

# news



**Umweltanalytik:  
neue Methoden,  
neue Möglichkeiten**

## Fokus



### 4 **Leichter Zugang zu Umweltdaten**

Daten über die Umwelt seien nur ungenügend verfügbar, konstatiert Eawag-Direktorin Janet Hering und plädiert für einen freieren Zugang.



### 6 **Auf der Suche nach den Unbekannten**

Bisherige Analysetechniken konnten nur wenige und bekannte Substanzen nachweisen. Neue Methoden erfassen auch unentdeckte Stoffe.



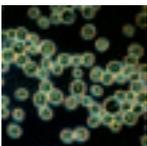
### 12 **Was Isotope über Schadstoffe aussagen**

Die Einzelstoff-Isotopenanalyse ermöglicht, die Isotopenzusammensetzung von Schadstoffen zu untersuchen und ihr Schicksal zu verfolgen.



### 18 **Passiv Proben nehmen**

Passivsammler erlauben räumlich und zeitlich differenziertere Analysen von Chemikalien in Fließgewässern als einzelne Stichproben.



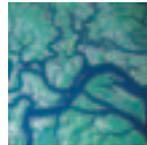
### 23 **Silber verändert die Zellregulation**

Mit so genannten Omik-Methoden lässt sich auf molekularer Ebene nachweisen, welche Effekte Umweltgifte auf Lebewesen haben.



### 28 **Der automatisierte Blick in den See**

Eine schwimmende Plattform misst, wie sich Algengemeinschaften im Tagesverlauf, über die Jahreszeiten und mit der Seetiefe verändern.



## Forum

### 32 **Vernetzung bestimmt die Artenvielfalt**

Ein Laborexperiment zeigt: Die in der Natur auftretenden Biodiversitätsmuster können durch flusstypische Netzwerkstrukturen entstehen.



### 36 **Überdüngte Flüsse in China**

Rasante wirtschaftliche Entwicklung und starkes Bevölkerungswachstum führen zu einer massiven Überdüngung im Haihe-Flusssystem.



### 41 **Der Faktor Mensch**

Umweltprobleme haben primär gesellschaftliche Ursachen. Die Einbindung der Sozialwissenschaften verspricht tragfähigere Lösungen.

## In Kürze

46 **Im Schweizerischen Lebensmittelbuch**

46 **Erste Ozonierungsanlage in Dübendorf**

47 **Anerkennungspreis der Gates-Stiftung**

## Impressum

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 / Übersetzungen: Jeff Acheson (e), Laurence Frauenlob-Puech (f) / Grafik: Peter Penicka, Peter Nadler

Erscheint zweimal jährlich in Deutsch, Englisch und Französisch, Nachdruck nach Absprache mit der Redaktion

Kostenloses Abonnement und Adressänderung: [eawag.news@eawag.ch](mailto:eawag.news@eawag.ch)

ISSN 1420-3979

Titelbild: Der Umweltchemiker Heinz Singer bereitet Proben vor für die Analyse mit der an die hoch auflösende Massenspektrometrie gekoppelten Flüssigchromatografie. (Foto: Aldo Todaro)



Rik Eggen, Molekularbiologe, ist stellvertretender Direktor der Eawag und lehrt an der ETH Zürich.

## Schneller, spezifischer, empfindlicher und komplexer

In den letzten Jahren hat sich die Umweltanalytik rasant verändert. Die Fortschritte im Bereich der Erbgutentschlüsselung, die Entwicklungen bei den Informationstechnologien und die immer ausgeklügelteren chemischen Messmethoden eröffnen der Forschung und der Praxis ganz neue Möglichkeiten. Sowohl in der chemischen als auch in der biologischen Analytik geht die Entwicklung hin zu immer schnelleren, spezifischeren und empfindlicheren Methoden. Immer mehr werden die verschiedenen Analyseverfahren auch kombiniert. Dies macht es heute möglich, komplexe Systeme und Zusammenhänge ganzheitlich zu untersuchen und zu verstehen.

Der Stand der Technik erlaubt es der Umweltchemie zum Beispiel, spezifische Substanzen einzeln oder in Gemischen in verschiedenen Umweltkompartimenten und bereits in sehr geringen Konzentrationen nachzuweisen. Mit den neuen Messmethoden lassen sich aber auch unbekannte Stoffe erfassen und deren mögliche chemische Identitäten feststellen. So hat die Einführung der hoch auflösenden Massenspektrometrie die chemische Analytik grundlegend verändert: von der Einzelanalytik einer begrenzten Anzahl von Verbindungen zur gleichzeitigen Bestimmung vieler Stoffe mit hoher Messempfindlichkeit. Die Anzahl der Substanzen in der Umwelt, deren Stoffmengen, Eintragswege und Verhalten lassen sich damit viel umfassender ermitteln. Das Analyseverfahren macht neue Monitoringkonzepte möglich und ist ein wesentlicher Beitrag zu einer zeitgemässen Überwachung der Wasser- und Gewässerqualität.

Um zu ermitteln, wie chemische Substanzen auf einen Organismus wirken, musste man sich früher auf einzelne biologische Parameter wie zum Beispiel die Überlebensrate beschränken. Die moderne biologische Analytik erlaubt es hingegen, zusätzlich Stoffwechselfunktionen sowie genetische und biochemische Prozesse von Lebewesen auf molekularer Ebene in ihrer Gesamtheit zu erfassen. Damit wandelten sich die Analyseverfahren in diesem Bereich zu einem – im Sinne der Systembiologie – ganzheitlichen Verfahren, das die verschiedenen biologischen Organisationsstufen einschliesst. Dank der methodischen Fortschritte in der biologischen Analytik und in der Bioinformatik in den letzten Jahren verfügen Forscherinnen und Forscher heute

über geeignete Werkzeuge, um differenzierte ökotoxikologische Risikobewertungen vorzunehmen. Immer häufiger können sie dabei auf neue standardisierte Tests zurückgreifen, die statt mit Tierversuchen mit Zellkulturen arbeiten. Basierend auf solchen Tests werden neue Konzepte zum Effektmonitoring erarbeitet und in der Praxis eingesetzt.

Mit den strategischen Schwerpunkten «Wasser für das Funktionieren der Ökosysteme», «Wasser für die Gesundheit und das Wohlergehen des Menschen» und «Entwickeln von wissenschaftlich fundierten Strategien bei Nutzungskonflikten» legt die Eawag die Stossrichtung ihrer Forschungsaktivitäten fest. Geht es bei Erstem darum, die Prozesse im System Wasser und die Ansprüche der aquatischen Umwelt besser zu verstehen, liegt der Fokus bei Zweitem auf den Voraussetzungen, die es braucht, um die Ressource Wasser nutzen zu können. Die moderne Umweltanalytik eignet sich hervorragend, hier einen wichtigen Beitrag zu leisten. Dasselbe gilt für die Lösung von Problemen in der Praxis.

Mit der vorliegenden Ausgabe der Eawag News möchten wir Ihnen deshalb einige der an der Eawag eingesetzten Verfahren näherbringen. Und ich lade Sie ein, sich mit den betreffenden Forscherinnen und Forschern in Verbindung zu setzen, falls Sie zu einer Methode mehr erfahren wollen oder eine Einsatzmöglichkeit in Ihrem Fachbereich sehen.

## «Wir müssen zu Umweltdaten leichter Zugang haben»

Informationen über die Umwelt sind für die Wissenschaft eine grundlegende Ressource. Im Zug der modernen Informationstechnologien wurden noch nie so viele Umweltbeobachtungsdaten erhoben wie heute. Allerdings seien viele Daten für Wissenschaft und Praxis nur sehr eingeschränkt verfügbar, konstatiert Eawag-Direktorin Janet Hering. Sie macht sich deshalb für einen freieren Zugang stark. *Interview: Andres Jordi*

**Noch nie wurden so riesige Datenmengen gesammelt wie heutzutage. Unser Planet steht unter Dauerbeobachtung von Satelliten, und Monitoring-Kampagnen erheben von der Gewässerbelastung bis zur Biodiversität fast alles Messbare. Ist das Informationszeitalter ein Paradies für Forschende?**

Tatsächlich hat die Forschung dank der modernen Informationstechnologien und den erhobenen Daten ganz andere Möglichkeiten als früher. Umweltbeobachtungsdaten sind für die Wissenschaft und die Gesellschaft eine essenzielle Ressource. Erst damit lassen sich Umweltprozesse überhaupt rekonstruieren und verstehen. Insbesondere über lange Zeiträume erhobene Daten sind unersetzlich, wenn es darum geht, langfristige Trends zu identifizieren oder zu ermitteln, wie sich bestimmte Aktivitäten des Menschen auf die Umwelt auswirken. Letztlich bilden sie auch die Basis fundierter politischer Entscheidungen. Eine langfristige Erhebung von Umweltdaten ist zudem für Erfolgskontrollen unabdingbar.

**Welche Umweltdaten nutzt die Wasserforschung?**

Erhebungen der Niederschläge, Abflussmengen in Flüssen, Pegelstände von Seen und des Grundwassers sowie Daten zur Wasserqualität oder zur aquatischen Artenvielfalt sind die Basisinformationen für unsere Arbeit. Manchmal ergeben sich wissenschaftliche Fragestellungen auch erst, weil gewisse Daten vorhanden sind. So war es zum Beispiel nur dank Langzeitaufnahmen der Wassertemperaturen in den Schweizer Gewässern möglich, Hinweise für die Auswirkungen des Klimawandels zu untersuchen.

**Fehlen gewisse Umweltdaten?**

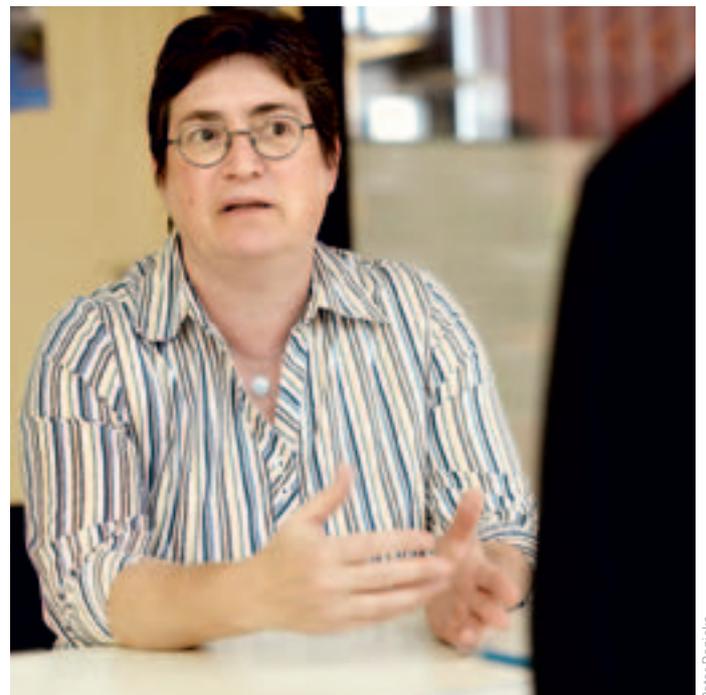
Das Problem ist eher die Unsicherheit, ob Datenerhebungen über längere Zeit fortbestehen. Denn langfristige Monitorings sind für viele Umweltfragen unersetzbar. Ebenfalls wichtig scheint mir, dass die Informationen auch nach dem Ende eines Monitoringprogramms à jour gehalten werden. Darüber hinaus sollten neue methodische Ansätze wie zum Beispiel genetische Analysen

in bestehende Beobachtungsprogramme integriert werden. Es reicht jedoch nicht, nur Umweltdaten zu erheben. Forschung und Praxis müssen auch möglichst leicht Zugang haben.

**Ist dies in der Schweiz der Fall?**

Nein, oft nicht. Das Bundesamt für Umwelt (Bafu) zum Beispiel konsolidiert zwar die Daten aus den Umweltmonitorings der Kantone, diese sind aber nur sehr beschränkt zugänglich. Die Datenhoheit liegt bei den Kantonen, und das Gewässerschutzgesetz verpflichtet diese nur, dem Bund die Ergebnisse ihrer Erhebungen mitzuteilen. Eine Weitergabe der Daten selber ist nicht vorgeschrieben. Der Zugriff auf Umweltdaten ist zum Teil auch aufgrund von Eigentumsansprüchen schwierig. Viele Schweizer Forschungsinstitutionen erheben ebenfalls Langzeitdaten, aber geben diese nur teilweise ans Bafu weiter. Wären nur schon die

**Es muss nicht alles neu erfunden werden, entsprechende Lösungen existieren bereits.**



Peter Penicka

bestehenden Daten allgemein verfügbar, wäre dies eine grosse Erleichterung für die Arbeit von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern.

### Erhebt die Eawag selber auch Daten?

Wir unterhalten zusammen mit dem Bafu und der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) das Messnetz «Nationale Daueruntersuchung der Fliessgewässer» (Naduf). Überdies bereiten wir zurzeit über Jahrzehnte gesammelte Daten zum Vorkommen von Phytoplankton in fünf Schweizer Seen digital auf und passen sie den modernen Standards an. Im Gegensatz etwa zur WSL war die Eawag bei der Erfassung von Umweltdaten bis jetzt aber wenig aktiv.

### Wie liesse sich die Datenverfügbarkeit verbessern?

Mit dem Bundesgesetz über das Öffentlichkeitsprinzip der Verwaltung sind die gesetzlichen Grundlagen für den freien Zugang vorhanden. Nun braucht es die Einsicht, dass der Nutzen die individuellen Interessen der Dateneinhaber in vielen Fällen aufwiegt sowie Kosten und Aufwand rechtfertigt. Danach müssten sich die wichtigen Datenbesitzer darauf einigen, ein gemeinsames Datenmanagementsystem zu entwickeln. Die Kooperation und die gemeinsame Nutzung der Ressourcen würden eine ökonomisch vertretbare Lösung ermöglichen. Es existieren heute entsprechende technische Lösungen, sodass nicht alles von Grund auf neu erfunden werden müsste. Eine solche Plattform sollte alle relevanten Akteure einbinden: neben den verschiedenen Bundesämtern die kantonalen Ämter, die für die Erhebung von Umweltinformationen verantwortlich sind, in Monitoring involvierte Pla-

nungsbüros sowie die Forschungsinstitutionen mit ihrer Erfahrung im Aufnehmen und Management von Daten. Wünschenswert wäre zudem, wenn sich innerhalb der Umweltwissenschaften in der Schweiz ein freier Datenaustausch etablieren würde.

### Gibt es erste Vorstösse in diese Richtung?

Die Zustimmung zu einem freien Datenzugang wächst. So kamen beispielsweise die Fachleute an einem vom Bafu und der Schweizerischen Hydrologischen Kommission Ende 2011 organisierten Workshop überein, dass die Verfügbarkeit von Umweltinformationen dringend zu verbessern sei. Auf der Grundlage des Geoinformationsgesetzes hat das Bafu entsprechende Aktivitäten initiiert (weitere Informationen: hugo.aschwanden@bafu.admin.ch). Das bietet der Schweizer Umweltforschung eine gute Gelegenheit, sich für den wissenschaftlichen Nutzen eines einfachen Datenzugriffs starkzumachen. Ich würde entsprechende Zusammenarbeiten zwischen der Eawag und verschiedenen Partnern aus dem gesamten Bereich der Umweltwissenschaften sehr begrü-

sen. Im Rahmen der entstehenden Daten- und Wissensplattform [www.swiss-experiment.ch](http://www.swiss-experiment.ch) des Kompetenzzentrums für Umwelt und Nachhaltigkeit des ETH-Bereichs verstärkt die Eawag in diesem

Sinn die Kooperation mit der WSL (weitere Informationen: [sandro.bischof@wsl.ch](mailto:sandro.bischof@wsl.ch)).

**Wären nur schon die bestehenden Daten verfügbar, wäre dies eine grosse Erleichterung.**

## Wichtige Akteure in der Umweltbeobachtung

**Sektion Umweltbeobachtung:** Innerhalb des Bundesamts für Umwelt ist sie für den Bereich Umweltbeobachtung zuständig. Insbesondere koordiniert sie die Zusammenarbeit mit den kantonalen Umweltfachstellen und betreut das Informations- und Koordinationsorgan Umweltbeobachtung (IKUB).

**Informations- und Koordinationsorgan Umweltbeobachtung (IKUB):** Im IKUB sind die wichtigsten Produzenten und Nutzer von Umweltdaten aus der Bundesverwaltung, den Kantonen und der Forschung vertreten. Das IKUB koordiniert die Beobachtungstätigkeiten in den verschiedenen Umweltbereichen und fördert den Informationsaustausch unter den Akteuren.

**Netzwerk Umweltbeobachtung Schweiz (NUS):** Das Netzwerk hat zum Ziel, eine gesamtschweizerisch kohärente Datengrundlage im Umweltbereich zu erarbeiten und bereitzustellen. Im Moment konzentriert sich das NUS auf die

Erarbeitung der Geodatenmodelle gemäss Geoinformationsgesetz des Bundes.

**Envirocat:** Der Datenkatalog bietet eine Zusammenstellung der verfügbaren Umweltdaten vom Bund und von den Kantonen und gibt einen Gesamtüberblick über deren Umweltbeobachtungsaktivitäten. [www.envirocat.ch](http://www.envirocat.ch)

**Koordinationsorgan für Geoinformation des Bundes (GKG):** Die Koordination von Geoinformationen innerhalb der Bundesverwaltung und die Plattform [geo.admin.ch](http://geo.admin.ch) stehen unter der strategischen Führung und Steuerung des GKG. Dieses wird aus Vertretern der sieben Departemente der Bundesverwaltung und der Bundeskanzlei gebildet und vom Direktor des Bundesamts für Landestopografie präsidiert. [www.geo.admin.ch](http://www.geo.admin.ch)

**Koordination, Geoinformation und Services (KOGIS):** KOGIS sorgt für die operationelle Umsetzung der von der GKG festgelegten Strategie

und ist für den Aufbau und Betrieb der Geodateninfrastruktur des Bundes verantwortlich.

**Interkantonale Koordination in der Geoinformation (IKGEO):** Das Gremium vereinigt die kantonalen Fachverbände aus den Bereichen Forst, Geoinformation, Grundbuch, Landwirtschaft, Raumplanung, Umwelt, Verkehr und Vermessung und soll die Interessen der Kantone gegenüber dem Bund vertreten.

**Fachinformationsgemeinschaft (FIG):** Eine FIG ist ein Zusammenschluss aller Akteure, die an der Erhebung, Ablage, Nachführung und Nutzung von Geodaten eines bestimmten Themengebiets beteiligt sind. So gibt es zum Beispiel eine FIG Gewässer und Wasser.

**Geocat:** Dieser Datenkatalog der verfügbaren Geodaten der Schweiz bietet einen Einstieg bei der Suche nach speziellen Geodaten wie zum Beispiel Luftbildern, Grundwasservorkommen oder Naturgefahren. [www.geocat.ch](http://www.geocat.ch)



Heinz Singer, Umweltchemiker, untersucht das Vorkommen von Spurenstoffen in Gewässern. Koautoren: Matthias Ruff, Juliane Hollender

# Auf der Suche nach den Unbekannten

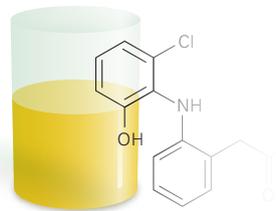
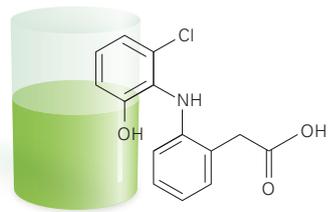
Organische Mikroverunreinigungen sind in Gewässern generell unerwünscht. Sie können Gewässerorganismen bereits in sehr niedrigen Konzentrationen schädigen. Bisherige Analysetechniken mussten sich technikbedingt auf den Nachweis weniger, bekannter Substanzen beschränken. Mit neuen Methoden lassen sich auch unentdeckte Stoffe erfassen.



Aus Haushalten, der Industrie oder der Landwirtschaft gelangen unzählige Mikroverunreinigungen in den Rhein (im Bild der Basler Rheinhafen).

Zurzeit sind in der weltweit grössten Chemikaliendatenbank SciFinder über 65 Millionen Substanzen registriert, ein Grossteil davon synthetische organische Stoffe. Das Inventar wächst täglich um 15 000 Einträge und ein Ende dieser rasanten Entwicklung ist nicht in Sicht. Das ist nicht erstaunlich, wenn man

bedenkt, dass theoretisch eine Dezillion (eine Eins mit 60 Nullen) verschiedene chemische Strukturen möglich sein sollte. Welcher Anteil der heute bekannten Substanzen in nennenswerten Mengen verwendet wird, ist schwer abzuschätzen. Einen Anhaltspunkt gibt die Anzahl Stoffe, die seit dem Inkrafttreten



<b>Strategie 1</b>	Substanz bekannt/ Referenzsubstanz vorhanden	Eindeutige Identifizierung und exakte Quantifizierung möglich
	Die Substanzanzahl pro Analyse unterliegt hierbei kaum einer Einschränkung.	
<b>Strategie 2</b>	Substanz vermutet / keine Referenzsubstanz vorhanden	Qualitative Detektion möglich
	Für die Detektion ist zunächst nur die Molekülstruktur und damit die exakte Masse nötig. Eine Bestätigung der Befunde kann durch den Abgleich mit Bibliothekenspektren oder nach- träglich gekauften Referenzsubstanzen erfolgen.	
<b>Strategie 3</b>	Substanz unbekannt	Zuordnung von Molekül- strukturen oft möglich
	Alle verbleibenden Massensignale werden durch unbekannte Substanzen aus der Probe erzeugt. Diesen Unbekannten lassen sich anhand der exakten Masse und der Fragmentierungs- information in vielen Fällen Molekülstrukturen zuordnen.	

Abb. 1: Mess- und Auswertestrategien für den umfassenden Substanznachweis mittels der an die hoch auflösende Massenspektrometrie gekoppelte Flüssigchromatografie (LC-HRMS-Technik) [1].

der Verordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (Reach) im Jahr 2007 in der EU gemeldet wurden. Demnach produziert oder importiert Europa etwa 140 000 Chemikalien.

In welchem Ausmass und über welche Eintragswege diese Stoffe in die Gewässer gelangen, schätzt man mithilfe von Modellrechnungen ab. Zuverlässige Vorhersagen lassen sich jedoch nur selten machen, da die notwendigen Informationen zu Einsatzmengen, Anwendungsorten oder Substanzeigenschaften meist nicht hinreichend sind. Angesichts der kaum fassbaren Chemikalienvielfalt erscheint die Palette an Substanzen, die bisher auf diese Weise evaluiert und schliesslich in Gewässern auch nachgewiesen wurden, verschwindend klein, obwohl sie bereits mehrere tausend Verbindungen umfasst.

### Umfangreichere Analysen möglich

Forschungsinstitute und Behörden haben in den letzten Jahrzehnten im Abwasser, in Oberflächengewässern und im Grundwasser vor allem Haushalts-, Agro- und Industriechemikalien wie zum Beispiel Pestizide, Arzneimittel, Tenside, Weichmacher und Steroidhormone gefunden und überwacht. Zunehmend empfindlichere Detektionsverfahren ermöglichten dabei immer genauere Analysen.

Seit den 1990er-Jahren ist die Gaschromatografie gekoppelt mit der Massenspektrometrie (siehe Kasten S. 11) die Methode der Wahl für viele unpolare oder leichtflüchtige Substanzen. Die Kopp-

lung der Flüssigchromatografie mit der Tandem-Massenspektrometrie ermöglicht den Nachweis polarer und sehr wassergängiger Moleküle. Mit diesen Verfahren lassen sich allerdings pro Analyse nur einige Dutzend Stoffe untersuchen. Zudem muss man sich vor der Analyse für eine Auswahl von Substanzen entscheiden und die Empfindlichkeit des Detektors auf diese einstellen. Unter diesen Voraussetzungen lässt sich nicht einmal ansatzweise ermitteln, welche Substanzen sich in einer Probe befinden.

Die Einführung der hoch auflösenden Massenspektrometrie hat das grundlegend geändert. Mit dieser Technik ist es möglich, Molekülmassen extrem genau zu bestimmen. Ausserdem können Moleküle mit einer Massendifferenz getrennt werden, die sich nur um 0,001 atomare Masseneinheiten ( $1,66 \times 10^{-30}$  Kilogramm) unterscheiden. Nahezu jede detektierte Substanz liefert so ein spezifisches Signal. Das Verfahren eignet sich zudem für den gesamten Massebereich, in dem Umweltchemikalien vorkommen. Mit der Flüssigchromatografie kombiniert lassen sich damit viele der erfassten Chemikalien mit einer hohen Nachweisempfindlichkeit identifizieren. Anders als bisher kann die Identifizierung ohne Referenzsubstanzen erfolgen. Diese sind nur noch nötig, um die Befunde zu quantifizieren. Grundsätzlich können drei Analysestrategien verfolgt werden (Abb. 1).

Die an die hoch auflösende Massenspektrometrie gekoppelte Flüssigchromatografie (LC-HRMS-Technik) könnte sich dank diesen Vorzügen vor allem bei der routinemässigen Gewässerbeobachtung als Standardmethode etablieren. Neben der Mög-



Abb. 2: Nach dem Chemieunfall bei Schweizerhalle 1986 installierten die Anrainerstaaten des Rheins mehrere Überwachungs- und Probenahmestationen.

Arzneimittel und  
Umwandlungsprodukte (39,6%)



Abb. 3: Zurzeit analysiert die Rheinüberwachungsstation Weil am Rhein bei Basel täglich 318 bekannte Mikroverunreinigungen. So will man langfristige Entwicklungen erfassen und problematische Einleitungen möglichst schnell entdecken.

lichkeit, eine nahezu unbeschränkte Anzahl Substanzen mit optimaler Nachweisempfindlichkeit zu detektieren, kann man aus den hoch aufgelösten Daten auch jederzeit nachträglich weitere Stoffe bestimmen. So lassen sich zum Beispiel Chemikalien, die neu als gewässerrelevant erachtet werden, aus früheren Messungen herausfiltern und so Gewässerbelastungen der Vergangenheit rekonstruieren.

### Lehren aus Schweizerhalle

Die internationale Rheinüberwachungsstation Weil am Rhein bei Basel setzt die neue Messtechnik bereits seit einigen Jahren erfolgreich ein. Mehr als 20 Millionen Menschen beziehen ihr Trinkwasser aus dem Rhein. Sein Einzugsgebiet erstreckt sich von den Schweizer Alpen bis in die dicht besiedelten Gebiete Deutschlands und der Niederlande. Neben gereinigtem Abwasser aus Haushalten und Industriebetrieben fließt auch Wasser aus intensiv genutzten landwirtschaftlichen Flächen und ausgedehnten Siedlungsgebieten in den Fluss. Die Überwachungsstation wurde 1992 in Betrieb genommen, nachdem sich 1986 der grosse Chemieunfall im Sandoz-Werk Schweizerhalle ereignet hatte (Abb. 2). Bei einem Grossbrand flossen damals mit dem Löschwasser grosse Mengen giftiger Chemikalien in den Rhein, was erhebliche ökologische Schäden verursachte und die tagelange Stilllegung der flussabwärts gelegenen Trinkwasserwerke erzwang.

Seitdem werden an der Rheinüberwachungsstation täglich Wasserproben gemessen, um langfristige Trends in der Gewässerqualität sowie zeitnah Fehleinleitungen und Havarien erfassen zu können. Dazu entwickelte die Eawag zusammen mit dem Amt für Umwelt und Energie Basel-Stadt basierend auf dem LC-HRMS-Verfahren eine mehrstufige Analysestrategie [2]. Innerhalb eines Tages werden die Proben schrittweise auf bekannte, verdächtige und unbekannte Substanzen untersucht. Die Stoffliste der bekannten Substanzen umfasst derzeit 318 Chemikalien und deren Umwandlungsprodukte aus der Gruppe der Pestizide, Biozide, Arzneimittel, Betäubungsmittel, Industriechemikalien, Korrosionsschutzmittel und Süsstoffe (Abb. 3). Die Liste wird laufend mit neuen Erkenntnissen aus Literaturstudien sowie mit Messresultaten aus nationalen und internationalen Monitoringprogrammen aktualisiert.

Die Analysen zeigen, dass 84 der 318 Stoffe aus Haushalt, Industrie und Landwirtschaft regelmässig im Rhein nachgewiesen werden (Abb. 4). Etwa die Hälfte der detektierten Substanzen verursacht mit Konzentrationen von weniger als 10 Nanogramm pro Liter eine kaum nachweisbare Belastung des Rheins. Wenige Substanzen überschreiten den gemäss Gewässerschutzverordnung geltenden Anforderungswert für Pestizide von 100 Nanogramm pro Liter. Bei dieser Konzentration und einem mittleren Abfluss von etwa 1000 Kubikmetern pro Sekunde verfrachtet der

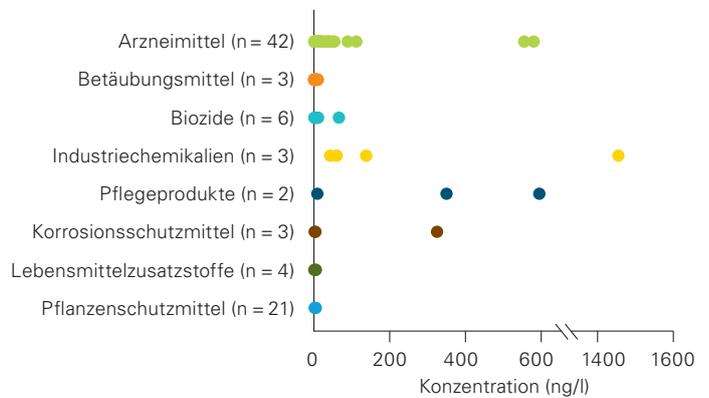
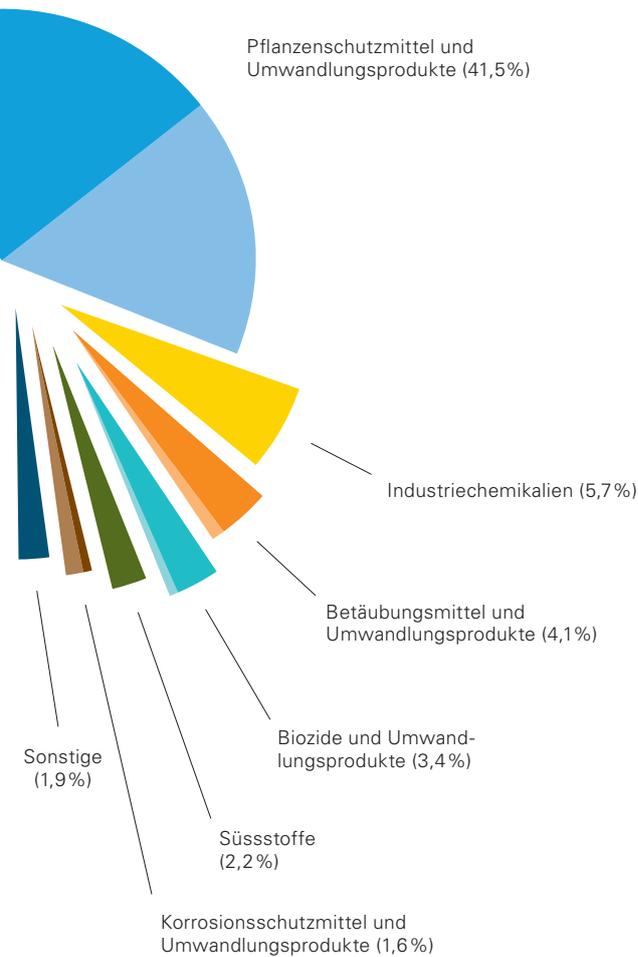


Abb. 4: 84 Chemikalien aus Haushalten, der Industrie und der Landwirtschaft können im Rhein regelmässig nachgewiesen werden.

Fluss jedoch bereits je über 10 Kilogramm dieser Substanzen pro Tag in Richtung Deutschland.

### Unbekannte Stoffe aufspüren

Obwohl der Analysenumfang verglichen mit bisherigen Methoden enorm ist, bleibt unklar, welcher Anteil der im Rhein vorhandenen Substanzen tatsächlich erfasst wird. Um auch die unbekanntesten Stoffe zu erfassen, hat die Eawag eine Software entwickelt, die aus den Massenspektrometriedaten alle vorhandenen Substanzsignale extrahiert, nach Intensität sortiert und Hintergrundsignale eliminiert. Die Auswertung offenbart, dass eine Probe neben den quantifizierten Mikroverunreinigungen durchschnittlich zwischen 2000 und 3000 weitere Chemikalien enthält. 100 bis 150 der Stoffe weisen Signalintensitäten auf, die eine Konzentration von über 10 Nanogramm pro Liter erwarten lassen. Eine Vielzahl organischer Substanzen im Rhein blieb bislang also unentdeckt. Ob dies synthetische oder natürlich vorkommende Stoffe sind, gilt es zu klären.

Für solche unbekanntesten Substanzen liegen ausser den Analysedaten wie der genauen Molekülmassen oder Isotopenmuster keine weiteren Informationen vor. Das Aufspüren verdächtiger Stoffe muss deshalb gemäss der Strategie 2 erfolgen (Abb. 1). Da Referenzsubstanzen fehlen, fahndet man innerhalb der gewässerrelevanten Gruppe der Pestizide, Biozide und Arzneimittel nach registrierten Wirkstoffen, die entsprechende Molekülmassen

aufweisen. Positive Treffer können gegebenenfalls mithilfe von Spektrenbibliotheken weiter abgesichert werden.

Die meisten unbekanntesten Substanzmassen muss man allerdings einer aufwändigen Auswertungsprozedur unterziehen (Strategie 3). Anhand der exakten Masse und des Isotopenmusters lässt sich für jede Substanz zunächst eine eindeutige Summenformel angeben. Danach sucht man in spezialisierten Datenbanken dazu passende Substanzstrukturen. Ein Vergleich der Fragmentierungsmuster führt schliesslich zur wahrscheinlichsten Struktur. Mit diesem Vorgehen konnten wir zum Beispiel das Antidepressivum Moclobemid erfolgreich nachweisen. Zwischen dem 12. und 28. Januar 2011 tauchte die Chemikalie in den Rhein-Proben plötzlich als starkes Massesignal auf, das sich der Summenformel  $C_{13}H_{17}Cl_1N_2O_2$  zuordnen liess (Abb. 5). Eine Messkampagne entlang des gesamten Rheins während einer zweiten Einleitungsphase vom 9. bis zum 15. März 2011 wies dabei eindeutig auf eine Punktquelle zwischen Rheinfeldern und Basel hin. Abschätzungen ergaben, dass in diesem Zeitraum etwa 14 Kilogramm Moclobemid in den Fluss gelangten, im Januar waren es rund 40 Kilogramm. Die Substanzspur liess sich bis zur Mündung in die Nordsee verfolgen. Abschätzungen zeigten, dass die detektierten Moclobemid-Konzentrationen kein erhöhtes Risiko für den Rhein und das aus dem Uferfiltrat hergestellte Trinkwasser darstellten [3].

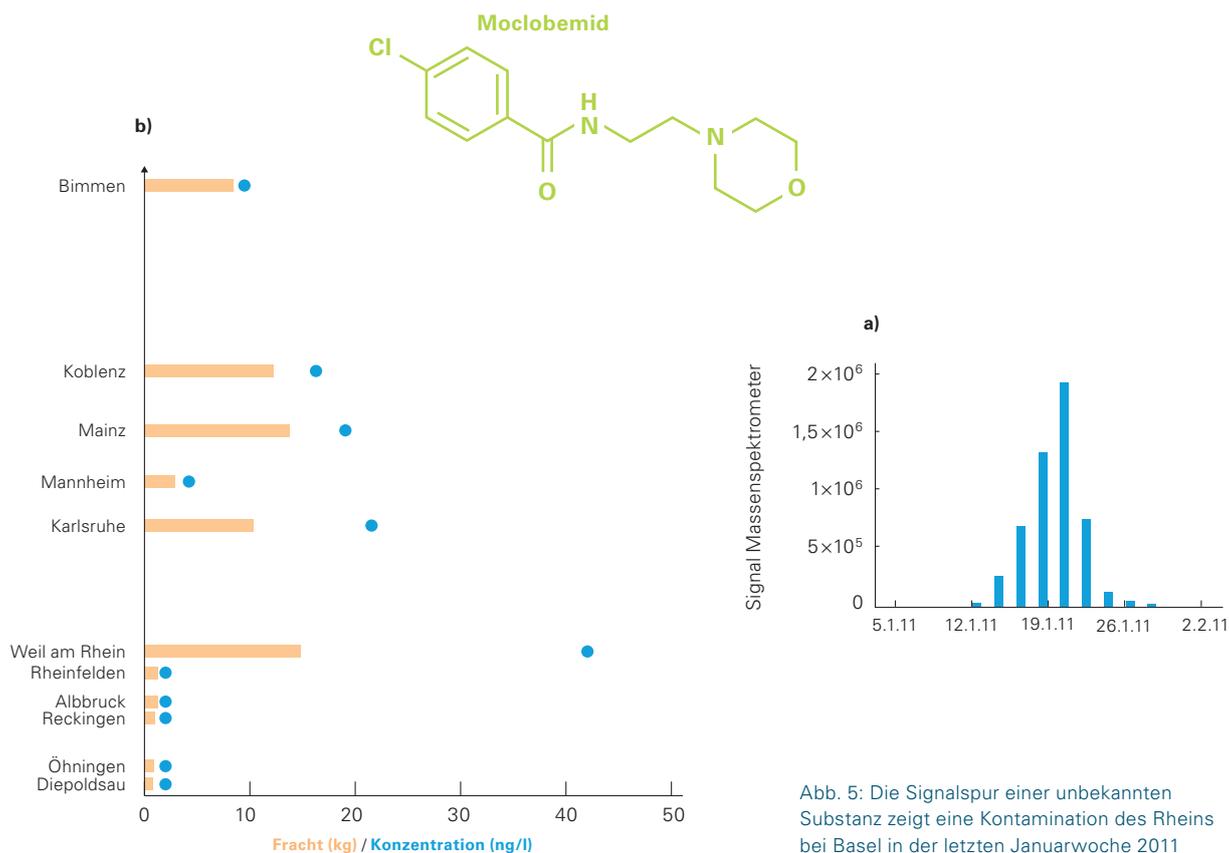


Abb. 5: Die Signalspur einer unbekanntem Substanz zeigt eine Kontamination des Rheins bei Basel in der letzten Januarwoche 2011 an (a). Während der zweiten Einleitungswelle wurde die Substanz von der Schweiz bis in die Niederlande mit Messungen verfolgt (b).

Mit der LC-HRMS-Technik hat man eine Methode zur Hand, um Havarien und Fehleinleitungen aufzuspüren. Da die Verursacher solche Unfälle oft gar nicht bemerken oder die Einleiter die genaue Zusammensetzung des abgegebenen Abwassers sehr häufig nicht kennen, kann die tägliche Messung Schadstoffspitzen im Rhein zeitnah erfassen und die Identität der Stoffe im Idealfall aufklären. Allerdings ist das Identifizierungsprozedere für die tägliche Routine im Moment noch zu zeitaufwändig. Deswegen soll als nächster Schritt die Detektion von plötzlich auftretenden Substanzmassen mithilfe statistischer Auswertemethoden in den Tagesablauf der Messstation eingebunden werden.

#### Nachweis unbekannter Umwandlungsprodukte

Das Monitoring organischer Mikroverunreinigungen in grossen Einzugsgebieten und auf nationaler Ebene umfasst aus Kostengründen meist nur ausgewählte Leitsubstanzen. Um die Auswahl dieser Substanzen überprüfen zu können, wendete die Eawag in Zusammenarbeit mit dem Bund und den Kantonen die LC-HRMS-Technik im Rahmen mehrerer Pilotstudien an. Im nationalen Grundwasserbeobachtungsnetz (Naqua), im Beobachtungsnetz für Oberflächengewässer (Nawa) sowie im Boden- und Vierwaldstättersee wurden Analysen durchgeführt. Expositionsmodelle, welche die Belastung rechnerisch vorhersagen, ergänzten die Messungen. So liessen sich zum Beispiel mit einem Stoffflussmodell die Belastungen für das Einzugsgebiet des Bodensees voraussagen und die Substanzen komplementär dazu mit der Analytik gezielt an ausgewählten Standorten bestimmen [4].

Dass dieses Vorgehen auch in extrem grossräumigen Einzugsgebieten wie dem Haihe-Flusssystem im Nordosten Chinas funktioniert, zeigen die Ergebnisse aus einer internationalen Zusammenarbeit (siehe auch Artikel Seite 36). Das Flusssystem erstreckt sich über 300 000 Quadratkilometer. Mehr als 20 Millionen Einwohner leben und arbeiten im Einzugsgebiet. Die Vorhersage, welche organischen Mikroverunreinigungen vorgefunden werden, ist damit äusserst schwierig. Mit LC-HRMS-Analysen liessen sich die relevanten Substanzen aufgrund weniger Proben ermitteln. Nachfolgend wurden diese Leitsubstanzen hinsichtlich ihres Eintrags und Verbleibs im Einzugsgebiet untersucht. Es stellte sich heraus, dass die Kläranlagen von Peking die grösste Quelle für organische Mikroverunreinigungen darstellen. Da über 90 Prozent des Wassers flussabwärts zur Bewässerung eingesetzt werden, gelangen die organischen Mikroverunreinigungen auch auf die Felder [5].

Neben der Gewässerbeobachtung liefert die hoch auflösende Massenspektrometrie ebenso in Experimenten wichtige Zusatzinformationen. So konnte die Eawag bei Versuchen zum biologischen Abbau im Abwasser im Labor bisher unbekannte Umwandlungsprodukte von Arzneimitteln nachweisen [6]. Ein computerbasiertes Expertensystem lieferte zunächst mögliche Umwandlungsprodukte. Mittels LC-HRMS wurde dann im Abwasser nach den vermuteten Strukturen gesucht. Die nachgewiesenen Verbindungen liessen sich zum Teil nach dem Vergleich mit Referenzsubstanzen in Proben von Kläranlagen identifizieren [7].



Die Beispiele aus Forschung und Praxis offenbaren das grosse Potenzial der neuen Analysetechnik. Dieses lässt sich allerdings nur dann voll ausschöpfen, wenn die Entwicklung effizienter und für die Automatisierung geeigneter Software-Routinen vorangetrieben wird. Denn wie in anderen datenintensiven Fachgebieten hängt der Erfolg massgeblich von den Fortschritten in der Datenanalyse ab. Die Verschmelzung von massenspektrometrischen Methoden mit geeigneten computergestützten Auswertungsalgorithmen stellt eine Grundvoraussetzung dar, damit diese Technik in Zukunft ihre volle Leistungsfähigkeit entfalten kann.

[heinz.singer@eawag.ch](mailto:heinz.singer@eawag.ch)

- [1] Krauss M., Singer H., Hollender J. (2010): LC-high resolution MS in environmental analysis: From target screening to the identification of unknowns. *Analytical Bioanalytical Chemistry* 397, 943–951.
- [2] Singer H., Huntscha S., Hollender J., Mazacek J. (2009): Multi-komponenten-Screening für den Rhein bei Basel. Abschlussbericht, Eawag, in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Umwelt BAFU, S. 62.
- [3] F. Hoffmann-La Roche AG/Ltd Basel: Predicted no-effect concentration (PNEC) according to EU Technical Guidance Document (TGD) on Risk Assessment; derived no-effect level (DNEL) according to Straub and Flückiger, 2010, SETAC Europe.
- [4] Longrée P., Singer H., Moschet C., Götz C., Schärer M., Keusen M. (2011): Organische Mikroverunreinigungen im Bodensee. GWA 7.
- [5] Heeb F., Singer H., Pernet-Coudrier B., Qi W., Liu H., Longrée P., Müller B., Berg M. (2012): Organic micropollutants in rivers downstream of the megacity Beijing: Sources and mass fluxes in a large-scale wastewater irrigation system. *Environmental Science and Technology* 46, 8680–8688.
- [6] Helbling D., Hollender J., Kohler H.P., Singer H., Fenner K. (2009): High-throughput identification of microbial transformation products of organic micropollutants. *Environmental Science and Technology* 44, 6621–6627.
- [7] Kern S., Fenner K., Singer H., Schwarzenbach R., Hollender J. (2009): Identification of transformation products of organic contaminants in natural waters by computer-aided prediction and high-resolution mass spectrometry. *Environmental Science and Technology* 43, 7039–7046.

## Nachweismethoden

Mit der **Chromatografie** lassen sich Substanzgemische in die Einzelstoffe auftrennen. Das Gemisch wird dabei mittels einer mobilen Phase durch eine Trennsäule geleitet, die mit einer stationären Phase (modifizierte Kieselgelpartikel oder beschichtete Kapillarsäule) versehen ist. Von dieser werden die einzelnen Inhaltsstoffe aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften mehr oder weniger stark zurückgehalten und dadurch voneinander getrennt. Ein Detektor misst die nacheinander aus der Säule austretenden Stoffe als elektrische Signale. Ein Vergleich mit den Kurven von Referenzsubstanzen (Kalibrierkurven) ermöglicht die Identifizierung. Anhand von Höhe und Breite der Signale (Peaks) lassen sich die Stoffmengen berechnen. Bei der **Gaschromatografie** wird als mobile Transportphase Gas (meist Helium oder Wasserstoff) eingesetzt und bei der **Flüssigchromatografie** werden Flüssigkeiten (Gemische aus organischen Lösungsmitteln oder Wasser) verwendet. Somit können mit der Gaschromatografie lediglich verdampfbare Substanzen analysiert werden, wogegen mit der Flüssigchromatografie alle löslichen Verbindungen getrennt werden können. Aufgrund der Selektivität und Nachweisempfindlichkeit werden als Detektoren heute meist Massenspektrometer eingesetzt.

Mit der **Massenspektrometrie** kann die Molekülmasse bestimmt werden. Dazu werden die zu analysierenden Substanzen nach der chromatografischen Trennung in einem Interface ionisiert. Im Massenspektrometer werden die Ionen anschliessend in einem elektrischen oder magnetischen Feld nach ihrer Masse und Ladung getrennt und detektiert. Neben den intakten Molekülen entstehen auch Fragmente. Deren Grösse und Häufigkeit können zur Identifizierung der Stoffe herangezogen werden. Um die Selektivität und Messempfindlichkeit zu verbessern, schaltet man bei der **Tandem-Massenspektrometrie** zwei Geräte hintereinander. Ein **hoch auflösendes Massenspektrometer** kann die Ionenmasse sehr genau bestimmen. Dadurch lassen sich auch Ionen mit sehr ähnlicher Masse und Ladung auftrennen. Dies nutzt man bei unbekanntem Verbindungen zur Entschlüsselung ihrer Strukturen.

# Was Isotope über Schadstoffe aussagen

Das Schicksal organischer Mikroverunreinigungen in Böden und Gewässern ist mit herkömmlichen Methoden schwierig zu verfolgen. Die Einzelstoff-Isotopenanalyse ermöglicht es, die Isotopenzusammensetzung von Schadstoffen zu untersuchen. Damit lassen sich zum Beispiel die Herkunft von Geschirrspülmitteln nachweisen oder die Abbauege von Sprengstoff bestimmen.



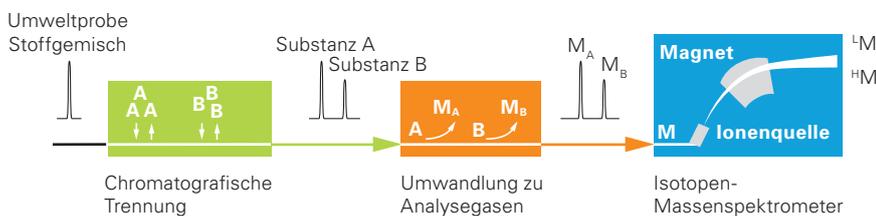
Thomas Hofstetter ist Umweltchemiker an der Abteilung Umweltchemie und Privatdozent an der ETH Zürich.  
Koautoren: Reto Wijker, Stephanie Spahr



Altlastensanierung auf dem Areal eines ehemaligen Schweizer Sprengstoffherstellers: Mithilfe von Isotopenanalysen lassen sich die Abbauprozesse im Untergrund rekonstruieren.

Für die Beurteilung der Gewässerqualität spielen organische Schadstoffe eine wichtige Rolle [1]. In Industrie, Gewerbe und Haushalten sind Zehntausende von Chemikalien im Gebrauch. Viele davon gelangen trotz der Abwasserbehandlung in einer Klär-

anlage in die Gewässer, wo sie bereits in tiefen Konzentrationen unerwünschte Effekte haben können. Hinzu kommen Schadstoffemissionen aus Deponien und Altlasten. Deren Konzentrationen übersteigen jene der organischen Mikroverunreinigungen in Bö-



Schematische Darstellung der Einzelstoff-Isotopenanalyse (nach [2]). Nach einer chromatografischen Trennung werden die untersuchten Substanzen direkt in Analysegasen umgesetzt. Ein Isotopen-Massenspektrometer misst gleichzeitig zwei Ionenströme der leichten (häufigen, <sup>L</sup>M) und schweren (seltenen, <sup>H</sup>M) Isotopologe.

den und Gewässern oft, sodass Massnahmen zur Schadstoff-immobilisierung oder Standortsanierung in Betracht gezogen werden müssen. Für die Beurteilung, ob aus praktischer Sicht ein Handlungsbedarf besteht, sind dabei folgende Fragen besonders relevant: Woher stammen die Schadstoffe und wer ist dafür verantwortlich? Laufen Transformationsprozesse ab, bei denen organische Substanzen zu harmlosen Produkten um- beziehungsweise abgebaut werden?

### Herkunft und Abbau besser erfassen

Mit modernen Analyseverfahren wie der Kopplung von Flüssig-chromatografie und hoch auflösender Massenspektrometrie (siehe Artikel Seite 6) lassen sich organische Mikroverunreinigungen im Spurenbereich identifizieren und deren Konzentrationen quantifizieren. Schwierig wird die Identifikation einer Schadstoffquelle aber, wenn mehrere Emittenten infrage kommen. Und was die Transformationsprozesse angeht, ist eine Konzentrationsabnahme allein oft nicht genug aussagekräftig. Diese kann durch Verdünnung, Sorption der Mikroverunreinigungen an Partikeln und Sedimenten, Ausgasungen oder Abbau zustande kommen. Ob und in welchem Mass Schadstoffe letztlich abgebaut werden, kann man nur mit grossem Messaufwand und mithilfe von Computermethoden quantifizieren. Hinzu kommt, dass auch Transformationsprodukte ökotoxikologisch problematisch sein können und in eine Gefahrenabschätzung einbezogen werden sollten.

Basierend auf der so genannten Einzelstoff-Isotopenanalyse entwickelt die Eawag neue Ansätze, um die Herkunft und die Transformationsprozesse von organischen Mikroverunreinigungen besser zu charakterisieren. Mit der Einzelstoff-Isotopenanalyse lassen sich in einzelnen Substanzen die Verhältnisse der stabilen Isotope messen, typischerweise von Kohlenstoff (<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C), Stickstoff (<sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N) und Wasserstoff (<sup>2</sup>H/<sup>1</sup>H) (siehe Kasten). Zuerst müssen die Stoffe in einer Umweltprobe allerdings chromatografisch von anderen Komponenten getrennt werden. Dafür verwendet man meistens die Kopplung von Gaschromatografie und Isotopen-Massenspektrometrie. Zurzeit arbeitet die Wissenschaft intensiv daran, das Spektrum der anwendbaren Trennmethode (zum Beispiel Flüssigchromatografie) und der analysierbaren Isotope, etwa von Chlor (<sup>37</sup>Cl/<sup>35</sup>Cl) oder Brom (<sup>81</sup>Br/<sup>79</sup>Br), zu erweitern [2].

## Einzelstoff-Isotopenanalyse

Organische Substanzen bestehen aus verschiedenen Atomen mehrerer isotopischer Elemente und somit zahlreichen Isotopologen (Moleküle, die sich nur in ihrer Isotopenzusammensetzung unterscheiden). Deshalb ist es nicht möglich, mit herkömmlichen Massenspektrometern die Isotopenverhältnisse mit ausreichender Präzision direkt aus der Molekülmasse zu bestimmen.

Dieses Problem wird in der **Einzelstoff-Isotopenanalyse** (engl. compound-specific isotope analysis, CSIA) dadurch gelöst, dass jede Substanz zu Analysegasen mit kleiner Masse umgesetzt wird, in denen nur ein bis zwei Atome des zu analysierenden Elements vorkommen. Dessen Isotope können in einem Isotopen-Massenspektrometer (engl. isotope ratio mass spectrometer, IRMS) als zwei separate Ionenströme, des schweren (seltenen) und des leichten (häufigen) Isotopologs, gleichzeitig gemessen werden. So wird zum Beispiel das Kohlenstoffgerüst eines Schadstoffs bei zirka 1000 Grad Celsius zu CO<sub>2</sub> oxidiert und im Massenspektrometer als Verhältnis von <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> zu <sup>12</sup>CO<sub>2</sub> quantifiziert. Um Stickstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffisotope zu analysieren, verwendet man N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, und CO als Analysegasen.

Die Messung eines Isotopenverhältnisses ist auch bei sehr unterschiedlichen Häufigkeiten der Isotope (1,1% des Elements Kohlenstoff bestehen aus <sup>13</sup>C, 0,015% des Wasserstoffs aus <sup>2</sup>H) auf diese Weise äusserst präzise. Allerdings beschränkt sich die Anwendung auf Elemente, die kontinuierlich zu Analysegasen umgesetzt werden können.

Weil die gemessenen Isotopenmengen von Gerät zu Gerät schwanken, muss ein gemessenes Isotopenverhältnis zudem immer mit einem international anerkannten Referenz-Isotopenverhältnis standardisiert werden. Daraus geht die so genannte **Isotopensignatur** als δ-Wert hervor, welche die Abweichung des Isotopenverhältnisses in der Probe zu jenem im Referenzmaterial in Promille (‰) angibt. Für Kohlenstoff-Isotopensignaturen, δ<sup>13</sup>C, gilt beispielsweise:

$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = \frac{{}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C} (\text{Probe})}{{}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C} (\text{Referenz})} - 1$$

Bei der Kopplung von Gaschromatografie und Isotopen-Massenspektrometrie liegt die typische Messunsicherheit für Kohlenstoffisotope bei ±0,5‰. Das entspricht einem Unterschied des Isotopenverhältnisses <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C zweier Messungen von lediglich 0,0000056.

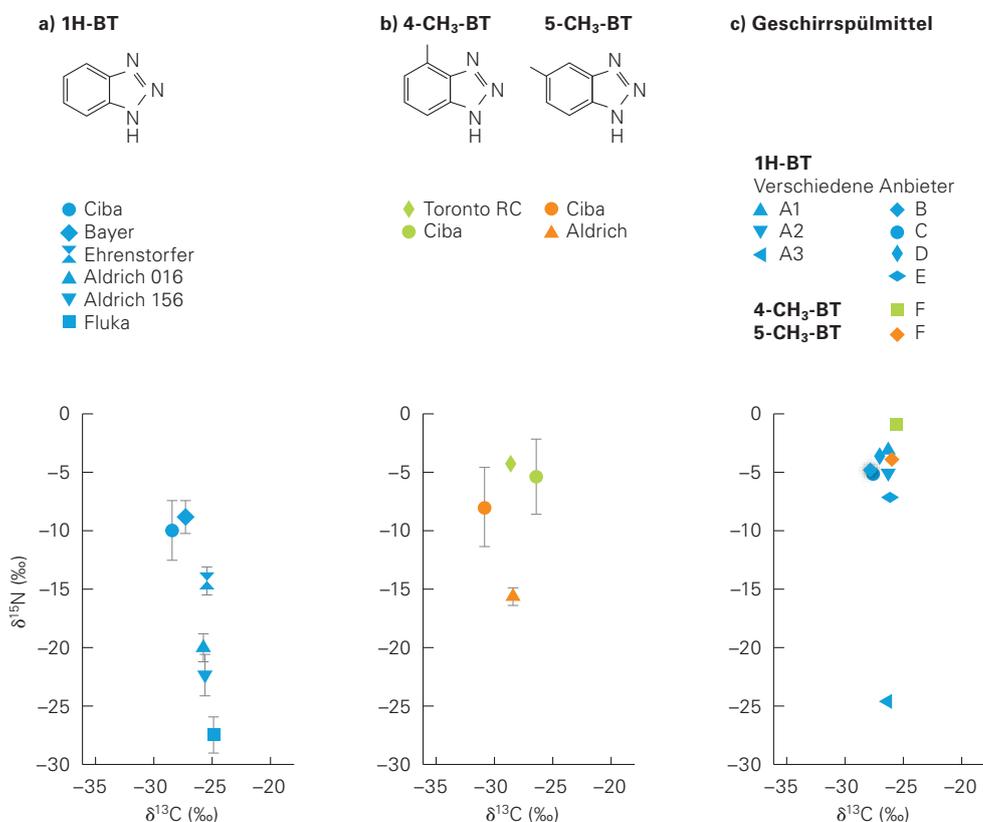


Abb. 1: Signaturen der Kohlenstoff- und Stickstoffisotope von Benzotriazol (1H-BT) und zwei Methylbenzotriazolen (4-CH<sub>3</sub>-BT, 5-CH<sub>3</sub>-BT) in Chemikalien diverser Hersteller. Rechts sind die  $\delta^{13}\text{C}$ - und  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte derselben Substanzen in Geschirrspülmitteln diverser Hersteller gezeigt (nach [6]).

Wie man sich die Kenntnis von Isotopenverhältnissen zunutze machen kann, veranschaulichen zwei aktuelle Beispiele aus der Eawag-Forschung. Am Beispiel der Benzotriazole lässt sich zeigen, dass, wenn die Isotopenverhältnisse eines Schadstoffes an verschiedenen Messstellen gleich sind, dies auf identische Produktionsweisen und gleiche Rohstoffquellen bei der Synthese hindeutet sowie Rückschlüsse auf die Schadstoffquelle zulässt. Ändern sich die Isotopenverhältnisse wie im Fall von nitroaromatischen Verbindungen in Sprengstoffaltlasten, kann daraus abgeleitet werden, dass eine Transformation stattfindet, welche Produkte daraus hervorgehen und – mit zusätzlichen Informationen – wie schnell dieser Prozess abläuft [3].

#### Woher stammen Benzotriazole in Geschirrspülmitteln?

Benzotriazole gehören zu den häufig nachgewiesenen organischen Mikroverunreinigungen in Schweizer Gewässern, da sie als Korrosionsschutzmittel und Enteisener in Industrie und Haushalten in grossen Mengen eingesetzt werden [4]. Wegen ihrer Persistenz dienen sie als Indikatursubstanz für das Vorkommen langlebiger organischer Chemikalien und werden beigezogen, um die Reinigungsleistung von Abwasserreinigungsanlagen zu beurteilen [5]. Ob und unter welchen Bedingungen Kläranlagen Benzotriazole – und damit wohl auch andere Mikroverunreinigungen – in Fließgewässern biologisch abbauen können, liesse sich mittels Einzelstoff-Isotopenanalysen feststellen. Dazu müssten Veränderungen der Zusammensetzung der Kohlenstoff- oder Stickstoffisotope in

Benzotriazolen nachgewiesen werden. Allerdings lassen sich Benzotriazole aufgrund ihrer korrosionshemmenden Eigenschaften als Komplexbildner nicht mit einer herkömmlichen Kopplung von Gaschromatografie und Isotopen-Massenspektrometrie messen. Deshalb haben wir an der Eawag neue Methoden für die Einzelstoff-Isotopenanalyse von solch polaren organischen Mikroverunreinigungen entwickelt und in einer ersten Studie Benzotriazole in Geschirrspülmitteln möglichen Herstellern zuordnen können.

Weil bei der Isotopenanalyse sehr unterschiedliche Signalstärken von schweren und leichten Isotopen miteinander verglichen werden, ist die Isotopen-Massenspektrometrie nicht empfindlich. Der von uns entwickelte Ansatz mit Nickel-Platin-Reaktoren zur Umwandlung von Benzotriazolen zu CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> benötigt für eine akkurate Messung minimale Stoffmengen von 22 Nanogramm des Elements Kohlenstoff und 11 Nanogramm des Elements Stickstoff. Dies entspricht in einem eingespritzten Mikroliter einer Benzotriazol-Konzentration von 30 bis 40 Milligramm pro Liter. Trotz der für die Einzelstoff-Isotopenanalyse tiefen Stoffmengen liegen diese Konzentrationen 10 000-fach über typischen Werten, wie sie in Fließgewässern oder in Kläranlagenausläufen vorkommen. Deshalb ist es notwendig, die Benzotriazole aus Umweltproben mit Festphasenextraktion anzureichern, ohne dabei die Isotopenzusammensetzung der Zielsubstanzen zu verändern. Damit lassen sich mit an Gaschromatografie gekoppelter Isotopen-Massenspektrometrie die C- und N-Isotopensignaturen



TNT- und DNT-Reste am Altlastenstandort.

Foto: Wijkler

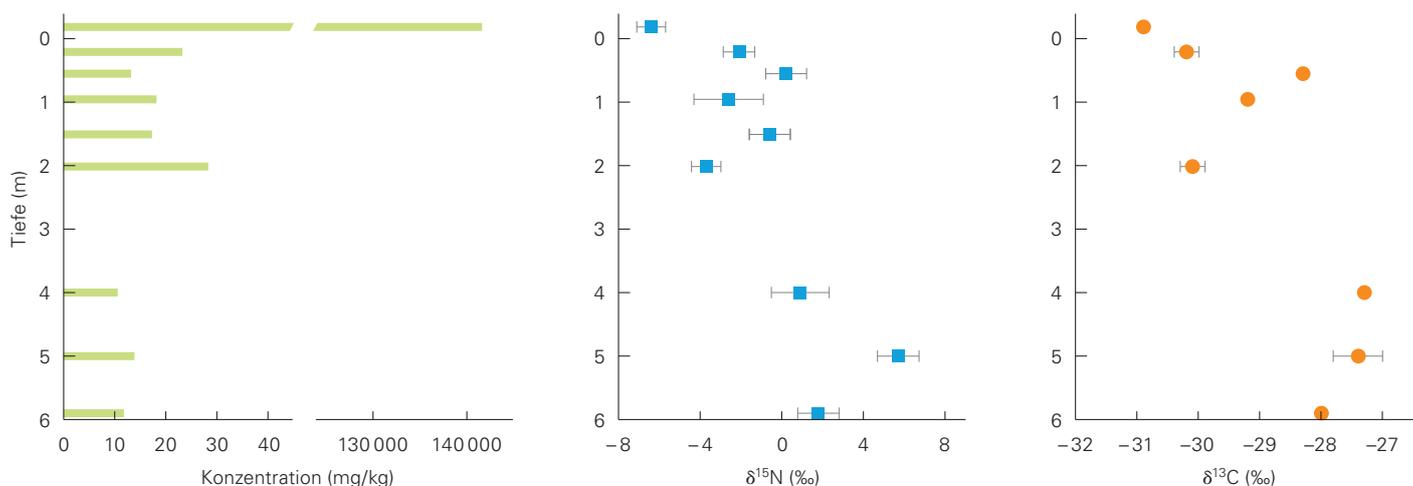


Abb. 2: Konzentrationsprofil des Sprengstoffs 2,4-DNT über sechs Meter Tiefe sowie die Signaturen der Kohlenstoff- und Stickstoffisotope (nach [7]).

von Benzotriazol (1H-BT) und Methylbenzotriazolen (4-CH<sub>3</sub>-BT und 5-CH<sub>3</sub>-BT) in Leitungswasser, im Kläranlagenauslauf, Klärschlamm und in Geschirrspülmitteln bestimmen.

#### Herstellung bestimmt isotopischen Fingerabdruck

Abbildungen 1a und b zeigen die  $\delta^{13}\text{C}$ - und  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte dieser Substanzen für verschiedene Chemikalienhersteller. Dabei fällt auf, dass sich Benzo- und Methylbenzotriazole diverser Hersteller vor allem durch die Isotopenverhältnisse des Stickstoffs unterscheiden. Dies lässt sich mit den Synthesewegen dieser Substanzen erklären. Während der Benzen-Ring die für petrochemische Chemikalien typischen  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte zwischen -25 bis -30 ‰ zeigt, muss der Triazol-Ring in mehreren Reaktionsschritten aus chloriertem Nitrobenzen hergestellt werden.

Dazu kommen weitere stickstoffhaltige Chemikalien wie Ammoniak und Salpetrige Säure zum Einsatz. Die sehr verschiedenen  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Benzotriazole widerspiegeln also die Isotopenverhältnisse des Stickstoffs dieser Ausgangssubstanzen. Zudem ändern sich während der Synthese von Industriechemikalien die Isotopenverhältnisse der Reaktanden und Produkte, weil die chemischen Reaktionen nicht vollständig ablaufen. Beides zusammen, die Isotopenverhältnisse in den Ausgangssubstanzen und deren Modifikation durch chemische Reaktionen, führt zum isotopischen Fingerabdruck der Benzotriazole.

Weiter haben wir untersucht, ob die Benzotriazole bei in der Schweiz erhältlichen Geschirrspülmitteln von verschiedenen Chemikalienproduzenten stammen (Abb. 1c). Dabei zeigte sich, dass

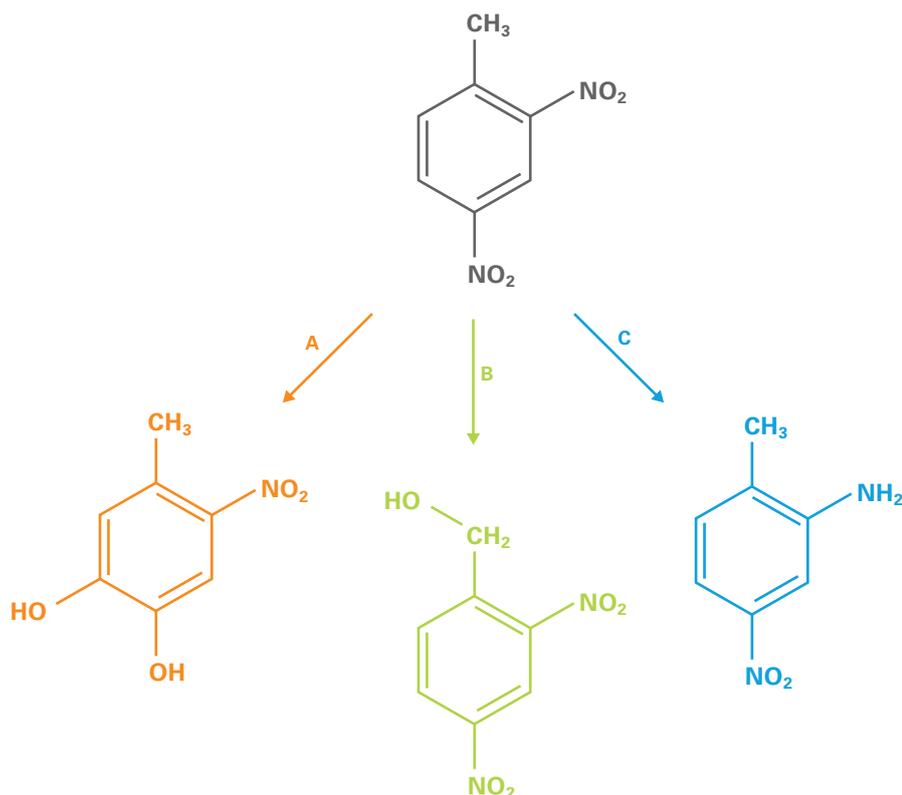


Abb. 3: Initiale Reaktionsschritte des mikrobiellen Abbaus von 2,4-DNT durch Dioxygenierung (A), Methylgruppenoxidation (B) und Nitrogruppenreduktion (C, nur eines von zwei möglichen Produkten gezeigt). Für 2,4-DNT führt nur die Dioxygenierung zur Mineralisierung.

sich die Signaturen der Stickstoffisotope mit einer Ausnahme sehr ähnlich sind (–5%), was darauf hindeutet, dass die meisten Benzotriazole vom gleichen Hersteller stammen. In anstehenden Untersuchungen wollen wir nun analysieren, ob Benzotriazole in Schweizer Flüssen die bei Geschirrspülmitteln gefundenen Befunde widerspiegeln. Dazu hat die Eawag in Zusammenarbeit mit der Universität Neuenburg und dem Helmholtz-Zentrum München mit der Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds ein neues Projekt zur Einzelstoff-Isotopenanalyse von Mikroverunreinigungen gestartet.

### Den Abbau von Sprengstoff rekonstruieren

Nitroaromatische Schadstoffe wie der Sprengstoff Trinitrotoluol (TNT) und dessen Ausgangssubstanz Dinitrotoluol (DNT) kommen in Sprengstoffaltlasten oder im kontaminierten Untergrund ehemaliger Produktionsbetriebe als toxische Substanzen vor. Obwohl ihre Abbauege bekannt sind, ist es bei dieser Substanzklasse äusserst schwierig, das Ausmass eines Abbaus und dessen Raten im Feld abzuschätzen. Das liegt zum einen daran, dass diese Prozesse über Jahrzehnte ablaufen. Zum anderen sind sowohl die Schadstoffe als auch deren Abbauprodukte oft stark an die organische und mineralische Matrix der Böden oder Sedimente gebunden, was die Analyse verkompliziert. Hinzu kommt, dass viele nitroaromatische Verbindungen über mehrere Reaktionen umgesetzt werden, die unter Umständen zu noch toxischeren Produkten wie aromatischen Aminen führen.

Der Eawag ist es nun erstmals gelungen, an einem Altlastenstandort in der Schweiz anhand der Veränderung der Isotopensignaturen, der so genannten Isotopenfraktionierung, nitroaromatischer Schadstoffe auf deren Abbauprozesse zu schliessen [7]. Abbildung 2 zeigt exemplarisch ein Tiefenprofil von 2,4-DNT

an der früheren, stark kontaminierten Verladestelle. Vergleichbare Daten existieren für TNT und 2,6-DNT. Die im Untergrund gemessenen Konzentrationen deuten auf einen Transport der Schadstoffe in zunehmende Tiefen hin. Ob es dabei auch zum Abbau kommt, ist anhand dieser Daten nicht feststellbar. Es ist aber bekannt, dass Mikroorganismen 2,4-DNT über drei verschiedene Reaktionen abbauen können, wobei nur ein Weg nachweislich zu einer Mineralisierung führt (Abb. 3).

Der Verlauf der C- und N-Isotopensignaturen von 2,4-DNT mit zunehmender Tiefe gibt Aufschluss über den mikrobiellen Abbau. Je tiefer die DNT-Konzentration im Untergrund ist, desto grösser sind die Abweichungen der  $\delta^{13}\text{C}$ - und  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte gegenüber jenen an der Oberfläche (Abb. 2). Dies ist ein aussagekräftiger und robuster Hinweis, dass der Sprengstoff (bio)chemisch umgebaut wurde. Solch substanzielle Isotopenfraktionierungen können nicht durch Transportprozesse verursacht werden, sondern bedingen den Bruch chemischer Bindungen und in diesem Fall einen mikrobiellen Abbau. Dieses physikalisch-chemische Phänomen ist als kinetischer Isotopeneffekt bekannt. Weil kinetische Isotopeneffekte je nach Element und Art der gebrochenen chemischen Bindungen variieren, lassen sich aus der Isotopenfraktionierung auch der Reaktionsmechanismus und somit der in der Umwelt ablaufende Abbauege samt Reaktionsprodukten identifizieren [8].

Trägt man die  $\delta^{13}\text{C}$ - und  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von Abbildung 2 gegeneinander auf, zeigt sich bei 2,4-DNT ein systematischer Verlauf hin zu schwereren Kohlenstoff- und Stickstoffisotopensignaturen. Mithilfe der typischen Isotopenfraktionierungstrends, wie sie für die Abbauege von 2,4-DNT im Labor gemessen wurden, lässt sich dieser Verlauf spezifischen Abbauegen zuordnen (Abb. 4). Wird ein Schadstoff gleichzeitig über verschiedene Mechanismen

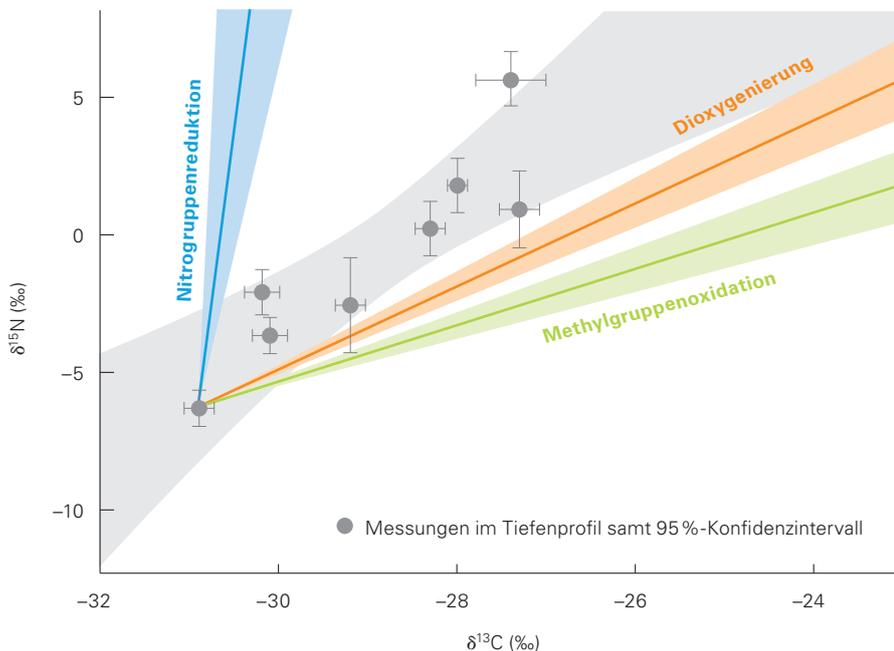


Abb. 4: Isotopenfraktionierungsanalyse von 2,4-DNT in einem kontaminierten Untergrund (graue Punkte). Die Anreicherung von  $^{13}\text{C}$  und  $^{15}\text{N}$  während des Abbaus folgt Trends, wie sie in Laborexperimenten für die Mineralisierung durch Dioxygenierung (orange Trendlinie) und für die Reduktion zu Aminonitrotoluolen (blaue Trendlinie) festgestellt wurden (nach [7]).

eliminiert, folgt die Isotopenfraktionierung einer Kombination der einzelnen Abbauprozesse. Dementsprechend zeigen die im kontaminierten Untergrund gemessenen Isotopensignaturen, dass 2,4-DNT zu einem grossen Teil durch Dioxygenierung eliminiert wurde, was zur vollständigen Mineralisierung führt. Der Rest hingegen wurde durch Nitrogruppenreduktion in problematische Aminonitrotoluole umgewandelt. Solche Verbindungen konnten wir in unseren Proben auch nachweisen.

Um das Instrument der Einzelstoff-Isotopenanalyse quantitativer nutzen zu können, untersuchen wir gegenwärtig das Ausmass der Isotopenfraktionierung und die zugrundeliegenden kinetischen Isotopeneffekte verschiedener Reaktionsmechanismen. Erste Laboruntersuchungen zeigen, dass die Dioxygenierung bei 2,4-DNT für eine bestimmte umgesetzte Stoffmenge nur eine relativ geringe Fraktionierung der Kohlenstoff- und Stickstoffisotope verursacht. Weil dies die hauptsächliche Abbaureaktion darstellt, weist die am Standort gemessene grosse Isotopenfraktionierung darauf hin, dass schon relativ viel dieses Schadstoffs (mehr als 99 Prozent) mineralisiert wurde. Wegen der starken Kontamination war der Schadstoff aber noch gut messbar. Vergleicht man die geschätzte abgebaute Stoffmenge mit historischen Informationen über den Zeitraum der Nitroaromaten-Herstellung, so lässt sich eine Halbwertszeit für 2,4-DNT im Untergrund von 10 bis 50 Jahren errechnen. Auch wenn die Abbaurate mit einer Unsicherheit von ein bis zwei Jahrzehnten behaftet ist, liefert die Einzelstoff-Isotopenanalyse Angaben zum Ausmass und Mechanismus der Schadstofftransformation, die sich nicht mit etablierten Methoden ableiten liessen.

[thomas.hofstetter@eawag.ch](mailto:thomas.hofstetter@eawag.ch)

- [1] Schwarzenbach R.P., Egli T., Hofstetter T.B., von Gunten U., Wehrli B. (2010): Global water pollution and human health. *Annual Review of Environment and Resources* 35 (1), 109–136.
- [2] Elsner M., Jochmann M.A., Hofstetter T.B., Hunkeler D., Bernstein A., Schmidt T.C., Schimmelmann A. (2012): Current challenges in compound-specific stable isotope analysis of environmental organic contaminants. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 403 (9), 2471–2491.
- [3] Hofstetter T.B., Berg M. (2011): Assessing transformation processes of organic contaminants by compound-specific stable isotope analyses. *Trends in Analytical Chemistry* 30 (4), 618–627.
- [4] Hollender J., Zimmermann S.G., Köpke S., Krauss M., McArdell C.S., Ort C., Singer H., von Gunten U., Siegrist H. (2009): Elimination of organic micropollutants in a municipal wastewater treatment plant upgraded with a full-scale post-ozonation followed by sand filtration. *Environmental Science and Technology* 43 (20), 7862–7869.
- [5] Götz C. et al. (2010): Mikroverunreinigungen – Beurteilung weitergehender Abwasserreinigerungsverfahren anhand Indikatorsubstanzen. *GWA* 4, 325–333.
- [6] Spahr S., Huntscha S., Bolotin J., Meier M.P., Elsner M., Hollender J., Hofstetter T.B. (2012): Compound-specific isotope analysis of benzotriazole and its derivatives. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. <http://dx.doi.org/10.1007/s00216-012-6526-1>
- [7] Wijker R.S., Bolotin J., Nishino S.F., Spain J.C., Hofstetter T.B. (in Vorbereitung): Evaluating nitroaromatic explosives biodegradation at a contaminated field site using compound-specific C and N isotope analysis. *Environmental Science and Technology*.
- [8] Hofstetter T.B., Schwarzenbach R.P., Bernasconi S.M. (2008): Assessing transformation processes of organic compounds using stable isotope fractionation. *Environmental Science and Technology* 42 (21), 7737–7743.



Étienne Vermeirssen, Biologe, ist Gruppenleiter am Oekotoxzentrum der Eawag und ETH Lausanne.  
Koautoren: Juliane Hollender, Markus Zennegg (Empa)

# Passiv Proben nehmen

Passivsammler ermöglichen aussagekräftigere Analysen von Chemikalienbelastungen in Fließgewässern als einzelne Stichproben. Die Methode eignet sich für eine räumlich und zeitlich differenzierte Erfassung von Schadstoffeinträgen. Damit lassen sich auch Stoffe nachweisen, deren Konzentrationen im Wasser unter der Bestimmungsgrenze liegen – zum Beispiel PCB in der Birs.



Chemikalien diffundieren aus dem Wasser in den Passivsammler aus Silikon und reichern sich dort an.

Schadstoffe erreichen unsere Oberflächengewässer über verschiedenste Eintragspfade. Viele Substanzen lassen sich heute zuverlässig messen und laufend kommen neue Verfahren hinzu, mit denen wir weitere Stoffe nachweisen können. Für all diese Analysen braucht man zunächst Wasserproben, die häufig als einzelne Stichproben genommen werden. Aber lassen Stichproben überhaupt aussagekräftige Analysen zu und geben sie ein korrektes Bild über eine Schadstoffsituation?

## Einzelne Stichproben reichen nicht

Fließgewässer sind äusserst dynamisch. Regenereignisse sorgen dafür, dass sich die Abflussmengen ständig ändern und vorhandene Schadstoffe dauernd unterschiedlich verdünnt werden. Auch der Eintrag erfolgt dynamisch: Durch Regen gelangen Schadstoffe von Strassen (oft Metalle) oder landwirtschaftlichen Oberflächen (oft Pestizide) stossweise in ein Gewässer. Die Einträge aus Industrieprozessen variieren zeitlich ebenfalls stark. Da

sich ein Eintrag in einen Bach oder Fluss nicht sofort mit dem übrigen Wasser durchmischt, sind die Substanzen zudem nicht homogen verteilt. All diese Aspekte machen es sehr schwierig, repräsentative Proben zu nehmen. Insbesondere wenn man wissen will, ob die Wasserqualitätskriterien eingehalten werden oder wo Massnahmen notwendig sind, reichen einzelne Messungen für eine Bewertung nicht aus. Automatische Sammelgeräte eignen sich nur für bestimmte Stellen wie ein Abflussrohr oder einen gut durchmischten Flussabschnitt. Solche Systeme sind zudem teuer und erfordern eine intensive Betreuung. Für grössere Monitoringprogramme eignen sie sich weniger gut.

Eine Alternative stellt die passive Probenahme dar. Sie basiert darauf, dass Stoffe aus dem Wasser an einem Sammler sorbieren und sich dort anreichern (siehe Kasten). Damit lassen sich auch Substanzen nachweisen, die aufgrund tiefer Konzentrationen in einer Wasserprobe schwer zu bestimmen sind. Ursprünglich zur Analyse von Luftschadstoffen entwickelt, verwendet man die passive Probenahme seit etwa drei Jahrzehnten auch, um Metalle und hydrophobe organische Schadstoffe in Wasser nachzuweisen [1, 2]. Methoden zur Beprobung hydrophiler organischer Substanzen aus Wasser wurden erstmals vor zehn Jahren vorgestellt. Die Eawag und das Oekotoxzentrum der Eawag und der ETH Lausanne erforschen seit einiger Zeit Passivsammler. Im Folgenden zeigen wir anhand zweier Beispiele die Vorteile der Methode.

### PCB-Quelle an der Birs identifiziert

Es erweckte viel Aufmerksamkeit, als 2008 in der Birs im Kanton Jura Fische gefunden wurden, die den zulässigen Gehalt an dioxinähnlichen polychlorierten Biphenylen (PCB) um ein Vielfaches überschritten [3]. Der Kanton empfahl Fischern, den Genuss der Fische zu beschränken, für besonders belastete Flussabschnitte erliess er gar ein Fangverbot. Die PCB-Belastung der Fische

lieferte allerdings keinen Hinweis auf die mögliche Quelle. Auf Anregung des Office de l'environnement des Kantons Jura und im Auftrag des Bundesamts für Umwelt untersuchten wir daher in einem Team aus Forschenden der Abteilung Umweltchemie der Eawag und der Abteilung Analytische Chemie der Empa gemeinsam mit den Kantonen Bern, Basel-Landschaft und Jura, ob die passive Probenahme die Suche nach der PCB-Quelle unterstützen könnte. Die Methode schien uns besonders geeignet, da passive Sammler ähnlich wie die Fische PCB kontinuierlich anreichern. Auf Basis früherer Erfahrungen wählten wir das Polymer Polydimethylsiloxan (Silikon) als Sammelmedium [2].

Auf einer Strecke von rund 60 Kilometern entlang der Birs verteilten wir an zehn Standorten Silikonstreifen. Nach einigen Wochen Exposition extrahierten wir das PCB aus dem Material und rekonstruierten die Belastung des Flusses. Anhand dieser Analysen konnten wir die Eintragungsstelle eindeutig lokalisieren (Abb. 1). Eine zweite Messkampagne identifizierte schliesslich ein Industriegebiet als Quelle des Umweltgiftes. Der Kanton Jura ergriff daraufhin rasch Sanierungsmassnahmen, um einen weiteren Eintrag von PCB zu verhindern. Erste Nachkontrollen deuten darauf hin, dass die Belastung mittlerweile stark zurückgegangen ist und sich die Massnahmen auszahlen. Nach diesem Erfolg wurden Silikonsammler zur PCB-Überwachung inzwischen auch in der Saane, der Aare und im Einzugsgebiet der Rhone verwendet.

### Passivsammler kombiniert mit Biotests

Zu einem weiteren Einsatz kam die passive Probenahme im Projekt «Integriertes Management der Wasserqualität von Fliessgewässern», in dem mehrere Forschungsabteilungen der Eawag zusammenarbeiten ([www.eawag.ch/iwaqa](http://www.eawag.ch/iwaqa)). Das Projekt ist Teil des nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Wassernutzung» (NFP61) und hat zum Ziel, den Gewässerzustand der

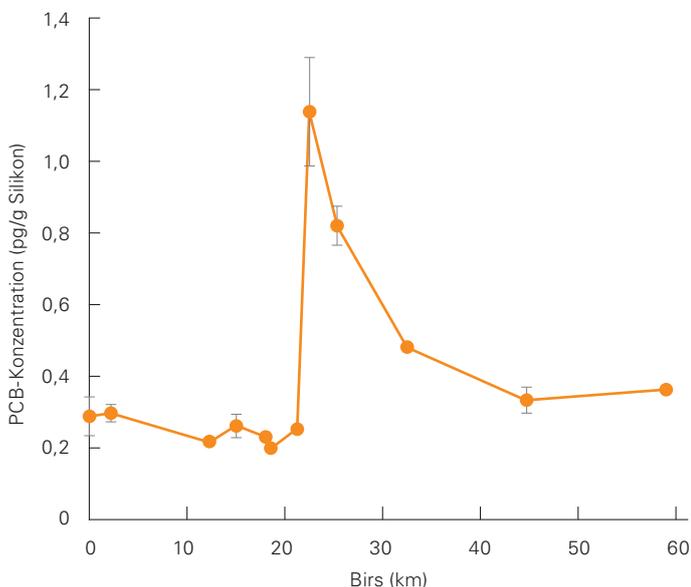


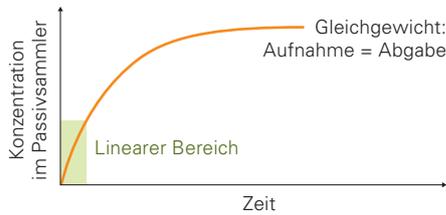
Abb. 1: PCB-Konzentrationen entlang der Birs. Die Eintragungsstelle lässt sich eindeutig identifizieren. Die PCB-Konzentration ist als so genannter WHO-TEQ angegeben.

## Passivsammler

Bei der passiven Probenahme diffundieren Stoffe aus dem beprobten Medium (zum Beispiel Wasser) in eine so genannte Referenzphase im Passivsammler. Treibende Kraft dahinter sind unterschiedliche Diffusionspotenziale der Stoffe in den beiden Medien. Die Stoffe werden an der Sammleroberfläche festgehalten, wo weitere Diffusions- und Sorptionsprozesse stattfinden. Je nach Zielsubstanz eignen sich Lipide, Lösungsmittel oder Polymere als Sammlerphase.

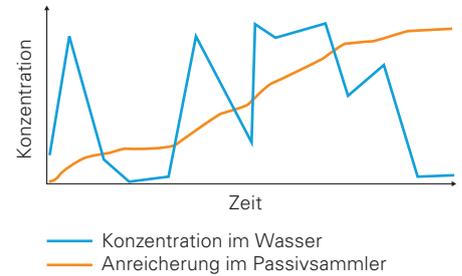
Der Stofffluss von der Wasserphase in die Referenzphase ist proportional zum Unterschied zwischen den Diffusionspotenzialen für die beiden Medien. Ist die Differenz gross genug, reichert sich eine Substanz im Passivsammler kontinuierlich an. In der Anfangsphase verläuft die Ansammlung im Medium mit einer konstanten Rate und die Kurve ist praktisch linear. Für eine genaue Probenahme ist es wichtig, dass sich die Expositionszeit nur über diesen Bereich erstreckt und weit entfernt vom Gleichgewichtszustand ist (Abbildung oben). Konzentrationsunterschiede im Wasser schlagen sich als unterschiedlich starke Zunahme im Sammler nieder und führen zu einem entsprechenden Kurvenverlauf. Damit lassen sich variable Konzentrationen über eine bestimmte Zeitspanne integrieren (Abbildung Mitte).

Verbreitete Passivsammler zur Analyse organischer Schadstoffe sind so genannte Chemcatcher und POCIS-Sammler (polar organic chemical integrative sampler). Bei diesen Systemen bedeckt eine Membran ein festes Sammelmedium (Abbildung unten). Die Sammler werden in eine Halterung eingebaut und diese in ein Fließgewässer eingesetzt. Nach einer Expositionszeit von einigen Wochen werden die Sammler entfernt und die Stoffe aus dem Referenzmedium extrahiert und analysiert.



Substanzaufnahme bei konstanter Konzentration im Wasser. Die Konzentration im Sammler steigt, bis Aufnahme und Wiederabgabe ins Wasser im Gleichgewicht sind.

Da die Anreicherungsrate einer Substanz im Passivsammler bei stabilen Umweltbedingungen und im linearen Bereich konstant ist, ist die Zunahme der Substanzmenge im Sammler proportional zur Substanzkonzentration im Gewässer.



Verschiedene Typen von Passivsammlern. a) Silikonstreifen zum Sammeln polychlorierter Biphenyle, b) POCIS-Sammler, c) Chemcatcher zum Sammeln hydrophiler organischer Substanzen.



Regula Haegi, Etienne Vermeirissen

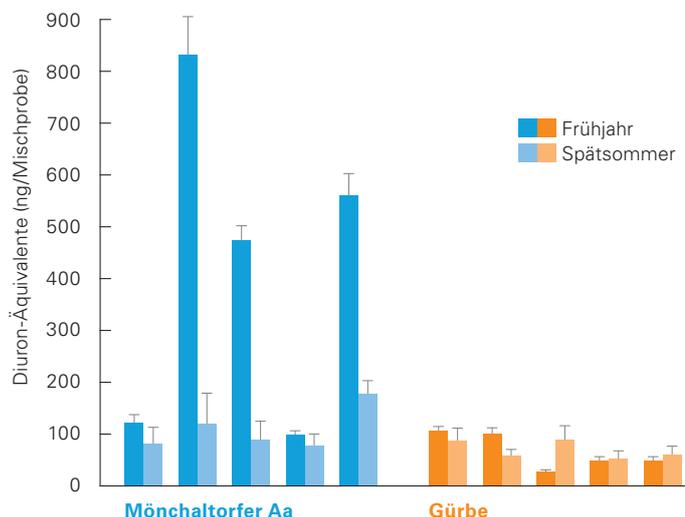
Mönchaltorfer Aa und der Berner Gürbe umfassend zu charakterisieren. Es soll Entscheidungshilfen liefern, um negative Auswirkungen auf den ökologischen Zustand von Fließgewässern abzuschätzen und zu minimieren. Mit einem mathematischen Modell will man den Einfluss verschiedener Bewirtschaftungsmethoden langfristig abschätzen. Für die Probenahme an den beiden Standorten wurden Passivsammler verwendet, da man von ihnen repräsentativere Durchschnittswerte erwartete als von wenigen Stichproben. Ausserdem waren die Probemengen nach einer längeren Exposition genügend gross, um die Wasserqualität mit verschiedenen chemischen Analysen und Biotests bewerten zu können.

Die Beprobung der beiden Flüsse erfolgte zwei Wochen lang mit so genannten Chemcatchern (siehe Kasten). Als Sammel-

medium diente eine Teflonmembran, die mit einer granulartigen Festphase beschichtet ist. Anschliessend bewerteten wir am Oekotoxzentrum die Wasserqualität mit drei Biotests: Mit einem Algentest untersuchten wir die Proben auf Herbizide, welche die Fotosynthese hemmen. Mit einem Enzymhemmtest konnten wir Insektizide nachweisen, welche die Signalübertragung bei Nervenzellen beeinträchtigen. Anhand gentechnisch veränderter Hefezellen identifizierten wir Substanzen mit östrogener Wirkung.

Wie der Algentest beispielhaft zeigt, ermöglichen die Passivsammlerproben ein differenziertes Bild der Gewässerqualität. Einerseits bildeten sie die räumlich unterschiedlichen Schadstoffbelastungen von Mönchaltorfer Aa und Gürbe und deren Einzugsgebieten gut ab. So waren bei Ersterer diverse Flussabschnitte deutlich stärker mit Herbiziden belastet als bei Letzterer. Anderer-

Abb. 2: Herbizidkonzentrationen an fünf Messstellen in der Mönchaltorfer Aa und in der Gürbe. Angegeben ist jeweils der Durchschnitt von sechs Passivsammlern (Mischprobe) in so genannten Diuron-Äquivalenten. Ein Diuron-Äquivalent entspricht jener Konzentration des Herbizids Diuron, welche im Algentest die gleichen biologischen Effekte bewirkt wie die Herbizide in der Probe.



seits erfassten die Passivsammler auch zeitliche Unterschiede. Demnach wiesen die Proben beider Flüsse im Mai höhere Herbizidkonzentrationen auf als Ende Sommer (Abb. 2). Dies korrespondiert mit dem erhöhten Einsatz von Pflanzenschutzmitteln zu Beginn der Vegetationszeit. In einer früheren Untersuchung in Kläranlagenausläufen konnten wir bereits zeigen, dass sich mithilfe von Passivsammlerproben Pestizidbelastungen sehr gut erfassen lassen [4].

### Umweltfaktoren berücksichtigen

Obwohl die passive Probenahme – kombiniert mit chemischer Analytik oder Biotests – schon nützliche Ergebnisse geliefert hat, besteht noch Optimierungsbedarf. So reichern sich zum Beispiel nicht alle Substanzen gleich rasch in einem Sammlermedium an. Gegenüber Stoffgemischen, deren Substanzen sich langsam akkumulieren, wird die Toxizität von Mischungen mit schneller Anreicherung tendenziell unterschätzt, auch wenn beide für Wasserorganismen gleich toxisch wären.

Die Diffusionsprozesse, welche die Aufnahme von Chemikalien bestimmen, hängen von Umweltfaktoren wie der Temperatur oder den Fließbedingungen sowie von der Dimensionierung und Konstruktion des Sammlers ab. Wie die Fließgeschwindigkeit und die diffusionslimitierende Membran von Passivsammlern die Stoffaufnahme beeinflussen, haben wir an den Abteilungen Umweltchemie und Umwelttoxikologie der Eawag untersucht. Dazu konstruierten wir ein modulares Rinnensystem für Fluss- oder Abwasser, das wir gezielt mit Chemikalien versetzen können (Abb. 3). Es stellte sich heraus, dass membranlose Passivsammler, zum Beispiel Silikonstreifen oder Chemcatcher ohne Membran, bei höherer Fließgeschwindigkeit mehr Substanz sammelten.

Grund dafür ist, dass sich die Diffusionswege infolge hydrodynamischer Effekte mit steigender Fließgeschwindigkeit verkleinern. Mithilfe solcher Erkenntnisse lassen sich Felddaten normalisieren und Auswertungen verbessern.

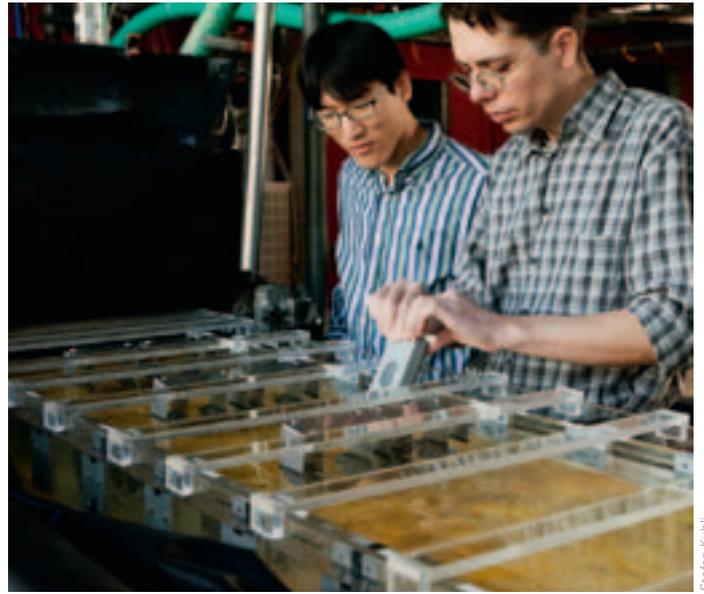
### Konzentrationsbestimmung ist schwierig

Um aus den Daten, welche die Passivsammler liefern (Substanzmenge pro Sammler und Zeiteinheit), auf die Substanzkonzentrationen im Wasser schliessen zu können, muss man die Sammler kalibrieren. Eine solche Kalibrierung kann im Labor erfolgen. Dabei setzt man die Passivsammler unterschiedlich lange mit Chemikalien versetztem Wasser aus und bestimmt anhand der verschiedenen Substanzmengen die Aufnahmekinetik.

Eine gute Alternative ist auch eine Feldkalibrierung. Dazu nimmt man während einer ersten Messkampagne regelmässig Proben. Mithilfe der durchschnittlichen Konzentration im Wasser, der vom Sammler aufgenommenen Substanzmenge und der Expositionszeit kann man eine Sammelrate berechnen. So ergibt sich bei einer durchschnittlichen Konzentration von 5 Nanogramm pro Liter und einer innert 10 Tagen gesammelten Substanzmasse von 50 Nanogramm eine Sammelrate von 1 Liter pro Tag. Bei den nachfolgenden Messungen kann man die gesammelte Substanzmenge dann durch die Sammelrate und die Sammelzeit teilen und erhält so die geschätzte Substanzkonzentration im Wasser [5].

Dieser Ansatz funktioniert gut, wenn die Verhältnisse im Feld jenen während der Kalibrierung entsprechen. In der Realität variieren zum Beispiel die Fließbedingungen aber ständig, sodass die Bestimmung von Substanzkonzentrationen trotz bekannter Sammelraten auch mit einer passiven Probenahme mit Unsicherheiten

Abb. 3: Die Wissenschaftler Junho Jeon und Etiënne Vermeirssen untersuchen in der modularen Fließrinne, wie sich die Umweltbedingungen und die Membran auf die Sammelrate im Passivsammler auswirken [6].



Stefan Kubi

behaftet ist. Bei der Verwendung von Biotests lassen sich oft keine Konzentrationen ableiten, denn dort werden in der Regel Stoffgemische untersucht. Wenn man nicht weiss, welche Substanzen in der Mischung vorliegen, kann man für diese keine Sammelrate bestimmen und die Toxizität einer Probe nur als Masse pro Sammler und nicht als Masse pro Liter Wasser angeben.

### Optimieren und standardisieren

Um die Aussagekraft der passiven Probenahme bezüglich Substanzkonzentrationen zu verbessern, braucht es noch weitere Forschung [5]. Trotz Einschränkungen in diesem Bereich eignet sich die Methode, um in Fließgewässern Schadstoffbelastungen räumlich differenziert festzustellen und deren Quellen aufzudecken. Zudem lassen sich damit zeitliche Muster von Einträgen zuverlässig erfassen und über längere Perioden verfolgen. Die passive Probenahme liefert wesentlich aussagekräftigere Resultate als vereinzelte Stichproben und ist kostengünstig sowie oft wenig arbeitsintensiv.

Ein weiterer Vorteil ist, dass sich im Passivsammler grössere Substanzmengen anreichern. Dadurch können unter Umständen Stoffe erstmals nachgewiesen werden (beispielsweise PCB in der Birs), weil deren Konzentrationen im Sammler über der Bestimmungsgrenze liegen, oder man kann wie beim Projekt an der Mönchaltorfer Aa und an der Gürbe mit einer Probe mehrere analytische Verfahren durchführen. Im Rahmen von Norman, einem internationalen Netzwerk von Referenzlaboratorien, dem auch die Eawag und das Oekotoxzentrum angehören, wird die passive Probenahme unter anderem durch gross angelegte Ringversuche gegenwärtig weiter optimiert und standardisiert.

[etienne.vermeirssen@oekotoxzentrum.ch](mailto:etienne.vermeirssen@oekotoxzentrum.ch)

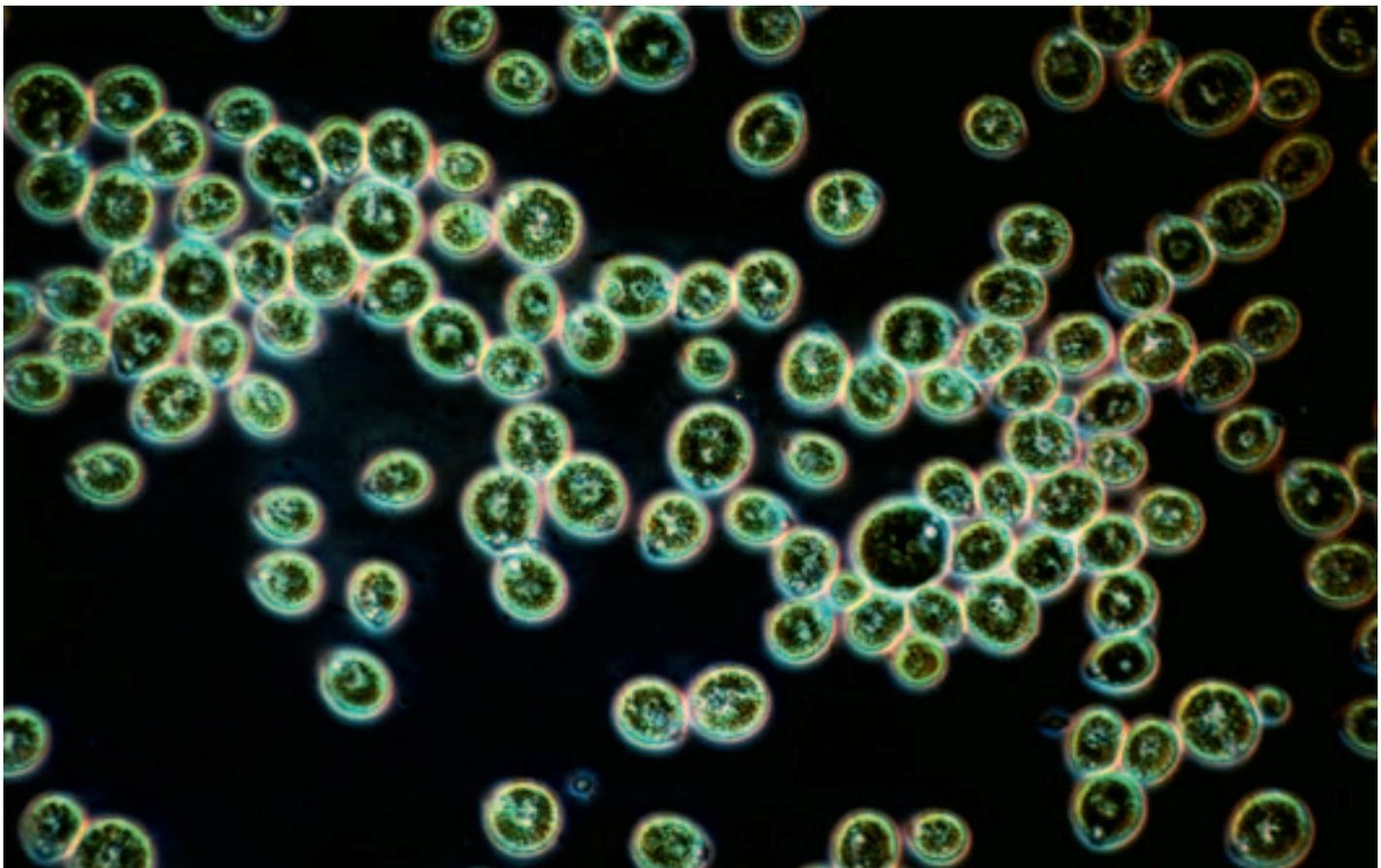
- [1] Meylan S., Odzak N., Behra R., Sigg L. (2004): Speciation of copper and zinc in natural freshwater – Comparison of voltammetric measurements, diffusive gradients in thin films (DGT) and chemical equilibrium models. *Analytica Chimica Acta* 510 (1), 91–100.
- [2] Kwon J.-H., Wüthrich T., Mayer P., Escher B. I. (2007): Dynamic permeation method to determine partition coefficients of highly hydrophobic chemicals between poly(dimethylsiloxane) and water. *Analytical Chemistry* 79 (17), 6816–6822.
- [3] Schmid P., Zennegg M., Holm P., Pietsch C., Brüscheweiler B., Kuchen A., Staub E., Tresp J. (2010): Polychlorierte Biphenyle (PCB) in Gewässern der Schweiz. Daten zur Belastung von Fischen und Gewässern mit PCB und Dioxinen, Situationsberichterstattung. Umwelt-Wissen Nr. 1002, Bundesamt für Umwelt.
- [4] Vermeirssen E.L.M., Hollender J., Bramaz N., van der Voet J., Escher B.I. (2010): Linking toxicity in algal and bacterial assays with chemical analysis in passive samplers deployed in 21 treated sewage effluents. *Environmental Toxicology and Chemistry* 29 (11), 2575–2582.
- [5] Harman C., Allan I.J., Vermeirssen E.L.M. (2012): Calibration and use of the polar organic chemical integrative sampler – A critical review. *Environmental Toxicology and Chemistry* 31 (12), 2724–2738.
- [6] Vermeirssen E.L.M., Dietschweiler C., Escher B.I., van der Voet J., Hollender J. (2012): Transfer kinetics of polar organic compounds over polyethersulfone membranes in the passive samplers POCIS and Chemcatcher. *Environmental Science and Technology* 46 (12), 6759–6766.

# Silber verändert die Zellregulation



Smitha Pillai, Ökotoxikologin, untersucht, wie sich Umweltchemikalien auf Gene und Proteine auswirken.

Herkömmliche Methoden erfassen die Auswirkungen von Umweltgiften auf Lebewesen oft nur ungenügend – insbesondere wenn diese in geringen Konzentrationen auftreten. Abhilfe können die so genannten Omik-Methoden schaffen. Mit ihnen lassen sich Effekte auf molekularer Ebene nachweisen, etwa dass eine Silberbelastung bei Grünalgen die Genaktivität und das Proteinprofil verändert.



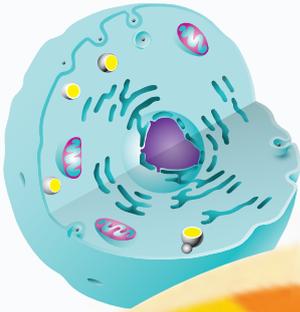
Silberionen greifen in den Zellstoffwechsel der Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii* ein und beeinträchtigen etwa die Fotosynthese.

Schätzungsweise 13 420 Tonnen Silber gelangten 1997 global in die Umwelt, etwa 400 Tonnen davon über Industrie- und Siedlungsabwasser direkt in die Gewässer [1]. Das toxische Schwermetall ist sehr stabil und reichert sich in Lebewesen und in der Nahrungskette an [2]. Seit einigen Jahren stammt ein wesentlicher Teil des Silbers in den aquatischen Lebensräumen aus Nanopartikeln, die wegen ihrer antibakteriellen Eigenschaften in immer mehr Textilien, Detergenzien, Kosmetika, Fassaden-

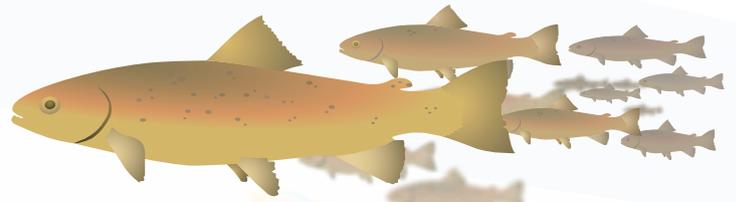
anstrichen und sogar in landwirtschaftlichen Produkten vorkommen [3]. Fachleute gehen davon aus, dass Silbernanoartikel in den Schweizer Oberflächengewässern heute in Konzentrationen von 30 bis 80 Nanogramm pro Liter auftreten [4]. Verschiedene Studien zeigen allerdings, dass die Toxizität nicht von den Nanopartikeln selber herrührt, sondern von den Silberionen, die sich aus ihnen lösen [5]. Sie stellen eine ernst zu nehmende Gefahr für die Wasserlebewesen dar.

**Zelle**

Die veränderte Genexpression wirkt sich auf die Synthese der Proteine und auf die Stoffwechselprozesse in den Zellen aus.

**Individuum/Population**

Wie wirken sich die Veränderungen in den Zellen auf das Wachstum, die Fortpflanzung oder die Mortalität einzelner Individuen und auf eine Population aus?

**Genom**

Umweltgifte wirken auf der Ebene der Biomoleküle und können die Aktivität von Genen verändern.

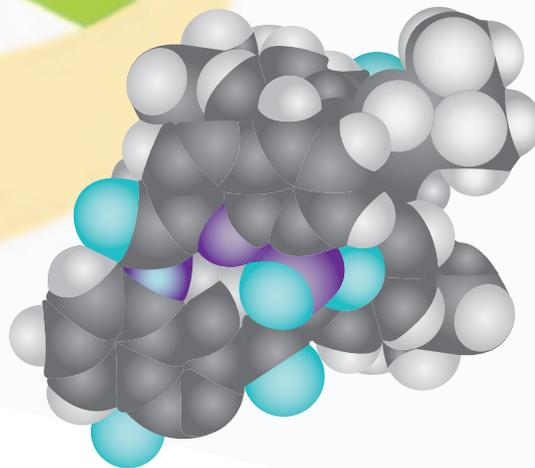
**Protein**

Abb. 1: Die Effekte von Umweltgiften müssen auf verschiedenen biologischen Organisationsstufen untersucht werden.

Silberionen kommen in den Gewässern meist nur in verhältnismässig geringen Konzentrationen von wenigen Nanogramm pro Liter frei vor. Ein Grossteil bildet mit Sulfiden und Chloriden Komplexe, die sich an Sedimente heften oder ausfallen. Allerdings sind die freien Silberionen für verschiedene Wasserorganismen bereits in solch geringen Mengen giftig. Empfindlich reagieren zum Beispiel Algen, weil sie gelöstes Silber besonders leicht aufnehmen und in ihren Zellen anreichern. Da Algen die Nahrungsgrundlage vieler Organismen darstellen, akkumuliert sich das Schwermetall zudem auch entlang der Nahrungskette und kann für höhere Lebewesen ebenfalls in problematischen Konzentrationen vorkommen.

**Alle Organisationsstufen betrachten**

Um das Risikopotenzial eines Umweltgiftes zu bestimmen, untersucht man üblicherweise anhand standardisierter Laborexperimente, wie sich dieses auf die Fortpflanzung, die Überlebensrate oder das Wachstum bestimmter Modellorganismen (zum Beispiel Hefezellen, Grünalgen oder Wasserflöhe) auswirkt. Daraus lassen sich Richtlinien für den Umgang mit toxischen Stoffen in der Umwelt ableiten [6]. Mit diesem Ansatz können jedoch Effekte von Umweltgiften, die in geringen Konzentrationen vorkommen, nur

sehr beschränkt erfasst werden. In solchen Fällen offenbaren sich die Beeinträchtigungen meist nicht durch eine gestörte Fortpflanzung oder eine verminderte Überlebensrate, sondern viel subtiler auf zellulärer oder molekularer Ebene. Vor diesem Hintergrund erscheint es notwendig, die Auswirkungen von Substanzen wie Silber auf die verschiedenen biologischen Organisationsstufen zu untersuchen: von der molekularen über die zelluläre und die organismische Ebene bis hin zu den Populationen und zum Ökosystem (Abb. 1).

Ist ein Lebewesen einer Chemikalie ausgesetzt, geschieht die direkte Interaktion immer auf der Ebene der Biomoleküle, aus denen sich die Zellen zusammensetzen. Will man wissen, wie Umweltgifte auf einen Organismus wirken, ist deshalb vor allem das Verständnis der zugrundeliegenden molekularen Mechanismen unabdingbar. Das ermöglicht auch eine differenziertere ökotoxikologische Risikobewertung. Dank der methodischen Fortschritte in Biologie, Analytik und Bioinformatik der letzten Jahre verfügen Forscherinnen und Forscher heute über die geeignete Technologie, um Effekte auf molekularer Ebene zu untersuchen. So lassen sich mithilfe der Omik-Methoden Prozesse im

Sinn eines systembiologischen Ansatzes in ihrer Gesamtheit untersuchen: Die Genomik analysiert die Aktivität der gesamten Gene eines Organismus (Genom), während die Transkriptomik alle RNA-Moleküle erfasst, die anhand des genetischen Bauplans (DNA) zur Proteinsynthese hergestellt werden (Transkriptom). Entsprechend erforscht die Proteomik die Gesamtheit der Proteine (Proteom) und die Metabolomik jene der Stoffwechselprodukte (Metabolom).

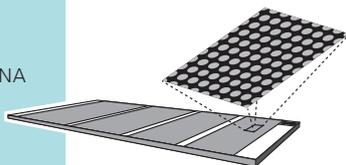
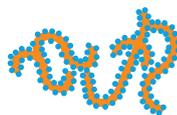
### Die gesamte Genaktivität erfassen

Obwohl das Genom in jeder Zelle eines Organismus dasselbe ist, unterscheidet sich die Aktivität der Gene in verschiedenen Zellen je nach ihrer physiologischen Funktion, aber auch als Reaktion auf externe Stimuli wie zum Beispiel chemische Stressfaktoren. Die als Genexpression bezeichnete Aktivität eines Gens zeigt sich daran, wie stark es abgelesen wird und wie viel RNA-Moleküle produziert werden (Transkription). Ein Transkriptom stellt einen Schnappschuss aller zu einem bestimmten Zeitpunkt und unter bestimmten Bedingungen exprimierter Gene dar [7]. Mit so genannten DNA-Mikroarrays und neusten Sequenzierungsmethoden lässt sich studieren, wie sich das Transkriptom eines Lebewesens verändert, wenn dieses Umweltgiften aus-

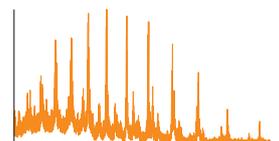
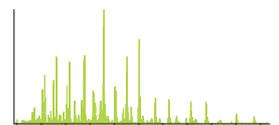
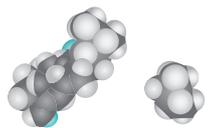
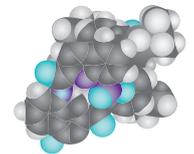
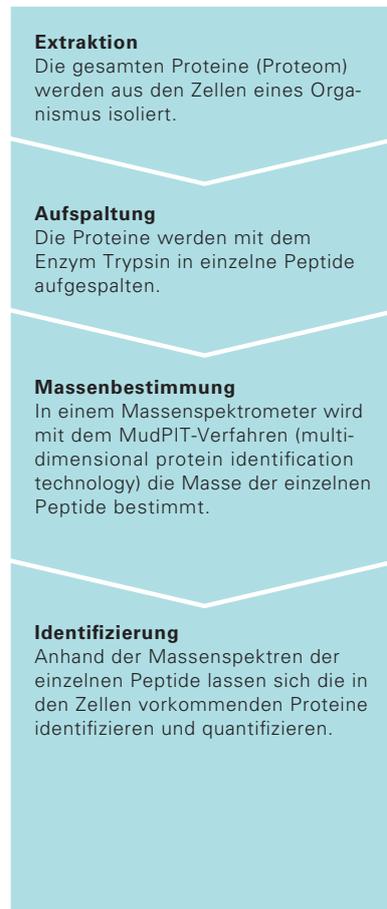
gesetzt ist (siehe Schema unten). Aus den spezifischen Genexpressionsmustern kann man auf den Wirkmechanismus der Stoffe schliessen.

Die RNA-Transkripte stellen ihrerseits die Vorlage dar, anhand derer die zelluläre Maschinerie Proteine herstellt. Deshalb ermöglicht die Untersuchung des Proteinprofils (Proteom) eines Organismus zusätzliche Einblicke darüber, wie toxische Substanzen in die biochemischen Prozesse eingreifen. Mit an Massenspektrometrie gekoppelter Flüssigchromatografie werden Proteom-Analysen vorgenommen. Dasselbe Prinzip wird auch bei Metabolom-Analysen angewendet. Das Metabolom, das Stoffwechselprodukte und Moleküle mit niedrigem Molekulargewicht umfasst, repräsentiert den physiologischen Zustand eines Organismus präziser als sein Transkriptom oder Proteom. Mithilfe der Omik-Methoden und der traditionellen ökotoxikologischen Methoden lassen sich die molekularen und biochemischen Vorgänge in den Zellen kausal beschreiben und quantitativ erfassen [8]. Werden diese Informationen in Modellrechnungen eingespeist, welche die Effekte auf Populationsebene prognostizieren, steht eine Methode zur Verfügung, die ökotoxikologische Risiken basierend auf wissenschaftlich fundierten Wirkzusammenhängen bewertet.

## Transkriptomik



## Proteomik



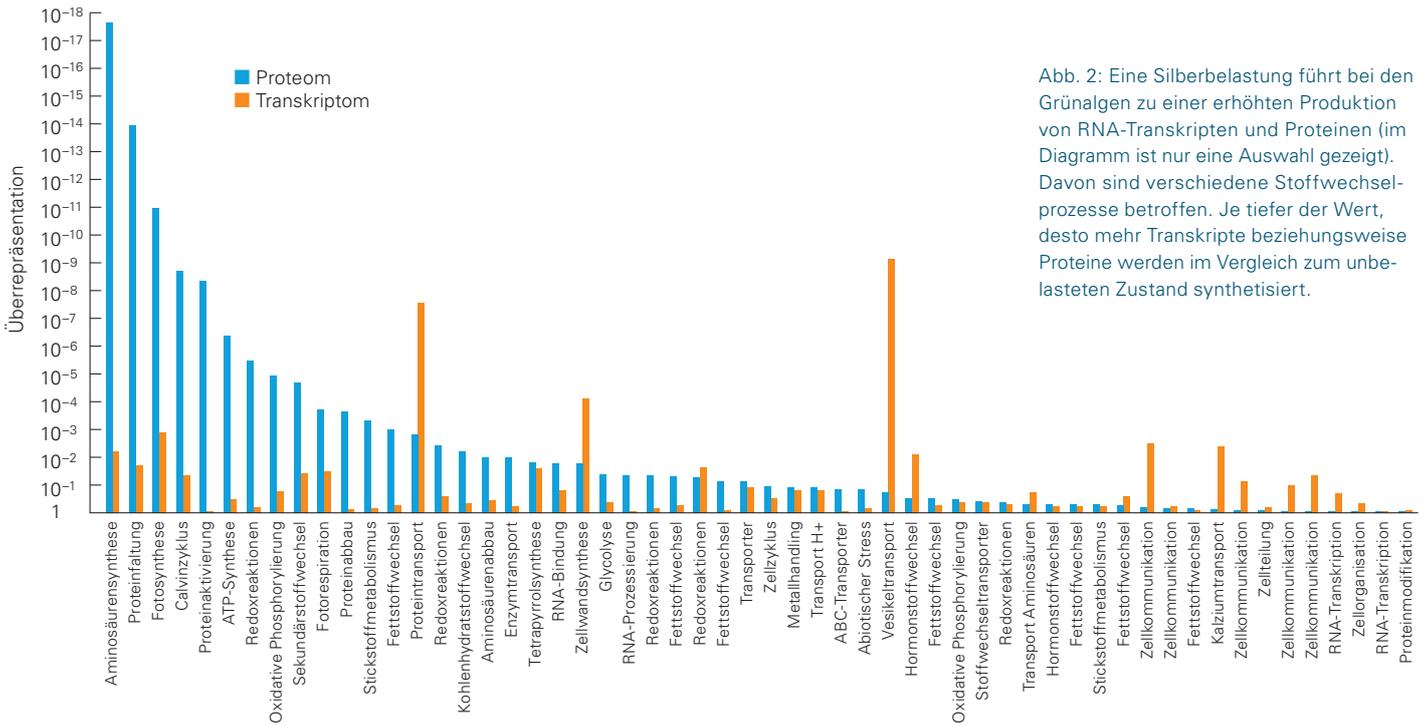


Abb. 2: Eine Silberbelastung führt bei den Grünalgen zu einer erhöhten Produktion von RNA-Transkripten und Proteinen (im Diagramm ist nur eine Auswahl gezeigt). Davon sind verschiedene Stoffwechselprozesse betroffen. Je tiefer der Wert, desto mehr Transkripte beziehungsweise Proteine werden im Vergleich zum unbelasteten Zustand synthetisiert.

**Veränderte Genexpression**

Die Eawag wendet Omik-Methoden unter anderem an, um die Toxizität von Silber auf die Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii* zu erforschen. Der Fotosynthese betreibende Einzeller gehört zum Phytoplankton und ist für die Ökotoxikologie ein wichtiger Modellorganismus, weil er an der Basis der aquatischen Nahrungskette steht. Zudem kann er unter Laborbedingungen leicht kultiviert werden und sein Genom ist vollständig sequenziert. *Chlamydomonas reinhardtii* nimmt im Wasser gelöste Silberionen rasch auf, die sich dann in den Zellen akkumulieren. Schon Konzentrationen von einigen Nanogramm pro Liter wirken deshalb toxisch und beeinträchtigen verschiedene Stoffwechselfunktionen. So vermindert das Schwermetall zum Beispiel das Wachstum und die Fotosynthese. Zwar lassen sich diese Effekte auch mit herkömmlichen Expositionsversuchen nachweisen, der zugrundeliegende Wirkmechanismus bleibt dabei aber verborgen. Deshalb untersu-

chen wir, welche Veränderungen Silber im Transkriptom, Proteom und Metabolom von *Chlamydomonas reinhardtii* bewirkt.

In ersten Versuchen setzten wir die Grünalgen verschiedenen Silberkonzentrationen aus und analysierten mit Mikroarrays und spezieller Massenspektrometrie (so genanntes MudPIT-Verfahren) das Transkriptom und das Proteom. In den belasteten Algen wichen die synthetisierten Mengen mehrerer 1000 RNA-Transkripte signifikant von jenen der Kontrollgruppe ohne Silberexposition ab. Das bedeutet, dass die Belastung die Aktivität der zugehörigen Gene beeinflusst hatte. Entsprechend veränderte sich auch das Proteinprofil: Gegen 1000 Proteine wichen vom Normalzustand ab. Die meisten Transkripte und Proteine liessen sich von ihrer Funktion her einander zuordnen (Abb. 2). Die Veränderungen des Transkriptoms und des Proteoms traten bereits bei Silberkonzentrationen auf, wie sie in der Umwelt vorkommen; bei höheren Konzentrationen waren sie allerdings stärker.

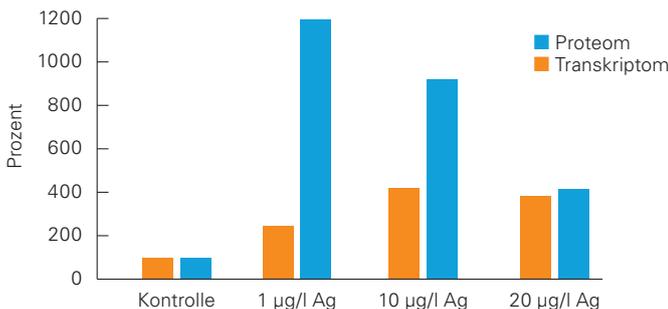


Abb. 3: Unter Silberbelastung produzieren die Grünalgen mehr Glutathion-S-Transferase, ein Protein, das der Abwehr von oxidativem Stress dient. RNA- und Proteinsynthese sind gegenüber der Kontrolle erhöht.

**Auswirkungen auf die Stoffwechselfunktionen**

Die Veränderungen im Transkriptom und im Proteom betrafen verschiedene zelluläre Regelkreise. So wirkte sich die Silberbelastung beispielsweise auf die Fotosynthese, die Herstellung von Pigmenten, den Energie- und Lipidstoffwechsel sowie auf die Zucker- und Stärkeproduktion aus. Dies zeigte sich auch im physiologischen Zustand der Algenzellen. Im Fall der Fotosynthese führte die Silberbelastung zu einem Ungleichgewicht beim Elektronentransport und zur Bildung reaktiver Sauerstoffverbindungen. In grösseren Mengen verursachen diese oxidativen Stress und können Lipide, Proteine oder DNA oxidieren. Üblicherweise reagiert eine Zelle darauf mit einer Abwehrreaktion und produziert Proteine, welche die Verbindungen neutralisieren. Genau das machten die silberexponierten Algen, was ebenfalls darauf hindeutet, dass das Schwermetall tatsächlich oxidativen Stress auslöst (Abb. 3). Ausserdem nahmen die Fotosynthese-

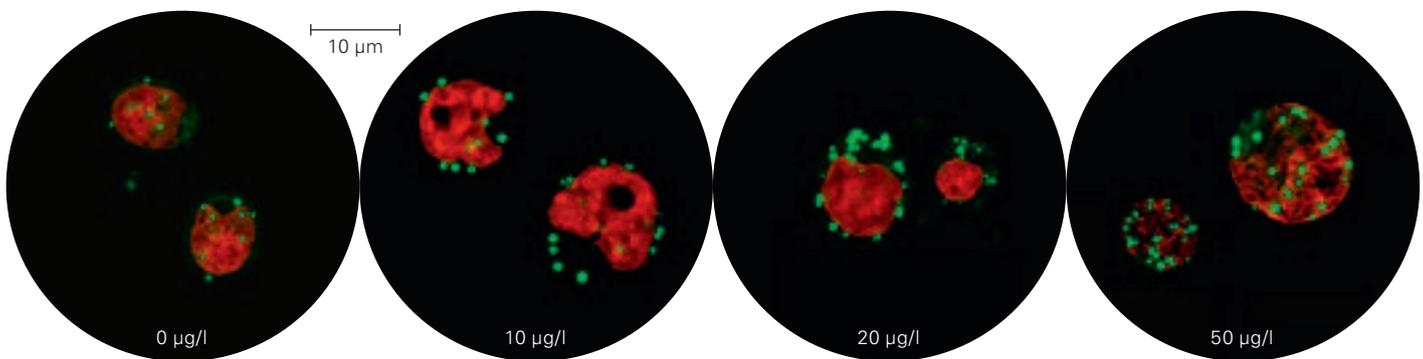


Abb.4: Mit zunehmender Silberkonzentration weisen die Algenzellen mehr Lipidkörper (grün) auf.

effizienz und der Gehalt an ATP (der Energiewährung der Zellen) mit steigender Silberkonzentration ab.

Ein weiteres Beispiel stellt die Synthese von Lipidkörpern dar. Diese Zellorganellen speichern Triacylglyceride, die Vorläufermoleküle der Fettsäuren. Gemäss Fachliteratur sollen Zellen vor allem unter Stress die Produktion von Lipidkörpern ankurbeln. Unsere Untersuchungen bestätigen dies. So nahm die Zahl der Lipidkörper in den Algenzellen mit steigender Silberbelastung zu (Abb. 4) und korrelierte gut mit anderen Reaktionen, die durch oxidativen Stress ausgelöst werden. Die Silberionen greifen ausserdem nicht nur in die RNA-Transkription und in die Proteinsynthese ein, sondern interagieren auch direkt mit Proteinen. Insbesondere wenn deren aktive Bereiche Kupfer enthalten, kann Silber Proteine inaktivieren. Dies kann wiederum zusätzliche Veränderungen auf Transkriptom- und Proteom-Ebene auslösen.

#### Ableiten des Wirkmechanismus

Nimmt man die Erkenntnisse aus den Transkriptom- und Proteom-Analysen sowie den physiologischen Untersuchungen zusammen, lässt sich ableiten, wie sich eine Silberexposition bei *Chlamydomonas*-Algen auswirkt. Demzufolge gelangen Silberionen relativ leicht in die Zellen, interagieren mit Proteinen mehrerer Stoffwechselwege und beeinträchtigen dadurch zum Beispiel die Fotosynthese oder die ATP-Produktion. Das löst in den Zellen oxidativen Stress aus, der zur Schädigung von Proteinen und der DNA führt. Diese Effekte auf der zellulären Ebene wirken sich schliesslich auch auf der Ebene der Individuen und auf Populationsstufe negativ aus und lassen sich etwa als vermindertes Wachstum der Algen beobachten.

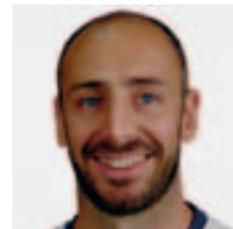
Um die zellulären Wirkmechanismen bei einer Belastung mit Umweltchemikalien zu entschlüsseln und daraus die Auswirkungen auf die Stoffwechselprozesse abzuleiten, sind Omik-Analysen

ein viel versprechender Ansatz. Zusätzlich zu den gängigen Parametern wie dem Wachstum oder der Mortalität lassen sich damit überdies weitere, möglicherweise empfindlichere Messgrössen finden, um die biologischen Effekte zu quantifizieren. So würde sich im Fall von *Chlamydomonas* die Akkumulation der Lipidkörper als solcher Endpunkt eignen. Auf dem Weg zu einer wissenschaftlichen ökotoxikologischen Risikobewertung stellt die neue Technologie damit eine grundlegende Methode dar.

[smitha.pillai@eawag.ch](mailto:smitha.pillai@eawag.ch)

- [1] Eckelman M.J., Graedel T.E. (2007): Silver emissions and their environmental impacts: A multilevel assessment. *Environmental Science and Technology* 41 (17), 6283–6289.
- [2] O'Connor T.P. (1996): Trends in chemical concentrations in mussels and oysters collected along the US coast from 1986 to 1993. *Marine Environmental Research* 41 (2), 183–200.
- [3] Wijnhoven S.W.P. et al (2009): Nano-silver: A review of available data and knowledge gaps in human and environmental risk assessment. *Nanotoxicology* 3 (2), 109–138.
- [4] Müller N.C., Som C., Nowack B. (2009): Exposure modeling of engineered nanoparticles in the environment. *Nanotech Conference & Expo 2009, Technical Proceedings* 1, 159–162.
- [5] Piccapietra F., Allué C. G., Sigg L., Behra R. (2012): Intracellular silver accumulation in *Chlamydomonas reinhardtii* upon exposure to carbonate coated silver nanoparticles and silver nitrate. *Environmental Science and Technology* 46 (13), 7390–7397.
- [6] Kramer V.J. et al. (2011): Adverse outcome pathways and ecological risk assessment – Bridging to population-level effects. *Environmental Toxicology and Chemistry* 30 (1), 64–76.
- [7] Schirmer K., Fischer B.B., Madureira D.J., Pillai S. (2010): Transcriptomics in ecotoxicology. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 397 (3), 917–923.
- [8] Garcia-Reyero N., Perkins E.J. (2011): Systems biology – Leading the revolution in ecotoxicology. *Environmental Toxicology and Chemistry* 30 (2), 265–273.

# Der automatisierte Blick in den See



Francesco Pomati,  
Mikrobiologe und Leiter  
der Gruppe Phyto-  
planktondiversität  
in der Abteilung Aqua-  
tische Ökologie.  
Koautor: Andri Bryner

Auch Algen haben einen Biorhythmus. Die Verteilung ihrer Masse, aber auch ihre Artenvielfalt ändern sich im Tag-Nacht-Wechsel ebenso wie über die Jahreszeit und die Seetiefe. Eine schwimmende Messplattform der Eawag und der ETH Zürich, unterstützt vom Nationalfonds, beschafft nun erstmals genügend hoch aufgelöste Daten, um dieser Dynamik und den treibenden Kräften dahinter auf die Spur zu kommen.

Süsswasserökosysteme zeichnen sich durch eine sehr hohe Biodiversität aus. Gleichzeitig zählen sie weltweit zu den am meisten bedrohten Lebensräumen, und das Verschwinden von aquatischen Arten verläuft überproportional schnell [1].

## Phytoplankton als Basis der Nahrungspyramide

In Seen ist die Basis der Nahrungspyramide das Phytoplankton. Ändert sich dessen Zusammensetzung, kann dies alles andere Leben im See beeinflussen. Doch bis heute ist unklar, ob Aufkommen und Zusammensetzung dieser pflanzlichen und bakteriellen Schwebepartikel einfach einer zufälligen Auswahl regional vorkommender Arten entsprechen oder ob es steuernde Mechanismen gibt. Fakt ist, dass Veränderungen sehr rasch ablaufen

können. Algenblüten, unter anderem auch von toxischen Blaualgen (eigentlich: Cyanobakterien), können innert weniger Stunden zu neuen Verhältnissen führen, zum Beispiel nach Wetteränderungen. Die zeitlich und räumlich möglichst exakte Erfassung des Planktons und dessen Umgebung muss also auch die Basis der Forschungspyramide sein. Entsprechend hoch aufgelöste Daten fehlen jedoch.

Typische Monitoringprogramme stützen sich auf monatliche oder bestenfalls wöchentliche Proben, meist nur von einer Stelle und aus einer Tiefe des Sees. Mein Kollege im Projekt, Bas Ibelings vom Genfer Forel Institut, sagt dazu: «Verglichen mit dem Blick in einen Wald, hiesse das, alle paar tausend Jahre einmal vorbe-



Das schwimmende limnologische Labor auf dem Greifensee.

zuschauen und dann aus dem Vergleich der zwei Einblicke zu schliessen, was sich in der Zwischenzeit ereignet hat.» Ursprüngliche, ganz naturbelassene Gewässer, die als Referenz dienen könnten, gibt es kaum mehr. Und dass gleichzeitig verschiedenste Stressfaktoren auf aquatische Ökosysteme wirken, macht es zusätzlich schwierig, das System zu verstehen, geschweige denn es zu managen. So können Klimaänderungen, Eutrophierung und Verschmutzung Algenblüten begünstigen – je einzeln oder auch in ihrer Summe.

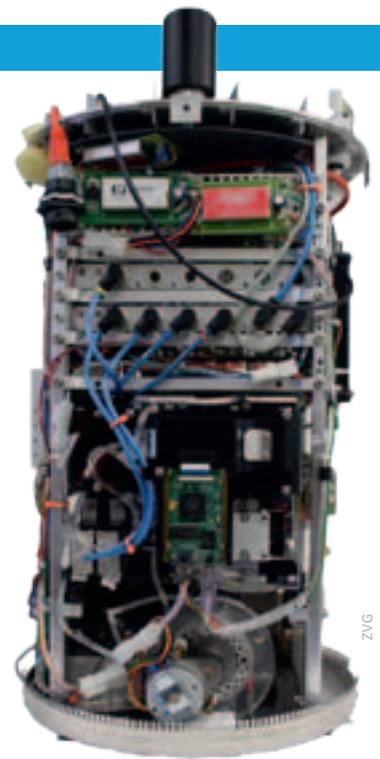
### Schwimmendes limnologisches Labor

An der Eawag wurde nun – gefördert vom Nationalfonds – eine schwimmende Plattform entwickelt und erfolgreich getestet, die

- ▶ automatisch, in kurzer Zeitfolge und in verschiedenen Seetiefen Phytoplankton erfassen kann,
- ▶ Daten aus dem Planktonmonitoring laufend verknüpft mit aktuellen physikalischen Messwerten der Umgebung und
- ▶ einen Echtzeitdatenfluss aller Werte sichert für die Modellierung und die Prognose von dynamischen Änderungen des Phytoplanktons. Die Übertragung der Daten von der Messplattform ans Land erfolgt über eine Mobilfunkverbindung [2].

Das Herz der Mess- und Monitoringplattform ist ein adaptiertes Durchflusszytometer vom Typ Cytobuoy des gleichnamigen niederländischen Herstellers. Das Gerät kann Plankton von 1 bis 700 Mikrometer im Durchmesser und bis zum Millimeterbereich in der Länge analysieren; das heisst, winziges Picoplankton kann ebenso erfasst werden wie grosse, koloniebildende Cyanobakterien. Zwei Laser tasten die Partikel mit unterschiedlichen Wellenlängen und aus unterschiedlichem Winkel ab, was Informationen

Das Durchflusszytometer Cytobuoy erfasst 54 Parameter der Planktonpartikel.



ZVG

über ihre Grösse und Form ergibt. Zudem emittieren die Fotosynthesepigmente beim Auftreffen des Lasers ein Fluoreszenzsignal, aus dem je nach Wellenlänge auf Chlorophyll-A, Phycocyanin, Phycoerythrin oder auf degradierte Pigmente geschlossen werden kann. Dank insgesamt 54 beschreibenden Grössen pro Partikel kann jedes Planktonpartikel einer funktionalen Gruppe zugeordnet werden. Das entspricht zwar nicht eins zu eins der taxonomischen Vielfalt, wie sie mit aufwändigem Auszählen unter dem Mikroskop ermittelt wird, beschreibt jedoch die Diversität von dynamischen Phytoplanktongesellschaften sehr gut. Von Planktonauswertungen mit dem Mikroskop ist bekannt, dass ihre Qualität extrem abhängig ist von der ausführenden Fachperson. Die Folge sind oft kaum replizierbare Resultate. Eine mehrfache Analyse derselben Probe mit unserem neuen, automatisierten Verfahren ergibt dagegen gut übereinstimmende Werte.



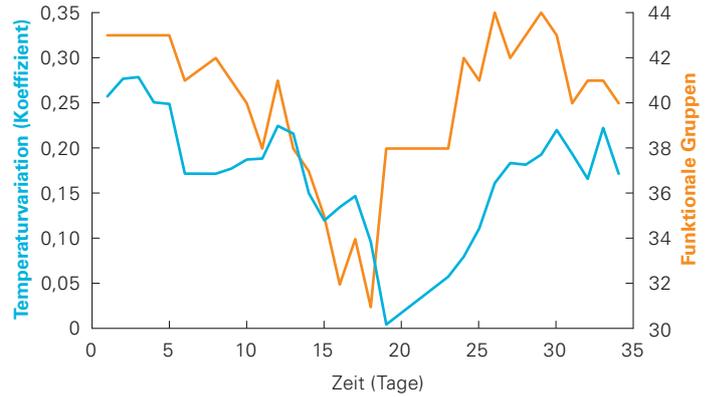
Kantonales Labor Zürich, René Schittl

Massenvermehrung von Blaualgen im Greifensee im August 2011.

### Vermeint Badeverbote?

Im Gegensatz zur EU und anderen Ländern (zum Beispiel Australien) gelten in der Schweiz keine Qualitätsanforderungen für Algentoxine im Badewasser. Im Verlauf des Massenaufkommens der Blaualgenart *Microcystis aeruginosa* im Sommer 2011 im Greifensee haben Fachleute der Eawag die Verantwortlichen im Kanton Zürich (Kantonales Labor, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft) zusammen mit der Universität Zürich unterstützt bei der Beurteilung der Situation. Glücklicherweise hat der für die Blüte verantwortliche Algenstamm keine toxischen Microzystine produziert. Es traten aber Zelldichten von deutlich über 100 000 Zellen pro Milliliter Seewasser auf. Das sind Konzentrationen, die zum Beispiel bei Kindern, Personen mit empfindlicher Haut oder bei Hunden, die Seewasser trinken, auch ohne die Microzystine zu allergischen Reaktionen oder Durchfallerkrankungen führen können. Dank des erfolgreichen Gewässerschutzes haben Algenblüten in Schweizer Seen seit den 1970er-Jahren abgenommen. Ob sie nun, im Zuge der Klimaerwärmung, wieder zunehmen, ist eine der Fragen, welche mit der Messplattform näher untersucht werden können [4]. Problematisch könnte die Situation vor allem dann werden, wenn plötzlich wesentlich toxischere Algen auftreten als bisher in der Schweiz bekannt, etwa die in Osteuropa schon verbreitete Art *Cylindrospermopsis raciborskii* [5] – ein Grund mehr, die Online-Überwachung zu intensivieren.

Abb. 2: Entwicklung der Planktonvielfalt (orange) im Luganersee während der Monitoringzeit (Ende April bis Ende Mai 2010). Die blaue Kurve zeigt den Variationskoeffizienten der Temperatur in der untersuchten Wassersäule (0 bis 12 m Tiefe): Je höher der Wert, umso stärker ist der See thermisch geschichtet. Bei null findet eine vollständige Durchmischung statt.



**Mit Multiparameter-Messsonde gekoppelt**

Ein Drucksensor am Multiparameter-Messgerät Ocean Seven des italienischen Herstellers Idronaut sorgt dafür, dass die Proben für das Durchflusszytometer in definierten Wassertiefen genommen werden. Der Idronaut steuert aber nicht nur den Probenahmeschlauch, sondern erfasst gleichzeitig über weitere Sensoren Temperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert sowie Sauerstoff- und Nitratkonzentration im Wasser. Zusätzlich ist an der Sonde ein TriLux-Fluorimeter angebracht. Damit können die Niveaus von Chlorophyll-A, Phycocyanin und Phycoerythrin quantifiziert werden – so lässt sich überprüfen, ob die Resultate aus dem Durchflusszytometer plausibel sind.

Das Plattformprojekt ist ein gemeinsames Vorhaben der Eawag und des Instituts für integrative Biologie der ETH Zürich. Damit die Planktonzellen beim Hinaufpumpen aus dem See nicht zerstört werden, wurde zusammen mit der Eawag-Werkstatt eine spezielle Lösung ausgetüfelt: Zum einen wird ein antimikrobiotisch beschichteter Schlauch verwendet, zum anderen befindet sich die Pumpe erst hinter einer Plexiglasskammer, von welcher aus das Durchflusszytometer mit den Proben beschickt wird.

Im Sommer 2010 wurde die Plattform ein erstes Mal getestet, auf dem Luganersee in einem wind- und strömungsarmen Bereich zwischen Laveno und Figino. Die Daten zeigen, wie sich die Verteilung des Planktons im Tag-Nacht-Zyklus ändert (Abb. 1) – ein Phänomen, das man bisher im Süßwasser noch nie so exakt hat verfolgen können.

Da sich die physikalischen Daten, zum Beispiel die Wassertemperatur, zwischen Tag und Nacht nicht signifikant veränderten, nehmen wir an, dass die tägliche Planktodynamik eher von biologischen Faktoren abhängig ist als von Veränderungen der Umweltbedingungen. Die aus den hoch aufgelösten Daten ablesbare, immer gleiche zeitliche Abfolge des Wechsels stützt diese These zusätzlich. Es scheint, als habe das Plankton eine innere Uhr. Diesen Biorhythmus des Planktons möchten wir genauer erforschen.

**Rasche Erholung nach Durchmischung**

Während der Luganersee zu Beginn der Messperiode stark geschichtet war, kam es als Folge sinkender Temperaturen und eines Sturms innert rund zwei Wochen zu einer immer stärkeren

**Via Modell zur Prognose**

Welche Umwelteinflüsse steuern die Dynamik der Planktongesellschaften [3]? Die Menge an hoch aufgelösten Planktondaten von der automatischen Messplattform legt es nahe, über Computermodelle Antworten auf diese Fragen zu suchen und so vielleicht auch zu Prognosen zu gelangen.

Wir haben ein Programm entwickelt, das auf einem multiplen linearen Regressionsmodell basiert. Die wesentlichen Eingangsdaten sind Luft- und Wassertemperaturen, Leitfähigkeit sowie ein Koeffizient für die Heterogenität der physikalischen Werte in der untersuchten Wassersäule. Damit kann das Modell die von der Plattform erfassten Planktondaten bereits sehr gut erklären. Beachtenswert ist die zeitliche Verzögerung – meist 24 oder 48 Stunden –, mit welcher die Planktongesellschaft auf Veränderungen dieser Umweltfaktoren reagiert.

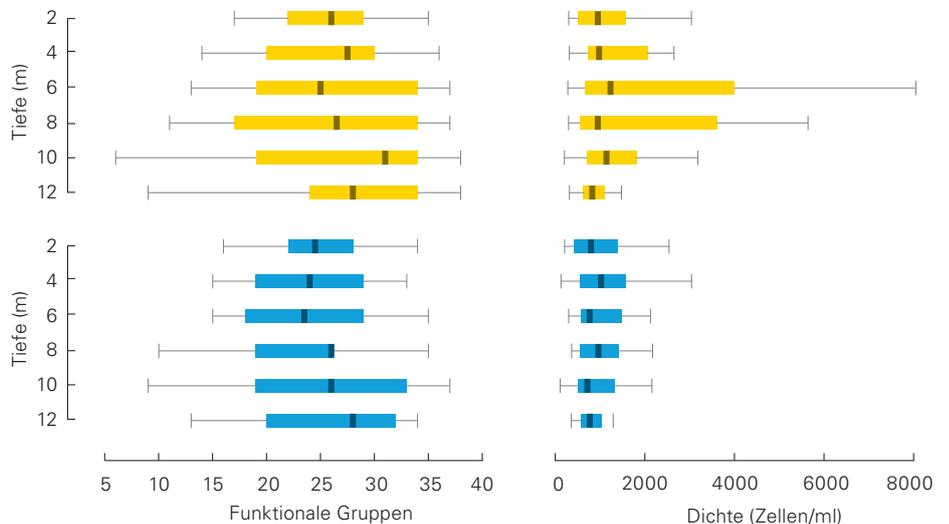


Abb. 1: Sowohl die Vielfalt (Zahl der funktionellen Gruppen) als auch die Verteilung des Planktons ändern sich stark im Rhythmus von Tag (gelb; 15 Uhr) und Nacht (blau; 3 Uhr).

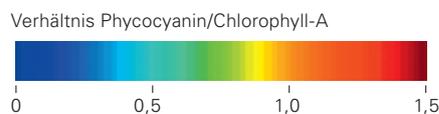
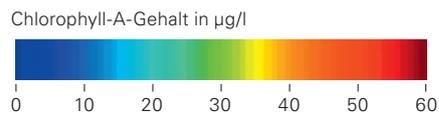
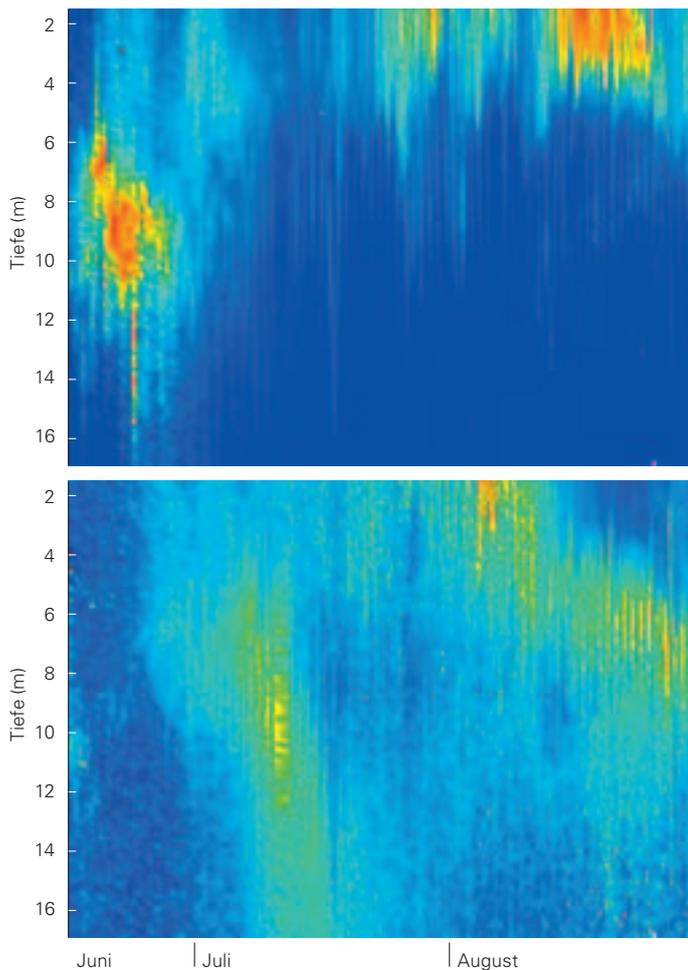


Abb. 3: Algendaten vom Greifensee im Sommer 2011. Die Chlorophyll-A-Gehalte (Grafik oben) zeigen, wie sich schon Ende Juni in 8 bis 10 Metern Tiefe grosse Algenmengen gebildet haben. Die intensivste Blüte an der Seeoberfläche trat jedoch erst Mitte August auf. Aus dem Verhältnis von Phycocyanin (das Pigment, welches die Blaualgen für die Fotosynthese einsetzen) und Chlorophyll-A (untere Grafik) lässt sich ablesen, wie die Blaualgen im Juli noch in der Tiefe blieben. Erst im August wurden sie an der Oberfläche dominant.

Durchmischung. Die Planktondaten der Messplattform spiegeln diese Entwicklung sehr gut: War die Zahl der funktionalen Gruppen anfangs hoch, sank sie bis zum Zeitpunkt der vollständigen Durchmischung (Temperatur-Variationskoeffizient = 0) immer mehr ab. Interessant ist die darauf folgende rasche Erholung der Vielfalt innert weniger Tage (Abb. 2). Welche Mechanismen diese Dynamik prägen, ist noch offen.

### Blaualgenblüte im Greifensee

Seit dem Frühsommer 2011 schwimmt die Messplattform mit Bewilligung des Kantons Zürich auf dem nördlichen Teil des Greifensees. Vom Greifensee haben die Eawag und der Kanton lange Messreihen; das hilft, das System zu verstehen. Nun können die Daten vom Floss noch mehr zu diesem Verständnis beitragen. Mitgeholfen hat ein spezielles Ereignis: Was Badegäste ekelte, hat die Wissenschaft gefreut: Just während unserer ersten Messkampagne trat im Greifensee eine Blaualgenblüte auf (siehe Kasten «Vermehrt Badeverbote?»). Noch ist die Auswertung der immensen Datenmengen nicht abgeschlossen, aber so detailliert hat bestimmt noch nie jemand ein Massenaufkommen von Cyanobakterien dokumentiert. Abb. 3 zeigt, wie die Blaualgen in der Tiefe schon im Juni überhandnahmen und wie sie dann, gegen Ende Juli, auch in Oberflächennähe zu dominieren begannen. Zu dieser Zeit handelte es sich um die Art *Microcystis aeruginosa*. Kühles und windiges Wetter Anfang August verteilte zwar die ganze Planktongesellschaft wieder über grössere Tiefen. Doch der relativ abrupte Stopp des Mischereignisses führte zur erneuten Dominanz der Blaualgen an der Seeoberfläche. Mitte August

kam es dann zur eigentlichen Blüte, wobei die hohen Lichtintensitäten an der Oberfläche dazu geführt haben dürften, dass die Algen kein Phycocyanin mehr produzierten – sie sind daher auf Abb. 3 unten nicht zu erkennen. Die intensive Produktion von Gasblasen, welche den Blaualgen zum Aufstieg aus tieferen Seeschichten verhelfen, dürfte der Hintergrund sein für die im selben Zeitraum beobachtete Schaumbildung auf dem Greifensee. Ein Teil der Population wanderte sukzessive wieder in ihre bevorzugte Tiefe von rund sechs bis acht Metern.

[francesco.pomati@eawag.ch](mailto:francesco.pomati@eawag.ch)

- [1] Vörösmarty C.J., McIntyre P.B., Gessner M.O. et al. (2010): Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* 467 (7315), 555.
- [2] Pomati F., Jokela J., Simona M., Veronesi M., Ibelings B.W. (2011): An automated platform for phytoplankton ecology and aquatic ecosystem monitoring. *Environmental Science and Technology* 45 (22), 9658–9665.
- [3] Pomati F., Matthews B. (2012): Reversal in the relationship between species richness and turnover in a phytoplankton community. *Ecology*, 93 (11), 2435–2447.
- [4] Pomati F., Matthews B., Jokela J., Schildknecht A., Ibelings B.W. (2011): Effects of re-oligotrophication and climate warming on plankton richness and community stability in a deep mesotrophic lake. *Oikos* 121 (8), 1317–1327.
- [5] Pomati F., Neilan B.A., Suzuki T., Manarolla G., Rossetti C. (2003): Enhancement of intracellular saxitoxin accumulation by lidocaine hydrochloride in the cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii* T3 (Nostocales). *Journal of Phycology* 39 (3), 535–542.



Florian Altermatt, Biologe, Gruppenleiter in der Abteilung Aquatische Ökologie, untersucht das räumliche Vorkommen und die Interaktion von Arten.

## Die Vernetzung bestimmt die Artenvielfalt

Fliessgewässer beherbergen eine hohe biologische Diversität. Meist kommen in Unterläufen mehr Arten vor als in Oberläufen, wobei in Letzteren die Artgemeinschaften unterschiedlicher sind. Ein Experiment zeigt, dass solche Diversitätsmuster durch flusstypische Netzwerkstrukturen entstehen können. Die Vernetzung von Flusslebensräumen spielt also für den Erhalt der Artenvielfalt eine wichtige Rolle.



Digital Vision, Ltd.

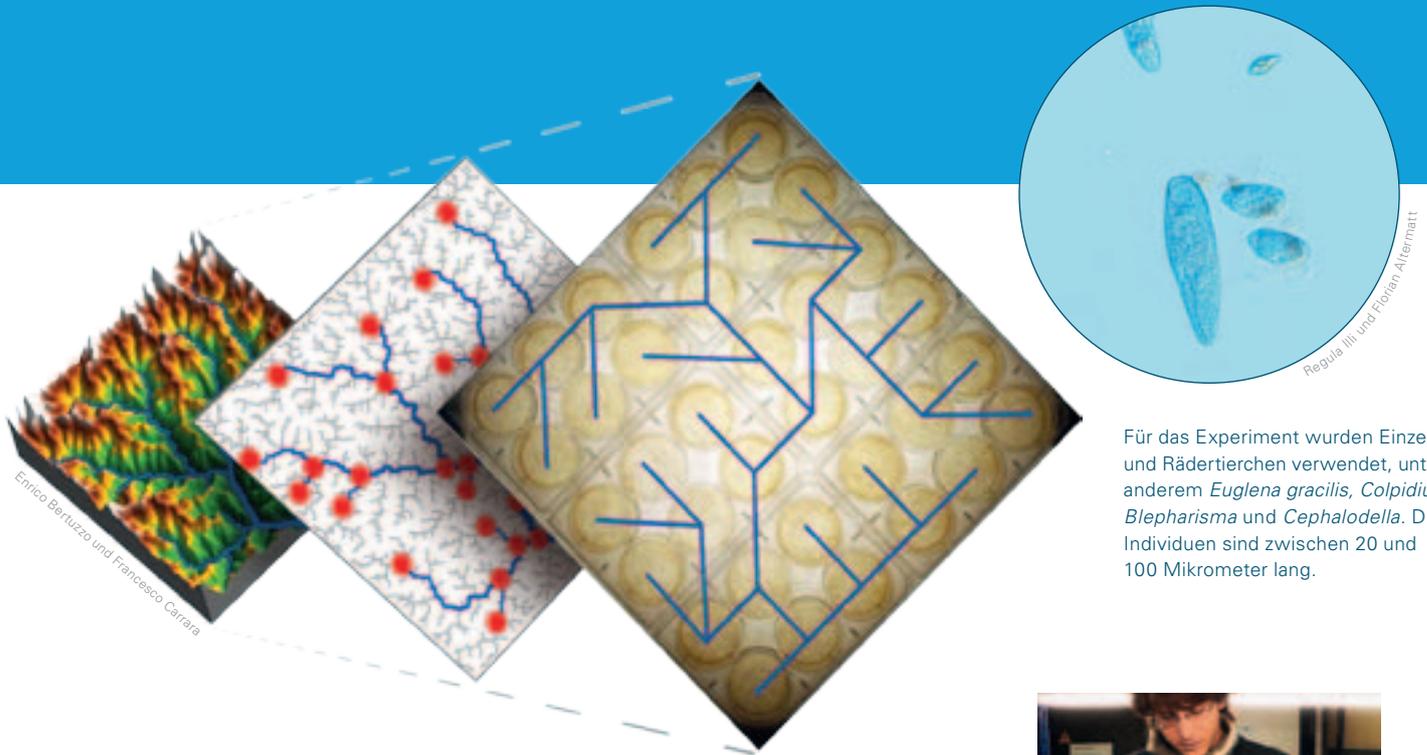


Abb. 1: Vom Landschaftsmodell zum Laborsystem. Ausgehend von einem Landschaftsmodell extrahierten wir die Struktur des Flussnetzwerks und projizierten eine vereinfachte Version auf unser Mikrokosmensystem. Die Ausbreitung der Organismen zwischen den einzelnen Lokalitäten erfolgte entlang des schematisierten Flussnetzwerks.

Von welchen Faktoren hängt es ab, welche und wie viele Arten in einem bestimmten Gebiet vorkommen? Erklärungen für die in der Natur beobachteten Artgemeinschaften sind nicht nur von wissenschaftlichem Interesse, sondern auch essenziell für den Schutz und das Management von Lebensräumen. Es gibt eine Reihe grossräumig auftretender Diversitätsmuster und entsprechende Vorstellungen, welchen Regeln die Zusammensetzungen von Artgemeinschaften unterliegen. Beispielsweise finden sich auf grossen Inseln mehr Arten als auf kleinen. Die amerikanischen Biologen Robert MacArthur und Edward Wilson erklärten dieses Grundprinzip der Biogeografie im Jahr 1967 folgendermassen: Die Kolonisation einer Insel durch neue Arten und das Aussterben bereits ansässiger Arten stehen in einem dynamischen Gleichgewicht. Die Aussterberate sinkt dabei mit zunehmender Grösse der Insel, während die Kolonisierungsrate mit zunehmender Grösse der Insel und Nähe zum Festland steigt. Deshalb beherbergen grössere und weniger isolierte Inseln mehr Arten als kleinere und isoliertere [1]. Aus dem theoretischen Konzept ergeben sich praktische Anwendungen, etwa wenn es darum geht, über die Grösse von Schutzgebieten zu entscheiden.

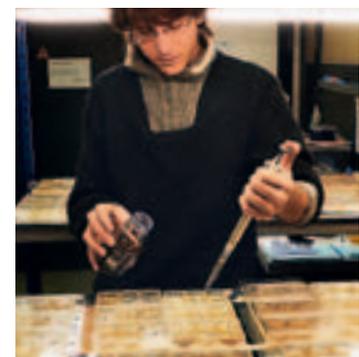
### Ausbreitung entlang der Wasserwege

Flüsse und Bäche gehören zu den artenreichsten Lebensräumen weltweit [2]. Veränderungen der Lebensräume, deren Fragmentierung, das Einwandern invasiver Arten oder Gewässerverschmutzung bedrohen diese Diversität vielfach. Für einen wirksamen Schutz ist deshalb ein besseres Verständnis der Ursachen der Vielfalt dringend nötig. Dabei sucht man auch in Fließgewässern nach allgemeinen Prinzipien, um die Artenvielfalt zu erklären. Fließgewässer weisen oft charakteristische Diversitätsmuster auf [3–5]. So beherbergen Flussoberläufe meist eine geringere

lokale Artenvielfalt ( $\alpha$ -Diversität) als die Unterläufe; dagegen unterscheiden sich die Artgemeinschaften zwischen den einzelnen Oberläufen stärker voneinander (hohe  $\beta$ -Diversität). In der Vergangenheit erklärte man das Vorkommen von Arten und diese Diversitätsmuster vor allem mit lokalen Umweltbedingungen. Zum Beispiel können diverse Arten nur in spezifischen pH- oder Temperaturbereichen leben. Dieser Ansatz vernachlässigt jedoch, dass sich Organismen ausbreiten, und man geht davon aus, dass jeder geeignete Lebensraum besetzt ist.

Die räumliche und zeitliche Verbreitung von Arten ist jedoch kein statischer Zustand, sondern läuft äusserst dynamisch ab: Organismen können neue Gebiete besiedeln, während sie andernorts verschwinden. Wie Schiffe ihre Güter benutzen viele Fische, Wirbellose oder Pflanzen der Auenvegetation die Wasserwege, um ihre Ausbreitungsstadien zu transportieren. So lassen Pflanzen ihre Samen ins Wasser fallen und können flussabwärts liegende Lebensräume besiedeln. Dabei bestimmt die Struktur des Flussnetzwerks, wohin sie gelangen. Schon Leonardo da Vinci beschrieb die typisch verzweigte Grundstruktur von Flusssystemen: ein hierarchisch gegliedertes, verästeltes Netzwerk, entstanden

Für das Experiment wurden Einzeller und Rädertierchen verwendet, unter anderem *Euglena gracilis*, *Colpidium*, *Blepharisma* und *Cephalodella*. Die Individuen sind zwischen 20 und 100 Mikrometer lang.



Zu Beginn befanden sich in allen Zellkulturplatten gleich viele Arten. Mit der Pipette verbreitet Doktorand Francesco Carrara die Organismen entlang der Netzwerkstruktur. Im Verlauf des Experiments fand eine Differenzierung der lokalen Artgemeinschaften statt.

durch hydrologische Prozesse. In der Ökologie wurden solche Netzwerke jedoch lange vernachlässigt und Fließgewässer als einfache lineare Systeme verstanden [6]. Erst seit kurzem bezieht man die Struktur von Flussnetzwerken mit ein, um das Vorkommen von Arten zu verstehen [4].

Aktuelle Modellrechnungen sagen voraus, dass die charakteristischen Diversitätsmuster in Fließgewässern entstehen, weil sich Lebewesen nur eingeschränkt in einem Flussnetzwerk ausbreiten können [3, 5]. Die Modelle berücksichtigen, dass sich die Organismen vor allem entlang der Flusslinien bewegen, die zurückgelegten Distanzen relativ kurz sind und in einzelnen Flussabschnitten Arten aufgrund verschiedener Prozesse lokal aussterben können. Eine Wiederbesiedelung der Habitate hängt davon ab, wo diese im Netzwerk liegen und wie nahe davon sich Populationen befinden, von denen Individuen einwandern können.

Diese Modelle prognostizieren also, dass nicht unbedingt oder nicht nur die lokalen Umweltbedingungen bestimmen, wo gewisse Arten vorkommen und wo nicht, sondern auch die räumliche Vernetzung der Habitate eine Rolle spielt. Anders gesagt: Die spezifischen Muster, die der Vernetzung von Flusslebensräumen zugrunde liegen, bringen charakteristische Diversitätsmuster hervor. Die mathematischen Modelle geben die in der Natur beobachteten Diversitätsmuster gut wieder, bislang fehlte dafür jedoch eine experimentelle Bestätigung.

**Flussnetzwerk im Labor**

In einer kürzlich veröffentlichten Untersuchung konnten wir mithilfe von Laborexperimenten erstmals nachweisen, dass die Ausbreitung von Organismen entlang von flussähnlichen Netzwerken

zu charakteristischen Diversitätsmustern führt [7]. Eine Kooperation der Eawag mit Andrea Rinaldo und seinen Mitarbeitenden vom Labor für Ökohydrologie der ETH Lausanne ermöglichte, empirische und theoretische Ansätze zusammenzubringen.

Für das Experiment bauten wir im Labor ein – stark vereinfachtes – verästelttes Flussnetzwerk nach. Von einem realistischen Landschaftsmodell extrahierten wir die räumliche Struktur eines Flussnetzwerks und übertrugen eine vereinfachte Version davon auf unser Laborsystem aus Zellkulturplatten (Abb. 1). Jede lokale Gemeinschaft beinhaltete anfänglich neun Arten von Einzellern und Rädertierchen in einem Nährmedium. Die Ausbreitung der Mikroorganismen in diesem miniaturisierten Flussnetzwerk simulierten wir, indem wir mit einer Pipette kleine Mengen des Nährmediums zwischen den einzelnen Gemeinschaften austauschten. Der Austausch erfolgte dabei zwischen direkt benachbarten Standorten entlang der abstrahierten Flussverläufe und zum Vergleich entlang eines homogenen Gitternetzes (Abb. 2). Am Schluss des Experiments erfassten wir die Artenvielfalt jeder Lokalität.

Mit dem vereinfachten Laborsystem konnten wir Umweltfaktoren ausschalten oder vereinheitlichen. Beispielsweise waren die Ausbreitungsraten und die Habitatbedingungen in beiden Versuchsanordnungen identisch. Die Systeme unterschieden sich nur in ihrer räumlichen Vernetzung, also in den Migrationsmöglichkeiten der Organismen. Damit konnten wir den kausalen Zusammenhang zwischen der räumlichen Beschaffenheit eines flussähnlichen Netzwerks und der Artenvielfalt untersuchen. Da das Experiment über Dutzende von Organismengenerationen lief, liessen sich zudem Langzeiteffekte zwischenartlicher Interaktionen und Populationsdynamiken auf die Diversitätsmuster berücksichtigen.

Abb. 2: Die lokale Artenvielfalt hängt von der Vernetzung ab. In flussähnlichen Netzwerken (a) weisen die «Zusammenflüsse» im Mittel höhere Artenzahlen auf als die «Oberläufe». In homogenen Gitternetzen (b) ist die Verteilung sehr gleichförmig.

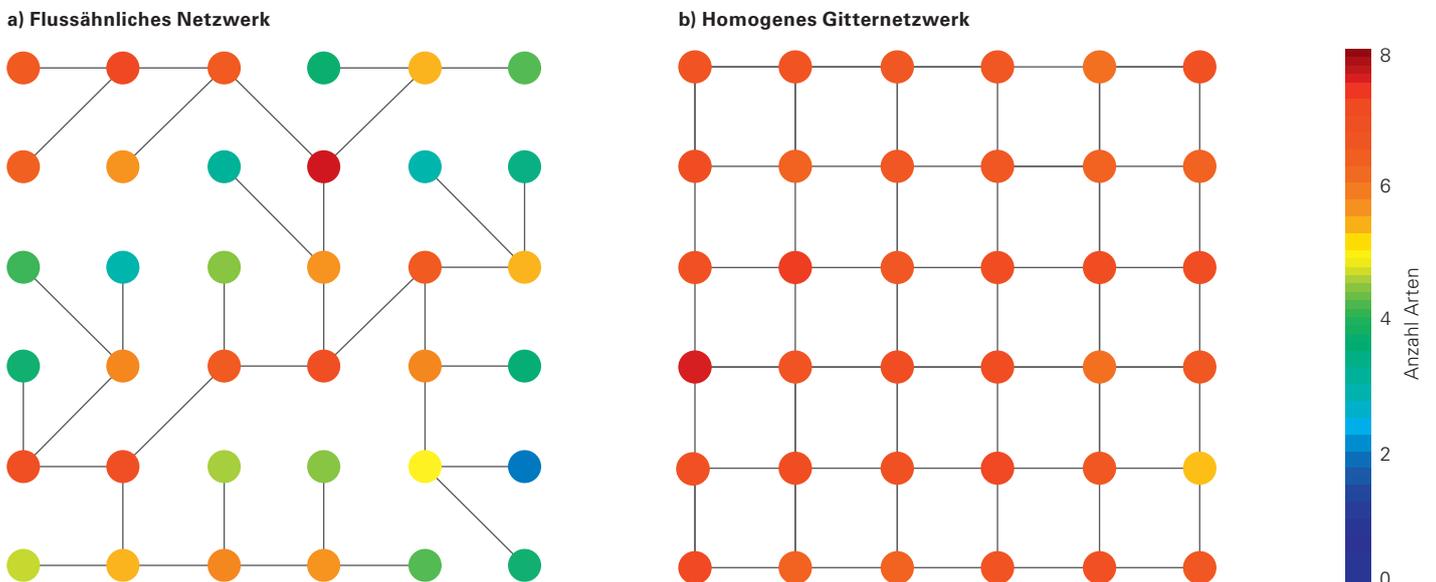
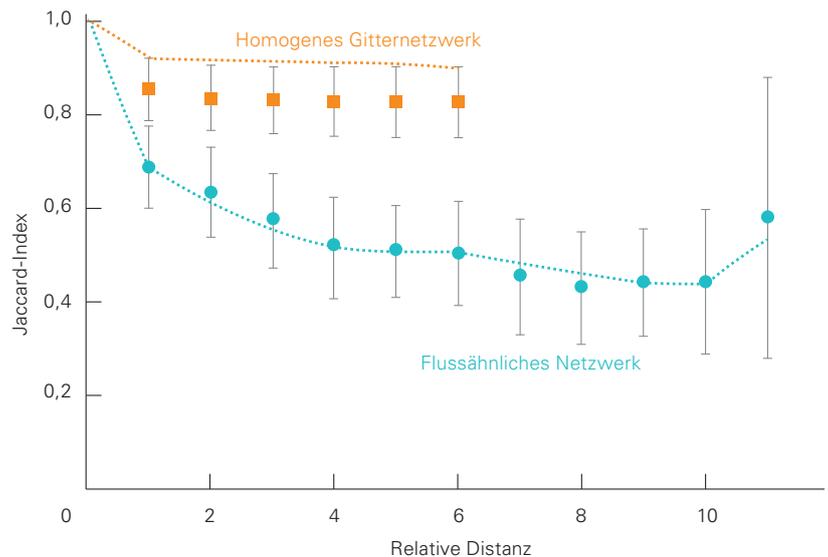


Abb. 3: Paarweise Ähnlichkeit von Artgemeinschaften abhängig von ihrer Distanz innerhalb des Netzwerks. Die Ähnlichkeit wird mit dem so genannten Jaccard-Index angegeben. Ein Wert von 1 bedeutet, dass zwei Habitate aus den gleichen Arten zusammengesetzt sind, ein Wert von 0, dass sie keine gemeinsamen Arten haben. Die Punkte geben die experimentell beobachteten Werte (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung) an, die gestrichelten Linien die vom Modell vorhergesagten Werte.



### Flussstruktur beeinflusst die Diversität

Im flussähnlichen Netzwerk wiesen die «Zusammenflüsse» am Ende des Experiments nach rund einem Monat höhere Artenzahlen auf als die stärker isolierten «Oberläufe». Zudem unterschied sich die Anzahl Arten zwischen den einzelnen Oberläufen deutlich. In der homogenen Gitternetzwerkstruktur ergab sich dagegen ein eintöniges Muster (Abb. 2). In beiden Versuchsanordnungen nahm die Ähnlichkeit der Artenzusammensetzung mit zunehmender Distanz zwischen den Habitaten ab. Vor allem in den flussähnlichen Netzwerken unterschieden sich die lokalen Artgemeinschaften umso stärker, je weiter sie voneinander entfernt waren. (Abb. 3). Ein parallel zu den Versuchen entwickeltes mathematisches Modell bestätigte die experimentell beobachteten Muster und erlaubte uns eine Verallgemeinerung.

Die Resultate machen deutlich, dass die Vernetzung und Durchgängigkeit von Gewässern einen direkten Einfluss auf die Artenvielfalt und -verteilung haben. Die Struktur von Flusssystemen beeinflusst zwei der wichtigsten Biodiversitätsindikatoren: die lokale Artenvielfalt innerhalb einzelner Habitats ( $\alpha$ -Diversität) und jene zwischen den Habitats ( $\beta$ -Diversität). Letztere ist für den Erhalt einer hohen regionalen Diversität essenziell.

### Was bedeutet das für reale Systeme?

Unser Ansatz beruht auf einer starken Vereinfachung natürlicher Systeme und wir können nicht direkt Aussagen zu einem bestimmten realen Fluss oder zu bestimmten Arten machen. Die Vereinfachung und Replizierung von Schlüsselfaktoren erlauben jedoch, den prinzipiellen Einfluss der Flussnetzwerkstruktur auf die Artenvielfalt zu testen. Daraus ergeben sich allgemeinere Erkenntnisse. Unsere Untersuchungen implizieren, dass sich Veränderungen der Netzwerkstruktur realer Gewässersysteme direkt auf die Ausbreitung von Arten und die Artenvielfalt auswirken können. Zum Beispiel führt der Bau von Staudämmen zu stärker fragmentierten Lebensräumen, während die Verbindung von Flussläufen mit Kanälen die Vernetzung verstärkt. Die Folgen davon sind auch im Naturschutz zu beachten. So gilt es etwa, beim Schutz oder bei der Renaturierung eines Gewässerabschnitts nicht nur die lokalen Umweltfaktoren zu berücksichtigen. Ebenso entscheidend ist die Position des Gewässerabschnitts innerhalb

des Flussnetzwerks. Isolierte Habitats in Oberläufen sind von Arten schwieriger zu besiedeln als zentral gelegene. Auf der anderen Seite kann die Vernetzung von natürlicherweise isolierten Lebensräumen die Ausbreitung invasiver Arten begünstigen.

Unsere Experimente bestätigen auch, dass die Struktur von Flussnetzwerken als wichtiger Faktor in mathematische Modelle für Diversitätsvorhersagen einbezogen werden sollte. Dies wiederum erlaubt eine bessere Abstimmung weiterer Modellvorhersagen. Parameterwerte zur Vernetzung können in Modellen variiert werden, um realistische Zukunftsszenarien zu vergleichen. Im Rahmen unseres Forschungsprojekts wenden wir unsere Erkenntnisse an, um die Verbreitung und Vielfalt von Gewässerinsekten im schweizerischen Flusssystem zu studieren. Dabei interessiert uns, wie sich die Diversität von Eintags-, Stein- und Köcherfliegen nicht nur durch lokale Umweltbedingungen, sondern auch durch die Position innerhalb des Flussnetzwerks erklären lässt.

[florian.altermatt@eawag.ch](mailto:florian.altermatt@eawag.ch)

- [1] MacArthur R.H. and Wilson E.O. (1967): The theory of island biogeography. Princeton, Princeton University Press.
- [2] Vorosmarty C.J., McIntyre P.B., Gessner M.O., Dudgeon D., Prusevich A., Green P., Glidden S., Bunn S.E., Sullivan C.A., Liermann C.R., Davies P.M. (2010): Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* 467, 555–561.
- [3] Munepeera R., Bertuzzo E., Lynch H.J., Fagan W.F., Rinaldo A., Rodriguez-Iturbe I. (2008): Neutral metacommunity models predict fish diversity patterns in Mississippi-Missouri basin. *Nature* 453, 220–222.
- [4] Grant E.H.C., Lowe W.H., Fagan W.F. (2007): Living in the branches: Population dynamics and ecological processes in dendritic networks. *Ecology Letters* 10, 165–175.
- [5] Finn D.S., Bonada N., Múrria C., Hughes J.M. (2011): Small but mighty: Headwaters are vital to stream network biodiversity at two levels of organization. *Journal of the North American Benthological Society* 30, 963–980.
- [6] Vannote R.R., Minshall G.W., Cummins K.W., Sedell J.R., C.E.C. (1980): The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37, 130–137.
- [7] Carrara F., Altermatt F., Rodriguez-Iturbe I., Rinaldo A. (2012): Dendritic connectivity controls biodiversity patterns in experimental metacommunities. *Proceedings of the National Academy of Science* 109, 5761–5766.

# Überdüngung in China – ein europäisches Déjà-vu

Eine rasante wirtschaftliche Entwicklung und ein starkes Bevölkerungswachstum führen im Haihe-Flusssystem bei Peking zu einer massiven Überdüngung der Gewässer. Der Nährstoffeintrag erfolgt hauptsächlich über das Abwasser. Zwar existieren mancherorts Kläranlagen, doch viele arbeiten bereits heute über ihren Kapazitätsgrenzen oder eliminieren die Nährstoffe mangelhaft.



Michael Berg, Umweltchemiker, untersucht das Verhalten von Schadstoffen in Oberflächengewässern und im Grundwasser. Koautor: Beat Müller



Algenblüte auf dem stark eutrophierten Shahe-Reservoir oberhalb von Peking.

Der Nordosten Chinas gehört zu den Gegenden der Volksrepublik, die sich am stärksten und schnellsten entwickeln. So verzeichnet der zwischen den Millionenstädten Peking und Tianjin gelegene Siedlungsraum landesweit das höchste Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum. Gleichzeitig leidet die Region mit ihrem semiariden Klima unter Trockenheit und die wachsende Bevölkerung zunehmend unter Wasserknappheit. Seit den 1970er-Jahren haben die Niederschläge deutlich abgenommen. 2007 standen jeder Einwohnerin und jedem Einwohner Pekings nur 230 Kubikmeter Trinkwasser pro Jahr zur Verfügung. Das sind weniger als

acht Prozent der Menge, die Personen in der Schweiz im Durchschnitt jährlich verbrauchen können.

## Abwasser als Hauptursache für die Eutrophierung

Trotz des trockenen Klimas stammen rund 30 Prozent des in China angebauten Weizens und 20 Prozent des Mais von den landwirtschaftlichen Flächen zwischen Peking und Tianjin. Das ist nur dank intensiver Bewässerung mit Wasser aus dem Haihe-Flusssystem möglich, das sich auf einer Länge von über 250 Kilometern von oberhalb Pekings bis zum Golf von Bohai erstreckt

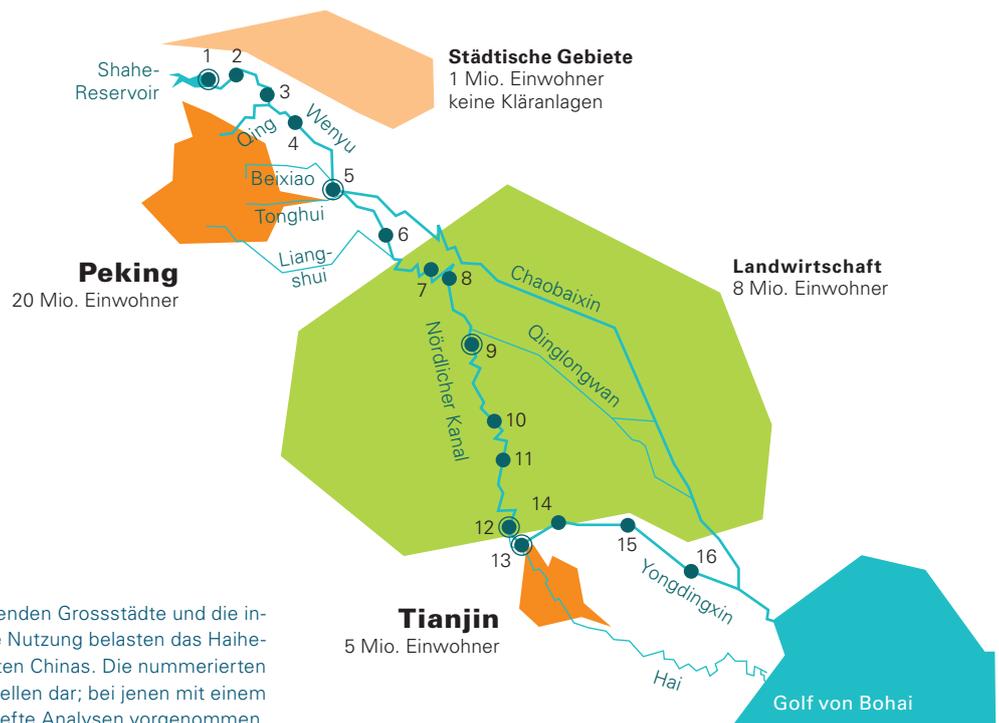


Abb. 1: Die rasant wachsenden Grosstädte und die intensive landwirtschaftliche Nutzung belasten das Haihe-Flusssystem im Nordosten Chinas. Die nummerierten Punkte stellen die Messstellen dar; bei jenen mit einem Kreis wurden vertiefte Analysen vorgenommen.

(Abb. 1). Der zunehmende Wasserbedarf von Landwirtschaft und Industrie hat zusammen mit den ausbleibenden Niederschlägen, dem Bevölkerungswachstum und dem steigenden Pro-Kopf-Konsum dazu geführt, dass viele Flüsse Nordchinas mittlerweile ausgetrocknet sind.

Daneben haben im Haihe-Flusssystem die Nährstoffkonzentrationen (Stickstoff und Phosphor) während der vergangenen 40 Jahre massiv zugenommen und zur Überdüngung (Eutrophierung) der Gewässer geführt. Das hängt teilweise mit dem gestiegenen Einsatz von synthetischem Dünger zusammen, ist aber vor allem eine Folge davon, dass ein Grossteil der Siedlungsabwässer unbehandelt in das bereits stark vom Menschen veränderte Flusssystem gelangt. Die Gewässer sind deshalb heute schwerwiegend geschädigt, Sauerstoffmangel und Algenblüten gehören zur Tagesordnung. Die Verschmutzungen gelangen zudem in die Böden, ins Grundwasser und ins Meer. Mit gravierenden Folgen: Die unnatürlichen Nährstoffverhältnisse führen zu Veränderungen in der Artenzusammensetzung mariner Algengesellschaften. Häufiger auftretende Algenblüten, bei denen sich bestimmte Arten massenhaft vermehren und dabei toxische Substanzen absondern (so genannte Red Tides), stellen eine zunehmende Gefahr dar. Die als Todeszonen bezeichneten sauerstoffarmen Bereiche entlang der chinesischen Küste, in denen praktisch kein Leben mehr gedeiht, gehören zu den weltweit grössten.

Zu einem gewissen Grad erlebte Europa während seines wirtschaftlichen Aufschwungs ab den 1950er-Jahren ähnlich katastrophale Zustände. In der Schweiz konnten die Probleme nicht zuletzt dank den Erkenntnissen der Wasserforschung mit entsprechenden Massnahmen – zum Beispiel dem Bau von Kläranlagen oder einem Phosphatverbot bei Waschmitteln – bis zu den 1990er-Jahren weitgehend entschärft werden [1]. Rigorose

Massnahmen sind heute dringend auch in China und anderen aufstrebenden Regionen rund um den Globus nötig.

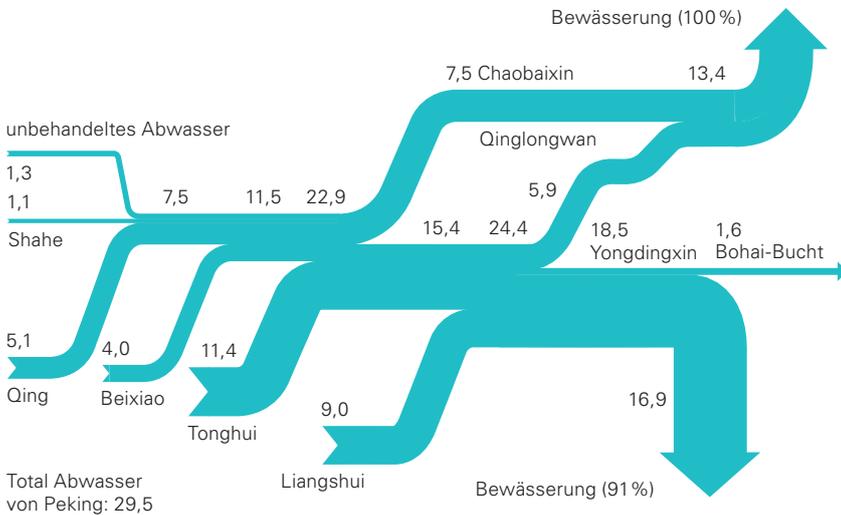
In Nordchina hat man die Dringlichkeit von Sanierungen inzwischen erkannt und das Thema auf die politische Agenda gesetzt. Die benötigten Geldmittel sind vorhanden und im Vergleich zu anderen Ländern leicht und schnell verfügbar, was die Umsetzung effizienter Massnahmen begünstigt und nicht zuletzt auch eine wirksame Zusammenarbeit mit westlichen Fachleuten sowie den Wissenstransfer erleichtert.

### Hoher Wasserverbrauch trotz Knappheit

Im Vorfeld der Olympischen Spiele in Peking 2008 hat die Stadt gleich neun Kläranlagen in Betrieb genommen, mit dem Ziel, zukünftig 90 Prozent ihres Abwassers gereinigt in das Haihe-Flusssystem zu leiten. Die Wirksamkeit dieser Massnahmen wurde bis anhin allerdings noch nicht untersucht. In einer Forschungszusammenarbeit mit dem Research Center for Eco-Environmental Sciences in Peking, einem Institut der Chinesischen Akademie der Wissenschaften, erhoben wir deshalb erstmals eine Gesamtbilanz der Nährstoffflüsse für das Haihe-Flusssystem [2]. Wir erfassten dazu die räumlichen und zeitlichen Muster der Stickstoff- und Phosphorfrachten im Gebiet vom Shahe-Reservoir oberhalb Pekings bis zur Bohai-Bucht unterhalb von Tianjin. Die Untersuchungen sollten eine wissenschaftlich fundierte Basis liefern, die es den Behörden der Region ermöglicht, sinnvolle und wirksame Massnahmen zur Verminderung der Nährstoffproblematik zu entwickeln. Eine zweite Arbeit mit Eawag-Beteiligung befasste sich mit der Belastung mit organischen Mikroverunreinigungen (siehe Artikel auf Seite 6) [3].

Um uns einen ersten Überblick über das Vorkommen und die Häufigkeit der Nährstoffe zu verschaffen, untersuchten wir 2009

a) Wasserabfluss (m³/s)



b) Stickstoff (t/Tag)

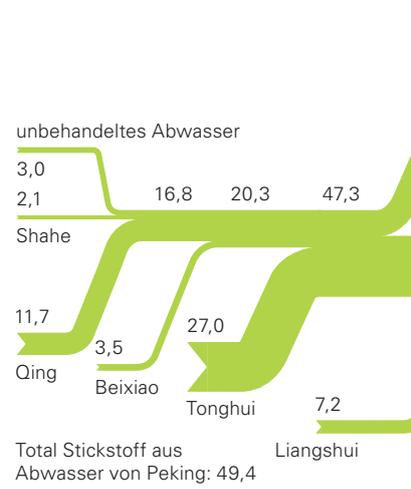


Abb. 2: Abflussmengen und Nährstofffrachten im Haihe-Flusssystem.

während der Trockenzeit (April) und der Regenzeit (Juli) entlang einer Strecke von 240 Kilometern an 16 Flussabschnitten Wasserproben. Anhand dieser ersten Analysen wählten wir für genauere Untersuchungen fünf permanente Messstellen aus, an denen wir während eines Jahres monatlich Proben nahmen (Abb. 1). Dabei erhoben wir auch tägliche und wöchentliche Schwankungen. Zudem untersuchten wir die vier Nebenflüsse Qing, Beixiao, Tonghui und Liangshui, über die Pekings Abwasser ins Flusssystem eingeleitet wird, sowie das Abwasser der fünf grössten Kläranlagen, um die Nährstofffracht pro Bewohner zu ermitteln.

Die Erhebung der Abflussmengen an den verschiedenen Messstellen gestaltete sich zunächst schwierig, denn die von den örtlichen Behörden erhobenen Daten waren für die Allgemeinheit nicht freigegeben. Erst hartnäckige Verhandlungen unserer lokalen Partner führten schliesslich zum Ziel. Aus dem 1,8 Quadratkilometer grossen, in einem öffentlichen Naherholungspark liegenden Shahe-Reservoir fliesst demnach nur ein Rinnsal von weniger als 1 Kubikmeter pro Sekunde in das Haihe-Flusssystem. Unterhalb von Peking stammen 90 Prozent des Flusswassers von den vier Nebenflüssen Qing, Beixiao, Tonghui und Liangshui. Damit speist Peking im jährlichen Mittel pro Sekunde 29,5 Kubikmeter geklärtes und ungeklärtes Abwasser ins Flusssystem (Abb. 2a). Das entspricht dem Abwasser von rund 14 Millionen Einwohnern oder 70 Prozent der gesamten Bevölkerung Pekings. Der durchschnittliche Wasserverbrauch liegt dabei bei 200 Litern pro Person und Tag, womit die Stadt trotz Wassermangel einen höheren Konsum als die Schweiz mit 170 Litern aufweist.

**Extrem hohe Nährstoffkonzentrationen**

Über Einträge aus Peking und seinem Umland gelangen durchschnittlich 54,5 Tonnen Stickstoff und 4,5 Tonnen Phosphor pro Tag in das Haihe-Flusssystem (Abb. 2b und c). Über 90 Prozent

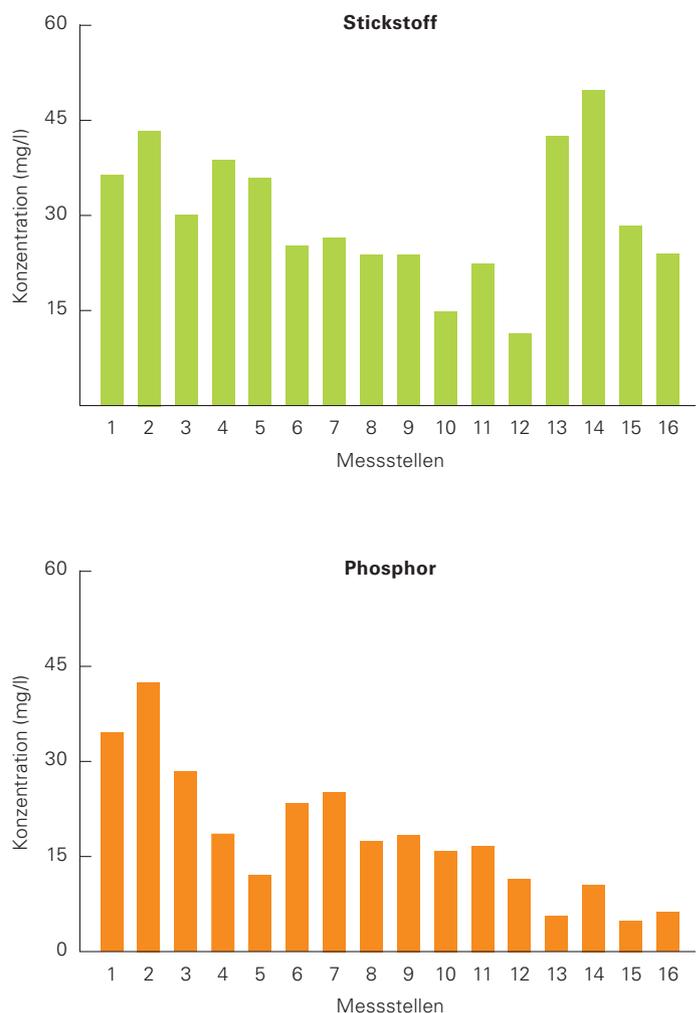
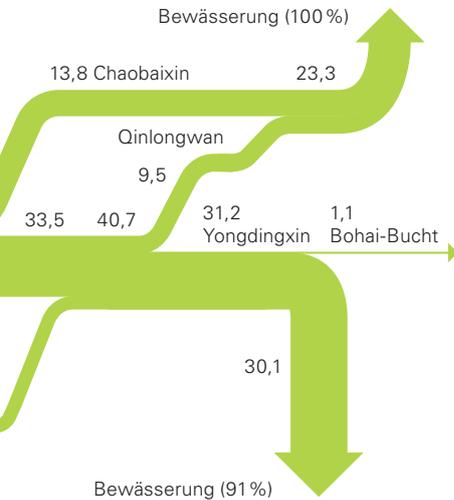
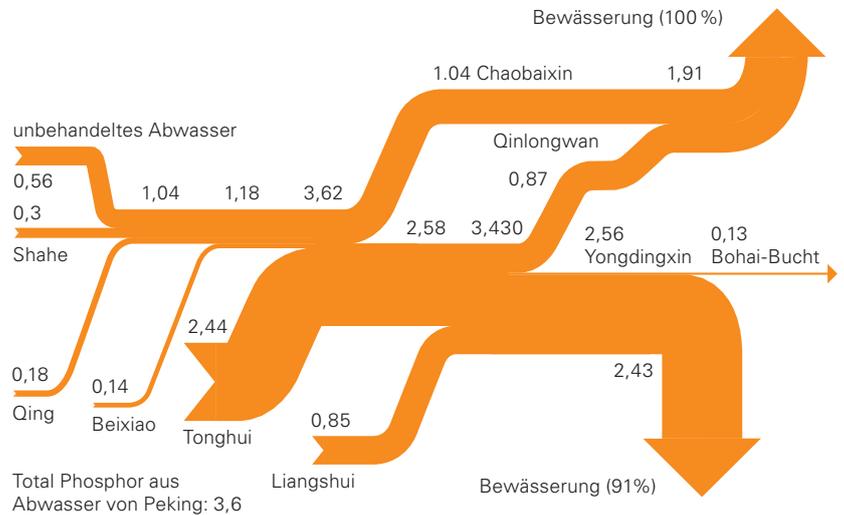


Abb. 3: Die Nährstoffkonzentrationen nehmen flussabwärts tendenziell ab.



c) Phosphor (t/Tag)



der Nährstoffe stammen aus dem Pekinger Abwasser, wobei der Tonghui über die Hälfte der Fracht einspeist.

Die im Shahe-Reservoir gemessenen Konzentrationen von Stickstoff (in Form von Ammonium) erreichen bis zu 33 Milligramm pro Liter, die Konzentrationen des gelösten anorganischen Phosphors bis zu 3,2 Milligramm pro Liter. Das ist mehr als das Zehn- beziehungsweise Sechsfache der Höchstwerte, die in der Schweiz zur Zeit der stärksten Gewässereutrophierung während der 1970er- und 1980er-Jahre gemessen wurden. Die Nährstoffe stammen zum grössten Teil aus unbehandeltem Abwasser und Schlamm aus Siedlungen und Tierzuchtbetrieben (vor allem aus der Geflügelhaltung) und setzen sich im seichten See ab. Aus den an organischem Kohlenstoff reichen Sedimenten gelangen kontinuierlich Nähr- und Spurenstoffe ins Wasser. Zudem speisen unterhalb des Sees zahlreiche kleine Abwasserleitungen unbehandeltes Abwasser in den Wenyu ein.

Damit ist der obere Bereich des Haihe-Flusssystemes besonders stark belastet, obwohl nur zirka drei Prozent der gesamten Nährstofffracht aus dieser Region stammen. Flussabwärts nehmen die Nährstoffbelastungen mehr oder weniger kontinuierlich ab (Abb. 3). Normalerweise würde man erwarten, dass die Nährstoffbelastung in der Umgebung von Städten (etwa bei Peking) und landwirtschaftlich stark genutzten Flächen (beispielsweise im Gebiet zwischen Peking und Tianjin) jeweils ansteigt. Aber die Verschmutzung aus dem Shahe-Reservoir ist so massiv, dass selbst der Eintrag des Pekinger Abwassers tendenziell eine Verdünnung zur Folge hat.

#### Kläranlagen eliminieren Stickstoff mangelhaft

Insgesamt bestätigen unsere Analysen, dass die Nährstoffe hauptsächlich über das Abwasser ins Haihe-Flusssystem gelan-

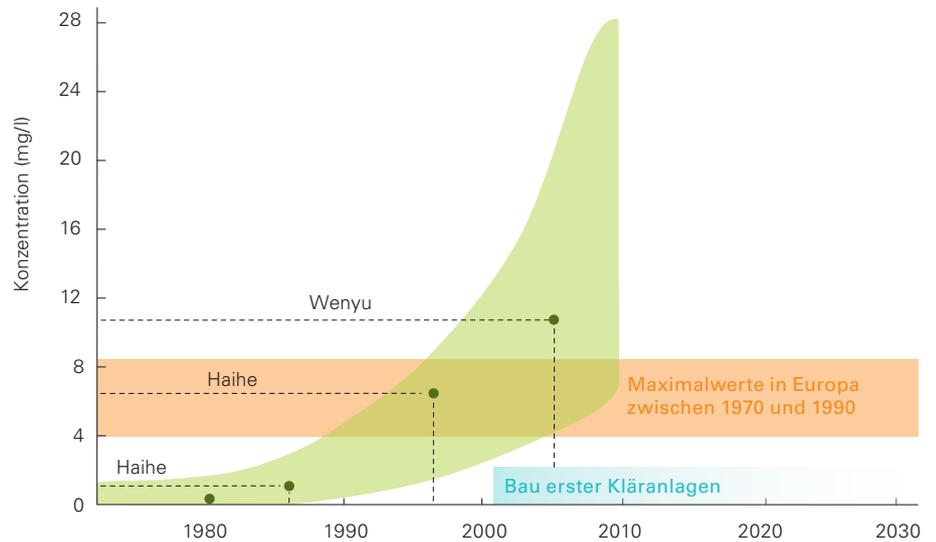
gen. Einträge aus Industrie, Landwirtschaft oder Atmosphäre sind daneben vernachlässigbar. Gemäss unseren Hochrechnungen landen in den Abwassereinigungsanlagen Pekings pro Jahr und Einwohner 1420 Gramm Stickstoff. Das entspricht annähernd den Erfahrungswerten für Kläranlagen auf der ganzen Welt, die in einem Bereich zwischen 1650 und 1850 Gramm liegen. Beim geklärten Abwasser liegt Peking mit mehr als 1200 Gramm pro Einwohner dagegen wesentlich über den internationalen Richtwerten (110 bis 800 Gramm). Die schlechte Reinigungsleistung deutet darauf hin, dass die Nitrifikations- und Denitrifikationsprozesse in den Kläranlagen nicht optimal funktionieren.

Im Gegensatz dazu wird Phosphor relativ effizient entfernt. Die Mengen im gereinigten Abwasser entsprechen den weltweit typischen Werten von 91 bis 211 Gramm pro Einwohner und Jahr. Die teilweise trotzdem sehr hohen Konzentrationen in den Fließgewässern sind daher eher auf einen Wassermangel als auf eine unzureichende Abwasserreinigung zurückzuführen.

Trotz des Baus von neun Kläranlagen und von über 4000 Kilometer Abwasserleitungen im Raum Peking konnte der starke Nährstoffanstieg der letzten Jahrzehnte im Haihe-Flusssystem nicht gebremst werden (Abb. 4). Zwar ist in Peking eine wachsende Anzahl Haushalte an Kläranlagen angeschlossen, doch ging man bei deren Planung Anfang 2000 von einem geringeren Bevölkerungswachstum aus, sodass sie für weniger Einwohner ausgelegt wurden. Deshalb arbeiten die Anlagen heute oft über ihrer Kapazität.

Der wirksamste Weg, die drastische Eutrophierung in der Region in den Griff zu bekommen, scheint uns der Bau zusätzlicher moderner und genügend grosser Abwassereinigungsanlagen, die auch den Stickstoff effektiv entfernen. Damit konnten die

Abb. 4: Die Stickstoffbelastung wächst auch nach dem Bau von Kläranlagen ungebremst weiter und übersteigt die höchsten je in Europa auftretenden Werte um ein Vielfaches.



Schweiz und Europa in den 1980er-Jahren die Stickstoffzunahme zumindest stoppen. In vielen Gewässern liegen die Konzentrationen trotz allem aber noch weit über den ursprünglichen Werten, denn die unzähligen diffusen Emissionsquellen sind schwer zu lokalisieren und kontrollieren.

Die chinesische Landwirtschaft könnte ebenfalls zur Schonung der Wasser- und Energieressourcen beitragen, indem sie mineralischen Stickstoffdünger zurückhaltender und verantwortungsvoller einsetzt. Das würde vor allem die Küstengebiete, etwa das Mündungsgebiet des Yangtse, entlasten [4]. Ein Verbot phosphorhaltiger Detergenzien wäre ein weiterer Schritt, die Phosphorkonzentrationen zu senken.

### Dreckiges Wasser für die Bewässerung

Die Resultate dieser schweizerisch-chinesischen Gemeinschaftsstudie haben wir in Peking den betroffenen Akteuren im Rahmen verschiedener Workshops vorgestellt und mit ihnen diskutiert. Dabei zeigte sich, dass China gewillt ist, seine Probleme in den Griff zu bekommen. Bei fünf Kläranlagen hat Peking versuchsweise bereits Verbesserungsmaßnahmen für eine effizientere Abwasserbehandlung vorgenommen. Sie sollen in naher Zukunft vollwertig ausgebaut werden.

Wie wichtig entschiedenes Handeln in dieser Sache ist, macht eine weitere Erkenntnis unserer Untersuchung deutlich: Von der Wassermenge von 31,9 Kubikmetern pro Sekunde, die im Jahresdurchschnitt durch das Haihe-Flusssystem fliesst, werden rund 95 Prozent zur Bewässerung abgezweigt. So wird praktisch die gesamte Wassermenge der beiden kanalisierten Flüsse Chaobai-xin und Qinlongwan dafür verwendet. Von den 18,5 Kubikmetern pro Sekunde, die unterhalb von Peking im nördlichen Kanal abfliessen, erreichen nur gerade 1,6 Kubikmeter pro Sekunde Tianjin und schliesslich das Meer (Abb. 2a). Verschiedene Dämme

entlang dieses Flussabschnitts leiten das Wasser in ein umfangreiches Netzwerk von Bewässerungskanälen um, aus denen es die Bauern abpumpen, um ihre Felder zu bewässern. Das verwendete Wasser weist einen höheren Verschmutzungsgrad auf als die gemäss dem chinesischen Qualitätsstandard schlechteste Stufe V. Das bedeutet, dass das Wasser eigentlich für jegliche Verwendung zu belastet ist.

[michael.berg@eawag.ch](mailto:michael.berg@eawag.ch)

- [1] Hering J.G., Höhn E., Klinke A., Maurer M., Peter A., Reichert P., Robinson C., Schirmer K., Schirmer M., Stamm C., Wehrl B. (2012): Moving targets, long-lived infrastructure, and increasing needs for integration and adaptation in water management: An illustration from Switzerland. *Environmental Science and Technology* 46, 112–118.
- [2] Pernet-Coudrier B., Qi W., Liu H., Müller B., Berg M. (2012): Sources and pathways of nutrients in the semi-arid region of Beijing-Tianjin, China. *Environmental Science and Technology* 46, 5294–5301.
- [3] Heeb F., Singer H., Pernet-Coudrier B., Qi W., Liu H., Longrée P., Müller B., Berg M. (2012): Organic micropollutants in rivers downstream of the megacity Beijing: Sources and mass fluxes in a large-scale wastewater irrigation system. *Environmental Science and Technology* 46, 8680–8688.
- [4] Müller B., Berg M., Pernet-Coudrier B., Qi W., Liu H. (2012): The geochemistry of the Yangtze River: Seasonality of concentrations and temporal trends of chemical loads. *Global Biogeochemical Cycles* 26, GB2028.

# Die Rechnung nicht ohne den Menschen machen

Ökologische Probleme haben primär gesellschaftliche Ursachen. Umweltforschung und -praxis tendieren aber noch immer dazu, sie einseitig aus natur- und technikwissenschaftlicher Perspektive anzugehen. Die Probleme auch aus sozialwissenschaftlichen Blickwinkeln zu betrachten, versprache tragfähigere Lösungen. Diese Erkenntnis ist nicht neu, braucht aber das Verständnis und den Willen aller Beteiligten. *Von Andres Jordi*



Der Mensch stellt vielfältige Ansprüche ans Wasser (im Bild die Zürcher Seeüberquerung im Sommer 2012).

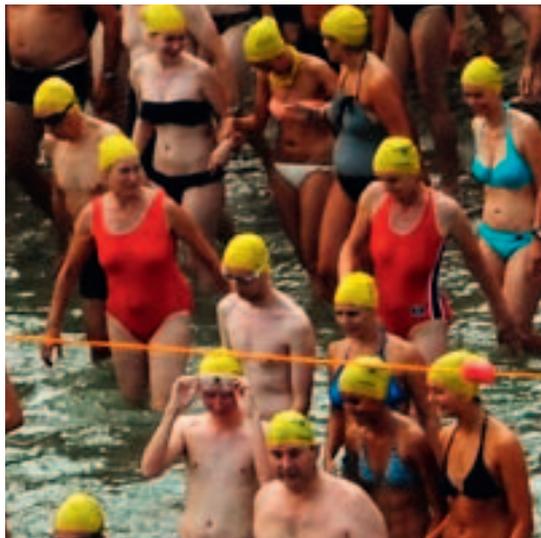
In der Umweltforschung findet ein Umdenken statt. Immer deutlicher muss man nämlich erkennen, dass sich die ökologischen Probleme alleine mit naturwissenschaftlich-technischen Ansätzen oft nicht lösen lassen. Denn bei einer Betrachtungsweise, die sich naturgemäss auf das Verständnis physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse beschränkt, blendet man die gesellschaftlichen Systeme und ihre Akteure aus. «Umweltprobleme haben

primär gesellschaftliche Ursachen», sagt Bernhard Truffer, Leiter der neuen Abteilung Umweltozialwissenschaften der Eawag, «folglich muss man die gesellschaftlichen Systeme und Prozesse verstehen, wenn man etwas bei den Auswirkungen verändern will.» Die sozialwissenschaftlichen Disziplinen trügen dazu bei, die Entstehung und Bewertung von Umweltproblemen und den Umgang damit besser zu verstehen, so Truffer.

## Wer verbreitet dezentrale Abwassersysteme?

Heiko Gebauer und Bernhard Truffer untersuchten, welche Rolle Firmennetzwerke bei der Verbreitung dezentraler Abwassertechnologien spielen. Dabei ging es um die Frage, ob multinationale Unternehmen wie General Electric, Siemens oder Veolia oder eher kleine und mittlere Unternehmen weltweit eine Verbreitung solcher Technologien vorantreiben. Die Studie zeigt, dass sich die multinationalen Firmen dazu am besten eignen. «Eine Hürde ist jedoch das anfänglich geringe Marktpotenzial und dass die Unternehmen ihre zentralen Abwassertechnologien in den bestehenden Märkten kannibalisieren», erklärt Gebauer. Die Konzerne umgehen dies, indem sie die Technologienentwicklung vermehrt in Schwellenländer ohne ausgebaute Abwasserreinigung verlagern und dort dezentrale Systeme als Alternative zu zentralen auf den Markt bringen. Kleineren und mittleren Unternehmen fehlt dieser Marktzugang dagegen häufig. Sie sind gezwungen, dezentrale Systeme in Nischenmärkten in den industrialisierten Ländern zu entwickeln. Die Nischenmärkte erscheinen bisher jedoch zu klein, um auch attraktive Kosten zu erzielen. Das verhindert die Erschliessung weiterer Anwendungsfelder. Sowohl für multinationale Firmen als auch für kleinere und mittlere Unternehmen ist es wichtig, dass die Wertschöpfungsprozesse für dezentrale Abwassertechnologien mit den urbanen, abwasserbezogenen und sanitären Planungsprozessen sinnvoll verknüpft werden [6].

heiko.gebauer@eawag.ch



### Dominierende Rolle der Technik

Wie eng Natur und Umwelt mit gesellschaftlichen Systemen verzahnt sind, zeigt sich beim Wasser. Wir produzieren Strom aus der Wasserkraft, nutzen Flüsse und Seen als Erholungsraum, schützen uns vor Überschwemmungen, brauchen die Ressource als Trinkwasser und zur Bewässerung oder erachten aquatische Lebensräume und ihre Artenvielfalt als erhaltenswert. Dabei geht es nicht nur um naturwissenschaftliches Verständnis und technische Lösungen, sondern mindestens so stark um unterschiedliche Bedürfnisse, Interessen, Wertvorstellungen – um gesellschaftliche Faktoren also. «Es gilt, das Wahrnehmen, Denken, Entscheiden und Handeln von Menschen im Kontext von Familien, Gruppen, Organisationen und der Gesellschaft zu verstehen», sagt Heinz Gutscher, Professor für Sozialpsychologie und Leiter der Sozialforschungsstelle an der Universität Zürich. «In den Diskussionen etwa über die zukünftige Energieversorgung spielte bisher aber die Technik die dominierende Rolle», so Gutscher.

Die Umweltprobleme von der gesellschaftlichen Seite her anzugehen, hält auch die Praxis für unabdingbar, wie eine kürzlich erschienene Studie der Universität Bern zeigt [1]. Demnach orten Schweizer Naturschutzpraktikerinnen und -praktiker vor allem bei ökonomischen und gesellschaftlichen Fragen sowie bei Interessenkonflikten zwischen verschiedenen Akteuren Handlungsbedarf und fordern eine aktivere Rolle der Sozialwissenschaften in der Naturschutzforschung. Ähnlich tönt es von europäischen Fachleuten aus dem Bereich Wasserversorgung: Um diese auch in Zukunft sicherstellen zu können, brauche es dringend interdisziplinäre Forschung, die Ingenieure und Sozialwissenschaftler zusammenbringe [2].

Auch Damian Dominguez vom Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern ist von der Wichtigkeit der sozialwissenschaftlichen Perspektive für die Praxis überzeugt. «Gerade wenn es darum geht, langfristige Zukunftsstrategien zu entwickeln, könnte sie wertvolle Instrumente für die Entscheidungsfindung, für die Priorisierung von Zielen oder die Handhabung komplexer Fragestellungen liefern», sagt der Ingenieur und Fachbereichsleiter Abwasserentsorgung. Als Beispiel nennt Dominguez das Pro-

## Was darf der Ausbau der Kläranlagen kosten?

Mithilfe einer Kosten-Nutzen-Analyse untersuchen Ivana Logar und Roy Brouwer, ob sich der geplante Ausbau von Kläranlagen zur Entfernung von Mikroverunreinigungen in der Schweiz auch ökonomisch rechtfertigt. Die Kosten für eine Erweiterung werden auf rund 133 Millionen Franken pro Jahr geschätzt. Anhand einer repräsentativen Umfrage in der

Deutschschweiz erhoben die Umweltökonominnen, wie viel die Haushalte für die Elimination von Mikroverunreinigungen zu zahlen bereit sind. «Unsere Untersuchung zeigt, dass die Bürger gut informiert sind über Mikroverunreinigungen», sagt Logar. «54 Prozent der befragten Personen betrachten diese zudem als substanzielles oder gar grosses Risiko

für Umwelt und Gesundheit.» Erste vorläufige Resultate zur Zahlungsbereitschaft deuten darauf hin, dass Schweizerinnen und Schweizer die Entfernung solcher Stoffe aus den Gewässern jährlich mehr als 200 Millionen Franken wert ist. Das würde eine Aufrüstung der Kläranlagen aus ökonomischer Sicht rechtfertigen. [ivana.logar@eawag.ch](mailto:ivana.logar@eawag.ch)

jekt Regional infrastructure foresight (RIF), eine von der Eawag entwickelte Methode zur nachhaltigen Strategieplanung in der Siedlungswasserwirtschaft, an der er mitgearbeitet hat [3]. RIF liefert den methodischen Rahmen, um in einem partizipativen Planungsprozess Zukunftsszenarien sowie technische und organisatorische Lösungsoptionen zu analysieren und zu bewerten. Aus den Ergebnissen lassen sich Empfehlungen für konkrete Planungsschritte ableiten. Die Anwendung in verschiedenen Regionen der Schweiz hat gezeigt, dass RIF zu besseren Resultaten führt als konventionelle Ansätze und die Teilnehmenden mit dem Verfahren und den Ergebnissen sehr zufrieden waren. Dabei schnitten Lösungen, die eine verstärkte Professionalisierung der Abwasserorganisationen verlangten, besonders gut ab, während schrittweise Weiterentwicklungen schlecht wegkamen.

### Langwieriger Prozess

Die Erkenntnis, dass die Sozialwissenschaften vermehrt Eingang in die Lösung von Umweltproblemen finden müssen, ist nicht neu. «Bereits in den 1970er-Jahren musste man feststellen, dass die Umweltprobleme viele gesellschaftliche Bereiche betreffen und natur- und ingenieurwissenschaftliche Ansätze allein nicht ausreichen», sagt der ehemalige Eawag-Direktor Ueli Bundi. Impulse für einen breiteren Zugang kamen laut Bundi auch aus der Praxis und von Umweltorganisationen. Diese Entwicklung spiegelt sich ebenso in der Geschichte der Eawag. Das Wasserforschungsinstitut erachtete es schon früh als notwendig, ökonomische und rechtliche Fragen einzubeziehen [4]. Bereits 1987 schrieben Exponenten der Eawag im Bericht «Forschungspolitische Früherkennung im Gewässerschutz», dass die Wasserforschung natur-, ingenieur- und sozialwissenschaftliche Belange und deren Zusammenwirken umfassen müsse, und propagierten die interdisziplinäre Zusammenarbeit [5]. Dies mündete 1992 in der Gründung einer Forschungsgruppe für Humanökologie und später in einer Abteilung für sozialwissenschaftliche Innovationsforschung. Im Herbst 2012 hat nun die neue Abteilung Umweltsozialwissenschaften ihre Arbeit aufgenommen (siehe Interview). Mit welchen Fragen sich Sozialwissenschaftlerinnen und Sozialwissenschaftler an der Eawag auseinandersetzen, zeigen die verschiedenen Beispiele in den Kästen.



## Wie lassen sich Planungsprozesse verbessern?

Im Rahmen des NFP61-Projekts «Langfristige Planung nachhaltiger Wasserinfrastrukturen» erforschen Judit Lienert, Florian Schnetzer und Karin Ingold, wie durch die Kombination von Stakeholder-Analysen mit der Analyse sozialer Netzwerke Entscheidungsfindungsprozesse besser erfasst und verstanden werden können. Diese Forschung dient konkret der Entwicklung von Zukunftsstrategien bei der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung. Dazu untersuchten die Forschenden die Beziehungen und Interaktionen der beteiligten Akteure und Sektoren. Mithilfe systematischer Befragungen fanden sie heraus, dass einerseits die Wasserversorgung und die Abwasserentsorgung wenig koordiniert sind und andererseits die Akteure auf kommunaler, kantonaler und nationaler Ebene selten zusammenarbeiten. «Die Infrastrukturplanung wird zudem klar von den Ingenieuren und den kommunalen Behörden dominiert», sagt Lienert. Die Kombination von Stakeholder-Analysen und Analysen sozialer Netzwerke ermöglicht es laut den Forschenden, das komplexe Beziehungsgefüge der Akteure zu verstehen – eine wichtige Voraussetzung, um Instrumente für einen gemeinschaftlichen Planungsprozess zu entwickeln [7].

[judit.lienert@eawag.ch](mailto:judit.lienert@eawag.ch)

Doch die Einbindung der Sozialwissenschaften in die Umweltforschung und die Interdisziplinarität ist ein langwieriger Prozess. «Jede wissenschaftliche Disziplin hat ihre eigenen Regeln und Strukturen, kultiviert andere Weltbilder und Wissenschaftsauffassungen», erklärt Bundi. Das mache den Austausch schwierig, weil man sich oft nicht verstehe. Zudem zahle sich ein Einlassen auf ein anderes Fachgebiet im konventionellen Wissenschaftsbetrieb zu wenig aus. «Eines der Hauptprobleme, mit denen wir Sozialwissenschaftler uns oft konfrontiert sehen, besteht in der Erwartung, dass wir vor allem praktische Probleme lösen», sagt

Truffer. «Oft verstehen unsere Kolleginnen und Kollegen aus den Natur- und Ingenieurwissenschaften nicht, dass wir eigene Forschungsfragen bearbeiten und nicht nur Berater sind.» Auch hätten viele Mühe zu akzeptieren, dass in gesellschaftlichen Prozessen keine einfachen Stellschrauben existierten, mit denen sich die Probleme lösen liessen. «Es gibt meist keine gesellschaftlichen End-of-pipe-Lösungen», so Truffer.

Auch in der Praxis hätten sozialwissenschaftliche Lösungsstrategien nach wie vor einen schweren Stand, stellt Dominguez fest.

## Neue Abteilung Umweltsozialwissenschaften

Im September 2012 hat die neue Forschungsabteilung Umweltsozialwissenschaften ihre Arbeit aufgenommen. Damit wolle die Eawag die langjährigen Erfahrungen in diesem Bereich zusammenführen, erklärt Abteilungsleiter Bernhard Truffer.



### Welche Ziele verfolgt die Eawag mit der neuen Forschungsabteilung Umweltsozialwissenschaften?

Es geht vor allem darum, die über die letzten 20 Jahre aufgebauten Kompetenzen und gesammelten Erfahrungen zu konsolidieren. Die neue Abteilung baut im Kern auf der 2006 gegründeten Abteilung Sozialwissenschaftliche Innovationsforschung und zwei weiteren, bereits existierenden Forschungsgruppen auf. In den letzten zwei Jahren wurden mit der Umweltökonomie und den Umweltpolitikwissenschaften ferner zwei zusätzliche Gruppen aufgebaut. Deshalb war es an der Zeit, die sozialwissenschaftlichen Kompetenzen in einer neuen Abteilung zusammenzuführen.

### Mit welchen Themen befassen sich die Umweltsozialwissenschaften?

Es gibt keinen entsprechenden Lehrgang an Universitäten. Wir haben diesen Namen gewählt, weil die Forschenden der neuen Abteilung in sehr unterschiedlichen sozialwissenschaftlichen Disziplinen beheimatet sind, etwa in der Volkswirtschaftslehre, den Politikwissenschaften, der Sozialpsychologie, der Betriebswirtschaftslehre oder der Wirtschaftsgeografie. Innerhalb jeder dieser Disziplinen gibt es Spezialisierungsfelder, die sich explizit mit Umweltthemen befassen.

### Wo liegen die Schwerpunkte der neuen Abteilung?

Wir haben unsere Forschungsarbeit entlang fünf disziplinärer Kompetenzen organisiert: Umwelt- und Ressourcenökonomie, Umweltpolitikwissenschaften, Umwelt- und Gesundheitspsychologie, Umweltinnovationen und -management sowie Entscheidungsanalyse. Die Schwerpunkte ergeben sich zuerst aus der Etablierung respektive Weiterentwicklung dieser Kompetenzbereiche. Bezogen auf Wasserthemen stehen Fragen nach neuen technischen und organisatorischen Optionen in der Siedlungswasserwirtschaft, nach dem Umgang mit Mikroverunreinigungen in den Gewässern und dem Management von Umweltressourcen im Vordergrund.

### Welches sind die Herausforderungen in der Zusammenarbeit mit den Natur- und Technikwissenschaften?

Wir haben über die Jahre viel Erfahrungen bei der inter- und transdisziplinären Zusammenarbeit gesammelt und im Allgemeinen läuft diese gut. Die Eawag wird weitherum als Vorzeigebispiel für transdisziplinäre Forschung gesehen. Man muss sich aber bewusst sein, dass das gegenseitige Kennen- und Schätzenlernen viel Zeit braucht. Die Eawag bietet gute Voraussetzungen dafür, dass die notwendigen Lernprozesse auch durchlaufen werden können. In anderen Kontexten werden Experimente oft zu früh abgebrochen, weil man am Anfang vor allem mit Schwierigkeiten zu kämpfen hat. Man sollte aber auch bedenken, dass mehr Integration nicht immer besser ist. Zusammenarbeit zwischen mehreren Disziplinen braucht zuallererst eine qualitativ hochstehende Problemanalyse, die von Experten aus den unterschiedlichen Bereichen gemeinsam erstellt wird. Danach erst kann man entscheiden, welche disziplinären Kompetenzen es wo in welcher Form braucht, um die gesteckten Ziele zu erreichen.



## Wie lässt sich Händewaschen wirkungsvoll fördern?

Im Zusammenhang mit dem verheerenden Erdbeben und dem Ausbruch der Cholera in Haiti 2010 führte die Hilfsorganisation Oxfam vor Ort verschiedene Aktionen durch, um das Hygieneverhalten der betroffenen Bevölkerung zu fördern. Anhand strukturierter Interviews in über 800 Haushalten evaluierten Nadja Contzen und Hans-Joachim Mosler von der Eawag die Förderung von Hygieneverhalten im Bereich Händewaschen auf ihre Wirksamkeit. Ob jemand im Bedarfsfall die Hände wäscht oder nicht, hängt demnach vor allem von den sozialen Normen, der grundsätzlichen Einstellung gegenüber dem Händewaschen

und der persönlichen Fähigkeitsüberzeugung ab. Statistische Analysen zeigten zudem, dass Radiospots, das Verteilen von Hygieneartikeln zusammen mit Gebrauchsdemonstrationen, Informationen von Bekannten und Theaterdarbietungen das Händewaschen wirksam förderten. Die Kombination mehrerer solcher Massnahmen hatte einen stärkeren Effekt, als wenn sie einzeln propagiert wurden. Hygiene-songs, Diskussionsgruppen oder Poster hingegen bewirkten selteneres statt häufigeres Händewaschen. Auch spezielle Hygienetage oder Hausbesuche waren kontraproduktiv [8].  
**nadja.contzen@eawag.ch**

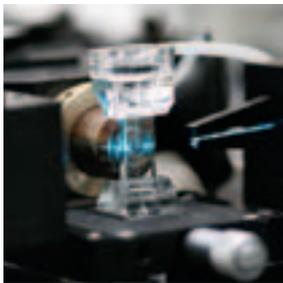
Immer noch herrsche der Glaube vor, alle Umweltprobleme mit technischen Lösungen beheben zu können, wenn man die Zusammenhänge nur genügend gut verstehe. Die Fachleute hätten in der Regel einen natur- oder ingenieurwissenschaftlichen Hintergrund und seien mit sozialwissenschaftlichem Gedankengut nicht vertraut. «Statt sich die grundsätzlichen Fragen zu stellen, verliert man sich deshalb leider oft in den technischen Details», so Dominguez.

### Bei Planungen vorgeschrieben

Dass die Bemühungen um eine sozialwissenschaftliche Perspektive trotz allem hier und dort Früchte tragen, zeigen die verschiedenen Beispiele der Eawag. Darüber hinaus haben in den letzten 20 Jahren

laut Bundi transdisziplinäre und partizipative Verfahren zunehmend Eingang in wissenschaftliche Studien und in Planungen gefunden. So sind diese heute etwa bei Revitalisierungen, Meliorationen, der Wasserkraftnutzung oder dem Hochwasserschutz vorgeschriebener Bestandteil des Prozesses. Auch das nationale Forschungsprogramm Nachhaltige Wassernutzung (NFP 61) hat neben Projekten, die sich um die natürlichen Systeme kümmern, eine Forschungsachse Gesellschaftssystem, die sich mit dem sozioökonomischen Wandel und sektorübergreifenden Strategien für die nachhaltige Nutzung und den Schutz des Wassers befasst. Und der Sozialpsychologe Heinz Gutscher verbreitet Aufbruchsstimmung: «Gegenwärtig ist ein starker Trend auszumachen, die Sozialwissenschaften zu Umweltthemen stärker einzubeziehen. Nutzen wir die Chance!»

- [1] Braunsch V., Home R., Pellet J., Arlettaz R. (2012): Conservation science relevant to action – A research agenda identified and prioritized by practitioners. *Biological Conservation* 153, 201–210.
- [2] Barraqué B., Isnard L. (2012): Urban water – When engineering met social science. *ParisTech Review*, [www.paristechreview.com/2012/10/23/urban-water-engineering](http://www.paristechreview.com/2012/10/23/urban-water-engineering)
- [3] Störmer E., Truffer B., Ruff A., Dominguez D., Maurer M., Klinker A., Herlyn A., Markard J. (2008): Nachhaltige Strategieentwicklung für die regionale Abwasserwirtschaft. Eawag Dübendorf, [www.eawag.ch/rif-handbuch](http://www.eawag.ch/rif-handbuch)
- [4] Bundi U. (1981): Gewässerschutz in der Schweiz – Sind die Ziele erreichbar? Haupt-Verlag.
- [5] Bundi U., Güttinger H., Stumm W. (1987): Forschungspolitische Früherkennung im Gewässerschutz. Schweizerischer Wissenschaftsrat, Bern 1987.
- [6] Gebauer H., Truffer B., Binz C., Störmer E. (2012): Capability perspective on business network formation – Empirical evidence from the wastewater treatment industry. *European Business Review* 24 (2), 169–190.
- [7] Lienert J., Schnetzer F., Ingold K. (eingereicht): Stakeholder analysis combined with social network analysis provides fine-grained insights into water infrastructure planning processes.
- [8] Contzen N., Mosler H.-J. (2012): Factors determining the effectiveness of Oxfam's public health promotion approach in Haiti. <http://kurzurl.net/oxfam>



## Ins Schweizerische Lebensmittelbuch aufgenommen

Das Bundesamt für Gesundheit hat die von der Eawag weiterentwickelte Durchflusszytometrie zur Analyse von Trinkwasser ins Schweizerische Lebensmittelbuch aufgenommen. Das Schweizerische Lebensmittelbuch ist eine amtliche Sammlung empfohlener und verbindlicher Untersuchungsmethoden zur Qualitätskontrolle von Lebensmitteln, Zusatzstoffen und Gebrauchsgegenständen. Für die Beurteilung der mikrobiologischen Qualität und Hygiene von Trinkwasser liefert die Durchflusszytometrie wesentlich genauere Ergebnisse als die gesetzlich vorgeschriebene Plattierungsmethode. Mit dieser lassen sich lediglich Bakterien nachweisen, die auf dem Nährmedium Agar-Agar wachsen. Das ist etwa ein Prozent aller Mikroorganismen, die in einer Wasserprobe vorkommen. Daneben ist die Durchflusszytometrie deutlich schneller als die herkömmliche Methode. Die Resultate liegen bereits nach einer Viertelstunde vor, während die Plattierung je nach Analyse mehrere Tage bis Wochen beansprucht. [www.slmb.bag.admin.ch](http://www.slmb.bag.admin.ch)



## Was bringt die Reduktion von Mikroverunreinigungen?

Mit «Eco Impact» startet die Eawag ein grossangelegtes, interdisziplinäres Forschungsprojekt, in dem untersucht werden soll, wie sich eine Reduktion von Mikroverunreinigungen in den Kläranlagen auf die Qualität und die Ökosystemfunktionen der Gewässer auswirkt. In den kommenden 20 Jahren will die Schweiz für rund 1,2 Milliarden Franken rund 100 ihrer 700 Abwasserreinigungsanlagen technisch aufrüsten, um die Belastung der Gewässer durch organische Spurenstoffe aus Medikamenten, Reinigungsmitteln, Pflegeprodukten oder Pestiziden zu vermindern. In einer ersten Phase befasst sich «Eco Impact» damit, wie sich solche Schadstoffe auf die aquatische Umwelt auswirken. Mithilfe von Laborexperimenten und Feldstudien wollen die Forschenden dies auf den verschiedenen biologischen Organisationsstufen – von der Zelle bis zum Ökosystem – untersuchen. In einer zweiten Projektphase soll ermittelt werden, wie sich die Aufrüstung der Kläranlagen auf den Zustand der aquatischen Lebensräume auswirkt. Kontakt: [christian.stamm@eawag.ch](mailto:christian.stamm@eawag.ch)



## Erste Ozonierungsanlage in Dübendorf

Im Oktober 2012 legte die Kläranlage Neugut in Dübendorf den Grundstein für die erste Ozonierungsanlage der Schweiz. Die Stufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen soll im Herbst 2013 in Betrieb genommen werden. Die Ozonierung wird in der Trinkwasseraufbereitung seit Jahrzehnten erfolgreich zur Desinfektion und Elimination von Geruchs- und Geschmacksstoffen eingesetzt. Ozon ist ein sehr reaktives Gas, das schwer abbaubare Verbindungen angreift und damit auch Mikroverunreinigungen eliminiert. Mit der neuen Anlage will man erste Langzeiterfahrungen sammeln. Zusammen mit der Eawag und anderen Partnern soll der Ozonierungsprozess weiter optimiert und ein Mess- und Überwachungskonzept entwickelt werden. [www.neugut.ch](http://www.neugut.ch)



## Grosse Ehre für Sodis-Gründer

Die Stiftung Dr. J.E. Brandenberger hat Martin Wegelin, dem Begründer der solaren Wasserdesinfektion (Sodis), am 24. November 2012 in Chur einen mit 200 000 Franken dotierten Preis für seine Leistungen verliehen. Wegelin, der bis 2007 während 25 Jahren an der Eawag gearbeitet hatte, und sein Team erforschten das Prinzip, verschmutztes Wasser in PET-Flaschen mithilfe von Sonnenlicht zu Trinkwasser aufzubereiten, und setzten es in die Praxis um. An der Eawag wurde nachgewiesen, dass und wie das Abtöten von Krankheitserregern mit Hilfe der UV-Strahlung der Sonne funktioniert, und erforscht, welche Verbreitungskanäle sich für Sodis am besten eignen. Dem Einsatz, der Hartnäckigkeit und dem Forschertrieb von Wegelin sei es zu verdanken, dass die solare Wasserdesinfektion heute breite Akzeptanz finde und von rund fünf Millionen Menschen in 28 Entwicklungsländern angewendet werde, so die Stiftung. Unermüdlich reiste er dafür um die Welt, baute Partnerschaften auf und konnte in vielen Ländern die Unterstützung der Regierung gewinnen. Während die Eawag weiterhin die Verbreitungsmöglichkeiten für Sodis untersucht, wird das eigentliche Projekt bis 2015 sukzessive an die Entwicklungsorganisation Helvetas übergeben. [www.sodis.ch](http://www.sodis.ch)



## Thomas Egli geht in Pension

Der ehemalige Leiter der Forschungsabteilung Umweltmikrobiologie, Thomas Egli, ist im August 2012 nach 30 Jahren an der Eawag pensioniert worden. Unter anderem entwickelte der Mikrobiologe zusammen mit seinen Kollegen basierend auf der aus der Medizin stammenden Durchflusszytometrie eine zuverlässige und effiziente Methode der Trinkwasserkontrolle, die bestehende Verfahren in Zukunft ersetzen könnte. Dafür erhielt er 2010 den Muelheim Water Award und wurde vom Schweizerischen Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW) geehrt.



## Neuer Leiter der Abteilung Oberflächengewässer

Am 1. September 2012 hat Carsten Schubert die Leitung der Forschungsabteilung Oberflächengewässer der Eawag von Alfred Wüest übernommen. Der Biogeochemiker arbeitet seit zehn Jahren an der Eawag. Er und seine Forschungsgruppe beschäftigen sich mit dem Abbau organischer Substanzen im Wasser und in Sedimenten von Süsswasserseen durch Bakterien.

## Neue Professuren für Eawag-Forschende



Der ETH-Rat hat im Mai 2012 **Alfred Wüest** der Abteilung Oberflächengewässer zum ordentlichen Professor für Physik aquatischer Systeme an der ETH Lausanne gewählt. Wüest ist bereits Titularprofessor an der ETH Zürich und erforscht die physikalischen Prozesse in Seen, Reservoirs und Flüssen. **Max Maurer** hat der ETH-Rat im September zum ordentlichen Professor für Systeme in der Siedlungswasserwirtschaft an der ETH Zürich gewählt. Maurer leitet die Forschungsabteilung Siedlungswasserwirtschaft und beschäftigt sich mit dem ingenieurwissenschaftlichen Potenzial von innovativen siedlungswasserwirtschaftlichen Ansätzen sowie von neuen Management- und Planungsverfahren für die Wasserinfrastrukturen. Ebenfalls im September verlieh die Universität Basel der Wissenschaftlerin **Hong Yang** der Forschungsabteilung Systemanalyse und Modellierung eine Titularprofessur. Yang erforscht die Auswirkungen wachsender Wasserknappheit und des Nahrungsmittelhandels auf die Ernährungssicherheit in der Welt. Yang ist bekannt für ihre Untersuchungen zum Konzept des so genannten virtuellen Wassers.



## Anerkennungspreis der Gates-Stiftung

Mit 40 000 US-Dollar honorierte die Bill and Melinda Gates Foundation das Projekt Diversion Toilet der Eawag und des Designbüros EOOS aus Wien für ihr herausragendes Design. Mit ihrem Wettbewerb Re-Invent the Toilet Challenge will die Stiftung Forschende zur Entwicklung des WCs der Zukunft motivieren. Das neue Klo soll ohne Kanalisation und Fremdenergie auskommen, in Stoffkreisläufe eingebaut sein und nicht mehr als fünf Cents pro Tag und Person kosten. Für Projektleiterin Tove Larsen war klar, dass das Wettbewerbsmodell auf dem Prinzip der Separierung von Urin und Fäkalien beruhen musste: «Die Trenntechnologie erlaubt die effiziente Rückgewinnung der wertvollen Rohstoffe und die einfache Wiedergewinnung von Wasser.» Das Team entwickelte eine Steh-Toilette, die in verschiedenen Kulturkreisen eingesetzt werden kann und mit ungefähr eineinhalb Litern Wasser pro Benutzung auskommt. Ein Membranfilter reinigt das Brauchwasser, sodass es wiederverwendet werden kann. Das Trenn-WC soll in ein ganzes Sanitärsystem eingebettet sein, das Sammlung, Transport und Aufbereitung der Fäkalien miteinschliesst und sich kostendeckend betreiben lässt. Als nächsten Schritt bauen und testen die Forschenden nun echte Prototypen der Toilette. [www.eawag.ch/rttc](http://www.eawag.ch/rttc)

# In Kürze

## Neu erschienen



Im Bericht **Abwasserentsorgung 2025** zeigt die Eawag Wissenslücken zur Situation und zur Zukunft der schweizerischen Abwasserentsorgung auf und dokumentiert den Wissensstand. Der Fokus liegt auf der Zusammenstellung des auf nationaler Ebene verfügbaren Metawissens und der Identifikation zukünftiger Handlungsfelder in der schweizerischen Abwasserentsorgung. Spezielle Beachtung finden das Thema Klimawandel und dessen direkte und indirekte Einflüsse auf die Abwasserentsorgung. [http://library.eawag-empa.ch/schriftenreihe/schriftenreihe\\_21.pdf](http://library.eawag-empa.ch/schriftenreihe/schriftenreihe_21.pdf)

Eine nützliche Informationsquelle stellt das Buch **Chemistry of Ozone in Water and Wastewater Treatment: From Basic Principles to Application** dar. Der Eawag-Wissenschaftler Urs von Gunten und sein Mitautor Clemens von Sonntag diskutieren darin mechanistische Details von Ozonreaktionen und den Abbau von Mikroverunreinigungen. Das Werk bietet eine gute Grundlage für Forschungsarbeiten, ebenso finden Verantwortliche für die Planung und Durchführung von Ozonierungsverfahren in der Trinkwasseraufbereitung und Abwasserbehandlung darin kompakt aufbereitete Informationen. [www.iwapublishing.com](http://www.iwapublishing.com)

Das Forschungsprojekt «Integrales Flussgebietsmanagement» erarbeitete ökologische und wasserbauliche Grundlagen zur Revitalisierung von Fließgewässern und unterstützt so deren Planung und Umsetzung. Die vom Bundesamt für Umwelt herausgegebene Merkblattsammlung **Wasserbau und Ökologie** präsentiert Ergebnisse dieses transdisziplinären Projekts der Eawag, der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, der ETH Lausanne und Zürich und richtet sich an Fachleute in Bundesämtern, kantonalen Ämtern sowie Ingenieur- und Ökobilros. [www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01678](http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01678)

Mit der Teilstrombehandlung von häuslichem Abwasser befasst sich das von Eawag-Forschenden herausgegebene Buch **Source Separation and Decentralization for Wastewater Management**. Wissenschaftler und Praktiker diskutieren darin Vorteile und Herausforderungen des Verfahrens und stellen neue Technologien und Abwasserkonzepte vor. [www.iwapublishing.com](http://www.iwapublishing.com)

## Faktenblätter und Publikationen

Zu wichtigen aktuellen Themen bietet die Eawag-Website Faktenblätter an. Neu herausgekommen sind Informationen zur Entfernung von Mikroverunreinigungen: [www.eawag.ch/medien/publ/fb](http://www.eawag.ch/medien/publ/fb)

Publikationen der Eawag-Forschenden sind in der Eawag-Bibliothek Lib4RI erhältlich. Darin enthaltene «open access»-Publikationen können frei heruntergeladen werden: [www.lib4ri.ch](http://www.lib4ri.ch)

## Kurse

**26. Februar 2013**  
Eawag Dübendorf

Der Einsatz von umweltsychologischen Massnahmen für Verhaltensänderungen im Umweltbereich

**6. März 2013**  
Eawag Dübendorf

Wasserwissen – die effiziente Informationsrecherche

**10.–12. April 2013**  
Eawag Dübendorf

Planning and Design of Sanitation Systems and Technologies

**23. April 2013**  
Eawag Dübendorf

Stoffflussanalyse und Modellierung

**7. Mai 2013**  
Eawag Dübendorf

Revitalisierung von Fließgewässern: Ansätze für die Priorisierung

**7. Juni 2013**  
Eawag Dübendorf

Drinking Water Quality in Developing Countries: Mitigating Geogenic Contamination

**11.–12. Juni 2013**  
Eawag Dübendorf

Einführung in die Ökotoxikologie

**19. Juni 2013**  
Eawag Dübendorf

Auswirkungen der Re-Oligotrophierung auf Ökologie, Artenvielfalt und Funktion der Seen

## Tagungen

**22. März 2013**  
Stade de Suisse, Bern

Wasser überwindet Grenzen – Beispiele und Chancen in der Schweiz

**16.–19. Juni 2013**  
ETH Zürich

8th IWA Specialized Conference on Assessment and control of micropollutants and hazardous substances in water

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