

Wasserwirtschaft

Autoren

Bruno Schädler, Chair

Hydrologie, Bundesamt für Umwelt BAFU

Bodo Ahrens

Atmospheric and Climate Science ETH

Rudolf Feierabend

Schweiz. Vereinigung für Schifffahrt & Hafenwirtschaft

Christoph Frei

Climate Services, MeteoSchweiz, Zürich

Roland Hohmann

Redaktion, OcCC, Bern

Thomas Jankowski

Water Resources Dept., EAWAG

Ronald Kozel

Sektion Hydrogeologie, Bundesamt für Umwelt BAFU

David M. Livingstone

Water Resources Dept., EAWAG

Armin Peter

Angewandte Gewässerökologie, EAWAG

Armin W. Petrascheck

Ennetbaden

Martin Pfaundler

Sektion Gewässersysteme, Bundesamt für Umwelt BAFU

Andreas Schild

Abt. Strukturverbesserungen, Bundesamt für Landwirtschaft BLW



1. Einleitung

Einbettung

Die Wasserwirtschaft umfasst alle Aktivitäten des Menschen zur Nutzung des Wassers, zum Schutz des Wassers und zum Schutz vor den Gefahren des Wasser. Die Klimaänderung beeinflusst diese wasserwirtschaftlichen Funktionen durch Veränderungen des hydrologischen Kreislaufs (vgl. Kapitel Grundlagen).

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserwirtschaft für folgende Bereiche detaillierter behandelt:

- Veränderungen in natürlichen Gewässern (Seen, Biodiversität, Fische)
- Naturgefahren Wasser (Hochwasser, Trockenheit)
- Wasserangebot und Wasserbedarf (Grundwasserneubildung, Bedarf an Trink- und Brauchwasser)
- Wassernutzung (Energie, Rheinschifffahrt)
- Bewirtschaftung der Wasserressourcen

Die Klimaänderung beeinflusst auch andere Bereiche der Wasserwirtschaft, wie beispielsweise die Binnenschifffahrt, den Erholungswert des Wassers und die Wassernutzung bei der Produktion von Gütern. Obwohl auch diese und andere Themen wichtig sind, werden sie hier nicht behandelt.

Die Wasserwirtschaft wird nicht nur durch die Klimaänderung beeinflusst, sondern insbesondere durch menschliche Aktivitäten. In der Vergangenheit waren Bevölkerungsdruck, Veränderung der Landnutzung, Wasserverbrauch und -verschmutzung die massgebenden Faktoren, die zu einer stetigen Veränderung der Bewirtschaftung führten. Als Folge der Klimaänderung müssen nicht nur Veränderungen bei der Wassernutzung, sondern neu auch Veränderungen im Wasserangebot berücksichtigt werden. Ob in Zukunft Veränderungen des Wasserangebots oder des -verbrauchs wichtiger sein werden, ist unklar. Im ungünstigsten Fall sind die Entwicklungen gegenläufig (Abnahme des Angebots und Zunahme der Nachfrage).

Überblick

Niedrigwasser

Im Vergleich zu anderen Regionen der Welt befindet sich heute die Schweiz mit rund 5560 m³ verfügbarem Wasser pro Jahr und Einwohner in einer günstigen Lage (Israel 115, Niederlande 690,

Deutschland 1305, Spanien 2785 m³ a⁻¹ E⁻¹). Die ergiebigen Niederschläge sowie die ausgleichende Wirkung der Schneeschmelze und – mit abnehmender Bedeutung – der Gletscherschmelze sorgen auch in Zukunft für ein vergleichsweise hohes Wasserdargebot.

Als Folge der Klimaänderung wird im Sommer und Herbst das Wasserdargebot abnehmen (vgl. Kapitel Grundlagen). Insbesondere in den öfters auftretenden Hitzesommern können selbst mittlere und grössere Mittellandflüsse ähnlich niedrige Wasserstände wie im Winter aufweisen. Grundwasserstände in Talschottern werden entsprechend im Spätsommer und Herbst stärker sinken.

Gleichzeitig wird der Bedarf der Landwirtschaft an Bewässerungswasser steigen. Dadurch entsteht eine Konkurrenzsituation zwischen dem Wasserbedarf der Flussökosysteme und verschiedenen Verbrauchern und Regionen, insbesondere bei der Nutzung von Grundwasser und kleinen und mittleren Fliessgewässern. Diese Konkurrenzsituation hat unterschiedliche Auswirkungen:

- In der Landwirtschaft kann es wegen Wassermangel zu Produktionseinbussen kommen.
- Die Stromproduktion wird vom reduzierten Wasserdargebot und den erhöhten Wassertemperaturen betroffen sein (Wasserkraft, Entnahme von Kühlwasser).
- Bei der Rheinschifffahrt werden in Zukunft Einschränkungen im Sommer und Herbst erwartet.

Hochwasser

Das Schadenpotenzial von Hochwassern hat in den letzten 50 Jahren markant zugenommen. Grund dafür sind das Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum: Es befinden sich immer mehr Infrastrukturwerte in exponierten Lagen. Diese Entwicklung wird sich in Zukunft fortsetzen.

Die heutigen Klimaszenarien zeigen eine Zunahme des mittleren Niederschlags und der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen im Winterhalbjahr. Zudem werden die Niederschläge häufiger als Regen statt als Schnee fallen. Diese Veränderungen lassen eine Zunahme der Hochwasserhäufigkeit vor allem im Winter erwarten und führen vor allem im Mittelland

und Jura sowie in den Voralpen unterhalb etwa 1500 m ü.M. zu höheren Hochwasserständen. Für den Sommer sind noch keine klaren Aussagen möglich.

Sowohl die erwartete Zunahme des Schadenpotenzials als auch die Möglichkeit häufigerer Hochwasser erfordern einen höheren Schutz vor Hochwasser. Eine mögliche Antwort auf diese Unsicherheiten sind so genannte no regret Massnahmen, wie sie beispielsweise der nachhaltige Hochwasserschutz darstellt: Im Falle unveränderter Hochwasserintensität sind renaturierte und verbreiterte Flüsse ein Gewinn für das Flussökosystem; im Falle einer Zunahme der Hochwasserintensität als Folge der Klimaänderung wird das erhöhte Risiko zumindest teilweise kompensiert und durch die Berücksichtigung des Überlastfalls minimiert.

Ökologie

Der Anstieg der Wassertemperaturen wird auch unerwartete Auswirkungen auf die aquatischen Ökosysteme haben, die sich jedoch nicht abschätzen lassen.

In Seen wird die Erwärmung zu einer stabileren Dichteschichtung und zu einer Abnahme des Sauerstoffgehalts im Tiefenwasser führen. Dadurch steigt das Risiko von Sauerstoffmangel in mesotrophen und vielleicht auch in oligotrophen Seen.

Massnahmen

Als Massnahme gegen Niedrigwasser bietet sich eine regionale/überregionale Bewirtschaftung der Ressourcen an. Dazu braucht es ein Umdenken hin zu einer integralen Wasserbewirtschaftung ganzer Flusseinzugsgebiete.

Die Seenbewirtschaftung bewirkt eine Reduktion und Verschiebung der Schwankungen. In Zukunft müssen die bestehenden Regulierschemata den veränderten Bedingungen angepasst werden (neue Zielfunktionen und -optimierung). Der Druck, heute unregulierte Seen in Zukunft zu bewirtschaften, wird zunehmen. Es ist unklar, welche ökologischen Probleme damit verbunden sind. Zu erwarten sind Auswirkungen auf die Ufervegetation, zum Beispiel Schilfbestände und andere Pflanzengemeinschaften, die auf natürliche Veränderungen der Pegel angewiesen sind.

Die flexible Hochwasserstrategie der Schweiz beinhaltet raumplanerische Massnahmen zur Begrenzung des Schadenpotenzials, Objektschutz zur Minderung der Schadenempfindlichkeit, bauliche Schutzmassnahmen sowie Notfallmassnahmen für den Überlastfall. Beim Augusthochwasser 2005 hat sich die Strategie bewährt. Überall dort, wo sie bereits umgesetzt worden war, konnten die Schäden im Vergleich zu ähnlichen Hochwassern deutlich vermindert werden. Eine ständige Überprüfung der Risikosituation ist Voraussetzung für eine langfristige Wirksamkeit der Umsetzung der Strategie, da sich sowohl Schadenpotenzial als auch Gefahrensituation laufend ändern.

Die alpinen Speicherbecken könnten in Zukunft auch vermehrt für den Rückhalt von Hochwasserspitzen eingesetzt werden. Der Einsatz als Mehrzweckanlagen wird an Bedeutung gewinnen.

Verknüpfung mit anderen Themen Landwirtschaft

Bedarf der Landwirtschaft an Bewässerungswasser, Produktionseinbussen wegen Mangel an Bewässerungswasser

Tourismus

Auswirkungen wasserbedingter Naturgefahren auf Tourismus, Auswirkungen des veränderten Wasserdargebots auf Tourismus (geringere Wasserstände in Seen und Fließgewässern im Sommer: Baden / Personenschiffahrt), Wasserversorgung für Beschneiungsanlagen

Energie

Produktion Wasserkraft bei reduziertem Angebot im Sommer/Herbst, Einfluss von Extremereignissen auf Wasserkraft, Einfluss der Wassertemperaturerhöhung auf die Kühlwassernutzung durch thermische Kraftwerke und Kernkraftwerke mit Durchlaufkühlung (Betzau und Mühleberg), Veränderung der Energienachfrage im Sommer und im Winter

Finanzwirtschaft

Investitionsbedarf, Schadensversicherung

Infrastrukturen

Hochwasserschutz, Bewässerungsanlagen, Kanalisation, Vernetzung der Systeme im Sinne der integralen Wasserwirtschaft

2. Veränderungen in natürlichen Gewässern

Wassertemperatur

Die Klimaänderung hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Wassertemperaturen. In der Schweiz werden die Wassertemperaturen in den Flüssen und in der Oberflächenschicht der Mittellandseen bis 2050 um ungefähr 2 °C gegenüber 1990 ansteigen.¹ In Mittellandseen steigt das Risiko des Sauerstoffmangels im Tiefenwasser.²

In den vergangenen Jahrzehnten sind die Wassertemperaturen in den Flüssen parallel zu den Lufttemperaturen angestiegen (Abb. 1).³ In den Seen war die Erwärmung in der durchmischten Oberflächenschicht stärker als im Tiefenwasser. Die Stabilität der Dichteschichtung hat dadurch zugenommen und die Periode der stabile Schichtung im Sommer dauert länger an. Im Zürichsee wurde seit den 1950er Jahren eine Erwärmung von durchschnittlich 0.24 °C pro Dekade in der Oberflächenschicht und 0.13 °C pro Dekade im Tiefenwasser beobachtet. Die stabile Schichtung dauert rund 2–3 Wochen länger.

In den Mittellandseen ohne regelmässige Eisbedeckung hat die Häufigkeit von Durchmischungsereignissen im Winter tendenziell abgenommen. Dadurch gelangt weniger Sauerstoff ins Tiefenwasser. In höher gelegenen Seen mit regelmässiger Eisbedeckung trifft dies nicht zu; stattdessen findet die Durchmischung im Frühling früher und im Herbst später statt.

Gemäss Szenario werden sich die Flüsse bis 2050 um weitere rund 2 °C gegenüber 1990 erwärmen. In den Mittellandseen wird sich die Oberflächenschicht weiterhin stärker erwärmen als das Tiefenwasser und die Stabilität und Dauer der Dichteschichtung werden zunehmen. Die Dauer der Periode, während der eine volle Durchmischung stattfinden kann, wird weiter verkürzt, die Häufigkeit von Durchmischungsereignissen wird weiter abnehmen und der Sauerstoffeintrag ins Tiefenwasser reduziert werden. In Seen mit heute ausreichendem Sauerstoffgehalt steigt das Risiko des Sauerstoffmangels im Tiefenwasser.

Mit der Klimaänderung wird erwartet, dass die tiefer gelegenen Mittellandseen seltener zufrieren und in den höher gelegenen Seen die Eisbedeckung kürzer dauert. In den Bergseen wird die Abnahme der jährlichen Eisbedeckung zur Erhöhung der biologischen Produktion und zu vermehrtem Sauerstoffbedarf führen.

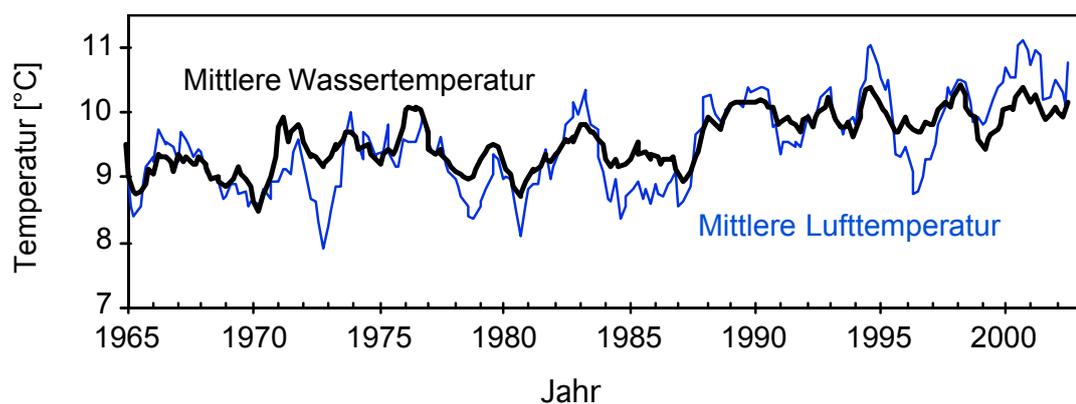


Abbildung 1: Der Anstieg der mittleren Wassertemperatur in den Schweizer Flüssen (schwarze Kurve) seit 1965 verlief parallel zum Anstieg der mittleren Lufttemperatur (blaue Kurve).³

Mikro- und Kleinorganismen

Die Wassertemperaturen in der Oberflächenschicht von Seen haben in den letzten Jahrzehnten im Winter zugenommen, was zu einer Zunahme der thermischen Stabilität und einer Änderung der Zirkulationsverhältnisse geführt hat. Es kam zu zeitlichen Verschiebungen in der Nahrungskette und in Seen mit ausreichendem Sauerstoffgehalt zu einer Abnahme der Phytoplanktondiversität. Als Folge der künftigen Erwärmung kann es in Seen, die heute einen ausreichenden Sauerstoffgehalt aufweisen, zu einer Verschlechterung der Lebensbedingungen kommen.²

Umfassende Prognosen über die Veränderungen der aquatischen Biodiversität bis 2050 sind aufgrund des heutigen Kenntnisstands nicht möglich. Anpassungsfähigkeit und -geschwindigkeit sind artenspezifisch und können nicht vorausgesagt werden. Hingegen sind einzelne Veränderungen qualitativ absehbar.

In Seen kommt es wegen der Erwärmung zu einer zeitlichen Verschiebung in der Nahrungskette. Im Frühling wird die Algenblüte durch den Frassdruck des Zooplanktons beendet. Es folgt das so genannte Klarwasserstadium. Weil Zooplankton bei höheren Wassertemperaturen grössere Wachstums- und Frassraten aufweist als bei tiefen Wassertemperaturen, findet das Klarwasserstadium nach warmen Wintern früher statt als nach kalten Wintern. In den letzten 20 Jahren wurde

aufgrund der Erwärmung eine Verfrühung der Klarwasserphase um rund 2 Wochen beobachtet. Gemäss Klimaszenario wird sich auch in Zukunft die Klarwasserphase weiter verfrühen, allerdings ist dies nicht unbegrenzt möglich.

Seit den 1970er Jahren haben die winterlichen Phosphatkonzentrationen durch kostenintensive Massnahmen (Abwassereinigung, Ringleitungen) abgenommen. Gleichzeitig ist eine Zunahme der Phytoplanktondiversität zu beobachten. Die warmen Wintertemperaturen in den letzten Jahrzehnten hatten in Seen mit ausreichendem Sauerstoffgehalt eine negative Wirkung auf die Phytoplanktondiversität. Diese Entwicklung wird sich mit der künftigen Erwärmung wahrscheinlich fortsetzen. In Seen ohne ausreichenden Sauerstoffgehalt ist der Einfluss unklar.

Fische

Die Erwärmung der Gewässer hat Auswirkungen auf Kaltwasserfische; ihre geeigneten Habitate werden verkleinert und die Artenzusammensetzung verändert sich. Kalt- und Warmwasserfische profitieren von den wärmeren Wintern.

Für Fische waren in der Vergangenheit menschliche Eingriffe in die Hydrologie und Morphologie der Gewässer wichtige Einflussfaktoren. Dies wird auch in Zukunft der Fall sein.

Als Folge der Erwärmung in den Schweizer Fließgewässern um 0.4–1.6 °C in den letzten 25 Jahren (Abb. 1) hat sich die Forellenregion um 100–200 m in der Höhe verschoben.³ Eine ähnliche Entwicklung wurde in Nordamerika beobachtet: In den Rocky Mountains verringerte sich die Habitatseignung von Forellen um 17% bei einer Erwärmung des Wassers im Juli um 1 °C.⁵

Abschätzungen zeigen, dass bei einer Erwärmung von 2 °C bis 2050 die Lebensräume der Salmoniden in der Schweiz um $\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{4}$ gegenüber heute schrumpfen werden. Von den wärmeren Wintertemperaturen profitieren sowohl Kalt- als auch Warmwasserfische; die Wachstumsphasen dauern länger und die Fische wachsen schneller. Als Folge davon werden die Gewässer geeigneter für Karpfen (Cypriniden) und exotische Fischarten.

Krankheiten wie die Parasiteninfektion PKD (Proliferative Kidney Disease) werden sich bei wärmeren Wassertemperaturen ausbreiten.⁶

3. Naturgefahren Wasser

Als Folge der Klimaänderung werden im Winter und Frühjahr in Höhenlagen unter ca. 1500 m ü.M. häufigere und zum Teil grössere Hochwasser erwartet. Im Sommer werden Trockenperioden markant zunehmen.

Hochwasser

Die Bildung von Hochwassern wird stark durch das Niederschlagsklima bestimmt. In der Vergangenheit gab es sowohl Perioden mit vielen Hochwassern als auch solche mit wenigen Hochwassern. Im Vergleich zu früheren Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts scheinen sich seit ungefähr 20 Jahren häufiger grosse Hochwasser zu ereignen (Sommer 1987, September 1993, Mai 1999, Oktober 2000, August 2005).

In einer Trendanalyse von gemessenen Abflüssen⁷ kleiner und mittelgrosser Einzugsgebiete in der Schweiz (Periode 1930–2000) wurde in vielen der untersuchten Flüsse eine Zunahme der Jahresabflüsse festgestellt. Sie wird hauptsächlich durch einen Anstieg der Abflüsse im Winter und Frühling verursacht. Die beobachtete Zunahme intensiver Winterniederschläge⁸ kann zumindest einen Teil der beobachteten Abflusstrends erklären.

In Zukunft sind gemäss dem heutigen Erkenntnisstand verschiedene Veränderungen des Niederschlagsklimas möglich, welche sich auf die Hochwasserhäufigkeit auswirken können (vgl. Kapitel Grundlagen). Im Winter wird mit einer Zunahme des mittleren Niederschlags gerechnet. Dieser fällt häufiger und bis in höhere Lagen als Regen statt als Schnee. Beide

Faktoren dürften zu einer Zunahme der mittleren Abflüsse im Winter bis in den Frühling führen.^{9,10} Zudem zeigen viele Analysen von globalen und regionalen Klimamodellen, dass die mittlere Niederschlagsintensität und die Häufigkeit von starken und extremen Niederschlägen in Mittel- und Nordeuropa im Winter zunehmen dürfte.^{11,12,13,14} Auswertungen aktueller Modellresultate zeigen auch eine Zunahme von Starkniederschlägen in Mitteleuropa für Frühling und Herbst. Die Modellresultate für den Sommer streuen stark. Für diese Jahreszeit sind auch qualitative Aussagen heute kaum möglich, aber die Abnahme des mittleren Niederschlags wird in vielen Modellen durch eine höhere Niederschlagsintensität begleitet.^{11,15}

Bei der Entstehung von Hochwassern spielt neben der Intensität und Dauer der Niederschläge auch der Zustand des Einzugsgebiets eine entscheidende Rolle. Die Abflussbereitschaft wird durch die mittlere Temperaturerhöhung und Niederschlagsabnahme im Sommer eher vermindert. Infolge der erwarteten Veränderungen im Niederschlagsklima ist vor allem im Winter und in den Übergangsjahreszeiten und vor allem für mittlere und grosse Einzugsgebiete des Juras, des Mittellandes, der Voralpen und des Tessins mit häufigeren und teilweise grö-

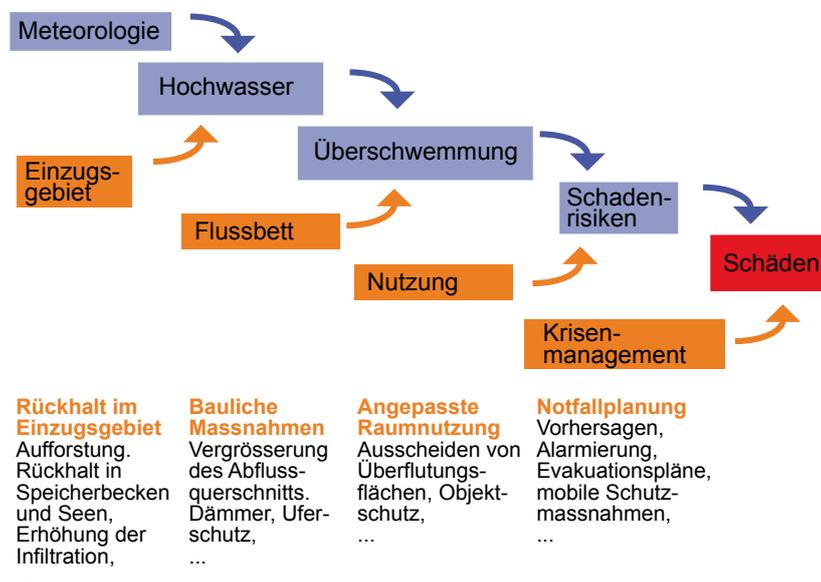


Abbildung 2:
Hochwasserschäden entstehen nur, wenn eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sind. Entsprechend zahlreich sind die Eingriffsmöglichkeiten.
(Quelle: BWG - BAFU)

Umleitung im Überlastfall

Um bei einem ausserordentlich grossen Hochwasser den Schaden auf ein erträgliches Mass zu begrenzen, werden die überschüssigen Wassermassen auf wenig schadenempfindliche Flächen umgeleitet. Beim Hochwasser vom August 2005 kam diese Notfallmassnahme zur Anwendung. 25–50% des Hochwasserabflusses wurde auf Sportplätze, Landwirtschaftsflächen, Parkplätze und andere wenig schadenempfindliche Flächen um das Siedlungsgebiet geleitet. Diese Massnahmen müssen baulich und raumplanerisch vorbereitet werden.



Abbildung 3: Im August 2005 wurde das Hochwasser der Engelberger Aa um das Schadenempfindliche Siedlungsgebiet geleitet. (Quelle: Schweizer Luftwaffe 2005)

seren Hochwassern zu rechnen als unter heutigen Klimabedingungen. Dazu kommt, dass die Temperaturzunahme einen häufigeren Wechsel zwischen Schneefall und Schneeschmelze bewirkt, so dass am Alpenrand vermehrt mehrere Tagesniederschläge kumuliert zum Abfluss kommen. Da die Verdunstung im Winter gering ist, sind keine nennenswerten Kompensationseffekte zu erwarten. In kleinen Einzugsgebieten des Mittellands und in den Alpen treten die grössten Hochwasser meist im Sommer nach kurzen aber intensiven Gewitterniederschlägen auf. Ob und in welche Richtung sich deren Häufigkeit ändert, ist sehr unsicher.

Im Hochgebirge wird im Winter keine signifikante Beeinflussung der Hochwasser erwartet, da Winterniederschläge, auch wenn diese zunehmen, wegen des Schneeanteils weiterhin nicht

Hochwasser bildend sind. Im Frühling wird eine Intensivierung der Schneeschmelze erwartet. Dies könnte zum Anstieg der Hochwassergefährdung bei Überlagerung von Schneeschmelz- und Regenereignissen führen. Im Sommer ist generell mit weniger Schmelzwasser und trockeneren Böden zu rechnen.

Hochwasserschäden sind die Folge des Konflikts zwischen dem sich natürlich ausbreitenden Hochwasser und der menschlichen Nutzung des Einzugsgebiets (Abb. 2). In den vergangenen 50 Jahren hat das Schadenpotenzial von Hochwassern im Zuge der wirtschaftlichen Entwicklung markant zugenommen. Immer mehr Infrastrukturbauten befinden sich in exponierten Lagen. Unabhängig von der Klimaänderung erfordert das höhere Schadenpotenzial einen verbesserten Schutz vor Hochwassern.

Die Schweiz verfolgt beim Hochwasserschutz eine flexible Strategie, die in erster Linie darauf abzielt, Schäden zu vermeiden und nicht unbedingt die Überschwemmung zu verhindern. Sie beinhaltet eine Reihe von Massnahmen, die angesichts der Unsicherheiten kombiniert angewandt werden müssen. Folgende Grundsätze sind dabei wichtig:

- Ein weiterer Anstieg des Schadenpotenzials ist durch raumplanerische Massnahmen zu verhindern; neue Überbauungen in gefährdeten Gebieten sind zu vermeiden.
- Für bestehende Gebäude und in weniger gefährdeten Gebieten ist die Schadenempfindlichkeit durch entsprechenden Objektschutz herabzusetzen. Dadurch werden ein weiterer Anstieg des Schadenpotenzials und die Notwendigkeit von baulichen Schutzmassnahmen am Gewässer vermindert.
- Bauliche Schutzmassnahmen werden ergriffen, wenn Raumplanung und Objektschutz nicht ausreichen. Ihre Bemessung soll nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten erfolgen, was eine Differenzierung der Schutzziele – höhere Werte sind höher zu schützen – impliziert. Bei bestehenden Siedlungen sind Bemessungen auf ein 100- bis 300-jährliches Hochwasser üblich.
- Unabhängig davon, ob die errechneten Wahrscheinlichkeiten für das Bemessungshochwasser gültig sind oder nicht, kann ein noch grösseres Hochwasser eintreten. Für diesen Überlastfall muss eine Notfallplanung eingerichtet werden. Sie hat zum Ziel, im Falle eines deutlichen Überschreitens des Bemessungshochwassers den Schaden auf ein erträgliches Mass zu begrenzen. Die Konzepte können Evakuationen, mobile Sperren oder Notentlastungen umfassen (vgl. Kasten).

Der wesentliche Vorteil dieser Strategie ist, dass die Schutzbauten aufgrund bekannter Wahrscheinlichkeiten dimensioniert werden. Ihre Wirtschaftlichkeit ist somit für heutige Bedingungen gesichert und in noch stärkerem Masse bei erhöhter Hochwassergefahr in einem

zukünftigen Klima. Der Einschluss eines wesentlich grösseren Hochwassers in die Planung ergibt bis zu einem gewissen Grad eine Schadenbegrenzung auch bei einer Erhöhung der Hochwassergefahr. Er verschafft einen Zeitgewinn, bis verlässlichere Grundlagen zur Entwicklung der Risikosituation zur Verfügung stehen. Dabei ist eine ständige Überprüfung der Risikosituation die Voraussetzung für eine langfristige Wirksamkeit, da sich sowohl Schadenpotenzial als auch Gefahrensituation laufend ändern.

Trockenheit

Die letzten Dürresommer erlebte die Schweiz 1947 und 2003. In der Landwirtschaft verursachte der Hitzesommer 2003 Schäden von ungefähr 500 Mio. Franken. Ein lebensbedrohender Wassermangel bestand jedoch nicht. Im Verlauf des 20. Jahrhunderts wurden in der Schweiz keine systematischen Trends in der Häufigkeit langer niederschlagsfreier Perioden gefunden.⁸ Gemäss Szenario werden die Niederschläge im Sommer abnehmen und die Wahrscheinlichkeit von Trockenperioden wird zunehmen. Auch extreme Trockenperioden werden gemäss Modellrechnungen zunehmen.

Im Vergleich zu anderen Regionen der Welt befindet sich heute die Schweiz in einer günstigen Lage. Die ergiebigen Niederschläge sowie die ausgleichende Wirkung der Schneeschmelze und – mit abnehmender Bedeutung – der Gletscherschmelze sorgen auch in Zukunft für ein vergleichsweise hohes Wasserdargebot. Um Engpässe bei der Wasserversorgung vorzubeugen, müssen die entsprechenden Infrastrukturen rechtzeitig massvoll ausgebaut werden. Bedarfsprognosen und Bauzeiten müssen bei der Planung berücksichtigt werden.

In Abflussregimes der Hochalpen, die durch die winterliche Schneedecke und die Schneeschmelze geprägt sind, dürften bei winterlichen Niedrigwassern infolge des Temperaturanstiegs und des höheren Winterniederschlags höhere Wasserstände erreicht werden.

4. Wasserdargebot und Wasserbedarf

Grundwasserneubildung

Als Folge der Klimaänderung wird die Grundwasserneubildung im Winter eher zunehmen und im Sommer und Herbst zurückgehen. Die Grundwasserstände werden insgesamt leicht sinken.

83% des Trink- und Brauchwasserbedarfs der Schweiz werden aus dem Grundwasser gedeckt; davon stammen 44% aus Quellen in Karst- und Kluft-Grundwasserleitern und 39% aus Filterbrunnen in Lockergesteinen (siehe Abb. 4). Die Lockergesteins-Grundwasserleiter weisen einen langsamen Grundwasserfluss auf und sind generell ergiebig. In Karstgebieten fliesst das Grundwasser schnell ab, weshalb diese Quellen nach Niederschlägen hohe Abflüsse aufweisen. Quellen in Kluftgebieten weisen einen gleichmässigeren Abfluss auf, sind aber generell wenig ergiebig. Die verschiedenen Grundwasserleitertypen reagieren daher in unterschiedlichem Ausmass und mit unterschiedlichen Verzögerungen auf klimatische Veränderungen. Als Folge der prognostizierten Klimaänderung wird die Grundwasserneubildung im Winter infolge vermehrten Niederschlags in Form von Regen eher zunehmen. Im Sommer und Herbst wird die Grundwasserneubildung infolge höherer Temperaturen, zunehmender Trockenperioden sowie Konzentration auf Starkniederschläge im

Mittelland und in den Voralpen zurückgehen. Die Infiltration aus alpinen Oberflächengewässern wird leicht zurückgehen.

Diese Veränderungen bei der Grundwasserneubildung haben zur Folge, dass die Quellschüttungen bei oberflächennahen Quellen mit kleinem Einzugsgebiet und bei Karst-Grundwasserleitern saisonal stärker schwanken werden und im Sommer und Herbst zum Teil versiegen können. In Grundwasservorkommen in Talschottern mit mittelländischem Fliessregime ist zu erwarten, dass die Grundwasserstände im Sommer und Herbst sinken. Grundwasservorkommen in Talschottern mit alpinem Fliessregime, die im Sommer ihren saisonalen Höchststand aufweisen, werden nur leicht sinkende Wasserstände verzeichnen. Allerdings muss wohl auch hier während den öfters vorkommenden Hitzesommern und der fehlenden Gletschereisschmelze im Spätsommer und Herbst mit tieferen Grundwasserständen gerechnet werden. In tieferen Grundwasserleitern wird ebenfalls ein leichter Rückgang der Grundwasserstände erwartet.



Abbildung 4: Verteilung verschiedener Grundwasserleiter in der Schweiz.¹⁶

Bedarf an Trink- und Brauchwasser

Als Folge der Klimaänderung wird es vermehrt zu Konkurrenzsituationen zwischen verschiedenen Wassernutzungen und Wassernutzern kommen. Für die Trinkwasserversorgung werden die Voraussetzungen regional und zeitlich begrenzt beeinträchtigt. In der Landwirtschaft steigt der Bedarf an Bewässerungswasser.

Durch die Klimaänderung werden die Voraussetzungen für Trinkwasserversorgungen beeinflusst. Die Auswirkungen sind regional

und zeitlich sehr unterschiedlich. Massnahmen gegen Engpässe bei der Trinkwasserversorgung und zur Erhöhung der Versorgungssicherheit

beinhalten die Nutzung von Oberflächenwasser (Seen), den Ausbau von Verbundnetzen der Trinkwasserversorgung und die Erschliessung neuer Grundwasserressourcen.

Wegen der abnehmenden Niederschläge im Sommer nehmen die Wasserreserven im Boden ab. Höhere Temperaturen führen zu höherer Evaporation und zu einem grösseren Wasserbedarf der Pflanzen (Transpiration). Dadurch führen länger anhaltende und häufigere Trockenperioden zur Bodenaustrocknung. In der Folge verringern sich lokal die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens durch Verkrustung und die Wasserspeicherfähigkeit durch Trockenrisse; die Fähigkeit zur Humusbildung nimmt ab.

Das geringere Wasserdargebot und ein steigender Bedarf der Landwirtschaft an Bewässerungswasser führen zu einer Konkurrenzsituation zwischen verschiedenen Nutzungen und Nutzern wie beispielsweise mit unterliegenden Anrainern. Wasser wird – allerdings zeitlich und örtlich beschränkt – im Sommer zunehmend zu einem knappen Gut werden. Dadurch wird die Notwendigkeit einer geeigneten Bewirtschaftung zunehmen. Diese wird Auswirkungen auf Nutzungs-Prioritäten, Nutzungs-Rechte und Nutzungs-Preise haben. Für Ausgleichs- und Bewässerungsmassnahmen wird es einerseits Regeln und andererseits neue Infrastrukturen brauchen.

5. Wassernutzung

Wasser wird in der Schweiz sehr stark für die Energieerzeugung genutzt. Als Folge der Klimaänderung wird die Stromproduktion durch Speicher- und Flusskraftwerke abnehmen. Die Rheinschifffahrt wird in Zukunft vermehrt durch längere Perioden mit aussergewöhnlich niedrigen Wasserständen beeinträchtigt werden.

Energie

Die Schweiz deckt rund 60% der Elektrizitätsnachfrage respektive $\frac{1}{8}$ des gesamten Energiebedarfs durch Wasserkraft.

Die Klimaänderung wird insbesondere im Alpenraum zu einem jahreszeitlichen Ausgleich der Abflussregime führen. Die Wasserführung nimmt im Winter und Frühjahr zu und im Sommer und Herbst ab. Dadurch erhalten die Kraftwerksbetreiber mehr Flexibilität. In Zukunft wird die Bewirtschaftung der Speicherräume neben dem Ausgleich jahreszeitlicher Schwankungen auch auf die Schwankungen des Strommarktes ausgerichtet sein. Insgesamt muss mit einer Einbusse bei der hydroelektrischen Energieproduktion durch Speicherkraftwerke gerechnet werden, weil weniger Wasser zur Verfügung steht: Die Jahresniederschläge nehmen ab und die Verdunstung nimmt zu.

Niedrigwasser im Spätsommer und Herbst werden die Stromproduktion der Flusskraftwerke im Mittelland einschränken. Andererseits können die Laufkraftwerke im Winter und Frühjahr durch die erhöhten Abflüsse profitieren, da die Kapazität der Turbinen heute in dieser Jahreszeit kaum ausgelastet ist.¹⁷ Insgesamt wird mit einer

kleinen Abnahme der Stromproduktion in den Flusskraftwerken gerechnet.¹⁸

Hochwasser und Hanginstabilitäten werden mit der Klimaänderung zunehmen, wobei insbesondere grosse Massenbewegungen Kraftwerksnebenanlagen wie z.B. Wasserfassungen an steilen Gebirgshängen gefährden können. Auch der Sediment-, Geschiebe- und Geschwemmseltransport könnte zunehmen und die Verlandung von Speicherseen verstärken und beschleunigen.^{19,20}

Auch die Produktion in Kernkraftwerken und anderen thermischen Kraftwerken wird von der Klimaänderung betroffen sein. Wegen der ansteigenden Wassertemperaturen und der abnehmenden Abflüsse werden sie weniger Kühlleistung aus den Gewässern beziehen können, insbesondere während Hitzeperioden wie im Sommer 2003.

Durch die Klimapolitik wird die Wasserkraft als erneuerbare, CO₂-neutrale Energie wirtschaftliche Vorteile gewinnen.

Rheinschifffahrt

Über die Rheinhäfen werden 15% des mengenmässigen Aussenhandels abgewickelt; bei den Mineralölprodukten sind es sogar 35%. Jährlich

werden 9 Mio. Tonnen Güter auf dem Rhein in die Schweiz transportiert.

Während Niedrig- und Hochwassern kann die Rheinschifffahrt eingeschränkt sein. Im Jahre 2003 verzeichneten die Beförderungsmenge und -leistung gegenüber dem Vorjahr einen Rückgang um 5.8% bzw. 9.9%. Für diesen Rückgang war in erster Linie die geringe Wasserführung in der zweiten Jahreshälfte verantwortlich. Wegen des Niedrigwassers konnten die Schiffe nicht gleich viel laden wie bei normalem Pegelstand. Bei Hochwasser wird die Rheinschifffahrt bei einem Pegelstand bei Rheinfelden von über 4.30 m eingestellt. Im Mai 1994 war die Fahrt zwischen Basel und Rheinfelden während 13 Tagen gesperrt. Im Februar 1999 war die Schifffahrt während fünf Tagen und vom 12. Mai bis zum 16. Juni für weitere 38 Tage unterbrochen.

Die Klimaänderung wird einen Einfluss auf den Abfluss haben. Heute weist der Rhein einen sta-

bilien Abfluss auf dank der Speisung im Frühling/Sommer durch Schmelzwasser und Niederschlag in den Alpen und im Herbst/Winter durch Niederschlag in den tiefer gelegenen Gebieten. Das Schmelzwasser der winterlichen Schneedecke und der Gletscher ist heute eine wichtige Quelle für den gleichmässigen Abfluss in Zeiten mit geringem Niederschlag. Dieser ausgleichende Einfluss wird mit dem Abschmelzen der Gletscher laufend abnehmen. Die Wahrscheinlichkeit von längeren Perioden mit aussergewöhnlich niedrigen Wasserständen wird bis 2050 zunehmen. Obwohl der Fortbestand der Schifffahrt dadurch nicht beeinträchtigt wird, dürfte die zeitliche Zuverlässigkeit der Rheinschifffahrt in Mitleidenschaft gezogen werden. Fortschritte bei den saisonalen Voraussagen der Wetterentwicklung und damit der Wasserstände werden in Zukunft die logistische Planung vereinfachen und die Planungssicherheit erhöhen.

6. Verstärkte Bewirtschaftung der Wasserressourcen

Die Schweiz verfügt heute über ein räumlich und zeitlich relativ ausgeglichenes Wasserdargebot. Wegen der Klimaänderung wird das natürliche Wasserdargebot den künftigen Bedarf nicht mehr zu allen Zeiten und überall decken können.

Als Folge der Klimaänderung werden die alpinen Abflussregimes etwas ausgeglichener und die Mittellandregimes werden vermehrt Niedrigwasser- und Trockenperioden aufweisen. Gemäss Klimaszenario werden Hitze- und Trockenperioden zunehmen. Dies hat zur Folge, dass Wasser – zeitlich und örtlich beschränkt – im Sommer immer mehr zu einer knappen Ressource wird. Mit der Klimaänderung verändern sich auch die Ansprüche an die Wassernutzung. Von den Seennutzern und den Anwohnern flussabwärts wird vermehrt eine Erhöhung des Abflusses bei niedrigen Wasserständen gefordert für die Schifffahrt, die Anliegen des Gewässerschutzes, die Entnahme von Trink- und Bewässerungswasser und für Freizeit und Erholung. Das saisonal und regional reduzierte Wasserdargebot und die veränderten Nutzungsansprüche führen zur Notwendigkeit, das Wasser mengenmässig zu bewirtschaften. Ohne Wassermengenbewirtschaftung können nicht mehr alle Ansprüche in gleichem Masse erfüllt werden.

Bei regulierten Seen müssen die bestehenden Regulierschemata den künftigen Anforderun-

gen angepasst werden. Bei Seen, die noch nicht reguliert werden (z.B. Bodensee), wird der Ruf nach Regulierung zunehmen.

Die intraregionale Bewirtschaftung heisst, dass wasserwirtschaftliche Einrichtungen (Verbundnetze und Speicher- und Seenbewirtschaftung) forciert werden müssten, um den erforderlichen Ausgleich zwischen (natürlichem) Dargebot und dem Bedarf gewährleisten zu können.

Die integrale Bewirtschaftung auf Einzugsgebietsbasis erfordert auf der organisatorischen Ebene administrativ-institutionelle Anpassungen (Neuregelung der Zuständigkeiten; Koordination) sowie rechtliche Anpassungen, da die bislang sehr kleinräumigen Zuständigkeiten zu diesem Zweck keine effiziente Struktur bieten.

Neben den Ansätzen der Bewirtschaftung sind auch Massnahmen auf der Nachfrageseite zu treffen, insbesondere bei der Landwirtschaft (effizienter Einsatz von Bewässerungstechniken bis hin zur Wahl der angepflanzten Kulturen) und beim Brauch- und Trinkwasserbedarf.

Literatur und Anmerkungen

- 1 F. Peeters, D. M. Livingstone, G.-H. Goudsmit, R. Kipfer, and R. Forster. Modeling 50 years of historical temperature profiles in a large central European lake. In: *Limnol. Oceanogr.*, 47(1), 2002, 186–197.
- 2 D. M. Livingstone and D. M. Imboden. The prediction of hypolimnetic oxygen profiles: a plea for a deductive approach. In: *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 53(4), 1996, 924–932.
- 3 R. E. Hari, D. M. Livingstone, R. Siber, P. Burkhardt-Holm and H. Güttinger. Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. In: *Global Change Biol.*, 12, 2006, 10–26.
- 4 D. M. Livingstone. Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake. In: *Clim. Change* 57, 2003, 205–225.
- 5 C. J. Keleher and F. J. Rahel. Thermal limits to salmoid distributions in the Rocky Mountain Region and potential habitat loss due to global warming: a geographic information system (GIS) approach. In: *Transaction of the American Fisheries Society* 125, 1996, 1–13.
- 6 P. Burkhardt-Holm, W. Giger, H. Güttinger, U. Ochsenbein, A. Peter, K. Scheurer, H. Segner, E. Staub, and M. J.-F. Suter. Where have all the fish gone? In: *Env. Science & Technology* 39 (21), 2005, 441A–447A.
- 7 M. V. Birsan, P. Molnar, M. Pfaundler und P. Burlando. Trends in schweizerischen Abflussmessreihen. In: *Wasser Energie Luft*, Heft 1/2, 2004, 29–38.
- 8 J. Schmidli and C. Frei. Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. In: *Int. J. Climatol.*, 25, 2005, 753–771.
- 9 F. Bultot, D. Gellens, B. Schädler and M. Spreafico. Effects of climate change on snow accumulation and melting in the Broye catchment (Switzerland). In: *Clim. Change*, 28, 1994, 339–363.
- 10 J. Kleinn. Climate change and runoff statistics in the Rhine basin: A process study with a coupled climate-runoff model. Diss. ETH Nr. 14663., 2002.
- 11 J. Räisänen, U. Hannson, A. Ullerstig, R. Döscher, L. P. Graham, C. Jones, H. E. M. Meier, P. Samuelsson, and U. Willén. European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two global models and two forcing scenarios. In: *Climate Dyn.*, 22, 2004, 13–31.
- 12 M. Ekström, H. J. Fowler, C. G. Kilsby, and P. D. Jones. New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 2. Future estimates and use in impact studies. In: *J. Hydrol.*, 300, 2005, 234–251.
- 13 C. Frei, R. Schöll, S. Fukutome, J. Schmidli and P. L. Vidale. Future change of precipitation extremes in Europe: An intercomparison of scenarios from regional climate models. In: *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 111, 2006, D06105, doi:10.1029/2005JD005965.
- 14 OcCC (Hg.). *Extremereignisse und Klimaänderung*. Bern, 2003.
- 15 J. H. Christensen and O. B. Christensen. Severe summertime flooding in Europe. *Nature*, 421, 2003, 805–806.
- 16 BUWAL. *Wegleitung Grundwasserschutz. Vollzug Umwelt*. Bundesamt für Umweltschutz, Wald und Landschaft, Bern, 2004.
- 17 D. Vischer und S. Bader. Einfluss der Klimaänderung auf die Wasserkraft. In: *Wasser Energie Luft*, Heft 7/8, 1999.
- 18 M. Piot. Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftproduktion in der Schweiz. In: *Wasser Energie Luft*, Heft 11/12, 2005.
- 19 IG Wasserkraft, VSE, ProClim, OcCC, NCCR Climate. *Wasserkraft und Klimawandel in der Schweiz – Vision 2030*, 2003.
- 20 A. Schleiss und C. Oehy. Verlandung von Stauseen und Nachhaltigkeit. In: *Wasser, Energie, Luft*, 94 (7/8), 2002, 227–234.