trinkwasser in der Schweiz: Auswertung der SVGW-Statistik 2005 und 2010. Aqua & Gas 9: 78–81.

[5] Schalcher H.-R., Boesch H.-J., Bertschy K., Sommer H., Matter D., Gerum J., Jakob M. (2011): Was kostet das Bauwerk Schweiz in Zukunft und wer bezahlt dafür? Fokusstudie des Nationalen Forschungsprogramms 54 «Nachhaltige Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung». vdf Verlag ETH Zürich. Zürich.

[6] Eawag (2009): Wasserversorgung 2025 – Vorprojekt. Eawag. Dübendorf.

[7] VSA, KI (2011): Kosten und Leistungen der Abwasserentsorgung. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Bern. Fachorganisation Kommunale Infrastruktur, Zürich. 1–88.

[8] Maurer M., Chawla F., Horn J. v., Stauffer P. (2012): Abwasserentsorgung 2025 in der Schweiz. Schriftenreihe der Eawag Nr. 21. Dübendorf.

[9] Maurer M., Herlyn A. (2006): Zustand, Kosten und Investitionsbedarf der schweizerischen Abwasserentsorgung. Schlussbericht. Eawag – Bericht an das Bundesamt für Umwelt. Dübendorf.

[10] Abegglen C. (2011): Mikroverunreinigungen: Energieverbrauch und Kosten weitergehender Verfahren auf kommunalen ARA. GWA 91 (7): 479–486.

[11] Gujer W. (2007): Siedlungswasserwirtschaft. 3. Aufl. Springer. Berlin-Heidelberg-New York.

[12] EVD (2011): Preisvergleich der Abwasserentsorgung in der Schweiz. Eidg. Volkswirtschaftsdepartement.
[13] AWEL (2004): Überwachung der privaten Abwasseranlagen (Grundstücksentwässerungsleitungen) im Kanton Zürich. Zustandserfassung von rund 8700 m Hausanschlussleitungen in 8 Zürcher Gemeinden im Auftrag des AWEL. Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick. Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Zürich.
[14] Blanc P., Schädler B. (2013): Das Wasser in der Schweiz – ein Überblick. Schweizerische Hydrologische Kommission, Bern.
[15] Sinreich M., Kozel R., Matousek F., Jeannin P. Y., Löw S., Stauffer F. (2012): Grundwasserressourcen der Schweiz. Aqua & Gas 9: 16–28.
[16] BAFU (2014): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2014–17. Zweiter Teil der Strategie des Bundesrates. Bundesamt für Umwelt, Bern.
[17] BAFU (2014): Grundlagen für die Wasserversorgung 2025. Risiken Herausforderungen und Empfehlungen. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1404.
[18] Wittmer I., Moschet C., Simovic J., Singer H. P., Stamm C., Hollender J. (2014): Über 100 Pestizide in Fliessgewässern. Aqua & Gas 3: 32–43.
[19] Bitterli T., Aviolat F., Brändli R., Christe R., Fracheboud S. (2004): Groundwater resources. Federal Office for the Environment. Hydrological atlas of Switzerland HADES!, Plate 8.6 (unveröffentlicht).
[20] Jeannin P. Y., Eichenberger U., Sinreich M., Vouillamoz J., Malard A., Weber E. (2013): KARSYS: a pragmatic approach to karst hydrogeological system conceptualisation. Assessment of groundwater reserves and resources in Switzerland. Environmental Earth Sciences 69 (3): 999–1013.
[21] BAFU (2009): Ergebnisse der Grundwasserbeobachtung Schweiz (NAQUA). Zustand und Entwicklung 2004–2006. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 0903.
[22] Lienert J., Scholten L., Egger C., Maurer M. (2014): Structured decision-making for sustainable water infrastructure planning and four future scenarios. EURO Journal on Decision Processes (EJDP), special issue on Environmental Decision-Making.
[23] Bundesrat (2012): Strategie Nachhaltige Entwicklung 2012–2015, 25.1.2012.
[24] Wuelser G., Pohl C., Hadorn G. H. (2012): Structuring complexity for tailoring research contributions to sustainable development: a framework. Sustainability Science 7 (1): 81–93.
[25] Eisenführ F., Weber M., Langer T. (2010): Rational Decision-Making. 1st edn Springer. Berlin-Heidelberg-New York.
[26] BAFU (2012): Umgang mit lokaler Wasserknappheit in der Schweiz. Bericht des Bundesrates zum Postulat «Wasser und Landwirtschaft. Zukünftige Herausforderungen» (Postulat 10.353 von Nationalrat Hansjörg Walter vom 17. Juni 2010)
[27] Larsen T. A., Gujer W. (2002): Waste Design, Source Control and On-Site Technologies: Der Weg zu einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft. KA Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 49: 1372–1379.
[28] Maurer M., Gujer W. (2003): Ist unsere Abwasserentsorgung nachhaltig? Artikel präsentiert an der Konferenz VSA-Symposium 2003, Winterthur, 14. Aug. 2003.
[29] Regierungsrat (2011): Wasserversorgungsstrategie 2010. Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern, Amt für Wasser und Abfall, Bern.
[30] Gander B. (2009): Klimaänderung und Wasserversorgungen – Informationen und Anpassungsstrategien. GWA 4: 241–249.
[31] Cornel P., Bischoff A., Müller K., Düppenbecker B. (2012): Hygieneaspekte bei der Wasserwiederverwendung. Artikel präsentiert an der Konferenz 9 BMBF Forum für Nachhaltigkeit, Berlin, 23. Okt. 2012.
[32] Ten Veldhuis J. A. E., Clemens F. H. L. R., Sterk G., Berends B. R. (2010): Microbial risks associated with exposure to pathogens in contaminated urban flood water. Water Research 44 (9): 2910–2918.
[33] OcCC, ProClim- (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. OcCC, ProClim-.
[34] Ernst Basler & Partner (2007): Wasserwirtschaft Schweiz 2025. Herausforderungen und Handlungsmöglichkeiten. Ein Diskussionsbeitrag zur Zukunftsgestaltung. BAFU, Bern.
[35] Ernst Basler & Partner, umwelt:dialog, bio-eco (2012): Anpassung an die Klimaänderung in Schweizer Städten. Bundesamt für Umwelt, Abteilung Klima, Sektion Berichterstattung und Anpassung. Bern.
[36] Reichert P., Schuwirth N., Langhans S. D. (2011): MCWM – Ein Konzept für multikriterielle Entscheidungsunterstützung im Wassermanagement. Wasser Energie Luft 103 (2): 139–147.
[37] Scholten L., Scheidegger A., Reichert P., Mauer M., Lienert J. (2014): Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis. Water Research 49: 124–143.
[38] Scholten L., Schuwirth N., Reichert P., Lienert J. (2014): Tackling uncertainty in multi-criteria decision analysis – An application to water supply infrastructure planning. European Journal of Operational Research: in press.
[39] SVGW, BFE (2004): Energie in der Wasserversorgung. EnergieSchweiz für Infrastrukturanlagen, Bern.
[40] Müller E. A., Schmid F., Kobel B. (2002): Wasserversorgungsunternehmen können Energiekosten senken. Energie Wasser Praxis 10: 32–37.
[41] Smeets E., Weterings R. (1999): Environmental indicators: Typology and overview. EEA. Copenhagen.

[42] Borchardt D. (2013): Zunehmende Nutzungen wirken stärker auf Gewässer als der Klimawandel. Aqua & Gas 7/8: 10–14.
[43] Moeck C., Bailieux A., Brunner P., Schirmer M., Hunkeler D. (in prep.): Hydrogeological modeling of climate change impacts on a small-scale aquifer.
[44] Moeck C., Brunner P., Hunkeler D. (in prep.): Predictive uncertainty of groundwater recharge rates caused by climate model chain variability and model simplification.
[45] Moeck C., Brunner P., Prasuhn V., Hunkeler D. (in prep.): Evaluating the effect of climate change on groundwater recharge for different crop types.
[46] Käser D., Hunkeler D. (in prep.): Contribution of alluvial groundwater to the outflow of mountainous catchments.
[47] SISKA (2013): Toward a sustainable management of karst waters in Switzerland (SWISSKARST project) – NRP 61 «Sustainable water management», Final Report. Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung, Schweizerischer Nationalfonds, La Chaux-de-Fonds. – Contracting authority: Swiss national science foundation (unveröffentlicht).
[48] SISKA (2011): Die Trinkwasserquelle Tarschlims (Flims, GR). Einzugsgebiet und Schutzzonen. Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung, La Chaux-de-Fonds (unveröffentlicht).
[49] BAFU B. f. U. (2012): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Umwelt Wissen 1217: 76.
[50] Diem S., Renard P., Schirmer M. (2013): New Methods to Estimate 2D Water Level Distributions of Dynamic Rivers. Ground Water 51 (6): 847–854.
[51] Diem S., Schirmer M., Rudolf von Rohr M., Kohler H.-P. E., Hering J. G., v. Gunten, U. (2013): Qualität des Uferfiltrats. Einfluss der klimabestimmten Variablen Temperatur und Abfluss. Aqua & Gas 11: 14–21.
[52] Diem S., Rudolf von Rohr M., Hering J. G., Kohler H.-P. E., Schirmer M., von Gunten U. (2013): NOM degradation during river infiltration: Effects of the climate variables temperature and discharge. Water Research 47 (17): 6585–6595.
[53] Diem S., Renard P., Schirmer M. (2014): Assessing the effect of different river water level interpolation schemes on modeled groundwater residence times. Journal of Hydrology 510: 393–402.
[54] Diem S., Cirpka O. A., Schirmer M. (2013): Modeling the dynamics of oxygen consumption upon riverbank filtration by a stochastic-convective approach. Journal of Hydrology 505: 352–363.
[55] Schirmer M. (2013): Das RECORD-Projekt – Flussrevitalisierung, eine ökologische Massnahme in einem komplexen Umfeld. Aqua & Gas 3: 22–28.
[56] Jammet N. (2011): Caractérisation et suivi de la relation entre le canal d'Hagneck et les captages de Gimmiz (aquifère nord du Seeland) sous différentes conditions de pompage. MSc, Université de Neuchâtel.
[57] Rudolf von Rohr M., Hering J. G., Kohler H.-P. E., von Gunten U. (2014): Column studies to assess the effects of climate variables on redox processes during riverbank filtration. Water Research 61: 263–275.
[58] Bahnmüller S., von Gunten U., Canonica S. (2014): Sunlight-induced transformation of sulfadiazine and sulfamethoxazole in surface waters and wastewater effluents. Water Research 57: 183–192.
[59] Białk-Bielińska A., Stolte S., Arning J., Uebers U., Böschen A., Stepnowski P., Matzke M. (2011): Ecotoxicity evaluation of selected sulfonamides. Chemosphere 85 (6): 928–933.
[60] Czekalski N., Berthold T., Caucci S., Egli A., Buergmann H. (2012): Increased levels of multiresistant bacteria and resistance genes after wastewater treatment and their dissemination into Lake Geneva, Switzerland. Frontiers in Microbiology 3.
[61] Czekalski N., Gascon Diez E., Burgmann H. (2014): Wastewater as a point source of antibiotic-resistance genes in the sediment of a freshwater lake. ISME J 8 (7): 1381–1390.
[62] Heuer H., Solehati Q., Zimmerling U., Kleineidam K., Schloter M., Muller T., Focks A., Thiele-Bruhn S., Smalla K. (2011): Accumulation of Sulfonamide Resistance Genes in Arable Soils Due to Repeated Application of Manure Containing Sulfadiazine. Applied and Environmental Microbiology 77 (7): 2527–2530.
[63] Canonica S., Freiburghaus M. (2001): Electron-rich phenols for probing the photochemical reactivity of freshwaters. Environmental Science & Technology 35 (4): 690–695.
[64] Tixier C., Singer H. P., Canonica S., Muller S. R. (2002): Phototransformation of triclosan in surface waters: A relevant elimination process for this widely used biocide – Laboratory studies, field measurements, and modeling. Environmental Science & Technology 36 (16): 3482–3489.
[65] Howe G. E., Marking L. L., Bills T. D., Rach J. J., Mayer F. L. (1994): Effects of water temperature and pH on toxicity of the terbufos, trichlorfon, 4-nitrophenol and 2,4-dinitrophenol to the amphipod gammarus-pseudolimnaeus and rainbow-trout (oncorhynchus-mykiss) Environmental Toxicology and Chemistry 13 (1): 51–66.
[66] Abegglen C., Siegrist H. (2012): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1214.
[67] Ort C., Hollender J., Schaerer M., Siegrist H. (2009): Model-Based Evaluation of Reduction Strategies for Micropollutants from Wastewater Treatment Plants in Complex River Networks. Environmental Science & Technology 43 (9): 3214–3220.

[68] von Horn J., Jordi B. (2013): Abwasserentsorgung der Zukunft. Aqua & Gas 2: 16–23.
[69] Hari R. E., Livingstone D. M., Siber R., Burkhardt-Holm P., Guttinger H. (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. Global Change Biology 12 (1): 10–26.
[70] North R. P., Livingstone D. M., Hari R. E., Koster O., Niederhauser P., Kipfer R. (2013): The physical impact of the late 1980s climate regime shift on Swiss rivers and lakes. Inland Waters 3 (3): 341–350.
[71] Figura S., Livingstone D. M., Hoehn E., Kipfer R. (2013): Klima und Grundwasser. Rückblicke und Vorhersagen von Temperatur und Sauerstoff mittels historischer Aufzeichnungen. Aqua & Gas 7/8: 28–33.
[72] Figura S., Livingstone D. M., Hoehn E., Kipfer R. (2011): Regime shift in groundwater temperature triggered by the Arctic Oscillation. Geophysical Research Letters 38 (23): L23401.
[73] Lo T.-T., Hsu H.-H. (2010): Change in the dominant decadal patterns and the late 1980s abrupt warming in the extratropical Northern Hemisphere. Atmos Sci Lett 11: 210–215.
[74] Rodionov S., Overland J. E. (2005): Application of a sequential regime shift detection method to the Bering Sea ecosystem. Ices Journal of Marine Science 62 (3): 328–332.
[75] Figura S., Livingstone D. M., Kipfer R. (2014): Forecasting groundwater temperature with linear regression models using historical data: in press
[76] Rössler O., Addor N., Bernhard L., Figura S., Köplin N., Livingstone D. M., Schädler B., Seibert J., Weingartner R. (2014): Hydrological responses to climate change: river runoff and groundwater. In: CH2014 – Impacts toward quantitative scenarios of climate change impacts in Switzerland. OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim-: Bern. 57–68.
[77] Figura S., Livingstone D. M., Kipfer R. (2013): Competing controls on groundwater oxygen concentrations revealed in multidecadal time series from riverbank filtration sites. Water Resources Research 49 (11): 7411–7426.
[78] Gunawardhana L. N., Kazama S. (2012): Statistical and numerical analyses of the influence of climate variability on aquifer water levels and groundwater temperatures: The impacts of climate change on aquifer thermal regimes. Global and Planetary Change 86–87: 66–78.
[79] Kurylyk B. L., Bourque C. P. A., MacQuarrie K. T. B. (2013): Potential surface temperature and shallow groundwater temperature response to climate change: an example from a small forested catchment in east-central New Brunswick (Canada). Hydrology and Earth System Sciences 17 (7): 2701–2716.
[80] MFR, SISKA (2012): Analyse et interprétation des tendances physico-chimiques enregistrées dans le cadre de la surveillance qualitative des points d'eau du réseau hydrométrique de l'A16 (1989–2011). MFR Géologie-Géotechnique SA, Bienne, Delémont, La Chaux-de-Fonds. SISKA Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung, La Chaux-de-Fonds. (unveröffentlicht).
[81] Lanz K., Rahn E., Stamm C. (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
[82] Kim J., Park J., Kim P.-G., Lee C., Choi K., Choi K. (2010): Implication of global environmental changes on chemical toxicity-effect of water temperature, pH, and ultraviolet B irradiation on acute toxicity of several pharmaceuticals in Daphnia magna. Ecotoxicology 19 (4): 662–669.
[83] Souchon Y., Tissot L. (2012): Synthesis of thermal tolerances of the common freshwater fish species in large Western Europe rivers. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems (405).
[84] van Vliet M. T. H., Franssen W. H. P., Yearsley J. R., Ludwig F., Haddeland I., Lettenmaier D. P., Kabat P. (2013): Global river discharge and water temperature under climate change. Global Environmental Change – Human and Policy Dimensions 23 (2): 450–464.
[85] Gu R. C., Montgomery S., Al Austin T. (1998): Quantifying the effects of stream discharge on summer river temperature. Hydrological Sciences Journal/Journal Des Sciences Hydrologiques 43 (6): 885–904.
[86] Zorn T. G., Seelbach P. W., Rutherford E. S. (2012): A regional-scale habitat suitability model to assess the effects of flow reduction on fish assemblages in Michigan streams. Journal of the American Water Resources Association 48 (5): 871–895.
[87] Tendall D., Honti M., Gorski S., Stamm C. (in prep.): Catchment-scale Assessment of the Impacts of Climate Change, Irrigation and Shading on a River's Temperature Regime and Aquatic Biota.
[88] Honti M., Schuwirth N., Riekermann J., Ghielmetti N., Stamm C. (in prep.): Prediction of nutrient and organic micropollutant loads in streams under changing climatic, socio-economic and technical boundary conditions with an integrated transport model.
[89] Schuwirth N., Reichert P. (2013): Bridging the gap between theoretical ecology and real ecosystems: modeling invertebrate community composition in streams. Ecology 94 (2): 368–379.
[90] Schuwirth N., Dietzel A., Reichert P. (in prep.): How to predict macroinvertebrate communities in streams: Application of the model Streambugs to the Glatt catchment on the Swiss Plateau.
[91] Schmidt-Kloiber A., Herung D. (2012): www.freshwaterecology.info – the taxa and autecology database for freshwater organisms, version 5.0.

[92] Hutchins M. G., Johnson A. C., Deflandre-Vlandas A., Comber S., Posen P., Boorman D. (2010): Which offers more scope to suppress river phytoplankton blooms: Reducing nutrient pollution or riparian shading? Science of the Total Environment 408 (21): 5065–5077.

[93] Ormerod S. J., Dobson M., Hildrew A. G., Townsend C. R. (2010): Multiple stressors in freshwater ecosystems. Freshwater Biology 55: 1–4.

[94] Woodward G., Perkins D. M., Brown L. E. (2010): Climate change and freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization. Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences 365 (1549): 2093–2106.

[95] Adrian R., O'Reilly C. M., Zagarese H., Baines S. B., Hessen D. O., Keller W., Livingstone D. M., Sommaruga R., Straile D., Van Donk E., Weyhenmeyer G. A., Winder M. (2009): Lakes as sentinels of climate change. Limnology and Oceanography 54 (6): 2283–2297.

[96] Livingstone D. M. (2003): Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake. Climatic Change 57 (1–2): 205–225.

[97] Livingstone D. M. (1997): An example of the simultaneous occurrence of climate-driven «sawtooth» deep-water warming/cooling episodes in several Swiss lakes. Verh Internat Verein Limnol 26 (2): 205–225.

[98] Rempfer J., Livingstone D. M., Forster R., Blodau C. (2009): Response of hypolimnetic oxygen concentrations in deep Swiss perialpine lakes to interannual variations in winter climate. Verh Internat Verein Limnol 30 (5): 717–721.

[99] Rempfer J., Livingstone D. M., Blodau C., Forster R., Niederhauser P., Kipfer R. (2010): The effect of the exceptionally mild European winter of 2006–2007 on temperature and oxygen profiles in lakes in Switzerland: A foretaste of the future? Verh Internat Verein Limnol 55 (5): 2170–2180.

[100] Schär C., Vidale P. L., Luthi D., Frei C., Haberli C., Liniger M. A., Appenzeller C. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. Nature 427 (6972): 332–336.

[101] Jankowski T., Livingstone D. M., Buhrer H., Forster R., Niederhauser P. (2006): Consequences of the 2003 European heat wave for lake temperature profiles, thermal stability, and hypolimnetic oxygen depletion: Implications for a warmer world. Limnology and Oceanography 51 (2): 815–819.

[102] Peeters F., Livingstone D. M., Goudsmit G. H., Kipfer R., Forster R. (2002): Modeling 50 years of historical temperature profiles in a large central European lake. Limnology and Oceanography 47 (1): 186–197.

[103] Livingstone D. M., Dokulil M. T. (2001): Eighty years of spatially coherent Austrian lake surface temperatures and their relationship to regional air temperature and the North Atlantic Oscillation. Limnology and Oceanography 46 (5): 1220–1227.

[104] Straile D., Livingstone D. M., Weyhenmeyer G. A., George D. G. (2003): The Response of Freshwater Ecosystems to Climate Variability Associated with the North Atlantic Oscillation. In: The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact. eds. Hurrell J. W. , Kushnir Y. , Ottersen G. and Visbeck M. American Geophysical Union: 263–279.

[105] Weyhenmeyer G. A., Adrian R., Gaedke U., Livingstone D. M., Maberly S.C. (2002): Response of phytoplankton in European lakes to a change in the North Atlantic Oscillation. Verh Internat Verein Limnol 28 (3): 1436–1439.

[106] Peter A., Köster O., Schildknecht A., von Gunten U. (2009): Occurrence of dissolved and particle-bound taste and odor compounds in Swiss lake waters. Water Research 43 (8): 2191–2200.

[107] Codd G., Bell S., Kaya K., Ward C., Beattie K., Metcalf J. (1999): Cyanobacterial toxins, exposure routes and human health. European Journal of Phycology 34 (4): 405–415.

[108] Rodriguez E., Onstad G. D., Kull T. P. J., Metcalf J. S., Acero J. L., von Gunten U. (2007): Oxidative elimination of cyanotoxins: Comparison of ozone, chlorine, chlorine dioxide and permanganate. Water Research 41 (15): 3381–3393.

[109] Peter A., von Gunten U. (2007): Oxidation kinetics of selected taste and odor compounds during ozonation of drinking water. Environmental Science & Technology 41 (2): 626–631.

[110] Pirbazari M., Ravindran V., Badriyha B. N., Craig S., McGuire M. J. (1993): GAC adsorber design protocol for the removal of off-flavors. Water Research 27 (7): 1153–1166.

[111] Orlowsky B. (2012): Erwartete Zunahme von Starkniederschlägen in den kommenden Jahrzehnten in Mitteleuropa. Artikel präsentiert an der Konferenz Klimawandel und Extremereignisse, in Präsentation, ETH Zürich, 8. Mai 2012.

[112] Milly P. C. D., Betancourt J., Falkenmark M., Hirsch R. M., Kundzewicz Z. W., Lettenmaier D. P., Stouffer R. J. (2008): Climate change – Stationarity is dead: Whither water management? Science 319 (5863): 573–574.

[113] Egger C., Honti M., Maurer M. (2013): Einfluss des Klimawandels auf die Leistung der Siedlungsentwässerung. Artikel präsentiert an der Konferenz Aqua Urbanica 2013 – Gewässerschutz bei Regenwetter, in Dübendorf, 29. Juli 2013.

[114] Fatichi S., Ivanov V. Y., Caporali E. (2012): On the search for vital details of climate change. Artikel präsentiert an der Konferenz 9th International Workshop on Precipitation in urban areas Urban Challenges in Rainfall Analysis, in St Moritz, 6. Dez. 2012.

[115] Maurer M., Lienert J. (2014): Wasserinfrastrukturen nachhaltig in eine unsichere Zukunft führen / Sustainable water infrastructure planning for an uncertain future (in German, English, French). Eawag News 2: 1–8.

[116] Pronk M., Sinreich M., Guhl F., Egli T., Felleisen R., Koch M., Köster O., Rätz E., Ramseier C., Rossi P., Schürch N. (2010): Auftreten von Mikroorganismen im Grundwasser – Ein erster landesweiter Überblick. GWA 12: 1059–1071.

[117] Vouillamoz J., Malard A., Schwab-Rouge G., Weber E., Jeannin P. Y. (2013): Mapping flood-related hazards in karst using KARSYS approach. Application to the Beuchire-Creugenat karst system (JU, Switzerland). Artikel präsentiert an der Konferenz Proceedings of the 13th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, in Carlsbad, New Mexico, USA, Mai 2013.

[118] Malard A., Jeannin P. Y., Sinreich M., Weber E., Vouillamoz J. (2014): Praxisorientierter Ansatz zur Kartographischen Darstellung von Karst-Grundwasserressourcen – Erfahrungen aus dem Swisskarst-Projekt. Grundwasser: in press.

[119] Scheidegger A., Scholten L., Maurer M., Reichert P. (2013): Extension of pipe failure models to consider the absence of data from replaced pipes. Water Research 47 (11): 3696–3705.

[120] Rieckermann J., Kracht O., Gujer W. (2003): Wie dicht ist unser Kanalnetz? Eawag News 57: 29–31.

[121] Maurer A. M., Sturchler D. (2000): A waterborne outbreak of small round-structured virus, campylobacter and shigella co-infections in La Neuveville, Switzerland, 1998. Epidemiology and Infection 125 (2): 325–332.

[122] Waltham T., Bell F., Culshaw M. (2010): Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction. Springer. Berlin, Heidelberg.

[123] Scheidegger A., Hug T., Rieckermann J., Maurer M. (2011): Network condition simulator for benchmarking sewer deterioration models. Water Research 45 (16): 4983–4994.

[124] Egger C., Scheidegger A., Reichert P., Maurer M. (2013): Sewer deterioration modeling with condition data lacking historical records. Water Research 47 (17): 6762–6779.

[125] Scholten L., Maurer M., Scheidegger A. (2014): Zustandsmodellierung kleiner Versorgungsnetze (in German) (Condition modeling of small water supply networks). Aqua & Gas 6: 51–58.

[126] Scholten L., Scheidegger A., Reichert P., Maurer M. (2013): Combining expert knowledge and local data for improved service life modeling of water supply networks. Environmental Modelling & Software 42: 1–16.

[127] Zheng J., Egger C., Lienert J. (in prep.): Multicriteria decision analysis for water infrastructure planning incorporating stakeholders' preferences.

[128] Hillenbrand T., Niederste-Hollenberg J., Menger-Krug E., Klug S., Holländer R., Lautenschläger S., Geyler S. (2010): Demografischer Wandel als Herausforderung für die Sicherung und Entwicklung einer kosten- und ressourceneffizienten Abwasserinfrastruktur. Im Auftrag des Umweltbundesamts, Berlin.

[129] Neuenteufel R., Ertl T., Spindler A., Lukas A., Perfler R., Schwarz D., Zessner M., Haberl R. (2012): Technische Herausforderungen in der Siedlungswasserwirtschaft Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien.

[130] Weber M., Schild A. (2006): Stand der Bewässerung in der Schweiz. Bericht zur Umfrage 2006. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern.

[131] Staufer P., Ort C. (2012): Diffuse Einträge aus Siedlungen: Ergebnisse einer Situationsanalyse. Aqua & Gas 11: 42–50.

[132] Lienert J., Schnetzer F., Ingold K. (2013): Stakeholder analysis combined with social network analysis provides fine-grained insights into water infrastructure planning processes. Journal of Environmental Management 125: 134–148.

[133] Gianella S., Maurer M. (2006): Infrastrukturmanagement: Internationale Standortbestimmung für den Wasser- und Abwassersektor. GWA 9: 733–742.

[134] Vollenweider S. (2011): Management kommunaler Netzinfrastruktur: Standortbestimmung und Handlungsbedarf am Beispiel des Wassersektors. GWA 5: 309–314.

[135] SVGW (2010): W1007d. Empfehlungen. Sabotageschutz von Trinkwasserversorgungen. Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches Zürich.

[136] Hartmann D., Meylan B. (2013): Engpässen rechtzeitig vorbeugen. Wichtigste Ergebnisse der Studie «Wasserversorgung 2025». Aqua & Gas 9: 16–24.

[137] Binggeli S., Dreyer J., Suter M., Kieliger T. (2014): Handbuch kommunales Infrastrukturmanagement. Entwurf Bericht vom 31.01.2014. Fachorganisation Kommunale Infrastruktur, Wasser Agenda 21, Bern.

[138] SVGW (2009): W1005d. Regelwerk. Empfehlung zur strategischen Planung der Wasserversorgung. Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Zürich.

[139] Maurer M. (2011): Die zukünftige Wasserinfrastruktur planen. Eawag News 70: 22–25.

[140] Hostmann M., Borsuk M. E., Reichert P., Truffer B. (2005): Stakeholder values in decision support for river rehabilitation. Archiv für Hydrobiologie, Supplement 155 (1–4): 491–505.

[141] Scholten L., Egger C., Zheng J., Lienert J. (2014): Multikriterielle Entscheidungsunterstützung. Neue Ansätze für langfristige Infrastrukturplanung in der Wasserver- und -entsorgung (in German) (Multicriteria decision support. New approaches for long-term water supply and wastewater infrastructure planning). Aqua & Gas 5: 62–69.

[142] Müller A., Meier T. (2014): Trinkwasser in Notlagen. Mobile Aufbereitungsanlagen von Trinkwasser. Aqua & Gas 3: 58–63.

[143] SVGW (1995): W/VN300d. Wegleitung für die Planung und Realisierung der Trinkwasserversorgung in Notlagen. Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Zürich.

[144] Larsen T. A., Gujer W. (1996): Separate management of anthropogenic nutrient solutions (human urine). Water Science and Technology 34 (3–4): 87–94.
[145] Battaglia R. (2014): Regionalisierung der Abwasserreinigung. Wann ist die Regionalisierung sinnvoll? Erfahrung der letzten 10 Jahre im Kt. Bern. Aqua & Gas 1.
[146] BAFU (2012): Einzugsgebietsmanagement. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1204.
[147] BAFU (2013): Koordination wasserwirtschaftlicher Vorhaben. Die Abstimmung wasserwirtschaftlicher Vorhaben in und zwischen den Bereichen, den Staatsebenen und im Einzugsgebiet. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1311.
[148] Natrup W. (2013): Raumplanung: Verstärkt dreidimensional. Aqua & Gas 1: 1–11.
[149] Figura S. (2013): The impact of climate change on groundwater temperature and oxygen concentration in Swiss aquifers. ETH Diss. Nr. 21621.
[150] SVGW (2003): Regelwerk. Empfehlungen für ein einfaches Qualitätssicherungssystem für Wasserversorgungen (WQS). Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Zürich.
[151] Lienert J., Duygan M., Zheng J. (in prep.): Preference stability over time using two methods to elicit MCDA-weights for wastewater infrastructure planning.
[152] www.bafu.admin.ch
[153] Martin P. (2009): Wiederbeschaffungswert der Umweltinfrastruktur. Umfassender Überblick für die Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 0920.
[154] Wanner O. (2009): Wärmerückgewinnung aus Abwasser. Schriftenreihe der Eawag Nr. 19. Dübendorf.
[155] Hunkeler D., Käser D., Möck C., Brunner P. (in prep.): Klimaeinflüsse auf die Grundwassermengen in der Schweiz.

Teams

Kernteam

- Daniel Hunkeler (CHYN)
- Max Maurer (Eawag)
- Sabine Hoffmann (Eawag)
- Michiel Pronk (CHYN) (ehem.)

Team Thematische Synthese (NFP 61-Expertinnen und -Experten)

- Pierre-Yves Jeannin (ISSK)
- Jan Seibert (Universität Zürich)
- Urs von Gunten (Eawag)
- David Livingstone (Eawag)
- Mario Schirmer (Eawag)
- Judit Lienert (Eawag)
- Christian Stamm (Eawag)

Begleitgruppe

- Martin Würsten (VSA, Kt. SO)
- Urs Kamm (SVGW)
- Alex Bukowiecki (Kommunale Infrastruktur)
- Heinz Habegger (Kt. BE)
- Jürg Suter (Kt. ZH)
- Pierre Christe (Kt. VS)
- Brigitta Gander (Kt. SZ, AG Klima und Grundwasser)
- Bernhard Gyger (Wasserverbund Region Bern AG)
- Andreas Frei (Stadt Uster)
- Dominique Bérod (BAFU, Abt. Hydrologie)
- Marc Schürch (BAFU, Abt. Hydrologie, AG Klima und Grundwasser)
- Michael Schärer (BAFU, Abt. Wasser)
- Federico Matousek (mbn AG, Baden, AG Klima und Grundwasser)
- Alex Benz (Hunziker Betatech)
- Stefan Vollenweider (WasserAgenda 21)
- Edi Hoehn (ehem. Eawag, NFP 61, AG Klima und Grundwasser)

Dank

Ohne die engagierte Teilnahme vieler Expertinnen und Experten auf lokaler, kantonaler und nationaler Ebene wäre dieser Synthesebericht nicht möglich gewesen. Ein besonderer Dank gebührt den Mitgliedern unserer Begleitgruppe für ihre konstruktive Mitarbeit und wertvollen Anmerkungen zu früheren Versionen dieses Berichts:

- Martin Würsten (VSA, Kt. SO)
- Urs Kamm (SVGW)
- Anton Kilchmann (SVGW)
- Alex Bukowiecki (Kommunale Infrastruktur)
- Heinz Habegger (Kt. BE)
- Jürg Suter (Kt. ZH)
- Pierre Christe (Kt. VS)
- Brigitta Gander (Kt. SZ, AG Klima und Grundwasser)
- Bernhard Gyger (Wasserverbund Region Bern AG)
- Andreas Frei (Stadt Uster)
- Dominique Bérod (BAFU)
- Marc Schürch (BAFU, AG Klima und Grundwasser)
- Michael Schärer (BAFU)
- Federico Matousek (mbn AG, Baden, AG Klima und Grundwasser)
- Alex Benz (Hunziker Betatech)
- Stefan Vollenweider (WasserAgenda 21)
- Edi Hoehn (ehem. Eawag, AG Klima und Grundwasser)

Auch bedanken wir uns sehr herzlich bei unseren Expertinnen und Experten des NFP 61 (Team Thematische Synthese) für ihre ausgezeichnete Zusammenarbeit, ihre angeregten Diskussionen und ihre konstruktiven Rückmeldungen zu früheren Versionen dieses Berichts:

- Pierre-Yves Jeannin (ISSKA, SWISSKARST)
- Jan Seibert (Universität Zürich, DROUGHT-CH)
- Urs von Gunten (Eawag, RIBACLIM)
- David Livingstone (Eawag, GW-TREND)
- Mario Schirmer (Eawag, RIBACLIM, GW-TREND)
- Judit Lienert (Eawag, SWIP)
- Christian Stamm (Eawag, IWAQA)

Wir bedanken uns auch sehr herzlich bei den Post-Docs und PhDs des NFP 61, die den Bericht mit ihren fundierten Forschungsergebnissen und wertvollen Anregungen massgeblich mitgestaltet haben:

- Daniel Käser (CHYN, GW-TREND)
- Christian Moeck (CHYN, GW-TREND)
- Danielle Tendall (ETH Zürich, AGWAM)
- Arnauld Malard (ISSKA, SWISSKARST)
- Mark Honti (Eawag, IWAQA)
- Nele Schuwirth (Eawag, IWAQA)
- Lisa Scholten (Eawag, SWIP)
- Christoph Egger (Eawag, SWIP)
- Jun Zheng (Eawag, SWIP)
- Simon Figura (Eawag, GW-TEMP)
- Sabrina Bahnmüller (Eawag, RIBACLIM)
- Samuel Diem (Eawag, RIBACLIM)
- Matthias Rudolf von Rohr (Eawag, RIBACLIM)

Wir bedanken uns ebenfalls bei der NFP 61-Leitungsgruppe, insbesondere Günter Blöschl und Franz Nobilis, dem NFP 61-Leitungsbüro, insbesondere Barbara Flückiger und Patricia Fry, sowie dem NFP 61-Programmbeirat für seine konstruktive Unterstützung beim Erstellen dieses Berichts. Schliesslich gebührt unser Dank auch den «Schreibenden» der Thematischen Synthesen des NFP 61: Astrid Björnsen Gurung (Thematische Synthese 1), Klaus Lanz und Eric Rahn (Thematische Synthese 2) sowie Franziska Schmid (Thematische Synthese 4) für ihre konstruktive Zusammenarbeit im NFP 61-Syntheseprozess.

Anhang I

Vorgehen

Formulierung von Zielen einer nachhaltigen SWW

Die Formulierung von Zielen einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft erfolgte auf der Grundlage der Ergebnisse des NFP 61-Forschungsprojekts «Langfristige Planung nachhaltiger Wasserinfrastrukturen». Lienert et al. (SWIP: 2014a [22]) identifizierten in einem mehrstufigen, partizipativen Verfahren Ziele einer guten Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastruktur in der Schweiz. Die Ziele wurden in zwei Workshops[7] mit Expertinnen und Experten des NFP 61 diskutiert und bezüglich einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft ergänzt (siehe Kapitel 3). Die Ziele dienten als Grundlage für die Beurteilung der Auswirkungen verschiedener Handlungsoptionen.

Identifizierung von Herausforderungen

Die Identifizierung von Herausforderungen einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft erfolgte zunächst im Rahmen eines Workshops mit Expertinnen und Experten des NFP 61.[17] Die Ergebnisse des Workshops wurden im Zuge einer umfassenden Literaturrecherche über aktuelle und künftige Herausforderungen der Wasserver- und Abwasserentsorgung im Kontext von Oberflächenwasser- und Grundwasserressourcen ergänzt. Die Herausforderungen wurden anschliessend individuell von den Expertinnen und Experten des NFP 61 und den Mitgliedern der Begleitgruppe nach ihrer Wichtigkeit bewertet. Die Bewertung diente als Grundlage für die Priorisierung der hier zu analysierenden Herausforderungen. Tabelle 6 beschreibt die für die Bewertung verwendeten Kriterien und deren Ausprägungen. Insgesamt wurde die Bewertung von 7 Expertinnen und Experten des NFP 61 und 15 Mitgliedern der Begleitgruppe vorgenommen. Die Anzahl Nennungen pro Ausprägung wurde mit den entsprechenden Punkten gewichtet und durch die Gesamtanzahl Bewertungen dividiert. Da der Synthesebericht sich an Fachkräfte in der Praxis richtet, wurde die Einschätzung der Begleitgruppenmitglieder stärker bzw. doppelt gewichtet. Die Ergebnisse der Gesamtbewertung sind in Tabelle 7 dargestellt. Die von den Expertinnen und Experten des NFP 61 und den Mitgliedern der Begleitgruppe identifizierten sechs wichtigsten Herausforderungen sind orange markiert, die von den Autoren als wichtig erachteten Herausforderungen gelb. In Anbetracht der beschränkten Seitenzahl wurden in diesem Synthesebericht nur die markierten Herausforderungen detaillierter analysiert. Die Herausforderung «Beeinträchtigung der Grundwasserqualität durch die Landwirtschaft» wird in der Thematischen Synthese 2 des NFP 61 behandelt.

Analyse kausaler Zusammenhänge

Die Analyse der kausalen Zusammenhänge der aktuellen und künftigen Herausforderungen einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft erfolgte mithilfe des DPSIR-Ansatzes (Abkürzung für Drivers, Pressures, State, Impact, Responses) [41]. Der Ansatz erlaubt es, die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Einflussgrössen, die auf das System Siedlungswasserwirtschaft einwirken, unter dem Blickwinkel der Kausalität zu analysieren. Die Analyse dient als Grundlage für die nachfolgende Ableitung von Handlungsoptionen für eine nachhaltige Siedlungswasserwirtschaft in der Schweiz.

Ableitung von Handlungsoptionen

Die Ableitung von Handlungsoptionen einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft erfolgte zunächst auf der Grundlage der analysierten kausalen Zusammenhänge. Die Handlungsoptionen wurden dann in einem Workshop mit Expertinnen und Experten des NFP 61 diskutiert und vor dem Hintergrund ihrer Forschungsergebnisse und ihres Expertenwissens ergänzt. Die Handlungsoptionen wurden anschliessend auf einer umfassenden Literaturrecherche abgestützt.[18]

Abschätzung der Auswirkungen von Handlungsoptionen

Die Abschätzung der Auswirkung der Handlungsoptionen bez. der Erreichung der Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft erfolgte individuell durch die Expertinnen und Experten des NFP 61. Jede Handlungsoption wurde individuell von drei Expertinnen und Experten des NFP 61 im Rahmen von Interviews bewertet. Für jede Handlungsoption wurde dabei geprüft, ob die in Kapitel 3 beschriebenen Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft durch die jeweilige Handlungsoption positiv (+), negativ (–), positiv und negativ (+/–) oder nicht (o) beeinflusst werden. Für die Ziele, für die im Rahmen des NFP 61-Forschungsprojekt

Tab. 6: Die für die Bewertung der Herausforderungen verwendeten Kriterien und Ausprägungen.

Kriterium	**Wichtigkeit**			
Ausprägung	Sehr wichtig	Wichtig	Wenig wichtig	Unwichtig
Punkte Expertinnen und Experten / Begleitgruppe	5/10	3/6	1/2	–1/–2

«Langfristige Planung nachhaltiger Infrastrukturen» Attribute definiert wurden (SWIP: Lienert et al. 2014a), erfolgte die Bewertung über das jeweilige Attribut.[16] Für alle anderen Ziele, für die keine Attribute festgelegt wurden, erfolgte die Bewertung über die Einschätzung der positiven oder negativen Veränderung gegenüber dem Status quo der gegenwärtigen Zielerreichung. Die Einschätzung erfolgte unter Berücksichtigung der regionalen Unterschiede in der Schweiz.

Die Ergebnisse der Experteneinschätzung wurden anschliessend ausgewertet und dem Team Thematische Synthese zurückgespiegelt. Allfällige Diskrepanzen zwischen den individuellen Bewertungen der drei Expertinnen und Experten (pro Handlungsoption) oder zwischen den Expertinnen und Experten und dem Syntheseteam wurden anschliessend diskutiert und bereinigt. Die Bewertungen wurden abschliessend aggregiert, um eine Gesamteinschätzung bez. der Auswirkungen der Handlungsoptionen auf der Ebene der Fundamentalziele zu erhalten (siehe auch Tabelle 5). Eine detaillierte Beschreibung der Auswirkungen der Handlungsoptionen auf Ebene der Unterziele findet sich in Anhang I, Auswertung. Die beschriebenen Auswirkungen entsprechen dem heutigen besten Wissen der Expertinnen und Experten des NFP 61.

Abschätzung der Konsequenzen (Auswertung)

Nachfolgend werden die Auswirkungen der Handlungsoptionen «Infrastrukturen», «Wasserressourcen» und «Wissen» auf die in Kapitel 3 beschriebenen Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft qualitativ abgeschätzt. Für jede Handlungsoption wird dabei geprüft, ob die sieben Fundamentalziele «Hohe Generationengerechtigkeit» (1), «Guter Gewässerschutz» (2), «Gute Wasserversorgung» (3), «Sichere Abwasserentsorgung» (4), «Hohe soziale Akzeptanz» (5), «Geringe Kosten» (6) und «Effiziente Ressourcennutzung» (7) durch die Handlungsoption positiv und negativ (+/–) oder nicht (o) beeinflusst werden.

Die Ergebnisse der individuellen Bewertung der Handlungsoptionen durch die Expertinnen und Experten des NFP 61 findet sich unter folgendem Link: http://www.nfp61.ch

Tab. 7: Ergebnisse der Bewertung der Herausforderungen einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft durch die Expertinnen und Experten des NFP 61 und die Mitglieder der Begleitgruppe. Die Anzahl der Nennungen pro Ausprägung (sehr wichtig, wichtig, wenig wichtig, unwichtig) wurden mit den entsprechenden Punkten (5, 3, 1, –1 für NFP 61-Expertinnen und -Experten und 10, 6, 2 und –2 für Mitglieder der Begleitgruppe) gewichtet und durch die Gesamtanzahl Bewertungen dividiert, um eine Gesamtbewertung zu erhalten.

	5	3	1	–1	10	6	2	–2		
	Wichtigkeit Expertinnen und Experten				Wichtigkeit Begleitgruppe					
Herausforderungen	Sehr wichtig	Wichtig	Wenig wichtig	Unwichtig	Sehr wichtig	Wichtig	Wenig wichtig	Unwichtig	**Gesamtbewertung**	**Rang**
Klimawandel										
a) Zunehmende Trockenperioden	3	4			8	7			12,0	1
b) Steigende Wassertemperaturen		6	1		3	9	2		9,0	10
c) Zunehmende Starkniederschläge	2	3	2		5	7	3		9,5	6
d) Zunehmende Hochwasserereignisse	3	2	2		4	8	3		9,6	5
Alterung der Infrastruktur										
a) Mittel- und langfristige Planung	3	4			7	7		1	11,2	2
b) Professionalisierung, Zentralisierungsgrad	1	2	3		4	9	1		9,2	7
c) Wasserbedarf der Zukunft – Auslegung der Trinkwasserversorgung	3	2	2		3	8	4		9,0	10
d) Infrastrukturmanagement	2	4	1		6	8	1		10,6	3
Intensivierung der Raumnutzung										
a) Beeinträchtigung der Grundwasserqualität durch die Landwirtschaft	2	3	1		5	7	2		10,2	4
b) Einfluss des urbanen Raums auf Wasserqualität und Quantität	3	2	1		5	3	7		9,1	8
c) Mikrobielle Beeinträchtigung der Wasserqualität	2	3	1		6	3	5	1	9,1	8
d) Ungenügender Vollzug des planerischen Gewässerschutzes		5	1		2	11	2		8,7	12

Tab. 8: siehe www.nfp61.ch Publikationen > Aus dem NFP > Thematische Synthese 3

Handlungsoptionen Infrastrukturen

Infrastrukturen-1: Förderung eines «zweiten Standbeins»

	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
Handlungsoption	1	2	3	4	5	6	7
Förderung eines «zweiten Standbeins»	+	+	+	o	+/–	–	+/–

1) **Hohe Generationengerechtigkeit (+):** Die Förderung eines «zweiten Standbeins» in der Wasserversorgung erhöht die Gesamtkosten, impliziert aber keine Verschiebung der finanziellen Rehabilitationslast auf zukünftige Generationen (o). Die Handlungsoption erhöht die flexible Anpassung der Wasserversorgung an sich verändernde Rahmenbedingungen (+) (z.B. zunehmende Trockenperioden). Das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» wird daher insgesamt positiv beeinflusst.
2) **Guter Gewässerschutz (+):** Die Förderung eines zweiten Standbeins wirkt sich positiv auf den Grundwasserschutz aus (+), da die Wasserbezugslast auf unterschiedliche Ressourcen und Standorte verteilt wird. Das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» wird daher insgesamt positiv beeinflusst.
3) **Gute Wasserversorgung (+):** Die Förderung eines zweiten Standbeins erhöht die Versorgungssicherheit, d.h. die zuverlässige Versorgung (+) von genügend Wasser (+) einwandfreier Qualität (+). Das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» wird daher positiv beeinflusst.
4) **Sichere Abwasserentsorgung (o):** Die Förderung eines zweiten Standbeins wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung» aus.
5) **Hohe soziale Akzeptanz (+/–):** Die Förderung eines zweiten Standbeins kann sich positiv (+) oder negativ (–) auf die Wasserressourcenautonomie der Gemeinden auswirken – je nachdem, ob der Wasserbezugsort innerhalb (+) oder ausserhalb (–) der Gemeinde liegt. Das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» wird daher insgesamt positiv oder negativ beeinflusst.
6) **Geringe Kosten (–):** Die Förderung eines zweiten Standbeins impliziert eine Erhöhung der Jahreskosten (+), da für die Bereitstellung zusätzlicher, voneinander unabhängiger Wasserressourcen zusätzliche Leitungen und Kapazitäten zur Verfügung gestellt werden müssen. Das Fundamentalziel «Geringe Kosten» wird daher negativ beeinflusst (–).
7) **Effiziente Ressourcennutzung (+/–):** Die Förderung eines zweiten Standbeins kann sich positiv (+) oder negativ (–) auf die effiziente Nutzung von Energie auswirken, je nachdem, ob für die Bereitstellung zusätzlicher Wasserressourcen mehr (–) oder weniger (+) Energie verbraucht wird. Das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcennutzung» wird daher insgesamt positiv oder negativ beeinflusst.

Infrastrukturen-2: Förderung eines umfassenden Infrastrukturmanagements

	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
Handlungsoption	1	2	3	4	5	6	7
Förderung eines umfassenden Infrastrukturmanagements	+	+	+	+	+/–	+/–	+

1) **Hohe Generationengerechtigkeit (+):** Die Förderung eines umfassenden Infrastrukturmanagements wirkt sich positiv auf die zukünftige Rehabilitationslast (+) und die flexible Anpassung des Systems aus (+), da sie den langfristigen Erhalt der Leistungsfähigkeit der Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsinfrastrukturen – auch bei unsicherer Zukunft – impliziert. Das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» wird daher positiv beeinflusst.
2) **Guter Gewässerschutz (+):** Die Förderung eines umfassenden Infrastrukturmanagements wirkt sich positiv auf den chemischen Zustand der Gewässer aus (+), da sie u.a. eine Verbesserung von Zustand (z.B. Reduktion von lecken Leitungen) und Leistungsfähigkeit der Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastrukturen (z.B. Reduktion von Mischwasserentlastungen) impliziert. Das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» wird daher insgesamt positiv beeinflusst.
3) **Gute Wasserversorgung (+):** Die Förderung eines umfassenden Infrastrukturmanagements erhöht die Versorgungssicherheit, d.h. die zuverlässige Versorgung (+) von genügend Wasser (+) einwandfreier Qualität (+). Das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» wird daher positiv beeinflusst.
4) **Sichere Abwasserentsorgung (+):** Die Förderung eines umfassenden Infrastrukturmanagements wirkt sich positiv auf die hygienische Ab- und Einleitung von Abwasser in die Gewässer (+) und die Zuverlässigkeit des Entwässerungssystems (+) aus, da sie u.a. eine Verbesserung von Zustand (z.B. Reduktion von lecken Leitungen) und Leistungsfähigkeit der Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastrukturen (z.B. Reduktion von Mischwasserentlastungen) impliziert. Das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung» wird insgesamt positiv beeinflusst.
5) **Hohe soziale Akzeptanz (+/–):** Die Förderung eines umfassenden Infrastrukturmanagements impliziert eine Verbesserung a) der Zusammenarbeit verschiedener Sektoren in der Planung von

Bau und Unterhalt von Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsinfrastrukturen und b) des Managements der Infrastrukturen. Die Handlungsoption wirkt sich daher positiv auf die Ziele einer geringen unnötigen Bautätigkeit (+) und einer hohen Qualität von Verwaltung und Betrieb (+) aus. Hingegen wirkt sie sich negativ auf das Mitspracherecht der Bevölkerung aus (–), da mit der Förderung eines umfassenden Infrastrukturmanagements die Einbindung der Bevölkerung in Entscheidungsprozessen abnimmt. Das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» wird daher insgesamt positiv und negativ beeinflusst.

6) **Geringe Kosten (+/–):** Die Förderung eines umfassenden Infrastrukturmanagements kann sich positiv (+) oder negativ (–) auf die Jahreskosten auswirken: Sie wirkt sich negativ aus, wenn Kosten nicht auf zukünftige Generationen verschoben und damit ansteigen werden (–). Sie wirkt sich hingegen positiv aus, wenn eine risikobasierte Instandhaltung betrieben wird, die Schäden minimiert und damit Kosten vermeidet (+). Das Fundamentalziel «Geringe Kosten» kann daher insgesamt positiv oder negativ beeinflusst werden.
7) **Effiziente Ressourcennutzung (+):** Die Förderung eines umfassenden Infrastrukturmanagements wirkt sich positiv auf das Ziel einer effizienten Nutzung von Energie aus (+), da mit einem umfassenden Infrastrukturmanagement die Energieeffizienz optimiert werden kann. Das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcennutzung» wird daher insgesamt positiv beeinflusst.

Infrastrukturen-3:
Verbesserung der mittel- und langfristigen Planung

	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
Handlungsoption	1	2	3	4	5	6	7
Verbesserung der mittel- und langfristigen Planung	+	+	+	+	+	+/–	+

1) **Hohe Generationengerechtigkeit (+):** Die Verbesserung der mittel- und langfristigen Planung wirkt sich positiv auf die zukünftige Rehabilitationslast (+) aus, da sie u.a. die Erarbeitung proaktiver Rehabilitationsstrategien (statt problembasierten Reparierens) impliziert. Auch wirkt sie sich positiv auf die flexible Anpassung des Systems (+) aus, da Unsicherheiten in Bezug auf zukünftige sozioökonomische oder klimatische Veränderungen in der Planung explizit berücksichtigt werden. Das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» wird daher positiv beeinflusst.
2) **Guter Gewässerschutz (+):** Die Verbesserung der mittel- und langfristigen Planung wirkt sich positiv auf den chemischen Zustand der Gewässer aus (+), da zukünftige Gewässerschutzaspekte in der Planung explizit berücksichtigt werden. Das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» wird insgesamt positiv beeinflusst.
3) **Gute Wasserversorgung (+):** Die mittel- und langfristige Planung ermöglicht die Optimierung der Wasserversorgung in Bezug auf die Ziele einer guten Wasserversorgung. Die Verbesserung der Planung wirkt sich daher positiv auf die Versorgungssicherheit, d.h. die zuverlässige Versorgung (+) von genügend Wasser (+) in einwandfreier Qualität (+) aus. Das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» wird insgesamt positiv beeinflusst.
4) **Sichere Abwasserentsorgung (+):** Die mittel- und langfristige Planung ermöglicht die Optimierung der Abwasserentsorgung in Bezug auf die Ziele einer sicheren Abwasserentsorgung. Die Verbesserung der Planung wirkt sich daher positiv auf die hygienische Ab- und Einleitung von Abwasser in die Gewässer (+) und die Zuverlässigkeit des Entwässerungssystems (+) aus, da sie u.a. die Erarbeitung proaktiver Rehabilitationsstrategien für alternde Infrastrukturen impliziert. Das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung» wird insgesamt positiv beeinflusst.
5) **Hohe soziale Akzeptanz (+):** Die Verbesserung der mittel- und langfristigen Planung impliziert eine Verbesserung der Zusammenarbeit verschiedener Sektoren in der Planung von Bau und Unterhalt von Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsinfrastrukturen sowie eine Verbesserung des Infrastrukturmanagements. Sie wirkt sich daher positiv auf die Ziele einer «Geringen unnötigen Bautätigkeit» (+) und einer «Hohen Qualität von Verwaltung und Betrieb» (+) aus. Das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» wird insgesamt positiv beeinflusst.
6) **Geringe Kosten (+/–):** Die Verbesserung der mittel- und langfristigen Planung wirkt sich positiv (+) und negativ (–) auf das Ziel «Tiefe Jahreskosten» aus: Je nach Detaillierungsgrad können die Kosten kurzfristig erhöht (–), jedoch mittel- und langfristig reduziert werden (+). Mittel- und langfristig wirkt sich die Planung positiv auf das Ziel eines «Geringen Kostenanstiegs» aus (+). Das Fundamentalziel «Geringe Kosten» wird insgesamt positiv und negativ beeinflusst.
7) **Effiziente Ressourcennutzung (+):** Die Verbesserung der mittel- und langfristigen Planung wirkt sich positiv auf die effiziente Nutzung von Energie aus (+), da mit einer mittel- und langfristigen Planung die Energieeffizienz optimiert werden kann. Das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcennutzung» wird insgesamt positiv beeinflusst.

Infrastrukturen-4:
Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Notlagen

	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
Handlungsoption	1	2	3	4	5	6	7
Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Notlagen	+	o	+	o	+/–	–	o

1) **Hohe Generationengerechtigkeit (+):** Die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Notlagen impliziert keine Verschiebung der Rehabilitationslast auf zukünftige Generationen (o), jedoch erhöht sie die flexible Anpassung des Wasserversorgungssystems (+) in Krisensituationen. Das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» wird insgesamt positiv beeinflusst.
2) **Guter Gewässerschutz (o):** Die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Notlagen wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» aus (o).
3) **Gute Wasserversorgung (+):** Die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Notlagen erhöht die Versorgungssicherheit, d.h. die zuverlässige Versorgung (+) von genügend Trinkwasser (+) in einwandfreier Qualität (+) in Krisensituationen. Das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» wird – bezogen auf Krisensituationen – gut erreicht.
4) **Sichere Abwasserentsorgung (o):** Die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Notlagen wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung» aus (o).
5) **Hohe soziale Akzeptanz (+/–):** Die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Notlagen impliziert eine Verbesserung des Managements von Trinkwasserversorgungen in Krisensituationen. Die Handlungsoption wirkt sich daher positiv auf das Ziel einer hohen Qualität von Verwaltung und Betrieb (+) aus. Hingegen wirkt sie sich negativ auf das Mitspracherecht der Bevölkerung (–) aus, da mit der Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Notlagen die Einbindung der Bevölkerung in Entscheidungsprozessen abnimmt. Das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» wird insgesamt positiv und negativ beeinflusst.
6) **Geringe Kosten (–):** Die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Notlagen wirkt sich negativ auf die Jahreskosten aus (–). Das Fundamentalziel «Geringe Kosten» wird insgesamt negativ beeinflusst.
7) **Effiziente Ressourcennutzung (o):** Die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Notlagen wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcenutzung» aus.

Infrastrukturen-5:
Förderung flexibler Infrastrukturen

	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
Handlungsoption	1	2	3	4	5	6	7
Förderung flexibler Infrastrukturen	+	+	+/o/–	+	+/–	+/–	+

1) **Hohe Generationengerechtigkeit (+):** Die Förderung flexibler Infrastrukturen wirkt sich positiv auf das Ziel einer tiefen zukünftigen Rehabilitationslast aus (+), da potenziell weniger veraltete oder unangebrachte «sunk costs» zukünftigen Generationen vererbt werden. Die Handlungsoption wirkt sich ebenfalls positiv auf das Ziel einer flexiblen Anpassung der Systeme (+) aus, da sich dezentrale Systeme besser veränderten (ökonomischen, ökologischen und sozialen) Rahmenbedingungen anpassen lassen. Das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» wird insgesamt positiv beeinflusst.
2) **Guter Gewässerschutz (+):** Die Förderung flexibler Infrastrukturen wirkt sich positiv auf den chemischen Zustand der Gewässer (+) aus, da mit dezentralen Systemen oft eine höhere Innovationsrate erzielt und damit schneller auf neue Reinigungsanforderungen eingegangen werden kann. Die Handlungsoption wirkt sich ebenfalls positiv auf das Ziel eines ausgeglichenen Grundwasserhaushalts aus (+), da mit dezentralen Systemen Wasserressourcen im Einzugsgebiet belassen oder höhere Wassernutzungseffizienzen erreicht werden können. Das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» wird insgesamt positiv beeinflusst.
3) **Gute Wasserversorgung (+/o/-):** Die Förderung flexibler Infrastrukturen kann sich – je nach dezentralem System bzw. je nach Rohwasserqualität, Aufbereitungsverfahren, Aufenthaltszeit des Wassers im Netz und Materialverwendung für Leitungen und Speicher – positiv oder negativ auf das Ziel einer einwandfreien hygienischen, mikrobiologischen, chemischen, physikalischen und ästhetischen Wasserqualität (+/–) auswirken: Positiv kann es sich auswirken, wenn als Hauptrohwasserquelle Grundwasser genutzt wird, da hier eine geringere Tendenz zur Wiederverkeimung und zur Beeinträchtigung von Geruch, Geschmack, Färbung und Trübung besteht. Negativ kann es sich auswirken, wenn als Hauptrohwasserquelle z.B. Regenwasser genutzt wird. Hier ist eine grössere ästhetische Beeinträchtigung gegeben, die erst durch eine weitere Aufbereitung entfernt werden muss. Es kann demnach nicht per se gesagt werden, ob durch die Förderung flexibler Infrastrukturen das Ziel «Hohe Qualität» positiv oder negativ beeinflusst wird; jedoch kann festge-

halten werden, dass flexible Infrastrukturen so ausgerichtet und dimensioniert werden können, dass unter den gegebenen Betriebsbedingungen eine mit dem heutigen Status quo vergleichbare Qualität gewährleistet werden kann (o). Die Auswirkungen der Handlungsoption auf das Ziel «Hohe Zuverlässigkeit» der Wasserversorgung konnte von den Expertinnen und Experten des NFP 61 nicht abgeschätzt werden. Die Auswirkungen auf das Ziel «Hohe Quantität» wurden mit (o) bewertet. Das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» wird demnach insgesamt positiv, negativ oder nicht beeinflusst.

4) **Sichere Abwasserentsorgung (+):** Die Förderung flexibler Infrastrukturen wirkt sich positiv auf die hygienische Ab- und Einleitung des Abwassers in die Gewässer (+) und die Zuverlässigkeit des Entwässerungssystems (+) aus, da mit einer langsameren Ableitung des Abwassers aus der Siedlung i) die stoffliche Belastung der Gewässer, ii) die Überstauhäufigkeit der Entwässerungssysteme und iii) die Exfiltration von Abwasser aus der Kanalisation in den ungesättigten Boden abnimmt. Mit der Förderung flexibler Infrastrukturen kann das Stadtklima verbessert (+) sowie die ästhetische und erholungswirksame Funktion der Gewässer erhöht (+) werden. Das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung» wird daher insgesamt positiv beeinflusst.
5) **Hohe soziale Akzeptanz (+/–):** Die Förderung flexibler Infrastrukturen wirkt sich negativ auf die Ziele «Geringer Zeitaufwand» (–) und «Geringer Raumaufwand» (–) aus, da insbesondere dezentrale Systeme oft direkt bei den Endnutzerinnen und Endnutzern installiert werden und letztere oft für den Unterhalt und Betrieb der Systeme verantwortlich sind. Die Handlungsoption wirkt sich jedoch positiv auf das Ziel einer «Geringen unnötigen Bautätigkeit» (+) aus, da mit der Förderung flexibler Infrastrukturen Bautätigkeiten reduziert werden können. Sie wirkt sich ebenfalls positiv auf das Ziel eines «Hohen Mitspracherechts» aus (+), da Endnutzerinnen und Endnutzern oft in die Planung lokaler Systeme einbezogen werden, sowie positiv auf das Ziel «Hohe Wasserressourcenautonomie» (+), da Wasserbezugsorte oft innerhalb einer Gemeinde liegen. Das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» wird insgesamt positiv und/oder negativ beeinflusst.
6) **Geringe Kosten (+/–):** Die Förderung flexibler Infrastrukturen kann sich je nach System positiv (+) oder negativ (–) auf die Jahreskosten auswirken. Da sich dezentrale Systeme stufenweise zukünftigen Veränderungen anpassen lassen, wird das Ziel eines «Geringen Kostenanstiegs» durch die Förderung flexibler Infrastrukturen positiv beeinflusst (+). Das Fundamentalziel «Geringe Kosten» wird insgesamt positiv und negativ beeinflusst.
7) **Effiziente Ressourcennutzung (+):** Die Förderung flexibler Infrastrukturen – insbesondere die Umsetzung von Massnahmen an der Quelle (Urinseparierung und Phosphorrückgewinnung) – wirkt sich positiv auf die Rückgewinnung von Nährstoffen (+) aus. Insgesamt wird das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcennutzung» positiv beeinflusst.

Infrastrukturen-6:
Förderung der Aufrüstung und/oder Zusammenlegung von ARA

	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
Handlungsoption	1	2	3	4	5	6	7
Förderung der Aufrüstung und/oder Zusammenlegung von ARA	–	+	o	+	+/–	+/–	+/–

1) **Hohe Generationengerechtigkeit (–):** Die Förderung der Aufrüstung und/oder Zusammenlegung von ARA impliziert keine Verschiebung der finanziellen Rehabilitationslast auf zukünftige Generationen (o). Hingegen vermindert die Zusammenlegung von ARA die flexible Anpassung von Abwasserentsorgungssystemen (–). Das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» wird durch die Zusammenlegung von ARA (nicht aber durch die Aufrüstung von ARA) insgesamt negativ beeinflusst.
2) **Guter Gewässerschutz (+):** Die Förderung der Aufrüstung und/oder Zusammenlegung von ARA wirkt sich positiv auf den chemischen und biologischen Zustand von Oberflächengewässern und den trophischen Zustand von Seen aus (+), da mit der Aufrüstung und/oder Zusammenlegung von ARA die Reinigungsleistung zunimmt und damit die stoffliche Belastung der Oberflächengewässer abnimmt. Wo Oberflächengewässer in Grundwasser infiltrieren, wirkt sich ein verbesserter chemischer Zustand ebenfalls positiv auf den chemischen Zustand und die mikrobiellen Gemeinschaften im Grundwasser (Biozönose) (+) aus. Das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» wird insgesamt positiv beeinflusst.
3) **Gute Wasserversorgung (o):** Die Förderung der Aufrüstung und/oder Zusammenlegung von ARA wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» aus.
4) **Sichere Abwasserentsorgung (+):** Die Förderung der Aufrüstung und/oder Zusammenlegung von ARA wirkt sich positiv auf die hygienische Ab- und Einleitung von Abwasser in die Gewässer aus (+), da mit der geplanten Aufrüstung und der gezielten Zusammenlegung die Reinigungsleistung zu- und damit die stoffliche Belastung der Gewässer abnimmt. Letzteres wiederum wirkt sich positiv auf die Erholungsfunktion der Gewässer aus (+). Das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung» wird durch diese Handlungsoption insgesamt positiv beeinflusst.
5) **Hohe soziale Akzeptanz (+/–):** Die Förderung der Aufrüstung und/oder Zusammenlegung von

ARA wirkt sich positiv auf die Qualität von Verwaltung und Betrieb aus (+), da mit der Zusammenlegung von ARA oft eine Professionalisierung einhergeht. Die Handlungsoption wirkt sich negativ auf das Mitspracherecht der Bevölkerung aus (–), da mit der Zusammenlegung von ARA die Einbindung der Bevölkerung in Entscheidungsprozessen oft abnimmt. Das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» wird insgesamt positiv und negativ beeinflusst.

6) **Geringe Kosten (+/–):** Die Förderung der Aufrüstung von ARA erhöht die Jahreskosten (–), während die Zusammenlegung von ARA die Jahreskosten in einigen Fällen reduziert (+). Insgesamt wird das Fundamentalziel «Geringe Kosten» durch die Aufrüstung von ARA negativ (–) und durch die Zusammenlegung von ARA in einigen Fällen positiv (+) beeinflusst.
7) **Effiziente Ressourcennutzung (+/–):** Die Zusammenlegung von ARA hat einen positiven Einfluss auf die Rückgewinnung von Nährstoffen (+), da grössere ARA besser in der Lage sind, Nährstoffe wiederzugewinnen. Je nach Situation kann sie sich ebenfalls positiv (grössere Anlage), aber auch negativ (zusätzliche Pumpenleistung) auf den Energieverbrauch auswirken (+/–). Die Aufrüstung von ARA mit weitergehenden Verfahren zur Elimination organischer Schadstoffe hat einen negativen Einfluss auf das Ziel einer effizienten Energienutzung (–). Insgesamt wird das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcennutzung» durch diese Handlungsoption positiv und negativ (+/–) beeinflusst.

Infrastrukturen-7:
Förderung von Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)

	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
Handlungsoption	1	2	3	4	5	6	7
Förderung von Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)	+	+/–	o	+	+/–	+/–	+

1) **Hohe Generationengerechtigkeit (+):** Die Förderung von Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) wirkt sich positiv auf die flexible Anpassung der Systeme aus (+), da SUDS bestehende Entwässerungssysteme entlasten. Das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» wird insgesamt positiv beeinflusst.
2) **Guter Gewässerschutz (+/–):** Die Förderung von Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) wirkt sich positiv auf den chemischen und biologischen Zustand von Fliessgewässern und Seen aus (+), da bei Regenwetter mehr Mischwasser einer Reinigung zugeführt wird. Jedoch kann die Förderung von SUDS sich negativ auf den chemischen Zustand des Grundwassers auswirken (–), da mit der Infiltration von Regenwasser die stoffliche Belastung zunehmen kann. Das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» wird insgesamt positiv und negativ beeinflusst (+/–).
3) **Gute Wasserversorgung (o):** Die Förderung von Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» aus.
4) **Sichere Abwasserentsorgung (+):** Die Förderung von Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) wirkt sich positiv auf die hygienische Ab- und Einleitung von Abwasser in die Gewässer (+) und die Zuverlässigkeit des Entwässerungssystems (+) aus, da mit SUDS die Wassermenge in der Kanalisation vermindert, die Dauer des Abfliessens verlängert und damit die stoffliche Belastung der Fliessgewässer und Seen (durch eine geringere Variabilität des Abwasseranfalls in den ARA) verringert wird. Die Handlungsoption wirkt sich ebenfalls positiv auf das Stadtklima (+) aus, da mit der Begrünung und der Integration offener Wasserflächen und -läufe in Siedlungen im Sommer niedrigere Lufttemperaturen und höhere Luftfeuchtigkeiten erzielt und die Erholungsfunktion erhöht wird (+). Das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung» wird insgesamt positiv beeinflusst.
5) **Hohe soziale Akzeptanz (+/–):** Die Förderung von Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) wirkt sich negativ auf die Ziele «Geringer Zeitaufwand» (–) und «Geringer Raumaufwand» aus (–), da – je nach SUDS – diese bei den Endnutzerinnen und Endnutzern installiert werden und letztere für Unterhalt und Betrieb der Systeme mitverantwortlich sein können. Die Handlungsoption wirkt sich positiv auf das Ziel einer «Geringen unnötigen Bautätigkeit» (+) aus, da mit der Förderung von SUDS die bestehenden Kapazitäten weiter genutzt und damit unnötige Bautätigkeiten vermieden werden können. Sie wirkt sich ebenfalls positiv auf das Ziel eines «Hohen Mitspracherechts» aus (+), da Endnutzerinnen und Endnutzer bisweilen in der Planung von SUDS einbezogen werden (Grünflächen, Regenrückhalteräume etc.). Das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» wird insgesamt positiv und negativ beeinflusst.
6) **Geringe Kosten (+/–):** Die Förderung von Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) kann sich – je nach SUDS – positiv oder negativ auf die Ziele «Tiefe Jahreskosten» und «Geringer Kostenanstieg» auswirken. Insgesamt wird das Fundamentalziel «Geringe Kosten» positiv oder negativ beeinflusst.
7) **Effiziente Ressourcennutzung (+):** Die Förderung von Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) wirkt sich positiv auf das Ziel einer effizienten Energienutzung (+) aus, da weniger Wasser in der ARA anfällt und damit weniger Energie für Abwassertransport und -reinigung verbraucht wird. Insgesamt wird das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcennutzung» positiv beeinflusst.

Handlungsoptionen Wasserressourcen

Wasserressourcen-1:
Verbesserung im Vollzug des planerischen Grundwasserschutzes

	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
Handlungsoption	1	2	3	4	5	6	7
Verbesserung im Vollzug des planerischen Grundwasserschutzes	+	+	+	o	+	+/–	+

1) **Hohe Generationengerechtigkeit (+):** Die Verbesserung im Vollzug des planerischen Gewässerschutzes wirkt sich positiv auf die zukünftige Rehabilitationslast aus (+), da durch die Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen und -arealen die Qualität und die Quantität der in der Schweiz verfügbaren Grundwasserressourcen langfristig sichergestellt werden. Die Handlungsoption wirkt sich ebenfalls positiv auf die flexible Anpassung der Systeme aus (+), da durch die Ausscheidung von Gewässerschutzbereichen die flexible Anpassung zukünftiger Wasserversorgungen gewährleistet wird. Das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» wird daher durch diese Handlungsoption gut erreicht.
2) **Guter Gewässerschutz (+):** Die Verbesserung im Vollzug des planerischen Gewässerschutzes wirkt sich positiv auf den Grundwasserhaushalt, den chemischen Zustand, die mikrobielle Gemeinschaft (Biozönose) und die naturnahe Temperatur des Grundwassers aus (+). Wo Grundwasser in Oberflächengewässer exfiltriert, wirkt sich ein verbesserter chemischer Zustand ebenfalls positiv auf den chemischen Zustand von Fliessgewässern und Seen aus (+). Das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» wird insgesamt positiv beeinflusst.
3) **Gute Wasserversorgung (+):** Die Verbesserung im Vollzug des planerischen Gewässerschutzes erhöht die Versorgungssicherheit, d.h. die zuverlässige Versorgung (+) von genügend Wasser (+) einwandfreier Qualität (+). Das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» wird durch diese Handlungsoption gut erreicht.
4) **Sichere Abwasserentsorgung (o):** Die Verbesserung im Vollzug des planerischen Gewässerschutzes wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung» aus.
5) **Hohe soziale Akzeptanz (+):** Die Verbesserung im Vollzug des planerischen Gewässerschutzes wirkt sich positiv auf das Ziel einer hohen Wasserressourcenautonomie aus (+), da durch die Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen und -arealen die lokalen Grundwasserressourcen langfristig gesichert werden. Das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» wird damit insgesamt positiv beeinflusst.
6) **Geringe Kosten (+/–):** Die Verbesserung im Vollzug des planerischen Gewässerschutzes wirkt sich positiv (+) und negativ (–) auf das Ziel «Tiefe Jahreskosten» aus: Kurzfristig wirkt es sich negativ aus (–), wenn Nutzungsbeschränkungen kompensiert werden müssen und z.T. Land umgezont oder von den Betreibern aufgekauft werden muss (–). Langfristig wirkt es sich positiv aus, wenn durch die Ausscheidung von Schutzzonen und -arealen zusätzliche finanzielle Aufwendungen für die Gewinnung und Aufbereitung von Trinkwasser aus entlegenen Quellen vermieden werden (+). Das Fundamentalziel «Geringe Kosten» wird damit positiv und negativ beeinflusst.
7) **Effiziente Ressourcennutzung (+):** Die Verbesserung im Vollzug des planerischen Gewässerschutzes wirkt sich positiv auf eine effiziente Energienutzung aus (+), da qualitativ einwandfreies Grundwasser nicht oder weniger aufbereitet werden muss. Insgesamt wird das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcennutzung» positiv beeinflusst.

Wasserressourcen-2:
Förderung einer Wasserressourcen-Bewirtschaftungsplanung

	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
Handlungsoption	1	2	3	4	5	6	7
Förderung einer Wasserressourcen-Bewirtschaftungsplanung	+	+	+	o	+/o	?	o

1) **Hohe Generationengerechtigkeit (+):** Die Förderung einer Wasserressourcen-Bewirtschaftungsplanung wirkt sich positiv auf die zukünftige Rehabilitationslast aus (+), da im Rahmen einer Bewirtschaftungsplanung aktuelle und künftige Konflikte bez. Wasserressourcen gelöst und damit die finanzielle Last bez der Bereitstellung von Wasserressourcen ausreichender Quantität und einwandfreier Qualität nicht auf zukünftige Generationen verschoben werden. Die Handlungsoption wirkt sich ebenfalls positiv auf die flexible Anpassung der Systeme aus (+), da die Förderung einer Wasserressourcen-Bewirtschaftungsplanung die langfristige Sicherstellung von Wasserbezugsorten impliziert. Das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» wird daher durch diese Handlungsoption gut erreicht.
2) **Guter Gewässerschutz (+):** Die Förderung einer Wasserressourcen-Bewirtschaftungsplanung wirkt sich positiv auf das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» aus (+), da ein umfassender Bewirtschaftungsplan einen für die jeweilige Nutzung angepassten Schutz der Gewässer beinhaltet.

3) **Gute Wasserversorgung (+):** Die Förderung einer Wasserressourcen-Bewirtschaftungsplanung erhöht die Versorgungssicherheit, d.h. die zuverlässige Versorgung (+) von genügend Wasser (+) einwandfreier Qualität (+). Das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» wird durch diese Handlungsoption daher positiv beeinflusst.
4) **Sichere Abwasserentsorgung (o):** Die Förderung einer Wasserressourcen-Bewirtschaftungsplanung hat keinen Einfluss auf das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung».
5) **Hohe soziale Akzeptanz (+/o):** Die Förderung einer Wasserressourcen-Bewirtschaftungsplanung kann sich positiv (muss aber nicht) auf die Ziele einer «Geringen unnötigen Bautätigkeit» (+/o) und einer «Hohen Qualität von Verwaltung und Betrieb» (+/o) auswirken, je nachdem, welche konkreten Massnahmen im Bewirtschaftungsplan festgehalten werden. Gleiches gilt für die Ziele einer «Hohen Wasserressourcenautonomie» und eines «Hohen Mitspracherechts». Insgesamt kann (muss aber nicht) das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» positiv beeinflusst werden.
6) **Geringe Kosten (?):** Die Auswirkungen der Förderung einer Wasserressourcen-Bewirtschaftungsplanung auf das Fundamentalziel «Geringe Kosten» konnten die Expertinnen und Experten des NFP 61 nicht abschätzen.
7) **Effiziente Ressourcennutzung (o):** Die Förderung einer Wasserressourcen-Bewirtschaftungsplanung hat keinen Einfluss auf das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcennutzung».

Wasserressourcen-3:
Regionale und integrale Betrachtung

	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
Handlungsoption	1	2	3	4	5	6	7
Regionale und integrale Betrachtung	+	+/o	+/o	+/o	+	+/–	o

1) **Hohe Generationengerechtigkeit (+):** Eine regionale und integrale Betrachtung wirkt sich positiv auf die zukünftige Rehabilitationslast (+) und die flexible Anpassung der Systeme (+) aus, da Synergien zwischen einzelnen lokalen Versorgern genutzt werden können (z.B. gemeinsame Reservoirs, verbesserte Redundanz). Das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» wird daher durch diese Handlungsoption gut erreicht.
2) **Guter Gewässerschutz (+/o):** Eine regionale und integrale Betrachtung kann sich positiv (muss aber nicht) auf das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» (+/o) auswirken, je nachdem, welche Trade-offs in der regionalen und integralen Abwägung verschiedener Ziele gegeneinander bestehen. Grundsätzlich erhöht sich jedoch mit einer regionalen und integralen Betrachtung die Spannbreite möglicher Optionen, sodass oft eine der lokalen Situation angepasste Kompromisslösung identifiziert werden kann (z.B. das Verlegen einer regionalen ARA an ein geeigneteres Gewässer oder die Verbesserung der Bauabnahme bei Versickerungsanlagen).
3) **Gute Wasserversorgung (+/o):** Eine regionale und integrale Betrachtung wirkt sich positiv (muss aber nicht) auf das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» (+/o) aus, je nachdem, welche Trade-offs in der regionalen und integralen Abwägung verschiedener Ziele gegeneinander bestehen. Allgemein wird aber der Einfluss auf das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» klein sein.
4) **Sichere Abwasserentsorgung (+/o):** Eine regionale und integrale Betrachtung wirkt sich positiv (muss aber nicht) auf das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung» aus (+/o), je nachdem, welche Trade-offs in der regionalen und integralen Abwägung verschiedener Ziele gegeneinander bestehen. Allgemein wird aber der Einfluss auf das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung» klein sein.
5) **Hohe soziale Akzeptanz (+):** Eine regionale und integrale Betrachtung wirkt sich positiv auf das Ziel einer «Geringen unnötigen Bautätigkeit» (+) aus, da sie die Zusammenarbeit verschiedener Sektoren fördert. Das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» wird daher insgesamt positiv beeinflusst.
6) **Geringe Kosten (+/–):** Eine regionale und integrale Betrachtung kann sich positiv oder negativ auf das Fundamentalziel «Geringe Kosten» auswirken (+/–), je nachdem, welche Trade-offs in der regionalen und integralen Abwägung verschiedener Ziele gegeneinander bestehen.
7) **Effiziente Ressourcennutzung (o):** Eine regionale und integrale Betrachtung hat keinen Einfluss auf das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcennutzung».

Wasserressourcen-4:
Verbesserung der Koordination in und zwischen den Behörden

	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
Handlungsoption	1	2	3	4	5	6	7
Verbesserung der Koordination in und zwischen den Behörden	+/o	+/o	+/o	+/o	+	+/–	o

1) **Hohe Generationengerechtigkeit (+/o):** Die Verbesserung der Koordination in und zwischen den Behörden kann sich positiv (muss aber nicht) auf die zukünftige Rehabilitationslast (+/o) auswirken, da sie zu einheitlicheren Vorgehen und klareren Investitionsentscheiden führt. Das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» wird insgesamt positiv (oder nicht) beeinflusst.
2) **Guter Gewässerschutz (+/o):** Die Verbesserung der Koordination kann sich positiv (muss aber nicht) auf das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» auswirken (+/o), da Schutz- und Nutzungskonflikte auf Ebene der Behörden ausgehandelt werden. Beispiele sind Hochwasserschutz und Revitalisierung vs. Schutz des aus Uferfiltrat gewonnenen Trinkwassers mit Einfluss auf die Ziele «Ökomorphologischer Zustand» von Fliessgewässern und «Chemischer Zustand» von Grundwasser oder Nutzung vs. Schutz von Grundwasserleitern mit Einfluss auf die Ziele «Guter chemischer Zustand» und «Naturnahe Temperatur».
3) **Gute Wasserversorgung (+/o):** Die Verbesserung der Koordination kann sich positiv (muss aber nicht) auf das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» auswirken (+/o), da die verschiedenen Schutz- und Nutzungskonflikte vorgängig auf Ebene der Behörden ausgehandelt werden. Beispiele sind Hochwasserschutz und Renaturierung vs. Schutz des aus Uferfiltrat gewonnenen Trinkwassers.
4) **Sichere Abwasserentsorgung (+/o):** Die Verbesserung der Koordination kann sich positiv (muss aber nicht) auf das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung» auswirken (+/o). Beispiele sind langfristig nachhaltigere Lösungen hinsichtlich der Ableitung von Abwasser in Siedlungen (z.B. SUDS, siehe auch Handlungsoption Infrastrukturen-7) durch eine verbesserte Koordination von Raumplanung und Siedlungsentwässerung mit Einfluss auf die Ziele «Hygienische Ab- und Einleitung von Abwasser in die Gewässer», «Zuverlässigkeit des Entwässerungssystems», «Gutes Siedlungsklima» und «Gute Erholungsfunktion der Gewässer».
5) **Hohe soziale Akzeptanz (+):** Die Verbesserung der Koordination wirkt sich positiv auf die Ziele einer «Geringen unnötigen Bautätigkeit» (+) und einer «Hohen Qualität von Verwaltung und Betrieb» aus, da sie eine Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Sektoren impliziert. Das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» wird insgesamt positiv beeinflusst.
6) **Geringe Kosten (+/–):** Die Verbesserung der Koordination kann sich positiv oder negativ auf das Fundamentalziel «Geringe Kosten» auswirken (+/–): positiv, wenn dabei Investitionen optimiert und dadurch reduziert werden (+); negativ, wenn neue Investitionen ausgelöst werden (–), die zuvor aufgrund fehlender Koordination nicht verwirklicht wurden.
7) **Effiziente Ressourcennutzung (o):** Die Verbesserung der Koordination hat keinen Einfluss auf das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcennutzung».

Wasserressourcen-5:
Verbesserung der Raumplanung

	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
Handlungsoption	1	2	3	4	5	6	7
Verbesserung der Raumplanung	+	+	+	+/o	+/–	+/–	o

1) **Hohe Generationengerechtigkeit (+):** Die Verbesserung der Raumplanung wirkt sich positiv auf die zukünftige Rehabilitationslast (+) und die flexible Anpassung der Systeme (+) aus, da aufwendige Sanierungsmassnahmen vermieden und langfristige Rechtssicherheiten gewährt werden. Das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» wird insgesamt positiv beeinflusst.
2) **Guter Gewässerschutz (+):** Die Verbesserung der Raumplanung wirkt sich positiv auf das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» aus (+), da mit einer konsequenten Umsetzung des raumplanerischen Gewässerschutzes (z.B. die Erweiterung des Anwendungsbereichs des Zuströmbereichs wichtiger Grundwasserleiter von landwirtschaftlichen Gefährdungen auf weitere Gefährdungsarten) einer Beeinträchtigung der Gewässer z.B. durch nicht oder nur schwer abbaubare, mobile Schadstoffe entgegengewirkt werden kann.
3) **Gute Wasserversorgung (+):** Die Verbesserung der Raumplanung wirkt sich positiv auf das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» aus (+), da mit einer konsequenten Umsetzung des raumplanerischen Gewässerschutzes die Qualität des als Trinkwasser gefassten Wassers vor negativen Beeinträchtigungen geschützt werden kann.
4) **Sichere Abwasserentsorgung (+/o):** Die Verbesserung der Raumplanung kann sich positiv (muss aber nicht) auf das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung»; auswirken (+/o). Für

die Leistung der Siedlungsentwässerung spielen hier vor allem der verfügbare Raum und die Besiedlungsdichte eine zentrale Rolle (siehe auch Handlungsoption Infrastrukturen-7).

5) **Hohe soziale Akzeptanz (+/–):** Die Verbesserung der Raumplanung impliziert eine Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen Bund, Kantonen und Gemeinden einerseits und zwischen verschiedenen Sektoren (z.B. Wasserversorgung und Abwasserentsorgung) andererseits. Die Handlungsoption wirkt sich daher positiv auf die Ziele einer «Geringen unnötigen Bautätigkeit» (+) und einer «Hohen Qualität von Verwaltung und Betrieb» (+) aus. Auf die Ziele «Geringer Zeitaufwand», «Geringer Raumaufwand», «Hohes Mitspracherecht» und «Hohe Wasserressourcenautonomie» kann sich die Handlungsoption positiv oder negativ auswirken (+/–), je nachdem, welche Massnahmen wie geplant und umgesetzt werden. Das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» wird daher insgesamt positiv oder negativ beeinflusst (+/–).
6) **Geringe Kosten (+/–):** Die Verbesserung der Raumplanung kann sich positiv oder negativ auf das Fundamentalziel «Geringe Kosten» auswirken (+/–): positiv, wenn durch eine sektorenübergreifende Abstimmung raumwirksamer Tätigkeiten die Wasserqualität verbessert und damit allfällige Kosten für eine Wasseraufbereitung reduziert werden können (+). Negativ, wenn sie zu Nutzungseinschränkungen führt, die kompensiert werden müssen (–).
7) **Effiziente Ressourcennutzung (o):** Die Verbesserung der Raumplanung hat keinen Einfluss auf das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcennutzung».

Handlungsoptionen Wissen

Wissen-1:
Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen

	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
Handlungsoption	1	2	3	4	5	6	7
Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen	o	+	+	+	+	+	o

1) **Hohe Generationengerechtigkeit (o):** Die Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» aus.
2) **Guter Gewässerschutz (+):** Verlässliche Daten und flächendeckende Übersichten über den Zustand der Wasserressourcen (Quantität, Qualität) einer Region sind notwendige Voraussetzungen, um im Rahmen einer Wasserressourcen-Bewirtschaftungsplanung geeignete Massnahmen planen und umsetzen zu können. Das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» wird daher durch die Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen insgesamt positiv beeinflusst.
3) **Gute Wasserversorgung (+):** Verlässliche Daten und flächendeckende Übersichten über den Zustand der Wasserversorgung und deren Infrastruktur sind notwendige Voraussetzungen, um die Wasserversorgung nachhaltig in die Zukunft zu führen und eine zuverlässige Versorgung (+) von genügend Wasser (+) einwandfreier Qualität (+) zu gewährleisten. Das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» wird durch diese Handlungsoption daher positiv beeinflusst.
4) **Sichere Abwasserentsorgung (+):** Verlässliche Daten und flächendeckende Übersichten über den Zustand der Abwasserentsorgung und deren Infrastruktur sind notwendige Voraussetzungen, um die Abwasserentsorgung nachhaltig in die Zukunft zu führen und eine hygienische Ab- und Einleitung von Abwasser in die Gewässer (+) und eine zuverlässige Abwasserentsorgung (+) sicherzustellen. Das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung» wird durch diese Handlungsoption daher positiv beeinflusst.
5) **Hohe soziale Akzeptanz (+):** Die Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen wirkt sich positiv auf das Management von Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungssystemen aus (+), da nur auf der Grundlage verlässlicher Daten und flächendeckender Übersichten über den Zustand der Systeme fundierte Entscheidungen getroffen werden können. Das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» wird insgesamt positiv beeinflusst.
6) **Geringe Kosten (+):** Die Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen (z.B. Koordination der Datengrundlagen und -erhebungen) wirkt sich positiv auf die Ziele «Tiefe Jahreskosten» und «Geringer Kostenanstieg» aus, da auf diese Weise Fehlinvestitionen vermieden werden können. Das Fundamentalziel «Geringe Kosten» wird damit positiv beeinflusst.
7) **Effiziente Ressourcennutzung (o):** Die Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcennutzung» aus.

Wissen-2:
Monitoring

	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
Handlungsoption	1	2	3	4	5	6	7
Monitoring	o	+	+	+	+	+/–	o

1) **Hohe Generationengerechtigkeit (o):** Monitoring wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» aus.
2) **Guter Gewässerschutz (+):** Monitoring ist eine notwendige Voraussetzung, um langfristige Veränderungen frühzeitig erkennen, Massnahmen rechtzeitig einleiten und deren Wirksamkeit überprüfen zu können (Bsp. Verunreinigungen in Fliessgewässern als Folge von Abwassereinleitungen, klimabedingte Veränderungen der Redoxbedingungen in Uferfiltrationszonen). Das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» wird durch diese Handlungsoption daher positiv beeinflusst.
3) **Gute Wasserversorgung (+):** Monitoring ist eine notwendige Voraussetzung, um langfristige Veränderungen der als Trinkwasser genutzten Wasserressourcen (Qualität, Quantität) frühzeitig erkennen, Massnahmen rechtzeitig einleiten und deren Wirksamkeit überprüfen zu können (Bsp. klimabedingte Veränderungen der Redoxbedingungen in Uferfiltrationszonen). Monitoring wirkt sich daher v.a. positiv auf die Ziele «Hohe Qualität» und «Hohe Quantität» aus. Das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» wird insgesamt positiv beeinflusst.
4) **Sichere Abwasserentsorgung (+):** Monitoring ist eine notwendige Voraussetzung, um z.B. qualitative Veränderungen des gereinigten Abwassers frühzeitig erkennen, Massnahmen rechtzeitig einleiten und deren Wirksamkeit überprüfen zu können. Monitoring wirkt sich daher positiv auf das Ziel «Hygienische Ab- und Einleitung von Abwasser in die Gewässer» aus (+). Das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung» wird damit insgesamt positiv beeinflusst.
5) **Hohe soziale Akzeptanz (+):** Monitoring wirkt sich positiv auf das Management von Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungssystemen aus (+), da ohne verlässliche, langfristige Daten keine fundierten Entscheidungen getroffen werden können. Das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» wird damit insgesamt positiv beeinflusst.
6) **Geringe Kosten (+/–):** Monitoring wirkt sich positiv und negativ auf das Fundamentalziel «Geringe Kosten» aus (+/–): Negativ wirkt es sich aus, da die Weiterführung und Verbesserung bestehender Monitoringsysteme sowie der Aufbau neuer Monitoringsysteme finanzielle Kosten impliziert (–). Positiv wirkt es sich aus, wenn durch Monitoring Probleme frühzeitig erkannt und Massnahmen rechtzeitig ergriffen werden können, die kurzfristig Kosten erhöhen (–), aber langfristig Kosten sparen (+).
7) **Effiziente Ressourcennutzung (o):** Die Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcennutzung» aus.

Wissen-3:
Verbesserung der Wissensintegration, Förderung des Wissens- und Erfahrungsaustauschs

	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
Handlungsoption	1	2	3	4	5	6	7
Verbesserung der Wissensintegration, Förderung des Wissens- und Erfahrungsaustauschs	o	+	+	+	+	+	+

1) **Hohe Generationengerechtigkeit (o):** Diese Handlungsoption wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» aus.
2) **Guter Gewässerschutz (+):** Die Verbesserung der Integration bereits vorhandener Daten- und Wissensbestände sowie die Förderung des Wissens- und Erfahrungsaustauschs wirkt sich generell positiv auf das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» aus (+).
3) **Gute Wasserversorgung (+):** Die Verbesserung der Integration bereits vorhandener Daten- und Wissensbestände sowie die Förderung des Wissens- und Erfahrungsaustauschs wirkt sich generell positiv auf das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» aus.
4) **Sichere Abwasserentsorgung (+):** Die Verbesserung der Integration bereits vorhandener Daten- und Wissensbestände sowie die Förderung des Wissens- und Erfahrungsaustauschs wirkt sich generell positiv auf das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung» aus.
5) **Hohe soziale Akzeptanz (+):** Die Verbesserung der Integration bereits vorhandener Daten- und Wissensbestände sowie die Förderung des Wissens- und Erfahrungsaustauschs wirkt sich positiv auf das Management von Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungssystemen aus (+), da so Entscheidungen auf einer soliden, konsistenten Grundlage getroffen werden können. Das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» wird damit insgesamt positiv beeinflusst.
6) **Geringe Kosten (+):** Die Verbesserung der Integration bereits vorhandener Daten- und Wissensbestände sowie die Förderung des Wissens- und Erfahrungsaustauschs wirkt sich positiv auf das Fundamentalziel «Geringe Kosten» aus (+), da von Fehlern gelernt und Fehlinvestitionen vermie-

den werden können.

7) **Effiziente Ressourcennutzung (+):** Die Verbesserung der Integration bereits vorhandener Daten- und Wissensbestände sowie die Förderung des Wissens- und Erfahrungsaustauschs wirkt sich positiv auf das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcennutzung» aus (+), da so Massnahmen zur Ressourcenrückgewinnung und Energieoptimierung rascher und besser umgesetzt werden können.

Wissen-4:
Prüfung des Potenzials natürlicher und künstlicher Wasserspeicher

	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
Handlungsoption	1	2	3	4	5	6	7
Prüfung des Potenzials natürlicher und künstlicher Wasserspeicher	o	+	+	o	o	o	o

1) **Hohe Generationengerechtigkeit (o):** Diese Handlungsoption wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» aus.
2) **Guter Gewässerschutz (+):** Die Prüfung des Potenzials natürlicher und künstlicher Wasserspeicher wirkt sich positiv auf den Schutz von Fliessgewässern (+) und Grundwasser (+) aus, wenn Speicher dazu genutzt werden, um a) den Abfluss von Fliessgewässern in Trockenperioden sicherzustellen oder b) den Grundwasserhaushalt und den chemischen Zustand des Grundwassers zu regulieren. Insgesamt wird das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» positiv beeinflusst.
3) **Gute Wasserversorgung (+):** Die Prüfung des Potenzials natürlicher und künstlicher Wasserspeicher wirkt sich positiv auf die Versorgung von genügend Wasser (+) ausreichender Qualität (+) aus. Insgesamt wird das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» positiv beeinflusst.
4) **Sichere Abwasserentsorgung (o):** Die Prüfung des Potenzials natürlicher und künstlicher Wasserspeicher wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung» aus.
5) **Hohe soziale Akzeptanz (o):** Die Prüfung des Potenzials natürlicher und künstlicher Wasserspeicher wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» aus.
6) **Geringe Kosten (o):** Die Prüfung des Potenzials natürlicher und künstlicher Wasserspeicher wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Geringe Kosten» aus (o): Kurzfristig steigen die Kosten zwar, mittelfristig kann die Prüfung des Potenzials natürlicher und künstlicher Speicher jedoch zu Einsparungen führen.
7) **Effiziente Ressourcennutzung (o):** Die Prüfung des Potenzials natürlicher und künstlicher Wasserspeicher wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcennutzung» aus.

Wissen-5:
Verbesserung des Prozessverständnisses

	Ziele einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft						
Handlungsoption	1	2	3	4	5	6	7
Verbesserung des Prozessverständnisses	o	+	+	+	o	+	o

1) **Hohe Generationengerechtigkeit (o):** Diese Handlungsoption wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Hohe Generationengerechtigkeit» aus.
2) **Guter Gewässerschutz (+):** Die Verbesserung des Prozessverständnisses wirkt sich generell positiv auf das Fundamentalziel «Guter Gewässerschutz» aus (+), da auf der Grundlage eines guten Prozessverständnisses Massnahmen geplant und umgesetzt werden können, die zu einer Verbesserung des Gewässerschutzes führen.
3) **Gute Wasserversorgung (+):** Die Verbesserung des Prozessverständnisses wirkt sich positiv auf die Versorgung von genügend Wasser (+) ausreichender Qualität (+) aus. Insgesamt wird das Fundamentalziel «Gute Wasserversorgung» positiv beeinflusst.
4) **Sichere Abwasserentsorgung (+):** Die Verbesserung des Prozessverständnisses wirkt sich positiv auf die hygienische Ab- und Einleitung von Abwasser in die Gewässer (+) und die hohe Zuverlässigkeit des Entsorgungssystems (+) aus. Hier spielen insbesondere das Wissen um die Effekte kurzzeitiger Beeinflussungen durch regenbedingte Schmutzstoffeinträge eine zentrale Rolle. Insgesamt wird das Fundamentalziel «Sichere Abwasserentsorgung» positiv beeinflusst.
5) **Hohe soziale Akzeptanz (o):** Die Prüfung des Potenzials natürlicher und künstlicher Wasserspeicher wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Hohe soziale Akzeptanz» aus.
6) **Geringe Kosten (+):** Die Verbesserung des Prozessverständnisses wirkt sich positiv auf das Fundamentalziel «Geringe Kosten» aus (+), da diese Handlungsoption das Risiko für Fehlinvestitionen verringert.
7) **Effiziente Ressourcennutzung (o):** Die Verbesserung des Prozessverständnisses wirkt sich nicht auf das Fundamentalziel «Effiziente Ressourcennutzung» aus.

Anhang II

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

RIBACLIM: Von Flüssen gespiesenes 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.

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.

SWIP: Langfristige Planung nachhaltiger Wasserinfrastrukturen
Dr. Judit Lienert und Prof. Dr. Max Maurer

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

SWISSKARST: Karstwasser, eine Wasserressource für die Zukunft?
Dr. Pierre-Yves Jeannin

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

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.

Produkte des NFP 61

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

Thematische Synthese 1
Wasserressourcen der Schweiz: Dargebot und Nutzung – heute und morgen
Astrid Björnsen Gurung und Manfred Stähli

Thematische Synthese 2
Bewirtschaftung der Wasserressourcen unter steigendem Nutzungsdruck
Klaus Lanz, Eric Rahn, Rosi Siber, Christian Stamm

Thematische Synthese 3
Nachhaltige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in der Schweiz: Herausforderungen und Handlungsoptionen
Sabine Hoffmann, Daniel Hunkeler, Max Maurer

Thematische Synthese 4
Nachhaltige Wassergouvernanz: Herausforderungen und Wege in die Zukunft
Franziska Schmid, Felix Walter, Flurina Schneider, Stephan Rist

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

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

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

Videos
Die Videos des NFP 61 helfen Brücken zwischen verschiedenen Disziplinen und zwischen Wissenschaft und Gesellschaft zu bauen (siehe www.nfp61.ch, DVD im Gesamtsynthesebuch).
Am Anfang des Programmes wurde für alle Forschungsprojekte ein kurzer Videoclip «Einblick» gedreht. Die Projektleitenden erzählen, was sie wie untersuchen und weshalb diese Forschung wichtig ist für unsere Gesellschaft.
Zum Abschluss des Programmes wurden 10 Videomodule «Ausblick» zu den Themen «Schwindende Gletscher», «Wasserressourcen der Zukunft», «Zunehmende Trockenheit», «Wachsende Siedlungen» und «Wassermanagement» gedreht. Forschende berichten, welche Erkenntnisse sie überrascht haben, wie sie mit Akteuren aus der Praxis zusammengearbeitet haben und welche Umsetzungstools nun zur Verfügung stehen. Akteure aus der Praxis erzählen, wie sie die Forschungsergebnisse einschätzen und was sie in ihrem Umfeld nun umsetzen können.

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

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

Potenziale und Limitationen transdisziplinärer Wissensproduktion in Forschungsprojekten des NFP 61
Tobias Buser, Flurina Schneider, Stephan Rist
Die Begleitforschung der Universität Bern untersuchte die transdisziplinären Ansätze in den 16 Projekten.

Methoden der inter- und transdisziplinären Wissensintegration im NFP 61-Syntheseprozess
Sabine Hoffmann, Christian Pohl, Janet Hering
Die Begleitforschung der Eawag/td-net untersuchte die Methoden der Wissensintegration in den vier Thematischen Synthesen.

Weitere Informationen: www.nfp61.ch

Diese Thematische Synthese untersucht die aktuellen und künftigen Herausforderungen einer nachhaltigen Schweizer Siedlungswasserwirtschaft. Diese wird dabei als Gesamtsystem der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung im Kontext von Grund- und Oberflächenwasserressourcen betrachtet. Die Analyse fokussiert auf die kausalen Zusammenhänge, die Formulierung von Nachhaltigkeitszielen, die Erarbeitung von Handlungsoptionen sowie die Abschätzung von deren Auswirkungen.

Die Herausforderungen sind vielfältig. Nicht alle sind neu, werden aber basierend auf einer Reihe von aktuellen Forschungsergebnissen, insbesondere zum Einfluss des Klimawandels, neu interpretiert. Eine Reihe von Handlungsoptionen zeigt auf, welche möglichen Wege in die Zukunft führen. Zusammen mit den formulierten Nachhaltigkeitszielen bildet dieser Bericht eine wertvolle Grundlage, um einen partizipativen Verständigungsprozess über eine nachhaltige Siedlungswasserwirtschaft transparent zu strukturieren.

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 978-3-9524412-5-1

Thematische Synthese 3
Nachhaltige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in der Schweiz
NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung»