

Alpine Gewässer – Fragile Vielfalt in Bedrängnis

Alpine Fließgewässer: vielfältige
und empfindliche Ökosysteme

9



Alpine Wasserkraftwerke
und ihre «Fernwirkung»

18



Rhonekorrektur: Revitalisierung
trotz Kraftwerksbetrieb?

21



Auswirkungen der Klimaveränderung
auf alpine Gewässersysteme

24



Alpine Gewässer in Bedrängnis

2 Editorial: Die Alpen im Fluss

Leitartikel

3 Alpiner Wasserreichtum im Visier

Forschungsberichte

7 Schützt die Alpenkonvention das
Wasserschloss Alpen?

9 Alpine Fliessgewässer: vielfältige und
empfindliche Ökosysteme

12 Alpine Seen: Extremökosysteme unter
dem Druck globaler Veränderungen

15 Archive in der Tiefe von
Hochgebirgsseen

18 Alpine Wasserkraftwerke und ihre
«Fernwirkung» auf talwärts liegende
Gewässer

21 Dritte Rhonekorrektur: Revitalisierung
trotz Kraftwerksbetrieb?

24 Auswirkungen der Klimaveränderung
auf alpine Gewässersysteme

Diverses

27 Publikationen (3158–3192)

28 In Kürze

Herausgeberin Vertrieb und ©:
EAWAG, Postfach 611, CH-8600 Dübendorf
Tel. +41-1-823 55 11
Fax +41-1-823 53 75
<http://www.eawag.ch>

Redaktion Martina Bauchrowitz, EAWAG

Abbildungen Y. Lehnhard und L. Zweifel, EAWAG

Copyright Nachdruck möglich nach Absprache mit der
Redaktion.

Erscheinungsweise dreimal jährlich in Deutsch,
Englisch und Französisch. Chinesische Ausgabe in
Zusammenarbeit mit INFOTERRA China National Focal
Point.

Fotos Titelblatt R. Zah, EAWAG, A. Wüest, U. Uehlinger

Konzept Inform, 8004 Zürich

Satz, Bild und Layout Peter Nadler, 8700 Küsnacht

Gedruckt auf rezykliertem Papier

Abonnemente und Adressänderungen
NeuabonnentInnen willkommen!
Bitte Bestelltalon in der Heftmitte beachten.

ISSN 1420-3979

Die Alpen im Fluss



Bernhard Wehrli,
Leiter der Abteilung
«Oberflächengewässer»

Einsame Bergseen und wilde Gletscherbäche zieren viele Postkarten und Reiseprosperkte. Dass der Mensch die alpinen Lebensräume umgestaltet, passt meist nicht in diese idyllischen Bilder. Bereits seit 4000 Jahren werden Bergwälder gerodet und die frei gewordenen Flächen als Alpweiden genutzt. Dies zeigen Blütenpollen, die in den Sedimenten alpiner Seen lagern. Mit der aktuellen Entwicklung der Alpentäler zu europäischen Transitzkorridoren wird der Schutz der Verkehrswege und Siedlungen vor Hochwasser und Murgängen immer dringender. Schwellen, Wehre und seitliche Dämme bändigen heute die wilden Alpenflüsse. Seit über 100 Jahren wird die Wasserkraft – das weisse Gold der Alpen – genutzt. Bezogen auf die Landesfläche liegt die Schweiz in der Produktion von Hydroelektrizität heute weltweit an der Spitze. Viele Alpenflüsse werden auf etwa 2000 m Höhe eingedolt und in Stauseen geleitet. Unten im Tal warnen Signaltafeln die Wanderer und Touristen vor plötzlichem Anschwellen des Wasserpegels, wenn die Kraftwerkzentralen ihre Turbinen einschalten. Auch die Nutzung fossiler Brennstoffe als Energiequelle beeinträchtigt die alpinen Gewässer: Durch die Klimaerwärmung wird nicht nur der Gletscherrückgang beschleunigt, sondern auch die Niederschlags- und Abflussdynamik verändert.

Die Uno hat das Jahr 2002 zum Jahr der Berge erklärt. Aus diesem Anlass führte die EAWAG ihren Infotag unter dem Titel «Alpine Gewässer – Fragile Vielfalt in Bedrängnis» durch. Die Referate fassen neueste Forschungsergebnisse zur Funktionsweise der alpinen Gewässer und ihrer Bewohner zusammen und liefern Fakten über die Auswirkungen der anthropogenen Veränderungen. Um die Forschungsergeb-

nisse in der Praxis umzusetzen, braucht es eine intensive Zusammenarbeit zwischen den Institutionen und über die Landesgrenzen hinaus. Gerade weil die Alpen ein wichtiges Hindernis im Nord-Süd-Verkehr sind, hat sich schon früh ein intensiver kultureller Austausch zwischen den Alpenregionen ausgebildet. Aus dieser Zusammenarbeit ist auf politischer Ebene die Alpenkonvention entstanden. Ihr Hauptziel ist eine nachhaltige Entwicklung dieser empfindlichen Region im Zentrum Europas. Für die alpinen Gewässer stellt sich die Aufgabe, die Elektrizitätsproduktion, den Hochwasserschutz und die touristische Nutzung so zu gestalten, dass die ökologische Funktionsfähigkeit dieser empfindlichen Ökosysteme langfristig erhalten bleibt. Seit ca. einem Jahr arbeiten deshalb EAWAG, die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), das Bundesamt für Wasser und Geologie (BGW) und verschiedene Institute der ETH Zürich und Lausanne gemeinsam am «Rhone-Thur»-Projekt. Darin sollen Methoden und Kriterien für eine Erfolgskontrolle von Revitalisierungsprojekten erarbeitet werden.

Das vorliegende Heft wird ergänzt durch die Schwerpunktnummer 54 der EAWAG news zur Ökologie alpiner Fliessgewässer¹. Beide Ausgaben bieten eher aktuelle Standortbestimmungen als endgültige Schlussberichte. Analog zu den rasanten Umweltveränderungen im Alpenraum ist nämlich auch die alpine Gewässerforschung im Fluss...



¹ Eine Zusammenfassung des Referats von Michael Monaghan findet sich in der EAWAG news Nr. 54.

Alpiner Wasserreichtum im Visier

Das Wasser spielt im Alpenraum eine prägende Rolle. Es steht hier für urtümliche Natur, sensible Ökosysteme und eine vielfältig nutzbare Ressource. Diese Natur- und Nutzungswerte werden durch einseitige und intensive Nutzungen gefährdet oder zerstört. Die alpinen Regionen sind daher gefordert, ihre Wasserressourcen nachhaltig zu bewirtschaften. Unumgänglich ist aber auch eine Koordination der Interessen über die Landesgrenzen hinaus. Denn entlang der grossen europäischen Flüsse sind Millionen Menschen und die Wirtschaft auf die alpinen Wasserressourcen angewiesen. Im Hinblick auf die prognostizierte Klimaerwärmung wird eine internationale Zusammenarbeit immer wichtiger.

Der schweizerische Alpenraum ist reich an Gewässern und bildet das Wasserschloss für grosse Gebiete Westeuropas. Seine Wasserressourcen werden intensiv für die Elektrizitätserzeugung genutzt. Zum Schutz vor Naturgefahren und zur Gewinnung nutzbarer Flächen wurden viele Gewässer korrigiert. Die Interessen an der Nutzung und der Gefahrenabwendung stehen teilweise im scharfen Konflikt zu den Werten sensibler Gewässerökosysteme und naturnaher Landschaftsbilder. Nötig ist ein ausgewogener Ausgleich zwischen den verschiedenen Interessen mit dem Ziel, sowohl wertvolle Naturwerte zu sichern als auch wichtige Nutzungen zu gewährleisten. Dafür sind umfassende Bewirtschaftungsansätze erforderlich, die auf verschiedenen Ebenen greifen und wissenschaftlich unterstützt werden müssen.

Lebensraum Alpen

Die Alpen umfassen eine Fläche von rund 190 000 km² in sieben Staaten – Frankreich, Italien, Schweiz, Deutschland, Lichtenstein, Österreich und Slowenien (Abb. 1). Der Schweizer Anteil am Alpenraum macht 25 000 km² aus. Diese Fläche entspricht 60% des nationalen Territoriums.

Das schweizerische Alpengebiet (Abb. 2 und 3) hat seinen tiefsten Punkt mit 193 m ü.M. am Lago Maggiore, der höchste Gipfel, die Dufourspitze erreicht 4634 m. Es gibt auf engem Raum enorme Klimaunterschiede: inneralpine Trockengebiete, mediterrane Zonen und alle Übergänge bis hin zu pola-

ren Zonen. Der mittlere Jahresniederschlag variiert von 500 bis 4000 mm.

Die grosse Variabilität der natürlichen Bedingungen, aber auch die oft noch naturnahen landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsformen führen zu vielfältigen Lebensräumen für die Tier- und Pflanzenwelt. Deshalb liegen Zonen mit hohem Artenreichtum, so genannte Hotspots, in der Schweiz mehrheitlich im Alpenraum. Anhand zahlreicher Reliktorkommen lässt sich überdies die Entwicklungsgeschichte der Alpen seit der letzten Eiszeit nachverfolgen.

Die Bevölkerungsdichte in den Alpen ist allgemein gering. Der gesamte alpine Raum wird von fast 14 Mio. Menschen besiedelt. Von der Schweizer Bevölkerung leben nur etwa 1,6 Mio. Menschen, das sind 22% der Gesamtzahl, im Alpenraum [1]. Im Kanton Graubünden ist die Bevölkerungsdichte mit 26 Einwohner pro km² und vielen unbesiedelten Hochgebirgsgebieten besonders gering, dagegen kann sie in den Talebenen regional auf über 400 Einwohner pro km² steigen. Die Talebenen werden intensiv landwirtschaftlich genutzt. Ausserdem sind sie Standort zahlreicher Industrieanlagen und weisen ein gut ausgebautes Strassen- und Schienennetz auf, das auch für den internationalen Verkehr wichtig ist.

Die Landwirtschaft, vor 100 Jahren in den meisten alpinen Gebieten der dominante Wirtschaftsbereich, hat stark an Bedeutung verloren und der Anteil der dort beschäftigten Erwerbstätigen macht nur noch wenige

Prozent aus. Je nach Höhenlage dominieren Obstkulturen, Ackerbau oder Gras- und Weidewirtschaft. In grossen Gebieten, speziell im Tessin, Wallis und in Graubünden, bleiben immer mehr Flächen ungenutzt. Dagegen haben die Bereiche Tourismus und Freizeitaktivitäten enorm zugenommen. Sie stellen heute zwischen 10% und über 20% der Arbeitsplätze in den Gebirgsregionen.

Das Wasserschloss

In den Schweizer Alpen entspringen die grossen Flüsse Rhein und Rhone sowie Inn und Ticino als wichtigste Zuflüsse der Donau und des Po. Hier fallen jährlich im Schnitt etwa 2000 mm Niederschlag, 1175 mm davon oder rund 28 km³ bzw. 900 m³/s fliessen in die umliegenden Gebiete ab. Beim Rhein stammen 24% des Wassers, das er an seiner Mündung in die Nordsee führt, aus den Schweizer Alpen. Bei den anderen Flüssen liegt dieser Anteil zwischen 1–10% (Tab. 1). Der Abfluss aus den Alpen spielt aber trotzdem auf langen Flusstrecken eine quantitativ sehr wichtige Rolle.

Die Alpen bilden zudem einen enormen Wasserspeicher: So lagern heute etwa 74 km³ Wasser in den Gletschern auf Schweizer Gebiet. Im Jahr 1901 waren es noch über 95 km³ [2]. In den natürlichen Seen, inklusive der Alpenrandseen (nur Schweizer Anteile bei den Grenzseen) sind etwa 100 km³ und in den künstlichen Speicherseen knapp 4 km³ gespeichert. Eine



Abb. 1: Der Alpenbogen.

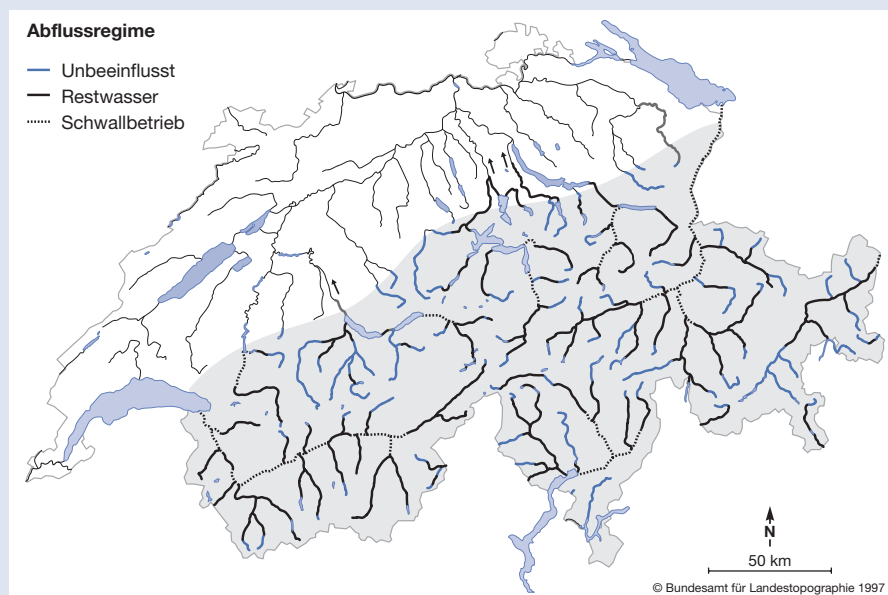


Abb. 2: Alpine Fließgewässer, die durch Wasserkraftnutzung beeinträchtigt sind. Verändert nach [14].

weitere Wasserreserve, die im Jahresrhythmus gebildet und wieder abgebaut wird, ist der Schnee. Sehr grosse und schwer bezifferbare Wassermengen lagern ausserdem in den verschiedenen Systemen des Untergrundes, in rezenten Schottern der Flusstäler sowie in Poren und Spalten im Fels.

Wasserreichtum prägt die Natur

Das schweizerische Alpengebiet weist etwa 30 000 km Fließgewässer sowie 17 natürliche Seen und 47 künstliche Stauseen mit einer Fläche von mehr als 0,5 km² auf. Hinzu kommen unzählige kleinere Bergseen. Die Gletscher der Schweiz nehmen heute eine Fläche von 1300 km² ein, das sind rund 5 % der Fläche des Alpenraums.

Alpine Fließgewässer haben viele Gesichter: Wir finden beschauliche Quellbäche, relativ ausgeglichene Seeausflüsse, steile und gestreckte Wildbäche, verästelte Bachsysteme in Schwemmebenen, rauschende Wasserfälle, mal tosende und mal ruhige Gletscherflüsse, häufig aber auch künstlich abgetreppte, seitlich hart verbaute und

trockengelegte Gerinne. Nach Art der Wasserherkunft unterscheidet man Fließgewässer, die von Gletscherschmelzwasser, Grundwasser oder Regen/Schneeschnelze gespeist werden. Die verschiedenen Erscheinungsformen der Fließgewässer repräsentieren hydrologisch, morphologisch, physikalisch und chemisch unterschiedlich geartete Lebensräume. Klimatische und topographische Barrieren führen zur Fragmentierung zahlreicher Habitate und Organismenvorkommen [3] (siehe Artikel von M. Hieber S. 9).

Hochalpine Seen sind Extremökosysteme, geprägt durch die strengen klimatischen Bedingungen, Nährstoffarmut und einen geringen Salzgehalt. Der Eintrag von Zivilisationschemikalien macht auch vor diesen entlegenen Seen nicht Halt. Über die Atmosphäre werden die Schadstoffe verteilt und schlagen sich auch in den Hochlagen der Alpen nieder (siehe Artikel von R. Psenner S. 12). Eine landschaftlich und hydrologisch dominante Rolle spielen die grossen Alpenrandseen: Genfersee, Bodensee, Vierwald-

stättersee, Zugersee, Walensee, Brienzersee, Thunersee, Lago di Lugano und Lago Maggiore.

Sowohl alpine Fließgewässer als auch die Hochgebirgsseen reagieren sehr empfindlich auf Klimaänderungen und menschliche Eingriffe (siehe Artikel von M. Sturm S. 15).

Wasserreichtum dient den Menschen

Im schweizerischen Alpenraum werden die Interessen am Wasser von der Wasserkraftnutzung dominiert. Die nutzbaren Potenziale sind weitgehend ausgeschöpft. Knapp 60 % des Schweizer Elektrizitätsbedarfs werden durch die Wasserkraft gedeckt, ein Grossteil davon stammt aus den Alpen. Weitere wichtige Nutzungen sind die Versorgung von Siedlungen, touristischen Zentren und Industrie mit Trink- und Brauchwasser sowie die Abwasserentsorgung, bei der die Bäche und Flüsse dem gereinigten Abwasser als Aufnahme- und Transportmedium dienen.

Eine lange Tradition hat die landwirtschaftliche Bewässerung, speziell in den inneralpinen Trockengebieten. Am bekanntesten sind die oft viele hundert Jahre alten Bewässerungsanlagen im Wallis. Das Wasser wird meist hoch oben in den Bergen gefasst und in Wasserleitungen, die in schwierigstem Gelände angelegt sind, bis an die zu bewässernden Äcker und Wiesen geleitet. Die Wasserleitungen im Wallis umfassen eine Länge von 1500–2000 km und bewäs-

Flüsse CH-Alpengebiet	Hauptfluss	Mündung	Abfluss aus		Anteil CH-Alpengebiet am	
			CH-Alpengebiet	Gesamt- EZG	Gesamt-EZG des Hauptflusses	Jahresabfluss bei Mündung ins Meer
Rhein-Aare-EZG*	Rhein	Nordsee	1238 mm/Jahr 530 m ³ /s	309 mm/Jahr 2200 m ³ /s	6 %	24 %
Rhone	Rhone	Mittelmeer	1100 mm/Jahr 182 m ³ /s	611 mm/Jahr 1900 m ³ /s	5 %	10 %
Ticino-EZG**	Po	Adriatisches Meer (Mittelmeer)	1239 mm/Jahr 134 m ³ /s	657 mm/Jahr 1460 m ³ /s	5 %	9 %
Inn	Donau	Schwarzes Meer	876 mm/Jahr 54 m ³ /s	253 mm/Jahr 6450 m ³ /s	0,2 %	1 %

* Rhein, Thur, Linth, Aare, Emme, Reuss etc. / ** Ticino, Maggia, Tresa etc.

Tabelle 1: Die hydrologische Bedeutung des Schweizer Alpenraums. Abflüsse aus dem schweizerischen Alpengebiet [15].

sern eine Fläche von 140–200 km² [4]. Eine heute nicht mehr praktizierte Gewässernutzung ist die Trift und Flösserei von Holz, die bis ins 20. Jahrhundert betrieben wurde. Sie erforderte in vielen Fliessgewässern wasserbauliche Eingriffe wie Stauteiche und Leitwerke [4].

Darüber hinaus bieten die Gewässer die Möglichkeit zu vielfältigen Erholungs- und Sportaktivitäten. Sie bereichern das Landschaftsbild, sind für das Wohlbefinden der Menschen wichtig und oft mit vielen Emotionen verbunden. Vielseitige, intakte Landschaften und Gewässer werden für die Freizeitattraktivität einer Region sehr hoch bewertet. Sie werden umgekehrt durch die Freizeitaktivitäten immer intensiver beansprucht und belastet [5].

Das Wasser und die Gewässer können aber auch Überschwemmungen, Murgänge und Erdbeben auslösen und so für die Menschen gefährlich werden.

Nutzungen wirken sich auf die Gewässer aus

Die Wasserkraftnutzung erfolgt in unterschiedlichen Dispositionen von Lauf- und Speicherkraftwerken [6]. Sie umfasst verschiedene betriebliche und bauliche Massnahmen, die sich in unterschiedlicher Weise auf die Fliessgewässer auswirken (Tab. 2). Oft werden auch die Infiltrations- und Exfiltrationsverhältnisse und damit das Grundwasserregime verändert.

Bei den Speicherseen wird Wasser oft aus anderen Gebieten zugeleitet. Überleitungen



Abb. 3: Alpine Fliessgewässer mit korrigiertem Verlauf. Verändert nach [14].

erfolgen sowohl innerhalb als auch zwischen den Einzugsgebieten der grossen Flüsse. Der Ticino z.B. erhält Zufluss aus den Gebieten Rhein, Reuss (Aare) und Rhone. Zum Teil wird das Wasser auch über die Landesgrenzen hinweg umgeleitet. So wird aus dem Einzugsgebiet des Inn eine Wassermenge entsprechend 55 mm nach Italien exportiert [2].

In den Schweizer Alpen sind fast alle grösseren und viele kleine Fliessgewässer von Wasserentnahmen sowie Schwall-Sunk-Abflüssen betroffen (Abb. 2). Die Speichervirtschaft kann auch zu markanten Verschiebungen von Sommer- zu Winterabflüssen führen. Dies ist beispielsweise in der Rhone und im Vorderrhein der Fall [2, 6]. Zum Schutz der Siedlungen vor Naturgefahren sowie zur Gewinnung und Sicherung von landwirtschaftlich nutzbarem Land wurden sehr viele Wildbäche verbaut und ein Grossteil der Fliessstrecken der grossen Gewässer begradigt und befestigt (Abb. 3). Die Gewässerkorrekturen sind oft kombiniert mit flächigen Entwässerungen des umliegenden Landes. Im schweizerischen

Alpenraum gibt es nur noch wenige Relikte der ursprünglich verbreitet vorkommenden Auen.

Die Wasserkraftnutzungen und Gewässerkorrekturen können sich weit flussabwärts auswirken und haben Veränderungen des Abfluss-, Partikel-, Nährstoff- und Temperaturregimes zur Folge (siehe Artikel von A. Wüest S. 18).

Auswirkungen des Klimawandels

Als Folge des Klimawandels wird sich der Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der grossen Flüsse verändern. Die in den Alpen eintretenden Veränderungen sind beim Rhein entlang der gesamten Fliessstrecke bis zur Mündung in die Nordsee spürbar und überlagern regionale Effekte [7]. Der Anstieg der Schneegrenze, grössere Hochwasser im Winter, tiefere Abflüsse im Sommer, die Dynamisierung des Abflussgeschehens, die gesteigerte Evapotranspiration, der Anstieg des Meeresspiegels mit nachfolgender Aufsalzung des küstennahen Grundwassers, aber auch die Veränderungen der Landnut-

Physikalische und chemische Auswirkungen der Wasserkraftnutzung	Art des Eingriffs:				
	Wasserentnahme	Entsandung (Entsanderspülung)	Wasserrückgabe	Wasserspeicherung	Bauliche Eingriffe
Änderung des Abflussregimes	P	(P)	P		
Änderung der Strömungsverhältnisse	S		S		P
Änderung des Feststoffregimes	S	P	S	P	(S)
Verkleinerung und/oder strukturelle Veränderung des Lebensraums	S	S	S		P
Veränderung des Chemismus und der Temperatur von Wasser und Sediment	S		S	P	

Tab. 2: Primäre (P) und sekundäre (S) Auswirkungen der Wasserkraftnutzung auf Fliessgewässer. S ist Folge von P.

zung durch Siedlungen und Landwirtschaft erfordern Anpassungen bei der Gewässerbewirtschaftung und darüber hinaus bei allen vom Wasser betroffenen menschlichen Aktivitäten (siehe auch Artikel von B. Schädler S. 24).

Interessenkonflikte

Die lokal und regional unterschiedlichen Interessen am Wasser können sich gegenseitig behindern. Oft stehen Wasserkraftnutzung und Korrekturen in einem scharfen Konflikt zu intakten Naturwerten, Erholung und Tourismus. Eine wichtige Rolle spielen auch die Interessen der Unterlieger. Einerseits beanspruchen sie vom Alpenraum Elektrizität und Wasser für die Versorgung der Bevölkerung und der Industrie. Andererseits sind entlang der Flüsse und in den untenliegenden Seen viele Schutzinteressen und Nutzungen von den Eingriffen im Alpenraum betroffen. Beispiele sind der Hochwasserschutz, die Schifffahrt und die Wasserversorgung.

Die Sensibilität der Unterlieger für diese Zusammenhänge steigt, gerade auch durch die Auseinandersetzung mit den möglichen Folgen eines Klimawandels. Das Wassermanagement in den Alpen wird künftig verstärkt mit den Problemen und Ansprüchen im Unterland konfrontiert sein. Aber auch die Unterlieger tragen Verantwortung. Denn je mehr sich eine Region im Tiefland von der nachhaltigen Nutzung ihrer eigenen Wasserressourcen entfernt, umso eher ist sie auf den Import von Wasser, z.B. aus dem Alpenraum, angewiesen [8]. Dies alles macht deutlich wie sehr die Interessen am Wasser, von den Alpen bis zur Mündung der Flüsse in die Meere, miteinander vernetzt sind.

Handlungsvorgaben

Das Wasser der Alpen dient der Natur und den Menschen. Einseitige Nutzungsgewichungen zum erheblichen Nachteil der alpinen Naturwerte oder der Interessen anderer Regionen verbieten sich. Handlungsbedarf besteht auf verschiedenen räumlichen und politischen Ebenen – lokal, regional und international.

Die unterschiedlichen Interessen und Probleme müssen auf allen Ebenen in einer Gesamtsicht analysiert und bewertet und in Bewirtschaftungskonzepten integriert werden. Voraussetzung dafür sind konsistente politische Vorgaben, die stufenweise für die verschiedenen Handlungsebenen zu konkretisieren sind. Dabei sind speziell auch Anreize und Freiräume für Eigeninitiativen aller Akteure und Betroffenen zu schaffen [9].

Die Wasserrahmenrichtlinie der EU regelt die gesamtheitliche Bewirtschaftung der Wasserressourcen im Kontext der grossen Flusseinzugsgebiete [10]. Sie ist jedoch nicht ausreichend, um die unschätzbaren ökologischen Ressourcen des Alpenraums zu erhalten. Deshalb wird von verschiedener Seite gefordert, die von den Alpenstaaten getragene Alpenkonvention durch ein Gewässerprotokoll zu erweitern. Damit soll der Ausgleich der Interessen am Wasser im Sinne nachhaltiger Schutz- und Nutzungsansprüche gewährleistet werden (siehe Artikel von M. Broggi S. 7).

Handlungsbeispiele

Die Entwicklung eines Schweizer Zertifizierungsverfahrens zur Kennzeichnung und Förderung umweltfreundlich gewonnener Elektrizität ist ein gelungenes Beispiel für die ökologische Optimierung spezifischer Wassernutzungen unter Einbezug der Stakeholder. Damit werden ökologische und energiewirtschaftliche Anliegen in einem für verschiedene Interessen produktiven Ansatz verbunden [11].

Für die geplante dritte Rhonekorrektur im Wallis sind multifunktionelle Anforderungen massgebend. Die Interessen des Hochwasserschutzes, die Verbesserung der ökologischen Funktionsfähigkeit des Flusses und die Schaffung von Erholungswerten sowie wirtschaftliche und soziale Anliegen sollen dabei in einem ausgewogenen Verhältnis wahrgenommen werden (siehe Artikel von M. Fette S. 21).

Im Falle der Rhone spielt auch die Bewirtschaftung der Speicherseen eine wichtige Rolle. Diese kann, in Kombination mit Retentionseinrichtungen zur Reduktion der Schwallabflüsse, wesentlich zum Hochwasserschutz und zur Milderung negativer ökologischer Auswirkungen beitragen. Die ökologische Optimierung der Speicherbewirtschaftung ist in der alpinen Wasserwirtschaft ganz generell ein wichtiges künftiges Handlungsfeld.

Die Wissenschaft hilft mit

Umfassende Ansätze erfordern Beiträge aus verschiedensten Bereichen: Physikalische, chemische, biologische, hydrologische, wasserbauliche, ökonomische und soziologische Disziplinen, aber auch Energiewirtschaft, Regionalpolitik und die beteiligten Interessengruppen müssen gemeinsam tragfähige Lösungen entwickeln und realisieren.

Ihr Handeln ist auf wissenschaftliche Unterstützung angewiesen. Einerseits ist grundlegendes Wissen zur Ökologie alpiner Gewässer [12] und über die Auswirkungen

direkter und indirekter Eingriffe erforderlich. Resultate zu diesen Forschungsthemen finden sich im vorliegenden Heft. Andererseits muss die Wissenschaft mithelfen, umfassende Bewirtschaftungsansätze unter Einbezug der massgebenden politischen, rechtlichen, wirtschaftlichen, institutionellen, sozialen und kulturellen Aspekte zu entwickeln und zu erproben [13].

Die Forschenden sind gefordert, ihre wissenschaftlichen Beiträge und darüber hinaus ihr persönliches Engagement in die nachhaltige Entwicklung der alpinen Wasserressourcen einzubringen.



Ulrich Bundi ist Mitglied der EAWAG Direktion und befasst sich mit Fragen des Gewässermanagements und der Umweltpolitik.

Mein Dank geht an Rudolf Koblet (EAWAG), der mich massgeblich bei der Abfassung des Manuskripts unterstützte.

- [1] Broggi M.F., Staub R., Ruffini F.V. (1999): Grossflächige Schutzgebiete im Alpenraum – Daten, Fakten, Hintergründe. Europäische Akademie Bozen, Fachbereich Alpine Umwelt, 241 S.
- [2] Schädler B. (1985): Der Wasserhaushalt der Schweiz. Bundesamt für Umweltschutz – Landeshydrologie, Mitteilung Nr. 6, 9–83.
- [3] Monaghan M. (2002): Habitatfragmentierung und genetische Diversität. EAWAG news 54d, 28–30.
- [4] Koblet R. (2000): Spiel mit dem Wasser – Spiel mit dem Feuer?, Selbstverlag, 70 S.
- [5] Bundesamt für Statistik (2002): Umwelt Schweiz 2002 – Statistiken und Analysen. 322 S.
- [6] Forstenlechner E., Hütte M., Bundi U., Eichenberger E., Peter A., Zobrist J. (1997): Ökologische Aspekte der Wasserkraftnutzung im alpinen Raum. Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 100 S.
- [7] Daamen K., Gellens D., Grabs W., Kwadijk J.C.J., Lang H., Middelkoop H., Parmet B.W.A.H., Schädler B., Schulla J., Wilke K. (1997): Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin (CHR), 172 p.
- [8] Lehn H. (1998): Nachhaltiges Wassermanagement in Baden-Württemberg? Spektrum der Wissenschaft, April, 96–97.
- [9] Bundi U., Truffer B. (2001): Integriertes Gewässermanagement als Perspektive. EAWAG news 51d, 3–6.
- [10] European Community (2000): Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy, L327/1–L327/72. http://europa.eu.int/comm/environment/water/water-framework/index_en.html
- [11] Bratrich C. (2001): Gewässerschutz mit Marktinstrumenten. EAWAG news 51d, 20–22.
- [12] EAWAG (2002): Alpine Fliessgewässer. EAWAG news 54d, 36 S.
- [13] EAWAG (2001): Gewässer bewerten – Gewässer bewirtschaften. EAWAG news 51d, 28 S.
- [14] Landeshydrologie und -geologie (Ed.) (1992): Hydrologischer Atlas der Schweiz.
- [15] Koblet R. (2002): Persönliche Mitteilungen.

Schützt die Alpenkonvention das Wasserschloss Alpen?

Die alpinen Fliessgewässer sind gefährdet. Der Raum für die Flüsse und Bäche ist oft nicht ausreichend, die Wasserqualität ungenügend und die Restwassermenge zu gering. Angesichts der grossen Bedeutung der Alpen als Wasserschloss Europas besteht dringender Handlungsbedarf. Bereits 1991 verabschiedeten die Alpenstaaten und die Europäische Union eine Konvention zum Schutz der Alpen. Mit dem Ziel, die Gefährdung der Fliessgewässer zu minimieren und die Sensibilität für das lebenswichtige Wasser zu erhöhen, soll die Alpenkonvention nun so rasch wie möglich um ein Gewässerprotokoll erweitert werden.

Die Bedeutung der Alpen als europäisches Wasserschloss, in dem die grossen Flüsse Rhein, Rhone, Drau, Durance, Inn und Po entspringen, ist allgemein anerkannt. Trotzdem wird den alpinen Fliessgewässern immer noch zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Von dem insgesamt 30 000 Fliesskilometer langen Gewässernetz in den Schweizer Alpen sind 12 500 Kilometer mittlerer und grösserer Flüsse in einem naturfernen Zustand. Sie wurden vor allem in den letzten 200 Jahren aufgrund verschiedenster Nutzungsansprüche, z.B. für den Hochwasserschutz und die Wasserkraftgewinnung, korrigiert. Wollte man alle

verbauten alpinen Fliessgewässer revitalisieren, wären bei heutiger Revitalisierungsgeschwindigkeit über tausend Jahre nötig [1]. Somit muss unverzüglich gehandelt werden, um einerseits die noch unverbauten Gewässer zu schützen und andererseits die verbauten Gewässer in einen möglichst natürlichen Zustand zurückzuführen. Grundlage hierfür sind staatliche und grenzüberschreitende Regelungen.

Vielfältige Bedeutung alpiner Gewässer

Im stark anthropogen geprägten und durch Tief-, Hoch- oder Wasserbauten fragmen-

tierten Alpenraum bilden das Wasser und die Gewässer das einzige flächendeckende und weitgehend zusammenhängende natürliche Netzwerk. Ökonomisch sind die Fliessgewässer vor allem für die Gewinnung von Wasserkraft, in der Trinkwasserversorgung und im Tourismus von Bedeutung. Bei der touristischen Nutzung kommt der ästhetische Aspekt der alpinen Gewässer hinzu. Sie ziehen durch ihre einzigartige Schönheit viele Menschen an.

Mit einem jährlichen Wasserabfluss von über 200 Mrd. m³ wirken sich Fliessgewässer aber nicht nur positiv für den Lebensraum aus. Sie stellen ein beachtliches Gefahrenpotenzial dar, das sämtliche flussnahen Gebiete prägt [2]. Verwüstungen in verschiedenen Teilen Europas haben dies in diesem Sommer deutlich vor Augen geführt (Abb. 1).

Aktuelle Gefahren für die alpinen Gewässer

Die Gefahren, die auf alpine Gewässer einwirken, sind vielfältig und werden hier schlaglichtartig beleuchtet:

■ Die *Energiegewinnung* mit Wasserkraft ist eines der heiklen Probleme für die Fliessgewässer. Wurden die hydroelektrischen Kraftwerke in den letzten 100 Jahren als «einheimisch», «sauber» und «erneuerbar» angepriesen, sind die ökologischen Auswirkungen heute gravierender als vor 50 Jahren angenommen. Zwar spielen die Wasserkraftwerke für den Finanzhaushalt der Berggemeinden eine eminente Rolle; für den wirtschaftlichen Aufschwung wird aber ein hoher ökologischer Preis bezahlt (siehe auch Artikel von A. Wüest S. 18 und M. Fette S. 21).

■ Die *Veräusserung und Privatisierung* von Quellen und Gewässern stellt eine neue Gefahr dar. Diese Gefahr wird in der Schweiz jedoch noch wenig beachtet, weil die meisten Gewässer und auch die Wasserversorgung in öffentlichen Händen liegen. Internationale Konzerne wie Nestlé, Coca Cola oder Danone sichern sich den Zugang zum Frischwasser und damit eine starke Position



Abb. 1: Spuren der Verwüstung nach einem Hochwasser.



W. Gerber, WSL

Abb. 2: Viele einstmals üppige Gebirgsflüsse führen heute nur noch geringe Restwassermengen, mit allen negativen Folgen.

am Markt. Über die Auswirkungen auf Natur und Landschaft kann nur spekuliert werden. ■ Nach inoffiziellen Quellen hat sich der Gebäudebestand in der Periode 1951–1991 in der Schweiz verdreifacht. Die *Siedlungen und Verkehrsinfrastrukturen* dringen zunehmend in den Einflussbereich der Flüsse vor. Der mangelnde Abstand wird bei Hochwasser in Form erheblicher Schäden deutlich (Abb. 1).

■ Nach wie vor ist die Belastung der Gewässer durch die Landwirtschaft ein Problem. Zudem ist erst seit kurzem bekannt, dass das in den Kläranlagen aufbereitete Wasser noch Spuren hormonaktiver so genannter endokriner Substanzen enthalten kann. Diese Stoffe wirken auch in kleinsten Konzentrationen auf das Hormonsystem von Tier und Mensch ein.

■ Auch wenn *Eindolungen* aufgrund der Schweizer Gesetzgebung kaum mehr möglich sind, darf dies nicht darüber hinweg täuschen, dass der jährliche Verlust an natürlichen Fliessgewässern in den letzten Jahrzehnten bei etwa 50 Fliesskilometern pro Jahr lag [3].

Genügt die Alpenkonvention?

Zum Schutz der Alpen wurde die Alpenkonvention 1991 von den Alpenstaaten Deutschland, Frankreich, Liechtenstein, Italien, Monaco, Österreich, Schweiz und Slowenien sowie der EU unterzeichnet. Die Rahmenkonvention, die den grundlegenden Schutzgedanken festhält, ist seit 1996 in Kraft. Beachtenswerterweise bezieht sie sich auf die Alpen als Ganzes als überaus vielfältigen, komplexen Lebensraum in 8 Staaten mit 8500 Gemeinden auf 190 000 km² und fast 14 Mio. Einwohnern [4, 5]. Ziel der Alpenkonvention und ihrer Protokolle (Tab. 1) ist die Verpflichtung der Konventionspartner, «unter Beachtung des Vorsorge-, Verursacher und Kooperationsprinzips» eine ganzheitliche Politik zur Er-

haltung und zum Schutz der Alpen unter umsichtiger und nachhaltiger Nutzung der Ressourcen zu garantieren.

Auch die alpinen Gewässer und ihre nachhaltige Nutzung sind in der Alpenkonvention enthalten. So wird in der *Rahmenkonvention* explizit gefordert, gesunde Wassersysteme zu erhalten oder wiederherzustellen. Im Fokus liegen Gewässerschutz, naturnaher Wasserbau und umweltverträgliche Wasserkraftnutzung. Daneben hebt die Präambel des Protokolls *Naturschutz und Landschaftspflege* die Bedeutung der Gewässer für die Erhaltung der Artenvielfalt hervor und auch das *Energieprotokoll* unterstreicht die elementare Rolle der Gewässer für die ökologische Vielfalt, die Trinkwasserversorgung und die Energiegewinnung.

Allerdings sind all diese Bestimmungen, vor allem im Hinblick auf eine griffige Umsetzung, nicht konkret genug. Es fehlt ein eigenständiges Gewässerprotokoll, das sowohl auf die spezifischen Funktionen und Bedürfnisse der Gewässer eingeht als auch deutlich die Gefahren benennt, die auf die Gewässer einwirken.

Erwartungen an ein Gewässerprotokoll

In der Schweiz ist man sich grundsätzlich einig, welche wichtigen Punkte ein Gewässerprotokoll enthalten sollte [1, 6–9]:

■ **Erhaltung der natürlichen Gewässer:** Die letzten Reste natürlicher Flüsse und Bäche müssen integral geschützt werden. Der spekulative Ausverkauf von Gewässern (Trinkwasser) muss verhindert werden.

■ **Ausreichender Raum für Fliessgewässer:** Grundvoraussetzung ist ein ausreichender Gewässerquerschnitt, damit Hochwasser ohne Schaden für die Umgebung abfliessen kann. Daneben muss genügend Raum für standortgerechte Ökosysteme und deren Vernetzung vorhanden sein. Nur dann wird sich auch eine natürliche aquatische, am-

phibische und terrestrische Strukturvielfalt einstellen. Den Erholungsbedürfnissen der Menschen ist Rechnung zu tragen. Zur Vermeidung von Gewässerverschmutzungen durch die Landwirtschaft sind ausreichend breite Pufferzonen einzurichten.

■ **Ausreichende Wasserführung:** Es muss eine Balance gefunden werden, damit einerseits genügend Wasser für die Erhaltung der aquatischen Lebensräume und des Landschaftsbildes vorhanden ist und andererseits der natürliche Abfluss und Geschiebehaushalt der Fliessgewässer durch eine genügend grosse Restwassermenge gewährleistet wird (Abb. 2).

■ **Ausreichende Wasserqualität:** Die Verschmutzung der Gewässer durch feste und flüssige Stoffe ist zu minimieren. Naturnahe Temperaturverhältnisse müssen garantiert werden.

Weil die Notwendigkeit eines Gewässerprotokolls bisher auf politischer Ebene kaum erkannt wurde, liegt hier ein grosser Handlungsbedarf vor. Denn nur, wenn eine politische Umsetzung dieser Forderungen gelingt, können die Alpengewässer ihre multifunktionalen Aufgaben auch in Zukunft erfüllen.



Mario F. Broggi, dipl. Forstingenieur (ETH), ist Direktor der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) sowie Privatdozent für angewandte Landschaftsökologie und Naturschutz an der Universität Wien und Dozent an der Universität Basel. 1983–1992 war er Präsident der CIPRA.

Protokoll	von der Schweiz unterzeichnet
Raumplanung und nachhaltige Entwicklung	16.10.1998
Naturschutz und Landschaftspflege	16.10.1998
Berglandwirtschaft	16.10.1998
Bergwald	16.10.1998
Bodenschutz	16.10.1998
Tourismus und Freizeit	16.10.1998
Energie	31.10.2000
Verkehr	31.10.2000
Streitbeilegung	31.10.2000
«Monacoprotokoll»	20.12.1994

Tab. 1: Die 10 Protokolle der Alpenkonvention [4].

- [1] BUWAL (2002): Grundlagenbericht zum Leitbild «Landschaft 2020». Noch unveröffentlichte Studie des BUWAL, Bern.
- [2] CIPRA (1999): http://deutsch.cipra.org/texte/publikationen/Info_52/Ci52_Blaues_Gold.htm
- [3] ARE und BUWAL (2001): *Landschaft unter Druck*. 2. Fortschreibung Februar 2001, 50 Seiten, EDMZ Bern.
- [4] CIPRA (2002): http://deutsch.cipra.org/texte/alpenkonvention/alpenkonvention_hauptseite.htm
- [5] Bätzing W. (2002): Die Bevölkerungsentwicklung der Alpen 1871–2000, Sonderbeilage zum CIPRA-Info Nr. 65.
- [6] Pro Natura (1998): Mehr Raum für unsere Fliessgewässer, ein Gewinn für Mensch und Natur. Beiträge zum Naturschutz in der Schweiz, pro natura Basel 19, 48 S.
- [7] BWG und BUWAL (2000): *Raum den Fliessgewässern!* Faltblatt, Bern.
- [8] BUWAL (2000): *Leitbild Fliessgewässer Schweiz*, interner Entwurf.
- [9] Rodewald R. (2001): Der Wasserschatz der Alpen im internationalen Kontext. Zusammenfassung des Referats, ANL-Fachtagung «Die Alpen – ein kostbares Wasserschloss», November 2001, Bad Reichenhall, unveröffentlicht.

Alpine Fliessgewässer: vielfältige und empfindliche Ökosysteme

Wer kennt sie nicht – plätschernde Bergbäche und tosende Gletscherflüsse, noch immer ein Inbegriff rauer Schönheit und unberührter Natur. Aber sind unsere alpinen Fliessgewässer wirklich so unberührt und intakt? Aufgrund der oft harschen Bedingungen und ihrer schweren Zugänglichkeit war bislang wenig bekannt über alpine Fliessgewässer und die dort lebenden Organismen. Ein umfassendes Forschungsprojekt an der EAWAG konnte zeigen, dass alpine Fliessgewässer unterschiedlichste Lebensräume umfassen und sich die Flora und Fauna auf verschiedenste Weise an die oft extremen Bedingungen angepasst hat. Kleinste Veränderungen durch anthropogene Eingriffe und Klimaerwärmung können diese sensiblen Ökosysteme unwiderruflich zerstören.

Alpine Fliessgewässer kommen weltweit vor – vom Pol bis in die Tropen [1]. Sie sind durch ihre Lage zwischen der Baumgrenze und der permanenten Schneelinie gekennzeichnet. In den europäischen Alpen entspricht dies in etwa der Zone zwischen 2000 und 3500 m ü.M. Alpine Fliessgewässer können auf kleinstem geografischen Raum unterschiedlichste Lebensräume umfassen, die meist durch spezifische Arten besiedelt sind. Alle alpinen Fliessgewässer sind jedoch auch durch eine Reihe von Gemeinsamkeiten gekennzeichnet [2]:

- Sie sind extremen Witterungen und klimatischen Bedingungen ausgesetzt. Dies führt z.B. zu generell sehr niedrigen Wassertemperaturen und einer hohen Sonneneinstrahlung.

- Die Wachstumsaison der Organismen ist aufgrund der meist langen und starken Winter extrem kurz und bei den meisten alpinen Fliessgewässern auf den Sommer beschränkt; bei Gletscherbächen hingegen liegen die günstigen Bedingungen im Frühjahr und Herbst, also in den kurzen Perioden zwischen winterlicher Schneebedeckung und sommerlicher Gletscherschmelze.

- Aufgrund der spärlichen Ufervegetation wird nur sehr wenig organisches Material in die Gewässer eingetragen, wodurch die Nahrungsgrundlage für viele Bachtiere begrenzt ist.

- Meist sind die Nährstoffkonzentrationen alpinen Fliessgewässer tief und limitieren das Algenwachstum.

- Alpine Regionen sind regelmässig natürlichen «Störungen» wie z.B. durch Hochwasser und Erdbeben ausgesetzt.

Von ruhigen Quellbächen und tosenden Gletscherflüssen

3 Haupttypen alpiner Fliessgewässer werden, basierend auf ihrem primären Ursprung, unterschieden: **kryale** Bäche werden auch als Gletscherbäche bezeichnet, weil sie vorwiegend durch Gletscherschmelzwasser gespeist werden; **krenale** Bäche sind Quellbäche, die vom Grundwasser abhängen; und **rithrale** Bäche werden hauptsächlich durch Regen und Schneeschmelzwasser gespeist [3]. Die Herkunft des Wassers beeinflusst massgeblich die jeweiligen Lebensraumbedingungen (Tab. 1).

Die Gletscher- und Schneeschmelze tritt während einer relativ kurzen Periode auf und

führt zu starken jahreszeitlichen Schwankungen vieler Umweltbedingungen. So steigt zum Beispiel der Abfluss des Gletscherbaches «Ova da Roseg» (Engadin, Schweiz) von ruhigen 0,2 m³/s auf tosende 30 m³/s während der sommerlichen Gletscherschmelze an. Dabei wird das bis dahin stabile Flussbett kräftig umgewälzt. Gleichzeitig führt der Bach die so genannte Gletschermilch. Mit dem Gletscherschmelzwasser werden Feststoffe aus dem Gletscher in den klaren Bach eingetragen und sorgen so für seine extrem trübe und milchige Farbe [4]. Rithrale Bäche sind weniger starken jahreszeitlichen Schwankungen ausgesetzt und somit etwas moderater in ihren Umweltbedingungen. Quellbäche hingegen weisen aufgrund ihrer gleichmässigen Zufuhr von Grundwasser relativ konstante und stabile Bedingungen auf [5].

Alpine Fliessgewässer: vielfältige Ökosysteme

Dass Bergbach nicht gleich Bergbach ist, sondern dass alpine Fliessgewässer eine viel höhere Heterogenität aufweisen als bisher angenommen, ist eine der wesentlichen Erkenntnisse unseres Forschungsprojekts. Das Auftreten eines Wasserfalls oder eines Sees, ob Fliessgewässer isoliert sind oder mit anderen in Verbindung stehen, die Hanglage und Exposition und viele weitere Faktoren bestimmen massgebend die Lebensraumbedingungen alpiner Fliessgewässer.

Gerinnetyp	Wasser- ursprung	Saisonalität	Gerinne- stabilität	Temperatur (°C)	Trübung
Hauptgerinne (H)	kryal	hoch	gering	0–4	hoch
Seeausfluss (A)	kryal	mittel-hoch	gering-mittel	0–9	hoch
Seitengerinne (S)	kryal	hoch-mittel	gering-mittel	0–4	hoch
Temporär vernetztes Gerinne (V)	kryal	hoch	mittel-gering	0–5	hoch-mittel
Gemischtes Gerinne (X)	kryal-krenal	hoch-mittel	mittel	0–5	mittel
Zufluss (Z)	kryal-rithral	gering	hoch	0–8	klar-mittel
Quellbach (Q)	krenal	gering	hoch	3–5	klar

Tab. 1: Gerinnetypen auf den ersten 11 Fliesskilometern des Roseg-Flusses (Engadin, CH) und wichtige Umweltbedingungen [2]. Siehe auch Abbildung 1.



R. Zalt, EAWAG

Abb. 1: Unterschiedliche Fließgewässertypen im Val Roseg: A = Seeausfluss, H = Hauptgerinne, Q = Quellbach, S = Seitengerinne, V = temporär vernetztes Gerinne, X = gemischtes Gerinne, Z = Zufluss.

Seeausflüsse zum Beispiel stellen die Übergangszone zwischen einem stehenden und einem fließenden Ökosystem dar. Der Lebensraum Seeausfluss wird daher wesentlich durch die beiden angrenzenden Ökosysteme beeinflusst und ist sowohl von typischen See- als auch Fließgewässerorganismen besiedelt [6]. Schwemmebenen hingegen umfassen eine Vielzahl unterschiedlichster Habitate, die je nach Abfluss miteinander verbunden oder isoliert sein können und abhängig von der Schnee- und Gletscherschmelze ständigen Veränderungen unterworfen sind. So ergaben unsere Untersuchungen, dass auf den ersten 11 Fließkilometern des Roseg-Flusses 7 verschiedene Gerinnetypen vorkommen (Abb. 1 und Tab. 1) [4]. Abhängig von den Abflussbedingungen im Jahresverlauf verändert sich die Vernetzung der einzelnen Gerinnetypen und damit sowohl die Gesamtlängslänge als auch die Herkunft des Wassers: Beträgt die Gesamtlänge der Gerinne im Winter nur etwa 5 km, so dehnt sie sich im Sommer auf mehr als 20 km aus. Ist das Fließgewässernetzwerk im Winter vor allem vom Grundwasser beeinflusst und

dadurch relativ einheitlich, wird es im Sommer überwiegend durch Gletscherschmelzwasser dominiert und weist eine viel größere Heterogenität auf [4].

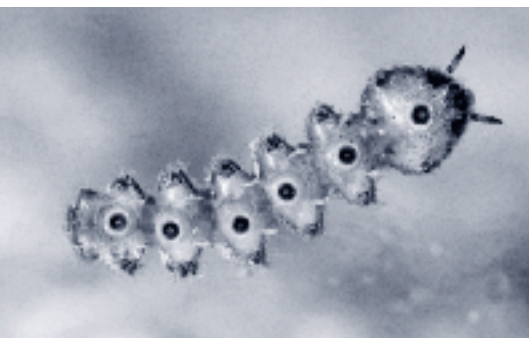
Leben an Extremstandorten

Wie gehen nun die aquatischen Organismen dieser unterschiedlichen Fließgewässertypen mit den kleinräumigen Unterschieden und teilweise extremen Umweltbedingungen um? Schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts stellte Steinmann [7] fest: *«Der Wildbach bietet seinen Bewohnern eine Heimat von so ausgeprägtem Charakter, dass sich dies in der Gestalt und Lebensweise der Bachtiere widerspiegeln muss.»* Nicht nur die Bachtiere, auch Algen und höhere Pflanzen haben unterschiedlichste Anpassungen an die speziellen Umweltbedingungen alpiner Fließgewässer entwickelt. Der Grossteil alpiner Fließgewässerorganismen ist benthisch, das heisst eng an das Substrat gebunden. Dies ermöglicht ihnen eine bessere Überlebenschance bei den oft hohen Fließgeschwindigkeiten. Weitere Anpassungen an den starken Abfluss sind z.B. die kräftigen Krallen vieler Steinfliegenlarven (Plecoptera), der dorsoventral abgeplattete Körper vieler Eintagsfliegenlarven (Ephemeroptera), bauchseitige Saugnäpfe der Lidmückenlarven (*Liponeura*, Blephariceridae) (Abb. 2), das Leben in selbstgebauten Köchern aus verschiedensten Materialien, z.B. Steinen (Köcherfliegenlarven, Trichoptera) oder das Ausbilden gelatinöser Krusten vieler Algen. Die Gemeinschaften der in Fließgewässern vorkommenden Algen und Wirbellosen werden meist von charakteristischen Kieselalgenfamilien und Insektenordnungen dominiert. Die Organismen der kryalen

Fließgewässer sind besonders extremen Lebensraumbedingungen und -schwankungen ausgesetzt, was zu einer weltweit sehr ähnlichen (kosmopolitisch) aber im Längsverlauf stark eingeschränkten (stenozonal) Artenzusammensetzung geführt hat. Dagegen sind die Bewohner rhithraler Flüsse eher moderat kosmopolitisch, dafür aber im Längsverlauf weiter verbreitet (euryzonal) [3]. Gletscherbach-Biozönosen sind zudem aufgrund der extremen Bedingungen im Vergleich zu rhithralen und krenalen Lebensgemeinschaften eher artenarm (Abb. 3). Der Einfluss eines vorgelagerten Sees wirkt je nach Herkunft des Wassers sehr unterschiedlich: so fanden sich mehr Arten in kryalen Seeausflüssen als in kryalen Bächen, jedoch weniger Arten in rhithralen Seeausflüssen als in rhithralen Bächen. Dabei unterscheiden sich die einzelnen Fließgewässertypen jedoch nicht nur in der Artenanzahl, sondern auch in der Zusammensetzung und Häufigkeit der unterschiedlichen Taxa. Kryale und rhithrale Bäche werden vorwiegend von Insekten dominiert, während in den eher stabilen und homogenen Quellbächen und rhithralen Seeausflüssen auch sehr viele Nicht-Insekten, wie zum Beispiel Borstenwürmer (Oligochaeta), benthische Ruderfuss- (Copepoda) und Muschelkrebse (Ostracoda) anzutreffen sind (Abb. 3).

Alpine Fließgewässer: empfindliche Ökosysteme

Wie reagieren alpine Fließgewässer auf anthropogene Eingriffe und Veränderungen des Klimas? Einige Auswirkungen anthropogener Eingriffe sind leicht sichtbar: Wasserfassungen legen teilweise ganze Flüsse trocken, Staudämme verändern das Abflussregime (siehe auch Artikel von A. Wüest S. 18 und M. Fette S. 21) und Hochwasserschutzmassnahmen zwingen die Bergbäche in ein undurchlässiges festes Bett. Dagegen sind die Auswirkungen der globalen Klimaerwärmung schwerer zu erfassen. Prognosen sagen nicht nur eine generelle Erwärmung der Oberflächentem-



A. Frutiger, EAWAG

Abb. 2: Die ventralen Saugnäpfe der Lidmückenlarve *Liponeura* ermöglichen ein Leben in starker Strömung.

peratur voraus, sondern auch eine Verschiebung der Niederschlagsmengen: künftig rechnet man mit vermehrtem Niederschlag im Winter und weniger Niederschlag im Sommer (siehe auch Artikel von B. Schädler S. 24). In den letzten 150 Jahren wurde weltweit ein kontinuierlicher Rückzug der Gletscher dokumentiert (Abb. 4), so dass extreme Prognosen vom völligen Verschwinden der Gletscher im Engadin in den nächsten 50 Jahren ausgehen [8].

Was bedeutet das für die Bewohner alpiner Fließgewässer? Ein Rückzug und Verschwinden der Gletscher zieht den Verlust dieser einzigartigen Umweltbedingungen nach sich – das Abflussregime verschiebt sich von einem glazial-nivalen (von Eis- und Schneeschmelze dominierten) zu einem nival-pluvialen (von Schneeschmelze und Regen dominierten) Typ, die Extremstandorte verschwinden und es kommt zu einer «Vereinheitlichung» der Lebensraumbedingungen. Dies wiederum erlaubt weiter flussabwärts angesiedelten Arten ebenso wie

Exoten, diese bis dahin unattraktiven Gebiete zu besiedeln und die ursprünglichen, angepassten Arten zu verdrängen. Spezifische Indikatororganismen sowie glaziale Arten werden verschwinden, denn es gibt für sie kein Entweichen in höhere, kältere Gebiete.

Ökologisches Fließgewässermanagement – ein Widerspruch?

Es liegt auf der Hand, dass ein nachhaltiger Umgang mit alpinen Fließgewässern nur möglich ist, wenn wir die Zusammenhänge zwischen Umweltbedingungen und Biota verstehen. Einerseits muss deshalb die Grundlagenforschung weiter vorangetrieben werden, damit wir diese Ökosysteme noch besser kennen lernen. Andererseits müssen aber auch angewandte Aspekte untersucht werden. So beschäftigt sich die EAWAG beispielsweise mit den folgenden Fragen: Wie stark muss der Abfluss in einer Restwasserstrecke unterhalb von Stau-

dämmen sein, um naturnahe Bedingungen zu bewahren [9]? Ist es möglich, durch künstliche Hochwässer eine natürliche Lebensgemeinschaft in solchen Restwasserstrecken zu erhalten [10]? Wie muss die Revitalisierung eines begradigten Fließgewässers aussehen, damit sich wieder eine natürliche Lebensgemeinschaft einstellt (siehe auch Artikel von M. Fette S. 21)? Diese und ähnliche Projekte lassen hoffen, dass wir auch zukünftig der Faszination alpiner Fließgewässer erliegen werden.



Mäggi Hieber, Biologin, hat kürzlich ihre Promotion über alpine Fließgewässer, insbesondere die Ökologie alpiner Seerausflüsse, in der Abteilung Limnologie der EAWAG abgeschlossen. Seither arbeitet sie als Projektleiterin beim Zentrum für angewandte Ökologie Schattweid.

Ko-Autoren: Peter Burgherr, Urs Uehlinger, Klement Tockner

- [1] Körner C. (1999): Alpine plant life. Springer-Verlag, Berlin, 338 p.
- [2] EAWAG (2002): Alpine Fließgewässer. EAWAG news 54d, 36 S.
- [3] Ward J.V. (1994): Ecology of alpine streams. Freshwater Biology 32, 277–294.
- [4] Tockner K., Malard F., Burgherr P., Robinson C.T., Uehlinger U., Zah R., Ward J.V. (1997): Characterization of channel types in a glacial floodplain ecosystem (Val Roseg, Switzerland). Archiv für Hydrobiologie 140, 433–463.
- [5] Klein B., Tockner K. (2000): Biodiversity in spring-brooks of a glacial flood plain (Val Roseg, Switzerland). Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie 27, 704–710.
- [6] Hieber M., Robinson C.T., Uehlinger U., Ward J.V. (2002): Are alpine lake outlets less harsh than other alpine streams? Archiv für Hydrobiologie 154, 199–223.
- [7] Steinmann, P. (1907): Die Tierwelt der Gebirgsbäche – eine faunistisch-biologische Studie. Annales de Biologie Lacustre 2, 30–162.
- [8] IPCC (2001): Climate Change 2001: Synthesis Report, 944 p.
- [9] Meier W., Reichert P. (2001): Modelle im Gewässerschutz. EAWAG news 51d, 13–15.
- [10] Robinson C.T., Uehlinger U., Monaghan M.T. (2002): Wie reagieren Fließgewässer auf künstliche Hochwasser? EAWAG news 54d, 27–29.

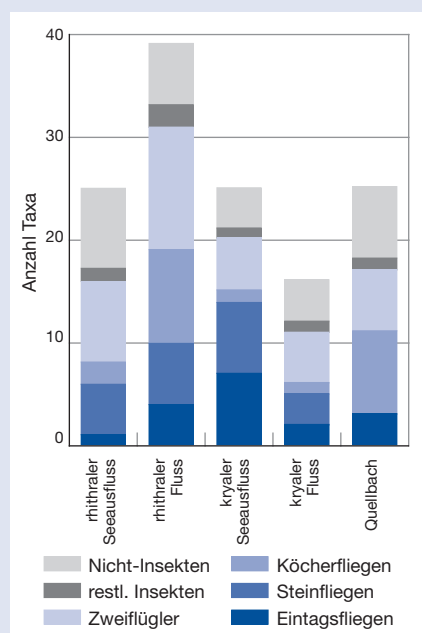


Abb. 3: Zusammensetzung der tierischen Lebensgemeinschaften in verschiedenen alpinen Fließgewässertypen.

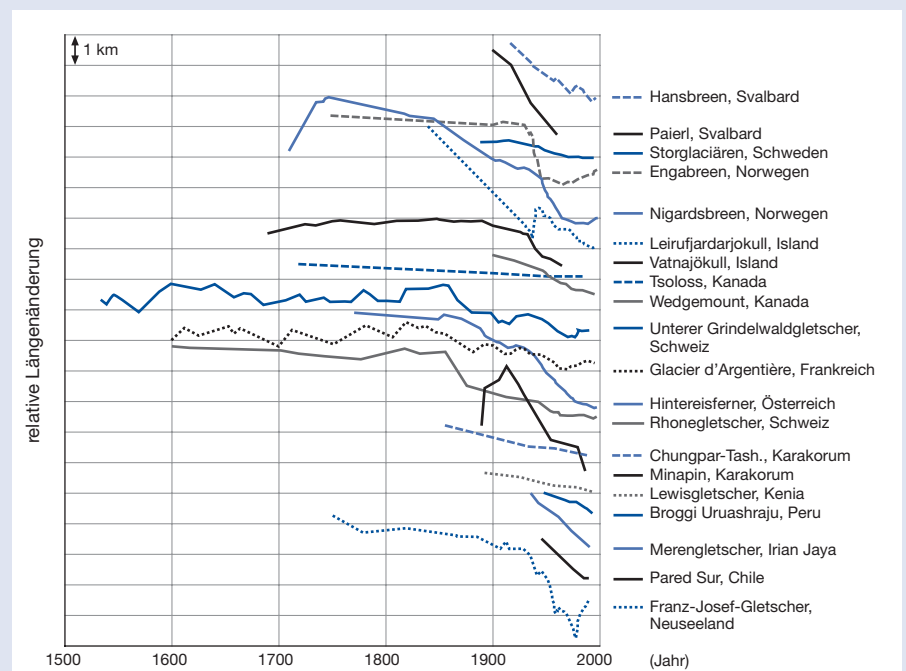


Abb. 4: Rückgang der Gletscher im Verlauf der letzten 500 Jahre. Verändert nach [8]. 1 Einheit = 1 km.

Alpine Seen: Extremökosysteme unter dem Druck globaler Veränderungen

Kälte und Nährstoffarmut, durchdringende UV-Strahlung oder monatelange Dunkelheit machen Hochgebirgsseen zu aussergewöhnlichen Lebensräumen. Die in ihnen lebenden Organismen müssen Künstler der Anpassung sein. Doch auch diese entlegenen Seen sind nicht mehr unberührt. Anthropogene Veränderungen überlagern die natürlichen Faktoren und beeinflussen das Ökosystem. Da Hochgebirgsseen besonders empfindlich auf diese Veränderungen reagieren, werden sie als Frühwarnsysteme eingesetzt. In welche Richtung die Veränderungen zukünftig gehen, ist aber noch weitgehend offen.

Alpine Seen sind Extremökosysteme und erscheinen auf den ersten Blick als lebensfeindlich. Sie sind gekennzeichnet durch sehr saure, alkalische, heisse oder kalte Bedingungen, durch das Einwirken von hohem Druck oder starker Strahlung (vor allem UV-Strahlung) oder durch einen hohen oder sehr niedrigen Salzgehalt. Oft sind alpine Seen von mehr als einer Extremsituation gleichzeitig betroffen oder im Lauf des Jahres findet ein rascher Wechsel der Extreme statt.

Hinzu kommt, dass alpine Seen in immer stärkerem Masse unter anthropogenen Einflüssen leiden. Hier spielt nicht nur die Klimaveränderung eine Rolle, sondern auch der Eintrag organischer Substanzen, die über die Atmosphäre in diese entlegenen Gebiete verfrachtet werden. Problematisch ist zudem, dass Organismen, die natürlicherweise in Hochgebirgsseen nicht vorkommen, durch den Menschen dort eingeschleppt oder bewusst eingesetzt werden.

Hochgebirgsseen reagieren besonders empfindlich auf Umweltveränderungen (siehe Kasten) und werden seit den 80er Jahren als Frühwarnsysteme bezeichnet.

Natürlich extrem...

Die Winterdecke eines alpinen Sees kann mehrere Meter dick werden und den See vollständig abdunkeln (Abb. 1). Im 10 m tiefen Gossenköllesee beispielsweise macht sie zur Zeit ihrer maximalen Ausdehnung etwa ein Drittel des gesamten Seevolumens aus [1]. Ohne Licht ist im See keine Photosynthese mehr möglich und der gesamte Wasserkörper entwickelt sich zu einem heterotrophen System, das über 6 bis 8 Monate komplett von der Aussenwelt abgeschnitten ist. Erst seit kurzem ist bekannt, dass sich während dieser Zeit in der Winterdecke eine eigene, überwiegend mikrobielle Lebensgemeinschaft entwickelt, die sowohl aquatische als auch terrestrische und atmosphärische Elemente enthält [2, 3].

Nach der langen Dunkelheit im Winter wechseln alpine Seen innerhalb kürzester Zeit zu strahlender Helle. Dies geschieht Ende Juni/Anfang Juli, wenn die Sonnenstrahlung die höchste Intensität aufweist und das Eis aufbricht. Je höher ein See liegt, desto stärker ist er der kurzwelligen UV-Strahlung (UVB, 280–320 nm Wellenlänge) ausgesetzt: In 3000 m Höhe ist die UVB-Strahlung um etwa 50 % höher als auf Meeresniveau. Hinzu kommt, dass die UVB-Strahlung seit 1970 durch Veränderungen in der Stratosphäre zusätzlich um ca. 10 % angestiegen ist.

Durch den Mangel an Huminsäuren und anderen gelösten organischen Substanzen dringt die UV-Strahlung in Hochgebirgs-

Die zentrale Hypothese

Der Zustand eines Sees hängt im wesentlichen von drei Faktoren ab, wobei es eine Hierarchie der Kräfte gibt: Faktor 1 wirkt auf Faktoren 2 und 3, Faktor 2 wirkt auf Faktor 3, Faktor 3 führt zur spezifischen Ausprägung der Eigenschaften des betreffenden Sees.

■ **Faktor 1: Das Klima und die atmosphärischen Depositionen...**
...bilden die räumlich-zeitlichen Gradienten treibender Kräfte.

■ **Faktor 2: Die Geologie, die Böden und die Vegetation des Einzugsgebietes...**
...bestimmen die Empfindlichkeit eines Sees gegenüber äusseren Einflüssen.

■ **Faktor 3: Die see-interne Dynamik (Organismen, Stoffkreisläufe)...**
...führt zu einer individuellen Antwort auf Belastungen.

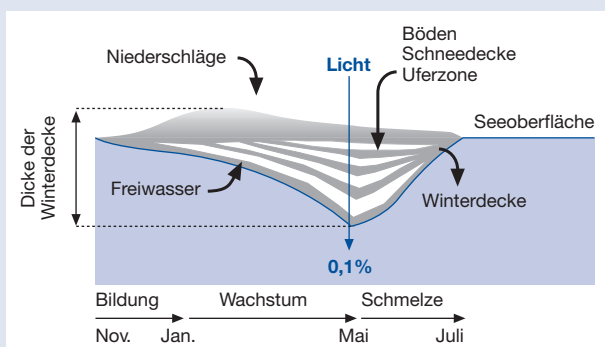


Abb. 1: Entstehung, Aufbau und Abschmelzen der Winterdecke alpiner Seen. Auf einer zentimeterdünnen Klareisschicht bildet sich eine meterdicke sandwichartige Struktur aus Schneematsch (weiss) und Trübeis (grau). Herkunft und Transport von Mikroorganismen sind mit Pfeilen gekennzeichnet. Verändert nach [3].



seen bis in Tiefen von 20 m vor (Abb. 2). Es gibt dadurch an sonnigen Tagen keinen Tiefenbereich, in dem ein Organismus vor UV-Strahlung geschützt wäre [4]. Eine Adaptationen an diese Extremsituation ist die Einlagerung so genannter mycosporin-ähnlicher Aminosäuren in Kleinkrebsen [5]. Diese Aminosäuren werden durch die Algen-nahrung aufgenommen und absorbieren die gefährliche UV-Strahlung im Bereich von 310–340 nm.

...aber nicht extrem natürlich

Die natürlichen Extrembedingungen werden zunehmend durch anthropogene Aktivitäten überlagert. Einer der massivsten menschlichen Eingriffe in natürliche Gewässer ist

das Einbringen von «alien species» [6]. So kommen in Hochgebirgsseen natürlicherweise keine Fische vor. Werden diese Seen trotzdem mit Fischen besetzt, kann es zur Ausrottung anderer Arten, z.B. seltener Daphnienarten, und im Extremfall zur Zerstörung des Ökosystems kommen. Ganz abgesehen davon, dass die Fische selbst an ein Leben in den meist nährstoff- und salzarmen Bergseen nicht angepasst sind [7]. Durch den Besatz mit Donau-Bachforellen hat kurioserweise eine interessante Unterart in zwei österreichischen Hochgebirgsseen überlebt. Diese Fische wurden vor mehr als 500 Jahren auf Initiative Kaiser Maximilians I ausgesetzt (Abb. 3).

Auch Zivilisationschemikalien wie polychlorierte Biphenyle (PCB) oder DDT und dessen Abbauprodukte machen nicht Halt vor alpinen Seen. Dabei spielt der Ort der Anwendung bzw. der Emission eine geringe Rolle, die Schadstoffe verteilen sich in der Atmosphäre um die ganze Erde [8]. Wo sie sich allerdings niederschlagen, ist abhängig von der Temperatur. So reichern sich leicht flüchtige Substanzen wie beispielsweise Hexachlorobenzen nur in den Polargebieten an, schwerer flüchtige Stoffe wie PCB-153, PCB-180 und DDT dagegen akkumulieren in den kalten Gebieten mittlerer Breiten, z.B. in den Hochlagen der Alpen. Fische aus alpinen Seen sind deshalb bis zu 1000-mal höher mit PCB (Abb. 4) und DDT belastet als Fische in tiefer gelegenen Seen [9].

Klimawärmung und ihre Folgen

Offen ist die Frage, ob und wie sich alpine Seen unter dem Einfluss der globalen Erwärmung verändern werden [10]. Der Schwarzsee (Abb. 5) zum Beispiel war um 1900 – damals war es in den Alpen um fast 2 °C kälter als heute – und auch während einer Kälteperiode um 1970 noch ganzjährig eisbedeckt. In seinem Einzugsgebiet, das sehr klein ist und nur auf knapp über 3000 m aufsteigt, lag bis in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts ein permanentes Schneefeld. Ausserdem gab es dort vermutlich

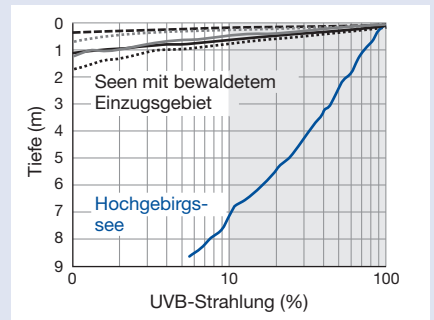


Abb. 2: Eindringtiefe von UVB-Strahlung (Wellenlänge = 305 nm) in Seen mit hohem und niedrigem Gehalt an gelöster organischer Substanz bzw. Huminsäuren. Verändert nach [4].

Permafrost. Seit 1985 jedoch trat eine starke Erwärmung ein, die dazu geführt hat, dass der Schwarzsee von Juli bis September eisfrei ist und die Schneefelder im Spätsommer gänzlich abschmelzen. Der See hat auf diese klimatischen Veränderungen dramatisch reagiert: Der pH-Wert stieg stark an, die Leitfähigkeit des Wassers und der Gehalt an gelöster Kieselsäure haben sich verdoppelt. Ausserdem ist der Schwarzsee wärmer und produktiver geworden – Eigenschaften, die der Niederschlagsversauerung entgegenwirken [11]. Damit hat die Klimaerwärmung einerseits zu einem Abbau von Extremen geführt. Andererseits nimmt je-



Abb. 3: Aus den Jagd- und Fischereibüchern Kaiser Maximilians I. Er liess um das Jahr 1500 viele Hochgebirgsseen Tirols mit Forellen und Saiblingen besetzen.

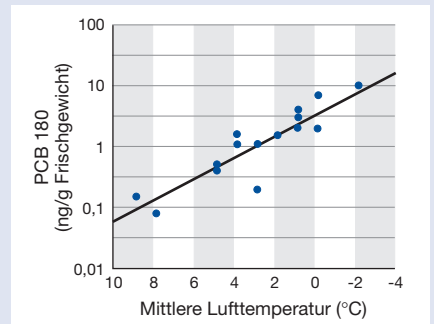


Abb. 4: Anreicherung von polychloriertem Biphenyl 180 (PCB-180) in Fischen aus verschiedenen europäischen Bergseen. Die mittleren Lufttemperaturen unterscheiden sich um etwa 10 °C, was zu einer etwa hundertfachen Anreicherung führt. Verändert nach [9].



R. Psenner, Universität Innsbruck

Abb. 5: Der Schwarzsee, der auf knapp 2800 m oberhalb Söldens in den Öztaler Alpen in Österreich liegt, war vor 100 Jahren noch ganzjährig eisbedeckt.

doch die UV-Strahlung unter Wasser durch die längere eisfreie Periode an Bedeutung zu, so dass die Bedingungen für die Organismen in dieser Hinsicht extremer wurden.

Hochgebirgsseen als Indikatoren

Fünf Eigenschaften machen Hochgebirgsseen zu idealen Indikatoren für globale Veränderungen:

Einheitlich: Abhängig von der Höhenlage finden wir alpine Seen in allen Breiten, vom Äquator bis zu den Polen; sie sind weltweit vergleichbar und sind sich in vielen Eigenschaften ähnlich.

Entlegen: Durch ihre Distanz von menschlichen Siedlungen und Tätigkeiten sind alpine Seen, wenn keine lokalen Eingriffe (Strassen, Pisten, Hütten etc.) vorliegen, geprägt von globalen Einflüssen wie Luftverschmutzung und Klimawandel.

Einfach: Hochgebirgsseen sind meist klein und nicht sehr tief, artenarm, haben einfache Nahrungsnetze und sind deshalb prinzipiell leichter zu verstehen als andere Ökosysteme.

Extrem: Physikalisch-chemische Bedingungen wie Temperatur, UV-Strahlung, Eisbedeckung und Nährstoffmangel sind extremer als in tiefer gelegenen Seen; selbst kleinere Veränderungen der treibenden Kräfte führen zu messbaren Reaktionen.

Empfindlich: Wegen ihrer extremen Bedingungen und ihrer unmittelbaren Reaktion sind Hochgebirgsseen durch globale Veränderungen extrem gefährdet.

Anthropogene Einflüsse auf ein Minimum beschränken

Obwohl die Zusammenhänge komplex sind und die Entwicklungen globaler Umweltbedingungen nicht mit Sicherheit voraussehbar sind, lassen sich einige unserer Erkenntnisse über alpine Seen in kurzen Sätzen zusammenfassen:

- Alpine Seen sind sowohl extrem als auch extrem empfindlich gegenüber bestimmten anthropogenen (und natürlichen!) Veränderungen. Einige dieser Einflüsse, wie z.B. Versauerung und Erwärmung, heben sich gegenseitig auf oder überlagern andere Entwicklungen fast vollständig.
- Die extremen Bedingungen haben zu interessanten Anpassungen bei Organis-

men geführt; einige leben jedoch am Limit ihrer Möglichkeiten.

■ Alpine Seen sind entlegen, jedoch nicht unberührt. Es gibt keine «natürlichen» Hochgebirgsseen im engeren Sinn, alle sind von globalen Veränderungen betroffen. Trotzdem gehören alpine Seen zu den letzten naturnahen Ökosystemen in einer vom Menschen gestalteten Welt.

■ Deshalb müssen alle menschlichen Einflüsse auf ein Minimum zurückgefahren werden: Das betrifft sowohl lokale («alien species», touristische Erschliessung) als auch globale Veränderungen (Emission von Schadstoffen und Treibhausgasen).

In den letzten 2 Jahrzehnten haben wir sehr viel über extreme Lebensräume, über alpine Seen und komplexe Wechselwirkungen gelernt – wir sollten auf weitere Überraschungen und Einsichten gefasst sein.



Roland Psenner ist Professor für Limnologie an der Universität Innsbruck. Er interessiert sich besonders für Hochgebirgsseen, die Auswirkungen globaler Veränderungen auf alpine Einzugsgebiete, biogeochemische Kreisläufe von Nähr- und Schadstoffen sowie die mikrobielle Ökologie von Wasser, Eis und Schnee.

- [1] Psenner R., Sattler B. (1998): Microbial communities: Life at the freezing point. *Science* 280, 2073–2074.
- [2] Felip M., Sattler B., Psenner R., Catalan J. (1995): Highly active microbial communities in the snow and ice cover of high mountain lakes. *Applied and Environmental Microbiology* 61, 2394–2401.
- [3] Felip M., Wille A., Sattler B., Psenner R. (2002): Microbial communities in the winter cover and the water column of an alpine lake: system connectivity and uncoupling. *Aquatic Microbial Ecology* 29, 123–134.
- [4] Sommaruga R., Psenner R. (1997): Ultraviolet radiation in a high mountain lake of the Austrian Alps: Air and under-water measurements. *Photochemistry & Photobiology* 65, 957–963.
- [5] Sommaruga R., Garcia-Pichel F. (1999): UV-absorbing mycosporine-like compounds in planktonic and benthic organisms from a high-mountain lake, *Archiv für Hydrobiologie* 144, 255–269.
- [6] Schindler D.W., Parker B.R. (2002): Biological pollutants: Alien fishes in mountain lakes. *Water, Air & Soil Pollution: Focus* 2, 379–397.
- [7] Hofer R. (1998): Fische in alpinen Hochgebirgsseen: Ökotoxikologische und ökophysiologische Aspekte. *Verhandlungen der Gesellschaft für Ichthyologie* 1, 59–73.
- [8] Carrera G., Fernandez P., Grimalt J.O., Ventura M., Camarero L., Catalan J., Nickus U., Thies H., Psenner R. (2002): Atmospheric deposition of organochlorine compounds to remote high mountain lakes of Europe. *Environmental Science & Technology* 36, 2581–2588.
- [9] Grimalt J.O., Fernandez P., Berdie L., Vilanova R., Catalan J., Psenner R., Hofer R., Appleby P.G., Rosseland B.O., Lien L., Massabuau J.C., Battarbee R.W. (2001): Selective trapping of organochlorine compounds in mountain lakes of temperate areas. *Environmental Science & Technology* 35, 2690–2697.
- [10] Psenner R., Schmidt R. (1992): Climate-driven pH control of remote alpine lakes and effects of acid deposition. *Nature* 356, 781–783.
- [11] Sommaruga-Wögrath S., Koinig K.A., Schmidt R., Sommaruga R., Tessadri R., Psenner R. (1997): Temperature effects on the acidity of remote alpine lakes. *Nature* 386, 64–67.

Archive in der Tiefe von Hochgebirgsseen

Wie sah es früher in den Alpen aus? Bereits vor mehr als 4000 Jahren haben Menschen die unwirtlichen Bergregionen der Schweizer Alpen besiedelt. Klimaverschlechterungen zwangen sie immer wieder, diese Gebiete zu verlassen. Doch sobald die Bedingungen besser wurden, kamen die Menschen zurück. Ablesen kann man das Auf und Ab der menschlichen Besiedlung an den Informationen, die in den Sedimenten von Bergseen gespeichert sind. Diese Archive erlauben es, anthropogene Einflüsse vor dem Hintergrund natürlicher Klimaveränderungen zu beurteilen.

Die Alpen werden allgemein als «das Wasserschloss Europas» bezeichnet. Die Erhaltung und nachhaltige Nutzung dieser Ressource ist eine der wichtigen Aufgaben der Konvention zum Schutz der Alpen (siehe auch Artikel von M. Broggi S. 7). Die Alpenkonvention geht davon aus, dass Hochgebirgsregionen noch weitgehend frei geblieben sind von anthropogenen Eingriffen. Ist das aber tatsächlich der Fall? Dieser Frage ist die EAWAG nachgegangen. Anhand von Sedimenten aus Hochgebirgsseen ist es möglich, die viele tausend Jahre alte Geschichte der Seen und ihrer Einzugsgebiete zu rekonstruieren. Wir wollten wissen, ob, seit wann und in welchem Ausmass sich die Bergregionen verändert haben und ob es möglich ist, anthropogene Einflüsse von natürlich verursachten Veränderungen zu unterscheiden.

Archive der Vorzeit im Hochgebirge?

Solange historische Quellen existieren oder instrumentelle Messreihen vorhanden sind, können diese Fragen direkt beantwortet werden. So lassen sich beispielsweise die Veränderungen der Landnutzung im Bergkanton Graubünden anhand der Daten der Schweizerischen Arealstatistik eindeutig belegen (Tab. 1).

Will man jedoch Veränderungen in früheren Zeitperioden bestimmen, wird die Sache schwieriger. Oft fehlen dann Datenreihen oder es gibt keine gesicherten historischen Quellen. In diesen Fällen sucht man nach indirekten Datenträgern, die als Umweltarchive herangezogen werden. Seesedi-

mente gehören heute zu den wichtigsten Archiven, die zur Rekonstruktion früherer Umweltbedingungen verwendet werden. Dabei können die in einem See und dessen Einzugsgebiet abgelaufenen geobiochemischen und physikalischen Prozesse mit hoher zeitlichen Auflösung (saisonal/jähr-

lich) und über sehr lange Zeiträume (10⁶ Jahre) bestimmt werden [1]. Hochgebirgsseen reagieren aufgrund ihrer ökologischen Randlage sensibler und rascher auf Umweltveränderungen als tiefer gelegene Seen. Daher wurden auch in den Schweizer Alpen eine ganze Reihe von Forschungsprojekten durchgeführt, die sich die in Bergseen vorhandenen Sedimentarchive zu Nutze machten [2–4].

Sägistalsee – ein Hochgebirgssee im Berner Oberland

Zu den bisher untersuchten Hochgebirgsseen gehört der Sägistalsee, der auf 1935 m ü.M. im Berner Oberland zwischen Grindelwald und dem Brienersee liegt (Abb. 1). Im Rahmen des interdisziplinären Forschungs-

	% Gesamtfäche (Stand 1992/1997)		% Veränderung (seit 1979/1985)	
	Kt. GR	CH	Kt. GR	CH
Wald	26,7	30,8	+3,9	+1,9
«unproduktive Flächen»	41,7	25,5	keine Angaben	
Landwirtschaft	29,8	36,9	–3,1	–3,1
Siedlungen	1,8	6,8	+12,9	+13,3

Tab. 1: Arealstatistik Kanton Graubünden (Kt.GR) und Gesamtschweiz (CH); Bundesamt für Statistik (2002).

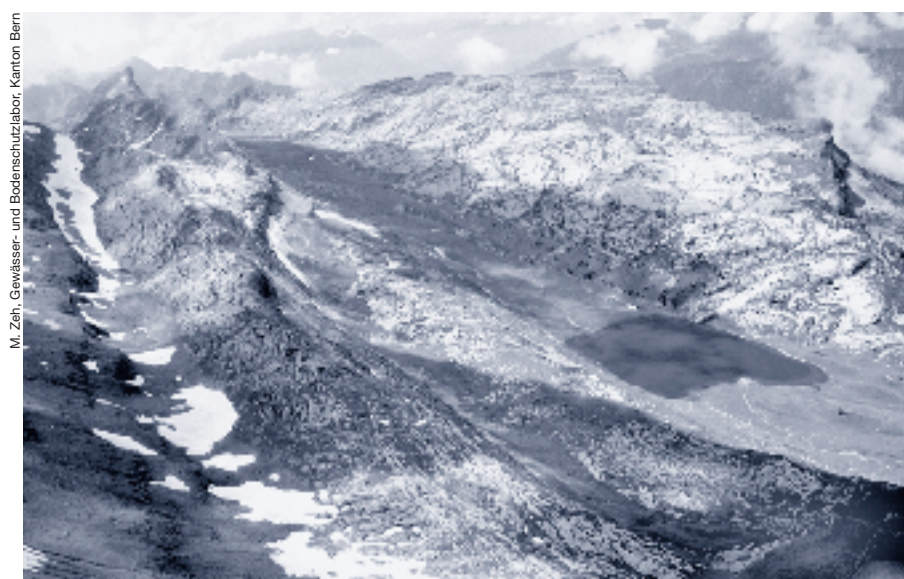


Abb. 1: Der Sägistalsee im Kanton Bern, Schweiz. Blick nach Westen. Deutlich sind die harten Felsrücken der Oberjura-Kalke und die eingetieften Mulden der Unterkreide-Mergel und -Schiefer erkennbar [5].

M. Zeh, Gewässer- und Bodenschutzlabor, Kanton Bern

Gemessener Indikator	Mass für frühere Umweltbedingung
organischer Kohlenstoff (C _{org})	biologische Produktivität im See
Calcit/Quarz-Verhältnis	Bodenbildung im Einzugsgebiet
mittlere Korngrössenverteilung	Gesteinserosion im Einzugsgebiet
Mangan/Eisen-Verhältnis (Mn/Fe)	Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser des Sees
benthisch lebende Zuckmückenlarven (Chironomiden)	Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser des Sees
Bäume, Sträucher, Weidepollen	Vegetation im Einzugsgebiet
Holzkohlereste	Waldbrände und menschliche Aktivitäten im Einzugsgebiet

Tab. 2: Die im Sediment des Sägistalsees bestimmten Umweltparameter als Indikatoren vergangener Gegebenheiten.

projekts AQUAREAL, das der Schweizerische Nationalfonds finanzierte, wurde 1996 ein 13,5 m langer Sedimentkern aus dem Sägistalsee entnommen. In diesem Kern ist die Geschichte der letzten 9000 Jahre, also nahezu des gesamten Holozäns, archiviert. Schicht für Schicht wurde dieser Kern auf verschiedene Parameter (Tab. 2) untersucht, um damit Rückschlüsse auf vergangene Umweltbedingungen und menschliche Aktivitäten zu ermöglichen.

Natürliche Umweltveränderungen

Die Klimaerwärmung nach dem Ende der letzten Eiszeit führte im Sägistalsee zu einer erhöhten Zufuhr von Nährstoffen aus dem Einzugsgebiet und verursachte bis vor etwa 6000 Jahren eine deutliche Zunahme der biologischen Produktivität im See (Abb. 2A). Im gleichen Zeitraum kam es zu vermehrter Bodenbildung (Abb. 2B) und zum Rückgang der Erosion (Abb. 2C). Im Tiefenwasser des Sees herrschten sauerstoffarme Verhältnisse

(Abb. 2D), welche nur wenigen Bodenbewohnern an der Wasser/Sedimentgrenze das Überleben ermöglichte (Abb. 2E). Während der folgenden 2000 Jahre, bis etwa 4000 Jahre vor heute, kam es zu einer Verdichtung des vorher lichten Föhren- und Fichtenwaldes durch die dann dominierende Tanne (Picea). Die Folgen waren eine zunehmende Stabilisierung des Waldbodens (Abb. 2B), eine bessere Versorgung des Tiefenwassers mit Sauerstoff (Abb. 2D) und damit eine Zunahme der Zuckmückenlarven (Chironomiden) im Sediment (Abb. 2E).

Der Mensch beginnt die Umwelt zu verändern

Anzeichen für eine Besiedlung durch den Menschen finden sich erstmals vor ca. 4000 Jahren. Damals rodeten die neolithisch-bronzezeitlichen Menschen den Wald und nutzten die frei gewordenen Flächen als Weideland. Diese Entwicklung wird verdeutlicht durch eine Zunahme von Graspollen (Abb. 2F), das Auftreten von Weideanzei-

gern (Abb. 2G) und die Häufung von Holzkohleresten (Abb. 2H). Im Tiefenwasser des Sees verschlechterten sich die Sauerstoffverhältnisse drastisch und die Bodenbewohner verschwanden nahezu vollständig (Abb. 2D + E).

Diese ersten Einflüsse des Menschen auf das Einzugsgebiet des Sägistalsees dauerten mehrere Jahrhunderte bis etwa 3500 Jahre vor heute. Weltweit kam es damals zu einer deutlichen Klimaverschlechterung [6]. Wie die Spuren im Sedimentarchiv des Sägistalsees zeigen, hatten auch die Menschen in den Alpen unter dieser Klimaverschlechterung zu leiden. Innerhalb von weniger als 100 Jahren verschwanden die Weideflächen im Einzugsgebiet des Sägistalsees (Abb. 2G), der Waldbestand nahm zu (Abb. 2F) und die Erosion im Einzugsgebiet verstärkte sich wieder (Abb. 2B + C). Im See selbst kam es durch die Klimaverschlechterung zu einem markanten Rückgang der biologischen Produktivität (Abb. 2A) und damit zu höheren Sauerstoff-

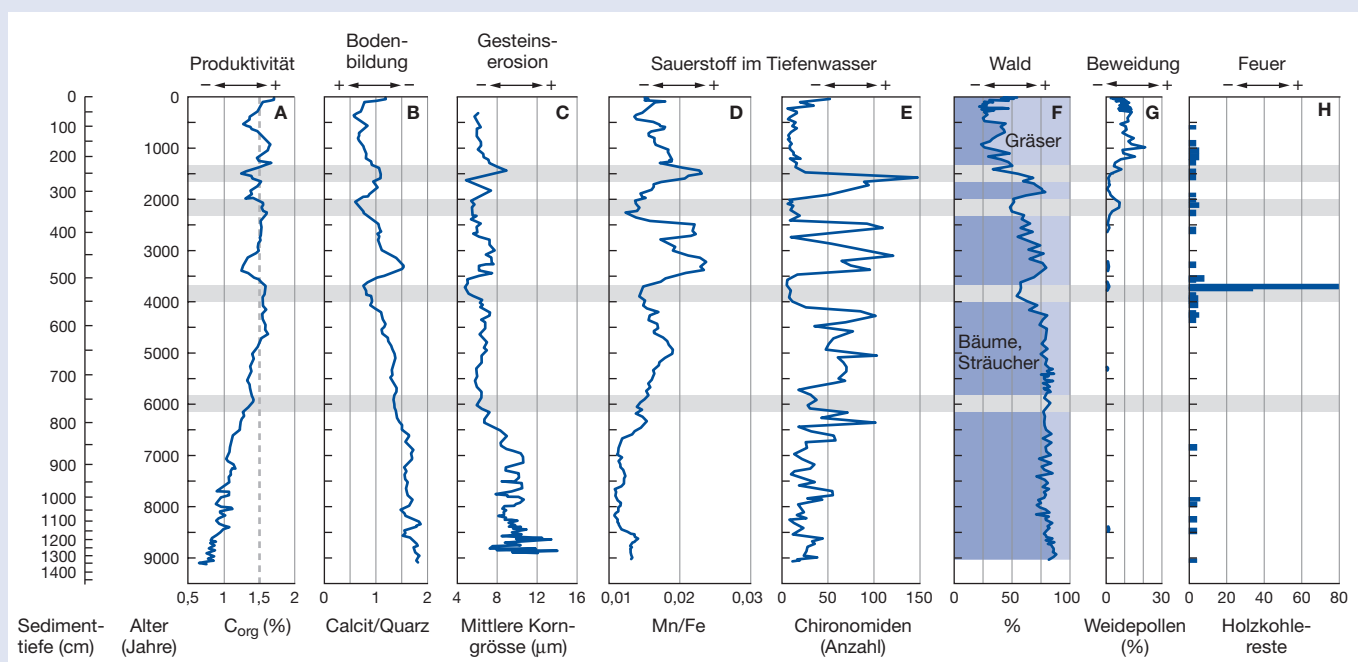


Abb. 2: Zeitlicher Verlauf verschiedener Umweltparameter (vgl. Tab. 2) während des Holozäns in einem Sedimentkern aus dem Sägistalsee [8–10]. Alter = kalibrierte ¹⁴C-Jahre vor heute. Graue Balken markieren Perioden mit deutlichen Veränderungen.

konzentrationen im Tiefenwasser und einer Zunahme der bodenbewohnenden Organismen (Abb. 2D + E)

Das Auf und Ab von Wiederbesiedlung und Wiederbewaldung

Im weiteren Verlauf des Holozäns werden anthropogene Signale in den Sedimenten des Sägistalsees immer häufiger und beginnen sich mit dem Klimasignal zu überdecken. Während der Eisenzeit vor etwa 3000 Jahren verbesserten sich die klimatischen Bedingungen wieder und führten zu einer bis heute anhaltenden anthropogenen Nutzung des Einzugsgebietes.

Bäume wurden abermals zugunsten des freien Graslandes abgeholzt (Abb. 2F) und die Alpweiden wurden insbesondere während der Römerzeit vor etwa 2000 Jahren intensiv genutzt (Abb. 2G). Das Tiefenwasser wurde wieder Sauerstoff- und Organismen-ärmer (Abb. 2D + E).

Im Frühmittelalter vor etwa 1500 Jahren erfolgte klimabedingt ein markanter Rückgang der anthropogenen Landnutzung. Die Waldflächen dehnten sich erneut aus (Abb. 2F), die Verfestigung der Böden nahm ab (Abb. 2B) und die deutlich größeren Korngrößen in den Seesedimenten (Abb. 2C) weisen auf erhöhte Erosion im Einzugsgebiet hin. Auf dem gut mit Sauerstoff versorgten Seeboden (Abb. 2D) entwickelten sich in dieser Zeit grosse Mengen von Chironomidenlarven (Abb. 2E).

Eine erneute Klimaverbesserung, die vor etwa 1200 Jahren im Hochmittelalter begann, führte wieder zu einer verstärkten landwirtschaftlichen Nutzung des Einzugsgebietes, die bis heute anhält und auch während der Kälteperiode der kleinen Eiszeit (Dauer: Mitte 13. bis Mitte 19. Jahrhundert) nicht unterbrochen wurde.

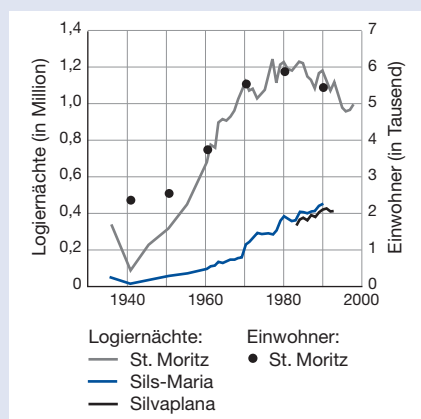


Abb. 3: Entwicklung der Bevölkerung in St. Moritz (Punkte) und der Logiernächte in St. Moritz (grau), Sils-Maria (dunkelblau) und Silvaplana (schwarz) während der letzten 60 Jahre. Quelle: Kur- und Verkehrsverein St. Moritz, Sils-Maria und Silvaplana.

Der Sägistalsee ist kein Einzelfall

Die Ergebnisse vom Sägistalsee zeigen, wie rasch und sensitiv Hochgebirgsseen auf kurzzeitige Klimaänderungen wie z.B. die Verschlechterung des Klimas vor 3500 Jahren reagieren. Gleichzeitig wird klar, dass die Besiedlung bzw. Nutzung selbst entlegener Hochgebirgsregionen durch den Menschen früher einsetzte als bisher angenommen, nämlich bereits vor etwa 4000 Jahren. Die menschlichen Aktivitäten veränderten den See und sein Einzugsgebiet nachhaltig. Sind diese Ergebnisse auf andere Bergregionen übertragbar?

Untersuchungen an Sedimentkernen aus den grossen Oberengadiner Seen haben ergeben, dass auch diese in ungefähr 1800 m ü.M. gelegenen Seen, ähnlich wie der Sägistalsee, sehr empfindlich auf klimatische Änderungen reagieren. Hier setzte die Besiedlung und Bodennutzung durch den Menschen ebenfalls sehr früh ein, vor ca. 4000 Jahren. Wieder lassen sich Abfolgen von Rodungen und Wiederbewaldung und Spuren von Beweidung in den Sedimentarchiven ablesen [7].

Sind Hochgebirgsregionen tatsächlich entlegen?

Die Annahme, dass entlegene Hochgebirgsregionen bzw. Bergseen von anthropogenen Veränderungen unbeeinflusst geblieben sind, kann gemäss unseren Ergebnissen nicht bestätigt werden. Obwohl Umweltveränderungen ursprünglich ausschliesslich auf natürliche Ursachen (Klima) zurückzuführen sind, ist der Einfluss des Menschen in alpinen Bergregionen schon seit etwa 4000 Jahren nachweisbar. «Entlegen» bedeutet daher für diese Gebiete nicht gleichzeitig auch «unberührt». Trotzdem wurden Hochgebirgsregionen in der Vergangenheit stets weniger intensiv genutzt als die dicht besiedelten Regionen im Unterland.

Heute jedoch werden Umweltveränderungen immer deutlicher durch den Menschen verursacht. Abbildung 3 verdeutlicht diese Tendenz. Innerhalb kürzester Zeit kam es in der Region um St. Moritz, einer ursprünglich «entlegenen» Bergregion, durch den Einfluss der Tourismusindustrie zur «Stadtentwicklung». Eine ähnliche Entwicklung ist in verschiedenen Gebieten der Alpen zu beobachten. Gerade weil Hochgebirgsregionen rasch und sensibel auf Umweltveränderungen reagieren, führt der stark erhöhte Nutzungsdruck (Verkehr, Anlage von Skipisten, Bau hydroelektrischer Anlagen, Aufschüttung neuer Landflächen etc.) zu weitaus dramatischeren Veränderungen, als dies durch natürliche Klimaänderungen ge-

schieht. Hochgebirgsregionen sind daher heute nicht nur durch die weltweite Klimaerwärmung, sondern vermehrt durch eine rasante Zunahme anthropogener Aktivitäten belastet. Der sorgfältige Umgang mit der sensiblen «Ressource Alpen», dem «Wasserschloss Europas», muss daher einen hohen Stellenwert in den Agenden der europäischen Staaten einnehmen.



Michael Sturm ist Geologe und Leiter der Fachgruppe «Sedimentologie» in der Abteilung «Oberflächengewässer/SURF». Innerhalb seiner Hauptarbeitsgebiete Paleolimnologie und Limnologie befasst er sich seit Jahren mit der Interpretation und Rekonstruktion von Umweltveränderungen, wie sie in Ablagerungen von Seen und Flüssen archiviert sind.

Koautoren: Thomas Kulbe, Christian Ohlendorf (jetzt Universität Bremen)

- [1] Sturm M., Lotter A.F. (1995): Seesedimente als Umweltarchive. EAWAG news 38d, 6–9.
- [2] Lotter A.F., Pienitz R., Schmidt R. (1999): Diatoms as indicators of environmental change near Arctic alpine treeline. In: Stoermer E.F., Smol J.P. (eds.) The Diatoms: Application for the Environmental and Earth Sciences. Cambridge University Press, 482 p.
- [3] Goudsmit G.-H., Lemcke G., Livingstone D.M., Lotter A.F., Müller B., Sturm M. (2000): Hagelseewli: a fascinating mountain lake – suitable for paleoclimate studies? Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie 27, 1013–1022.
- [4] Lanci L., Hirt A.M., Lotter A.F., Sturm M. (2001): A record of Holocene climate in the mineral magnetic record of Alpine lakes: Sägistalsee and Hinterburgsee. Earth and Planetary Science Letters 188, 29–44.
- [5] Guthruf J., Guthruf-Seiler K., Zeh M. (1999): Kleinsseen im Kanton Bern. Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft, Kanton Bern.
- [6] Wick L., Lemcke G., Sturm M. (2002): Evidence of Late-glacial and Holocene climatic change and human impact in eastern Anatolia: high-resolution pollen, charcoal, isotopic, and geochemical records from the laminated sediments of Lake Van, Turkey. Holocene, in press.
- [7] Gobet E., Hochuli P.A., Ariztegui D. (2001): Human impact on the vegetation of the Upper Engadine (Central Swiss Alps). Conf. Int. Assoc. Sedimentology, Davos.
- [8] Heiri O., Lotter A.F. (2002): 9000 years of chironomid population dynamics in an Alpine lake: long-term trends, sensitivity to disturbance and resilience of the fauna. Journal of Paleolimnology, in press.
- [9] Koinig K.A., Shotyk W., Lotter A.F., Ohlendorf C., Sturm M. (2002): 9000 years of geochemical evolution of lithogenic major and trace elements in alpine lake sediments – The role of climate, vegetation and land use history. Journal of Paleolimnology, in press.
- [10] Ohlendorf C., Sturm M., Hausmann S. (2002): Natural environmental changes and human impact reflected in sediments of a high alpine lake in Switzerland. Journal of Paleolimnology, in press.

Alpine Wasserkraftwerke und ihre «Fernwirkung» auf talwärts liegende Gewässer

Alpine Wasserkraftwerke beeinflussen neben den direkt betroffenen Gewässern auch weit entfernte, talwärts liegende Flüsse und Seen. Beispielsweise nimmt der Schwebstofftransport in Flüssen unterhalb von Stauseen ab, was letztlich Auswirkungen auf die Sauerstoffbedingungen in tiefer liegenden Seen hat. Neben Schwebstoffen werden auch Nährstoffe in den Stauseen zurückgehalten. So führte man den Zusammenbruch der Binnenlachspopulation im kanadischen Columbia River darauf zurück, dass nach dem Bau mehrerer Dämme die Nährstoffkonzentration in den unterliegenden Seen abnahm. Auch wird durch die Wasserkraftnutzung der Wärmehaushalt tiefer liegender Flüsse verändert.

Wasserkraft ist für unsere Wirtschaft und Gesellschaft von enormer Bedeutung. Mit 38 TWh pro Jahr produzieren die Schweizer Wasserkraftwerke 58% des inländischen Elektrizitätsaufkommens, wovon etwa 60% in den Alpen realisiert werden. In den letzten 50 Jahren wurden dafür über 130 Stauseen gebaut. Mit einem Gesamtvolumen von 4 km³ können sie etwa ein Viertel des jährlichen Abflusses aus allen alpinen Einzugsgebieten (Rhone, Ticino, Inn, Rhein, Reuss und Aare) zurückbehalten.

Export ökologischer Defizite ins Unterland

Solch intensive Nutzung ist jedoch nicht ohne ökologische Auswirkungen auf die betroffenen Gewässer (siehe Kasten). Neben den meist bekannten und eher lokalen Einflussfaktoren in den Alpen treten auch Effekte in entfernten, talwärts liegenden Flussabschnitten, Seen und Randmeeren auf [1]. Die weltweite Kritik an der Wasser-

kraft [2] verlangt deshalb auch eine differenziertere Einschätzung dieser oft wenig beachteten Beeinträchtigungen. Ziel dieses Beitrags ist, einige dieser gemeinsam mit dem Strom ins Unterland exportierten ökologischen Defizite aufzuzeigen (siehe auch Artikel von M. Fette S. 21).

Stauseen als Partikelfallen

Seit dem Bau der etwa 50 Talsperren im Einzugsgebiet der Rhone hat sich der jährliche Schwebstoffeintrag in den Genfersee um fast 50% auf ca. 1,5 Mio. Tonnen verringert [3]. Da der grosse Strombedarf hauptsächlich im Winter auftritt, wird das Wasser in den Stauseen meist länger als ein halbes Jahr gespeichert, bevor es turbinert wird. In dieser Zeit lagert sich ein Grossteil der im Wasser vorhandenen Schwebstoffe in den Stauseen ab. Als weitere Folge der Stauseen ging auch die Hochwasserhäufigkeit in der Rhone deutlich zurück. Lag der Abfluss vor dem Bau der Stauseen jährlich an

ca. 23 Tagen über 500 m³/s, ist dies heute nur noch an etwa 5 Tagen der Fall [3].

Die verringerte Schwebstofffracht und die reduzierte Hochwasserhäufigkeit verändern die Hydraulik der meisten tiefer liegenden Schweizer Voralpenseen. Der Grund liegt darin, dass die Dichte von Flusswasser, neben der Temperatur und den gelösten Stoffen, vor allem von der Schwebstoffkonzentration abhängt. Ist die Schwebstoffkonzentration grösser als ca. 0,5 g/l (Tab. 1),

Einflussfaktoren von Stauseen auf tiefer liegende Gewässer im globalen Kontext [2]

Veränderungen in *kursiver Schrift* sind bei alpiner hydroelektrischer Nutzung von Bedeutung.

Hydrologie:

Saisonale Verschiebung der Abflussganglinie, Rückgang der Hochwasserhäufigkeit, Schwall und Sunk, Restwasser, Modifikation des Grundwasserniveaus, Änderung der internen Hydraulik in voralpinen Seen, Wasserverlust.

Flussmorphologie und Feststoffhaushalt: *Schwebstoffrückhalt, zeitliche Verschiebung der Trübung sowie des Partikel- und Nährstofftransports, Kolmation, Stagnation der Morphodynamik, Erosion, Delta- und Küstenrückzug.*

Geochemische Kreisläufe:

Primärproduktion, Modifikation der Wasserqualität, Selbstreinigung und Nährstoffrückhalt in den Reservoiren, anoxische Reservoirabflüsse, Freisetzung von reduzierten Substanzen und Metallen, Methanfreisetzung.

Fluss- und Auenökologie:

Verschiebung der Artenzusammensetzung, Unterbruch der Durchlässigkeit, Verlust von überschwemmten Feuchtgebieten, Auen und Fluss-Land Übergangsbereiche, neue Feuchtgebiete im Stauwurzelsbereich.

Fischökologie:

Behinderung der Migration und Fragmentierung der Populationen, Verschiebung von «Fluss»- zu «See»-Arten, Überflutung der Laichgründe, Verschiebung des Wärmehaushalts, Abnahme der Lebensqualität in den Restwasser- und Schwall-Sunk-Strecken, Gasblasenkrankheit, anoxische Reservoirabflüsse.

See/Fluss/Messstation	Jährliche Schwebstofffracht ¹ (Mio.t/Jahr)	Mittlerer Schwebstoffgehalt im Sommer ² (g/l)
Bodensee (Rhein, Diepoldsau)	3,6	0,91
Genfersee (Rhone, Porte du Scex)	1,9	0,52
Brienzersee (Lütschine, Gsteig)	0,16	0,39
Walensee (Linth, Mollis)	0,11	0,18
Brienzersee (Aare, Brienzwiler)	0,11	0,14
Langensee (Ticino, Bellinzona)	0,47	0,12
Urnersee (Reuss, Seedorf)	0,05	0,047

¹ Jahresmittel von 1979 bis 1993 [LHG, Bern] (Schwebstoffe im 14-tägigen Rhythmus).

² Frachtgemittelte Schwebstoffkonzentration im Sommer (Juni bis August).

Tab. 1: Schwebstoffeintrag in die Voralpenseen der Schweiz (Daten: BWG/LHG, Bern)

wird das Zuflusswasser schwerer als das Seewasser und taucht in die Tiefe ab. Dies ist vor allem bei gewitterbedingten Hochwassern mit erhöhter Schwebstofffracht der Fall. Die Folge ist eine Erhöhung des Sauerstoffgehalts im Tiefenwasser.

Dies geschieht einerseits direkt, weil das abtauchende Flusswasser grosse Mengen Sauerstoff in das Tiefenwasser der Seen verfrachtet. In einem Gutachten der EAWAG [4] wurde gezeigt, dass im Juli 1994 durch mehrere solcher Ströme von dichterem Flusswasser etwa 4000 Tonnen Sauerstoff ins Tiefenwasser des Brienzersees eingetragen wurden (Abb. 1A). Dabei kam es vor allem im tiefsten Bereich zu einer drastischen Erhöhung des Sauerstoffgehalts (Abb. 1B). (Zum Vergleich: In die künstlich belüfteten Mittellandseen werden pro Sommer weniger als 500 Tonnen Sauerstoff eingebracht.)

Andererseits ist das dichtere Flusswasser wärmer als das tiefe Seewasser und es kommt mit jedem Eintrag zu einer leichten Erwärmung des Tiefenwassers (Abb. 1C). Über Jahre hinweg steigt die Temperatur des Tiefenwassers kontinuierlich an – beispielsweise im Genfersee um bis zu 1,5 °C [5]. In der Folge wird die Dichteschichtung im Tiefenwasser schwächer, was den See auf eine wirksame, tiefgreifende Durchmischung vorbereitet. Eine solche vollständige Durchmischung findet sporadisch etwa alle 5–10 Jahre statt und bringt ebenfalls sauerstoffhaltiges Wasser in die tiefsten Bereiche des Sees.

Kurzfristige partikelbeladene Hochwasserspitzen erfüllen deshalb in allen grossen Voralpenseen der Schweiz (Tab. 1) eine wichtige ökologische Funktion. Der direkte und indirekte O₂-Nachschub trugen in der Vergangenheit wesentlich dazu bei, dass diese Seen (mit Ausnahme des Luganersees) auch in Zeiten starker Nährstoffbelastung immer verhältnismässig gute Sauerstoffbedingungen aufwiesen. Je seltener abtauchende Ströme von dichterem Flusswasser auftreten, desto ungünstiger entwickeln sich die Sauerstoffverhältnisse im

Tiefenwasser. Aus seeökologischer Sicht ist daher eine weitere Abnahme partikelbeladener Hochwasserspitzen unerwünscht.

Stauseen als Nährstofffallen

Mit den Schwebstoffen werden auch Nährstoffe in den Stauseen zurückgehalten. Während diese Wirkung in unseren überdüngten Schweizer Einzugsgebieten einen positiven Nebeneffekt darstellt, kann es in nährstoffarmen Regionen zu negativen Veränderungen der aquatischen Fauna und Flora kommen. Dieser Umstand wurde ins Bewusstsein gerufen, als Ende der 80er Jahre die Population des einzigartigen Binnenlaches «Kokanee» im Kootenay Lake und in den Arrow Lakes (Britisch-Kolumbien, Kanada) in beunruhigender Weise zusammenbrach (Abb. 2). Diese Seen liegen am Kootenay bzw. Columbia River, welche je durch zwei grosse Dämme aufgestaut wurden. Seit dem Bau dieser Stauseen gelangen jährlich ca. 50 t Phosphor weniger in die beiden Seen [6].

Mangels anderer überzeugender Argumente wurde der Nährstoffrückhalt durch die Stauseen als wahrscheinlichste Ursache der «Kokanee-Krise» identifiziert. Deshalb werden der Kootenay Lake seit 1992 und die Arrow Lakes seit 1999 jährlich mit ca. 50 t Phosphor und 200 t Stickstoff gedüngt (siehe Foto S. 20). Ob die in wissenschaftlichen Kreisen kontrovers diskutierte Notmassnahme – es wurde der totale Verlust des Binnenlaches befürchtet – wirksam war, kann noch nicht abschliessend bewertet werden. Jedoch stabilisierte sich die Zahl der geschlechtsreifen Binnenlache erfreulicherweise wieder auf früherem Niveau (Abb. 2) [6]. Daneben untersuchte die EAWAG, ob auch andere Faktoren zum Zusammenbruch der Kokanee-Population beitragen konnten [7]. Es zeigte sich, dass das zusätzliche Aufstauen der Arrow Lakes und insbesondere die Tiefe des Wasserauslasses, tatsächlich kritisch auf das Auswaschen der Biomasse wirken.

Gelöste Nährstoffe werden unter entsprechenden Voraussetzungen in Stauseen

auch selektiv zurückgehalten. Bei genügend langer Aufenthaltszeit können Kieselalgen den Nährstoff Kieselsäure weitgehend aus dem Wasser entfernen [8]. Flüsse aus den Bergen Nordschwedens beispielsweise, deren Wasser aus Stauseen stammt, transportieren bis zu 60 % weniger Kieselsäure ins Baltische Meer, als dies bei Flüssen aus unverbauten Einzugsgebieten der Fall ist [9]. Es wird deshalb befürchtet, dass die Kieselalgen im Baltischen Meer zunehmend

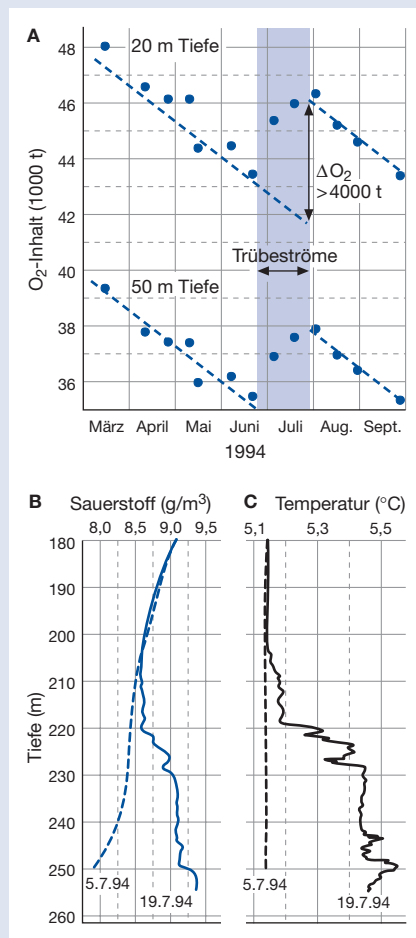


Abb. 1: Sauerstoffhaushalt im Tiefenwasser des Brienzersees im Sommer 1994: Mehrere gewitterbedingte warme und partikelbeladene Dichteströme aus der Aare und Lütchine transportierten im Juli während weniger Stunden ca. 4000 Tonnen Sauerstoff ins Tiefenwasser (A). Der Eintrag von Sauerstoff (B) und Wärme (C) erfolgte zwischen dem 5. und 19. Juli vorwiegend in den tiefsten 50 m.

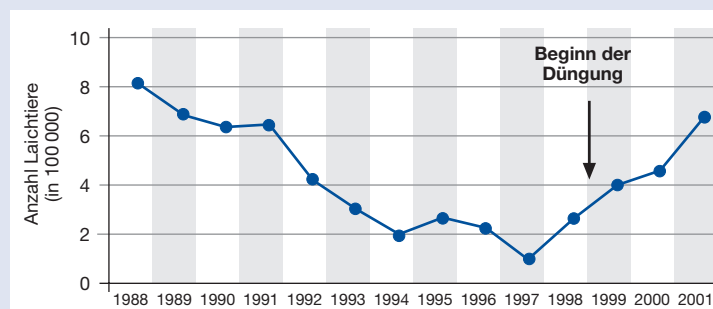


Abb. 2: Zusammenbruch und Erholung der Population des Binnenlaches Kokanee in den Arrow Lakes [6].



K. Ashley, Kanada

Floss mit Nährstofftanks auf dem Kootenay Lake, der seit 1992 jährlich mit über 50 t Phosphor gedüngt wird [6].

durch unerwünschte Arten verdrängt werden und sich dadurch die Zusammensetzung der Zooplankton- und Fischgemeinschaft verschiebt. Ein ähnlicher Effekt im System «Donau/Schwarzes Meer» wird zurzeit im Rahmen eines Projektes am Staudamm des «Eisernen Tors» von der EAWAG untersucht.

Stauseen als Modulatoren der Flusstemperatur

Die Wasserkraftnutzung verändert neben dem Partikel- und Nährstoffhaushalt auch den Wärmehaushalt der tiefer liegenden Gewässer: Beim Turbinieren wird potenzielle Energie in Strom umgewandelt, die unter natürlichen Abflussbedingungen das Flusswasser via Reibung erwärmen würde. Dies führt zu einer Abkühlung des Flusses bei der Wasserrückgabe. Für die gesamten Schweizer Alpen ergibt sich eine mittlere Temperaturreduktion von 1,1 °C in den sonst schon kühlen alpinen Flüssen – wobei der Effekt in der Rhone mit 1,6 °C am grössten ist.

Im jahreszeitlichen und täglichen Verlauf greift diese Abschätzung jedoch zu kurz,

da verschiedene indirekte Einflüsse zum Tragen kommen. Über die Oberfläche der Stauseen (im Rhoneeinzugsgebiet sind es etwa 14 km²) wird im Sommer eine enorme Wärmemenge gespeichert und teilweise auf den Winter übertragen. Das turbinierete Wasser, welches vom Grund der drei grossen Stauseen stammt, weisst deshalb ganzjährig eine ausgeglichene Temperatur zwischen 4 und 5 °C auf. Im Winter erwärmt das temperierte Stauseewasser die wenig Wasser führende Rhone bei der Rückgabe typischerweise um 0,5 °C. Im Sommer vermindert der Stauseerückhalt den Abfluss und trägt somit, vor allem in den Restwasserstrecken, zur Erwärmung bei. Bei der Rückgabe des kälteren Stauseewassers wird die Rhone anschliessend abrupt gekühlt, wobei die Temperatursprünge mehrere °C betragen können (Abb. 3A + B). Mit der zurzeit im Rahmen des Revitalisierungsprojektes Rhone/Thur (siehe auch Artikel von M. Fette S. 21) durchgeführten Untersuchung soll die Wirkung der hydroelektrischen Nutzung auf das thermische Regime und die Konsequenzen für die Lebewesen der Rhone aufgezeigt werden.

Aktuelle Schweizer Probleme

Seit den 80er Jahren warnen die Fischer des voralpinen Brienzersees vor potenziellen ökologischen Veränderungen durch die hydroelektrische Nutzung im Grimselgebiet. In der Folge wurde die mögliche Beeinflussung der Trübung, welche wegen der Stauseen einen veränderten saisonalen Verlauf aufweist, in mehreren Beratungsstudien von der EAWAG untersucht [4]. Als es im Jahr 1999 zu einem massiven Einbruch der Fischerträge und der Daphnienpopulation im Brienzersee kam, entschied sich der Kanton Bern, die ökologische Funktion des Brienzersees und deren mögliche Veränderungen genauer zu analysieren. Es wurden neun Hypothesen formuliert, die in den

nächsten Jahren in diversen Forschungsprojekten überprüft werden sollen. Die EAWAG wird sich sowohl in einer begleitenden Expertengruppe als auch durch einzelne Forschungsarbeiten (Fische, biologische Produktion, Partikelschichtung etc.) an diesem Projekt beteiligen. Zu belegen, welche der diversen Einflussfaktoren die entscheidende «Fernwirkung» auf den Brienzersee hat, stellt eine grosse und weitreichende Herausforderung dar.



Alfred Wüest, Physiker und Leiter der Abteilung «Angewandte Gewässerökologie». Titularprofessor für Aquatische Physik an der ETH Zürich. Forschungsgebiet: Mischungs- und Transportprozesse in Seen und Reservoirs, Einfluss der menschlichen Nutzung auf Stoffkreisläufe in Gewässern.

Koautoren:
Lorenz Moosmann, Gabriela Friedl

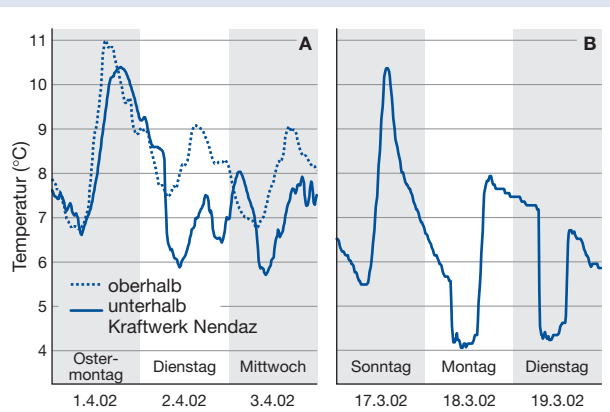


Abb. 3: (A) Temperaturverlauf in der Rhone oberhalb (punktierter Linie) und unterhalb des Kraftwerks Nendaz (Linie) vom 1.–3. April 2002. Während am Ostermontag (ohne Kraftwerksbetrieb) die Temperatur mittags über 10 °C anstieg, senkte das kalte Wasser der Grande Dixence werktags die Temperatur zur gleichen Tageszeit unter 6 °C. (B) Temperaturverlauf in der Lötchen (Zufluss zur Rhone) unterhalb des Kraftwerks Lötchen am 17.–19. März 2002. Aus den gleichen Gründen variierte die Temperatur von Sonntag bis Montag mehr als 6 °C.

- [1] Friedl G., Wüest A. (2002): Disrupting biogeochemical cycles – consequences of damming. *Aquatic Sciences* 64, 55–65.
- [2] World Commission of Dams (2000): Dams and development – a new framework for decision-making. Earthscan Publications Ltd, London and Sterling VA, USA and World Commission of Dams, Cape Town, www.dams.org.
- [3] Loizeau J.-L., Dominik J. (2000): Evolution of the Upper Rhone River discharge and suspended sediment load during the last 80 years and some implications for Lake Geneva. *Aquatic Sciences* 62, 54–67.
- [4] Sturm M., Siegenthaler C., Suter H.P., Wüest A. (1996): Das Verhalten von Schwebstoffen im Brienzersee (Untersuchungsergebnisse der Jahre 1994–1995). EAWAG Auftrag Nr. 84 109, 102 S.
- [5] Livingstone D.M. (1993): Temporal structure in the deep-water temperature of four Swiss lakes: a short-term climatic change indicator? *Verhandlungen der internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 25, 75–81.
- [6] Ashley K., Thompson L.C., Sebastian D., Lasenby D.C., Smokorowski K.E., Andrusak H., (1999): Restoration of kokanee salmon in Kootenay Lake, a large intermountain lake, by controlled seasonal additions of nutrients. In: Murphy T., Munawar M. (eds.) *Aquatic Restoration in Canada. Ecovision World Monograph Series*, Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands, p. 127–170.
- [7] Matzinger A., Wüest A. (2001): The effect of cascading on nutrient pathways and productivity in dams – towards a sensitivity analysis, *Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics*, ISEH, Tempe, Arizona, USA.
- [8] Humborg C., Conley D.J., Rahm L., Wulff F., Cociasu A., Ittekkott V. (2000): Silicon retention in river basins: far-reaching effects on biogeochemistry and aquatic food webs in coastal marine environments. *Ambio* 29, 44–49.
- [9] Conley D.J., Stalnacke P., Pitkanen H., Wilander A. (2000): The transport and retention of dissolved silicate by rivers in Sweden and Finland. *Limnology and Oceanography* 45, 1850–1853.

Dritte Rhonekorrektur: Revitalisierung trotz Kraftwerksbetrieb?

Im Gegensatz zu den vergangenen Rhonekorrekturen will die anstehende 3. Korrektur dem Fluss wieder mehr Raum geben. Geplant sind Flussaufweitungen, die neben dem Hochwasserschutz die ökologische Funktionsfähigkeit der Rhone verbessern sollen. Allerdings ist die Ausgangssituation heute weitaus komplexer: In den letzten 50 Jahren sind mehrere Wasserkraftanlagen im alpinen Einzugsgebiet der Rhone gebaut worden, die für starke periodische Wasserstandsschwankungen in der Rhone verantwortlich sind. Die EAWAG untersucht derzeit, wie sich die geplanten Flussaufweitungen – und die fortwährenden Wasserstandsschwankungen – auf das Niveau des Grundwassers auswirken und ob sich unter diesen Bedingungen überhaupt eine natürliche Fauna einstellen kann.

«On se représente sans peine l'attitude des hommes devant le fleuve: ses grandes crues assez fréquentes devaient leur donner l'impression que le Rhône est une force contre laquelle l'homme ne peut rien.» Jahrhundertlang fühlten sich die Menschen im Rhonetal machtlos gegenüber den gewaltigen Hochwassern, die die Menschen gefährdeten und grosse Schäden verursachten [1]. Nach dem dramatischen Hochwasser von 1860 fiel die Entscheidung für eine «harte» Verbauung des Flusses, die in der ersten (1863–1928) und zweiten (1930–1960) Rhonekorrektur umgesetzt wurde. Die Hochwasser der letzten Jahre machten jedoch erneute Mängel deutlich, die zur 3. Korrektur der Rhone führen werden.

Die dritte Rhonekorrektur

Zu Zeiten der ersten und zweiten Rhonekorrektur stand noch der «harte» Hochwasserschutz im Vordergrund. Heute ist das zentrale Anliegen beim Umgang mit Fließgewässern eine ganzheitliche Planung, die neben den wirtschaftlichen, sozialen und politischen Aspekten auch die ökologischen Werte einbezieht [2]. Zu den Zielen der dritten Rhonekorrektur gehören daher neben dem Hochwasserschutz auch Massnahmen zur Verbesserung der ökologischen Funktionsfähigkeit des Flusses. Die Renaturierung, d.h. die «Rückführung des Gewässers in einen natürlichen oder zumindest naturnahen Zustand» [3], wird trotzdem eine Wunschvorstellung bleiben. Vielmehr sieht

die 3. Rhonekorrektur die Revitalisierung ausgewählter Flussabschnitte vor, wobei z.B. Flussaufweitungen dem Fluss mehr Freiheiten für seine ökologische Funktion geben sollen.

Wasserkraftnutzung bringt weitere Probleme

Das Wallis ist aufgrund seiner topografischen Verhältnisse für den Betrieb von Wasserkraftanlagen sehr geeignet. Im vergangenen Jahrhundert wurden mehrere eindrucksvolle Anlagen gebaut, darunter auch die grösste hydroelektrische Anlage der Schweiz: Cleuson-Dixence, deren Gesamtleistung der eines Atomkraftwerks entspricht. Die Anlagen produzieren gemäss Nachfrage und werden daher meist nur in Spitzenbedarfszeiten zugeschaltet. Dazu wird Wasser aus den hochalpinen Seen

über Druckleitungen zu den hunderte von Metern tiefer im Tal gelegenen Kraftwerksturbinen geleitet.

Problematisch ist, dass das Wasser nach getaner Arbeit in die Rhone eingeleitet wird und dort kurzfristige Schwankungen des Wasserspiegels verursacht. Dieses als Schwall-Sunk bezeichnete Phänomen kann stellenweise zu Wasserspiegelschwankungen von bis zu einem Meter führen. Dies stellt die Ingenieure der dritten Rhonekorrektur zusätzlich zur Hochwasserproblematik vor eine weitere anspruchsvolle Aufgabe.

Gewässeraufweitungen und die Folgen

Durch die geplanten Revitalisierungsmassnahmen entstehen grössere Uferzonen, die planerische Fragen aufwerfen:

- Wird die Verlegung des Damms im Rahmen der Revitalisierungsmassnahmen zu Störungen des Grundwasserniveaus führen?
 - Wie wird sich der Schwall-Sunk-Betrieb auf das ökologische Gleichgewicht in der revitalisierten Flussstrecke auswirken?
- Gegenwärtig werden diese Aspekte im Rahmen zweier Projekte an der EAWAG untersucht. Der vorliegende Artikel fasst erste Ergebnisse zusammen.

Schwallwellen beeinflussen den Grundwasserpegel

Zur Klärung der Frage, ob eine Verlegung des Damms zu Störungen des Grundwasserniveaus führen, werden Wasserspiegel- und Temperaturprofile an Grundwasser-

Die 3. Rhonekorrektur

hat ein Kostenvolumen von rund 900 Millionen Franken verteilt auf 30 Jahre und verfolgt folgende Ziele:

- Verbesserung der Hochwassersicherheit,
- ökologische Aufwertung des Flussraums,
- Steigerung der Attraktivität der Flusslandschaft.

Begleitend zum kantonalen Projekt und zur Beantwortung spezifischer Fragen wird ein interdisziplinäres Forschungsvorhaben durchgeführt, an dem auch die EAWAG beteiligt ist. Darüber hinaus sollen praxisrelevante Erkenntnisse für ähnliche wasserbauliche Projekte in der Schweiz oder im Ausland gewonnen werden.

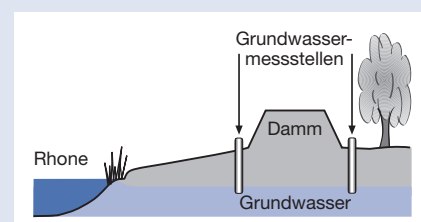


Abb. 1: Querschnitt durch Rhone und Rhonedamm mit Grundwassermessstellen.

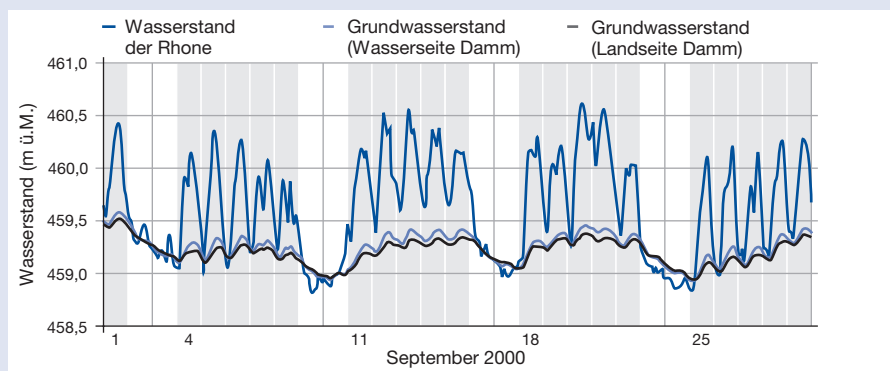


Abb. 2: Grundwasserstände im Bereich des linken Rhonedamms bei Martigny im Vergleich zum Pegelstand der Rhone (Rohdaten: Kanton Wallis/Büro BEG). Graue Bereiche: Montag bis Freitag, weisse Bereiche: Samstag und Sonntag.

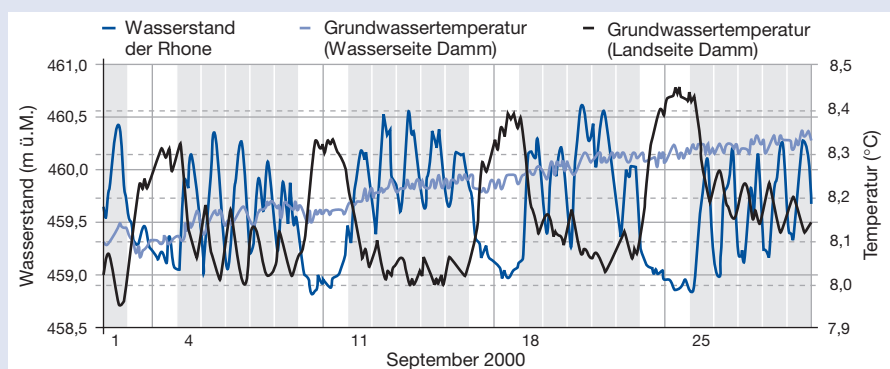


Abb. 3: Temperaturprofile des Grundwassers im Bereich des linken Rhonedamms bei Martigny (Rohdaten: Kanton Wallis/Büro BEG). Graue Bereiche: Montag bis Freitag, weisse Bereiche: Samstag und Sonntag.

messstellen beidseits des Rhonedamms aufgenommen und miteinander verglichen (Abb. 1). Wie aus Abbildung 2 ersichtlich, spiegelt sich der Schwall-Sunk-Betrieb deutlich im Pegelstand der Rhone wieder: Jeweils von Montag bis Freitag (graue Bereiche) führt dies zu täglichen Wasserstandsschwankungen von etwa einem Meter (dunkelblaue Kurve). Abgeschwächt und nur mit geringer zeitlicher Verzögerung bildet sich diese Charakteristik in den Messstellen zu beiden Seiten des Damms ab (hellblaue bzw. schwarze Kurve). Mit Ende der Turbinierung am späten Freitag Abend normalisieren sich sowohl der Abfluss in der Rhone als auch der Grundwasserpegel.

Während Variationen im Temperaturprofil auf der Wasserseite (hellblaue Kurve, Abb. 3) im Rahmen der Messgenauigkeit nicht festzustellen sind, zeigt die Temperatur auf der Landseite (schwarze Kurve, Abb. 3) des Rhonedammes ein spiegelbildlich zum Schwall-Sunk ausgeprägtes Muster. Die Temperatur schwankt dort während des Schwall-Sunk-Betriebs regelmässig um 0,1–0,2 °C und steigt am Wochenende sogar um bis zu 0,4 °C an. Untersuchungen in weiterer Entfernung (>100 m) zum Damm ergaben, dass die Schwallwellen der Rhone dort keine Auswirkungen auf das Grundwasser haben. Im betrachteten Dammbereich kann daher davon ausgegangen werden, dass es sich bei den beobachteten Niveauschwankungen im Grundwasser zum einen um die Weitergabe der durch Schwall-Sunk verursachten Druckwellen handelt. Unsere Ergebnisse sprechen aber zum anderen auch für einen Wasseraustausch. Da der wasserseitige Dammfuss vom restlichen System hydraulisch abgekoppelt zu sein scheint, ist ein Wasseraustausch unterhalb des Damms wahrscheinlich.

Die Isotopenchemie liefert weitere Indizien

Weitere Hinweise auf die In- und Exfiltrationsdynamik der Rhone liefert die Iso-

topenchemie. Unter Isotopen versteht man die Atomarten eines Elementes mit verschiedenen Massenzahlen. Beispielsweise kommt das Element Sauerstoff im Wasser als ^{16}O -Isotop mit der Masse 16 und als ^{18}O -Isotop mit der Masse 18 vor.

Während des Wasserkreislaufs gelangen diese Isotopen in die Atmosphäre und werden in Form von Niederschlag wieder abgegeben. Fraktionierungsprozesse in der Atmosphäre bewirken, dass das in grossen Höhen ausregnende Wasser «leichter», also ärmer an Sauerstoff-18 ist als im Tal. Der relative Anteil des ^{18}O -Isotops wird in Bezug auf eine Referenz in ‰ angegeben und als $\delta^{18}\text{O}$ bezeichnet. Gewässer auf unterschiedlichen Höhen haben somit auch unterschiedliche $\delta^{18}\text{O}$ -Werte. Dieses «Höhengedächtnis» kann zur Herkunftsbestimmung genutzt werden.

Mit Hilfe der mittleren $\delta^{18}\text{O}$ -Wertes (Abb. 4) des Rhonewassers (-13,32), des angrenzenden Grundwassers (-13,17) und des Rhone-seitenbachs Printse (-13,12) kann deshalb abgeschätzt werden, ob der Grundwasserkörper überwiegend durch Zustrom von Rhone- oder Bergwasser gespeist wird. Aufgrund noch fehlender Datensätze wurde der Beitrag von oberstromigem Grundwasser und Niederschlag vernachlässigt. Unsere Mischungsrechnung ergab, dass das Grundwasser wahrscheinlich zu gleichen Teilen aus Rhone- und Bergwasser besteht.

Geringere Diversität durch Schwall-Sunk-Betrieb

Mit der zweiten Frage – wie sich der Schwall-Sunk-Betrieb auf das ökologische

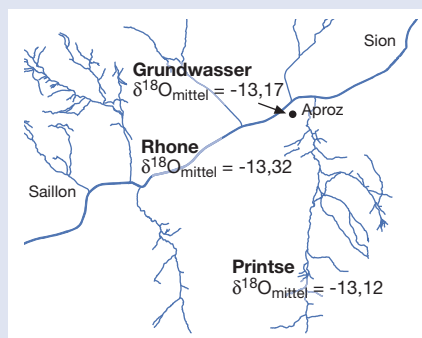


Abb. 4: Isotopische Betrachtungen im Untersuchungsgebiet.

Bauliche Varianten der 3. Rhonekorrektur [4]

- Anpassung des derzeitigen Hochwasserschutzsystems durch Verstärkung und Erhöhung der bestehenden Dammanlagen.
- Flussraumaufweitungen und natürliche Gestaltung der Uferbereiche.
- Schaffung eines zweiten, neben der Rhone verlaufenden Gerinnes zur separaten Aufnahme der Schallwellen.



Schwallwellen werden durch die Rückgabe von Turbinenwässern erzeugt.

Gleichgewicht in einer revitalisierten Flussstrecke auswirkt – beschäftigt sich derzeit an der EAWAG ein weiteres Projekt. Dabei wird die Diversität der aquatischen und terrestrischen Wirbellosenfauna im Uferbereich verschiedener Fliessgewässer über mehrere Jahre beobachtet. Beprobt wird jeweils beidseits der Uferlinie, d.h. sowohl im überfluteten als auch im nicht überfluteten Bereich. Für die Untersuchung wurden 12 verschiedene Fliessgewässerabschnitte ausgewählt, die sich hinsichtlich ihres hydrologischen und morphologischen Zustands unterscheiden.

Die Ergebnisse der ersten Probenkampagne sind in Abbildung 5 dargestellt. Erwartungsgemäss hat der Schwall-Sunk-Betrieb einen negativen Einfluss auf die Artenvielfalt. So ist die Anzahl der aquatischen Wirbelosentaxa in Schwall-Sunk-beeinträchtigten Fliessgewässern deutlich geringer als in Gewässern mit natürlichem Abflussregime. Das gleiche Bild zeigt sich – wenngleich weniger ausgeprägt – bei den terrestrischen Wirbellosen (Abb. 5A). Die Artenvielfalt der terrestrischen Wirbellosen wird hingegen vornehmlich von der Morphologie der Flussufer beeinträchtigt: An begradigten Flussabschnitten ist die Anzahl der Taxa um etwa 50% geringer als an Flussufern mit natürlicher Morphologie (Abb. 5B).

Diese Ergebnisse sprechen dafür, dass sich Flussaufweitungen für die terrestrische Uferfauna durchaus positiv auswirken könnten. Daneben scheint es aber unabdingbar, das Schwall-Sunk-geprägte Abflussregime zu sanieren, will man auch einer natürlichen aquatischen Lebensgemeinschaft eine Chance geben.

Zurück zur Frage...

Schliessen sich nun Revitalisierung und Kraftwerksbetrieb gegenseitig aus? Nach gegenwärtigem Kenntnisstand muss hier für die Rhone mit einem vorsichtigen «nein» geantwortet werden.

Zur Sicherung des Talbodens sind Hochwasserschutzdämme auch bei Aufweitungsmassnahmen unerlässlich. Werden

dabei die veralteten Dämme durch moderne ersetzt, ist nach heutigem Erkenntnisstand nicht mit gefährlichen Veränderungen des hydrologischen Status quo im Grundwasser zu rechnen.

Aus biologischer Sicht zeichnet sich ab, dass durch den Schwall-Sunk-Betrieb die Entwicklung einer natürlichen Biozönose auch im aufgeweiteten Uferbereich nicht möglich sein wird. Zusätzliche Massnahmen, wie beispielsweise die Aufnahme der Schwallwellen durch Entlastungsbecken oder Seitenkanäle, müssen daher in Betracht gezogen werden. Voraussetzung für eine erfolgreiche Korrektur ist daher ein gesundes Zusammenspiel von «harten» technischen und «weichen», ökologisch verträglichen Massnahmen.

Zwei Randbedingungen sind bereits sehr deutlich sichtbar: Die Rhone ist stark verbaut und sie wird massiv für die Stromproduktion genutzt. Es ist daher realitätsfern zu glauben, dass sich durch die geplanten Massnahmen im Unterlauf der Rhone wieder ein Idyll mit reicher Fauna und Flora entwickeln könnte. «Le Rhône (...) symbole

d'une force inflexible, toujours jeune et triomphante, qui descend vers le soleil, il suscite dans notre esprit des pensées vivantes» [1] – diese poetischen Ziele bleiben zumindest ein grosses Ziel.



Markus Fette, Ingenieur und Doktorand in der Abteilung «Oberflächengewässer». Die vorgestellten Untersuchungen werden im Rahmen des Rhoneprojektes durchgeführt.

Koautoren: Bernhard Wehrli, Achim Pätzold, Klement Tockner

Weitere Informationen: www.rhone-thur.eawag.ch

- [1] Mariétan I. (1953): Le Rhône, la lutte contre l'eau en Valais. Edition du Griffon, Neuchâtel, 22 p.
- [2] Willi H.-P. (2001): Synergie von Hochwasserschutz und Gewässerökologie. EAWAG news 51d, 26–28.
- [3] Friedrich G. (1986): Was bedeutet Renaturierung von Fliessgewässern? – LWA-Materialien Nr. 3/86. Aktuelle Fragen der Unterhaltung von Fliessgewässern, S. 23–35.
- [4] Kanton Wallis (2000): Dienststelle für Strassen und Flussbau: Broschüre zur Dritten Rhonekorrektur. Siehe auch: www.vs.ch/rhone-vs

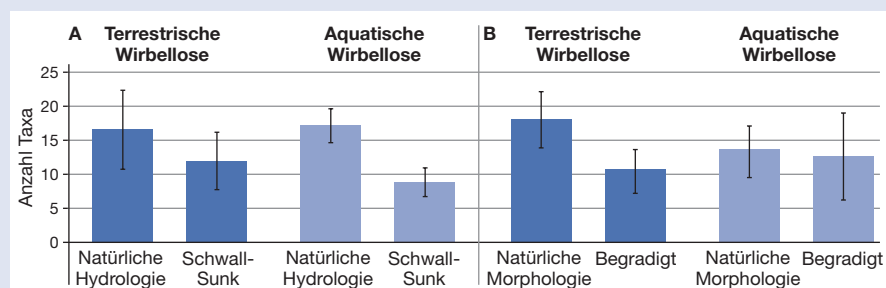


Abb. 5: Diversität aquatischer und terrestrischer Wirbelloser in Fliessgewässern mit Wasserstandsschwankungen durch Schwall-Sunk-Betrieb oder mit natürlichem Abflussregime (A) sowie in Fliessgewässern mit begradigten oder natürlichen Flussufern (B).

Auswirkungen der Klimaveränderung auf alpine Gewässersysteme

Die Klimaveränderung greift direkt in den alpinen Wasserkreislauf ein. Die vergangenen 10 Jahre waren wahrscheinlich die wärmsten der letzten 1000 Jahre. Hält diese Temperaturerwärmung an, ergeben sich bedeutende Konsequenzen für den Wasserkreislauf in der Schweiz. So rechnet man mit weniger sommerlichen, jedoch vermehrten Niederschlägen im Winter sowie mit dem Anstieg der Schneegrenze und dem Abschmelzen der Gletscher. Welche Auswirkungen hätten diese Veränderungen für die Gewässer im Alpenraum?

Alpine Gewässersysteme – Bäche, Flüsse, kleine und grosse Seen, Wasser im Untergrund, in Poren und Spalten sowie das Grundwasser – sind Teile des globalen Wasserkreislaufs. Durch Verdunstung und Niederschlag verbindet er die Atmosphäre, den Boden, die Vegetation und die Gewässersysteme. Geprägt wird der Wasserkreislauf durch das Klima und das aktuelle Wettergeschehen, auf der anderen Seite werden aber Klima und Wetter auch vom Wasserkreislauf beeinflusst – ein äusserst komplexer Regelkreis. Zusätzlich greift der Mensch durch wasserwirtschaftliche Massnahmen in diesen Regelkreis ein: Wasser wird in Stauseen und Reservoirs zurückgehalten oder in andere Einzugsgebiete umgeleitet, landwirtschaftliche Flächen werden grossflächig bewässert, Feuchtgebiete entwässert und der Grundwasserspiegel wird abgesenkt oder angehoben.

In unseren Breiten scheint das Wechselspiel Wasserkreislauf–Klima–Wetter über Zeiträume von hunderten von Jahren recht stabil zu sein, vorausgesetzt, dass sich das globale Klima nicht verändert. Dies gilt auch für die alpine Umgebung.

Schwankungen im Wasserkreislauf – gestern und vorgestern

Zur Beurteilung zukünftiger Klimaveränderungen, kann man den Wasserkreislauf und insbesondere den Niederschlag nicht ausser Acht lassen. In allen Gebieten der Schweiz waren die Niederschläge im Verlauf der letzten 100 Jahre erheblichen Schwankungen unterworfen (Abb. 1): Sie liegen beispielsweise für das Einzugsgebiet des Flusses Ticino zwischen 1084 mm im Jahre 1949 und 3038 mm im Jahre 1977 – das heisst, sie schwanken um einen Faktor drei. Probst und Tardy [1] haben die Abflüsse

grosser Flüsse analysiert und gezeigt, dass diese Schwankungen weltweit in analoger Weise zu beobachten sind. Sie hängen mit den Veränderungen der allgemeinen globalen Zirkulation in der Atmosphäre zusammen.

Die Abflüsse sind indirekt an die Niederschläge gekoppelt. Im Verlauf der Jahre folgen sie bei relativ konstanter Verdunstung den Veränderungen der Niederschläge. Niederschläge fliessen jedoch nicht ausschliesslich direkt ab, sondern werden in mannigfacher Weise gespeichert, z.B. in der Schneedecke und in Gletschern, im Boden, im Grundwasser und in natürlichen und künstlichen Seen. Die Freigabe des Wassers aus den Speichern beeinflusst den Abfluss kurzfristig. Ausgehend vom Grad der Vergletscherung und Schneebedeckung lassen sich daher verschiedene Abflusstypen unterscheiden. Sie sind durch unterschiedliche jahreszeitliche Abflussmuster gekennzeichnet. Abbildung 2 zeigt eine Auswahl dieser Abflusstypen. Grösste Abflussschwankungen zeigt der Typ «a-glaciaire», das sind Fliessgewässer, die weitgehend durch das Abschmelzen von Gletschern und Schnee gespeist werden. Hier kann sich der mittlere Monatsabfluss zwischen Winter und Sommer leicht um einen Faktor 30 verändern. Am geringsten sind die Abflussschwankungen bei Fliessgewässern

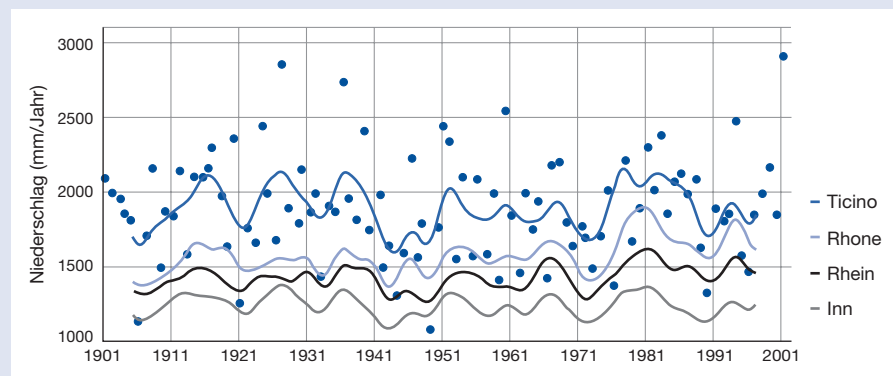


Abb. 1: Zeitreihen der jährlichen Gebietsniederschläge (mm/Jahr) 1901–2002 für die Einzugsgebiete des Ticino bis Bellinzona, der Rhone bis zum Genfersee, des Rheins bis Basel (nur Schweiz) sowie des Inn bis zur Landesgrenze. Für den Ticino sind zudem die einzelnen Jahreswerte als Punkte dargestellt [7].



Ein Murgang in Aktion.

vom Typ «pluvial supérieur», die überwiegend vom Regen abhängig sind. In Bezug auf die extremen Abflüsse bei Trockenheit oder Hochwasser sind die Unterschiede noch sehr viel grösser. Im Rappengraben, einem Fließgewässer mit einem sehr kleinen Einzugsgebiet, wurden Extreme von weniger als 0,1 l/s bis zu über 2300 l/s beobachtet. Dagegen wurden im Rhein mit seinem sehr grossen Einzugsgebiet (betrachtet wird nur das Einzugsgebiet bis Basel) Extremwerte von 205 m³/s im Jahr 1858 und 5700 m³/s im Jahr 1876 aufgezeichnet.

Problematisch ist, dass die Gesellschaft und die Wasserwirtschaft diese in den letzten 100 Jahren gemessenen Extreme als allgemeingültige Erfahrungswerte festlegen. Gehen wir aber weiter als nur 100 Jahre zurück, so stellen wir fest, dass unsere Erfahrungswerte längst nicht die gesamte Variabilität erfassen. Pfister [2] hat die Klimavariationen in den letzten 500 Jahren untersucht und festgestellt, dass das 20. Jahrhundert ein ziemlich untypisches «gut-

mütiges» Jahrhundert war. So waren zu-gefrorene Seen für die Menschen des 18. Jahrhunderts in den sehr häufig kalt-trockenen Wintern nichts Aussergewöhnliches. Gleichzeitig wurden ausnehmend trockene Sommer verzeichnet: vor 1730 etwa alle 12 bis 15 Jahre, nachher nur noch alle 50 Jahre und im 20. Jahrhundert nur 1947. Kalt-feuchte Sommermonate wurden vor allem zwischen 1576 und 1635 beobachtet, damals wuchsen auch die Gletscher. Seither sind derartige Extremsommer selten geworden.

Entsprechend hat sich auch die Hochwasserdynamik verändert: In den Gebirgskantonen Wallis, Uri, Tessin und Graubünden waren die Perioden zwischen 1550–1580 und 1827–1875 besonders von Hochwassern betroffen, dagegen waren Hochwasser in den Jahren zwischen 1641–1706 und 1927–1975 eher selten. Im 20. Jahrhundert verzeichnen wir seit etwa 1977 wieder eine Häufung von Hochwassern. So verwundert es auch nicht, dass Schmidli und Koautoren [3] eine Zunahme der Winterniederschläge und Frei und Schär [4] eine Zunahme der intensiveren Niederschlagsereignisse für den gleichen Zeitraum beobachtet haben.

Wasserkreislauf morgen und übermorgen

Die 1990er Jahre waren wahrscheinlich das wärmste Jahrzehnt der letzten 1000 Jahre. Dies hat der dritte Wissensbericht des «Intergovernmental Panel on Climate Change» (IPCC) erstmals deutlich zum Ausdruck gebracht [5]. Gleichzeitig betont der Bericht, dass wahrscheinlich der grösste Teil des Temperaturanstieges der letzten 50 Jahre auf die Aktivitäten des Menschen zurückzuführen ist. In Bezug auf die Schweiz hat das «Beratende Organ für Fragen der Klimaänderung» («Organe consultatif sur les Changements Climatiques», OcCC) [6] die wichtigsten Auswirkungen aus den IPCC-

Berichten zusammengefasst. In Folge der wahrscheinlich weiter anhaltenden Temperaturerhöhung dürfte bis ca. 2050 mit bedeutenden Konsequenzen für den Wasserkreislauf in der Schweiz zu rechnen sein:

- Abnahme der Niederschläge im Sommer, Zunahme im Winter, grössere Schwankungen der jährlichen Niederschlagsmengen;
- vermehrte Starkniederschläge im Winter (vgl. Abb. 3);
- weniger Niederschläge in Form von Schnee;
- Anstieg der Schneegrenze um 200 m;
- Abschmelzen eines Grossteils der Gletscher;
- Zunahme des Abflussvolumens nördlich der Alpen um 10%, Abnahme um 10% südlich der Alpen;
- Veränderung des Abflussregimes um eine Regimestufe (vgl. Abb. 2);
- Zunahme der Häufigkeit und Stärke von Hochwassern vor allem im Winter in mittleren und tieferen Regionen;
- Zunahme von Trockenheiten im Sommer, vor allem an Unterläufen;
- grössere Schwankungen in der Abflussdynamik;
- Zunahme von Murgängen in steilen, mit Schutt belasteten Zonen, die nach dem Abschmelzen des Permafrosts und der Gletscher an die Oberfläche kommen.

Es muss allerdings betont werden, dass die für unsere Region prognostizierten Veränderungen nach wie vor unsicher sind. Das liegt vor allem an den globalen Klimamodellen, welche nur unsichere regionale Szenarien berechnen können.

Konsequenzen für die Wasserwirtschaft

Die Folgen der weiterschreitenden Klimaveränderung können dazu führen, dass die Elemente des Wasserkreislaufs Werte annehmen, die die heute gültigen Erfahrungswerte überschreiten. Deshalb ist mit



B. Schädler, BWG

Das Ergebnis. Mehr Murgänge bei Klimaerwärmung?

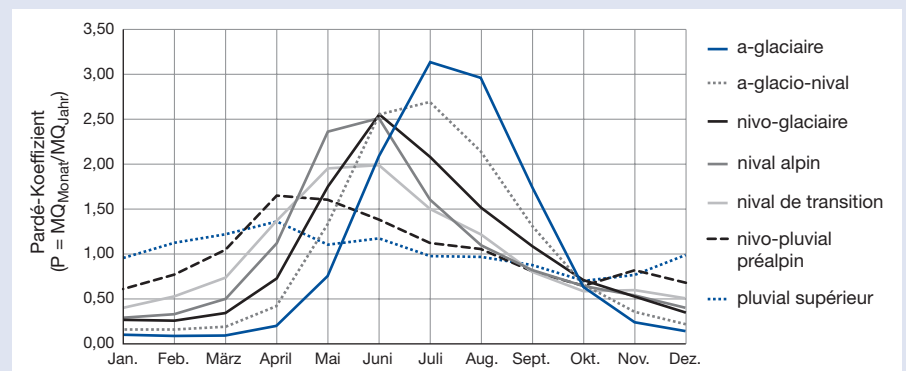


Abb. 2: Mittlere Abflussregime von schweizerischen Einzugsgebieten mit unterschiedlicher Höhenlage, vom Regime pluvial supérieur (mittlere Höhe 800 m ü.M.) alle ca. 300 Höhenmeter bis zum Regime a-glaciaire (2700 m ü.M.) [nach 8].

Konsequenzen für verschiedene wasserwirtschaftliche Aspekte zu rechnen:

- Durch eine Verminderung der Sommerniederschläge würden Seen und Fließgewässer weniger Wasser führen. Gleichzeitig müssten landwirtschaftliche Kulturen künstlich bewässert werden, was die Wasserknappheit weiter verstärken würde. Die Wasserknappheit wiederum hat Konsequenzen für die Wasserqualität. Einerseits würden eingetragene Schadstoffe nicht mehr stark genug verdünnt werden. Andererseits würde die Wassertemperatur ansteigen. Normalerweise entwickelt sich die Wassertemperatur parallel zur Lufttemperatur (Abb. 4). Bei verminderter Wasser-

führung müsste jedoch insbesondere bei kleineren Gewässern mit einem überproportionalen Anstieg gerechnet werden.

- Konsequenzen auf das flussnahe Grundwasser können nicht ausgeschlossen werden, da die Infiltration von Regenwasser und Flusswasser vermindert wäre und gleichzeitig die Verdunstung zunehmen dürfte.

- Die Bewirtschaftung aller grösseren Seen in der Schweiz (Ausnahmen Bodensee und Walensee) stützt sich auf die Erfahrungen im 20. Jahrhundert und auf einen Interessenausgleich aller Seebenutzer. Erhöhte Winterniederschläge könnten zu höheren Ansprüchen seitens des Hochwasserschutzes führen. In der Folge wären entweder neue Betriebsregeln oder sogar weitere bauliche Massnahmen erforderlich. Da derartige Veränderungen eine lange Vorbereitungs- und Ausführungszeit benötigen, müssten für dieses Problem schnellstens Szenarien entwickelt werden.

- Die zeitliche Verteilung der Zuflüsse zu den Stauseen einerseits und die Nachfrage nach Strom andererseits dürften sich verändern. Gleichzeitig könnten zunehmend neue Ansprüche im Rahmen des Hochwasserrückhalts an Stauseebetreiber gerichtet werden. Umfangreiche politische, gesetzgeberische und technische Vorbereitungsarbeiten wären notwendig, um die Stauseen zu Mehrzweckspeichern umzufunktionieren.

- Sollten sich die Hochwasser im Winter verstärkt auf Hochwasser in unterliegenden Ländern auswirken, ist mit Forderungen nach Hochwasserrückhalt in schweizerischen Reservoiren und Seen zu rechnen. Dadurch erhalten die beiden oben angesprochenen Punkte eine besondere politische Dimension.

- Schliesslich könnte auch die Rheinschifffahrt betroffen sein: Im Rhein ist vor allem im Sommer und Herbst bis hinunter nach

Holland mit sehr niedrigen Pegelständen und im Winter mit dem Durchzug von Hochwassern zu rechnen. Dadurch können die Schiffe nicht oder nur teilweise beladen in die Schweiz gelangen, was insbesondere die Preise der Massengüter (Erdöl) verteuert.

Die Wasserwirtschaft ist seit jeher gewohnt, auf extreme Situationen zu reagieren und flexible Massnahmen umzusetzen. Die prognostizierte Klimaänderung ist jedoch eine Herausforderung, auf die schon heute mit Massnahmen reagiert werden kann, die dem Prinzip des «no regret» folgen. Das sind Massnahmen, die die Auswirkungen der Klimaänderung so weit wie möglich verkleinern und gleichzeitig aus anderen Gründen erwünschte Massnahmen sind, z.B. eine Anpassung der Raumordnungspolitik oder die flexiblere Bewirtschaftung der grossen Seen.



Bruno Schädler ist promovierter Atmosphärenphysiker und Hydrologe. Er leitet am Bundesamt für Wasser und Geologie in Bern-Ittigen die Abteilung Wasserwirtschaft und ist Experte für Wasser und Klima im Beratenden Organ für Fragen der Klimaänderung (OcCC).

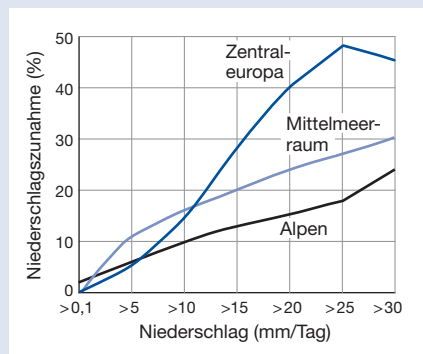


Abb. 3: Berechnete Zunahme der Niederschlags-tätigkeit im Winter für drei Regionen in Mitteleuropa in einer gegenüber heute 2 °C wärmeren und 15% feuchteren Atmosphäre [nach 9].

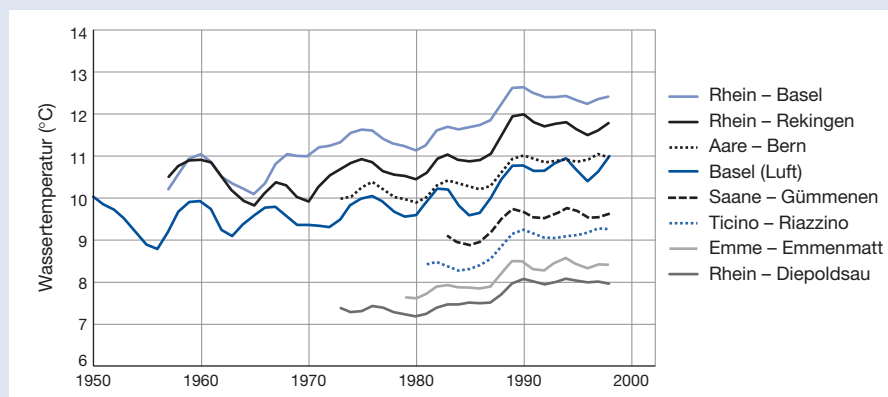


Abb. 4: Beobachtete jährliche Mittelwerte der Wassertemperatur 1954–2001 in verschiedenen schweizerischen Flüssen im Vergleich zur Lufttemperatur in Basel. Die Zeitreihen der Jahresmittelwerte sind mit einem Gauss'schen Tiefpassfilter über jeweils 7 Jahre geglättet [nach 10].

- [1] Probst J.L., Tardy Y. (1987): Long range streamflow and world continental runoff fluctuations since the beginning of this century. *Journal of Hydrology* 94, 289–311.
- [2] Pfister C. (1999): *Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen*. Verlag Haupt, Bern, 304 S.
- [3] Schmidli J., Schmutz C., Frei C., Wanner H., Schär C. (2002): Mesoscale precipitation variability in the region of the European Alps during the 20th century. *International Journal of Climatology* 22, 1049–1074.
- [4] Frei C., Schär C. (2001): Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *Journal of Climate* 14, 1564–1584.
- [5] IPCC (2001): *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 944 p.
- [6] OcCC (2002): *Das Klima ändert – auch in der Schweiz. Die wichtigsten Ergebnisse des dritten Wissensstandsberichtes des IPCC aus der Sicht der Schweiz*. Bern, 48 S.
- [7] Schädler B. (1985): *Der Wasserhaushalt der Schweiz. Mitteilungen der Landeshydrologie Nr. 6*, Bern, 84 S.
- [8] Weingartner R., Aschwanden H. (1992): Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 5.2, Bern.
- [9] Frei C., Schär C., Lüthi D., Davies H.C. (1998): Heavy precipitation processes in a warmer climate. *Geophysical Research Letters* 25, 1431–1434.
- [10] Jakob A., Liechti P., Schädler B. (1996): Temperatur in Schweizer Gewässern – Quo vadis?. *Gas Wasser Abwasser* 76, 288–294.

Publikationen

Separata bitte mit dem in der Mitte eingeklebbten Talon bestellen.

- [3158] **Siegrist H., Vogt D., Garcia-Heras J.L., Gujer W.** (2002): Mathematical Model for Meso- and Thermophilic Anaerobic Sewage Sludge Digestion. *Environ. Sci. Technol.* 36 (5), 1113–1123.
- [3159] **Larsen T.A., Rauch W., Gujer W.** (2001): Waste Design Paves the Way for Sustainable Urban Wastewater Management. *Proc. Internat. UNESCO Sympos. «Frontiers in Urban Water Management – Deadlock or Hope?»*, UNESCO, Paris, pp. 219–229.
- [3160] **Arscott D.B.** (2002): Habitat Heterogeneity and Aquatic Invertebrates Along an Alpine Floodplain River. *Diss. ETHZ No. 14 443*, Zurich.
- [3161] **Winder M.** (2002): Zooplankton Ecology in High-mountain Lakes. *Diss. ETHZ No. 14 519*, Zurich.
- [3162] **Holocher J.** (2002): Investigations of Gas Exchange in Quasi-saturated Porous Media Using Noble Gases as Conservative Tracers. *Diss. ETHZ No. 14 588*, Zurich.
- [3163] **Gujer W.** (2002): Microscopic Versus Macroscopic Biomass Models in Activated Sludge Systems. *Water Sci. Technol.* 45 (6), 1–11.
- [3164] **Siegrist H., Rieger L., Koch G., Kühni M., Gujer W.** (2002): The EAWAG Bio-P Module for Activated Sludge Model No. 3. *Water Sci. Technol.* 45 (6), 61–76.
- [3165] **Zehnder A.J.B.** (2002): Wasserressourcen und Bevölkerungsentwicklung. *Nova Acta Leopoldina NF 85 (323)*, 399–418.
- [3166] **Haller M.Y., Müller S.R., McArdell C.S., Alder A.C., Suter M.J.-F.** (2002): Quantification of Veterinary Antibiotics (Sulfonamides and Trimethoprim) in Animal Manure by Liquid Chromatography-Mass Spectroscopy. *J. Chromatogr. A* 952, 111–120.
- [3167] **Clarke T.E., Rohrbach M.R., Tari L.W., Vogel H.J., Köster W.** (2002): Ferric Hydroxamate Binding Protein FhuD from *Escherichia coli*: Mutants in Conserved and Non-conserved Regions. *BioMetals* 15, 121–131.
- [3168] **Ward J.V., Malard F., Tockner K.** (2002): Landscape Ecology: a Framework for Integrating Pattern and Process in River Corridors. *Landscape Ecol.* 17 (Suppl. 1), 35–45.
- [3169] **Hunziker R.W., Escher B.I., Schwarzenbach R.P.** (2002): Acute Toxicity of Triorganotin Compounds: Different Specific Effects on the Energy Metabolism and Role of pH. *Environ. Toxicol. Chem.* 21 (6), 1191–1197.
- [3170] **Robinson C.T., Tockner K., Burgherr P.** (2002): Seasonal Patterns in Macroinvertebrate Drift and Seston Transport in Streams of an Alpine Glacial Flood Plain. *Freshwater Biol.* 47, 985–993.
- [3171] **Lacour S., Kolb A., Zehnder A.J.B., Landini P.** (2002): Mechanism of Specific Recognition of the *aidB* Promoter by σ^S -RNA Polymerase. *Biochem. Biophys. Res. Comm.* 292, 922–930.
- [3172] **Robinson C.T., Tockner K., Ward J.V.** (2002): The Fauna of Dynamic Riverine Landscapes. *Freshwater Biol.* 47, 661–677.
- [3173] **Egli T.** (2002): Metabolism of Mixtures of Organic Pollutants. In: «Encyclopedia of Environmental Microbiology», G. Bitton (Ed.). John Wiley, New York, pp. 1869–1877.
- [3174] **Wanner O.** (2002): Modeling of Biofilms. In: «Encyclopedia of Environmental Microbiology», G. Bitton (Ed.). John Wiley, New York, pp. 2083–2094.
- [3175] **Lienert J., Diemer M., Schmid B.** (2002): Effects of Habitat Fragmentation on Population Structure and Fitness Components of the Wetland Specialist *Swertia perennis* L. (Gentianaceae). *Basic Appl. Ecol.* 3, 101–114.
- [3176] **Lienert J., Fischer M., Schneller J., Diemer M.** (2002): Isozyme Variability of the Wetland Specialist *Swertia perennis* L. (Gentianaceae) in Relation to Habitat Size, Isolation, and Plant Fitness. *Amer. J. Botany* 89 (5), 801–811.
- [3177] **Lienert J., Fischer M., Diemer M.** (2002): Local Extinctions of the Wetland Specialist *Swertia perennis* L. (Gentianaceae) in Switzerland: a Revisitation Study Based on Herbarium Records. *Biol. Conservation* 103, 65–76.
- [3178] **Schreiber J.V., Frackenhof J., Moser F., Fleischmann T., Kohler H.-P.E., Seebach D.** (2002): On the Biodegradation of β -Peptides. *ChemBioChem* 3, 424–432.
- [3179] **Holocher J., Matt V., Aeschbach-Hertig A., Beyerle U., Hofer M., Peeters F., Kipfer R.** (2001): Noble Gas and Major Element Constraints on the Water Dynamics in an Alpine Floodplain. *Ground Water* 39 (6), 841–852.
- [3180] **Cadieux N., Bradbeer C., Reeger-Schneider E., Köster W., Mohanty A.K., Wiener M.C., Kadner R.J.** (2002): Identification of the Periplasmic Cobalamin-binding Protein BtuF of *Escherichia coli*. *J. Bacteriol.* 184 (3), 706–717.
- [3181] **Greber E., Baumann A., Cornaz S., Herold T., Koel R., Muralt R., Zobrist J.** (2002): Grundwasserqualität in der Schweiz. *Gas, Wasser, Abwasser* 82 (3), 191–201.
- [3182] **Frutiger A., Müller R.** (2002): Der Rote Sumpfkrebs im Schübelweiher (Gemeinde Küssnacht ZH) – Auswertung der Massnahmen 1998–2001 und Erkenntnisse. *EAWAG, Dübendorf*, 26 S.
- [3183] **Laemmli C.M., Schönenberger R., Suter M., Zehnder A.J.B., van der Meer J.R.** (2002): TfdD_{II}, One of the Two Chloromuconate Cycloisomerases of *Ralstonia eutropha* JMP134 (pJP4), Cannot Efficiently Convert 2-chloro-*cis,cis*-muconate to *trans*-dienelactone to Allow Growth on 3-chlorobenzoate. *Arch. Microbiol.* 178 (1), 13–25.
- [3184] **Lichtensteiger T.** (2002): Auf dem Weg zum Endlager: Auswirkung thermischer Behandlungen auf den Stoffhaushalt von Deponien. *Österr. Wasser- & Abfallwirtschaft* 54 (3/4), 29–36.
- [3185] **Xue H.B., Sigg L.** (2002): A Review of Competitive Ligand-exchange-voltammetric Methods for Speciation of Trace Metals in Freshwater. In: «Environmental Electrochemistry: Analyses of Trace Element Biogeochemistry». T.F. Rozan, M. Tallefert (Eds.). ACS Symposium Series 811, Amer. Chem. Soc., Washington D.C., 336–370.
- [3186] **Zwank L., Schmidt T.C., Haderlein S.B., Berg M.** (2002): Simultaneous Determination of Fuel Oxygenates and BTEX Using Direct Aqueous Injection Gas Chromatography Mass Spectrometry (DAI-GC/MS). *Environ. Sci. Technol.* 36 (9), 2054–2059.
- [3187] **Bürgi H., Stadelmann P.** (2002): Change of Phytoplankton Composition and Biodiversity in Lake Sempach Before and During Restoration. *Hydrobiologia* 469, 33–48.
- [3188] **Burkhardt-Holm P., Peter A., Segner H.** (2002): Decline of Fish Catch in Switzerland – Project Fishnet: A Balance Between Analysis and Synthesis. *Aquatic Sci.* 64, 36–54.
- [3189] **Tropel D., van der Meer J.R.** (2002): Identification and Physical Characterization of the HbpR Binding Sites of the *hbpC* and *hbpD* Promoters. *J. Bacteriol.* 184 (11), 2914–2924.
- [3190] **Dähn R.** (2001): Determination of Ni(II) and Th(IV) Sorption Mechanisms on Clay Mineral Surfaces: A Combined Macroscopic, Spectroscopic, and Microscopic Approach. *Diss. ETHZ No. 14 390*, Zurich.
- [3191] **Malard F., Tockner K., Dole-Olivier M.-J., Ward J.V.** (2002): A Landscape Perspective of Surface-Subsurface Hydrological Exchanges in River Corridors. *Freshwater Biol.* 47, 621–640.
- [3192] **Egli T., Köster W., Meile L.** (2002): Pathogenic Microbes in Water and Food: Changes and Challenges. *FEMS Microbiol. Rev.* 26, 111–112.

Veranstaltungen

EAWAG-Freitagseminar

Das Freitagseminar der EAWAG befasst sich im Wintersemester 2002/2003 mit dem Thema «Trinkwasser». Es findet jeweils Freitags von 11–12 Uhr im Hörsaal E2 der EAWAG in Dübendorf statt. Das Programm ist erhältlich unter:

www.freitagseminar.eawag.ch

Chemische Problemstoffe

Der PEAK-Kurs «Chemische Problemstoffe» wird vom 3.–5. Dezember 2002 an der EAWAG durchgeführt. Der 3. Kurstag ist dem Benzinzusatzstoff MTBE gewidmet.

Weitere Informationen:

www.peak.eawag.ch

Totholz und Schwemmgut

SGHL und EAWAG organisieren am 7. Dezember 2002 eine Tagung zum Thema «Totholz und Schwemmgut» im Audi Max der ETH Zürich. Weitere Informationen:

www.eawag.ch/events/totholz



K. Tockner, EAWAG

Totholz spielt in Fließgewässern eine zentrale Rolle für den Erhalt der ökologischen Integrität und der biologischen Vielfalt.

Neue Methoden zur Restwasserbemessung

«Neue Methoden zur Restwasserbemessung» sind Thema eines weiteren PEAK-Kurses, der vom 20.–23. Januar 2003 am Forschungszentrum für Limnologie der EAWAG in Kastanienbaum durchgeführt wird. Weitere Informationen unter:

www.peak.eawag.ch/restwasser

Conference on Environmental Future

Anlässlich des Internationalen Jahres des Süßwassers 2003 organisiert die EAWAG gemeinsam mit der «Foundation for Environmental Conservation» eine Konferenz zum Thema «Environmental Future of Aqua-

tic Ecosystems». Die Konferenz dauert vom 23.–27. März 2003 und findet an der ETH Zürich statt. Weitere Informationen:

www.icef.eawag.ch

International Water Management Course IWMC

Vom 5.–12. Juli 2003 führt die EAWAG gemeinsam mit der Swiss Re den «International Water Management Course» durch. Der Kurs richtet sich an Entscheidungsträger aus den Bereichen Gewässermanagement, Trinkwasserversorgung und Abwasserreinigung. Weitere Informationen:

www.iwmc.eawag.ch

Fazit Runder Tisch

«Es wird nie mehr sein wie vorher. Ich bin ein für allemal sensibilisiert worden für den sorgfältigen Umgang mit Wasser», resümiert eine Bürgerin. «Ich habe es mir einfacher vorgestellt, doch wir sind so weit gekommen, einander zu verstehen und etwas voneinander mitzunehmen», fasst auf der anderen Seite ein EAWAG-Forscher zusammen. Der Dialog zwischen Laien und Forschenden ist einen Schritt vorangekommen. Dieses Fazit zogen die Teilnehmenden des Pilotprojekts «Runder Tisch – Science et Cité» an ihrem letzten Treffen vom 4.–5. Oktober 2002. Drei Jahre hatte das Experiment gedauert. An insgesamt 12 Tagen hatten sich Bürger und Forschende der EAWAG zusammengesetzt und Forschungsprojekte und Fragen rund ums Thema Wasser disku-

tiert. Die gemachten Erfahrungen und Richtlinien für zukünftige Dialogprojekte werden in einem Schlussbericht zusammengefasst, der im Januar 2003 der Öffentlichkeit vorgestellt werden soll. Weitere Informationen: http://www.eawag.ch/news/science_et_cite

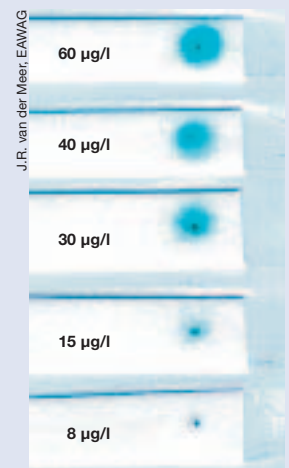


T. Kawara, Zürich

Neuer Biosensor für den Nachweis von Arsen im Wasser

Arsen ist weltweit eine der wichtigsten anorganischen Verunreinigungen im Trinkwasser. Besonders alarmierend ist die Situation in Bangladesch: Dort werden Höchstwerte von 1000 µg Arsen pro Liter Trinkwasser gefunden, der von der WHO empfohlene Grenzwert liegt bei 10 µg/l. Mehr als 1 Mio. Menschen leiden bereits an Arsenvergiftung (siehe EAWAG news 53). Um die rund 9 Mio. privaten Trinkwasserbrunnen einzeln untersuchen zu können, ist deshalb eine preiswerte, zuverlässige, sensitive und feldtaugliche Nachweismethode nötig. Aus diesem Grund hat ein Forschungsteam der EAWAG einen neuen Arsenbiosensor entwickelt. Der Papierstreifentest funktioniert mit genetisch modifizierten Bakterien, die bereits bei geringen Arsenkonzentrationen mit einer Blaufärbung reagieren. Für das Verfahren hat die EAWAG die Patentierung beantragt. Weitere Informationen unter:

www.eawag.ch/news/arsenbiosensor



J.R. van der Meer, EAWAG

Teststreifen mit Farbreaktion.