

# EAWAG news [dtsch. Ausg.]

## Das Magazin des Wasserforschungs-Instituts des ETH-Bereichs

**Journal Issue**

**Publication date:**

1999

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000916380>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

**Originally published in:**

EAWAG news [dtsch. Ausg.]

# news



**Im Fokus:  
Lebensraum Wasser –  
was er leistet, was er braucht**



Janet Hering ist Direktorin der Eawag und lehrt an der ETH Zürich und ETH Lausanne.

## Wasser für das Funktionieren der Ökosysteme

Aus unserer alltäglichen Erfahrung wissen wir, welche zentrale Rolle Wasser in unserem Leben spielt. Sei es als Trinkwasser, für die Hygiene, zur Erholung oder für den Transport – wir sind weitgehend von der natürlichen Ressource abhängig. Die Wasserkraftnutzung generiert weltweit etwa 20 Prozent der Elektrizität, in der Schweiz sind es fast 60 Prozent. Hingegen ist uns oft nicht bewusst, welche indirekten Dienstleistungen wir von der aquatischen Umwelt beziehen. So erfolgt die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen global zu rund 80 Prozent und in der Schweiz praktisch vollständig durch Niederschläge. Nicht nur die Fischerei ist von der Produktivität der Wasserlebensräume abhängig, sondern auch die Wasservögel oder die terrestrische Fauna. Die aquatische Umwelt kann ihre Leistungen aber nur erbringen, wenn sie intakt ist. Ökosysteme in einem nahezu natürlichen Zustand sind dabei üblicherweise am ergiebigsten.

Doch setzt der Mensch durch seine Tätigkeiten und Eingriffe die Wasserlebensräume erheblich unter Druck. Dämme, Flusskanalisierungen oder Drainagen verändern deren Morphologie, Einträge von Pathogenen, Nährstoffen oder Mikroverunreinigungen aus dem Siedlungsraum und der Landwirtschaft belasten die Gewässerqualität. Daneben können auch die Einführung invasiver Arten oder Fischbesatzmassnahmen die ökologische Integrität beeinträchtigen. Ein zielführendes Management der Wasserressourcen und ein wirksamer Gewässerschutz setzen voraus, dass man versteht, wie aquatische Lebensräume auf solche Störungen reagieren. Oder anders ausgedrückt: was sie brauchen, damit ihre Resilienz und Anpassungsfähigkeit gewährleistet bleiben.

Wasser für das Funktionieren der Ökosysteme ist deshalb einer von drei strategischen Schwerpunkten im Entwicklungsplan 2012–2016 der Eawag. Damit wollen wir Antworten erarbeiten auf Fragen, wie sich die menschengemachten Umweltveränderungen auf die Populationen von Wasserorganismen und auf die Wasserlebensräume auswirken, wie die Biodiversität die Ökosystemfunktionen beeinflusst und wie sich verbaute Gewässer effektiv sanieren und revitalisieren lassen. Dazu entwickeln wir zurzeit unter anderem zwei umfangreiche Projekte. Das

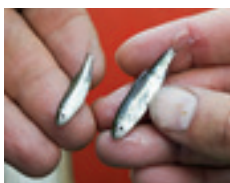
Programm Fließgewässer Schweiz soll die Umsetzung der 2011 in Kraft getretenen Gewässerschutzrevision wissenschaftlich begleiten und unterstützen. Mit dem Projekt Eco Impact wollen wir untersuchen, wie sich eine Reduktion der Mikroverunreinigungen in den Kläranlagen auf die Ökosystemfunktionen der Gewässer auswirkt.

Diese Aktivitäten bauen auf der soliden Basis der bisherigen Forschung auf, die wir Ihnen in der aktuellen Ausgabe der Eawag News vorstellen: die Entwicklung von Konzepten und Bewertungsmethoden in der Ökotoxikologie, Feldstudien über die Effekte von Nährstoffeinträgen in Seen, Ansätze für ein nachhaltiges Wassermanagement angesichts der Klimaveränderung und gegenteiliger Interessen, Computermodelle zur Vorhersage von Auswirkungen verschiedener Managementmassnahmen, die Rolle der Wasserkraft bei der zukünftigen Stromversorgung. Ein Grossteil dieser Forschung beruht auf Daten aus Monitorings, was die Wichtigkeit solcher Programme deutlich macht.

Mit ihrem Engagement will die Eawag dazu beitragen, die wissenschaftlichen und in der Praxis anwendbaren Grundlagen für den nachhaltigen Umgang mit der Ressource Wasser zu erarbeiten – einen Umgang, der sowohl die menschlichen Bedürfnisse abdeckt als auch sicherstellt, dass die Gewässer ihre Ökosystemfunktionen ausüben können.

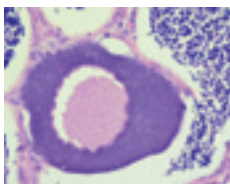
## Fokus: Lebensraum Wasser – was er leistet, was er braucht

### 4 **Wie Nährstoffe Gewässer verändern**



Die Reduktion der Phosphorbelastung in den Seen ist ein Erfolg im Schweizer Gewässerschutz. Um die Erträge zu erhöhen, fordern Fischereikreise nun eine gezielte Zufuhr von Nährstoffen. Die Düngung nährstoffarmer Seen kann jedoch zum Aussterben und Verschmelzen von Arten führen.

### 8 **Hormonaktive Stoffe: messen, bewerten, minimieren**

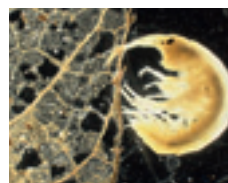


Hormonaktive Stoffe im Abwasser können die Gesundheit von Wassertieren beeinträchtigen. Ökotoxikologische Testmethoden verbessern die Messung und Bewertung dieser Substanzen. Sie liefern wichtige Entscheidungshilfen für Massnahmen zur Verminderung.

### 12 **Ohne Nullpunkt keine Aussagen über Veränderungen**

Die Eawag-Wissenschaftler Pascal Vonlanthen und Florian Altermatt sind überzeugt, dass langfristig angelegte Monitoring-Programme unverzichtbar sind, um Biodiversität und Ökosystemleistungen schützen zu können.

### 14 **Das Vorkommen von Lebewesen vorhersagen**



Wirbellose Kleinlebewesen haben sehr verschiedene Ansprüche an ihren Wasserlebensraum. Mit einem an der Eawag entwickelten Computermodell lassen sich die Lebensgemeinschaften am Flussgrund vorhersagen. Es soll in Zukunft ein integratives Flussmanagement unterstützen.

### 18 **Wassermanagement: Schutz und Nutzen verbinden**

Gewässer erbringen sozioökonomische Leistungen, benötigen aber auch bestimmte ökologische Rahmenbedingungen, damit sie ihre Funktionen wahrnehmen können. Gefragt ist deshalb ein nachhaltiges Ressourcenmanagement. Wie ein solches aussehen könnte, zeigen zwei Forschungsprojekte am Spöl und im Auengebiet Sandey.

### 22 **Potenzial und Grenzen der Wasserkraft**



Die Schweizer Wasserkraft steht vor milliardenschweren Herausforderungen. Es gilt, wirtschaftlich und ökologisch verträgliche Lösungen für die optimierte Spitzenstromproduktion und Speicherung von Überschussstrom aus erneuerbaren Quellen zu finden. Im Idealfall profitieren die Gewässer und die Stromwirtschaft.

### 26 **Forschung und Praxis müssen zusammenarbeiten**



In der Schweiz sind die Herausforderungen für die Gewässerforschung und die Fachleute in der Praxis gross. Das Forschungsprogramm Fließgewässer Schweiz soll die anstehenden Aufgaben angehen und dafür sorgen, dass Wissenschaft und Praxis mehr zusammenspannen.

## In Kürze

- 28 **Ausgezeichnet: Fundación Sodis**
- 28 **Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser**
- 28 **Swiss Water Partnership**

**eawag**  
aquatic research

Herausgeberin, Vertrieb: Eawag, Postfach 611, 8600 Dübendorf, Schweiz,  
Tel. +41 (0)58 765 55 11, Fax +41 (0)58 765 50 28, [www.eawag.ch](http://www.eawag.ch)

Redaktion: Andres Jordi

Mitarbeit: Andri Bryner, Anke Poiger

Übersetzungen: Jeff Acheson (E), Laurence Frauenlob-Puech (F)

Copyright: Nachdruck möglich nach Absprache mit der Redaktion.

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

Konzept: TBS Identity, Zürich

Satz, Bild, Grafiken und Layout: Peter Nadler, Fällanden

Gedruckt: auf Recyclingpapier

Abonnement und Adressänderung: Neuabonnentinnen und Neuabonnenten  
willkommen, [eawag.news@eawag.ch](mailto:eawag.news@eawag.ch)

ISSN 1420-3979



Piet Spaak, Biologe,  
leitet die Abteilung  
Aquatische Ökologie.  
Koautor: Pascal  
Vonlanthen

## Wie Nährstoffe Gewässer verändern

Die Reduktion der Phosphorbelastung in den Seen ist ein Erfolg im Schweizer Gewässerschutz. Um die Erträge zu erhöhen, fordern Fischereikreise nun aber für den Brienzersee und andere Gewässer eine Verminderung der Phosphorelimination in den Kläranlagen. Die Zufuhr von mehr Phosphor kann in nährstoffarmen Seen allerdings zum Aussterben und Verschmelzen von Arten führen und verändert die Gewässerökosysteme unwiederbringlich.

Dank des Baus von Kläranlagen, des Verbots von Phosphat in Waschmitteln im Jahr 1985 und der zusätzlichen Phosphatfällung in den Kläranlagen ging die Überdüngung in den Schweizer Seen während der letzten Jahrzehnte stark zurück. Dadurch verbesserte sich die Gewässerqualität deutlich und die Lebensbedingungen und die Artenzusammensetzung näherten sich wieder einem natürlichen Zustand an. Insbesondere weil Fischerinnen und Fischer die sinkenden Fangerträge in gewissen Seen teilweise mit dem Fehlen des Nährstoffs in Verbindung bringen, wird der Phosphoreintrag in jüngster Zeit wieder diskutiert. So verlangen zwei im National- und Ständerat eingereichte Motionen, dass im Rahmen eines Pilotprojekts wieder mehr Phosphor in den Brienzersee

Im Rahmen des Projekt Lac erfassten Wissenschaftler die Artenvielfalt im Brienzersee. Das Inventar offenbarte etwa, dass in dessen Tiefen an den Nährstoffgehalt angepasste kleinwüchsige Felchenarten leben.



Stefan Kubi

eingeleitet werden soll. Die Initiantinnen und Initianten versprechen sich davon eine höhere Primärproduktion (Algenwachstum) und damit auch mehr Fische [1]. Für den Vierwaldstättersee und weitere Seen macht man sich ähnliche Überlegungen.

**Verdrängung und Verschmelzung von Arten.** Ohne Nährstoffe wären unsere Gewässer tot und für jegliches Leben ungeeignet. Damit Lebewesen in einem See existieren können, brauchen sie ein Minimum an Nährstoffen. Diese gelangen natürlicherweise durch Erosion und Zersetzungsprozesse in ein Gewässer. Das Nährstoffangebot bestimmt auch, wie viele Organismen in einem Ökosystem leben können, das heisst, wie produktiv dieses ist. Meist ist es der am wenigsten häufig verfügbare Nährstoff, der das Wachstum beschränkt. Für das Wachstum von Algen wirkt in unseren Breitengraden fast immer Phosphor limitierend. Algen sind die wichtigsten Primärproduzenten und die wesentliche Nahrungsgrundlage der anderen Wasserorganismen im Nahrungsnetz unserer Seen. Eine bestimmte Menge an Phosphor und anderen Nährstoffen ist für ein funktionierendes Gewässerökosystem also unabdingbar. Wie gross diese Menge ist, ist von See zu See verschieden und hängt zum Beispiel vom Einzugsgebiet ab. Das Nährstoffangebot beeinflusst auch die Zusammensetzung der Arten.

Vor allem der stark gestiegene Einsatz phosphorhaltiger Waschmittel und Dünger nach dem Zweiten Weltkrieg brachten jedoch unnatürlich hohe Einträge von Phosphor aus Haushalten und aus der Landwirtschaft in viele Schweizer Gewässer mit sich. Dies führte zu einer starken Vermehrung von Algen (Algenblüten) und als Folge davon zu Sauerstoffmangel und Fischsterben. Heute sind verschiedene Seen wieder so sauber und nährstoffhaltig wie vor der Verschmutzung (Abb. 1).

Die Überdüngung der Gewässer (Eutrophierung) wirkte sich nicht nur negativ auf die chemische Gewässerqualität aus, sondern veränderte auch die aquatischen Ökosysteme. Diese Veränderungen sind zum Teil bis heute sichtbar. In verschiedenen Untersuchungen konnte die Eawag dokumentieren, wie sich zum Beispiel die Artenzusammensetzung bei den Wasserflöhen infolge der Eutrophierung entwickelte. Die zum Zooplankton ge-

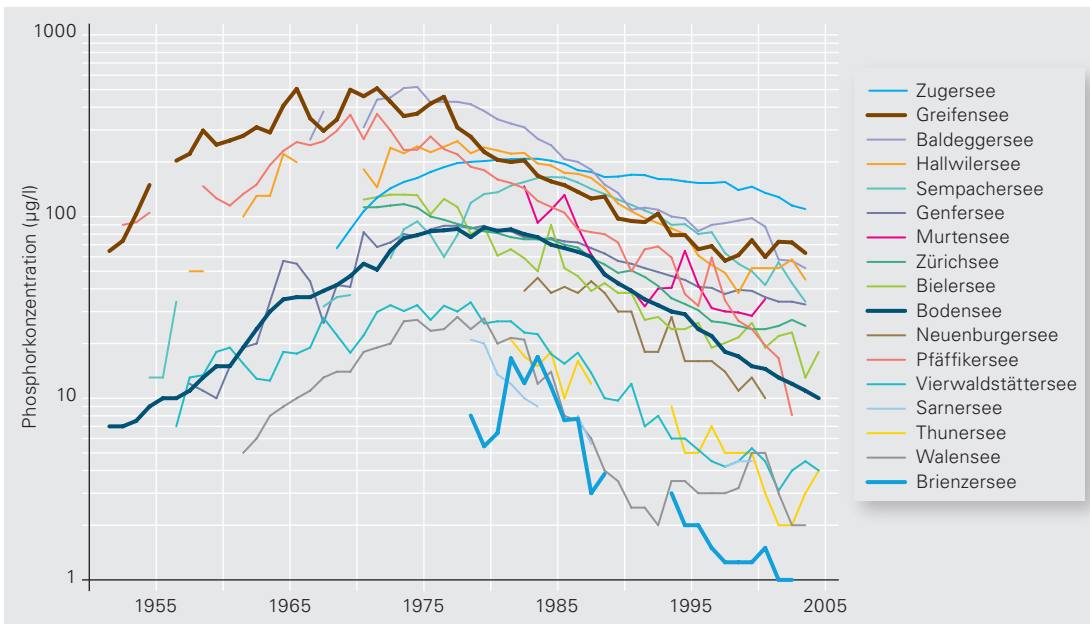


Abb. 1: Aufgrund von Gewässer-schutzmassnahmen gingen die Phosphorkonzentrationen in Schweizer Seen zurück.

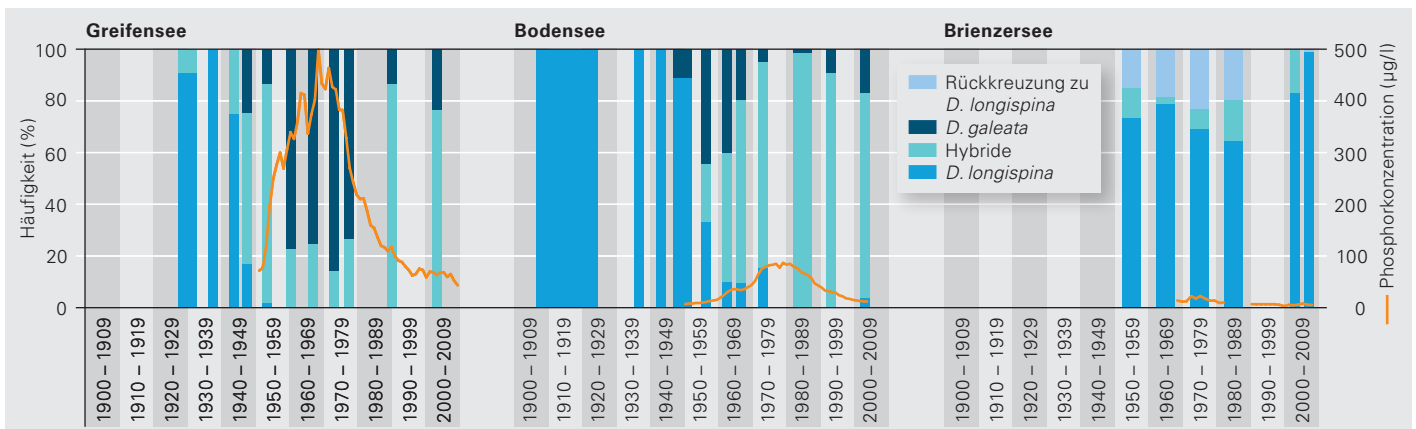
hörenden Krebstiere ernähren sich von Algen und sind für Fische eine wichtige Nahrungsquelle. Für viele Felchen etwa stellen sie die hauptsächliche Nahrung dar.

Mit genetischen Analysen von Dauerstadien aus den Sedi-menten von gering bis stark verunreinigten Seen konnten wir re-konstruieren, dass vor dem Nährstoffeintrag durch den Menschen *Daphnia longispina* in allen untersuchten Schweizer Gewässern die vorherrschende Wasserflohart gewesen war [2, 3]. Während der Eutrophierungsphase gelang es der invasiven Art *Daphnia galeata*, sich in vielen Seen, zum Beispiel im Bodensee und im Greifensee, auszubreiten und *Daphnia longispina* zu verdrängen. Teilweise verschmolzen die beiden Arten auch miteinander und bildeten Hybride (Abb. 2). In vielen Seen kommen deshalb heute ausschliesslich *Daphnia galeata* und die Hybridform vor, auch wenn sich die Nährstoffverhältnisse wieder normalisiert haben. In Seen wie dem Brienersee, die natürlicherweise sehr wenig

Phosphor enthalten und weniger stark von der Eutrophierung betroffen waren, konnte sich *Daphnia longispina* besser halten. Allerdings haben hier Rückkreuzungen zwischen den Hybriden und *Daphnia longispina* stattgefunden. Daher besitzen heutige Individuen von *Daphnia longispina* auch genetisches Material von *Daphnia galeata* – in ihrer ursprünglichen genetischen Aus-stattung existiert die Art *Daphnia longispina* in vielen Seen nicht mehr. Mit anderen Worten: Solche Veränderungen können dauer-haft und unumkehrbar sein.

**Verlust ökologischer Nischen.** Mithilfe von Experimenten konn-ten wir kürzlich nachweisen, was die Ursache für die Verände-rungen in der Artenzusammensetzung war. Wir zogen Klone beider Arten aus verschiedenen Seen unter nährstoffarmen und nährstoffreichen Bedingungen im Labor auf [4]. Bei einem spär-lichen Futterangebot, wie es in nährstoffarmen (oligotrophen)

Abb. 2: Abhängig von der Phosphorkonzentration veränderte sich die Artenzusammensetzung bei den Daphnien.





Eawag

Bergung eines Sedimentbohrkerns aus dem Greifensee: Wie sich die Artenzusammensetzung bei Wasserflöhen in Abhängigkeit der Phosphorkonzentration im Lauf der Zeit veränderte, lässt sich mithilfe von Dauerstadien in den Sedimenten rekonstruieren.

Seen typisch ist, gedieh *Daphnia longispina* besser, bei eutrophen Verhältnissen hingegen *Daphnia galeata*. Das erklärt auch, warum *Daphnia longispina* nicht in allen Schweizer Seen verdrängt wurde: In den Sedimenten der wenigen Seen, die von der Eutrophierung bloss in geringem Mass betroffen waren, fanden wir nur wenige oder keine Dauerstadien von *Daphnia galeata*. So kam die Art im saubersten See der Schweiz, dem Brienersee, praktisch nie vor, obwohl sie im benachbarten Thunersee auftritt. Die Untersuchungen zeigen sogar, dass vor 1950 im Brienersee überhaupt keine ständige Daphnien-Population existiert hat. Erst mit dem (verhältnismässig geringen) Phosphoreintrag konnte sich eine dauerhafte Population von *Daphnia longispina* ansiedeln.

Das Verschwinden und Verschmelzen von Arten als Folge der Eutrophierung haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Eawag nicht nur bei Wasserflöhen beobachtet, sondern auch bei den Fischen. So konnten Pascal Vonlanthen und Ole Seehausen von der Abteilung Fischökologie und Evolution zusammen

mit Kollegen der Universität Bern jüngst nachweisen, dass die Überdüngung der Schweizer Seen die Zahl der einheimischen Felchenarten innert weniger Jahrzehnte schweizweit um 38 Prozent dezimiert hat [5]. Je höher die maximalen Phosphorkonzentrationen in den untersuchten Seen einst lagen, desto höher ist der Artenverlust (Abb. 3A).

In sieben Seen – im Genfer-, Murten-, Sempacher-, Baldegger-, Hallwiler-, Greifen- und Pfäffikersee – sind die ursprünglichen Felchenarten heute vollständig ausgestorben und wurden durch den Besatz mit anderen Felchenarten ersetzt. Keinen Artenrückgang hinnehmen mussten einzig die tiefen und von der Überdüngung weniger stark betroffenen Alpenrandseen Thuner-, Briener- und Vierwaldstättersee. Im Walen- und im Zürichsee leben heute noch je zwei von ehemals drei historisch belegten Felchenarten, im Bodensee konnten die Forschenden noch vier von fünf Arten nachweisen. Die Studie zeigt auch, dass in mindestens 25 Seen im europäischen Alpenraum teilweise mehrere endemische Felchenarten lebten, das heisst Arten, die ausschliesslich im jeweiligen See und sonst nirgends vorkamen.

Die Abnahme der Artenvielfalt bei den Felchen ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass sich zuvor eigenständige Spezies vermischten und untereinander fortpflanzten. Infolge des massiven Phosphoreintrags zwischen 1950 und 1990 erhielten viele Seen am Grund und im tiefen Wasser kaum noch Sauerstoff. Damit gingen ökologische Nischen für jene Spezialisten verloren, die sich seit der letzten Eiszeit vor rund 15 000 Jahren entwickelt und an ein Leben in grösseren Tiefen angepasst hatten. Besonders die tiefen und nährstoffarmen Seen scheinen ein einzigartiges Reservoir für die Entstehung neuer Arten zu sein. Mit dem Verschwinden dieser Lebensräume mussten die Fische in die Habitate anderer Felchenarten ausweichen und kreuzten sich mit diesen. Dadurch verloren sie innert weniger Generationen ihre genetische und funktionale Einzigartigkeit. Das kommt faktisch einer Umkehr der Artenstehung gleich. In stärker mit Phosphor belasteten Seen ist die genetische Differenzierung zwischen den verbliebenen Arten heute zudem geringer als in nährstoffarmen Gewässern (Abb. 3B). Damit gingen auch Spezialisierungen an bestimmte Laichzeiten oder besondere Ernährungsweisen verloren und die Variationen in der Gestalt der Fische wurden geringer.

**Zurück in die «guten» alten Zeiten?** Die Untersuchungen über die Wasserflöhe und die Felchen führen eindrücklich vor Augen, dass sich in Seen schon eine geringfügige Nährstoffanreicherung negativ auf deren natürlichen Zustand auswirken kann, indem sich das Spektrum der Arten verändert, die genetische Differenzierung verloren geht und Arten aussterben können. Ausserdem machen sie deutlich, dass solche Veränderungen unter Umständen unumkehrbar sind. So lassen sich die verschwundenen endemischen Felchenarten oder die ursprüngliche *Daphnia longispina* auch in jenen Gewässern nicht mehr zurückholen, wo sich die Nährstoffverhältnisse wieder normalisiert haben.

Mit den eingangs erwähnten Massnahmen hat die Phosphorbelastung in den meisten Schweizer Seen in den vergangenen drei Jahrzehnten wieder abgenommen. In den saubersten beziehungsweise nährstoffärmsten Seen wie dem Briener-, Walen-

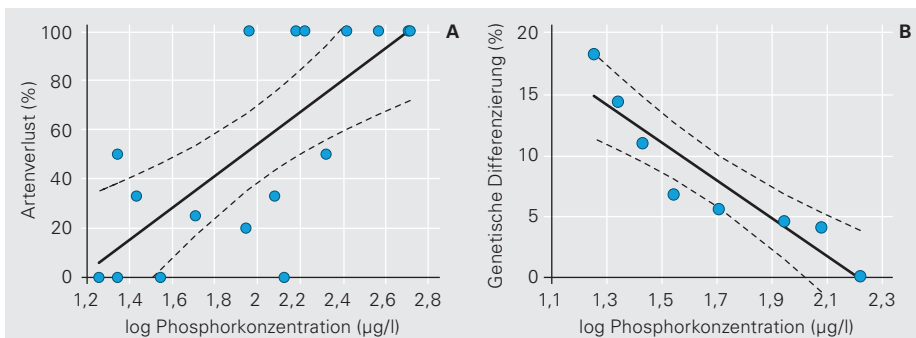


Abb. 3: Höhere Phosphorkonzentrationen führten bei Felchen zu einem grösseren Verlust von Arten (A) und zu geringeren genetischen Unterschieden zwischen den verschiedenen Populationen (B).

oder Vierwaldstättersee betragen die Phosphorkonzentrationen heute nur noch weniger als fünf Mikrogramm pro Liter (siehe Abb. 1). Aus Sicht des Gewässerschutzes ist das ein grosser Erfolg. Die Forderungen aus Fischereikreisen, die Nährstoffelimination in solchen Seen neu zu überdenken, stellen diesen nun in Frage.

Die Befürworterinnen und Befürworter dieser Idee schlagen zum Beispiel für den Brienzersee einen Grenzwert für Phosphat von zwei bis fünf Mikrogramm pro Liter vor, was den Bedingungen in den 1970er-Jahren entspricht. Ihrer Ansicht nach soll diese Massnahme wieder «ein ökologisch erstrebenswertes Pflanzen- und Fischwachstum» erlauben. Denn zogen die Berufsfischer während der Periode mit erhöhtem Nährstoffeintrag jährlich im Durchschnitt gegen 15 Kilogramm Felchen pro Hektare aus dem See, ist es heute weniger als 1 Kilogramm [6]. Das führen die Initiantinnen und Initianten auf einen Nährstoffmangel im See zurück. Mit dem Ziel, die Algenproduktion und damit die Fischereierträge wieder zu erhöhen, streben sie einen teilweisen oder gar vollständigen Verzicht auf die Phosphatfällung in den Kläranlagen im Einzugsgebiet des Brienzersees an. Eine Erhöhung des Nährstoffeintrags soll zudem auch die seit 1999 regelmässig auftretenden Einbrüche der Daphnienpopulationen verhindern und damit die wichtigste Nahrung der Felchen sicherstellen.

Obwohl Daphnien in den letzten 30 Jahren für die Felchen die bedeutendste Futterquelle darstellten, konnten wir keine Dauerstadien in den Seesedimenten vor 1950 nachweisen. Auch ältere Studien über das Plankton im Brienzersee erwähnen das Fehlen der Wasserflöhe [7]. Das deutet darauf hin, dass die endemischen Felchenarten sehr wahrscheinlich ohne Daphnien als ständige Nahrungsquelle auskamen. Der heute wieder auftretende zeitweilige Rückgang der Daphnienpopulationen sollte darum als Rückkehr zu einem natürlichen Zustand angesehen werden und nicht als Bedrohung für die Felchen.

**Weniger Fischfang, dafür mehr endemische Arten.** Eine systematische Erfassung der Fischarten im Rahmen des Proje Lac der Eawag und des Naturhistorischen Museums Bern im Herbst 2011 brachte ans Licht, dass in den Tiefen des Brienzersees naturverlassende Felchenpopulationen leben. Die geringen Fangträge der Berufsfischer weisen also nicht auf eine generelle Fischarmut im See hin. Vielmehr sank der Aufwand der Fischerinnen und Fischer gemäss dem Fischereinspektorat des Kantons Bern seit Ende

der 1970er-Jahre laufend und beträgt heute nur noch ein Fünftel von damals. Die nicht normierte Statistik der kommerziellen Fangträge zeigt also ein verzerrtes Bild.

Vor diesem Hintergrund wird das vorgeschlagene Phosphormanagement obsolet. Die künstliche Düngung eines natürlichen Sees würde diesen zudem zu einer Fischzucht degradieren, was nicht im Sinne einer nachhaltigen Nutzung der natürlichen Ressourcen ist. Nährstoffreiche Seen mit grösserer Produktivität gibt es in der Schweiz einige, die wenigen von Natur aus nährstoffarmen Gewässer und ihre einzigartige Biodiversität gilt es dagegen zu erhalten – insbesondere wenn man die möglichen ökologischen Konsequenzen aufgrund der Erfahrungen der vergangenen 80 Jahre kennt. ○ ○ ○

[1] Phosphatmanagement Brienzersee: 11.4091 Motion von Ständerat Werner Luginbühl, 11.4158 Motion von Nationalrat Erich von Siebenthal.

[2] Brede N., Sandrock C., Straile D., Jankowski, T., Spaak, P., Streit B., Schwenk K. (2009): The impact of human-made ecological changes on the genetic architecture of *Daphnia* species. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106, 4758–4763.

[3] Rellstab C., Keller B., Girardclos S., Anselmetti F., Spaak, P. (2011): Anthropogenic eutrophication shapes the past and present taxonomic composition of hybridizing *Daphnia* in unproductive lakes. *Limnology and Oceanography* 56, 292–302.

[4] Spaak P., Fox J.A., Hairston Jr. N.G. (2012): Modes and mechanisms of a *Daphnia* invasion. *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences Series B*, online veröffentlicht.

[5] Vonlanthen P., Bittner D., Hudson A.G., Young K., Müller R., Lundsgaard-Hansen B., Roy D., Di Piazza S., Largiader C.R., Seehausen O. (2012): Eutrophication causes speciation reversal in whitefish adaptive radiations. *Nature* 482, 357–362.

[6] Eawag (2012): Fakten zum Phosphor im Brienzersee, [www.eawag.ch/phosphor\\_brienzersee](http://www.eawag.ch/phosphor_brienzersee)

[7] Flück H. (1926): Beiträge zur Kenntnis des Phytoplanktons des Brienzersees. Dissertation ETH Zürich.



# Hormonaktive Stoffe: messen, bewerten, minimieren



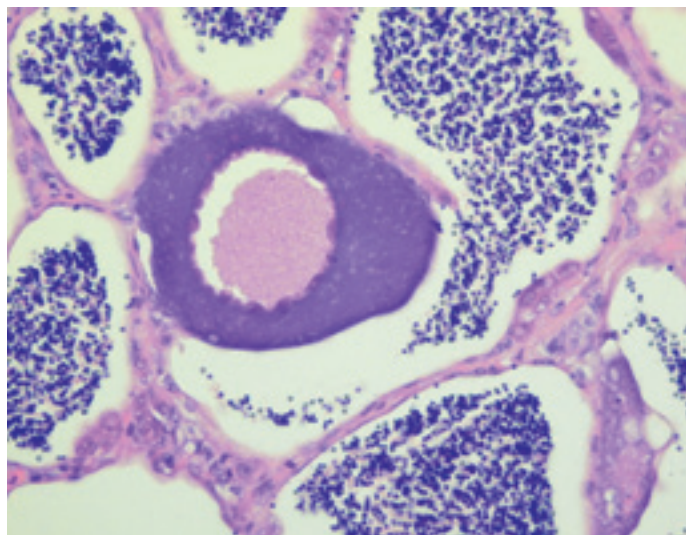
Inge Werner, Biologin, ist Leiterin des Oekotoxizentrums der Eawag und ETH Lausanne. Koautoren: Cornelia Kienle, Petra Kunz, Étienne Vermeirssen, Robert Kase

Hormonaktive Stoffe, die vor allem über das Abwasser in Oberflächengewässer gelangen, können die Gesundheit von Wassertieren beeinträchtigen. Ökotoxikologische Testmethoden verbessern die Messung und Bewertung dieser Substanzen. Sie liefern wichtige Entscheidungshilfen für Massnahmen zur Verminderung. So lässt sich mit ihnen die Wirkung zusätzlicher Reinigungsstufen in den Kläranlagen evaluieren.

Englische Forscher waren erstaunt, als sie zu Beginn der 1990er-Jahre in Flüssen immer wieder männliche Fische entdeckten, die als Intersex ausgeprägt waren, also sowohl männliche als auch weibliche Geschlechtsmerkmale aufwiesen (Abb. 1). Was konnte die Ursache für diese Anomalien sein? Die Fische traten besonders häufig in Fließgewässern unterhalb von Kläranlagen auf, bei denen das Flusswasser einen grossen Anteil an gereinigtem Abwasser enthielt. Nachfolgende Untersuchungen zeigten, dass in gereinigtem Abwasser Substanzen vorkamen, die östrogen auf Fische wirkten und so männliche Fische verweiblichen konnten [1].

Zu den östrogen aktiven Stoffen gehören neben den natürlichen Östrogenen von Tieren und vom Menschen auch synthetische Substanzen wie Ethinylöstradiol aus Antibabypillen

Abb. 1: Schnitt durch Hodengewebe eines Rotaugen-Männchens aus dem Genfersee: In der Bildmitte ist eine Eizelle sichtbar.



Daniel Bernet

oder Bisphenol A, das zur Herstellung zahlreicher Kunststoffe verwendet wird. Diese wirken ähnlich wie die natürlichen weiblichen Sexualhormone und können sie nachahmen oder ihre Wirkung blockieren. Östrogen aktive Stoffe beeinträchtigen die Entwicklung, Fortpflanzung und Gesundheit von Wassertieren. Insbesondere Fische sind betroffen, da ihr Hormonsystem dem des Menschen ähnlich ist. Bemerkenswert ist, dass die Stoffe schon in sehr geringen Konzentrationen von weniger als einem Nanogramm pro Liter (das entspricht etwa einem Kilogramm Wirkstoff im Bielersee) eine Wirkung auf Fische haben können.

**Auch in der Schweiz ein Problem.** Die hormonaktiven Substanzen gelangen aus zahlreichen Quellen in die Gewässer. Die wichtigste Quelle ist das kommunale Abwasser, da Kläranlagen die Stoffe meist nur unzureichend entfernen. Das Projekt Fischnetz identifizierte östrogen aktive Substanzen als einen der Faktoren, die in der Schweiz einen Rückgang der Forellenzahlen um mehr als 60 Prozent seit den frühen 1980er-Jahren bewirkt haben. Von 2002 bis 2007 wurde das nationale Forschungsprogramm über hormonaktive Substanzen (NFP 50) mit dem Ziel durchgeführt, das Risiko hormonaktiver Substanzen in der Umwelt abzuschätzen. Es stellte sich heraus, dass die Östrogenkonzentrationen flussabwärts von Kläranlagen deutlich grösser waren als flussaufwärts (Abb. 2). Auch die Vitellogeninkonzentrationen in männlichen Regenbogenforellen waren teilweise erhöht [2]. Das Vorkommen von Vitellogenin in männlichen Fischen zeigt eine Belastung mit östrogenen Stoffen an. Das Eiweiss ist ein Vorläufer des Eidotterproteins und wird natürlicherweise nur bei geschlechtsreifen weiblichen Fischen gebildet. Die Schlussfolgerungen des NFP 50 waren unter anderem:

- ▶ Hormonaktive Substanzen sind in der Schweiz ein Problem in Fließgewässern mit einer unzureichenden Verdünnung des gereinigten Abwassers,
- ▶ die Schweizer Kläranlagen sollen auf ihre Effizienz und ihr Optimierungspotenzial überprüft werden,

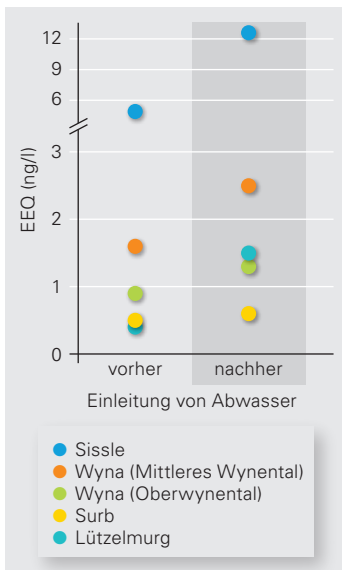


Abb. 2: Durchschnittliche Konzentration von östrogen aktiven Stoffen (EEQ = Östradiol-Äquivalente) in den Schweizer Flüssen Sissle, Surb, Lützelburg und Wyna vor und nach der Einleitung von gereinigtem Abwasser aus Kläranlagen. Die Studie erfolgte 2004, mittlerweile wurde die Einleitung von Abwasser in die Sissle massiv reduziert.

- ▶ die schnelle Entwicklung international standardisierter Methoden zum Nachweis östrogenen Substanzen und zur Überprüfung der Gewässerqualität muss unterstützt werden,
  - ▶ für die praktische Anwendung müssen wissenschaftlich basierte Qualitätskriterien für hormonelle Aktivität in Gewässern abgeleitet werden, die dann in die Schweizerische Gewässerschutzverordnung aufgenommen werden sollen.
- Einigen dieser Forderungen ist das Oekotoxzentrum zusammen mit dem Bundesamt für Umwelt (Bafu), der Eawag und weiteren Partnern in den letzten Jahren nachgegangen.

**In vier Schritten die Gewässerqualität beurteilen.** Obwohl das NFP 50 gezeigt hatte, dass in manchen Fliessgewässern unterhalb von Kläranlagen mit kritischen Konzentrationen östrogen aktiver Substanzen zu rechnen ist, fehlte weiterhin ein wissenschaftlich abgestütztes Vorgehen, um die Gewässerbelastung mit solchen Mikroverunreinigungen zu beurteilen. Ein Beurteilungskonzept für Mikroverunreinigungen, das wir zusammen mit der Eawag im Rahmen des Projekts Strategie Micropoll im Auftrag des Bafu erarbeiteten, schliesst inzwischen diese Lücke [3]. Auf der Basis von Mess- und Toxizitätsdaten wurden dabei zunächst 47 Stoffe identifiziert, die in der Schweiz repräsentativ für die Gewässerbelastung mit Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser sind. Die Auswahlliste enthält verschiedene Arzneimittel, Biozide und Industriechemikalien und auch acht Stoffe mit hormonaktiver Wirkung. Um die Ökotoxizität dieser Substanzen zu bewerten, erarbeiteten wir wirkungsbasierte Qualitätskriterien, also Konzentrationsgrenzen, die für einen Schutz der aquatischen Umwelt nicht überschritten werden sollten. Als Grundlage dafür dienten akute und chronische Toxizitätsdaten von Algen, wirbellosen Tieren und Fischen.

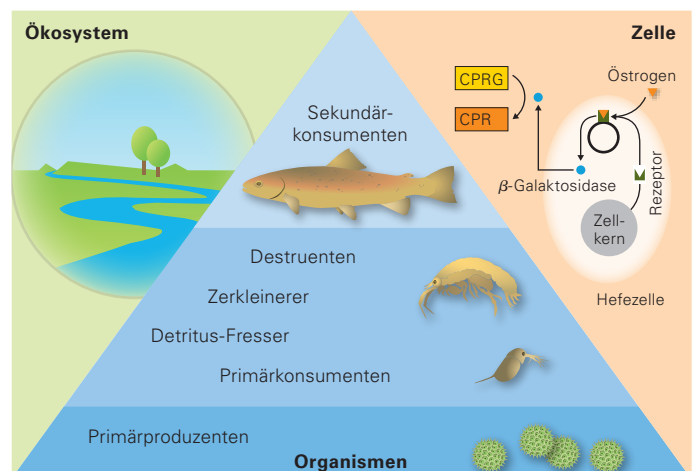
Das Beurteilungskonzept schlägt für die Analyse der Gewässerqualität ein vierstufiges Verfahren vor: Als Erstes werden potenziell belastete Gewässer ermittelt, indem deren Abwasseranteil geschätzt wird. Ist dieser entsprechend hoch, wird unter-

sucht, wie gross die Belastung mit Mikroverunreinigungen ist. Anschliessend wird diese ökotoxikologisch bewertet: Je nachdem, wie gross die Umweltkonzentration im Vergleich zum Qualitätskriterium ist, teilt man die Wasserqualität in eine von fünf Zustandsklassen ein. Der letzte Schritt dient dazu, die Hauptursachen für die Verunreinigungen zu ermitteln und Verminderungsmassnahmen vorzuschlagen. Mit diesem Vorgehen lässt sich identifizieren, in welchen Gewässerabschnitten kritische Konzentrationen von Mikroverunreinigungen auftreten und bei welchen Kläranlagen die Elimination dieser Stoffe verbessert werden muss.

**Wie lassen sich Mikroverunreinigungen minimieren?** Zusätzliche Reinigungsstufen in der Kläranlage können den Eintrag von Mikroverunreinigungen, speziell auch von hormonaktiven Stoffen, in die Gewässer reduzieren. Im Rahmen des Projekts Strategie Micropoll wurden zwei technische Verfahren in einer Pilotanlage auf ihre Eignung überprüft: im einen Fall eine Ozonierung gefolgt von einer biologisch aktiven Stufe, im anderen Fall eine Aktivkohlebehandlung mit nachfolgender Filtration. Dabei untersuchten verschiedene Projektpartner mithilfe zahlreicher Biotests (Abb. 3), ob sich die Mikroverunreinigungen mit diesen Verfahren besser entfernen lassen und ob sich die Tests für die Erfolgskontrolle in Kläranlagen eignen [4].

Es wurden zwei verschiedene Arten von Biotests eingesetzt: So genannte *In-vitro*-Tests können Effekte auf spezifische zelluläre Prozesse in Zelllinien oder Einzellern und daher Chemikalienklassen wie zum Beispiel Östrogene hochsensitiv nachweisen. Sie zeigen aber nur sehr begrenzt, wie Substanzen auf ganze Organismen wirken. Bei *In-vivo*-Tests nutzt man ganze Organismen und untersucht die Effekte auf biologische Funktionen wie Wachstum, Sterblichkeit, Vermehrung oder Vitellogeninbildung. Sie erfassen die Auswirkungen aller Substanzen in einer Abwasserprobe, geben allerdings oft nur wenige Informationen über die verantwortlichen Substanzklassen.

Abb. 3: Die Effekte von Mikroverunreinigungen wurden im Projekt Strategie Micropoll auf der Ebene der Organismen, der Zelle und des Ökosystems untersucht. Je höher die Organisationsebene, desto schwieriger sind Effekte einzelnen Einflussfaktoren zuzuordnen.





Peter Schönenberger

Cornelia Kienle und Petra Kunz vom Oekotoxzentrum diskutieren über die Ergebnisse eines Hefezell-Östrogentests.

An verschiedenen Stellen der Pilotanlage wurden Abwasserproben genommen und anschliessend mit den verschiedenen Biotests und chemischer Analytik analysiert. Wie die *In-vitro*-Tests zeigten, verringerte bereits die bestehende biologische Reinigungsstufe die toxische Wirkung des Abwassers. Die Substanzen liessen sich alleine damit jedoch nicht vollständig entfernen. Das Abwasser enthielt unter anderem immer noch Stoffe mit östrogenen Wirkung in relevanten Konzentrationen. Gemäss den spezifischen *In-vitro*-Tests entfernte dagegen eine zusätzliche Behandlung mit Ozongas oder mit Aktivkohle über 80 Prozent der verbliebenen Mikroverunreinigungen. Die chemische Analyse bestätigte dieses Ergebnis.

Auch die *In-vivo*-Tests mit Regenbogenforellen zeigten aufgrund der zusätzlichen Reinigungsstufen eine verringerte Toxizität an. So erhöhten sich die Schlupfrate und das Gewicht der Fischembryonen und deren Sterblichkeit nahm ab. Die Ergebnisse der übrigen *In-vivo*-Tests waren nicht einheitlich. Dies lag unter anderem an der ungenügenden Empfindlichkeit der Testsysteme. Der Vergleich der verwendeten Biotests zeigt, dass es keinen Einzeltest gibt, der sich für die Gesamtbeurteilung der Toxizität einer Abwasserprobe nutzen lässt. Um die Entfernung von Mikroverunreinigungen zu kontrollieren, eigneten sich die *In-vitro*-Tests in der untersuchten Pilotanlage allerdings besser als die *In-vivo*-Tests. Sie sind auch einfacher zu handhaben und bieten sich daher für Routineüberwachungen an.

Die Versuche mit den Biotests wiesen nicht nur nach, dass eine Ozonierung oder eine Behandlung mit Aktivkohle ein breites Spektrum von Mikroverunreinigungen entfernen und die Belastung des Abwassers mit hormonaktiven Substanzen signifikant reduzieren können. Sie gaben auch keine Hinweise darauf, dass bei der Kombination von Ozonierung und biologisch aktiver Stufe stabile, ökotoxikologisch problematische Umwandlungsprodukte entstehen. Um das Risiko zu minimieren, dass solche Verbindun-

gen in die Gewässer gelangen, sollte daher nach einer Ozonierung stets eine Stufe mit biologischer Aktivität nachgeschaltet werden.

**Wie messen und überwachen?** Aufgrund dieser Resultate hat der Bund beschlossen, zum Schutz der Trinkwasserressourcen und der Wasserlebewesen ausgewählte Kläranlagen entsprechend auszubauen. In Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern hat er dazu eine verursachergerechte gesamtschweizerische Finanzierungslösung erarbeitet. Gegenwärtig wird an der dazu notwendigen Änderung des Gewässerschutzgesetzes gearbeitet.

Trotz des Ausbaus von Kläranlagen bleibt es notwendig, die Gewässerqualität bezüglich hormonaktiver Substanzen zu überwachen und regelmässig zu messen. Da östrogene Stoffe bereits in sehr geringen Konzentrationen biologisch aktiv sind, stösst der chemische Nachweis von Einzelstoffen allerdings an seine Grenzen. Ausserdem ist die Aussagekraft der chemischen Analytik limitiert, weil sich die Wirkungen von Stoffen mit gleichem Wirkmechanismus addieren. So kann die Kombination verschiedener Östrogene, die jedes für sich in unwirksamen Konzentrationen vorliegen, gesamthaft eine biologische Wirkung hervorrufen. Um die gesamte Wirkung östrogen wirksamer Stoffe sensitiv zu bestimmen, bieten sich ergänzend zur chemischen Analytik *In-vitro*-Testsysteme an.

Im Auftrag des Bafu entwickeln wir zusammen mit Vertretern des Bundes, den Gewässerschutzfachstellen, der Forschung und privaten Büros zurzeit ein Konzept, um die Wasserqualität anhand von Biotests routinemässig zu beurteilen. Geeignete Tests unter anderem für die Messung östrogenen Aktivität müssen zahlreiche Anforderungen erfüllen: Sie sollen sensitiv, wirkungsorientiert, einfach durchführbar und kostengünstig sein.

In einer ersten Messkampagne haben wir in zahlreichen Schweizer Gewässern mit einem hohen Anteil an gereinigtem Abwasser die Konzentration östrogenen Stoffe bestimmt. Dazu setzten wir zwei schon im Rahmen des Projekts Strategie Micropoll bewährte *In-vitro*-Biotests ein, die eine hormonelle Wirkung mit genetisch veränderten Organismen oder Zellen nachweisen: Der Hefezell-Östrogentest (YES) verwendet dazu Hefezellen, die eine Bindung an den menschlichen Östrogenrezeptor über einen Farbumschlag von Gelb nach Rot anzeigen. Dieser einfache Test ist kostengünstig, frei verfügbar und wird breit genutzt. Als Zweites wendeten wir den so genannten ER-Calux an, einen kommerziell erhältlichen Test basierend auf menschlichen Zellen, denen ein Östrogenrezeptor eingesetzt wurde. Wegen der Arbeit mit Zelllinien ist der ER-Calux aufwändiger und teurer in der Durchführung als der YES, aber auch deutlich sensitiver.

Beide Testsysteme eigneten sich grundsätzlich, um zu überprüfen, ob das ökotoxikologisch basierte Qualitätskriterium für  $17\beta$ -Östradiol von 0,4 Nanogramm pro Liter in den Wasserproben eingehalten wurde oder nicht. Dieser Wert entspricht dem Qualitätsnorm-Vorschlag der EU-Wasserrahmenrichtlinie und des Oekotoxentrums. Beide Tests wiesen in den untersuchten Fließgewässern jeweils unterhalb der Abwassereinleitung der Kläranlagen eine höhere östrogene Aktivität nach als oberhalb. Mit der chemischen Analytik konnten wir dagegen die Wasserqualität bezüglich Östrogenbelastung nicht umfassend beurteilen.

Um die östrogene Aktivität in abwasserbelasteten Gewässern zu bestimmen, empfehlen wir als pragmatisches Vorgehen den YES-Test. Aus diesem Wert kann die Endkonzentration im Gewässer über die Verdünnung im Vorfluter abgeschätzt werden (Abb. 4). Der YES ist zwar weniger empfindlich als der ER-Calux, lässt sich jedoch gut für die Bewertung stärker belasteter Proben einsetzen. Der Hauptvorteil des Verfahrens liegt darin, dass er sich gut für eine Routineanwendung eignet: Er ist einfach durchzuführen und preiswert.

Die hier benutzten Methoden und Konzepte sind vielversprechend und unsere Untersuchungen zeigen, dass sich Biotests zur Beurteilung der östrogenen Aktivität in Fließgewässern eignen. Bevor kantonale oder private Labors sie anwenden können, braucht es jedoch eine weitere Validierung und Standardisierung. Im Rahmen des DIN-Arbeitskreises Hormonelle Wirkungen/Xenohormone sind wir aktiv daran beteiligt, eine ISO-Zertifizierung der Biotests in die Wege zu leiten.

**Offene Fragen klären.** Obwohl in den letzten Jahren in der Schweiz viele Informationen zu den hormonaktiven Stoffen gesammelt wurden, gibt es immer noch zahlreiche offene Fragen. Beispielsweise zeigen seit ungefähr zehn Jahren viele Felchen im Thunersee veränderte Geschlechtsorgane. Trotz intensiver Forschung konnte man die Ursache für die Veränderungen mit den angewendeten Analysemethoden und unserem Wissen über die Wirkung verschiedener Chemikalien noch nicht aufdecken [5]. Neue Befunde deuten zudem darauf hin, dass hormonaktive Stoffe nicht nur die Vermehrung der Fische beeinflussen, sondern auch deren Immunsystem schädigen können und sie so anfälliger für Krankheitserreger machen [6]. Solche multiplen Wirkmechanismen machen es umso schwieriger, Effekte auf der Populationsebene vorherzusagen. Überlagerungen mit den Wirkungen anderer Schadstoffe und Stressfaktoren verkomplizieren die Interpretation zusätzlich.



Abb. 4: Mögliches Vorgehen, um Gewässer hinsichtlich östrogen aktiver Substanzen zu beurteilen.

Allerdings wissen wir immer mehr über ökotoxikologische Wirkungen und es werden immer leistungsfähigere Screeningmethoden mit hohem Durchsatz entwickelt. So werden wir in der Praxis zunehmend besser in der Lage sein, hormonaktive und andere Wirkungen auf Wasserorganismen zu messen. Schwierig ist bei hochdurchsatzfähigen Verfahren immer noch, eine Verbindung herzustellen zwischen Effekten auf molekularer Ebene und der Wirkung auf den ganzen Organismus. Hier ruht die Hoffnung auf den so genannten Omik-Methoden wie der Transkriptomik, Proteomik und Metabolomik. Mit diesen lässt sich die Gesamtheit der Gene, Proteine oder Stoffwechselprodukte eines Lebewesens auf einmal untersuchen. Sie könnten helfen, die Stoffwechselwege zu finden, die von einer zellulären Wechselwirkung zu Schädigungen der Gesundheit führen. Dadurch würde es möglich, gezielt effektspezifische Biomarker zu erkennen, die dann in Routineuntersuchungen eingesetzt werden könnten. Erfüllt sich diese Vision, werden wir mittelfristig deutlich weniger Tierversuche benötigen, um Risiken auf Natur und Mensch vorherzusagen und die Gesundheit der Ökosysteme zu bewahren. ○ ○ ○

- [1] Purdom C.E., Hardiman P.A., Bye V.J., Eno N.C., Tyler C.R., Sumpter J.P. (1994): Estrogenic effects of effluents from sewage treatment works. *Chemical Ecology* 8, 275–285.
- [2] Vermeirssen E.L.M., Burki R., Joris C., Peter A., Segner H., Suter M.J.-F., Burkhardt-Holm P. (2005): Characterization of the estrogenicity of Swiss midland rivers using a recombinant yeast bioassay and plasma vitellogenin concentrations in feral male brown trout. *Environmental Toxicology and Chemistry* 24, 2226–2232.
- [3] Götz C.W., Kase R., Hollender J. (2010): Mikroverunreinigungen – Beurteilungskonzept für organische Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser. Eawag-Studie im Auftrag des Bafu.
- [4] Kienle C., Kase R., Werner I. (2011): Evaluation of bioassays and wastewater quality – *In vitro* and *in vivo* bioassays for the performance review in the project Strategy Micropoll. Oekotoxzentrum, Eawag/EPFL.
- [5] Bernet D., Liedtke A., Bittner D., Eggen R.I.L., Kipfer S., Kung C., Largiadere C.R., Suter M.J.-F., Wahli T., Segner H. (2008): Gonadal malformations in whitefish from Lake Thun – Defining the case and evaluating the role of EDCs. *Chimia* 62, 383–388.
- [6] Casanova-Nakayama A., Wenger M., Burki R., Eppler E., Krasnov A., Segner H. (2011): Endocrine disrupting compounds – Can they target the immune system of fish? *Marine Pollution Bulletin* 63, 412–416.

# Ohne Nullpunkt keine Aussagen über Veränderungen

Die Eawag-Wissenschaftler Pascal Vonlanthen und Florian Altermatt sind überzeugt, dass langfristig angelegte Monitoring-Programme unverzichtbar sind, um Biodiversität und Ökosystemleistungen schützen zu können. Vonlanthen erforscht die Evolution der Fische in Schweizer Seen und koordiniert derzeit eine Aufnahme der Fischbiodiversität im Rahmen des Projet Lac. Altermatt interessiert sich für die Ausbreitung und Differenzierung von Makroinvertebraten entlang von Fließgewässern.

Interview: Andri Bryner

## Warum muss die Biodiversität überwacht werden?

**Florian Altermatt (FA)** Naturwissenschaftliche Forschung wird seit Hunderten von Jahren betrieben. Doch bei den meisten Dingen wissen wir 2012 immer noch nicht, was die Ausgangssituation ist. Ohne ein Monitoring verpassen wir *time zero* immer wieder aufs Neue.

**Pascal Vonlanthen (PV)** Und wenn es Daten aus früheren Jahren gibt, sind sie oft unkoordiniert erfasst worden und können heute nur schwer mit anderen Datensätzen verglichen werden. Verlässliche Aussagen über Veränderungen sind kaum möglich.

## Ist das wirklich Aufgabe des Bundes?

**(PV)** Die Forscherinnen und Forscher suchen nach der Artenvielfalt, nach dem noch Unbekannten. Ein Monitoring überwacht Veränderungen des Bekannten. Die Forschenden sollten versuchen herauszufinden, wie und weshalb die Veränderungen ablaufen – wie es funktioniert da draussen. Für uns ist es logistisch, finanziell und zeitlich nur selten möglich, Monitorings durchzuführen. Aber natürlich sind Monitoring-Daten letztlich für die Forschung sehr wichtig.

Pascal Vonlanthen (links) und Florian Altermatt zum Wert von Monitoringprogrammen.



Fotos: Andri Bryner

**Biodiversität ist mehr als nice to have. Die Umwelt erbringt für uns zentrale Leistungen.**

**(FA)** Es ist ja auch nicht Sache der Forschung, Bevölkerungsdaten – Geburten, Hochzeiten, Zuwanderung und so weiter – zu sammeln. Das ist Sache des Staates. Ausserdem hat sich die Forschungslandschaft verändert: Mit dem Erfassen des Ist-Zustands gibt sich die Wissenschaft heute nicht mehr zufrieden. Dafür finde ich kein Geld. David Keeling hat aus Eigeninitiative ab 1958 seine CO<sub>2</sub>-Messungen auf dem Mauna Loa gemacht. Er hat jahrelang gemessen, bevor er zum ersten Mal Geld bekam dafür. Heute ist seine Kurve eines der wichtigsten Diagramme in der Klimaforschung. Aber der Staat darf nicht darauf vertrauen, dass es immer solche mutigen und intelligenten Forscher gibt.

## Was heisst für euch Biodiversität überhaupt?

**(FA)** Für mich bedeutet Biodiversität Abwechslung und Charakter. Ich will nicht immer dasselbe essen und dasselbe sehen. Wir fahren dorthin in die Ferien, wo es divers ist, die Blumenwiese ist uns lieber als ein monotones Maisfeld.

**(PV)** Aber Biodiversität ist mehr als *nice to have*. Die Umwelt erbringt für uns zentrale Leistungen: sauberes Trinkwasser, Luft zum Atmen und so weiter. Das wird gesteuert von der Artenvielfalt. In meinem Forschungsbereich ist das ganz simpel: Wenn das Nahrungsnetz nicht mehr funktioniert, fangen die Fischer keine Speisefische mehr.

**(FA)** Einverstanden. Gleichzeitig liegt in der Auflistung der Ökosystemleistungen aber auch eine Gefahr. Denn sauberes Wasser kann ja auch über ein technisches System sichergestellt werden. Darum müssen wir aufzeigen, dass naturnahe Gewässer und die darin lebenden Organismen komplex vernetzt sind und dass daraus deutlich mehr resultiert als nur sauberes Wasser.

## Und wie wird diese Vielfalt gemessen?

**(PV)** In den meisten Fällen werden die beobachteten oder gefangenen Individuen bestimmt und die Häufigkeiten oder die Biomasse der Arten erfasst. Tiere und Pflanzen in Arten einzuteilen, ist ein Bedürfnis des Menschen, der alles klassifizieren will. In der Natur sind die Grenzen nicht immer so scharf. Die Prozesse der Evolution neuer Arten sind oft kontinuierlich. In unseren Projekten

geht es deshalb darum, die gesamte Vielfalt zu erfassen, neben der Vielfalt an Formen, Farben oder Lebensweisen auch die genetische Vielfalt. Das ist die Basis, damit sich neue Arten entwickeln können oder damit sich bestehende Arten an Umweltveränderungen anpassen können.

**(FA)** Wichtig ist, dass ein Monitoring langfristig läuft, wiederholt durchgeführt wird und die Methoden nicht jedes Mal neu erfunden werden, also zum Beispiel, dass mit standardisierten Netzen abgefischt wird. Die von einzelnen Expertinnen oder Experten lancierten Monitorings spiegeln leider oft eher deren Interessen und deren Aktivitätsradius – Ferien- und Arbeitsorte –, statt dass sie für die ganze Schweiz vergleichbare Daten liefern.

#### Wie lange muss ein Monitoring dauern?

**(FA)** Als Faustregel sollte ein Programm im Minimum einen oder wenige Generationenzyklen der erfassten Arten abdecken, um einen Nullwert und einen Veränderungswert zu haben. Aber grundsätzlich wird die Datengrundlage natürlich immer besser, je länger die Reihe fortgesetzt wird. Die freie Verfügbarkeit der von der öffentlichen Hand erfassten Monitoring-Daten inspiriert zudem mit zunehmender Länge der Datenreihe immer mehr Forschungsprojekte; diese müssen dann nicht über die Monitoring-Programme finanziert werden.

#### Wie werden Monitoring-Daten von euch genutzt?

**(FA)** In meinen Projekten untersuche ich unter anderem, wie sich Arten entlang von Gewässern ausbreiten und wie sich Barrieren auf die Differenzierung der Arten auswirken. Ich möchte dazu Aussagen machen können für die ganze Schweiz. Das geht nicht ohne die Daten aus dem Biodiversitätsmonitoring Schweiz (BDM). Wir ergänzen aber die Indikatoren des BDM mit eigenen Untersuchungen, vor allem mit genetischen Analysen.

## Die von Experten lancierten Monitorings spiegeln oft vor allem deren persönliche Interessen.

**(PV)** Leider basieren die Daten zu den Fischen fast ausschliesslich auf den Fischfangstatistiken. Das ergibt ein verzerrtes Bild, weil vor allem diejenigen Arten erfasst werden, welche die Fischer gerne fangen. Darum haben wir mit dem Projet Lac ein eigenes Monitoring lanciert, basierend auf anerkannten methodischen Vorgaben der EU. Unsere aktuelle Arbeit zum Verschwinden vieler Felchenarten wäre allerdings nicht möglich gewesen, wenn nicht ein Lehrer vor über 50 Jahren die Felchen in der Schweiz sehr genau erfasst und beschrieben hätte.

#### Was trägt die Eawag-Forschung zum Biodiversitätsmonitoring bei?

**(FA)** Die Eawag war beteiligt an der Entwicklung der neuen Gewässerindikatoren: Eintags-, Stein-, und Köcherfliegen. Künftig wird das Beobachten von Ökosystemleistungen an Bedeutung gewinnen. Da können wir auf Erfahrungen zurückgreifen aus Forschungsvorhaben, zum Beispiel für

einen Summenindikator zum Laubbau im Gewässer.

**(PV)** Wir werden die Daten aus dem Projet Lac öffentlich zugänglich machen und hoffen, dass sich noch mehr Kantone zur Zusammenarbeit entschliessen. Das würde den Referenzcharakter unserer Bestandesaufnahme der Fischarten in den Schweizer Seen stärken. Generell sollten die Fischbestände auch in den Seen regelmässig überwacht werden. Nur so können Artensterben vermieden werden. ○ ○ ○

Am Eawag-Infotag 2012 diskutierten Pascal Vonlanthen von der Forschungsabteilung Fischökologie und Evolution und Florian Altermatt von der Forschungsabteilung Aquatische Ökologie mit der Nationalrätin Franziska Teuscher über das Biodiversitätsmonitoring. Eine Videoaufzeichnung des halbstündigen Gesprächs finden Sie auf [www.eawag.ch/infotag](http://www.eawag.ch/infotag).

## Monitoring als Teil der Strategie

Im April 2012 hat der Bundesrat die Strategie Biodiversität Schweiz verabschiedet. Bereits bis 2014 soll in einem partizipativen Prozess mit Kantonen, Gemeinden, Wirtschaft und Privaten ein Aktionsplan mit Massnahmen ausgearbeitet werden, um die gesetzten Ziele bis 2020 zu erreichen. Eines dieser zehn strategischen Ziele sieht vor, ausgehend von bestehenden Programmen ein Monitoring-System für alle Ebenen der Biodiversität aufzubauen. Dies soll die Vielfalt der Ökosysteme, der Arten und der Gene einbeziehen. Ausserdem will der Bund Indikatoren einführen, die Aussagen zulassen über die Ökosystemleistungen, also zum Beispiel über die Reinigungsleistung eines naturnahen Gewässers oder die Schutzfunktionen des Waldes. Für die Strategie stark gemacht hat sich unter anderem das Forum Biodiversität der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz, in dem auch die Eawag vertreten ist. Download der Strategie Biodiversität Schweiz (in d, f, i): [www.bafu.admin.ch/publikationen](http://www.bafu.admin.ch/publikationen), Forum Biodiversität: [www.biodiversity.ch](http://www.biodiversity.ch)

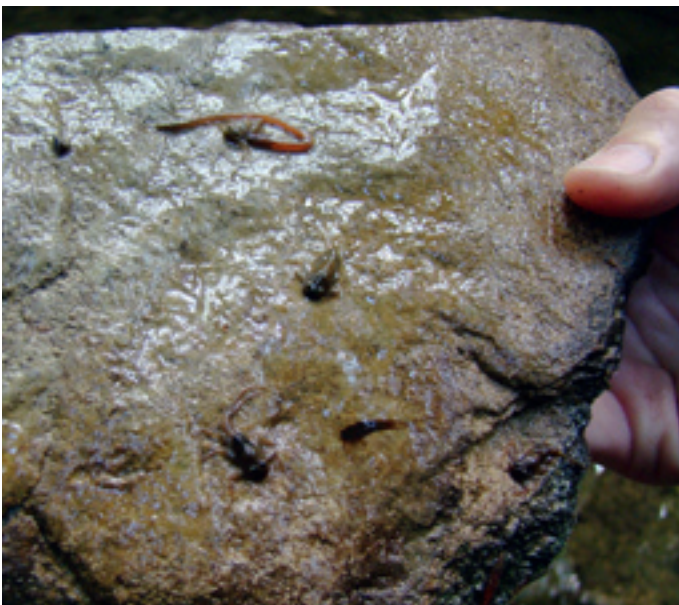
Das Biodiversitätsmonitoring Schweiz (BDM) ist eines von mehreren Umweltbeobachtungsprogrammen des Bundes. Es wurde 2001 lanciert und erfasst auf über 2000 systematisch über die Schweiz verteilten Probeflächen und Messpunkten mit standardisierten Methoden Pflanzen, Moose, Mollusken, Brutvögel und Tagfalter. Neu sind 2010 die Eintags-, Stein- und Köcherfliegen als Indikatoren für die Artenvielfalt in Gewässern dazugekommen. Ganz bewusst fokussiert das BDM nicht auf bedrohte Arten, sondern erfasst häufige und verbreitete Arten in der «Normallandschaft». So ergänzt das BDM andere Programme, welche die seltenen Arten im Blick haben. Das BDM-Schweiz kostet aktuell gut drei Millionen Franken jährlich. [www.biodiversitymonitoring.ch](http://www.biodiversitymonitoring.ch)

# Das Vorkommen von Lebewesen vorhersagen

Wirbellose Kleinlebewesen haben sehr verschiedene Ansprüche an ihren Lebensraum. Die Eawag entwickelt ein Computermodell, um die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften am Flussgrund vorherzusagen. Das Modell soll in Zukunft integratives Flussmanagement unterstützen und mögliche Konsequenzen verschiedener Managementmassnahmen oder des Klimawandels vorhersagen.

Die Klimaerwärmung und die Art unserer Landnutzung werden in den kommenden Jahrzehnten den Zustand unserer Fließgewässer stark beeinflussen. Durch die Klimaerwärmung werden die Temperaturen in den Flüssen ansteigen und die Wasserführung wird sich verändern; durch den gesellschaftlichen und demografischen Wandel werden sich auch die Schadstoffeinträge aus Landwirtschaft, Siedlungen, Industrie und Verkehr ändern. Diese Veränderungen wirken sich auf die Gewässerökosysteme und ihre Lebewesen aus. Allerdings ist das Verständnis darüber lückenhaft. Computermodelle können das vorhandene Wissen über die in den Fließgewässern ablaufenden Prozesse integrieren und quantitativ beschreiben. Dadurch können sie dazu beitragen, Auswirkungen von Umweltveränderungen auf die Ökosysteme zu prognostizieren. Wir zeigen am Beispiel eines Modells zur Zusammensetzung der Gemeinschaft wirbelloser Kleinlebewesen, wie solche Prognosemodelle aufgebaut sind, welche Schwierigkeiten

Welche wirbellosten Kleinlebewesen in einem Fließgewässer vorkommen, hängt von dessen Beschaffenheit und Zustand ab.



Mark Honti

bei deren Entwicklung auftreten und wie man mit den vorhandenen Unsicherheiten umgehen kann.

**Zentrale Rolle der Makroinvertebraten in Gewässern.** Makroinvertebraten nennt man die wirbellosen Kleinlebewesen, die man mit blossen Auge sehen kann. Dazu gehören ganz unterschiedliche Organismen wie Insektenlarven, Bachflohkrebse, Muscheln, Schnecken, Egel und viele mehr. Sie leben meistens auf dem Flussgrund oder im Sediment und erfüllen wichtige Funktionen im Ökosystem: Sie zerkleinern eingetragenes Laub und machen es so für andere Organismen einfacher verwertbar, filtern organische Partikel aus dem Wasser und weiden Algen ab. Sie stellen auch ein wichtiges Glied in der Nahrungskette dar und dienen zum Beispiel Bachforellen als Nahrung.

Daneben sind sie faszinierende Organismen, die zur Biodiversität der Gewässer beitragen. Die verschiedenen Arten haben sich an sehr unterschiedliche Umweltbedingungen angepasst. Manche Arten kommen nur in besonders sauberem Wasser vor, andere tolerieren hohe Belastungen an organischem Material oder haben spezielle Eigenschaften, um besser mit Pestiziden klarzukommen. Manche lieben eine starke Strömung oder sehr langsam fließende Gewässer, andere sind Generalisten, die ein breites Spektrum an Umweltbedingungen tolerieren. Auch ihre Ernährungsweisen unterscheiden sich. Die Weidegänger grasen Algen am Flussgrund ab, die Filtrierer, Sedimentfresser und Zerkleinerer, filtern organische Partikel aus dem Wasser, sammeln diese im Sediment oder zerkleinern Laub. Aber es kommen auch Räuber vor, die sich von anderen Invertebraten ernähren, und Allesfresser, die verwerten, was gerade vorhanden ist.

Für das Management eines Gewässers sind die Makroinvertebraten besonders wichtig, weil sie einerseits eine entscheidende Funktion bei der Aufrechterhaltung von dessen Ökosystemdienstleistungen (Wasserreinigung, Erholungsraum, Fischerei) innehaben. Andererseits eignen sie sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Ansprüche als Indikatoren für die Wasserqualität und für natürliche oder vom Menschen beeinträchtigte Umweltbedingungen. Daher spielen sie für die Bewertung des ökologischen Zustands von Gewässern eine bedeutende Rolle, beispielsweise im Schweizer Modul-Stufen-Konzept ([www.modul-stufen-konzept.ch](http://www.modul-stufen-konzept.ch)).



Nele Schuwirth, Hydrogeologin, entwickelt ökologische Modelle und erforscht Methoden zur Entscheidungsunterstützung im Umweltmanagement.

Koautor: Peter Reichert

**Auswirkungen auf Arten prognostizieren.** Um die ökologischen Veränderungen eines Gewässers zum Beispiel infolge einer Revitalisierung oder eines Kläranlagenausbaus von vornherein abschätzen zu können, wäre es hilfreich, die Auswirkungen auf die Makroinvertebraten liessen sich vorhersagen. Im Rahmen des Projekts iWaQa des nationalen Forschungsprogramms Nachhaltige Wassernutzung ([www.nfp61.ch](http://www.nfp61.ch)) entwickeln und verfeinern wir deshalb Methoden, um in Zukunft solche Prognosen machen zu können.

In der Vergangenheit entwickelten wir das Computermodell Ecological river model (Erimo), das die verschiedenen Arten basierend auf ihrem Ernährungstyp in funktionelle Gruppen zusammenfasst und die Häufigkeit beziehungsweise Biomasse dieser funktionellen Gruppen im Lauf der Zeit abhängig von Abfluss und Temperatur beschreibt [1, 2]. Dieses Modell eignet sich sehr gut, um die zeitliche Entwicklung der Wirbellosengemeinschaft und ihrer Funktionen im Ökosystem (zum Beispiel die Abweidung von Algen oder den Abbau von Laub) zu beschreiben. Andere Faktoren, die für die Bewertung des ökologischen Zustands eines Gewässers wichtig sind, wie die Biodiversität oder das Vorkommen besonders empfindlicher Arten, lassen sich darin nicht abbilden. Mit dem Modell Streambugs 1.0 gehen wir nun einen Schritt weiter und versuchen, einzelne Taxa (Arten, Gattungen oder Familien, je nach Verfügbarkeit der Daten) zu beschreiben [3]. Dafür müssen wir Abstriche bei der zeitlichen Dynamik machen. Wir konzentrierten uns bisher auf das Vorkommen oder Nicht-Vorkommen von Arten an einem Standort; Prognosen des zeitlichen Verlaufs der Häufigkeiten oder Biomassen der verschiedenen Taxa wie bei Erimo sind damit prinzipiell auch möglich, benötigen aber noch ausführliche Tests und allenfalls eine Weiterentwicklung des Modells.

Ob bestimmte Arten an einem Standort vorkommen oder nicht, hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab, etwa von den Umweltbedingungen (Abb. 1). Unter Einbezug dieser Einflussgrößen simuliert unser Computermodell die wichtigsten Prozesse,

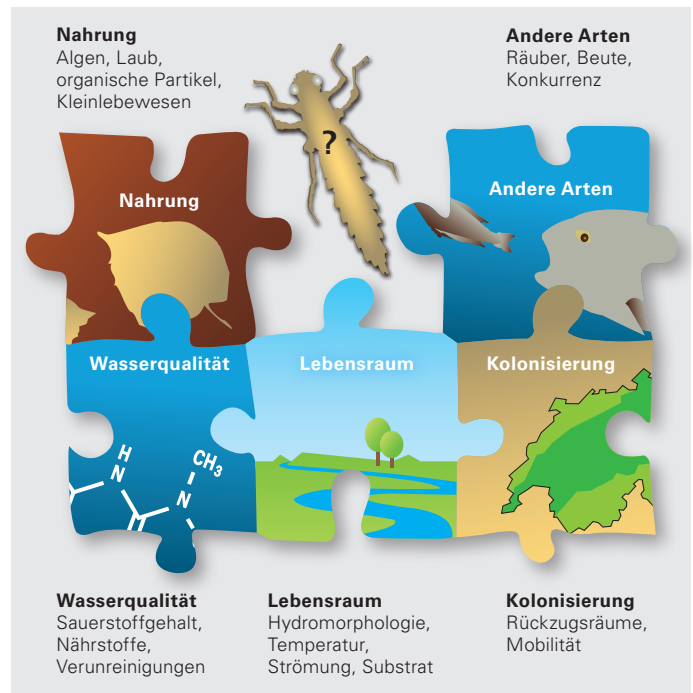


Abb. 1: Verschiedenste Faktoren bestimmen, ob eine Art in einem bestimmten Lebensraum vorkommt oder nicht.

die über das Vorhandensein der Taxa beziehungsweise über eine Zu- oder Abnahme deren Biomasse entscheidet: Wachstum durch Nahrungsaufnahme und Fortpflanzung auf der einen Seite, Atmung (Umwandlung der eigenen Biomasse in Energie) und Sterben auf der anderen Seite. Diese Prozesse hängen vom basalen Stoffwechsel ab, der den Energieumsatz im Ruhezustand charakterisiert. Zusätzlich werden sie von den spezifischen Ansprüchen der verschiedenen Taxa und den Umweltbedingungen beeinflusst (Abb. 2).

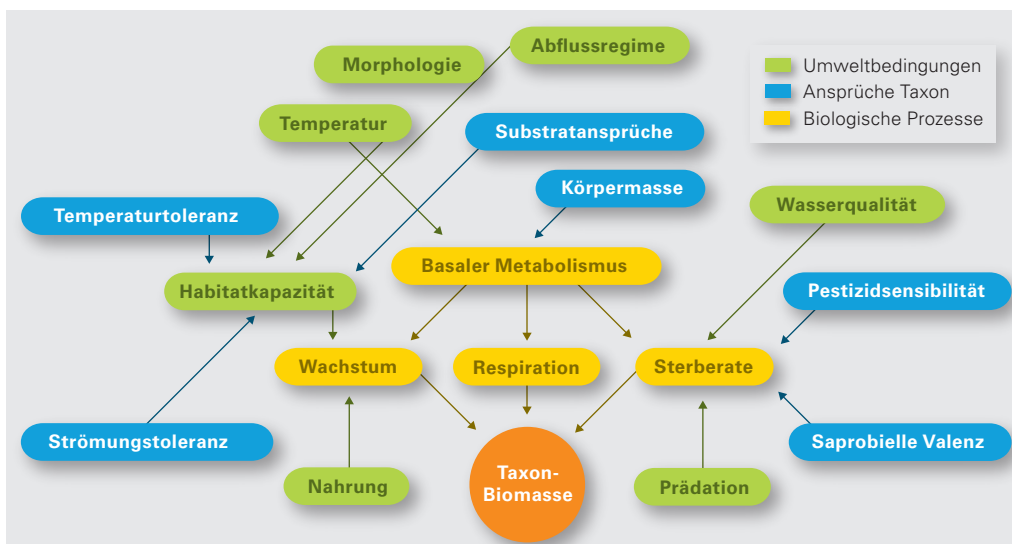


Abb. 2: Das Computermodell Streambugs 1.0 umfasst die grundlegenden Prozesse und Einflussfaktoren, um daraus das Vorkommen eines Taxons beziehungsweise die Zu- oder Abnahme von dessen Biomasse für einen bestimmten Standort zu simulieren. Die Habitatkapazität beschreibt, wie viele Lebewesen ein bestimmtes Habitat maximal aufnehmen kann. Unter saprobienle Valenz versteht man die Toleranz gegenüber der Belastung mit abbaubarem organischem Material.



**So komplex wie nötig, so einfach wie möglich.** Solche Modelle sind immer eine grobe Vereinfachung der viel komplexeren Natur. Die Kunst muss deshalb darin bestehen, einen guten Kompromiss zwischen Einfachheit und Komplexität (sprich Realitätsnähe) zu finden. Einfachheit ist wünschenswert, da sich das Modell dann auch leichter anwenden lässt. So ist es ein Vorteil, auf möglichst wenige Eingabedaten zurückgreifen zu müssen – am besten auf solche, die bereits erhoben wurden oder die man aus vorhandenen Informationen abschätzen kann. Wenn das Modell einfacher ist, verkürzt sich auch die Rechenzeit. Das ist ein wichtiger Faktor für die Anwendung von Methoden zur Quantifizierung von Unsicherheiten oder zur Sensitivitätsanalyse. Letztere zeigt, wie sich kleine Änderungen der Einflussgrößen auf die Modellresultate auswirken und dient der Einschätzung der Robustheit.

Die Komplexität und damit die Realitätsnähe eines Modells zu erhöhen, ist nur möglich, wenn die Wirkungszusammenhänge und Einflussgrößen auch quantitativ erfasst werden können. Das ist aber nur dann sinnvoll, wenn das Modell dadurch genauere Prognosen machen kann oder universeller wird, das heisst, auf verschiedene Situationen oder Orte übertragbar ist. Wir können beispielsweise ein Modell entwickeln, das das Vorkommen von Makroinvertebraten in der Mönchaltorfer Aa gut beschreibt. Wenn dieses Modell auch für die Gürbe und die Thur gute Prognosen liefert, ist es einerseits nützlicher für die Praxis. Andererseits gibt das aber auch mehr Gewissheit, dass die einzelnen Prozesse im Modell korrekt abgebildet sind. In diesem Fall kann man es auch eher wagen, das Modell zur Vorhersage sich ändernder Umweltbedingungen zu verwenden. Eine universelle Verwendbarkeit hat aber immer ihre Grenzen. Es wäre vermessen zu verlangen, dass ein Modell für jegliche Flusstypen funktioniert, also gleichzeitig für den Rhein bei Basel und für einen Bergbach in den Hochalpen.

**Online-Datenbanken liefern die Informationen.** Die spezifischen Eigenschaften der verschiedenen Makroinvertebraten-Taxa entnehmen wir Datenbanken, die im Internet zur Verfügung stehen. Diese wurden aus Beiträgen vieler Forscherinnen und Forscher zusammengestellt. Die Daten zu Habitatsprüchen und Ernährungstypen beziehen wir zum Beispiel von der Website [www.freshwaterecology.info](http://www.freshwaterecology.info) [4]. Für die Empfindlichkeit der verschiedenen Taxa gegenüber Pestiziden benutzen wir eine Datenbank zum so genannten Spear-Index [5].

Der Spear-Index berechnet aus Monitoring-Daten von Makroinvertebraten, wie sie Gewässerschutzämter typischerweise erheben, den prozentualen Anteil von Arten, die empfindlich auf Pestizide reagieren. Wenn es viele davon gibt, kann man davon ausgehen, dass an diesem Standort keine Beeinträchtigung durch Pestizide existiert. Kommen hauptsächlich Arten vor, die tolerant gegenüber Pestiziden sind, ist das ein Hinweis darauf, dass Pestizide hier ein Problem darstellen. Wir benutzen diese Informationen über die Empfindlichkeit der Arten in unserem Modell, indem wir an Standorten, an denen wir eine Pestizidbelastung erwarten, die Sterberate der empfindlichen Arten erhöhen. Das ist eine stark vereinfachte Beschreibung des Einflusses von Pestiziden auf die Lebensgemeinschaften. Ähnlich gehen wir bei Belastungen durch organisches Material vor, das zu Sauerstoffarmut im

Gewässer führen kann. Dafür benutzen wir das so genannte Saprobien-System, das in Mitteleuropa schon lange zur Einschätzung der Wasserqualität verwendet wird [6].

Wir haben das Modell bisher an vier Standorten im Einzugsgebiet der Mönchaltorfer Aa getestet, einem Zufluss des Greifensees im Kanton Zürich. Für diese Standorte können wir Monitoring-Daten mehrerer Jahre des Amts für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons nutzen [7]. Diese enthalten die vorkommenden Makroinvertebraten-Arten und deren Häufigkeit, aufgenommen nach der Methode des Modul-Stufen-Konzepts (Stufe F). Zusätzlich sind für diese Gebiete auch Daten über Nährstoffe, Pestizide, Abflussbedingungen und Temperaturen vorhanden. Damit sind wir in der Lage, die Umweltbedingungen an den vier Standorten abzuschätzen, die als Eingabegrößen in das Modell eingehen (Tabelle).

**Erfolgreiche Praxistests.** Viele Einflussgrößen, die in das Modell eingehen, zum Beispiel die spezifischen Wachstums- oder Sterberaten der Taxa, sind unsicher. Wir arbeiten in solchen Fällen deshalb nicht mit festen Werten, sondern definieren für jeden eine entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilung, die das Wissen und die Unsicherheit über den Wert widerspiegelt. Um die Auswirkung dieser Unsicherheiten auf die gesamte Unsicherheit der Modellvorhersage zu quantifizieren, benutzen wir ein spezielles mathematisches Verfahren (Monte-Carlo-Simulation). Damit erhalten wir eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Modellresultate. Anhand derer können wir für jedes Makroinvertebraten-Taxon die vom Modell prognostizierte Wahrscheinlichkeit berechnen, dass es an dem Standort überlebt oder dort aussterben würde, weil beispielsweise die Umweltbedingungen unpassend sind.

Um abzuschätzen, wie gut das Streambugs-Modell die Wirklichkeit abbildet, haben wir die Modellvorhersagen mit den

Umweltbedingungen an vier Standorten der Mönchaltorfer Aa.

	Standort 1 oberhalb ARA	Standort 2 unterhalb ARA	Standort 3 oberhalb ARA	Standort 4 unterhalb ARA
mittlere Wassertemperatur (°C)	10,3	12,4	9,6	11,4
Temperaturregime	moderat	warm	moderat	warm
mittlerer Laubeintrag (g/m <sup>2</sup> /Jahr)	170	260	500	420
Beschattungsgrad (%)	15	26	90	95
Strömungsregime	stark strömend	stark strömend	stark strömend	mittel
Pestizidbelastung	?	ja	nein	ja
Gewässergüteklasse gemäss Saprobien-System	I: oligo-saprobe Zone	II: $\beta$ -meso-saprobe Zone	I: oligo-saprobe Zone	II: $\beta$ -meso-saprobe Zone
mittlere Phosphatkonzentration (mg/l)	0,01	0,03	0,05	0,04
mittlere Stickstoffkonzentration (mg/l)	3,3	8,0	2,1	7,6

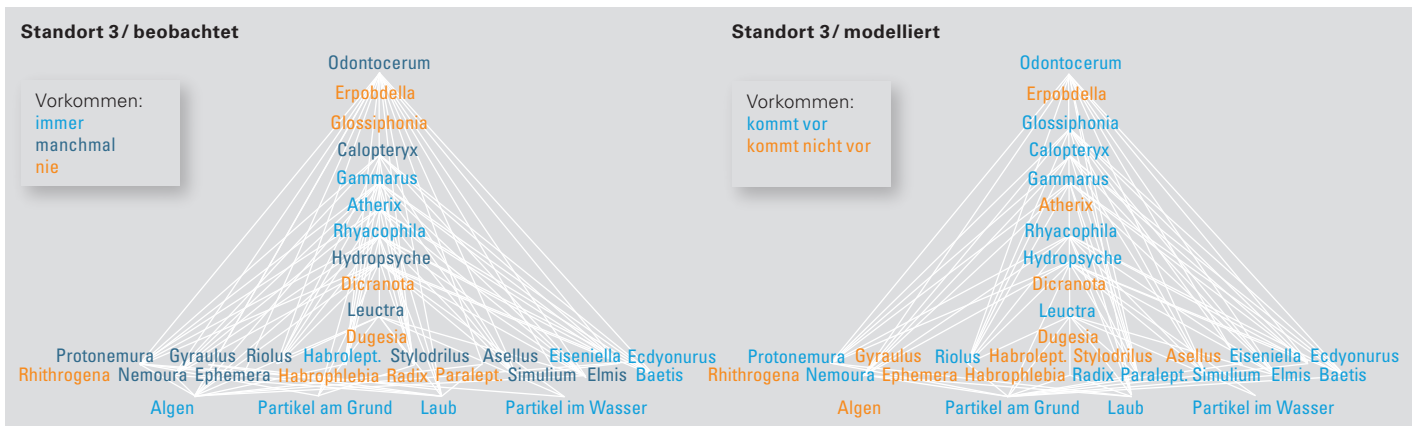


Abb. 3: Vorkommen von Makroinvertebraten an einem Standort an der Mönchaltorfer Aa, dargestellt als Nahrungsnetz auf Gattungsniveau. Rechts sind die Modellprognosen abgebildet, links die realen Verhältnisse anhand von Felddaten.

beobachteten Vorkommen von Makroinvertebraten an den vier Standorten an der Mönchaltorfer Aa verglichen (Abb. 3). Bereits die ersten Tests waren sehr erfolgreich, ohne dass wir die Eingabegrößen im Rahmen einer Kalibrierung angepasst hatten. Die Computersimulation konnte zwar nicht alle Taxa genau vorhersagen – das hatten wir aber auch nicht erwartet. Dennoch attestierte das Modell den meisten Taxa, die an einem Standort gemäss Felderhebungen zu allen Probenahmezeitpunkten vorgekommen sind, dort auch eine hohe Überlebenswahrscheinlichkeit. Taxa, die nie in den Monitoring-Daten aufgetaucht sind, haben auch nach dem Modell zumeist eine geringe Überlebenswahrscheinlichkeit.

**Managementalternativen bewerten.** Unser Beispiel zeigt, dass Computermodelle hilfreich sind, um auch lückenhaftes Wissen zu bündeln. Durch bestmögliche Vorhersagen können sie damit Entscheidungsfindungsprozesse unterstützen. Für eine realistische und glaubwürdige Einschätzung ist es aber wichtig, die Unsicherheiten zu quantifizieren. Damit ein solches Computermodell in der Praxis eingesetzt werden kann, sind grundsätzlich folgende Entwicklungsschritte nötig: Testen des Modellkonzepts, Anwendung in einem möglichst breiten Spektrum von Umweltbedingungen inklusive Modellverbesserungen, Implementierung einer benutzerfreundlichen Software.

Das Modell Streambugs 1.0 befindet sich derzeit im ersten Entwicklungsstadium. Die Ausnahmen, bei denen die Modellvorhersagen nicht mit den Feldbeobachtungen übereinstimmen, sind besonders interessant für uns, denn sie können helfen, das Modell zu verbessern. Wir werden dieses daher als Nächstes an weiteren Standorten testen, um zu schauen, ob sich die Ergebnisse bestätigen, und um den Gründen für die Unstimmigkeiten auf die Spur zu kommen. So können wir auch die Universalität und die Vorhersagekraft zuverlässiger einschätzen und verbessern.

Zusätzlich wollen wir in Zukunft auch die Wiederbesiedlung nach Störungsereignissen in das Modell aufnehmen. Das ist ein wichtiger Prozess, der über den biologischen Erfolg oder Misserfolg von Renaturierungsmassnahmen mitentscheiden kann.

Unser Ziel ist es, dass das Modell neben dem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn dereinst vorhersagen kann, welche möglichen Konsequenzen verschiedene Managementmassnahmen oder der Klimawandel auf das Vorkommen von Lebewesen in Fließgewässern haben können. ○ ○ ○

- [1] Schuwirth N., Kühni M., Schweizer S., Uehlinger U., Reichert P. (2008): A mechanistic model of benthos community dynamics in the River Sihl, Switzerland. *Freshwater Biology* 53, 1372–1392.
- [2] Schuwirth N., Reichert P. (2009): Modell für Lebensgemeinschaften in Fließgewässern. *Eawag News* 66, 19–21.
- [3] Schuwirth N., Reichert P. (eingereicht): Bridging the gap between theoretical ecology and real ecosystems – Modeling invertebrate community composition in streams.
- [4] Schmidt-Kloiber A., Hering D. (2012): [www.freshwaterecology.info](http://www.freshwaterecology.info) – the taxa and autecology database for freshwater organisms, version 5.0 (accessed on 02/2011: version 4.0/2009).
- [5] Liess M., Schäfer R.B., Schriever C.A. (2008): The footprint of pesticide stress in communities – Species traits reveal community effects of toxicants. *Science of the Total Environment* 406, 484–490.
- [6] DIN 38410 (2004): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Biologisch-ökologische Gewässeruntersuchung (Gruppe M) Teil 1: Bestimmung des Saprobienindex in Fließgewässern (M 1).
- [7] Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (2006): Wasserqualität der Seen, Fließgewässer und des Grundwassers im Kanton Zürich, Statusbericht 2006. Zürcher Umweltpaxis. [www.gewaesserschutz.zh.ch](http://www.gewaesserschutz.zh.ch)

# Wassermanagement: Schutz und Nutzen verbinden



Michael Döring, Landschaftsökologe an der Abteilung Aquatische Ökologie, untersucht die Zusammenhänge von Strukturen und Funktionen in Ökosystemen. Koautor: Christopher T. Robinson

Gewässer erbringen sozioökonomische Leistungen, benötigen aber auch bestimmte ökologische Rahmenbedingungen, damit sie ihre Funktionen wahrnehmen können. Gefragt ist deshalb ein nachhaltiges Ressourcenmanagement, das die Bedürfnisse des Menschen wie auch der Umwelt berücksichtigt. Wie ein solches aussehen könnte, zeigen zwei Forschungsprojekte am Spöl und im Auengebiet Sandey.

Die zunehmende Nutzung durch den Menschen und der fortschreitende Klimawandel beeinflussen die Verfügbarkeit der Ressource Wasser. Besonders in trocknen Gegenden erreichen viele grosse Flüsse die Ozeane nicht mehr, weil der Mensch übermässig Wasser verbraucht und für die Nutzung zurückhält (rund 4000 Kubikkilometer pro Jahr). Die Flüsse sind weltweit auf mehr als 500 000 Kilometern zu schiffbaren Wasserstrassen ausgebaut und entsprechend beeinträchtigt. Über 63 000 Kilometer Kanäle und 50 000 Staudämme regulieren die Fliessgewässer. Letztere speichern mehr als 6300 Kubikkilometer Wasser und weitere Stauhaltungen sind geplant – vorab in Entwicklungsländern [1]. Mit dem Klimawandel ändern sich Zeitpunkt und Stärke von Niederschlägen, Extremereignisse wie Überschwemmungen und Wasserknappheit werden zunehmen.

**Wasser als Risiko und Ressource.** Für die Schweiz weisen aktuelle Daten und Vorhersagen zum Beispiel darauf hin, dass sich die Hauptniederschläge in Zukunft in den späten Winter und ins Frühjahr verschieben werden. Damit steigt das Risiko für starke Überschwemmungen im Frühling, gefolgt von Wassertiefständen und Trockenperioden im späteren Sommer. Langfristig wird sich diese Situation durch das Abschmelzen der Gletscher noch akzentuieren. Diese Veränderungen haben direkte Konsequenzen für den Hochwasserschutz sowie für die Landwirtschaft, die Energieproduktion und die Trinkwasserversorgung, für die Wasser eine unersetzliche Ressource darstellt.



Abb. 1: Ein nachhaltiges Ressourcenmanagement muss die ökologischen wie die sozioökonomischen Interessen an den Gewässern möglichst umfassend vereinen (nach [3]).

Das sich verändernde Klima und die verschiedenen Nutzungen erhöhen aber auch den Druck auf die aquatischen Ökosysteme weiter. So soll in der Schweiz ein Ausbau der Wasserkraft die in Zukunft wegfallende Atomenergie teilweise ersetzen. Bereits heute werden rund 55 Prozent des Stroms mithilfe von Wasserkraft produziert. Dem stehen Bestrebungen gegenüber, welche die negativen Auswirkungen der Wasserkraftnutzung besser abfedern sollen. Die 2011 in Kraft getretene Revision des Gewässerschutzgesetzes sieht deshalb Sanierungsmassnahmen vor, um die Auswirkungen des Schwall-Sunk-Betriebs zu vermindern, den Geschiebehalt zu reaktivieren und die Fischgängigkeit wiederherzustellen. Zudem soll während der nächsten 80 Jahre etwa ein Viertel der beeinträchtigten, zusammengezählt rund 15 000 Kilometer langen Flussabschnitte revitalisiert werden [2].

Einerseits erbringen Gewässer als nutzbare Ressource verschiedene sozioökonomische Leistungen, andererseits benötigen sie als Lebensräume bestimmte ökologische Rahmenbedingungen, damit sie ihre Funktionen für Mensch und Umwelt wahrnehmen können. Daneben stellen sie auch ein Risiko für den Menschen und dessen Infrastrukturen dar. Diese unterschiedlichen, zum Teil gegensätzlichen Anforderungen und Interessen – akzentuiert durch den Klimawandel – bergen erhebliches Konfliktpotenzial. Vor diesem Hintergrund wird ein nachhaltiges Management der Wasserressourcen eine zunehmend dringliche Aufgabe (Abb. 1). Nachhaltigkeit bedeutet, sowohl die Bedürfnisse des Menschen als auch jene der Ökosysteme angemessen zu berücksichtigen. Hierzu müssen ökonomische, soziale und ökologische Anliegen ganzheitlich betrachtet werden, um in einer Abwägung einen tragfähigen Kompromiss zwischen diesen Interessen beziehungsweise ihren Akteuren zu finden. Dazu sind sektorenübergreifende Denkansätze, eine partizipative Entscheidungsfindung und eine langfristige Strategieplanung notwendig.

**Adaptives Management für mehr Nachhaltigkeit.** Ein methodisches Werkzeug auf dem Weg zu einem nachhaltigen Umgang mit den Wasserressourcen ist das so genannte adaptive Management. Dabei geht es darum, in einem ständigen Entwicklungsprozess aus den Ergebnissen vergangener Entscheidungen zu lernen

und zukünftige Massnahmen entsprechend zu optimieren und sich so einer idealen Lösung anzunähern.

In zwei exemplarischen Studien – am Spöl im Schweizerischen Nationalpark und im Auengebiet Sandey des Urbachs im Kanton Bern – untersuchen wir, wie sich im Sinne des adaptiven Ansatzes ökologische und sozioökonomische Interessen in ein nachhaltiges Wassermanagement integrieren lassen. Im ersten Fall geht es darum, mit gezielten Flutungen einen von der Wasserkraftnutzung beeinträchtigten Fluss in einen naturnäheren Zustand zurückzuführen, ohne die Stromproduktion zu beeinträchtigen. Im zweiten Fall untersuchen wir, wie vergangene Eingriffe eine Auenlandschaft beeinträchtigt haben und wie sich mögliche Revitalisierungsmassnahmen mit dem Überschwemmungsschutz und der Landnutzung vereinbaren lassen.

Der Spöl entspringt dem Lago di Livigno, einem Stausee an der schweizerisch-italienischen Grenze. Vor der Regulierung betrug der Abfluss zwischen 6 und 12 Kubikmeter pro Sekunde ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) mit Spitzen bis zu  $120 \text{ m}^3/\text{s}$ ; die konstante Restwassermenge nach der Regulierung beträgt  $1,45 \text{ m}^3/\text{s}$  im Sommer und  $0,55 \text{ m}^3/\text{s}$  im Winter. Seit 2000 wird dieser konstante Restwasserabfluss im Rahmen unserer Studie ein- bis dreimal pro Jahr von Flutungen unterbrochen, um das Abflussverhalten wieder dem ursprünglichen Regime anzunähern (Abb. 2). Die Hauptfrage war, ob sich der Lebensraum des Spöl damit überhaupt ökologisch positiv verändern würde, nachdem er über 30 Jahre mit einem geringen und konstanten Restwasserstrom auskommen musste.

Ein aus ökologischer Perspektive optimales Abflussregime (ausreichender Basisabfluss, Zeitpunkt, Dauer, Häufigkeit und Ausmass der Flutungen) ist dann erreicht, wenn damit Voraussetzungen geschaffen werden, die den lebensraumtypischen Arten eine dauerhafte Besiedlung ermöglichen – auch unter sich verändernden klimatischen Bedingungen.

**Annäherung an natürlichen Zustand.** Die Flutungen veränderten die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Spöl praktisch nicht, da das Wasser wie zuvor aus den Tiefenschichten (Hypolimnion) des Lago di Livigno stammte. Hingegen verbesserten sie die Porosität des Flussbetts, das sich unter dem alten Abflussregime massiv verdichtet hatte. Sedimente wurden stärker ausgewaschen und innerhalb der ersten zwei Jahre nach Beginn der Flutungen verschwanden auf dem Untergrund wachsende Moose. Ebenso verringerte sich in der Bodenzone (Benthos) die Menge des organischen Materials. Die Bestände der Primärproduzenten, zum Beispiel des Phytoplanktons, gingen ebenfalls deutlich zurück. Obwohl der Spöl ein nährstoffreiches Gewässer ist, blieb der Bewuchs mit Algen gering, weil diese aus dem Flussbett gespült wurden.

Bei den benthischen Makroinvertebraten führten die Flutungen zu einer Reduktion der Individuendichte und der Artenvielfalt sowie zu einer Veränderung der Artenzusammensetzung, was sich in einem höheren Anteil kleinerer Organismen und einer geringeren Biomasse zeigte. So nahmen die Bestände störungsanfälliger Arten, etwa des sesshaft lebenden und grossgewachsenen Bachflohkrebses *Gammarus fossarum*, ab, während resistenterer Spezies wie die mobilen und kleingewachsenen Eintagsfliegen

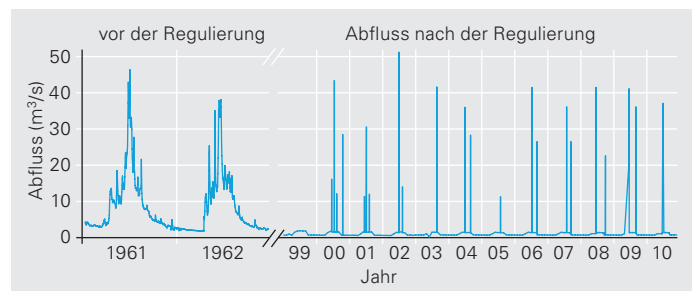


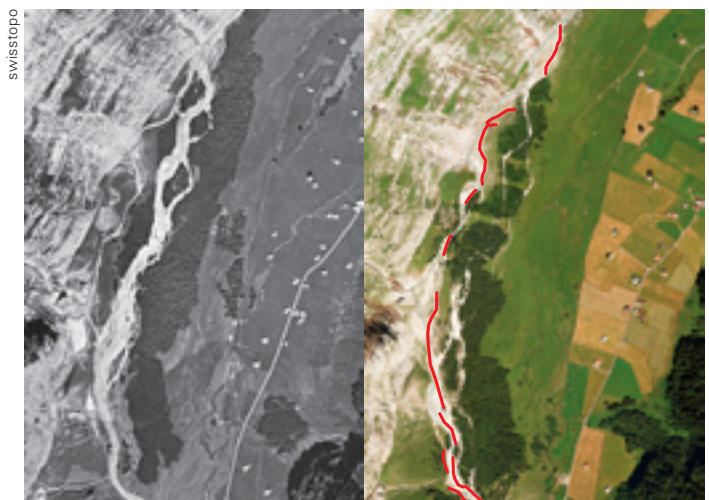
Abb. 2: Bis 1970 hatte der Spöl ein natürliches Abflussregime (links). Nach der Regulierung war die Restwassermenge konstant auf circa  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  beschränkt. Seit dem Jahr 2000 sorgen regelmässige Flutungen mit bis zu  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  für ein naturnäheres Regime.

der Gattung *Baetis* häufiger wurden. Insgesamt variierten die untersuchten Organismen in ihrer Zusammensetzung und Morphologie nach dem Regimewechsel stärker.

Zum jetzigen Zeitpunkt kann man sagen, dass sich die Habitatbedingungen und die Artenzusammensetzung im Spöl aufgrund der jährlichen Flutungen wieder jenen eines vergleichbaren natürlichen alpinen Gebirgsbaches annähern. Gleichzeitig ist der Spöl auch ein Beispiel dafür, dass sich ökologische und ökonomische Interessen vereinbaren lassen, da das für die Flutungen abgelassene Wasser in andere Stauhaltungen umgeleitet werden kann und sich dort praktisch kostenneutral zur Stromproduktion nutzen lässt [4, 5].

**Einbezug der verschiedenen Interessen.** Das Projekt im Auengebiet Sandey (Abb. 3), das gemeinsam mit den Kraftwerken Oberhasli sowie den Bundesämtern für Umwelt und Raumentwicklung initiiert wurde, vereint Felduntersuchungen, hydrologische Modellrechnungen, Fernerkundung und räumliche Daten, um die Auswirkungen des historischen Gebietsmanagements und

Abb. 3: Der Vergleich von Luftbildern macht deutlich, wie sich der Charakter des Auengebiets Sandey zwischen 1940 und 2007 verändert hat. Die roten Linien stellen die Lage von Hochwasserschutzdämmen dar.



möglicher Revitalisierungsmassnahmen, etwa der Entfernung von Seitendämmen, zu untersuchen. Dabei soll der Überschwemmungsschutz gewährleistet und die bestehende Nutzung mit einbezogen werden. Die Studie soll die nachhaltige Entwicklung aktiv fördern, indem sie wissenschaftliche Grundlagen liefert für den sachlichen Dialog zwischen den verschiedenen Interessenvertreterinnen und -vertretern und für eine transparente Entscheidungsfindung für ein zukünftiges Management. Vergleichsuntersuchungen an anderen Flusssystemen und die Einbindung verschiedener Akteurinnen und Akteure auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene sollen gewährleisten, dass die Erkenntnisse auch auf andere Situationen übertragbar sind.

Das rund 3,5 Kilometer lange und 118 Hektar grosse Auengebiet der Sandey zeichnet sich auf den ersten Blick durch eine hohe Vielfalt an Strukturen aus und enthält die typischen Habitate einer natürlichen Flussaue: Inseln, Auenwald, verschiedene Gerinne und Kiesbänke. Als Auengebiet von nationaler Bedeutung stellt es ein vorrangiges Schutzobjekt dar. Sozioökonomisch wird das Gebiet als Weidefläche und für verschiedene Privatzwecke genutzt. Ein 1950 erstellter, flussaufwärts liegender Staudamm zweigt zudem rund 30 Prozent des durchschnittlichen Jahresabflusses des Urbachs zur Elektrizitätserzeugung ab. Zudem wurden insbesondere in den 1990er-Jahren innerhalb der aktiven Aue zahlreiche Längsverbauungen zum Schutz vor Überschwemmungen eingesetzt.

Historische Luftaufnahmen zeigen, wie stark sich das Auengebiet über die Zeit gewandelt hat. Die Häufigkeit verschiedener Habitate und die Komplexität der Gerinne variierten im Lauf der Zeit erheblich, was für eine natürliche Flussaue in dieser Art untypisch ist. Verglichen mit dem naturnahen Zustand, wie er

Abb. 4: Habitatveränderungen im Auengebiet Sandey zwischen 1940 und 2007. Die Daten wurden anhand entsprechender Luftaufnahmen erhoben.

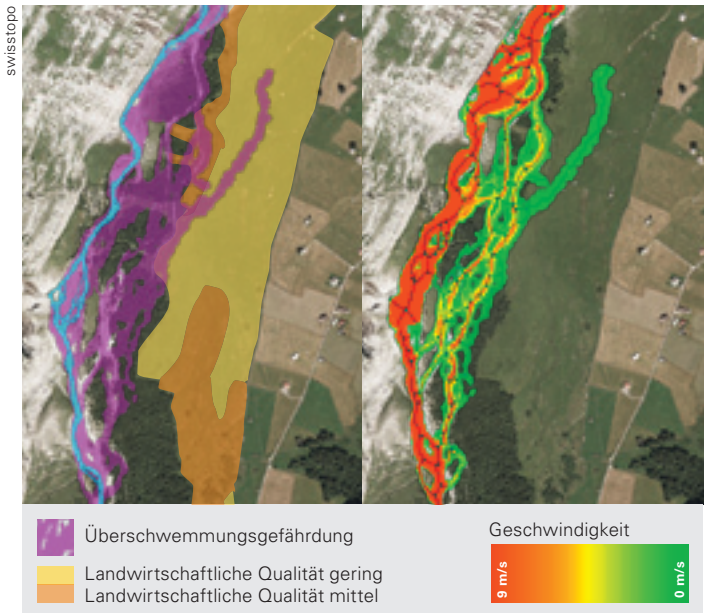
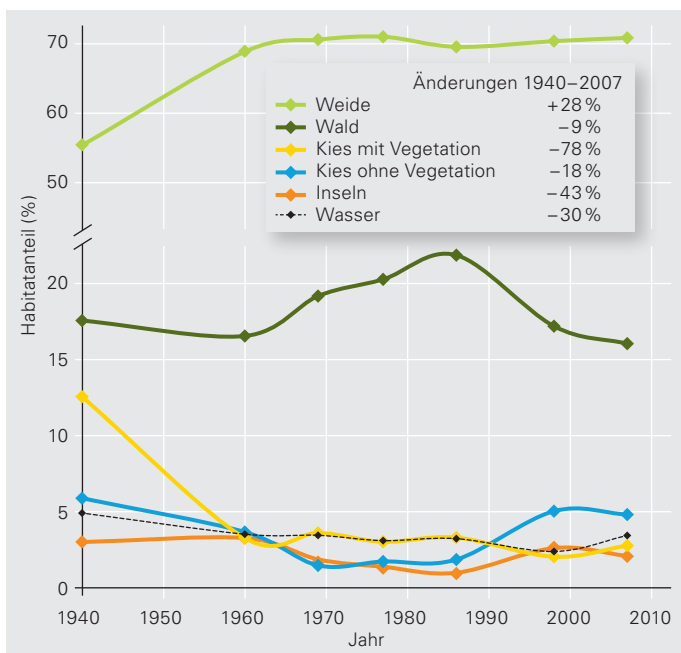


Abb. 5: Mit Computermodellen lassen sich die sozioökonomischen und ökologischen Folgen verschiedener Managementszenarien im Sandey-Auengebiet simulieren. So lässt sich zum Beispiel vorhersagen, welche Auswirkungen eine Entfernung der Hochwasserschutzdämme auf die Landnutzung, die Fließgeschwindigkeiten und die Gewässernetzung mit sich bringt.

bis 1940 vorherrschte, präsentiert sich das Gebiet heute viel gleichförmiger und einzelne auentypische Habitate sind seltener geworden (Abb. 3 und 4). Höchstwahrscheinlich lässt sich diese Entwicklung auf die Wasserentnahme und insbesondere auf den Einsatz von Längsverbauungen zum Hochwasserschutz zurückführen, welche die natürliche Dynamik der Sandey-Aue erheblich einschränken [6].

**Auswirkungen auf die ökologischen Prozesse.** In den verschiedenen Habitaten erhoben wir die Respirationsraten als Mass für den Kohlenstoffumsatz und berechneten diesen für die heutigen Verhältnisse. Mithilfe der habitatspezifischen Respirationsraten und der ehemaligen räumlichen Ausdehnung der Habitate konnten wir auch den historischen Kohlenstoffumsatz herleiten. Der Vergleich zeigt, dass sich der Kohlenstoffumsatz während der letzten 70 Jahre signifikant verändert hat. Dies deutet darauf hin, dass die strukturellen und funktionellen Eigenschaften einer Aue relativ rasch auf Veränderungen des hydrologischen Regimes reagieren. Durch die Wiederherstellung einer natürlicheren Überflutungsdynamik liesse sich die Habitatheterogenität verbessern und somit auch die Prozess- und Biodiversität des Auenökosystems wieder natürlicher gestalten.

Eine Rückkehr zu einer grösseren Flussdynamik – zum Beispiel indem man die Hochwasserdämme entfernen würde – in einer intensiv genutzten Landschaft wie die Sandey-Auen sie darstellen, geht möglicherweise mit einem Hochwasserrisiko für Mensch und Infrastruktur einher. Dank Fortschritten in der Landschaftsmodellierung lassen sich die verschiedenen, von den jeweiligen hydrologischen Gegebenheiten abhängigen Hochwas-

serszenarien heutzutage allerdings mit dem Computer simulieren und damit das Schadensrisiko minimieren. Gleichzeitig lassen sich Habitatveränderungen vorhersagen. Mit unseren Modellrechnungen möchten wir zum Beispiel evaluieren, in welchen Bereichen der Sandey-Auen sich eine Erhöhung der Dynamik ökologisch besonders positiv auswirkt und gleichzeitig die Gefahr von Hochwasserschäden vernachlässigbar ist (Abb. 5). Erste Resultate deuten darauf hin, dass das Öffnen zusätzlicher Seitenarme das Überschwemmungsrisiko sogar generell senken und zugleich die Habitatvielfalt und Biodiversität erhöhen könnte.

Mit dem Modell lässt sich ausserdem auch simulieren, wie der Klimawandel oder eine veränderte Wassernutzung das Abflussverhalten beeinflussen. Das Ziel ist es, Fachleute in der Praxis oder Entscheidungsträgerinnen und -träger bei der Planung eines nachhaltigen Wassermanagements zu unterstützen, das einerseits einen ökologisch funktionsfähigen Lebensraum und andererseits eine sozioökonomische Nutzung gewährleistet.

**Langzeitbegleitung ist wichtig.** Ein nachhaltiges Management der Wasserressourcen ist eine komplexe Aufgabe. Denn zum einen gilt es, die Bedürfnisse der Gesellschaft hinsichtlich der Nutzung der Gewässer zu gewährleisten, ohne deren ökologischen Kapazitätsgrenzen zu überschreiten. Zum anderen braucht es zuerst einmal ein gutes Verständnis der Ansprüche dieser Ökosysteme. Was brauchen sie, um intakt und langfristig funktionsfähig zu sein und um dadurch auch jene Dienstleistungen generieren zu können, die der Mensch beziehen will?

Die beiden Studien am Spöl und in der Sandey zeigen empirische und pragmatische Herangehensweisen, um ein nachhaltigeres Wassermanagement zu erreichen, das diese Komplexität berücksichtigt und die betroffenen Akteure einbezieht (Abb. 6). Die bisherigen Resultate am Spöl waren so überzeugend, dass die

Abb. 6: Ein Weg zu einem integrativen nachhaltigen Ressourcenmanagement: Die Messung relevanter Parameter im Feld (Indikatoren) erfasst den Zustand im Untersuchungsgebiet, Computermodelle simulieren die Auswirkungen verschiedener Managementszenarien, und das Monitoring ermöglicht die Langzeitbeobachtung.



gezielten Flutungen in die regulatorischen Bestimmungen dieses Flusses übernommen wurden. Zudem hat das Projekt vergleichbare Vorhaben auf internationaler Ebene initiiert, etwa am Snowy River in Australien oder am Colorado in den USA. Die Studie zeigt aber auch, dass ein Langzeit-Monitoring unabdingbar ist, um Entwicklungen zu rekonstruieren und Auswirkungen von Massnahmen zu evaluieren [7, 8].

Das Sandey-Projekt demonstriert, wie sich durch die Kombination verschiedener Methoden Veränderungen auf Landschaftsebene erfassen lassen und eine integrative Sichtweise hinsichtlich sozioökonomischer und ökologischer Ansprüche an Auenlandschaften geschaffen werden kann. Gleichzeitig bilden die Untersuchungen auch die Grundlage eines geplanten flächendeckenden Monitorings mithilfe der Fernerkundung. Beides soll dazu dienen, den langfristigen Erfolg von Massnahmen zu evaluieren und zu sichern.

Diese langfristige und umfassende Perspektive ist beim adaptiven Management und der Revitalisierung von Gewässerräumen absolut notwendig, um aus unvorhergesehenen Entwicklungen lernen zu können und sich in einem iterativen Prozess an eine optimale Balance zwischen ökologischen und sozioökonomischen Bedürfnissen heranzutasten. Wasserressourcenmanagement sollte als moralische Verpflichtung für die Gesellschaft und die Umwelt angesehen werden mit dem Ziel, Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen nachhaltig sicherzustellen. ○ ○ ○

- [1] Tockner K., Stanford J.A. (2002): Riverine flood plains: present state and future trends. *Environmental Conservation* 29 (3), 308–330.
- [2] Göggele W. (2012): Revitalisierung Fließgewässer. Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1208.
- [3] Bundesamt für Umwelt (2012): Einzugsgebietsmanagement – Anleitung für die Praxis zur integralen Bewirtschaftung des Wassers in der Schweiz. *Umweltwissen* 1204.
- [4] Robinson C.T. (2012): Long-term changes in community assembly, resistance and resilience following experimental floods. *Ecological Applications*, online.
- [5] Robinson C.T., Uehlinger U. (2008): Experimental floods cause ecosystem regime shift in a regulated river. *Ecological Applications* 18, 511–526.
- [6] Döring M., Blaurock M., Robinson C.T. (2012): Landscape transformation of an alpine floodplain influenced by humans – Historical analysis of aerial images. *Hydrological Processes*, online.
- [7] Robinson C.T., Döring M., Seelen L. (2011): Importance of protected areas for freshwater biomonitoring – Case studies in Switzerland. *Journal on Protected Mountain Areas Research and Management* 3, 13–23.
- [8] Robinson C.T., Örtli B. (2009) : Long-term biomonitoring of alpine waters in the Swiss National Park. *Journal on Protected Mountain Areas Research and Management* 1, 23–34.

# Potenzial und Grenzen der Wasserkraft



Alfred Wüest, Physiker, leitet die Abteilung Oberflächengewässer und lehrt an der ETH Zürich und Lausanne.

Koautoren: Andreas Bruder, Armin Peter, Stefan Vollenweider

Die Schweizer Wasserkraft steht vor milliardenschweren Herausforderungen. Es gilt, wirtschaftlich und ökologisch verträgliche Lösungen für die optimierte Spitzenstromproduktion und Speicherung von Überschussstrom aus neuen erneuerbaren Quellen zu finden. Beides dient sowohl der Schweiz als auch Europa und im Idealfall können die Gewässer und die Stromwirtschaft gewinnen.

In der Schweiz haben alle Zugang zu Strom. Weltweit ist dies keine Selbstverständlichkeit, denn die Planung einer nachhaltigen Stromversorgung ist eine höchst anspruchsvolle Herausforderung für jede Regierung. Diese Aufgabe ist seit Fukushima nicht einfacher geworden. In der Schweiz haben sowohl Parlament als auch Bundesrat noch 2011 den Ausstieg aus der gegenwärtigen Nutzung der Kernkraft beschlossen. Nun müssen wir dringend klären, wie die künftig fehlenden rund 24 Terawattstunden pro Jahr (TWh/a) kompensiert werden sollen. Diese Lücke, die wir in den nächsten Jahrzehnten durch Sparen und neue Quellen schliessen müssen, beträgt 40 Prozent des heutigen Strombedarfs – und vergrössert sich aufgrund des nach wie vor steigenden Stromkonsums laufend weiter.

Gesucht sind realistischerweise Energiequellen mit einer Gesamtleistung von 30 bis 40 TWh/a [1]. Naheliegender wäre, die wegfallende Stromerzeugung durch fossile Energieträger zu ersetzen. Doch hat sich die Schweiz zu den Klimazielen des Kyoto-Protokolls verpflichtet. Daher muss die Suche bei den erneuerbaren Stromquellen wie Wind, Sonne, Wasser oder Geothermie erfolgen. Welche Rolle kann und soll die Wasserkraftnutzung in Zukunft dabei übernehmen?

**Die ausgleichende Rolle der Wasserkraft.** Die Wasserkraft liefert in der Schweiz mit über 55 Prozent den wichtigsten Beitrag zur Stromproduktion – doch das verbleibende Potenzial ist beschränkt. Das Bundesamt für Energie [2], der Schweizerische Wasserwirtschaftsverband [3] und die Umweltorganisationen

schätzen den Beitrag der Wasserkraft etwas unterschiedlich ein. Realistischerweise liegt dieser bei einer zusätzlichen Produktion von netto rund 1 bis 3 TWh/a (Tab. 1). Abzüglich der Reduktion, welche die Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben bezüglich Restwasser mit sich bringt, ergeben betriebliche Optimierungen sowie neue Gross- und Kleinwasserkraftwerke eine bescheidene Mehrproduktion von weniger als 10 Prozent der heutigen Stromerzeugung [3]. Die Wasserkraft kann deshalb das anstehende Defizit nicht schliessen. Da auch die Windnutzung wenig beitragen kann und die künftige Rolle der Tiefengeothermie noch unsicher ist, wird offensichtlich, dass die Fotovoltaik den grössten Anteil zum künftigen Strom-Mix beisteuern muss.

Die Wasserkraft kann jedoch für die Stromproduktion in der Schweiz und in Europa in zweifacher Hinsicht zur Bewältigung der riesigen Herausforderung beitragen: (1) durch die Bereitstellung von Spitzenproduktion bei grosser Nachfrage und (2) durch die Speicherung während Zeiten des Überangebotes. Die hiesige Wasserkraft ist mit einer installierten Spitzenleistung von 13,4 GW und effektiven Spitzen von rund 10 GW nicht nur äusserst flexibel und kurzfristig einsetzbar, sondern verfügt mit dem alpinen Stauvolumen von etwa vier Kubikkilometern auch über ein robustes Rückgrat, um Regel- und Ausgleichsleistungen über Monate hinweg zu erbringen. Da in Europa in der Vergangenheit die stochastische (kurzfristig witterungsabhängige und somit nur bedingt planbare) Überproduktion von Wind und Sonne kaum eine Rolle spielte, wurden in den Alpen nur wenige Pumpspeicherkraftwerke für den Tag-Nacht-Ausgleich gebaut. Hier erwarten wir in naher Zukunft grosse Veränderungen: Bei der Speicherung von stochastisch erzeugtem Überschussstrom kann die Schweiz einen wichtigen Beitrag leisten.

**Wasserkraft für den täglichen Ausgleich.** Wenn künftig mehr neue erneuerbare Energie aus Wind (vom nördlichen Europa) und Fotovoltaik (aus der Schweiz) stammt, so wird die Stromproduktion im zeitlichen Verlauf unruhiger und kann täglich – ja sogar stündlich – enorm variieren (Abb. 1). In welcher Grössenordnung liegen die Überschüsse und Defizite der neuen Erneuerbaren und wie kurzfristig treten diese auf? Als Orientierung dient das eingangs definierte Stromdefizit von mindestens 30 TWh/a,

Tab. 1: Potenzial der zusätzlichen Wasserkraft [2–4].

Anpassungen	Geschätztes Potenzial (TWh/a)
Effizienzsteigerung, Optimierungen, Renovationen	1,0 bis 1,8
Grosswasserkraft	0,7 bis 1,4
Kleinwasserkraft	0,7 bis 1,7
Einhaltung minimale Restwassermenge	–2,0 bis –1,4
Klima	± 0
<b>Total</b>	<b>0,5 bis 3,5</b>

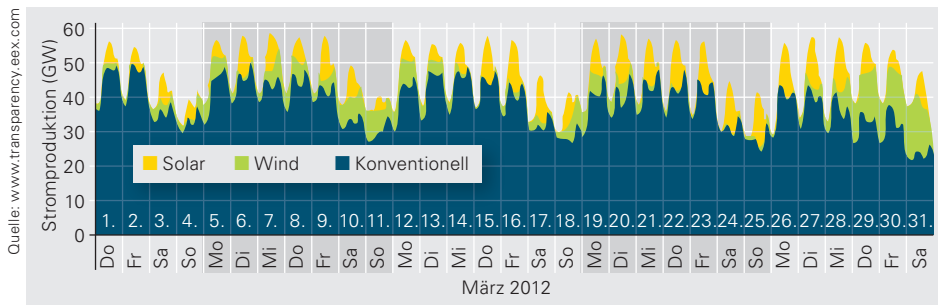
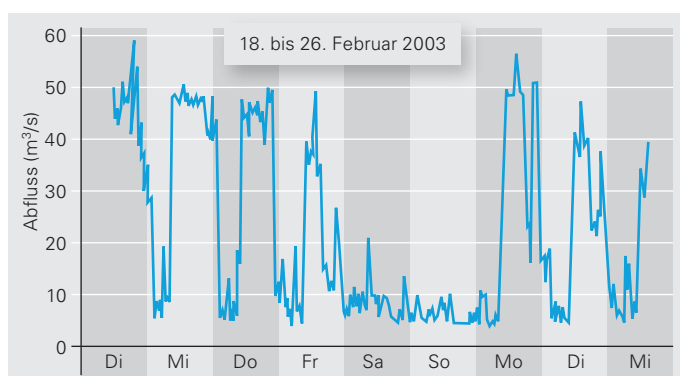


Abb. 1: Stromproduktion in Deutschland während des Monats März 2012. Am Samstag, 31. März, betrug die Stromproduktion aus Wind- und Solaranlagen mittags rund 32 GW, also mehr als 50 Prozent der gesamten Stromproduktion. Bei solchen Gelegenheiten sollten Pumpspeicherkraftwerke den Überschussstrom aufnehmen können.

das im Idealfall durch die Fotovoltaik gedeckt wird. Nach den praktischen Erfahrungen aus Deutschland ist eine installierte Spitzenleistung von rund 40 GW notwendig, um eine Jahresproduktion von 30 TWh/a zu erreichen [4]. Ein solch grosser Anteil an Fotovoltaikstrom würde zu kurzfristigen witterungsbedingten Leistungsschwankungen von bis zu 20 GW führen, welche die Schweizer Wasserkraftwerke zum aktuellen Zeitpunkt nicht vollständig ausgleichen könnten. Obwohl die Fotovoltaik den grossen Vorteil hat, dass die täglichen Maxima und Minima der Produktion weitgehend synchron zum Tagesbedarf anfallen und intelligentere Netze kurzfristige Schwankungen ausgleichen können, zeichnet sich trotzdem ab, dass die Kapazitäten für Spitzenlast erhöht werden müssen.

Variieren die Spitzenleistungen der Speicherkraftwerke künftig noch stärker, zum Beispiel aufgrund des Ausbaus der installierten Leistung, führt das vor allem an Wochentagen bei der Rückgabe des turbinieren Wassers zu enorm schwankenden Abflüssen. Diese unterschiedliche Wasserrückgabe führt im unterhalb liegenden Flussabschnitt zu Schwall und Sunk und somit zu grossen ökologischen Beeinträchtigungen in den betroffenen alpinen Flüssen (Abb. 2). Der rasche Anstieg und der anschliessend hohe Abfluss (Schwall) können die Gewässersohle destabilisieren und Gewässerorganismen wie Insektenlarven und kleine Fische wegschwemmen. Dies führt zu einer Reduktion des Vorkommens dieser Organismen und ihrer Biomasse und letztlich zu einer Veränderung der Artenzusammensetzung (Tab. 2). Während des

Abb. 2: Beispiel von Schwall/Sunk an der Hasli-Aare mit einem für den Winter typischen Abflussverhältnis von 10:1. Aufgrund des höheren Basisabflusses sind die Verhältnisse im Sommer meist deutlich günstiger.

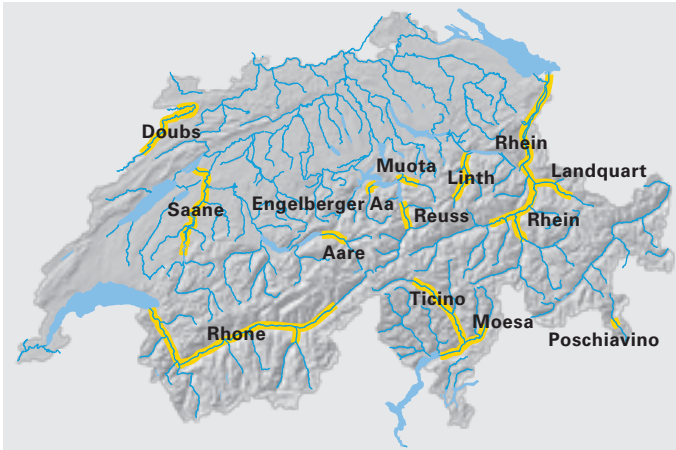


Absinkens des Wasserspiegels und des nachfolgend geringen Abflusses (Sunk) können Organismen (vor allem Fische) stranden und in ihrer Bewegungsfreiheit eingeschränkt werden. Das kurzfristige Zu- und Abschalten turbinieren Wassers und die enorme

Tab. 2: Effekte von Schwall und Sunk.

	Phänomen	Direkte Auswirkungen
<b>Rascher Anstieg des Abflusses (Schwall)</b>	Rasche Zunahme der Fließgeschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Drift von Fließgewässerorganismen (übersteigt Kompensation durch Aufwanderung)</li> <li>▶ Flucht der Tiere in Zonen geringer Strömung</li> <li>▶ Auswaschen von organischem Material (Ressource).</li> </ul>
	Mobilisierung der Gewässersohle	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Mechanische Schädigung</li> <li>▶ Drift von Fließgewässerorganismen</li> <li>▶ Entfernung von Feinstoffen von der Sedimentoberfläche</li> <li>▶ Erhöhung der Trübung</li> </ul>
	Eintrag und Transport von Schwebstoffen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Erhöhung der Trübung</li> <li>▶ Erhöhung der physiologischen Belastung</li> <li>▶ Mechanische Schädigung (Haut und Kiemen)</li> <li>▶ Abrasion von Organismen</li> <li>▶ Reduktion der Fotosynthese</li> </ul>
<b>Während hohem Abfluss</b>	Umlagerung der Gewässersohle	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Mechanische Schädigung von substratbewohnenden Organismen</li> <li>▶ Reduktion der inneren Kolmation</li> </ul>
	Veränderung der Flusstemperatur	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Drift von Fließgewässerorganismen</li> <li>▶ Erhöhte Aktivität</li> </ul>
	Veränderung der geochemischen Zusammensetzung des Flusswassers	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Exposition der Organismen in unterschiedlichen Konzentrationen von Sauerstoff, Nährstoffen sowie organischem und anorganischen Gehalt</li> </ul>
<b>Rasche Abnahme des Abflusses (Sunk)</b>	Abnahme der benetzten Gewässerfläche	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Stranden von Organismen (Austrocknen, Gefrieren von Flächen und Laichgruben)</li> <li>▶ Blockieren von Organismen (ungeeignete Lebensräume)</li> </ul>
	Rasche Abnahme der Fließgeschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Aussedimentieren der Schwebstoffe</li> <li>▶ Kolmation der Gewässersohle</li> </ul>
<b>Während geringem Abfluss</b>	Geringe Gewässerfläche, geringe Wassertiefe	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Übliche Restwasserproblematik: veränderte Wasserqualität (reduzierte Lebensräume und Durchgängigkeit, Temperatur)</li> </ul>
<b>Hohe Variabilität des Abflusses</b>	Unnatürliches Abflussregime	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Veränderte Morphologie</li> <li>▶ Verhaltensänderungen von Makrozoobenthos und Fischen</li> </ul>





Quelle: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Abb. 3: Karte der wichtigsten Flussabschnitte mit wesentlichen Beeinträchtigungen durch Schwall und Sunk, die sich schwerpunktmässig auf die unteren Einzugsgebiete der Zuflüsse oberhalb der Alpenrandseen konzentrieren. Stark betroffen sind etwa die Rhone oberhalb des Genfersees, der Alpenrhein oberhalb des Bodensees sowie der Ticino, die Saane und der Doubs.

Variation im Abfluss führen somit zu einer Vielzahl negativer Effekte für die Gewässerökologie und insbesondere für die Biozönose [5]. Speziell für Fische und wirbellose Wasserbewohner haben diese raschen Abfolgen von Schwall und Sunk verheerende Auswirkungen. Pumpspeicherwerke dagegen sind bezüglich Schwall und Sunk neutral, da beim Austausch zwischen Unterbecken und Oberbecken die Flüsse nicht betroffen sind.

**Massnahmen zur Dämpfung von Schwall zu Sunk.** Die vom Schwall/Sunk betroffenen Flüsse erstrecken sich über den gesamten Alpenraum, doch ist das Ausmass in der Schweiz besonders oberhalb der Alpenrandseen augenfällig (Abb. 3). Aufgrund

Abb. 4: Illustration eines möglichen Beruhigungsbeckens [8]. Im Vordergrund von rechts oben nach links unten ist die Aare bei Innertkirchen zu erkennen, in die das Gadmerwasser einmündet. Mit einem Volumen des Beckens von rund 50 000 Kubikmetern liesse sich das Schwall-Sunk-Verhältnis von 8:1 auf 5:1 verbessern.



der Dimension der Beeinträchtigung und der sich abzeichnenden künftigen Nutzung hat das Parlament mit der Revision des Gewässerschutzgesetzes 2010 entschieden, dass künftig wesentliche negative Beeinträchtigungen des Schwall-Sunk-Betriebes zu beseitigen seien. Um die Verschärfung der gesetzlichen Bestimmungen zu erfüllen, sind primär bauliche Massnahmen vorgesehen, während freiwillig auch betriebliche möglich sind. Die Kantone entwerfen zurzeit einen strategischen Sanierungsplan, der mit anderen Massnahmen (Revitalisierungen) im Einzugsgebiet abzustimmen ist, und verfügen anschliessend die Sanierungspflicht.

Beruhigungsbecken und Ausgleichsbecken bieten solche baulichen Möglichkeiten, um Schwall/Sunk zu dämpfen (Abb. 4). Während kleine Beruhigungsbecken vor allem den Anstieg und den Abfall, nicht aber die Spitze des Abflusses dämpfen, haben Ausgleichsbecken ein deutlich grösseres Volumen, sodass durch Tages- oder Wochenausgleich die Maxima und Minima gebrochen werden können. Eine Studie im Auftrag des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbands hat den baulichen Aufwand abgeschätzt [6]: Bei einem Schwall-Sunk-Verhältnis von 5:1 liegen diese Volumina für die alpinen Hauptflüsse Rhein, Rhone, Reuss, Aare, Ticino und Inn im Bereich von einigen 100 000 bis mehreren Millionen Kubikmetern. Der Landbedarf beträgt Dutzende von Hektaren, abhängig davon, ob der Ausgleich über einen Tag, eine Woche oder über mehrere Monate erfolgen soll.

Ausgleichsbecken könnten zusätzlich als kleine Unterbecken von Pumpspeicherwerken dienen und somit einen konstruktiven Beitrag zum Lastausgleich der variablen neuen erneuerbaren Energien liefern. So liesse sich mit genügend grossen Ausgleichsbecken stochastisch anfallender Wind- und Solarstrom für einige Stunden in höher gelegenen Stauseen speichern. Ausgleichsbecken der Grössenordnung einiger Millionen Kubikmeter dürften allerdings aus Platzgründen auf Widerstand stossen. Sie sind jedoch nötig, falls die direkt in einen Fluss turbinierte Spitzenleistung bestehender Anlagen erhöht wird.

**Pumpspeicher für den längerfristigen Ausgleich.** Neben Ausgleichsbecken mit Pumpanlagen werden künftig vor allem zusätzliche neu gebaute Pumpspeicherkraftwerke dazu beitragen müssen, die Fluktuationen der neuen erneuerbaren Energien auszugleichen. Heute betreibt die Schweiz 14 meist kleine Pumpspeicherkraftwerke mit einer installierten Pumpleistung von 1,4 GW (Tab. 3). Bei der oben erwähnten Grössenordnung der zu erwartenden stochastischen Schwankungen im europäischen Netz ist diese Leistung ein Tropfen auf den heissen Stein. Momentan befinden sich deshalb in der Schweiz diverse Projekte in der Planungs- oder Bewilligungsphase. Drei grosse Anlagen sind im Bau.

Sind Pumpspeicherkraftwerke mit hochalpinen Speicherseen die umweltverträgliche Lösung? Der Pumpspeicherbetrieb zwischen bestehenden Stauseen oder mit einem sehr grossen Alpenrandsee als unteres Becken verursacht eher geringe Eingriffe in die natürlichen Gewässer, sofern die Pumpanlagen geeignet ausgerüstet sind, um das Einziehen von Fischen zu verhindern. Negative Auswirkungen auf Fische kennt man beispielsweise vom Pumpspeicherkraftwerk Geesthacht an der Elbe. Besonders kritisch ist auch die hydrologische und gewässerökologische Ver-

Existierende		Total 1460	
Grimsel 2	352	Ova Spin	52
Hongrin-Léman	256	Handeck	48
Mapragg	159	Zermeiggern	46
Robiei	157	Mottec	36
Nestil	140	Chatelard-Barbarine	32
Ferrera I	90	Sambuco-Peccia	24
Etzselwerk	54	Rempen	16
Im Bau		Total 2140	
Hongrin-Léman/Veytaux II, 2015	240	Nant de Drance/Emosson, 2017	900
Linth-Limmern/Muttsee, 2015	1000		
Im Bewilligungsverfahren		Total 1630	
Lagobianco (Val Poschiavo)	1000	Grimsel 3 (KWO Plus)	630

Tab. 3: Existierende und geplante Pumpspeicherkraftwerke der Schweiz und ihre Leistung in MW.

mischung verschiedener Einzugsgebiete zu betrachten. Kleine Seen als Becken sind aus ökologischen Gründen (Wasserspiegelschwankungen, Temperatur- und Trübungsänderungen) abzulehnen. Die Grösse des Lago di Poschiavo im Puschlav gilt dabei als Grenzfall [7]. Der grosse ökologische Vorteil von Pumpspeicherkraftwerken besteht darin, dass sich die Spitzenproduktion ohne zusätzliche Schall-Sunk-Belastung erhöhen lässt.

Gemäss Tabelle 3 könnte die Schweiz zum Zeitpunkt des Ausstiegs aus der Kernkraft über eine installierte Pumpenleistung von circa 6 GW verfügen, was für den täglichen und wöchentlichen Ausgleich komfortabel reichen und zusätzlich einen Service für Europa bieten würde. Diese Kapazität reicht dagegen nicht, um mehrwöchige, sehr kalte, heisse oder trockene Perioden zu überbrücken, geschweige denn für den saisonalen Ausgleich. Mit diesen Systemleistungen könnte die Wasserwirtschaft aber ansehnliche Gewinne erzielen, die sie in die ökologisch notwendigen Kompensationen investieren könnte.

**Wasserkraft für den saisonalen Ausgleich?** Wenn wir davon ausgehen, dass die Schweiz den wegfallenden Kernkraftstrom in Zukunft vor allem aus Fotovoltaik erzeugen wird, stellt sich die Frage, ob die (bestehende) Wasserkraft auch den saisonalen Ausgleich schaffen kann. Erfahrungen aus Deutschland zeigen, dass von der saisonalen Produktion des Solarstroms im Frühling und Herbst rund 50 Prozent, im Sommer 40 Prozent und im Winter 10 Prozent anfallen. Das bedeutet für die Schweiz, dass die Fotovoltaik im Sommer einen Überschuss von 4 bis 5 TWh produzieren würde, der im Winter fehlen würde. Diese Strommenge im heutigen Stauvolumen zu speichern ist unrealistisch, da dieses bereits heute für den saisonalen Ausgleich gebraucht wird. Eine Überschlagsrechnung zeigt, dass ein zusätzliches Volumen von circa einem Kubikkilometer nötig wäre, um diese zusätzliche Strommenge saisonal umzulegen. Dies entspricht in etwa dem gesamten Speichervolumen des Kantons Wallis mit seinen riesigen Stauseen Grand-Dixence, Mauvoisin und Emosson. Dass

der Bau neuer Stauseen in diesen Dimensionen – ein Teil könnte durch Erhöhung bestehender Staumauern realisiert werden – gesellschaftlichen Widerspruch provozieren wird, ist offensichtlich.

**Forschungsfragen zur nachhaltigen Gewässernutzung.** In Anbetracht dieser Vision zur Entwicklung der Wasserkraft ergibt sich eine Vielzahl praktischer Fragen zu den ökologisch akzeptablen Randbedingungen der Spitzenstromproduktion und der Stromspeicherung: Welche Änderungen bezüglich Abfluss und Sohlenbelastung sind bei der Sanierung von Schwall-Sunk-Strecken anzustreben? Wie sind Beruhigungs- und Ausgleichsbecken zu gestalten, damit sich Pumpspeicher und Wochenausgleich lohnen? Welche Minimalanforderungen bezüglich Temperatur, Trübung, Seespiegelschwankung und Habitatansprüchen von Fischen sind beim Pumpspeicherbetrieb für die unterliegenden Gewässer tolerierbar? Eine Forschungsagenda mit solchen Zielsetzungen soll so rasch wie möglich ausgearbeitet werden (siehe Seite 26).

**Fazit.** Mit Spitzenproduktion und Pumpspeicherung kann die Wasserkraft einen zentralen und konstruktiven Beitrag leisten, um den künftig stochastisch erzeugten Strom ins europäische Netz zu integrieren. Diese Anpassungen der Wasserkraft, die im Idealfall zu einer Win-win-Situation führen können, erfordern in der Schweiz milliardenschwere Investitionen: (1) für den Ausbau der Fotovoltaik und (2) der Netzkapazität, (3) für neue Pumpspeicherkraftwerke und (4) den Aus- und Neubau alpiner Speicher sowie (5) für Beruhigungs- und Ausgleichsbecken. Während der wöchentliche Ausgleich von Angebot und Nachfrage des Stroms mit realistischem Aufwand erreicht werden kann, sind für den saisonalen Ausgleich neue alpine Speicher notwendig. Falls sich dies als gesellschaftlich unakzeptabel erweist, sind für den Winter entweder fossile Kraftwerke oder zusätzliche Windkraftanlagen im Ausland notwendig. ○ ○ ○

- [1] ETH Zürich (2011): Energiezukunft Schweiz, Studie vom November 2011.
- [2] Bundesamt für Energie (2011): Energieperspektiven 2050. Abschätzung des Ausbaupotenzials der Wasserkraftnutzung unter neuen Rahmenbedingungen.
- [3] Pfammatter R. (2012): Wasserkraftpotenzial der Schweiz – eine Auslegeordnung. Wasser Energie Luft 104 (1).
- [4] European Energy Exchange AG, Leipzig, [www.transparency.eex.com](http://www.transparency.eex.com)
- [5] Baumann P., Klaus I. (2003): Gewässerökologische Auswirkungen des Schwallbetriebes – Ergebnisse einer Literaturstudie. Mitteilungen zur Fischerei 75, Bundesamt für Umwelt.
- [6] Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband (2006): Kraftwerksbedingter Schwall und Sunk. Eine Standortbestimmung. Studie von VAW/ETHZ und LCH/EPFL.
- [7] Bonalumi M., Anselmetti F.S., Wüest A., Schmid M. (2012): Modeling of temperature and turbidity in a natural lake and a reservoir connected by pumped-storage operations. Water Resources Research. akzeptiert.
- [8] Kraftwerke Oberhasli (2011): Aufwertung der Kraftwerke Handeck 2 und Innertkirchen 1: Das Wasser effizienter nutzen. Informationsbroschüre, KWO, Innertkirchen.

# Forschung und Praxis müssen zusammenarbeiten

In der Schweiz sind die Herausforderungen für die Gewässerforschung und die Fachleute in der Praxis gross. Die anstehenden Aufgaben lassen sich nur bewältigen, wenn Wissenschaft und Praxis zusammenspannen, ist Bernhard Wehrli von der Eawag-Direktion überzeugt. Mit dem praxisorientierten Forschungsprogramm Fließgewässer Schweiz will die Eawag dafür ein wirksames Netzwerk knüpfen.

Interview: Andres Jordi

## **Einer der drei Forschungsschwerpunkte der Eawag lautet Wasser für das Funktionieren der Ökosysteme. «Funktionieren» die aquatischen Ökosysteme in der Schweiz?**

Die Gewässerqualität ist gut, da ist die Schweiz auf der Zielgeraden. Mit der kürzlich veröffentlichten Plan des Bundesrates, den Eintrag von Mikroverunreinigungen zu verringern, gehört sie gar zu den Pionierinnen. Bei den Lebensräumen sieht es leider anders aus. Sie sind stark verbaut durch Hochwasserschutzmassnahmen und die Wasserkraftnutzung. Das hindert die Fische am Wandern und beeinträchtigt ihre natürliche Verlaichung. Bei der Sanierung der Restwasserstrecken gibt es ein Vollzugsdefizit.

Bereits 1992 hat der Bund die Kantone verpflichtet, in ihren Fließgewässern für angemessene Restwassermengen zu sorgen, um die ökologischen Auswirkungen der Wasserkraftnutzung zu vermindern. Vor allem die grossen Alpenkantone sind hier sehr im Rückstand. Sie werden die Umsetzung bis zum Ablauf der gesetzten Frist 2012 grösstenteils nicht mehr schaffen.

## **Dämpft das nicht die grossen Hoffnungen, die mit der jüngsten Revision des Gewässerschutzgesetzes verbunden sind?**

Das Problem bei der Restwassersanierung ist, dass die Kantone sie kostenneutral umsetzen und teilweise sogar auf Einnahmen aus der Wasserkraft verzichten müssen. Bei der neuen Gesetzesrevision steht hingegen Geld zur Verfügung, um Massnahmen für Revitalisierungen oder zur Verminderung der Auswirkungen des Schwall-Sunk-Betriebs zu finanzieren. Die Kantone kriegen über den Finanzausgleich und eine Abgabe auf den Stromtransport frisches Geld in ihre Kassen. Von daher bin ich optimistisch, dass die Umsetzung zügiger vorangeht.

## **Kommt die Umsetzung durch einen möglichen Ausbau der Wasserkraft, der im Zusammenhang mit dem Atomausstieg gefordert wird, nicht unter Druck?**

Tatsächlich ist das eine neue Baustelle. Das Bundesamt für Energie möchte die Stromproduktion aus der Wasserkraft um rund 10 Prozent erhöhen. Neben der Optimierung bestehender Anlagen soll der zusätzliche Strom je zur Hälfte aus Gross- und Kleinwasserkraftwerken fließen. Die Realisation gewisser Grosskraftwerke macht durchaus

Sinn. Insbesondere neue Kleinkraftwerke, von denen eine ganze Anzahl gebaut werden müsste, stehen aber im Widerspruch zum Anliegen, Durchgängigkeit und Vernetzung der Gewässer zu verbessern, und hätten grosse negative Auswirkungen auf die aquatischen Lebensräume. Die Schweiz nutzt bereits heute 90 Prozent

ihres Wasserkraftpotenzials. Daneben braucht es auch intakte Gewässerstrecken zur Erhaltung der Biodiversität und der Ökosystemfunktionen. Hier besteht ein ernsthafter Interessenkonflikt.

**Wie lässt sich dieser lösen?** Mit der Wasseragenda 21 haben wir für konstruktive Diskussionen eine gute Plattform, auf der alle im

Wasserbereich aktiven Akteure vertreten sind – von der Eawag und den Behörden über die Wasserwirtschaft bis zu den Umweltorganisationen. Meiner Meinung nach wäre es zudem sinnvoll, wenn die Kantone Gewässerabschnitte priorisieren würden: in welchen eine zusätzliche Nutzung möglich ist, bei welchen der Schutz Vorrang hat und wo eine Interessenabwägung stattfinden muss. Damit liessen sich die Reibungsverluste minimieren und man könnte die Zahl umstrittener Objekte reduzieren.

**Was gibt es für die Forschung noch zu tun?** Uns fehlt immer noch eine solide Datenbasis zur aquatischen Biodiversität. Bei Massnahmen im Gewässerschutz ist Biodiversität zwar stets als wichtiges Ziel genannt, was das umfasst, ist aber unklar: Welche Vielfalt gilt es wo zu schützen? Mit welchen Massnahmen lässt sich das erreichen? Welche Arten etablieren sich, wenn wir die Lebensräume aufwerten? Sind es überhaupt die seltenen, wertvollen Organismen? Wünschenswert ist zudem ein Monitoring, das die Biodiversität auch auf genetischer Ebene erfasst. Die Forschung kann mit der Bereitstellung geeigneter Konzepte und Methoden dazu beitragen. Weil die Gewässerhoheit bei den Kantonen liegt, sind die Daten aus Monitorings oft nicht flächendeckend und nur schlecht verfügbar. Es wäre wichtig, diese sowohl für die Öffentlichkeit als auch für die Forscherinnen und Forscher einfacher zugänglich zu machen.

In Zukunft braucht es auch eine engere Zusammenarbeit zwischen der Hydrologie und der Biologie. Wir wissen noch zu wenig darüber, wie aquatische Lebensräume funktionieren und wie die

Gewässermorphologie und die Organismen zusammenspielen. Das Verständnis über die Gesetzmässigkeiten ist unabdingbar, um bei Sanierungen oder Revitalisierungen jene Massnahmen treffen zu können, die ökologisch möglichst viel nützen.

**Wie lassen sich diese Mankos beheben?** Angesichts der anstehenden Aufgaben im Zusammenhang mit dem revidierten Gewässerschutzgesetz und dem Atomausstieg erarbeitet die Eawag zurzeit das Forschungsprogramm Fließgewässer Schweiz. Damit wollen wir unter anderem in den Bereichen Revitalisierung und Fischmigration Wissenslücken schliessen und zur Entwicklung einer umweltfreundlicheren Wasserkraftnutzung beitragen. Zum Beispiel weiss man zwar, wie funktionierende Fischtreppe zu bauen sind, damit die Fische stromaufwärts schwimmen können. Hingegen klappt der Abstieg noch schlecht. Starkes Gewicht legen wir dabei auf eine enge Zusammenarbeit mit der Praxis und die Umsetzbarkeit im Feld.

**Mit wem arbeitet ihr zusammen?** Ein zentraler Partner ist das Bundesamt für Umwelt (Bafu), das uns in unseren Bestrebungen unterstützt. Insbesondere beim Wissenstransfer wollen wir eng mit dem Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA) zusammenarbeiten. Auch die Fischerinnen und Fischer spielen – quasi als Laienforschende – eine wichtige Rolle. Sie kennen die Gewässer und mithilfe ihrer Rückmeldungen kann die Wissenschaft ihre Zielsetzungen laufend präzisieren. Daneben möchten wir die Akteure der Wasseragenda 21 einbinden.

Seitens der Forschung führt die Eawag die bereits seit einigen Jahren bestehende enge Zusammenarbeit mit dem Hydrauliklabor der ETH Zürich, dem Laboratoire de constructions hydrauliques der ETH Lausanne und der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft weiter. Eine weitere Partnerin haben wir in der Hydrologischen Kommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften.

**Wie sieht der Fahrplan aus?** Momentan suchen wir eine Programmleiterin oder einen Programmleiter für die Koordination und Organisation. Wir wollen jemanden mit wissenschaftlichem Hintergrund und viel praktischer Erfahrung. Die Person soll vor allem für die Umsetzung in die Praxis sorgen. Das Programm wird Ende 2012 starten und läuft vorerst für drei Jahre mit der Aussicht auf eine Verlängerung. Ein Zeithorizont von sechs bis acht Jahren ist notwendig, um das Netzwerk aufzubauen und zu stärken.

**Wie wird das Programm finanziert?** Das Geld stammt aus verschiedenen Töpfen. Die Eawag wird in Partnerschaft mit dem Bafu für die Grundfinanzierung der neuen Programmleiterstelle sorgen. Das Bafu finanziert vor allem praxisnahe Projekte; wenn es primär um wissenschaftliche Fragestellungen geht, ist natürlich der Nationalfonds eine Anlaufstelle. Auch über die Kommission für Technologie und Innovation des Bundes liessen sich in Kooperation mit der Privatwirtschaft gewisse Vorhaben finanzieren. Schliesslich trägt die Eawag mit ihrem internen Finanzie-



Peter Pentzka

rungsprogramm dazu bei, Studien anzuschieben oder ergänzend zu unterstützen.

**Wie stellt ihr die Umsetzung in die Praxis sicher?** Nach meinen eigenen Erfahrungen ist es sehr hilfreich, bei praxisorientierten Projekten wirklich direkt mit den Profis der Privatwirtschaft zusammenzuarbeiten. Dabei können wir lernen, was in der Praxis wirklich gefragt ist und mit welchen Problemen sie kämpft. Die Fachleute in der Praxis bekommen ihrerseits einfach Zugang zu Forschungsergebnissen. Im Programm Fließgewässer Schweiz sollen regelmässige Weiterbildungsanlässe diesen Wissens- und Erfahrungsaustausch garantieren. Wir sind sehr interessiert an Rückmeldungen aus der Praxis und sind diesbezüglich auf offene Kommunikationskanäle angewiesen: Wenn die Leute in der

Praxis Bedürfnisse und Anliegen haben, dann möchten wir das wissen. So gesehen will Fließgewässer Schweiz Praktikerinnen und Praktikern auch eine offene Türe bieten. Für die Planung und Umsetzung der anstehenden Aufgaben steht sehr wenig Zeit zur Verfügung. Dies lässt sich nur erreichen, wenn wir zusammenarbeiten.



## Agenda

### Kurse

3.–4. Oktober 2012, Eawag Dübendorf

**Evaluation von ökotoxikologischen Tests**

31. Oktober – 2. November 2012, Eawag Dübendorf

**VSA-Eawag-Kurs: Messen – Regeln – Überwachen in der Abwasserreinigung**

7.–8. November 2012, Eawag Dübendorf

**Nanomaterialien in der aquatischen Umwelt**

### Tagungen

28.–29. Juni 2012, Eawag Dübendorf

**1st European Conference on the Replacement, Reduction and Refinement of Animal Experiments in Ecotoxicology**

14. September 2012, Empa-Akademie, Dübendorf

**Herausforderungen einer nachhaltigen Wasserwirtschaft**

22. November 2012, Landhaus Solothurn

**5. Fachtagung ChloroNet**

Weitere Informationen: [www.eawag.ch/veranstaltungen](http://www.eawag.ch/veranstaltungen)

## Neu erschienen



Der Bundesrat eröffnete im Mai 2012 die Vernehmlassung für eine Änderung des Gewässerschutzgesetzes. Die Neuerung sieht vor, den Ausbau ausgewählter Kläranlagen zur Entfernung von Mikroverunreinigungen über eine gesamtschweizerische Lösung verursachergerecht zu finanzieren. Die Eawag hat massgeblich an der Entwicklung und der Evaluation des Konzepts und der Massnahmen zur Reduktion dieser

Spurenstoffe aus Medikamenten und Chemikalien mitgewirkt. Die Erkenntnisse hat das Bundesamt für Umwelt nun in der Publikation «**Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser**» veröffentlicht. Der Bericht zeigt auf, wie sich mit weitergehenden technischen Verfahren, zum Beispiel mit Adsorption an Pulveraktivkohle oder mit Ozonierung, die Wasserqualität deutlich verbessern lässt. <http://tinyurl.com/micropoll-bafu>

## Faktenblätter und Publikationen

Zu wichtigen aktuellen Themen bietet die Eawag auf ihrer Website verschiedene Faktenblätter an. Neu herausgekommen sind Informationen zur Entfernung von Mikroverunreinigungen, zur Phosphorbelastung im Brienzersee und zur Strassen-salzung: [www.eawag.ch/medien/publ/fb](http://www.eawag.ch/medien/publ/fb)

Alle Publikationen der Eawag-Forscherinnen und -Forscher samt Zusammenfassungen der einzelnen Artikel sind in der Eawag-Bibliothek Lib4RI erhältlich. Darin enthaltene «open access»-Publikationen können frei heruntergeladen werden: [www.lib4ri.ch/institutional-bibliography/eawag.html](http://www.lib4ri.ch/institutional-bibliography/eawag.html)

## Neuer Leiter Verfahrenstechnik



Ab 2012 übernimmt **Eberhard Morgenroth** an der Eawag die Leitung der Abteilung Verfahrenstechnik. Er ist Umweltingenieur und studierte an der Technischen Universität von Hamburg-Harburg und der University of California. Er doktorierte an der Technischen Universität München und war zunächst Assistent und dann Associate Professor für Umweltingenieurwissenschaften an der University of Illinois in Urbana-Champaign. Seit 2010 hat er an der ETH Zürich eine Professur für Siedlungswasserwirtschaft. [www.eawag.ch/forschung/eng](http://www.eawag.ch/forschung/eng)

## Swiss Water Partnership

Vertreterinnen und Vertreter von 45 Schweizer Organisationen aus den Bereichen Verwaltung, Wissenschaft, Wirtschaft und Entwicklungszusammenarbeit haben im Februar 2012 in Bern die **Swiss Water Partnership** ins Leben gerufen. Der Zusammenschluss will das Profil des Schweizer Wassersektors international stärken und Synergien zwischen den Aktivitäten seiner Mitglieder nutzen. Die Eawag ist mit Christian Zurbrügg, dem Leiter der Abteilung Wasser und Siedlungshygiene in Entwicklungsländern, im Steuerungskomitee vertreten. [www.swisswaterpartnership.ch](http://www.swisswaterpartnership.ch)

## Auszeichnungen

Die **Fundación Sodis** in Bolivien erhielt 2012 den Water for Life Award der Vereinten Nationen. Die von der Eawag und der Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit gegründete Non-Profit-Organisation verbreitet Lösungen im Wasser- und Abwasserbereich in Lateinamerika. In den letzten elf Jahren hat sie mehr als eine Millionen Menschen in der Methode der solaren Wasserdesinfektion (Sodis) ausgebildet und ihre Arbeit auch auf weitere Themen wie Hygiene und Sanitär-lösungen ausgedehnt. [www.fundacionsodis.org](http://www.fundacionsodis.org)



Der Schweizerische Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW) hat den Umweltmikrobiologen **Thomas Egli** für seine Forschungsarbeit im Bereich der mikrobiologischen Trinkwasseruntersuchung geehrt. Mit Einsatz der Durchflusszytometrie habe Egli sozusagen das Fieberthermometer für die Wasserversorgung erfunden, sagte der SVGW-Präsident Mauro Suà. ○ ○ ○