

Eawag

News

Ferne Länder, andere Stoffflüsse

Bangladesch: Arsen im Reisfeld – eine Gefahr. Seite 9

Eritrea: Dezentral kompostieren – wirtschaftlich sinnvoll? Seite 12

Vietnam: Den Phosphorkreislauf schliessen. Seite 21





Roland Schertenleib,
Mitglied der Eawag-
Direktion und ehemaliger
Leiter der Abteilung
«Siedlungshygiene in
Entwicklungsländern»

Problemlösungen entwickeln mit Hilfe der Stoffflussanalyse

In Entwicklungs- und Schwellenländern haben mehr als 1,2 Milliarden Menschen keinen Zugang zu sicherem Trinkwasser und für mehr als 2,6 Milliarden Menschen stehen keine adäquaten sanitären Anlagen zur Verfügung. Ein Grossteil der kommunalen Abfälle wird weder eingesammelt, geschweige denn umweltgerecht entsorgt. So bleiben die damit in direktem Zusammenhang stehenden Infektions- und Parasitenkrankheiten weiterhin eines der Hauptprobleme in diesen Ländern. Daneben treten zunehmend akute und chronische Umweltprobleme in den Vordergrund, die in Industrieländern bereits seit Jahrzehnten bekannt sind.

Mit ihrem breiten Wissen engagiert sich die Eawag schon seit vielen Jahren für die Erarbeitung von Problemlösungen in Entwicklungs- und Schwellenländern. Vielfach geht es um die Anwendung und Anpassung von Methoden, die in industrialisierten Ländern mit Erfolg eingesetzt werden. Dabei arbeitet die Eawag stets eng mit Partnern vor Ort zusammen. Die Forschungsprojekte dienen damit auch dem Wissenstransfer und der Stärkung der Forschungskapazitäten in den Ländern des Südens.

Anfang der 1980er Jahre wurde die Methode der Stoffflussanalyse für umweltrelevante Stoffe und Güter an der Eawag entwickelt. Sie ist seither ein wertvolles Instrument im Umweltmanagement und bietet sich ebenso bei dringlichen Umweltproblemen in Entwicklungs- und Schwellenländern an. Von Vorteil ist, dass damit ganze Regionen beschrieben werden können und man selbst bei einer eher beschränkten Datenlage einen guten Überblick über die Systemzusammenhänge und die Problemursachen erhält.

Diese Ausgabe der Eawag News beschreibt eine Reihe internationaler Projekte, bei denen Umweltprobleme mit der Stoffflussanalyse angegangen werden. Beispielsweise ist die Belastung der Gewässer mit Nährstoffen in vielen Ländern ein grosses Problem, so auch in Vietnam und Thailand sowie am Kivu-See in Kongo/Ruanda. Durch Bilanzierung von Phosphor, Stickstoff und Silizium helfen Forschende der Eawag, Nährstoffquellen und mögliche Ver-

besserungsmassnahmen zu identifizieren. In Bangladesch gelangt giftiges Arsen mit dem Bewässerungswasser auf die Reisfelder. Die Eawag untersucht zusammen mit lokalen Partnern, ob es sich dort akkumuliert und eine Gefahr für die Menschen darstellt. Mit dem Bevölkerungszuwachs und dem erhöhten Lebensstandard fällt auch in Entwicklungs- und Schwellenländern immer mehr Abfall an. Stoffflussanalysen in Eritrea und Kuba zeigen auf, wie die zu entsorgenden Abfallmengen z. B. durch Kompostieren und Wiederverwertung reduziert werden könnten. Die dabei anfallenden Kosten werden mit einer Kombination aus Stofffluss- und Prozesskostenanalyse ermittelt. Um abschätzen zu können, ob sich mögliche Massnahmen effektiv umsetzen lassen, wurde die Abfallflussanalyse in Kuba zudem mit sozialwissenschaftlichen Studien gekoppelt. Auf diese Weise kann die Einstellung der Bevölkerung bzw. der Entscheidungsträger ausgelotet werden.

Meist werden Stoffflussanalysen heute zur Simulierung von Veränderungsszenarien verwendet. Dies ermöglicht es, die ökologischen Auswirkungen möglicher Massnahmen zu quantifizieren. Jedoch können damit weder Gesundheitsrisiken noch Massnahmen zur Verbesserung der gesundheitlichen Situation beurteilt werden. Aspekte, die aber gerade bei der hohen Rate an Infektions- und Parasitenkrankheiten in den Ländern des Südens entscheidend sind. Dazu müssten die Pathogenflüsse analysiert und kombiniert werden mit einer so genannten «Quantitativen Mikrobiologischen Risiko Analyse» (QMRA). Gemeinsam mit dem Schweizerischen Tropeninstitut in Basel arbeitet die Eawag zurzeit an dieser neuen Herausforderung.

Roland Schertenleib

Titelfoto: Ein Junge aus dem Dorf Srinagar in Bangladesch hilft bei der Probenahme auf einem überfluteten Reisfeld während der Monsunzeit. Mit dieser Vorrichtung können Wasserproben aus verschiedenen Sedimenttiefen genommen werden. Mehr auf Seite 9 im Artikel «Arsen im Reisfeld – eine Gefahr?». © Linda Roberts, Eawag

Leitartikel

- 4 **Stoffflüsse: Analysen – Management**
Vom Prinzip her eine Art Buchhaltung bilanziert die Stoffflussanalyse umweltrelevante Stoffe und Güter. Die Eawag setzt die Methode nun auch vermehrt bei akuten Umweltproblemen in Entwicklungs- und Schwellenländern ein.

Forschungsberichte

- 9 **Arsen im Reisfeld – eine Gefahr?**
Vielerorts in Bangladesch werden Reisfelder mit arsenhaltigem Grundwasser bewässert. Die Eawag führt umfangreiche Messkampagnen vor Ort durch.
- 12 **Dezentral kompostieren: wirtschaftlich sinnvoll?**
Ein grosser Anteil der Siedlungsabfälle in Entwicklungsländern ist kompostierbar. Kompostieranlagen wären daher von grossem Vorteil. Am Beispiel der Stadt Asmara in Eritrea berechnete die Eawag, ob es auch wirtschaftlich ist, solche Anlagen in die städtische Abfallentsorgung zu integrieren.

Fotos: Eawag



Ein grosser Anteil der Siedlungsabfälle in Entwicklungsländern ist kompostierbar. Kompostieranlagen wären daher von grossem Vorteil. Am Beispiel der Stadt Asmara in Eritrea berechnete die Eawag, ob

es auch wirtschaftlich ist, solche Anlagen in die städtische Abfallentsorgung zu integrieren.

- 15 **Abfallflüsse in Santiago de Cuba**
Abfall stellt Entwicklungsländer vor ein grosses Problem. Meist wird er nicht adäquat entsorgt, sondern lediglich auf Müllhalden deponiert. Was kann die Bevölkerung tun, um die Müllberge zu reduzieren?

- 18 **Alarm – zu viele Nährstoffe im Tha Chin**
Mit zunehmender landwirtschaftlicher Intensivierung hat sich die Wasserqualität des Tha Chin in Thailand massiv verschlechtert. Unser Stoffflussmodell zeigt, dass ein Grossteil der unerwünschten Nährstoffe im Fluss aus der intensiven Fischzucht stammt.



- 21 **Den Phosphorkreislauf schliessen**
In Hanoi, Vietnam, gehen grosse Nährstoffmengen einfach mit dem Abwasser verloren und verschmutzen die Gewässer. Unsere Analyse der Stoffflüsse zeigt, wo man ansetzen kann, um nachhaltig mit den Nährstoffen umzugehen.



- 24 **Gefährliche Gasmassen in der Tiefe des Kivu-Sees**
Die im Kivu-See (DR Kongo/Ruanda) enthaltenen Gasmassen können, wenn sie an die Oberfläche gelangen, zu einer Gefahr für die Anwohner werden. Zudem zeigen neuere Messungen, dass die Gaskonzentrationen immer weiter ansteigen. Die Eawag will wissen, woran das liegt.



Verschiedenes

- 27 **Publikationen**
- 30 **Forum: Das genügsame Haus**
Mit ihrem Neubau «Forum Chriesbach» leistet die Eawag einen Beitrag zur 2000-Watt-Gesellschaft und beweist, dass nachhaltiges Bauen keine Utopie ist.
- 32 **In Kürze**

eawag
aquatic research ooo

Impressum

Herausgeberin, Vertrieb: Eawag, Postfach 611, 8600 Dübendorf, Schweiz, Tel. +41 (0)44 823 55 11, Fax +41 (0)44 823 53 75, www.eawag.ch

Redaktion: Martina Bauchrowitz, Eawag

Copyright: Nachdruck möglich nach Absprache mit der Redaktion.

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

Abbildungen: Peter Nadler, Küssnacht

Konzept: TBS Identity, Zürich

Satz, Bild und Layout: Peter Nadler, Küssnacht

Gedruckt: auf Recyclingpapier

Abonnement und Adressänderung: NeuabonnentInnen willkommen.

eawag.news@eawag.ch

ISSN 1420-3979



Hans-Peter Bader, theoretischer Physiker und Leiter der Gruppe «Stoffflüsse in der Anthroposphäre», Hans-Joachim Mosler, Sozial- und Umweltpsychologe sowie Leiter der Gruppe «Modellierung sozialer Systeme»
Koautorin: Martina Bauchrowitz

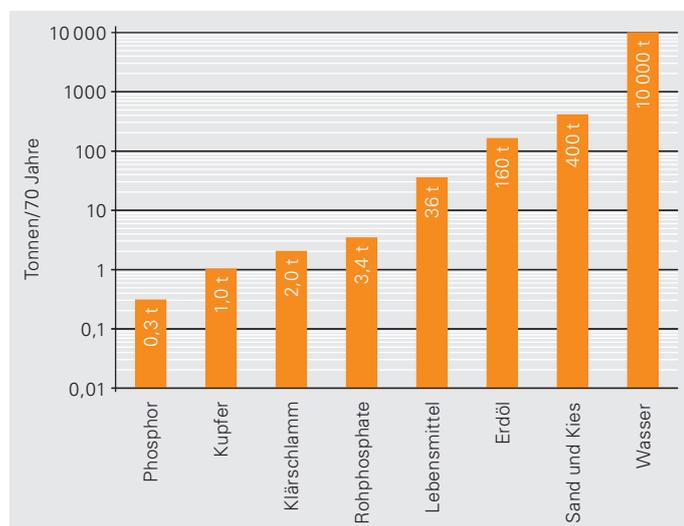
Stoffflüsse: Von der Analyse zum Management

Die Analyse von Stoffflüssen ist im Prinzip eine Umweltbuchhaltung. Nur werden anstelle von Geld- und Vermögenswerten umweltrelevante Stoffe und Güter bilanziert. Die Eawag setzt das Verfahren nun auch vermehrt bei akuten Umweltproblemen in Entwicklungs- und Schwellenländern ein.

Jeder Mensch verursacht im Laufe seines Lebens beträchtliche Güter-, Stoff- und Energieflüsse (Abb. 1) [1]. In den letzten Jahrhunderten sind diese Flüsse extrem angewachsen. Zwei Gründe sind dafür verantwortlich: die starke Zunahme der Weltbevölkerung sowie der bis zu einem Faktor 100 angestiegene Pro-Kopf-Verbrauch. Dies hat entscheidende Auswirkungen auf die Umwelt – Wasser, Boden, Luft – und damit auch auf die Gesundheit der Menschen.

Wirksamer Umwelt- und Gesundheitsschutz mit Hilfe der Stoffflussanalyse. Meist treten die Auswirkungen stofflicher Belastungen jedoch erst stark verzögert zu Tage. So war es auch bei einer endemischen Erkrankung, die Ende der 1940er Jahre bei Arbeitern in den Reisfeldern am Unterlauf des Jintsu-Flusses in Japan auftrat. Die Krankheit, die in vielen Fällen zum Tod führte,

Abb. 1: Mittlerer Stoffumsatz eines Menschen im Verlauf von 70 Lebensjahren (Achtung: logarithmische Skala).



äußerte sich unter anderem in dramatischen Verformungen des Skeletts und starken Schmerzen. Deshalb wird sie im Japanischen auch als «Itai-Itai» bezeichnet, was soviel wie «Aua-Aua» heisst. Erst ca. 20 Jahre später erkannte man, dass die Personen an den Folgen einer Cadmiumvergiftung litten. In einer flussaufwärts gelegene Mine wurde neben Zink auch Cadmium gefördert und die Abwässer der Mine dienten zur Bewässerung der Reisfelder. Cadmium wurde damals und wird zum Teil heute noch in Farbstoffen und Nickel-Cadmium-Batterien sowie als Kunststoffstabilisator und Korrosionsschutz eingesetzt. Es ist in der Anthroposphäre, der menschlichen Umwelt, weit verbreitet (Abb. 2) [2].

Dieses Beispiel zeigt, wie wichtig es ist, schädliche oder unerwünschte Stoffflüsse möglichst frühzeitig zu erkennen. Dabei hilft die Stoffflussanalyse [1]. Sie ermöglicht es, das Schicksal von Stoffen oder Gütern ausgehend von der Entstehung oder Erzeugung über den Aufenthalt in der Anthroposphäre bis hin zur endgültigen Lagerung, Entsorgung oder zum Abbau zu verfolgen. Die Methode ist jedoch auch bei akuten Umweltproblemen interessant, weil man sich – ohne umfangreiche eigene Messkampagnen – mit Daten aus der Literatur einen ersten Überblick über das System, mögliche Ursachen und Verbesserungsmaßnahmen verschaffen kann.

Bevor diese Methode ab Mitte der 1980er Jahre auch in der Umweltforschung angewendet wurde [3], war sie bereits seit mehr als 20 Jahren erfolgreich im Chemieingenieurwesen eingesetzt worden, um den Stoff- und Energieverbrauch chemischer Produktionsprozesse zu optimieren [4]. Und in der Ökonomie arbeitete man sogar schon seit etwa 1930 mit diesem Ansatz [5].

Die Eawag analysiert Stoffflüsse weltweit. Da sich die Stoffflussanalyse in Europa entwickelte, waren erste Anwendungen auch auf diese Länder konzentriert. Es wurden unzählige Studien für verschiedenste Systeme in der Schweiz, Schweden, Holland und im übrigen Europa durchgeführt. Die betrachteten Stoffe waren einerseits Massengüter wie Wasser, Holz, Baustoffe und Energie. Andererseits wurde das Schicksal einzelner Elemente



Datenerhebung: Die Betreiber einer thailändischen Fischzuchtanlage werden zur Fütterungspraktik befragt.

wie der Nährstoffe Stickstoff und Phosphor, der Schwermetalle Kupfer, Eisen, Zink, Cadmium, Quecksilber und Blei, sowie von Kohlenstoff, Schwefel und Chlor als wichtige Komponenten im biogeochemischen Kreislauf verfolgt.

Aktuell führt die Eawag gemeinsam mit Partnern für den Schweizer Raum Studien über Flammschutzmittel, Mikroverunreinigungen, Biozide und Schwermetalle im Zement durch. Zunehmend untersucht die Eawag aber auch Stoffflüsse in Entwicklungs- und Schwellenländern. Hier geht es meist darum, Ursachen für akute Umweltprobleme zu finden oder Verbesserungsmöglichkeiten für bestehende Systeme im Abwasser- und Abfallbereich aufzuzeigen.

Wie geht man vor bei der Analyse von Stoffflüssen? Je nach Fragestellung reicht die Stoffflussanalyse von der Messung und Darstellung der Stoffflüsse in einfachen Systemen bis hin zur Beschreibung komplexer Systemzusammenhänge mit Hilfe von computergestützten mathematischen Modellen. Standardmässig umfasst die computergestützte Stoffflussanalyse heute eine Reihe von Schritten:

- ▶ Auswahl des zu untersuchenden Systems: Einerseits müssen die geografischen und zeitlichen Systemgrenzen festgelegt werden. Andererseits gilt es, die zu bilanzierenden Stoffe und den Detaillierungsgrad des Systems zu bestimmen.

- ▶ Entwicklung des Modells: Aufgrund des aktuellen Systemwissens werden zunächst die für die Stoffflüsse wichtigen Kompartimente (z. B. Wasser, Boden) oder Prozesse (z. B. Privathaushalte, Landwirtschaft, Abwasserwirtschaft) definiert (Abb. 2). Anschliessend übersetzt man die Systemzusammenhänge in mathematische Formeln.

- ▶ Kalibrierung des Modells: Dabei werden Daten für die Modellparameter erhoben. Als Datenquellen dienen Messdaten, Literaturdaten, Schätzwerte sowie Expertenwissen. Die Modellparameter sind die charakteristischen Grössen des Modells, ihre Variation entspricht verschiedenen Modellzuständen. Sie können auf direkten Messdaten wie z. B. Stoffkonzentrationen und Aufenthaltszeiten beruhen. Oft aber sind die Modellparameter indirekte Grössen, z. B. Stoff-Transferkoeffizienten, die zunächst auf Basis der erhobenen Daten berechnet werden müssen. Mit der anschliessenden Schätzung der Modellparameter will man herausfinden, wie genau das Modell das untersuchte System beschreibt.

- ▶ Identifizierung der Schlüsselparameter und Verbesserungsmassnahmen: Das kalibrierte Modell wird benützt, um den Ist-Zustand darzustellen, aber auch, um mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse die Schlüsselparameter (also diejenigen Parameter, auf deren Änderung die Stoffflüsse am sensibelsten reagieren) zu finden sowie um mögliche Massnahmen für gewünschte Veränderungen zu simulieren.

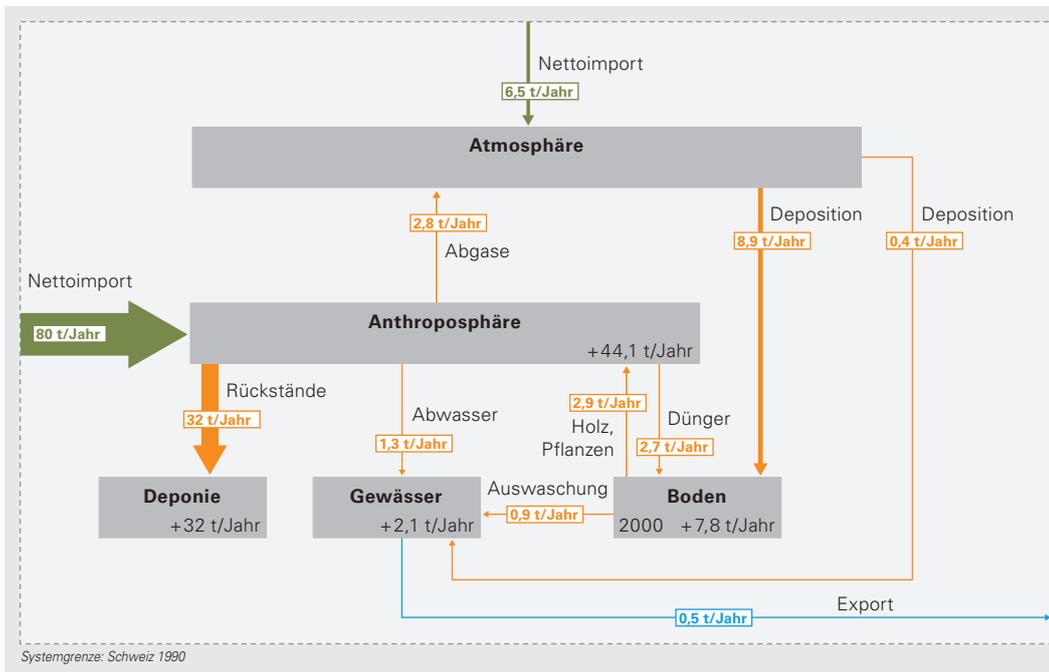


Abb. 2: Cadmiumflüsse (Tonnen) im Jahr 1990 in der Schweiz [Daten aus 2]. Die Zahlen in den Kästchen rechts unten bezeichnen den Lagerzuwachs. Die Zahl links unten im Kästchen «Boden» gibt die Cadmiummenge an, die dort in der Vergangenheit angereichert wurde. Entsprechende Zahlen für die anderen Kompartimente existieren nicht.

► Interpretation der Ergebnisse: Die Ergebnisse werden unter Einbezug der Betroffenen und Beteiligten bewertet und diskutiert.

Um die Stoffflussanalyse zu erleichtern, wurde an der Eawag das Simulationsprogramm SIMBOX entwickelt (siehe Kasten). Erste einfachere Stoffflussanalysen wurden ohne Modellierung

durchgeführt [3]. Man bestimmte die Grösse der Stoffflüsse aus Datenquellen, visualisierte die Ergebnisse in einer grafischen Darstellung und diskutierte potenzielle Steuerungsmöglichkeiten anhand dieses einfachen Modellschemas.

SIMBOX

SIMBOX ist ein an der Eawag entwickeltes Computerprogramm zur Simulation anthropogener Massen-, Strom-, Energie- und Geldflüsse [6]. Es wird heute international von Ingenieurbüros, Firmen, Behörden und Forschungsinstitutionen verwendet. Das System wird grafisch iterativ aufgebaut. Anschliessend wird der Modellansatz in einer Datei mit mathematischen Gleichungen definiert. Aufgrund der eingegebenen Daten und Gleichungen berechnet SIMBOX die Flüsse (und Lager) für einen momentanen Zustand (stationäres System) oder in Funktion der Zeit (dynamisches System). Für die grafische Darstellung der Modellergebnisse bietet SIMBOX eine Reihe von Möglichkeiten: Flussdiagramme, Zeitverläufe, Animationen sowie Spezialdarstellungen. Darüber hinaus kann das Programm mittels Unsicherheitsanalyse abschätzen, wie glaubwürdig die gemachten Aussagen sind und kann durch die Sensitivitätsanalyse berechnen, welche Modellparameter die Stoffflüsse entscheidend beeinflussen.

Datensammlung durch direkte Messungen der Stoffe vor Ort. Grundlage einer Stoffflussanalyse sind die eingehenden Daten. Am besten ist es natürlich, wenn die Stoffe direkt vor Ort gemessen werden. Das ist dann möglich, wenn die Systemgrenzen relativ eng gefasst sind wie im Beitrag von Linda Roberts und Stephan Hug auf S. 9. Darin geht es um die Arsenkonzentrationen und -flüsse in einem Reisfeld. Seit der landesweiten Einführung von Grundwasserpumpen in Bangladesch gelangt Arsen kontinuierlich mit dem Bewässerungswasser auf die Reisfelder. Die Eawag-Forschenden wollen abschätzen, wie sich das Arsen in der Umwelt verhält und ob es zu einer Gefahr für die Menschen wird.

Messungen vor Ort sind auch dann sinnvoll, wenn ein einzigartiges System im Blickpunkt steht. So geht es im Artikel von Martin Schmid auf S. 24 um den Kivu-See in Zentralafrika. Er enthält in seinem Tiefenwasser grosse Mengen von Kohlendioxid und Methan. Gelangten diese Gase an die Oberfläche, würden die Anwohner aufgrund des dann herrschenden Sauerstoffmangels ersticken. Neue Messungen zeigen, dass der Methangehalt und damit das Risiko eines Gasausbruchs in den letzten drei Jahrzehnten noch weiter angestiegen ist. Die Eawag untersucht, worauf das zurückzuführen ist.

Datenlücken durch Abschätzungen schliessen. Was kann man tun, wenn das zu untersuchende System zu umfangreich und komplex ist, um überall direkte Messungen vornehmen zu

können? In diesem Fall stützt man sich auf bereits vorhandene Literaturdaten (auch aus vergleichbaren Systemen) und versucht, Datenlücken durch Schätzungen zu schliessen. Dies ist zum einen möglich, in dem die am System beteiligten Parteien oder Personen direkt befragt werden. Um beispielsweise beurteilen zu können, wieviel Futter die Fische in den Fischkulturen am Tha Chin in Thailand bekommen, besuchten die Eawag-Forscherinnen Monika Schaffner und Irene Wittmer die Betreiber vor Ort und liessen sich von ihnen detailliert darüber informieren. Ziel ihres Projekts ist es, herauszufinden, wo die Quellen für die Überdüngung des Flusses liegen und was dagegen getan werden kann (siehe Beitrag auf S. 18).

Zum anderen können Datenlücken mit Hilfe von Expertenwissen gefüllt werden. Für ihr Projekt in der Provinz Hanoi, Vietnam, holte die Eawag-Forscherin Agnes Montangero die Meinungen von Experten ein (siehe Artikel auf S. 21). Dadurch konnte sie abschätzen, dass nur recht wenig Phosphor im dort gebräuchlichen Sanitärsystem mit Klärgruben zurückgehalten wird. Auch in diesem Projekt geht es darum aufzuzeigen, wie die Nährstoffbelastung der Gewässer vermindert werden kann. Die Berechnungen zeigen, dass ein Toilettensystem mit Urinseparierung die Wasserqualität wesentlich verbessern würde.

Bewertung der Resultate. Ein weiterer wichtiger Schritt in der Stoffflussanalyse ist die Bewertung der Ergebnisse. Dabei wird abgeschätzt, welche Auswirkungen die Stoffflüsse tatsächlich auf die Umwelt und die Gesundheit der Menschen haben. Dies ist mit der Stoffflussanalyse alleine jedoch nicht möglich. Es braucht zusätzliche Kenntnisse aus anderen Wissensgebieten wie der Ökotoxikologie, der Biologie und der Limnologie. Zum Beispiel ist es notwendig, die Daten aus der Stoffflussanalyse in Relation zu

setzen zu ökotoxikologischen «Qualitätszielen» (Grenzwerte). Sie geben die maximalen Stoffkonzentrationen an, die zum Schutz der Umwelt und des Menschen nicht überschritten werden dürfen. Auch die in der Region natürlicherweise vorkommenden Stoffflüsse müssen mit in die Bewertung einbezogen werden.

Stoffflussanalysen mit partizipativen Prozessen kombinieren. Schliesslich sollen die Ergebnisse der Stoffflussanalyse für das Umweltmanagement von Nutzen sein und als Entscheidungshilfen für zukünftige Massnahmen dienen. Deshalb wird die Stoffflussanalyse heute verstärkt an partizipative Prozesse gekoppelt und man versucht, die am System beteiligten Personen und Entscheidungsträger möglichst frühzeitig einzubeziehen [7]. Vorteilhaft ist dabei die leicht verständliche Datendarstellung (Abb. 2), die es ermöglicht, den Ist-Zustand eines Systems direkt mit den möglichen Verbesserungsszenarien zu vergleichen.

Management: Gezielt Meinungen einholen und gemeinsam Lösungen erarbeiten. Beispielsweise können Vertreter bestimmter Gruppierungen oder der Bevölkerung im Rahmen einer Befragung oder eines Workshops um ihre Meinung gebeten werden. Um herauszufinden, welches Szenario sie am meisten überzeugt und damit wahrscheinlich die grösste Aussicht auf Erfolg hat, lässt man die Beteiligten die verschiedenen Szenarien z. B. in Bezug auf Umweltauswirkungen, Kosten oder Machbarkeit beurteilen. Will man zudem einschätzen, ob es schwierig ist, die Verbesserungsszenarien in die Praxis umzusetzen, können die Beteiligten befragt werden, wie stark sie sich für deren Realisierung einsetzen würden. Das tat auch Hans-Joachim Mosler (siehe Beitrag auf S. 15), der in seiner Studie der Frage nachging, was die Bevölkerung von Santiago de Cuba tun könnte, um die im Haushalt anfallende Abfall-

Datenerhebung: In Bangladesch wird der Arsengehalt des Grundwassers gemessen, das zur Bewässerung der Reisfelder dient.



S. Hug, Eawag

Modellberechnung: Aufgrund der erhobenen Daten können die Stoffflüsse als Modell dargestellt und Veränderungsszenarien simuliert werden.



S. Rothenberger, Eawag



C. Wongsupap, Asian Institute of Technology, Bangkok

Entscheidungshilfe: Am Workshop werden die Ergebnisse einer Stoffflussanalyse sowie mögliche Verbesserungsmaßnahmen diskutiert.

menge zu reduzieren. Durch eine Umfrage wurde die Meinung der Bevölkerung zum Abfallmanagement eingeholt. Eine der Fragen drehte sich gezielt um die Bereitschaft der Haushalte, sich am Trennen, Kompostieren oder Recyclen des Abfalls zu beteiligen.

Bei der Arbeit mit kleinen bis mittelgrossen Gruppen kann die Stoffflussanalyse überdies zum Ausprobieren neu entwickelter Alternativen eingesetzt werden. Denn im Gruppengespräch entstehen schnell einmal neue Ideen zur Problemlösung, die man sofort in weiteren Szenarien testen möchte. Möglicherweise wird dadurch ein Konsensprozess ausgelöst, der die unterschiedlichen Positionen der Gruppenmitglieder einander annähert.

Die Verantwortlichen mit stichhaltigen Argumenten überzeugen.

Die Stoffflussanalyse eignet sich insbesondere für eine unvoreingenommene Betrachtung der Stoffflüsse in einem System. Obschon jeder Beteiligte eine Meinung z. B. über die Hauptverschmutzungen und ihre Ursachen hat, muss er sich mit einer gut begründeten Sichtweise der Probleme auseinandersetzen. Damit sich die Personen wirklich auf den Prozess einlassen können und die Grundlagen nicht anzweifeln, sollten sie aber bereits beim Aufbau der Stoffflussanalyse einbezogen werden. So soll die im Projekt von Silke Rothenberger (siehe Beitrag auf S. 12) erstellte Stoffflussanalyse der Behörde für Abfallmanagement in Asmara, Eritrea, die Vorteile der dezentralen Kompostierung organischer Abfälle aufzeigen. Darin wurden sowohl die Abfallströme aufgezeichnet als auch die Entsorgungskosten beziffert. Für die lokalen Verantwortlichen ergab sich eine völlig neue Sichtweise, die sehr positiv aufgenommen wurde. Trotzdem bleibt die Frage offen, ob man durch den Einsatz der Stoffflussanalyse weg von den eher interessengeleiteten und machtbegründeten Entscheidungen und hin zu nachhaltigen Lösungen kommt.

Stoffflussanalysen werden immer umfassender. In den letzten Jahren wurde die Methode der Stoffflussanalyse an der Eawag und an anderen Orten stark erweitert. Einige Beispiele sind: Die Kombination mit neuen Modellierungsmethoden und die Ausweitung auf dynamische Systeme [1]. Es können ökonomische Überlegungen einbezogen werden, indem man die Geldflüsse darstellt [8]. Um die Ergebnisse einzuschätzen, werden Expertenmeinungen als so genanntes subjektives Systemwissen mit Wahrscheinlichkeitsfunktionen bewertet [9]. Partizipative Prozesse unterstützen die Entwicklung und Umsetzung von Problemlösungen [6]. Die Stoffflussanalyse kann durch Modellierungen zum Verbleib der Stoffe in den Umweltkompartimenten sowie durch eine Bewertung der Gesundheitsrisiken ergänzt werden [10]. Kurzum, die Stoffflussanalyse ist ein flexibles und potentes Instrument im Umweltmanagement. ○ ○ ○

- [1] Baccini P., Bader H.-P. (1996): Regionaler Stoffhaushalt, Erfassung, Bewertung und Steuerung, Spektrum Verlag, Heidelberg, 420 p.
- [2] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (1997): Cadmium – Stoffflussanalyse. BUWAL, Schriftenreihe Umwelt, Nr. 295, 74 S.
- [3] Baccini P., Brunner P. (1991): Metabolism of the anthroposphere. Springer Verlag, Berlin, 157 p.
- [4] Levenspiel O. (1962): Chemical Reaction Engineering: an introduction to the design of chemical reactors. Wiley, New York, 501 p.
- [5] Leontief W. (1936): Quantitative Input and Output Relations in the Economic Systems of the US. Review of Economic Statistics XVIII, 105–125.
- [6] www.eawag.ch/research/siam/software/d_simbox.html
- [7] Grimble R. & Wellard K. (1997): Stakeholder methodologies in natural resource management: a review of principles, contexts, experiences and opportunities. Agricultural systems 55, 173–193.
- [8] Bader H.-P., Scheidegger R., Real M. (2006): Global renewable energies: a dynamic study of implementation time, greenhouse gas emissions and financial needs. Clean Technologies and Environmental Policy 8, 159–173.
- [9] Holtmann X., Bader H.-P., Scheidegger R., Wieland R. (2005): SIMBOX-FUZZY: ein Tool zur Bewertung von Stoffflüssen basierend auf unscharfem Wissen. In: J. Wittmann, X.N. Thinh (Hrsg.) Konferenzband: Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften, Workshop Dresden, Shaker Verlag Aachen, S. 261–271.
- [10] Kwonpongsagoon S. (2006): Integration of substance flow analysis, transport and fate of materials in the environment, and environmental risk assessment for provision of information for regional environmental management: Cadmium as a case study in Australia. Thesis at University of New South Wales, Australia.



Arsen im Reisfeld – eine Gefahr?

Linda Roberts, Umweltnaturwissenschaftlerin, schreibt ihre Doktorarbeit zu diesem Thema und Stephan Hug, Chemiker, Leiter der Arbeitsgruppe «Chemie von Wasserressourcen»

Vielerorts in Bangladesch werden Reisfelder mit arsenhaltigem Grundwasser bewässert. Dadurch gelangen jährlich über 1000 Tonnen Arsen auf die landwirtschaftlichen Böden. Mit Partnern an der ETH Zürich und in Bangladesch untersucht die Eawag, was mit diesem Arsen geschieht: Reichert es sich in den Böden an oder wird es während der Regenzeit wieder mobilisiert?

Bangladesch ist in vieler Hinsicht ein Land der Extreme. Es liegt auf dem grössten Flussdelta der Erde, gebildet von den drei Flüssen Ganges, Bramaputhra und Megna. Auf seiner Fläche von 144 000 km², dreieinhalbmal so gross wie die Schweiz, wohnen über 147 Millionen Menschen. Während in der Monsunzeit von Juli bis Oktober fast das ganze Land überschwemmt wird, herrscht den Rest des Jahres über Trockenheit. Mit einem jährlichen Pro-Kopf-Einkommen von 440 US\$ [1] steht Bangladesch vor grossen sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Herausforderungen. Politisch ist das Land relativ stabil und demokratisch; und die Regierung unternimmt erfolgreiche Anstrengungen, um die allgemeine Situation zu verbessern. Eine der grössten Herausforderungen ist die Versorgung der Bevölkerung mit Wasser zum Trinken sowie zum Bewässern in der Landwirtschaft.

Arsen im Trinkwasser. Von 1970 an erfolgte mit internationaler Hilfe die Umstellung der Trinkwasserversorgung von Oberflächenwasser auf Grundwasser. Heute versorgen über 10 Millionen handbetriebene Rohrbrunnen praktisch die ganze ländliche Bevölkerung, was die Zahl der wasserbedingten Infektionskrankheiten deutlich reduziert hat und dadurch als grosser Erfolg gewertet werden kann. Leider wurde damals versäumt, das Wasser auf chemische Problemstoffe zu untersuchen. Zwischen 1992 und 1998 wurde bekannt, dass ungefähr ein Viertel der Brunnen Wasser mit über 50 µg Arsen pro Liter liefern [2]. Arsen (As) ist eine so genannte geogene Verunreinigung des Grundwassers: es ist natürlicherweise in den Sedimenten im Untergrund vorhanden und löst sich unter den sauerstofffreien Bedingungen nach und nach im Grundwasser. Der Konsum des belasteten Wassers kann zu chronischen Arsenvergiftungen führen. Mit 30–50 Millionen Betroffenen spricht die WHO von der grössten Massenvergiftung in der Geschichte der Menschheit [3]. Der Grenzwert der WHO, USA und Europäischen Union für Arsen im Trinkwasser ist 10 µg/l.

Eintrag von Arsen auf die Reisfelder. Eng verbunden mit dem Trinkwasserproblem ist der Einsatz des Grundwassers in der Landwirtschaft. Durch den bewässerten Anbau von ertragreichem Boro-Reis während der Trockenzeit konnte die Reisproduktion mit

dem Bevölkerungswachstum mithalten. Neben dem traditionellen Amman-Reis macht Boro-Reis heute 50% der Reisernte aus und erhält Bangladesch in Bezug auf die Nahrungsmittelproduktion unabhängig [4]. Wie die Trinkwasserbrunnen fördern die meisten Bewässerungspumpen Wasser aus 30–60 m Tiefe, wo die Arsenkonzentrationen am höchsten sind. Die Felder werden zwischen Januar und Mai mit insgesamt etwa 1 m Grundwasser bewässert. Dadurch werden landesweit schätzungsweise 1000 Tonnen Arsen [5] direkt auf die Reisfelder gepumpt. Für die Landwirtschaft und die Bevölkerung ist es eine Überlebensfrage, was mit diesem Arsen geschieht. Falls das Arsen jährlich akkumuliert, wird es die Böden zunehmend belasten und in die Nahrungsmittel gelangen. Längerfristig könnten die Erträge sinken und der Boden für die Landwirtschaft unbrauchbar werden.

Dieselbetriebene Bewässerungspumpen fördern arsenhaltiges Grundwasser auf die Reisfelder.



S. Hug, Eawag

Gefahr für Pflanzen und Menschen? Einige Untersuchungen zeigen, dass die Arsenkonzentrationen im Oberboden während der Bewässerung stark zunehmen, nach der Monsunflut jedoch wieder zurückgehen [5, 6]. Diese Analysen sind allerdings zu wenig genau und örtlich nicht genügend gut aufgelöst, um Stoffbilanzen erstellen und längerfristige Voraussagen machen zu können. Wenn es stimmt, dass die Arsenkonzentrationen im Boden jeweils nach der Flut wieder absinken, stellt sich die Frage, wohin das Arsen verlagert wird. Wird es mit dem Flutwasser in Richtung Meer geschwemmt oder verteilt es sich in tiefere Bodenschichten?

Bei Messungen der Arsenkonzentrationen in Reispflanzen wurden erhöhte Konzentrationen in den Wurzeln, moderat erhöhte Konzentrationen in den Stängeln und Blättern und praktisch normale Konzentrationen in den Reiskörnern nachgewiesen [7]. Kurzfristig sind diese Resultate beruhigend und lassen hoffen, dass die Belastung durch arsenhaltige Nahrungsmittel, neben der durch Arsen im Trinkwasser, in den nächsten Jahren nicht auch noch signifikant zunimmt. Ob dies auch langfristig so bleibt, ist unklar.

Gemeinsames NSF-Projekt der Eawag und der ETH. Um solche grundlegende Fragen zu beantworten, arbeitet die Eawag seit Anfang 2005 mit der Gruppe Bodenchemie am Institut für Biogeochemie und Schadstoffdynamik (IBP) der ETH Zürich und der Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET) zusammen. Die Strategie ist, sich auf einige wenige Reisfelder in einer typischen Anbauregion zu beschränken und die darin ablaufenden Prozesse detailliert zu analysieren. Aufgrund dieser Ergebnisse sollen Stoffflussmodelle entwickelt werden, die auch auf andere Regionen anwendbar sind. Parallel dazu werden hydrologische und geochemische Aspekte von Forschungsgruppen aus den USA, Bangladesch und der Eawag erforscht.

Das Untersuchungsgebiet (Abb. 1) befindet sich 40 km südlich von Dhaka, im Distrikt Munshiganj, nahe des Dorfs Srinagar. In dieser Gegend wird nur Boro-Reis angebaut. Im Testgebiet versorgt eine Grundwasserpumpe mehrere Felder über Kanäle, die nach Bedarf geöffnet und mit Lehm wieder geschlossen werden.

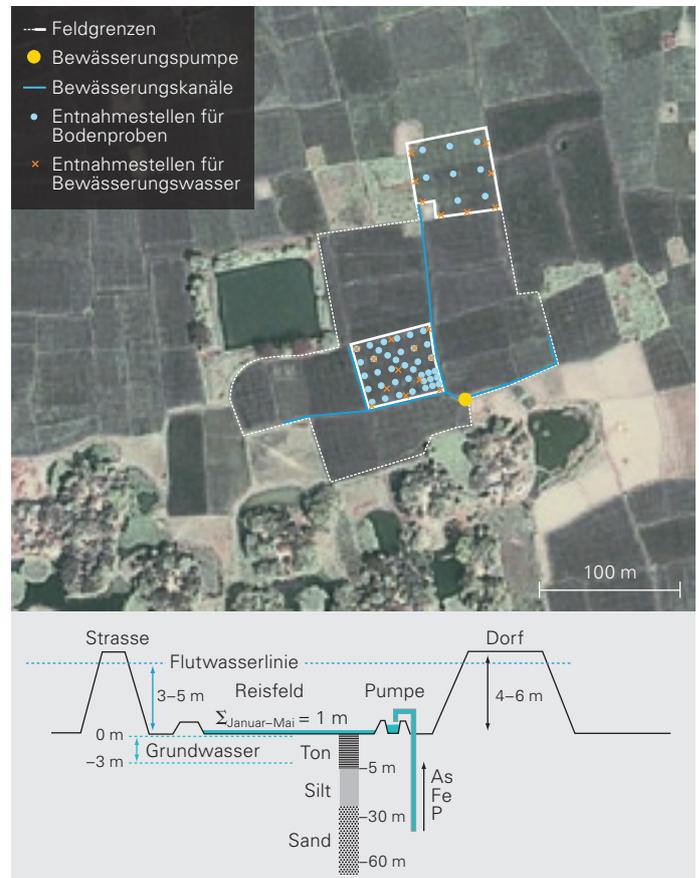
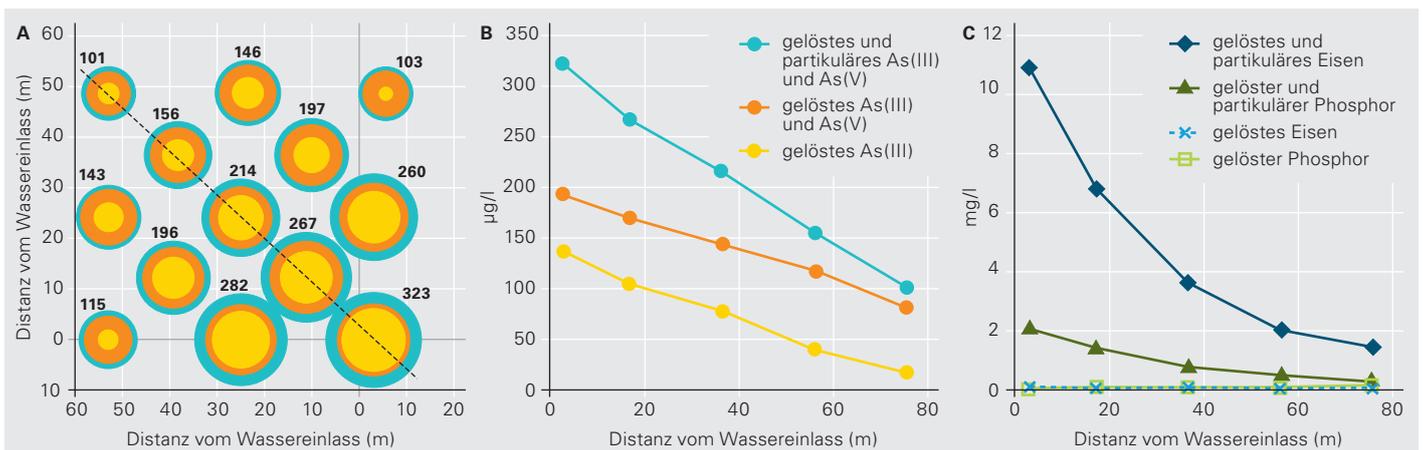


Abb. 1: Satellitenaufnahme (oben) des 3 Hektar grossen Testgebiets und vertikaler Querschnitt (unten). Um eine Überflutung während des Monsuns zu vermeiden, sind Strassen und Dörfer auf Lehmaufschüttungen gebaut.

Zwischen den Bewässerungsphasen, die 3–5 Stunden dauern und die Felder 3–10 cm tief überfluten, wird jeweils mehrere Tage nicht bewässert, oft bis die Felder trocken werden.

Abb. 2A: Arsenkonzentrationen ($\mu\text{g/l}$) im Feldwasser 1–2 Stunden nach Ende der Bewässerung. 2B und 2C: Konzentrationen von Arsen, Eisen und Phosphor auf der in 2A eingezeichneten Diagonalen. Die Abnahme der Arsenkonzentration beruht auf der Ausfällung von Arsen mit Eisenhydroxiden.



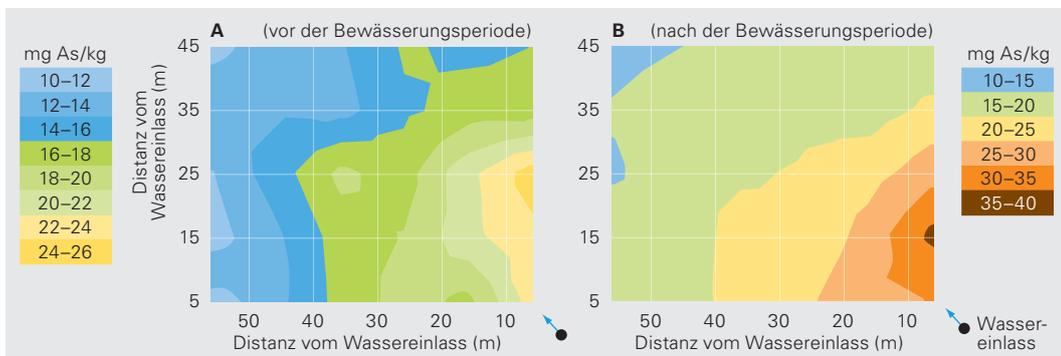


Abb. 3: Arsenkonzentrationen im Oberboden (0–10 cm) vor (A) und nach (B) der Bewässerungsperiode von Januar bis Mai 2005 (Jessica Dittmar, Andreas Voegelin und Ruben Kretzschmar, IBP, ETH Zürich).

Arsen bildet mit Eisenhydroxid feine Partikel, die sich am Boden absetzen. In einer ersten Testkampagne wollten wir herausfinden, was mit dem Arsen während und nach der Bewässerung geschieht. Da Arsen insbesondere mit Eisen und Phosphat Wechselwirkungen eingeht, war es wichtig, auch die Konzentrationen dieser Stoffe zu bestimmen. Zudem muss man wissen, dass Arsen in zwei Oxidationsstufen vorkommt: As(III) ist die unter reduzierenden Bedingungen stabile Form von Arsen. Es bindet relativ schwach an mineralische Oberflächen und ist daher im Wasser mobil. As(V) dagegen dominiert unter oxidischen Bedingungen und adsorbiert stark an Mineralien, insbesondere an Eisenoxiden.

Das im sauerstofffreien Grundwasser gelöste Eisen(II) oxidiert an der Luft innerhalb von 30–60 Minuten zu Eisen(III). Es bilden sich braune Eisen(III)hydroxide, die As(V), Phosphat und andere zuvor gelöste Stoffe ganz oder teilweise binden. Unsere Untersuchungen haben ergeben, dass diese sehr feinen Partikel teilweise bereits in den Kanälen entstehen, sich aber dort nicht absetzen können und somit auf die Felder geschwemmt werden. Der Eintrag von Arsen hängt also nicht von der Distanz der Felder zur Grundwasserpumpe ab. Nachdem das Wasser jedoch durch eine Öffnung im Kanal auf ein Feld gelangt, verlangsamt sich die Strömungsgeschwindigkeit und es dauert 2–3 Stunden, bis es die entfernten Punkte im Feld erreicht. In dieser Zeit setzen sich die Eisenhydroxide grösstenteils auf dem Boden ab, so dass ein Teil des Arsens aus dem Wasser entfernt wird (Abb. 2). Dies führt zu einer heterogenen Verteilung des Arsens im Boden und im Wasser. Zwei Tage nach der Bewässerung sind Eisen, Arsen und Phosphat fast vollständig aus dem Wasser verschwunden. Die heterogene Verteilung des Arsens auf den Feldern zeigt sich am Ende der Bewässerung auch deutlich in den Bodenproben (Abb. 3).

Während des Monsuns wird das im Boden angereicherte Arsen wieder mobilisiert. Was passiert mit dem Arsen in der Monsunzeit, wenn die Felder 4–5 Monate lang durch Fluss- und Regenwasser überschwemmt sind? Wir konnten nachweisen, dass die Arsenkonzentrationen im Boden während dieser Zeit wieder deutlich zurückgehen. Dies ist wahrscheinlich auf die reduktive Auflösung von Eisen(hydr)oxiden zurückzuführen, bei der adsorbiertes Arsen ebenfalls gelöst wird. Erste Messungen in der Wassersäule eines überfluteten Reisfelds ergaben, dass

ein Teil des mobilisierten Arsens ins Flutwasser gelangt. Im Vergleich liegen die in den Jahren 2004 und 2005 jeweils nach Ende der Regenzeit im Dezember erhobenen Arsenkonzentrationen im Boden in derselben Grössenordnung. Trotzdem spricht die heterogene Arsenverteilung im Boden dafür, dass die Bewässerung mit arsenhaltigem Grundwasser, mit der in unserem Untersuchungsgebiet vor ca. 15 Jahren begonnen wurde, bereits zu einer Arsenanreicherung geführt hat.

Welcher Anteil des Arsens in tiefere Bodenschichten verlagert oder oberflächlich mit dem Flutwasser ins Meer transportiert wird, muss noch im Detail untersucht werden. In jedem Fall ist die Verlagerung des Arsens in tiefere Bodenschichten als wesentlich problematischer einzuschätzen als ein lateraler Transport mit dem Flutwasser ins Meer, bei dem das Arsen stark genug verdünnt und damit keine Gefahr mehr darstellen würde. ○ ○ ○

- [1] <http://www.bangladeshinfo.com/business>
- [2] Kinniburgh D.G., Smedley P.L. (2001): Arsenic contamination of groundwater in Bangladesh, Final Report Summary. British Geological Survey & Bangladesh Department for Public Health Engineering.
- [3] Smith A.H., Lingas E.O., Rahman M. (2000): Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency. *Bulletin of the World Health Organization* 78, 1093–1103.
- [4] Ministry of Agriculture Bangladesh (2005): Handbook of Agricultural Statistics. <http://www.moa.gov.bd/statistics/statistics.htm>
- [5] Saha G.C., Ali M.A. (in press): Dynamics of arsenic in agricultural soils irrigated with arsenic contaminated groundwater in Bangladesh. *Science of the Total Environment*.
- [6] Roberts L.C., Dittmar J., Saha G.C., Hug S.J., Voegelin A., Kretzschmar R., Ali M.A., Badruzzaman A.B.M. (2006): Spatial heterogeneity of arsenic input to paddy soil through irrigation water in Bangladesh. *Conference Proceedings, International Symposium on Environmental Sustainability (ISES), February 7–9, Dhaka, Bangladesh*.
- [7] Abedin M.J., Cotter-Howells J., Meharg A.A. (2002): Arsenic uptake and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) irrigated with contaminated water. *Plant Soil* 240, 311–319.

Dezentral kompostieren: wirtschaftlich sinnvoll?

In Entwicklungsländern belegen einige kleinräumige Pilotprojekte die Vorteile dezentraler Kompostieranlagen. Doch wie würde sich eine flächendeckende Verteilung solcher Anlagen auf die städtische Abfallentsorgung auswirken? Am Beispiel der Stadt Asmara in Eritrea ermittelte die Eawag mit einem neu entwickelten Modell die Abfallflüsse sowie die Entsorgungskosten und berechnete verschiedene Alternativszenarien.

Ein grosser Anteil der Siedlungsabfälle in Entwicklungsländern ist kompostierbar. Er schwankt je nach Entwicklungsstand und Ernährungsweise zwischen 50 und 70%. Meist aber landet auch dieses Material auf der Deponie und es gehen wertvolle Nährstoffe verloren. Hier wären dezentrale Kompostieranlagen von grossem Vorteil. Das sind kleinere Einrichtungen, die täglich bis zu drei Tonnen Abfall aus der näheren Umgebung sammeln, sortieren und kompostieren. Sie sind nicht nur aufgrund des Nährstoffrecyclings interessant, sondern auch weil sie die lokale hygienische Situation nachweislich verbessern und weil insgesamt weniger Abfall abtransportiert und auf Deponien gelagert werden muss.

Nur selten jedoch sind dezentrale Kompostieranlagen in die städtische Abfallentsorgung eingebunden. Meist werden sie von den Behörden nur geduldet. Die dezentrale Kompostierung könnte aber als strategisches Element der Abfallwirtschaft stadtwweit eine wichtige Rolle spielen. Um die lokalen Behörden von den Vorzügen dieses Systems zu überzeugen, bedarf es einer Analyse der Ab-

fallflüsse sowie der anfallenden Kosten. Solche Zahlen sind auf städtischer Ebene in Entwicklungsländern bisher kaum ermittelt worden. Hier setzte die Arbeit der Eawag an.

Materialflussanalyse und Prozesskostenrechnung. Als Methode wendeten wir eine Kombination aus Materialfluss- und Prozesskostenanalyse an, um den Einfluss der Kompostierung auf die städtische Abfallentsorgung zu berechnen. Dabei werden die Prozesse der städtischen Abfallentsorgung sowie die Abfallflüsse in einem Modell dargestellt. Darüber hinaus werden die Abfallflüsse mit den Kosten der beteiligten Prozesse in Beziehung gesetzt. Eine Stärke unseres Modells ist es, innerhalb kurzer Zeit verschiedene Szenarien mit anderen Prozessen zu berechnen: z.B. Abfallentsorgungen mit und ohne Kompostieranlagen. Schliesslich beschreibt das Modell, wie die neuen Prozessabläufe sowie die entsprechend veränderten Abfallströme die Kosten des Abfallmanagements insgesamt verändern. Unser Modell wurde basierend auf bestehenden Erfahrungen zur städtischen Abfallentsorgung in Entwicklungsländern entwickelt und erstmals am Beispiel der Stadt Asmara in Eritrea getestet.

Eine Strassenkehrerin sammelt Grünabfälle in der Nähe des Marktes ein.



Fotos: S. Rothenberger, Eawag

Dezentrale Kompostierung verringert die Abfallmenge und den Transportaufwand zur Deponie. In Eritrea führten wir unsere Untersuchung in Zusammenarbeit mit der Universität Asmara und der Stadtverwaltung durch [1–3]. Asmara besitzt bisher keine Kompostieranlagen. Eine Studie belegt allerdings den hohen Bedarf an Kompost in der stadtnahen Landwirtschaft [4]. Abbildung 1A zeigt das Modell des Abfallmanagements in Asmara im Jahr 2004. Die Stadt sammelte und deponierte eine Gesamtmenge von 44 364 Tonnen Abfall. 17 745 Tonnen davon – hauptsächlich Staub, Blätter und Kleinverpackungen – nahm die Strassenreinigung auf. Haushaltsabfälle wurden entweder von der Kehrichtabfuhr direkt abgeholt oder von den Haushalten in kommunalen Sammelcontainern deponiert. Diese Container werden regelmässig ausgetauscht und ebenso wie die Kehrichtwagen auf der 6 km entfernten Deponie entleert. Etwa 52% des gesamten Abfalls in Asmara sind biologisch abbaubar und für die Kompostierung ge-



Silke Rothenberger, Wirtschaftsingenieurin und Projektleiterin im Bereich Abfallmanagement der Abteilung Wasser und Siedlungshygiene in Entwicklungsländern – Sandec
Koautoren: Chris Zurbrügg und Christian Müller

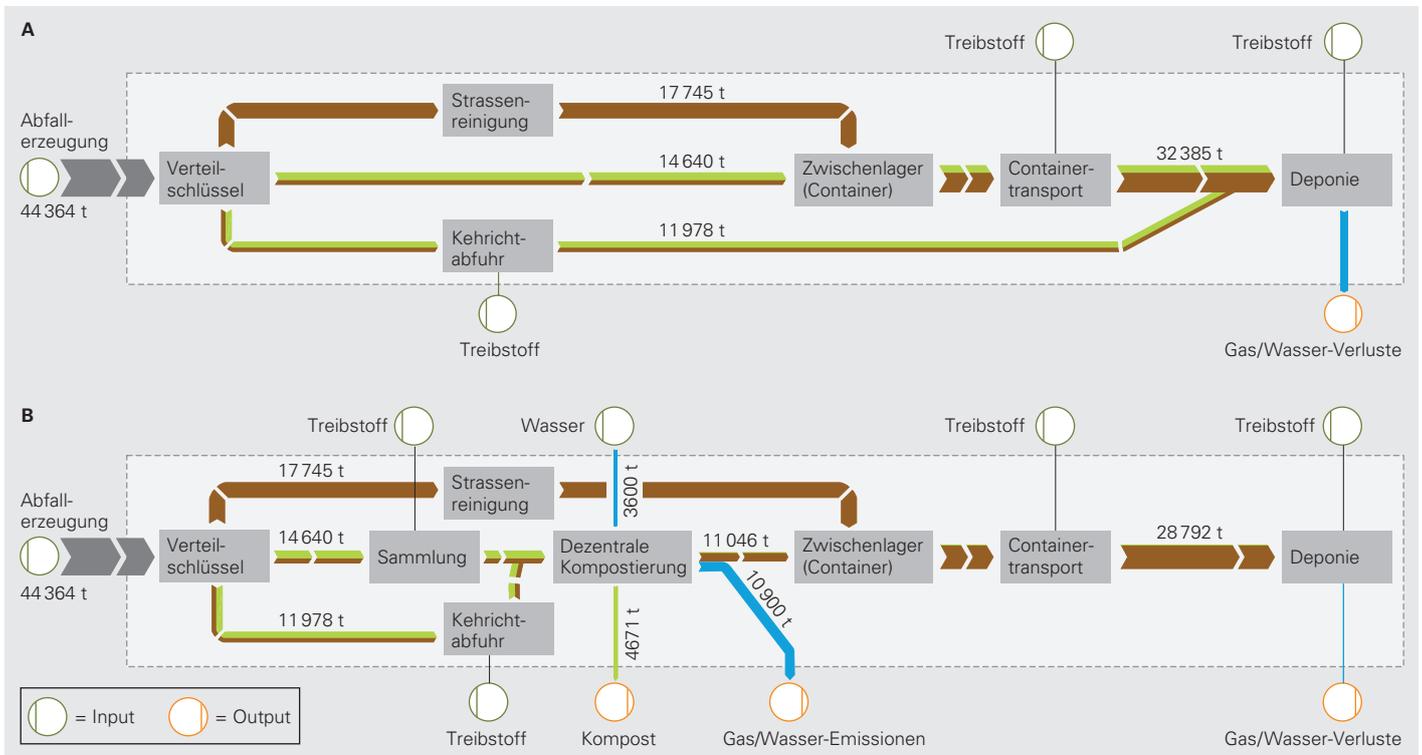


Abb. 1: Prozesse und Materialflüsse im derzeitigen System der Abfallentsorgung von Asmara ohne Kompostieranlage (A) und in einem Zukunftsszenario mit dezentralen Kompostieranlagen (B). Die Pfeildicke ist proportional zu den Abfallflüssen. Grau: gemischte Abfälle, grün: Grünabfälle, braun: Restabfälle.

eignet. Das Modell berücksichtigt bei der Kostenberechnung auch den Treibstoffbedarf für den Transport des Abfalls. Zudem bezieht das Modell die Verwaltungskosten des Abfallmanagements ein.

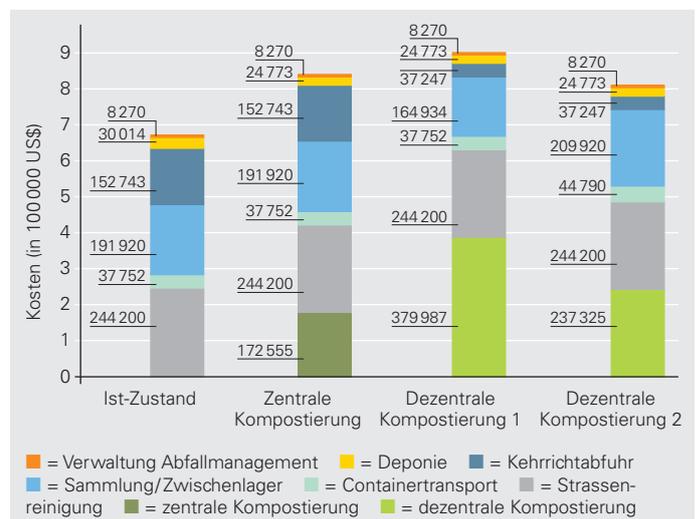
Abbildung 1B zeigt ein Szenario, bei dem der Abfall vor dem Transport zur Deponie in mehreren dezentralen Anlagen innerhalb der Stadt separiert und der organische Anteil kompostiert wird. Lediglich die Reste und der Abfall aus der Strassenreinigung werden zur Deponie gebracht. Durch die dezentrale Kompostierung reduziert sich nicht nur die Abfallmenge um 35% – erkennbar an den CO₂ und Wasserdampfemissionen – sondern auch der Transportaufwand sinkt. Die reduzierte Abfallmenge entspricht circa 500 Lastwagenladungen pro Jahr. Ausserdem kann die Nutzungsdauer der Deponie um 30% verlängert werden. Bei einer Nutzung von 20 Jahren bedeutet dies eine Verlängerung um bis zu 6 Jahren. Mit Hilfe der Prozesskostenrechnung können diese Veränderungen im System nun auch monetär bewertet und dargestellt werden.

Jede Verbesserung des Systems ist mit Mehrkosten verbunden. Asmara gibt jährlich etwa 670 000 US\$ für die Abfallentsorgung aus. Gemeinsam mit der Stadtverwaltung schlüsselten wir die Ausgaben einerseits nach ihrer Kostenstruktur (z.B. Löhne und Gehälter, Instandhaltung, Treibstoff, Abschreibung etc.) und andererseits nach den in der Materialflussanalyse definierten Prozessen auf. Für die Verantwortlichen ergab sich dadurch eine völlig neue Sichtweise und unerwartete Transparenz, die sehr positiv aufgenommen wurde. Insgesamt werden heute 57% des Abfall-

management-Budgets für die Sammlung und den Transport des Abfalls aufgewendet (Abb. 2, linke Säule).

Neben der Ist-Situation haben wir für Asmara auch die Kosten von drei Alternativszenarien berechnet (Abb. 2). Das Szenario «zentrale Kompostierung», d.h. eine grosse Kompostieranlage auf

Abb. 2: Prozesskostenanalyse für die heutige Abfallentsorgung in Asmara, Eritrea, und für verschiedene Szenarien mit Kompostierung.





Kehrichtabfuhr in Asmara. Kinder und Frauen bringen den Abfall vor die Türe, wenn sie das Signal des Sammelfahrzeuges hören.

der Deponie, in der 180 Tonnen Abfall pro Tag behandelt werden, zeigt einen Anstieg der jährlichen Kosten um etwa 167 000 US\$. Das Szenario «dezentrale Kompostierung 1» geht von 60 kleinen im Stadtgebiet verteilten Kompostieranlagen aus. Bei diesem Szenario muss mit Mehrkosten von 213 000 US\$ gerechnet werden, die vor allem auf den hohen Personalbedarf zurückgehen. Im Szenario «dezentrale Kompostierung 2» (vgl. Abb. 1B) hingegen wird nur der Abfall aus den Haushalten in den dezentralen Kompostieranlagen behandelt. Der Abfall aus der Strassenreinigung wird weiterhin direkt auf die Deponie transportiert. Dadurch werden insgesamt nur 36 statt 60 Anlagen benötigt, um den restlichen Abfall zu verarbeiten. Die Gesamtkosten steigen hier nur um 140 000 US\$ und liegen damit niedriger als beim Szenario «zentrale Kompostierung». Die dezentrale Kompostierung scheint also dann für das Gesamtsystem von Vorteil zu sein, wenn sie sich auf ausgewählte Abfallströme mit hohem Anteil kompostierbarer Materialien beschränkt. Die niedrigeren Kosten sind vor allem auf die Einsparungen bei der Sammlung und dem Transport zurückzuführen: Sie reduzieren sich um knapp 30% im Vergleich zum Ist-Zustand.

Die Prozesskostenrechnung erhöht die Transparenz. Unsere Kostenanalyse zeigt, dass jede Verbesserung des Abfallsystems, egal ob es sich um zentrale oder dezentrale Kompostieranlagen handelt, mit Zusatzkosten verbunden ist. Die detaillierte Aufschlüsselung der Kostenstruktur erlaubt allerdings eine differenzierte Diskussion über die Vor- und Nachteile der jeweiligen Anlagen. Obwohl der Betrieb vieler dezentraler Kompostieranlagen im Vergleich zu einer einzelnen zentralen Anlage kostspieliger sein mag, fallen die Transportkosten in den Szenarien mit dezentraler Kompostierung doch geringer aus. Im günstigsten Fall, Szenario «dezentrale Kompostierung 2» (Abb. 2, vierte Säule), können bis zu 113 300 US\$ eingespart werden. Diese Einsparungen zusammen mit dem möglichen Erlös aus dem jährlichen Kompostverkauf

(ca. 6000 US\$) decken zur Hälfte die Kosten der dezentralen Anlagen. Diese Kompensation ist im Szenario «zentrale Kompostierung» nicht möglich, weil in diesem Fall die Transportkosten unverändert bleiben.

Ein weiterer Vorteil der dezentralen Kompostierung ist, dass sie den Druck auf das schwächste Glied in der Kette der Abfallentsorgung, nämlich den Transport, mindert. Der Betrieb und die Instandhaltung von Sammelfahrzeugen ist in vielen Entwicklungsländern technisch und finanziell eine der grössten Herausforderungen. Im Fall von Asmara könnten mit Hilfe der Kompostierung die bestehenden Transportkapazitäten sichtlich entlastet und dadurch bisher noch nicht versorgte Stadtgebiete an die Abfallentsorgung angeschlossen werden. Das Problem gewinnt noch an Brisanz, sobald eine Deponie gefüllt ist und eine neue in grösserer Entfernung vom Stadtzentrum angelegt werden muss. Statt in den Fuhrpark und in die Deponieerweiterung, wäre es besser, in die dezentrale Kompostierung zu investieren. Die ausführliche Analyse des Systems ist in der Arbeit von Müller [1] beschrieben.

Materialflussanalyse und Prozesskostenrechnung als Planungsinstrument?

Der hier beschriebene Ansatz erlaubt nicht nur eine Prognose möglicher finanzieller Änderungen in der Abfallentsorgung, sondern unterstützt auch die planerischen Aufgaben der Stadtverwaltung. Die Darstellung der Abfallflüsse und die Aufgliederung der Kosten auf die einzelnen Prozesse sind allerdings für viele städtische Behörden in Entwicklungsländern neu und bedürfen einer entsprechend intensiven Einführung. Zurzeit diskutieren wir die Ergebnisse der Studie und wie sie umgesetzt werden können mit den beteiligten Ämtern in Asmara und anderen Kommunen. Ihr Interesse gilt insbesondere einer möglichen Erweiterung des Modells auf die regionale Abfallwirtschaft. ○ ○ ○

- [1] Müller C. (2006): Decentralised composting in developing countries – Financial and technical evaluation. Diplomarbeit, Sandec, Dübendorf, 85 p.
- [2] Kubrom T., Mehari S., Wegmann M. (2004): Economic valuation of decentralised composting – Case study report of Asmara, Eritrea. University of Asmara, College of Asmara, 80 p.
- [3] Drescher S., Müller C., Kubrom, T., Mehari, S., Zurbrügg C., Kyzia S. (2006): Decentralised composting – Assessment of viability through combined material flow analysis and cost accounting. Proceedings, Orbit 2006 Conference, Weimar, pp. 1215–1227.
- [4] Drescher S., Ogbazghi W., Mehreteab T.M., Kubrom T., Mehari S. (2005): Benefits and risk of the use of organic matter from the Asmara landfill in agriculture, Final Report, Sandec, Dübendorf, 79 p.

Abfallflüsse in Santiago de Cuba



Hans-Joachim Mosler, Titularprofessor für Sozial- und Umweltpsychologie an der Universität Zürich sowie Leiter der Gruppe «Modellierung sozialer Systeme» an der Eawag

Abfall stellt Entwicklungsländer vor ein grosses Problem. Mit steigendem Lebensstandard fällt immer mehr Abfall an. Meist wird er nicht adäquat entsorgt, sondern lediglich auf Müllhalden deponiert. Dies ist auch in Santiago de Cuba nicht anders. Was kann die Bevölkerung tun, um die Müllberge zu reduzieren?

Santiago de Cuba, mit ca. 500 000 Einwohnern die zweitgrösste kubanische Stadt, besitzt ein relativ gut funktionierendes Abfuhrwesen. Doch es fehlen adäquate Entsorgungsmöglichkeiten wie Verbrennungs-, Biogas- oder Kompostieranlagen. Der Abfall wird ausschliesslich zu einer offenen Deponie gebracht. Die Folgen für Mensch und Umwelt sind dramatisch: Boden, Wasser und Luft werden verschmutzt und zudem sind die Deponien Quellen für Krankheiten, die durch Nagetiere und Vögel verbreitet werden.

Da auch in absehbarer Zeit keine Abfallentsorgungsanlagen in Santiago de Cuba installiert werden, stellte sich die Frage, welche Massnahmen in den Haushalten dazu führen könnten, dass möglichst wenig Abfall auf der Deponie landet. Zur Beantwortung führten wir gemeinsam mit unserem kubanischen Projektpartner, dem Soziologischen Institut der Universidad del Oriente von Santiago de Cuba, eine Materialflussanalyse und eine Befragung auf Haushaltsebene durch [1–4].

Die Beteiligten des Abfallmanagements. Da Kuba an akuter Ressourcenknappheit leidet, investiert der Staat viel Geld in Kam-

Im Rahmen unserer Umfrage wiegen Studenten den Abfall in den beteiligten Haushalten.



Fotos: H.-J. Mosler, Eawag

pagnen zur Abfallverwertung. Abfälle wie Glas, Plastik, alle Sorten von Metall, Papier und Karton werden als wertvolle Ressourcen angesehen, und bereits jetzt versucht man, so viel wie möglich zu recyceln. Um ein umfassendes Bild der Materialflüsse zu bekommen, identifizierten wir deshalb zunächst die lokalen Beteiligten des Abfallmanagements:

- ▶ Die Privathaushalte als Verursacher des Abfalls.
- ▶ 2–3-mal in der Woche holen offene Lastwagen der städtischen Müllabfuhr «Servicios Comunales» den Hausmüll ab. Die Müllsammler sortieren in kleinem Umfang Material aus, das sie als wertvoll erachten, und verkaufen es an die «Casas de Compra».
- ▶ Die Bevölkerung kann verwertbare Materialien an die Recyclingzentren Casas de Compra verkaufen: z.B. bekommt man für 20 leere 1,5-l-Plastik-Flaschen eine volle ausgehändigt.
- ▶ Die Nachbarschaftsorganisation «Comité de Defensa de la Revolución», eine politische Organisation mit vielfältigen Aufgaben, fordert die Bürger in unregelmässigen Abständen auf, Recyclingmaterial abzugeben.
- ▶ Die Casas de Compra und das Comité de Defensa de la Revolución liefern Wertstoffe an den Rohstoffverwertungsbetrieb «Materias Primas», der die Materialien sammelt, sauber trennt und wiederum an die verarbeitende Industrie abgibt.

Tatsächliche Abfallmenge und -handhabung. Die der Materialflussanalyse zugrunde liegenden Daten wurden in 1180 Haushalten gewonnen, was bezogen auf Santiago de Cuba eine repräsentative Stichprobe ist. Einerseits wurden die Abfallmengen direkt bestimmt: Dazu erhielten alle Haushalte jeweils 7 Plastiktüten, in denen sie eine Woche lang Plastik, Aluminium, übriges Metall, Papier und Karton, Organische Abfälle, Glas sowie Restabfall sammeln sollten. Am Ende der Woche besuchten Studenten die Haushalte und wogen die Tüten mit einer Federwaage.

Andererseits befragten wir die Haushalte mit Hilfe eines standardisierten Fragebogens. Es wurde erhoben, wie der Abfall entsteht und gehandhabt wird, wie gross die Zufriedenheit mit dem bestehenden Abfallmanagement ist und wie es verbessert werden könnte. Die Daten wurden anschliessend in Diagrammen zusammengefasst, die zeigen, wie unterschiedlich die Wege des Abfalls sind (Abb. 1+2).

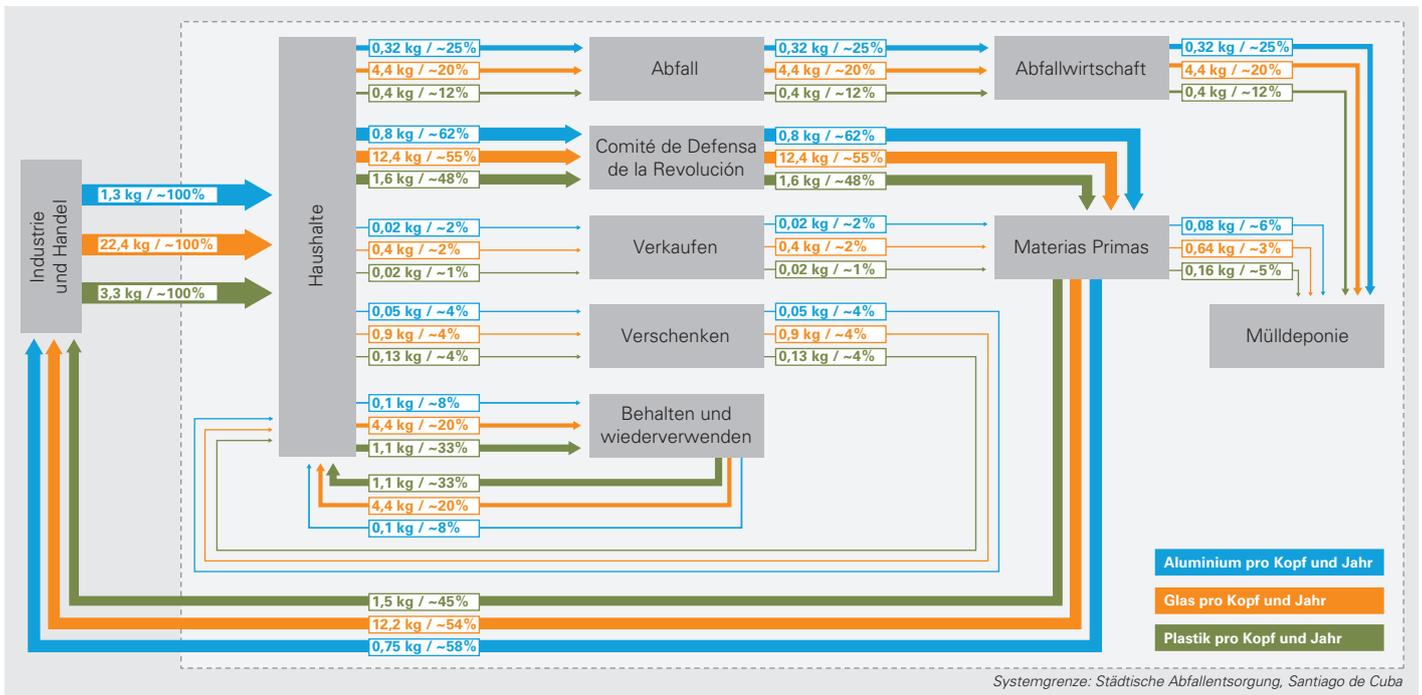
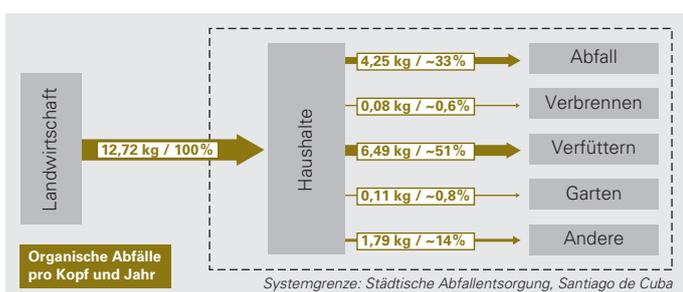


Abb. 1: Umgang mit Glas, Plastik und Aluminium in 1180 Haushalten Santiago de Cubas. Die Pfeildicke bezieht sich auf die Prozentangaben.

Ein Grossteil des Wertstoffabfalls wird recycelt. Ein Grossteil des Wertstoffabfalls wird dem Comité de Defensa de la Revolución gespendet: Glas 55%, Plastik 48%, Aluminium 62% (Abb. 1). Obwohl das Einkommen in Kuba relativ niedrig ist, wird äusserst wenig Material an die Casas de Compra verkauft. Weitere 20% Glas, 33% Plastik und 8% Aluminium werden im eigenen Haushalt weiterverwertet oder an andere Haushalte verschenkt. Beispielsweise werden Plastik- und Glasflaschen gerne zur Aufbewahrung von Flüssigkeiten benutzt. Die restlichen 20% Glas, 12% Plastik und 25% Aluminium werden effektiv weggeworfen (Abb. 1).

Damit erreichen die Haushalte in Santiago de Cuba eine ähnlich hohe Recyclingrate wie die europäischen Spitzenreiter Schweiz und Deutschland. Sie liegt für Glas bei 79% (Schweiz 95%, Deutschland 83%), für Plastik bei 97% (Schweiz 71%, Deutschland 64%) und für Aluminium bei 74% (Schweiz 75%, Deutschland 78%). Dies ist sicherlich auf die Kombination von erfahrener Ressourcenarmut, staatlich gefördertem Umweltbewusstsein und sozialem

Abb. 2: Umgang mit organischem Material (nicht essbare Teile von Gemüse und Früchten sowie Essensreste) in 1180 Haushalten Santiago de Cubas.



Druck zurückzuführen. Das Umweltbewusstsein äussert sich z.B. darin, dass über 80% der Befragten eine umweltschonende Entsorgung der Abfälle für sehr wichtig halten. Wie hoch der soziale Druck ist, lässt sich an dem grossen Anteil verwertbaren Materials ablesen, der dem Comité de Defensa de la Revolución geliefert wird, obwohl viel davon eigentlich Gewinn bringend verkauft werden könnte.

Organischer Abfall wird hauptsächlich verfüttert. Der organische Abfall wird zu mehr als 50% an Tiere verfüttert (Abb. 2). Die Haltung von Hühnern und Schweinen ist in Santiago de Cuba auch im Stadtzentrum weit verbreitet und fast 40% aller Haushalte beteiligen sich an der Fütterung eigener oder fremder Tiere. Die Tiere werden im Hinterhof, auf dem Balkon, in der Toilette oder einfach in der Wohnung gehalten.

Ein weiterer grosser Anteil des organischen Abfalls wird in die Abfallabfuhr gegeben. Wenig wird verbrannt, in den Garten geworfen oder anderweitig entsorgt. Kompostieren ist in Santiago de Cuba, wie wahrscheinlich in ganz Kuba, so gut wie unbekannt.

Psychologische Aspekte im zukünftigen Abfallmanagement beachten. Die Materialflussanalyse liefert wichtige Grundlagen für das zukünftige Abfallmanagement. Um aber geeignete Verbesserungsmaßnahmen zu entwerfen, ist es wichtig, die Einstellung der Bevölkerung gegenüber möglichen neuen Recyclingpraktiken zu kennen. Andernfalls ist das Risiko zu gross, dass die Massnahmen nicht angenommen werden. Wir hatten unseren Fragebogen deshalb mit einer Reihe von Zusatzfragen ergänzt:

- Empfindungen: Wäre es für Sie angenehm oder unangenehm den Abfall zu trennen/wiederzuverwerten/zu kompostieren?



Auch mitten in der Stadt werden Schweine gehalten - wenn nötig einfach in der Toilette.

- ▶ Kosten/Nutzen-Einschätzung: Würde es für Sie mehr Kosten oder mehr Nutzen bedeuten, den Abfall zu trennen/wiederzuverwerten/zu kompostieren?
- ▶ Schwierigkeiten: Wie schwierig ist es ihrer Meinung nach zu trennen/wiederzuverwerten/zu kompostieren?
- ▶ Reputation: Was würden Ihre Freunde denken, wenn sie wüssten, dass Sie den Abfall trennen/wiederverwerten/kompostieren?
- ▶ Bereitschaft: Wären Sie bereit, sich beim Trennen/Wiederverwerten/Kompostieren zu beteiligen?

Tab. 1: Durchschnittswerte verschiedener Faktoren, die bei der Bevölkerung bezüglich Trennen, Kompostieren und Wiederverwerten erfragt wurden. N = Anzahl der befragten Haushalte (jeweils ein Drittel der 1180 Haushalte wurde zu einer der drei Abfallpraktiken befragt, jedoch kamen nie alle Fragebögen zurück). Werte in Klammern = Standardabweichungen der Mittelwerte.

	Trennen	Kompostieren	Wiederverwerten
<i>Faktor</i>	N = 299	N = 347	N = 289
<i>Empfinden</i>			
-3 Sehr unangenehm	1,57	2,28	0,63
0 Neutral	(1,38)	(1,02)	(1,18)
+3 Sehr angenehm			
<i>Kosten/Nutzen</i>			
-3 Viel mehr Kosten als Nutzen	2,42	2,46	1,64
0 Gleichviel Kosten wie Nutzen	(1,09)	(0,99)	(1,48)
+3 Viel mehr Nutzen als Kosten			
<i>Reputation</i>			
-3 Sehr negative Reputation	0,91	1,56	0,72
0 Neutrale Reputation	(1,10)	(1,08)	(0,87)
+3 Sehr positive Reputation			
<i>Schwierigkeit</i>			
0 Nicht schwierig	1,11	0,95	0,55
+3 Sehr schwierig	(1,19)	(1,23)	(0,89)
<i>Bereitschaft</i>			
0 Keine Bereitschaft	2,75	2,65	2,23
+3 Sehr hohe Bereitschaft	(0,56)	(0,65)	(0,84)

Aus den Antworten ging hervor, dass die verstärkte Wiederverwertung im eigenen Haushalt als relativ leicht durchführbar erachtet wird (Tab. 1). Im Vergleich zu den anderen Recyclingpraktiken wird das Wiederverwerten jedoch als eher unangenehm empfunden und die Bereitschaft, sich daran zu beteiligen, ist gering. Dies mag daran liegen, dass man weniger Nutzen darin sieht und es weniger Reputation einbringt. Beim Trennen und Kompostieren weist die Bevölkerung eine hohe Bereitschaft auf, schätzt aber die Ausführung als eher schwierig ein. Laut Umfrage liegt dies vor allem am Mangel an Behältern und Platz im Haushalt, um die Materialien getrennt aufzubewahren.

Fazit: mehr Abfall trennen und kompostieren. Aus unseren Ergebnissen lässt sich insgesamt folgern, dass die Reduktion des anfallenden Abfalls in den Haushalten von Santiago durch verstärktes Abfalltrennen und die Einführung des Kompostierens zu erreichen ist. Dagegen sollte man davon absehen, die Weiterverwertung in den Haushalten zu propagieren.

In der derzeit laufenden zweiten Projektphase werden Strategien getestet, die das Abfalltrennen und Kompostieren fördern:

- ▶ Selbstverpflichtung: die Haushalte können sich bewusst der Abfalltrennung verpflichten und dies mit einem Schild «In diesem Haushalt wird Abfall getrennt» anzeigen.
- ▶ Erinnerungshilfen: Schilder am Ort der Trennung anbringen, die das Abfallsortieren erleichtern.
- ▶ Informieren: das Prinzip des Kompostierens bekannt machen.
- ▶ Infrastruktur bereitstellen: z.B. leicht zugängliche Komposttonnen aufstellen.

Die erfolgreichen Strategien sollen schliesslich in einer dritten Projektphase auf dem gesamten Stadtgebiet von Santiago de Cuba eingesetzt werden. Es wäre eine grosse Leistung, wenn die Menge des anfallenden Abfalls durch einfache Verhaltensänderungen in den Haushalten reduziert werden könnte. Auch wenn die Einwohner von Santiago de Cuba schon recht gut im Recyceln sind, so ist doch jede zusätzliche Tonne Abfall, die nicht in einer Deponie landet, ein Erfolg. ○ ○ ○

- [1] Binder C., Mosler H.-J. (in press): Waste – resource flows of short-lived goods in Santiago de Cuba. Resources, Conservation and Recycling.
- [2] Mosler H.-J., Drescher S., Zurbrügg Ch., Caballero Rodríguez T., Guzmán Miranda O. (in press): Formulating waste management strategies based on waste management practices of households in Santiago de Cuba. Habitat International.
- [3] Mosler H.-J., Tamas A., Tobias R., Caballero Rodríguez T., Guzmán Miranda O. (2005): Produced household waste and the recycling and disposal strategies of the population of Santiago de Cuba. Available as CD: Conference Proceedings: Waste the Social Context. Edmonton, Alberta, Canada.
- [4] Mosler H.-J., Tamas A., Tobias R., Caballero Rodríguez T., Guzmán Miranda O. (in press): Deriving interventions on the basis of factors influencing behavioral intentions for waste recycling, composting and reuse in Cuba. Environment & Behavior.

Alarm – zu viele Nährstoffe im Tha Chin



Monika Schaffner, Geografin und Doktorandin sowie Irene Wittmer, Umweltnaturwissenschaftlerin und ehemalige Diplomandin in der Abteilung «Wasser und Siedlungshygiene in Entwicklungsländern»
Koautorin: Ruth Scheidegger

Mit zunehmender landwirtschaftlicher Intensivierung hat sich die Wasserqualität des Tha Chin in Thailand massiv verschlechtert. Ein enormes Problem ist der hohe Nährstoffgehalt des Flusses. Unser Stoffflussmodell zeigt, dass ein Grossteil der Nährstoffe aus der intensiven Fischzucht stammt.

Der Tha Chin und seine zahlreichen – natürlichen und künstlichen – Kanäle fliessen träge und stark reguliert durch intensiv genutzte Reis- und Zuckerrohrfelder, Gemüse- und Obstplantagen, Schweine- und Fischzuchtanlagen und schliesslich durch das periurbane Gebiet am Westrand Bangkoks. Dabei werden viele Nährstoffe in das Gewässer eingetragen. Alarmiert durch ein flussweites Fischsterben, taten sich Regierung und Zivilgesellschaft im Jahr 2002 zusammen, um einen Aktionsplan zur Verbesserung der Wasserqualität zu entwerfen. Die Pläne sind ambitiös. Unklar ist jedoch, womit man beginnen soll und wie die beschränkten finanziellen und personellen Mittel am wirkungsvollsten genutzt werden können. Im Rahmen des NCCR – Nord-Süd [1] entwickelt die Eawag derzeit ein Stoffflussmodell für die Nährstoffe. Es ermöglicht, die Hauptquellen der Nährstoffbelastung und mögliche Verbesserungsmaßnahmen zu identifizieren.

Die intensive Fischzucht ist eine der Hauptursachen für die Nährstoffbelastung des Tha Chin.



I. Wittmer, Eawag

Ein Stoffflussmodell für den Tha Chin. Grundlage unserer Studie war die Analyse der Stoffflüsse im Gebiet des Tha Chin [2]. Als Indikatoren für die Überdüngung wählten wir die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor. Dabei haben wir die Aktivitäten charakterisiert, die zur Nährstoffanreicherung im Tha Chin führen. Die wichtigsten Prozesse sind:

- ▶ Landwirtschaft: Reis-, Zuckerrohr-, Gemüse- und Obstanbau;
- ▶ Tierhaltung: Schweine-, Geflügel- und Fischzucht;
- ▶ industrielle Betriebe;
- ▶ Haushalte.

Das Systemwissen, das in das Stoffflussmodell eingeht, basiert auf Feldbeobachtungen und auf Gesprächen mit Bevölkerung und Fachleuten. Hinzu kommen Daten aus nationalen und internationalen Statistiken, der Fachliteratur, sowie regionalen Forschungsprojekten. Wo keine Daten vorhanden sind, werden diese Lücken vorerst mit Schätzungen gefüllt. Sie werden so bald wie möglich durch genauere Angaben ersetzt. Die gesamte Datenerhebung ist ein iteratives Vorgehen. Die Daten werden laufend verfeinert und aktualisiert bis eine zufrieden stellende Genauigkeit der Modellrechnungen erlangt ist. Das für das gesamte Einzugsgebiet erarbeitete Grundmodell (Abb. 1) kann später auf beliebig kleine Teilräume reduziert werden. Dies ist von Vorteil, da die anthropogene Nutzung im Gebiet des Tha Chin nicht homogen verteilt ist, und somit eine genauere Darstellung der spezifischen Verhältnisse möglich ist.

Erste Modellresultate weisen darauf hin, dass insbesondere durch die Fischzucht grosse Mengen von Stickstoff und Phosphor in den Tha Chin gelangen. Daneben spielen auch die Schweinezucht und die Düngepraktiken in der Landwirtschaft eine grosse Rolle in der Nährstoffbilanz.

Fischzucht am Tha Chin. Um die Stoffflüsse für die Fischzuchten genau aufzuschlüsseln, erarbeiteten wir ein detailliertes Teilmodell [3]. Im Gebiet des Tha Chin sind die Fischzuchtteiche nicht zu übersehen. Oft liegen mehrere der ein bis vier Hektar grossen Teiche beieinander und sind nur durch schmale Land-

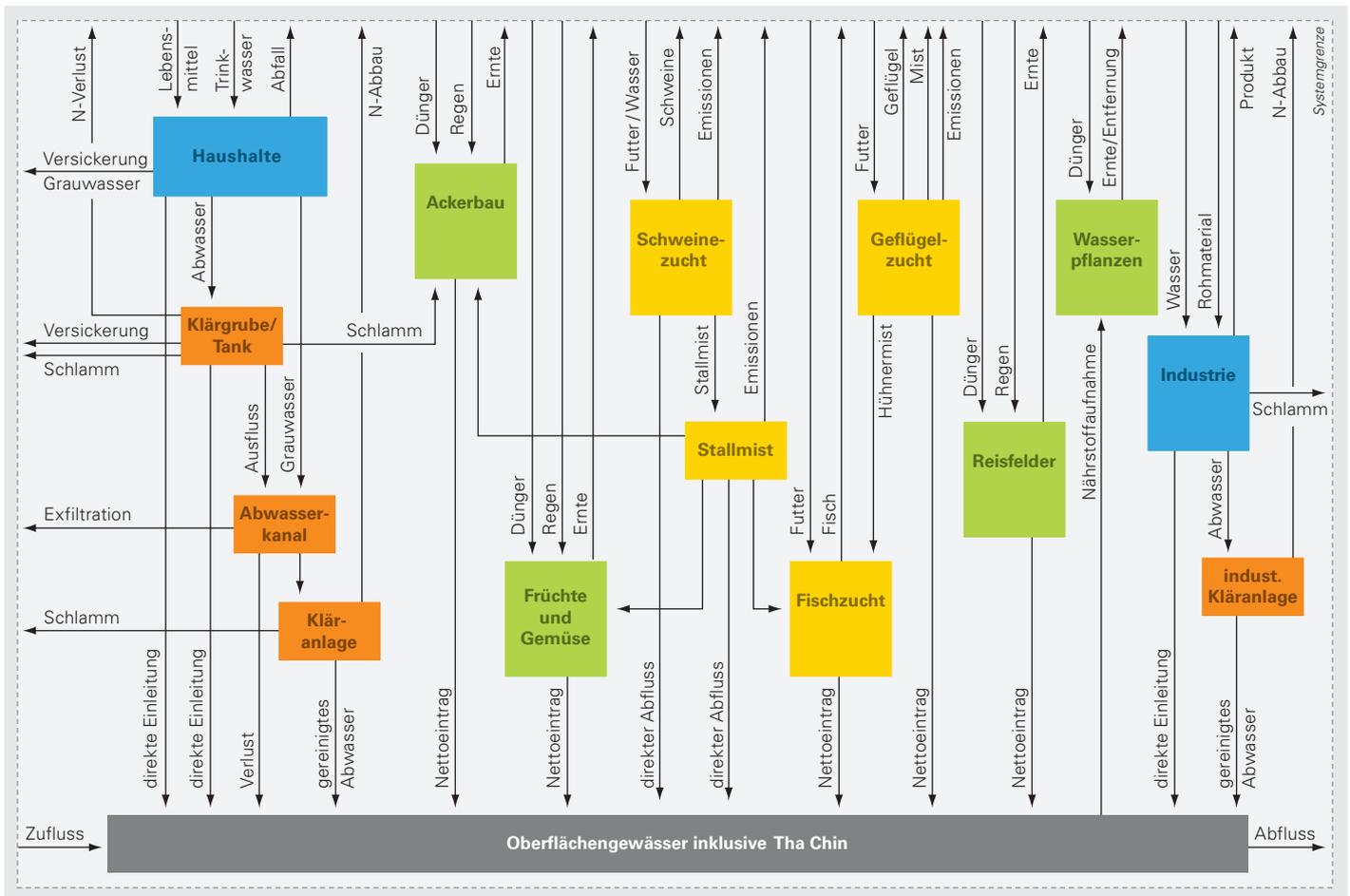


Abb. 1: Vereinfachtes Systemschema für das Gebiet des Tha Chin: Kästen = Prozesse, die die Nährstofffracht im Tha Chin beeinflussen; Pfeile = Nährstoffflüsse.

streifen getrennt. Darin werden Barsche der Gattungen Tilapia (Petrus-Fische, lat. *Oreochromis niloticus*) und Channa (Schlangenkopffische, lat. *Channa striatus*) sowie Welse (catfish, lat. *Clarias bartrachus*) und Tiger-Shrimps (lat. *Penaeus monodon*) gezüchtet. Obwohl nur wenige Teiche im Tha Chin für die Welszucht genutzt werden, wird gewichtsmässig doch doppelt so viel Wels wie Tilapia produziert. Die intensiven Welskulturen sind leicht am Geruch des verwendeten Futters erkennbar – alter und unverwertbarer Meeresfisch. Auch die Shrimpszucht ist umfangreich: mehr als 30% der gesamten thailändischen Garnelenproduktion findet am Tha Chin statt. Dagegen ist die Produktion der Schlangenkopffische relativ gering.

Die Aufzucht der Aquakulturen erfolgt zyklisch. Sind die Tiere verkaufsfähig, werden sie gefangen und das Wasser wird in den nächstgelegenen Kanal gepumpt. Von dort gelangen die Nährstoffe schliesslich in den Tha Chin.

Das Stoffflussmodell wurde so entwickelt, dass es für jede Art von Fischkultur anwendbar ist. Es ging darum, überschlagsmässig zu ermitteln, wie viel Stickstoff und Phosphor mit dem Fischfutter ins System eingebracht, von den Fischen und vom Phytoplankton aufgenommen wird und welcher Anteil schliesslich in den Fluss gelangt. Zum Teil wurden die benötigten Eingabedaten durch

Interviews erhoben, d.h. wir besuchten die Fischzüchter vor Ort und fragten sie nach der Futtermenge und der Art und Weise, wie sie die Teiche bewirtschaften. Beispielsweise wird ein Teil des Wassers der Garnelen- und Welsteiche täglich erneuert. Dagegen wird in den Tilapienteichen nur das durch Verdunstung und Versickerung verlorene Wasser ergänzt. Die restlichen Daten stammen aus lokalen Statistiken oder sind der Fachliteratur entnommen.

Aquakulturen tragen erheblich zur Nährstofffracht im Tha Chin bei.

Da die Nährstoffflüsse in den Fischkulturen am Tha Chin sehr verschieden sind, wurden sie für die wichtigsten Kulturen – Welse, Tilapia, Schlangenkopffische und Shrimps – einzeln berechnet. Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Stickstoff- und Phosphorflüsse in einer Welskultur. Nur ein kleiner Teil der Nährstoffe wird von den Welsen verwertet, der grösste Teil (12 von 14 Tonnen Stickstoff und 3,2 von 4,4 Tonnen Phosphor) wird direkt in die mit dem Tha Chin verbundenen Kanäle geschwemmt. Um die Nährstoffmenge zu berechnen, die insgesamt aus den Welskulturen in den Tha Chin gelangen, wurden die kultivierten Flächen für das gesamte Gebiet hochgerechnet. Es zeigte sich, dass die enorme Menge von rund 10000 t Stickstoff und 3000 t Phosphor pro Jahr in den Tha Chin eingeschwemmt werden. Die Welskulturen stel-

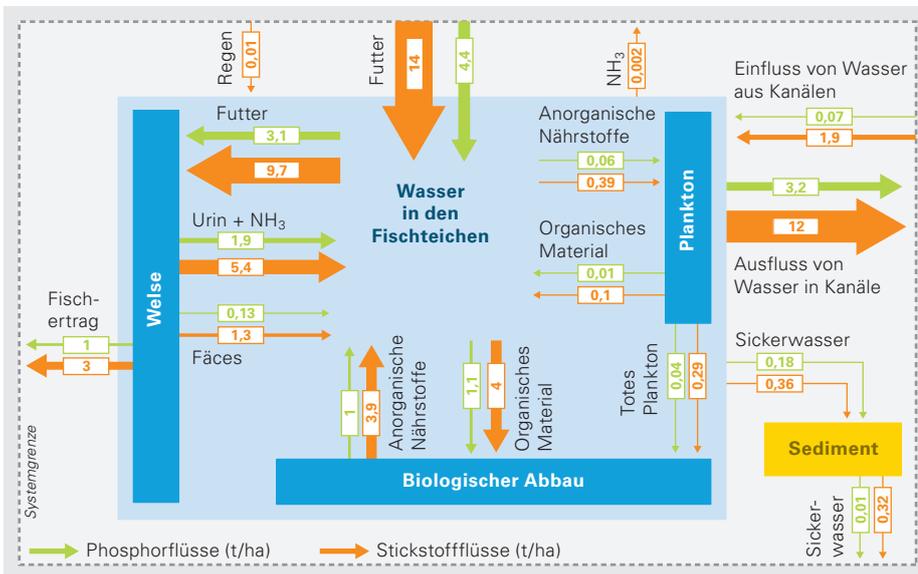


Abb. 2: Stickstoff- und Phosphorflüsse für das Teilsystem einer Welskultur.

len damit den grössten Anteil an der jährlichen Gesamtfracht von 15000 t Stickstoff und 3600 t Phosphor aus der Aquakultur dar.

Welche Faktoren beeinflussen die Nährstofffracht am stärksten? Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse (siehe Leitartikel auf S. 4), bei der die Eingabegrößen variiert werden, ermittelten wir die Schlüsselparameter für das Teilsystem der Aquakulturen.

► **Futtermenge:** Aquakulturen werden oft unnötig überfüttert, um maximale Erträge zu erzielen. Die Fische können jedoch nur einen gewissen Prozentsatz ihres momentanen Körpergewichts verwerten, der Rest wird ungenutzt fortgeschwemmt. Um angemessen zu füttern, müsste der Besitzer von Zeit zu Zeit das Gewicht seiner Fische bestimmen und deren ungefähre Anzahl kennen.

► **Nährstoffgehalt des Futters:** Falls die Aquakultur auf Frischprodukte angewiesen ist, kann an deren Nährstoffzusammensetzung nichts geändert werden. Ist das Futter hingegen künstlich hergestellt, kann zumindest der Phosphorgehalt massiv gesenkt werden. Unsere Berechnungen zeigen, dass die Fracht für Tilapia-kulturen, die sich von Mist ernähren, im Vergleich zum künstlich hergestellten Trockenfutter von 30 kg Phosphor pro Tonne Fisch auf 3 kg gesenkt werden kann. Der Stickstoffgehalt kann allerdings nicht verändert werden. Er ist durch den benötigten Proteingehalt vorgegeben.

► **Entwässerung der Teiche am Ende der Kultur:** Vor der Ernte wird der Teich zu einem grossen Teil entleert. So können die Arbeiter in den Teich steigen und die Fische einsammeln. Dadurch wird das nährstoffreiche Sediment aufgewirbelt. Am Ende wird es samt dem Restwasser bewusst in den nächstgelegenen Kanal gepumpt. Dies geschieht, um die Sedimentakkumulation in den Teichen zu verhindern. Der Tha Chin wird also nicht nur kontinuierlich mit Nährstoffen belastet, sondern erhält zusätzlich periodisch besonders hohe Stickstoff- und Phosphoreinträge. Die Nährstofffracht könnte erheblich gesenkt werden, wenn die Sedimente nicht in die

Kanäle gelangen, sondern beispielsweise auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht würden. Ob es jedoch möglich ist, diese Vorgehensweise zu verändern, ist unklar.

Massnahmen mit allen Beteiligten planen und Stoffflussanalyse auf andere Schadstoffe ausweiten.

Um die Ergebnisse der Stoffflussanalyse für die Praxis nutzbar zu machen, müssen Gesellschaft und Wirtschaft bei der Erarbeitung von Massnahmen zur Verbesserung der Gewässerqualität einbezogen werden. Deshalb sollen in einem Workshop Vertreter aller betroffenen Gruppen an einen runden Tisch eingeladen werden. Aufgrund der abgeschätzten Stoffflüsse und der identifizierten Schlüsselparameter können konkrete Massnahmen diskutiert werden. So wird gemeinsam überlegt, welche Massnahmen – im Spannungsfeld zwischen Gewässerschutz, Realisierbarkeit und sozioökonomischen Aspekten – am meisten Erfolg versprechen.

Die vorliegende Studie quantifiziert die Nährstoffflüsse im Gebiet des Tha Chin. Sie geht jedoch nicht auf andere Wasserschadstoffe ein wie Schwermetalle, Pestizide oder Hormone, die im Tha Chin sicher ebenfalls eine Rolle spielen. Bei der Diskussion um geeignete Massnahmen zur Verbesserung der Wasserqualität sollten aber unbedingt alle Problemstoffe berücksichtigt werden. Es wäre deshalb sinnvoll, in einer erweiterten Analyse, auch die bisher nicht untersuchten Schadstoffe zu erfassen. ○ ○ ○

- 1) <http://www.nccr-north-south.unibe.ch>. Die «Swiss National Centres of Competence in Research» (NCCR) sind Forschungsinstrumente des Schweizer Nationalfonds und werden mitfinanziert von der Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit (DEZA).
- 2) Schaffner M. (2005): Assessment of water quality problems and mitigation potentials by using material flow analysis – A case-study in the Tha Chin River basin, Thailand. In: Proceedings of the «International Symposium on role of water sciences in trans-boundary river basin management». Ubon Ratchathani, Thailand.
- 3) Wittmer I. (2005): Modeling the water and nutrient flows of freshwater aquaculture in Thailand: Diplomarbeit, Eawag, ETH Zürich, 66 p.

Den Phosphorkreislauf schliessen

Einerseits gehen in Hanoi, Vietnam, grosse Nährstoffmengen einfach mit dem Abwasser verloren und verschmutzen die Gewässer. Andererseits wird in der dortigen Landwirtschaft Kunstdünger verwendet. Unser neues Planungsinstrument zeigt, wo man ansetzen kann, um nachhaltig mit den Nährstoffen umzugehen und dabei gleichzeitig die Gewässerbelastung zu senken.

Der Fluss sei so stark verschmutzt, dass das Wasser den Fischzuchtteichen bald nicht mehr zugeleitet werden könne, so der Vertreter der Bezirksbehörde von Dong My in der Peripherie von Hanoi, Vietnam. Tatsächlich ist die starke Überdüngung der Gewässer eines der Hauptprobleme in der Region. Was aber kann getan werden, um die Nährstofffracht in den Gewässern zu verringern? Gemeinsam mit Partnerorganisationen in Vietnam haben wir ein mathematisches Modell entwickelt, das vorhersagt, wie sich mögliche Massnahmen auf die Wasser- und Nährstoffflüsse auswirken. Dieses Modell ist generell auf urbane Regionen von Entwicklungsländern anwendbar und integriert Daten aus den

Datenlücken schliessen: Experten befragen

In Entwicklungsländern ist der Zugang zu zuverlässigen Daten nicht immer gewährleistet. Hinzu kommt, dass die vorhandenen Mittel oft ungenügend sind, um Messkampagnen durchzuführen. Deswegen ist die Berücksichtigung von Unsicherheiten von grosser Bedeutung, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Eine vielversprechende Methode, um Datenlücken zu schliessen, besteht darin, subjektive Expertenmeinungen einzuholen. Die daraus gewonnenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschreiben den Stand des Wissens über eine Grösse. Diese Techniken der so genannten Bayesschen Statistik zeigen auf, wie sich die beschriebene Unsicherheit aufgrund von neuen Erkenntnissen (z.B. Resultaten aus später durchgeführten Datenerhebungen) verkleinert [2]. Einflussgrössen, die nicht durch vorhandene Daten quantifizierbar sind, können also durch Expertenbefragungen abgeschätzt werden. Im Rahmen dieses Projektes konnte der Transferkoeffizient für Phosphor im Prozess «Klärrube» durch Expertenbefragungen angenähert werden.



Agnes Montangero, Umweltingenieurin und Doktorandin in der Abteilung «Wasser und Siedlungshygiene in Entwicklungsländern, Sandec»
Koautoren: Roland Schertenleib, Hasan Belevi

Bereichen Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallmanagement sowie Landwirtschaft. Wir testeten es am Beispiel der Provinz Hanoi und fokussierten insbesondere auf die Phosphorfrachten.

Wachsende Bevölkerung als Grund für die Gewässerverschmutzung. In den letzten Jahrzehnten erlebte Hanoi ein rasantes Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum und eine rasche Industrialisierung. Diese Prozesse sind eng mit einer Zunahme des Ressourcenverbrauchs und der Umweltverschmutzung gekoppelt. Einerseits wird immer mehr Abwasser in die Gewässer eingeleitet. Andererseits müssen immer mehr Einwohner durch die peri-urbane Landwirtschaft versorgt werden. Dadurch wächst der Kunstdüngerkonsum, was einen Anstieg des Phosphorverbrauchs zur Folge hat. Bei den gegenwärtigen Extraktionsraten dürften aber die bekannten weltweiten Phosphorreserven in 50–100 Jahren erschöpft sein [1].

Mit Hilfe unseres Modells wollten wir deshalb die Phosphorflüsse im System detailliert charakterisieren (Abb. 1) und anschliessend die Auswirkung ausgewählter Extremszenarien auf den Phosphoreintrag in die Gewässer sowie auf die Wiederverwertung des Phosphors in der Landwirtschaft aufzeigen. Dazu untersuchten wir die Wirkung verschiedener Einflussgrössen – wie Bevölkerungs-

Die Stadt breitet sich aus. Gebiete an der Peripherie von Hanoi weisen sowohl ländliche als auch städtische Merkmale auf.

Fotos: A. Montangero, Eawag



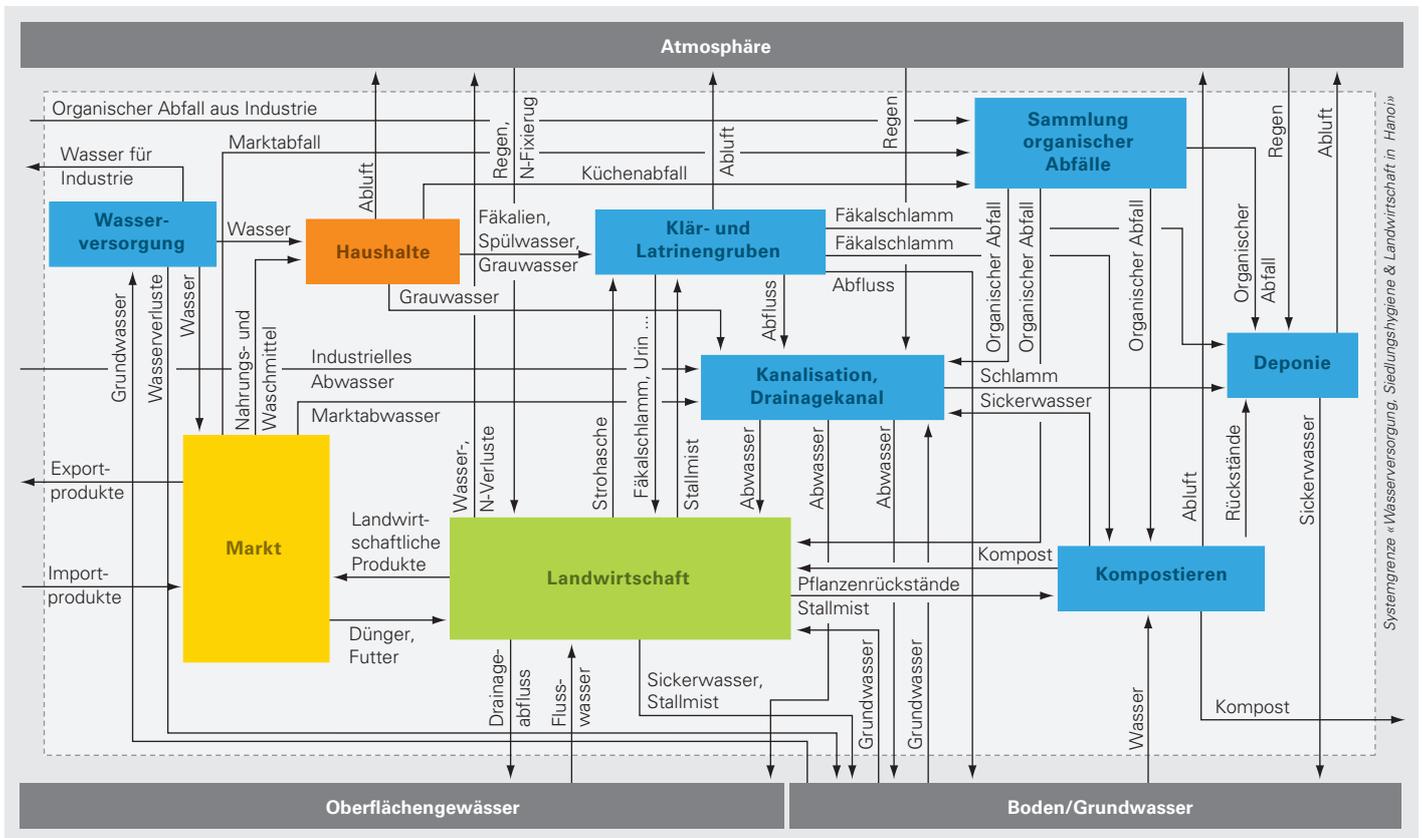


Abb. 1: Prozesse (Kästen) und Güterflüsse (Pfeile) in der Provinz Hanoi für die Bereiche Wasserversorgung, Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft sowie peri-urbane Landwirtschaft und ihr Einfluss auf die Umwelt.

zahl, Art der Sanitäreinrichtungen, Fläche der Kulturpflanzen und Anzahl Vieh. Das Modell soll lokale Akteure bei der Entwicklung geeigneter Massnahmen unterstützen.

Haushaltsabwässer sind die Hauptverursacher der Phosphorbelastung. Im Zentrum des Modells steht die Beschreibung der Prozesse und Stoffflüsse [3], die die Phosphorbelastung der Gewässer beeinflussen (Abb. 1). Unsere Berechnungen identifizieren die Haushaltsabwässer als Hauptquelle: Der Abfluss der Klärgruben und das Grauwasser (Wasch-, Küchen- und Badabwasser) gelangen über die offenen Drainagekanäle am Strassenrand in die Gewässer: sie machen zusammen 94% der gesamten Phosphorfracht aus (Abb. 2). Diese Fracht wird wesentlich durch die Art des Sanitärsystems beeinflusst. Nur ein kleiner Teil dieses Phosphors wird für die Nahrungsmittelproduktion wiederverwertet. Dies liegt insbesondere daran, dass die Bauern das Abwasser aus den Drainagekanälen nur während der Trockenzeit zum Bewässern und Düngen nutzen. Im Verlauf der Regenzeit von Mai bis Oktober dagegen müssen die Felder nicht bewässert werden. Dann fließt das gesamte Drainagewasser ungenutzt in die Gewässer.

Klärgruben halten den Phosphor nur ungenügend zurück. In Hanoi sind die meisten Häuser an Klärgruben angeschlossen. Sie fangen das Toilettenabwasser auf. Eine Klärgrube ist eine einfache

Hauskläranlage, die aus einer oder mehreren Kammern besteht, durch die das Abwasser strömt. Dabei setzen sich die Feststoffe ab und akkumulieren auf dem Kammerboden, und ein Teil der im Abwasser enthaltenen organischen Stoffe wird von Mikroorganismen abgebaut. Das so vorgereinigte Wasser gelangt anschliessend in die offenen Drainagekanäle am Strassenrand und von dort in das nächste Fließgewässer. Die akkumulierten Feststoffe sollten regelmässig aus den Klärgruben entfernt und behandelt werden. In Hanoi Stadt werden diese Feststoffe in der Regel zur Deponie gebracht. In den peri-urbanen Gebieten dagegen werden sie oft als organischer Dünger wiederverwertet.

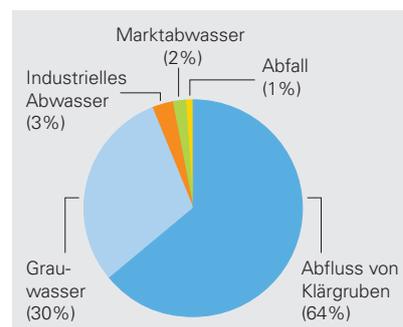


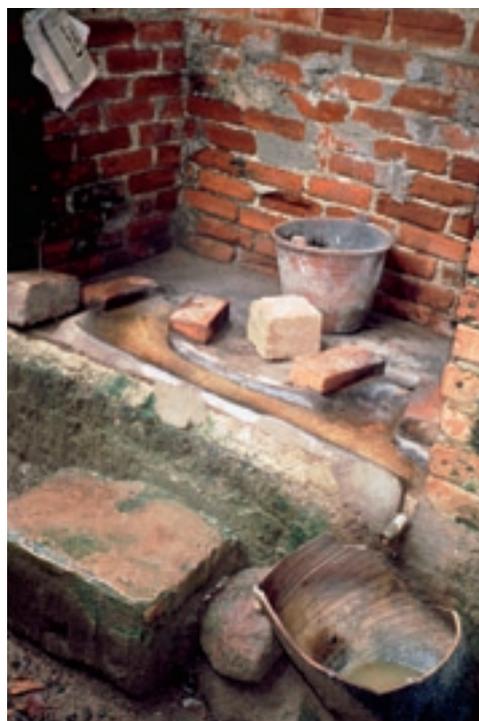
Abb. 2: Beitrag der verschiedenen Quellen an die Phosphorfracht in den Gewässern von Hanoi.

Allerdings ist der Hauptteil des Phosphors im Klärgrubenabfluss enthalten. Dies liegt einerseits daran, dass sich 50–80% des vom Menschen ausgeschiedenen Phosphors im Urin befinden [4], und andererseits daran, dass der Phosphor im Urin in wasserlöslicher Form vorliegt, so dass nur 11–27% davon in der Klärgrube als Schlamm zurückgehalten werden. Der Rest verlässt die Grube mit dem flüssigen Abfluss.

Latrinen mit Urinseparierung können den Phosphorkreislauf schliessen. Gäbe es ein besseres Sanitärsystem, das den Phosphor effizienter zurückhält? Wir fanden, dass die im Norden Vietnams einst weit verbreiteten so genannten Zweikammer-Latrinen mit Urinseparierung wesentliche Vorteile gegenüber den Klärgruben haben. Sie bestehen aus zwei alternierend betriebenen Kammern für die Fäkalien, einem speziell konstruierten Latrinboden für die separate Ableitung des Urins und einem Behälter für die Urinsammlung. Den Fäkalien wird regelmässig Asche beigegeben, um den Trocknungsprozess zu unterstützen und die Geruchsbildung zu vermeiden. Wenn eine Kammer voll ist, wird die zweite benutzt und das Fäkalien-Asche-Gemisch in der ersten Kammer etwa ein Jahr lang gelagert. In dieser Zeit sterben krankheitserregende Mikroorganismen ab, was das Gesundheitsrisiko bei einer landwirtschaftlichen Wiederverwertung des Gemischs als Dünger stark vermindert. Der Urin dagegen kann, gegebenenfalls sogar verdünnt, für die Bewässerung verwendet werden. Ausser wenig Stickstoff, der während der Lagerung des Urins als Ammoniakdampf entweicht, wird durch dieses Latrinensystem die Gesamtmenge der vom Menschen ausgeschiedenen Nährstoffe inklusive Phosphor zurückgehalten. Sie könnten anschliessend einen Teil des Kunstdüngers in der Landwirtschaft ersetzen. Dadurch würden sowohl die Nährstoffflüsse in die Gewässer als auch der Bedarf an Kunstdünger verringert.

Mit unserem Modell konnten wir zudem beziffern, wie stark sich der Phosphoreintrag in die Gewässer tatsächlich vermindern lässt. Gehen wir beispielsweise davon aus, dass alle Klärgruben in Hanoi durch Zweikammer-Latrinen mit Urinseparierung ersetzt würden, liesse sich die Phosphorfracht in den Gewässern von 1570 auf 900 t pro Jahr, also um 42%, verringern. Zudem könnte der Bedarf an künstlichem Phosphordünger durch die zusätzlich gewonnene Menge an organischem Dünger von 2800 auf 1200 t Phosphor pro Jahr, entsprechend 57%, reduziert werden.

Gefragt ist ein ganzheitlicher Planungsansatz. Will man solche Szenarien, wie die Urinseparierung für Hanoi oder andere Städte in Entwicklungsländern weiter entwickeln, müssten noch eine Reihe anderer Fragen abgeklärt werden, z.B.: Wie ist die Akzeptanz für neue Sanitäreinrichtungen? Welche Kosten sind damit verbunden und wie gross ist die Bereitschaft, Mehrkosten zu tragen? Wird es längerfristig einen Markt für Urin und die hygienisierten Fäkalien geben? Unser Ziel ist es deshalb, das Stoffflussmodell in einen ganzheitlichen Planungsansatz zu integrieren und diesen im Rahmen weiterer Fallstudien und für andere Parameter zu testen. Geeignete Szenarien, die eine adäquate Versorgung mit sanitären Einrichtungen und den nachhaltigen Umgang mit Ressourcen koppeln, lassen sich aber nur dann umsetzen, wenn



Zweikammer-Latrine mit Urinseparierung (Vietnam). Latrinboden mit zwei Löchern zu den beiden Kammern, Rinne für die Urinableitung und Urinbehälter.

die betroffenen Einwohner, Behörden und weiteren Interessenvertreter in die Planung eingeschlossen werden. Die Bereitschaft der dortigen Behörden, an solch zukunftsweisenden Szenarien mitzuarbeiten, ist vorhanden. Schliesslich ist die Gewässerverschmutzung ein dringend zu lösendes Problem und die Fischzucht eine der Haupteinnahmequellen vieler peri-urbaner Bezirke in der Region. ○ ○ ○

Dieses Projekt wurde im Rahmen des NCCR Nord-Süd und in Zusammenarbeit mit folgenden Personen in Hanoi, Vietnam durchgeführt: *Le Ngoc Cau*, Asian Institute of Technology Center in Vietnam (AITCV); *Viet Anh Nguyen* und *Pham Thuy Nga*, Centre for Environmental Engineering of Towns and Industrial Areas (CEETIA) an der Universität Hanoi; *Vu Dinh Tuan*, National Institute for Soils and Fertilizers (NISF).

- [1] Cordell D. (2005): Phosphorus – the forgotten ingredient in Food Security. Prepared for the Masters of Water Resources & Livelihood Security, Department of Water & Environmental Studies, Linköping University.
- [2] Morgan M.G., Henrion M. (1990): Uncertainty. A guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis. Cambridge University Press. Cambridge, UK, 332 p.
- [3] Baccini P., Bader H.P. (1996): Regionaler Stoffhaushalt – Erfassung, Bewertung, Steuerung. Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, 420 S.
- [4] Jönsson H., Richert Stintzing A., Vinnerås B., Salomon E. (2004): Guidelines on the use of urine and faeces in crop production. Report 2004–2. EcoSanRes Publications Series. Stockholm Environment Institute, 35 p.



Martin Schmid, Umwelt-
naturwissenschaftler und
Mitarbeiter der Abteilung
«Oberflächengewässer»

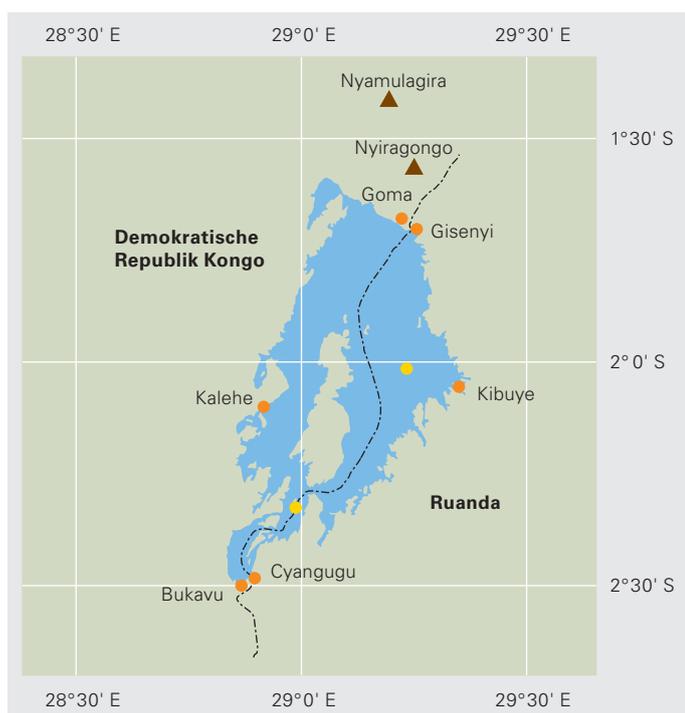
Gefährliche Gasmassen in der Tiefe des Kivu-Sees

Der Kivu-See (DR Kongo/Ruanda) enthält in seinem Tiefenwasser enorme Mengen von Kohlendioxid und Methan. Würde dieses Gas an die Oberfläche gelangen, wäre das Leben der am Kivu-See wohnenden Menschen bedroht. Messungen der Eawag zeigen nun einen unerwarteten Anstieg der Methankonzentrationen, wodurch sich die Gefahr eines Gasausbruchs erhöht.

In Kibuye, Ruanda, deutet wenig darauf hin, dass man sich an einem der ungewöhnlichsten Seen der Erde befindet. Die Landschaft erinnert ein wenig an einen Schweizer Voralpensee, die Hänge sind allerdings mit Bananen und Maniok statt mit Buchen und Tannen bepflanzt. In der Weite kann man gelegentlich den Vulkan Nyiragongo erkennen, der über der Stadt Goma im Kongo am Nordende des Sees thront. Im Januar 2002 wurde Goma durch einen Ausbruch des Nyiragongo weitgehend zerstört. Die Lava ergoss sich damals aus der Flanke des Vulkans und floss mit hoher Geschwindigkeit durch das Zentrum der Stadt und zum Teil in den Kivu-See. Neben den grossen Schäden, die der Lavastrom

verursachte, befürchtete man damals auch, dass er einen Gasausbruch auslösen könnte. Denn der Kivu-See (Abb. 1) enthält in seinem Tiefenwasser enorme Mengen der gelösten Gase Kohlendioxid und Methan. Gleich nach dem Vulkanausbruch im Jahr 2002 wurde kurzfristig eine Messkampagne mit Beteiligung der Eawag organisiert, um die Auswirkungen des Lavastroms auf die Schichtung im See zu untersuchen. Daraus entwickelte sich ein Projekt der Eawag, das die Gaskonzentrationen im See, die Bedingungen für einen Gasausbruch sowie die Zusammenhänge zwischen den Nährstoffkreisläufen im See und der Entstehung der Gase untersucht.

Abb. 1: Der Kivu-See mit den wichtigsten Städten, den beiden Vulkanen und den im See gesetzten Verankerungsstellen (gelbe Punkte).



Ein Gasausbruch wäre eine grosse Gefahr für das Leben der Menschen am Kivu-Sees. Bringt man Wasser aus 400 m Tiefe des Kivu-Sees an die Oberfläche, dann sprudelt es, als ob man eine Flasche Mineralwasser öffnete, die vorher geschüttelt worden war. Derart hohe Gaskonzentrationen können nur deshalb entstehen, weil der fast 500 m tiefe See extrem stabil geschicht-

Blick nach Westen auf den Kivu-See in der Nähe von Kibuye (Ruanda). Im Hintergrund sieht man die Idjwi-Insel (DR Kongo).



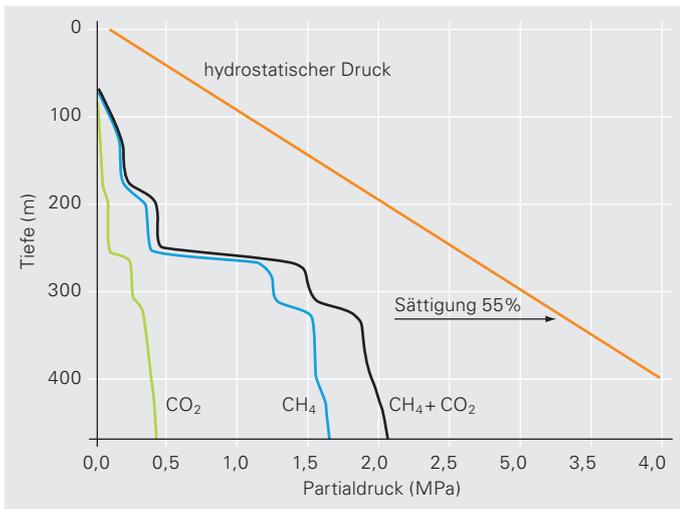


Abb. 2: Gasdruck im Kivu-See im Vergleich zum hydrostatischen Druck. Die höchste prozentuale Sättigung liegt zurzeit in einer Tiefe von ca. 300 m und beträgt gut 50%.

tet ist und der Austausch zwischen dem Tiefenwasser und dem Oberflächenwasser stark eingeschränkt ist. So sammelten sich die Gase über Jahrhunderte hinweg im Tiefenwasser an.

Insgesamt enthält der Kivu-See rund 60 km³ Methan und 250 km³ Kohlendioxid. Würde man dieses Gas auf der Oberfläche des Sees verteilen, so entstünde eine Schicht von mehr als 100 m Mächtigkeit. Wenn auch nur ein Teil dieses Gases aus dem See ausbrechen würde, wäre das eine riesige Gefahr für die rund 2 Millionen Menschen, die in der näheren Umgebung des Sees leben. Denn das Kohlendioxid ist schwerer als Luft und würde sich deshalb über dem See ansammeln. Zudem ist es bereits bei einem Anteil von weniger als 10% in der Atemluft tödlich. Bei einem ähnlichen Gasausbruch aus dem viel kleineren Nyos-See in Kamerun sind im August 1986 mehr als 1700 Menschen erstickt [1]. Der Nyos-See wird deshalb seit einigen Jahren künstlich entgast, damit sich diese Katastrophe nicht wiederholt [2]. Beobachtungen im Sediment des Kivu-Sees lassen vermuten, dass auch hier vor einigen tausend Jahren massive Gasausbrüche stattgefunden haben [3].

Zum Gasausbruch kommt es, wenn die Schichtung des Sees aufgebrochen wird. Bei unseren ersten Messungen nach dem Vulkanausbruch im Jahr 2002 stellten wir keine wesentlichen Veränderungen in der Schichtung des Sees fest. Daraus schlossen wir, dass die durch die Lava eingetragene Wärme nicht ausreichend war, um die geschichteten Wassermassen zu durchmischen und damit einen Gasausbruch auszulösen [4].

Aber unter welchen Bedingungen könnte das Gas aus dem Kivu-See ausbrechen? Abbildung 2 zeigt den Gasdruck im See im Vergleich mit dem hydrostatischen Druck. Das ist der Druck, den die Wassersäule in einer bestimmten Tiefe bewirkt. Weil Methan viel weniger gut löslich ist als Kohlendioxid, trägt es trotz der geringeren Konzentration den Löwenanteil zum Gasdruck bei. Wenn die Summe der Partialdrücke der gelösten Gase grösser ist als der

hydrostatische Druck, dann können sich spontan Gasblasen bilden und aufsteigen. Normalerweise wird dies nicht gleich zu einem massiven Gasausbruch führen. Wenn allerdings der See in einem grösseren Tiefenbereich fast vollständig mit Gasen gesättigt ist, dann kann eine kräftige interne Auslenkung einer Wasserschicht – ausgelöst beispielsweise durch eine Hangrutschung, einen Bergsturz oder einen Vulkanausbruch – ein grösseres Wasservolumen nach oben in einen Bereich verschieben, wo es mit Gasen übersättigt ist. In der Folge bilden sich Blasen, die einen zusätzlichen Auftrieb erzeugen, der weiteres gasreiches Wasser mit sich reissen kann. Eine solche Kettenreaktion könnte dann innert kurzer Zeit zum Austritt von gewaltigen Gasmengen aus dem See führen.

Im Moment ist der Kivu-See etwa zu 50% mit Gasen gesättigt (Abb. 2). Das Wasser aus 320 m Tiefe müsste rund 150 m aufsteigen, bis sich spontan Blasen bilden würden. Ein Gasausbruch erscheint deshalb in der aktuellen Situation unwahrscheinlich. Es müsste schon eine grössere Menge Magma direkt ins Tiefenwasser des Sees eindringen, um einen Aufstieg bis zur Entgasung zu ermöglichen [5].

Erstaunlicher Anstieg der Methankonzentration. Ein Vergleich mit Messungen aus den 70er Jahren [6] zeigt, dass die Methankonzentrationen innerhalb von nur 30 Jahren um fast 20% zugenommen haben. Diese Beobachtung war überraschend, weil man zuvor davon ausgegangen war, dass sich die Konzentrationen im See in einem langfristigen Gleichgewichtszustand befinden: es wird etwa gleich viel Methan nach oben transportiert und in der sauerstoffhaltigen Oberflächenschicht von Bakterien konsumiert, wie im Tiefenwasser entsteht. Aktuell scheint jedoch die Methanproduktion zu überwiegen, so dass gegen Ende des 21. Jahrhunderts ein Zustand erreicht würde, bei welchem jederzeit mit einem verheerenden Gasausbruch gerechnet werden müsste [7].

Mögliche Ursachen: Bevölkerungswachstums und Einführung einer ortsfremden Fischart. Die Ursache für die Zunahme des Methans ist unklar. Sicher ist, dass das Methan grösstenteils von Bakterien im sauerstofffreien Tiefenwasser des Sees aus totem organischem Material – abgestorbenen Algen – gebildet wird. Eine erhöhte Methanproduktion deutet also darauf hin, dass mehr organisches Material aus dem Oberflächenwasser ins Tiefenwasser exportiert wird. Dies kann mit zwei unterschiedlichen Hypothesen erklärt werden:

- ▶ Die Bevölkerung hat in den vergangenen Jahrzehnten im Einzugsgebiet des Kivu-Sees stark zugenommen. Entsprechend gelangen heute mehr Nährstoffe aus der Landwirtschaft und der Siedlungsentwässerung sowie durch Bodenerosion in den See.
- ▶ In den 1950er Jahren wurde eine Sardine aus dem Tanganjika-See in den Kivu-See eingeführt, weil dort vorher keine Fischart vorhanden war, die das Zooplankton im Freiwasser als Nahrungsquelle nutzen konnte. Die Sardine vermehrte sich bestens und leistet heute den grössten Beitrag zum Einkommen der Fischer. Sie hat aber auch den Nährstoffkreislauf im See stark beeinflusst, weil sie die Daphnien (Wasserflöhe) eliminierte, welche zuvor das Algenwachstum kontrollierten. Entsprechend sind heute die Zooplanktonkonzentrationen im Kivu-See nur halb so gross und



N. Pasche, Eawag

Die Sedimentfallen werden gesetzt. Sie sollen absinkende Algen auffangen.

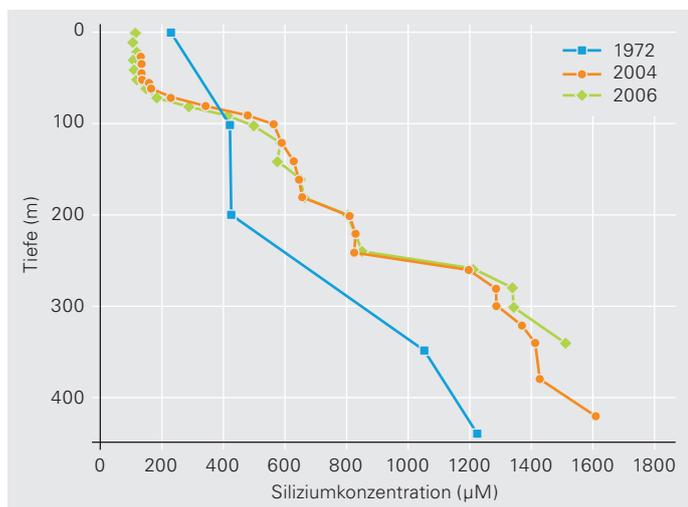
die Algenkonzentrationen höher als in den übrigen grossen ostafrikanischen Seen [8, 9].

Sowohl der Bevölkerungsanstieg als auch die Einführung der Sardine könnten damit zu einer erhöhten Algenproduktion geführt haben und Ursache für die ansteigenden Gaskonzentrationen sein.

Nachweisbarer Nährstoffanstieg. Der verstärkte Eintrag von organischem Material ins Tiefenwasser äussert sich auch in einer deutlichen Zunahme der Nährstoffkonzentrationen. Abbildung 3 zeigt als Beispiel dafür die Siliziumkonzentrationen im Kivu-See. Silizium wird vor allem von Kieselalgen für den Aufbau ihrer Schalen benötigt. Die Abnahme der Siliziumkonzentrationen im Oberflächenwasser und die entsprechende Zunahme im Tiefenwasser deuten darauf hin, dass vermehrt tote Kieselalgen ins Tiefenwasser abgesunken sind und dort zersetzt wurden. Ähnliche Trends wurden auch bei anderen Nährstoffen wie Phosphor und Calcium beobachtet.

Um die Ursachen des Methananstiegs herauszufinden, hat die Eawag, finanziert durch den Schweizerischen Nationalfonds, ein

Abb. 3: Siliziumkonzentrationen im Kivu-See, gemessen in den Jahren 1972 [10], 2004 [7] und 2006 (N. Pasche, Eawag).



neues Projekt lanciert. Es wird in Zusammenarbeit mit dem Institut Supérieur Pédagogique in Bukavu (DR Kongo), der Université Nationale du Rwanda in Butare und der Université Notre-Dame de la Paix in Namur (Belgien) durchgeführt. Im Rahmen dieses Projektes wurden im Mai 2006 an zwei Stellen im See Verankerungen installiert (Abb. 1), die mit Sedimentfallen bestückt sind, um absinkende Algen aufzufangen. So kann der Export von Nährstoffen aus der Oberflächenschicht bestimmt werden. Zudem wurden Sedimentkerne entnommen, um die historische Entwicklung der Nährstoffflüsse nachvollziehen zu können. Sie werden derzeit analysiert. Und schliesslich sollen regelmässig Wasserproben der Zuflüsse und des Niederschlags analysiert werden, um die Nährstoffeinträge von aussen abschätzen zu können. Neben der rein wissenschaftlichen Fragestellung hat das Projekt auch zum Ziel, die Forschungstätigkeit an den lokalen Universitäten zu fördern. Denn langfristig soll die Überwachung des Sees und damit die Sicherheit der Bevölkerung von lokalen Institutionen gewährleistet werden. ○ ○ ○

- [1] Sigvaldason G.E. (1989): International Conference on Lake Nyo Disaster, Yaounde, Cameroon 16–20 March, 1987 – conclusions and recommendations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 39, 97–107.
- [2] Halbwachs M., Sabroux J.C., Grangeon J., Kayser G., Tochon-Danguy J.C., Felix A., Béard J.C., Villeveille A., Vitter G., Richon P., Wüest A., Hell J. (2004): Degassing the «killer lakes» Nyo and Monoun, Cameroon. *EOS* 85, 281–288.
- [3] Haberyan K.A., Hecky R.E. (1987): The late pleistocene and holocene stratigraphy and paleolimnology of Lake Kivu and Tanganyika. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 67, 169–197.
- [4] Lorke A., Tietze K., Halbwachs M., Wüest A. (2004): Response of Lake Kivu stratification to lava inflow and climate warming. *Limnology and Oceanography* 49, 778–783.
- [5] Schmid M., Tietze K., Halbwachs M., Lorke A., McGinnis D., Wüest A. (2004): How hazardous is the gas accumulation in Lake Kivu? Arguments for a risk assessment in light of the Nyiragongo Volcano eruption of 2002. *Acta volcanologica* 14/15, 115–121.
- [6] Tietze K. (1978): Geophysikalische Untersuchung des Kivusees und seiner ungewöhnlichen Methangaslagerstätte – Schichtung, Dynamik und Gasgehalt des Seewassers. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel.
- [7] Schmid M., Halbwachs M., Wehrli B., Wüest A. (2005): Weak mixing in Lake Kivu: new insights indicate increasing risk of uncontrolled gas eruption. *Geochemistry, Geophysics, and Geosystems* 6, Q07009, doi:10.1029/2004GC000892.
- [8] Isumbisho M., Sarmiento H., Kaningini B., Micha J.-C., Descy J.-P. (2006): Zooplankton of Lake Kivu, half a century after the Tanganyika sardine introduction. *Journal of Plankton Research* 28, 971–989.
- [9] Sarmiento H., Isumbisho M., Descy J.-P. (2006): Phytoplankton ecology of Lake Kivu (eastern Africa). *Journal of Plankton Research* 28, 815–829.
- [10] Degens E.T., Von Herzen R.P., Wong H.-K., Deuser W.G., Jannasch H.W. (1973): Lake Kivu: structure, chemistry and biology of an East African Rift Lake. *Geologische Rundschau* 62, 245–277.

Publikationen

Die hier aufgelisteten und alle älteren Eawag-Publikationen können als PDF-Dateien heruntergeladen werden: <http://library.eawag.ch/ris/risweb.isa>
Suche nach Autor, Titel oder Stichwort möglich. Bei Problemen: bibliothek@eawag.ch

- [04493] **Uehlinger U., Brock J.T.** (2005): Periphyton metabolism along a nutrient gradient in a desert river (Truckee River, Nevada, USA). *Aquatic Sciences* 67, (4), 507–516.
- [04494] **Berg M., Giger W., Tran H.C., Pham H. V., Pham T.K.T., Schertenleib R.** (2006): Extent and severity of arsenic pollution in Vietnam and Cambodia (Chapter 29). In: Naidu R., Smith E., Owens G., Bhattacharya P., Nadebaum P. (Eds.), *Managing arsenic in the environment: From soil to human health*, CSIRO Publishing, Australia, 495–509.
- [04495] **Schärer M., Vollmer T., Frossard E., Stamm C., Flüher H., Sinaj S.** (2006): Effect of water composition on phosphorus concentration in runoff and water-soluble phosphate in two grassland soils. *European Journal of Soil Science* 57, (2), 228–234.
- [04496] **Malard F., Uehlinger U., Zah R., Tockner K.** (2006): Flood-pulse and riverscape dynamics in a braided glacial river. *Ecology* 87, (3), 704–716.
- [04497] **Zurbrugg C., Drescher S., Patel A.H., Sharatchandra H.C.** (2004): Decentralised composting of urban waste – an overview of community and private initiatives in Indian cities. *Waste Management* 24, (7), 655–662.
- [04498] **Sigg L., Black F., Buffle J., Cao J., Cleven R.F.M.J., Davison W., Galceran J., Gunkel P., Kalis E., Kistler D., Martin M., Noel S., Nur Y., Odzak N., Puy J., van Riemsdijk W.H., Temminghoff E., Tercier-Waeber M.L., Töpferwien S., Town R.M., Unsworth E.R., Warnken K.W., Weng L.P., Xue H.B., Zhang H.** (2006): Comparison of analytical techniques for dynamic trace metal speciation in natural freshwaters. *Environmental Science & Technology* 40, (6), 1934–1941.
- [04499] **Unsworth E.R., Warnken K.W., Zhang H., Davison W., Black F., Buffle J., Cao J., Cleven R.F.M.J., Galceran J., Gunkel P., Kalis E., Kistler D., Van Leeuwen H.P., Martin M., Noel S., Nur Y., Odzak N., Puy J., van Riemsdijk W.H., Sigg L., Temminghoff E., Tercier-Waeber M.L., Töpferwien S., Town R.M., Weng L.P., Xue H.B.** (2006): Model predictions of metal speciation in freshwaters compared to measurements by *in situ* techniques. *Environmental Science & Technology* 40, (6), 1942–1949.
- [04500] **Kaiser S.M., Escher B.I.** (2006): The evaluation of liposome-water partitioning of 8-hydroxyquinolines and their copper complexes. *Environmental Science & Technology* 40, (6), 1784–1791.
- [04501] **Dodd M.C., Buffle M.O., von Gunten U.** (2006): Oxidation of antibacterial molecules by aqueous ozone: Moiety-specific reaction kinetics and application to ozone-based wastewater treatment. *Environmental Science & Technology* 40, (6), 1969–1977.
- [04502] **Buschmann J., Canonica S., Lindauer U., Hug S.J., Sigg L.** (2005): Photoirradiation of dissolved humic acid induces arsenic(III) oxidation. *Environmental Science & Technology* 39, (24), 9541–9546.
- [04503] **Urmann K., Gonzalez-Gil G., Schroth M. H., Hofer M., Zeyer J.** (2005): New field method: Gas push-pull test for the *in situ* quantification of microbial activities in the vadose zone. *Environmental Science & Technology* 39, (1), 304–310.
- [04504] **Collins A.G., Schuchert P., Marques A.C., Jankowski T., Medina M., Schierwater B.** (2006): Medusozoan phylogeny and character evolution clarified by new large and small subunit rDNA data and an assessment of the utility of phylogenetic mixture models. *Systematic Biology* 55, (1), 97–115.
- [04505] **Luo J., Wu W.M., Fienen M.N., Jardine P.M., Mehlhorn T.L., Watson D.B., Cirpka O.A., Criddle C.S., Kitanidis P.K.** (2006): A nested-cell approach for *in situ* remediation. *Ground Water* 44, (2), 266–274.
- [04506] **Cirpka O.A., Olsson A., Ju Q.S., Rahman M.A., Grathwohl P.** (2006): Determination of transverse dispersion coefficients from reactive plume lengths. *Ground Water* 44, (2), 212–221.
- [04507] **Steiner M., Pronk W., Boller M.** (2006): Modeling of copper sorption onto GFH and design of full-scale GFH adsorbers. *Environmental Science & Technology* 40, (5), 1629–1635.
- [04508] **Lienert J., Monstadt J., Truffer B.** (2006): Future scenarios for a sustainable water sector: A case study from Switzerland. *Environmental Science & Technology* 40, (2), 436–442.
- [04509] **Egli T.** (2001): Biodegradation of metal-complexing aminopolycarboxylic acids. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 92, (2), 89–97.
- [04510] **Mieleitner J., Reichert P.** (2006): Analysis of the transferability of a biogeochemical lake model to lakes of different trophic state. Selected Papers from the Fourth European Conference on Ecological Modelling, September 27–October 1, 2004, Bled, Slovenia 194, (1–3), 49–61.
- [04511] **Matzinger A.D., Spirkovski Z., Patceva S., Wüest A.** (2006): Sensitivity of ancient Lake Ohrid to local anthropogenic impacts and global warming. *Journal of Great Lakes Research* 32, (1), 158–179.
- [04512] **Jankowski T., Livingstone D.M., Bührer H., Forster R., Niederhauser P.** (2006): Consequences of the 2003 European heat wave for lake temperature profiles, thermal stability, and hypolimnetic oxygen depletion: Implications for a warmer world. *Limnology and Oceanography* 51, (2), 815–819.
- [04513] **Janssen G.M.C.M., Cirpka O.A., van der Zee S.E.A.T.M.** (2006): Stochastic analysis of nonlinear biodegradation in regimes controlled by both chromatographic and dispersive mixing. *Water Resources Research* 42, (1), W01417, doi: 10.1029/2005WR004042.
- [04514] **Uehlinger U.** (2006): Annual cycle and inter-annual variability of gross primary production and ecosystem respiration in a floodprone river during a 15-year period. *Freshwater Biology* 51, (5), 938–950.
- [04515] **Buffle M.O., Schumacher J., Salhi E., Jekel M., von Gunten U.** (2006): Measurement of the initial phase of ozone decomposition in water and wastewater by means of a continuous quench-flow system: Application to disinfection and pharmaceutical oxidation. *Water Research* 40, (9), 1884–1894.
- [04516] **Meunier L., Canonica S., von Gunten U.** (2006): Implications of sequential use of UV and ozone for drinking water quality. *Water Research* 40, (9), 1864–1876.
- [04517] **Joss A., Zabczynski S., Göbel A., Hoffmann B., Löffler D., McArdeil C.S., Ternes T.A., Thomsen A., Siegrist H.** (2006): Biological degradation of pharmaceuticals in municipal wastewater treatment: Proposing a classification scheme. *Water Research* 40, (8), 1686–1696.
- [04518] **Wegelin M., Canonica S., Alder A.C., Marazuela M.D., Suter M.J.F., Bucheli T.D., Haefliger O.P., Zenobi R., McGuigan K.G., Kelly M.T., Ibrahim P., Larroque M.** (2001): Does sunlight change the material and content of polyethylene terephthalate (PET) bottles? *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua* 50, (3), 125–133.
- [04519] **Borsuk M.E., Reichert P., Peter A., Schager E., Burkhardt-Holm P.** (2006): Assessing the decline of brown trout (*Salmo trutta*) in Swiss rivers using a Bayesian probability network. *Ecological Modelling* 192, (1–2), 224–244.
- [04520] **Huber C., Beyerle U., Leuenberger M., Schwander J., Kipfer R., Spahni R., Severinghaus J.P., Weiler K.** (2006): Evidence for molecular size dependent gas fractionation in firn air derived from noble gases, oxygen, and nitrogen measurements. *Earth and Planetary Science Letters* 243, (1–2), 61–73.
- [04521] **Ho L., Onstad G., von Gunten U., Rinck-Pfeiffer S., Craig K., Newcombe G.** (2006): Differences in the chlorine reactivity of four micro-

- cystin analogues. *Water Research* 40, (6), 1200–1209.
- [04522] **Greinert J., Artemov Y., Egorov V., De Batist M., McGinnis D.F.** (2006): 1300-m-high rising bubbles from mud volcanoes at 2080 m in the Black Sea: Hydroacoustic characteristics and temporal variability. *Earth and Planetary Science Letters* 244, (1–2), 1–15.
- [04523] **Pronk W., Palmquist H., Biebow M., Boller M.** (2006): Nanofiltration for the separation of pharmaceuticals from nutrients in source-separated urine. *Water Research* 40, (7), 1405–1412.
- [04524] **Niggemann J., Schubert C.J.** (2006): Sources and fate of amino sugars in coastal Peruvian sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, (9), 2229–2237.
- [04525] **Niggemann J., Schubert C.J.** (2006): Fatty acid biogeochemistry of sediments from the Chilean coastal upwelling region: Sources and diagenetic changes. *Organic Geochemistry* 37, (5), 626–647.
- [04526] **Pronk W., Biebow M., Boller M.** (2006): Electrodialysis for recovering salts from a urine solution containing micropollutants. *Environmental Science & Technology* 40, (7), 2414–2420.
- [04527] **Tandy S., Ammann A.A., Schulin R., Nowack B.** (2006): Biodegradation and speciation of residual SS-ethylenediaminedisuccinic acid (EDDS) in soil solution left after soil washing. *Environmental Pollution* 142, (2), 191–199.
- [04528] **Tockner K., Peter A.** (2003): Totholz und Schwemmgut – entsorgungspflichtig oder ökologisch wertvoll? *Wasser Energie Luft* 95, (11/12), 351–374.
- [04529] **Langhans S.D., Tockner K.** (2006): The role of timing, duration, and frequency of inundation in controlling leaf litter decomposition in a river-floodplain ecosystem (Tagliamento, north-eastern Italy). *Oecologia* 147, (3), 501–509.
- [04530] **Nakamura K., Tockner K., Amano K.** (2006): River and wetland restoration: Lessons from Japan. *Bioscience* 56, (5), 419–429.
- [04531] **Bernasconi D., Burckhardt S., Peter P., Gujer W.** (2000): Anwendung der Datenstruktur Siedlungsentwässerung (VSA-DSS). *GWA Gas, Wasser, Abwasser* 86, (4), 245–253.
- [04532] **Zurbrügg C., Strauss M., Schertenleib R., Morel A.** (2006): Wiederverwenden statt verschwenden. *Helvetas Partnerschaft* 183, 16–18.
- [04533] **Zurbrügg C., Strauss M., Schertenleib R., Morel A.** (2006): Recycler au lieu de jeter. *Helvetas Partnerschaft* 183, 16–18.
- [04534] **Chèvre N.** (2006): Pestizide in Schweizer Oberflächengewässern. *GWA Gas, Wasser, Abwasser* 4, 297–307.
- [04535] **Burgherr P., Meyer E.I.** (1997): Regression analysis of linear body dimensions vs. dry mass in stream macroinvertebrates. *Archiv für Hydrobiologie* 139, (1), 101–112.
- [04536] **Dodd M.C., Vu N.D., Ammann A.A., Le V.C., Kissner R., Pham H.V., Cao T.H., Berg M., von Gunten U.** (2006): Kinetics and mechanistic aspects of As(III) oxidation by aqueous chlorine, chloramines, and ozone: Relevance to drinking water treatment. *Environmental Science & Technology* 40, (10), 3285–3292.
- [04537] **Dodd M.C., Huang C.H.** (2004): Transformation of the antibacterial agent sulfamethoxazole in reactions with chlorine: Kinetics mechanisms, and pathways. *Environmental Science & Technology* 38, (21), 5607–5615.
- [04538] **Hostmann M.** (2005): Decision support for river rehabilitation. Dissertation 16136, ETH-Zürich, Switzerland, 170 pp.
- [04539] **Reinhardt M., Müller B., Gächter R., Wehrli B.** (2006): Nitrogen removal in a small-constructed wetland: An isotope mass balance approach. *Environmental Science & Technology* 40, (10), 3313–3319.
- [04540] **Seehausen O.** (2006): African cichlid fish: a model system in adaptive radiation research. *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 1–12.
- [04541] **Schubert C.J., Durisch-Kaiser E., Holzner C.P., Klauser L., Wehrli B., Schmale O., Greinert J., McGinnis D.F., De Batist M., Kipfer R.** (2006): Methanotrophic microbial communities associated with bubble plumes above gas seeps in the Black Sea. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 7, Q04002, doi: 10.1029/2005GC001049.
- [04542] **Lomstein B.A., Jorgensen B.B., Schubert C.J., Niggemann J.** (2006): Amino acid biogeo- and stereochemistry in coastal Chilean sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, (12), 2970–2989.
- [04543] **Burkhardt M.** (2006): Einsatz von Bioziden in Fassaden. *Applica* 113, (12), 2–6.
- [04544] **Hammes F.A., Salhi E., Köster O., Kaiser H.P., Egli T., von Gunten U.** (2006): Mechanistic and kinetic evaluation of organic disinfection by-product and assimilable organic carbon (AOC) formation during the ozonation of drinking water. *Water Research* 40, (12), 2275–2286.
- [04545] **Wu W.M., Carley J., Gentry T., Ginder-Vogel M.A., Fienen M.N., Mehlhorn T., Yan H., Carol S., Pace M.N., Nyman J., Luo J., Gentile M.E., Fields M.W., Hickey R.F., Gu B.H., Watson D.B., Cirpka O.A., Zhou J.Z., Fendorf S., Kitani-dis P.K., Jardine P.M., Criddle C.S.** (2006): Pilot-scale *in situ* bioremediation of uranium in a highly contaminated aquifer. 2. Reduction of U(VI) and geochemical control of U(VI) bioavailability. *Environmental Science & Technology* 40, (12), 3986–3995.
- [04546] **Wu W.M., Carley J., Fienen M.N., Mehlhorn T., Lowe K., Nyman J., Luo J., Gentile M.E., Rajan R., Wagner D., Hickey R.F., Gu B.H., Watson D.B., Cirpka O.A., Kitani-dis P.K., Jardine P.M., Criddle C.S.** (2006): Pilot-scale *in situ* bioremediation of uranium in a highly contaminated aquifer. 1. Conditioning of a treatment zone. *Environmental Science & Technology* 40, (12), 3978–3985.
- [04547] **Kohler A., Abbaspour K.C., Fritsch M., Schulin R.** (2005): Solute recycling by crops and leaching in a drained arable soil. *European Journal of Soil Science* 56, (2), 145–153.
- [04548] **Yang H., Wang L., Abbaspour K.C., Zehnder A.J.B.** (2006): Virtual water trade: an assessment of water use efficiency in the international food trade. *Hydrology and Earth System Sciences* 10, 443–454.
- [04549] **Uehlinger U.** (1994): Sauerstoff in der Glatt: Photosynthese, Respiration und Sauerstoffhaushalt in einem anthropogen stark beeinflussten Mittellandfluss (Glatt, Kt. ZH). *GWA* 2/94, 123–128.
- [04550] **Gerecke A.C., Giger W., Hartmann P.C., Heeb N.V., Kohler H.-E., Schmid P., Zennegg M., Kohler M.** (2006): Anaerobic degradation of brominated flame retardants in sewage sludge. *Chemosphere* 64, (2), 311–317.
- [04551] **Müller T.A., Fleischmann T., van der Meer J.R., Kohler H.P.E.** (2006): Purification and characterization of two enantioselective α -Keto-glutarate-dependent dioxygenases, RdpA and SdpA, from *Sphingomonas herbicidovorans* MH. *Applied and Environmental Microbiology* 72, (7), 4853–4861.
- [04552] **Moosmann L., Gächter R., Müller B., Wüest A.** (2006): Is phosphorus retention in autochthonous lake sediments controlled by oxygen or phosphorus? *Limnology and Oceanography* 51, (1, part 2), 763–771.
- [04553] **Schmitt H., Stoob K., Hamscher G., Smit E., Seinen W.** (2006): Tetracyclines and tetracycline resistance in agricultural soils: microcosm and field studies. *Microbial Ecology*, doi: 10.1007/s00248-006-9035-y.
- [04554] **McGinnis D.F., Bocaniov S., Teodoru C., Friedl G., Lorke A., Wüest A.** (2006): Silica retention in the Iron Gate I reservoir on the Danube River: The role of side bays as nutrient. *River Research and Applications* 22, (4), 441–456.
- [04555] **Peter A.** (2006): Hydropeaking hinders biodiversity in Swiss rivers. *World Water and Environmental Engineering* 29, (2), 27–28.
- [04556] **Usooskin I.G., Solanki S.K., Kovaltsov G.A., Beer J., Kromer B.** (2006): Solar proton

- events in cosmogenic isotope data. *Geophysical Research Letters* **33**, (8),
- [04557] **Schmitt H., Martinali B., Stoob K., Hamscher G., van Beelen P., Smit E., van Leeuwen K., Seinen W.** (2006): Antibiotika als Umweltkontaminanten – Effekte auf Bodenbakterien. *UWSF – Z Umweltchem Ökotox* **18**, (2), 110–118.
- [04558] **Buffle M.O., von Gunten U.** (2006): Phenols and amine induced HO center dot generation during the initial phase of natural water ozonation. *Environmental Science & Technology* **40**, (9), 3057–3063.
- [04559] **Leuz A.K., Hug S.J., Wehrli B., Johnson C.A.** (2006): Iron-mediated oxidation of antimony(III) by oxygen and hydrogen peroxide compared to arsenic(III) oxidation. *Environmental Science & Technology* **40**, (8), 2565–2571.
- [04560] **Berney M., Weilenmann H.U., Egli T.** (2006): Flow-cytometric study of vital cellular functions in *Escherichia coli* during solar disinfection (SODIS). *Microbiology* **152**, 1719–1729.
- [04561] **Maurer M., Rothenberger D., Larsen T. A.** (2006): Decentralised wastewater treatment technologies from a national perspective: at what cost are they competitive? *Water Science and Technology* **5**, (6), 145–154.
- [04562] **Wenger K., Bigler L., Suter M.J.F., Schönenberger R., Gupta S.K., Schulin R.** (2005): Effect of corn root exudates on the degradation of atrazine and its chlorinated metabolites in soils. *Journal of Environmental Quality* **34**, (6), 2187–2196.
- [04563] **Nesatyy V., Ammann A.A., Rutishauser B.V., Suter M.J.F.** (2006): Effect of cadmium on the interaction of 17 beta-estradiol with the rainbow trout estrogen receptor. *Environmental Science & Technology* **40**, (4), 1358–1363.
- [04564] **Tockner K., Klaus I., Baumgartner C., Ward J.V.** (2006): Amphibian diversity and nest-ness in a dynamic floodplain river (Tagliamento, NE-Italy). *Hydrobiologia* **565**, 121–133.
- [04565] **Paetzold A., Bernet J.F., Tockner K.** (2006): Consumer-specific responses to riverine subsidy pulses in a riparian arthropod assemblage. *Freshwater Biology* **51**, (6), 1103–1115.
- [04566] **Li W., Cirpka O.A.** (2006): Efficient geostatistical inverse methods for structured and unstructured grids. *Water Resources Research* **42**, (6), W06402, doi: 10.1029/2005WR004668.
- [04567] **Matzinger A.D.** (2006): Is anthropogenic nutrient input jeopardizing unique Lake Ohrid? – Mass flux analysis and management consequences. Dissertation 16390, ETH-Zürich, Switzerland, 130 pp.
- [04568] **Vonmoos M.V.** (2005): Rekonstruktion der solaren Aktivität im Holozän mittels Beryllium-10 im GRIP Eisbohrkern. Dissertation 16224, ETH-Zürich, Schweiz, 145 S.
- [04569] **Philipp B., Erdbrink H., Suter M.J.F., Schink B.** (2006): Degradation of and sensitivity to cholate in *Pseudomonas* sp strain Chol1. *Archives of Microbiology* **185**, (3), 192–201.
- [04570] **Franchini A.G., Egli T.** (2006): Global gene expression in *Escherichia coli* K-12 during short-term and long-term adaptation to glucose-limited continuous culture conditions. *Microbiology* **152**, (7), 2111–2127.
- [04571] **Gasser D., Hauser L., Quirici R., Preusschoff P., Schläpfer M., Wegmann R., Kleinn J., Verbunt M., Gurtz J., Schär C., Wehrli B.** (2003): Einfluss von Klima- und Landnutzungsänderungen auf den Abfluss der Thur. *Wasser, Energie, Luft* **11/12**, 337–344.
- [04572] **Wittmer D.** (2006): Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt. Dissertation 16325, ETH-Zürich, Schweiz, 201 S.
- [04573] **Hostmann M., Bernauer T., Mosler H.J., Reichert P., Truffer B.** (2005): Multi-attribute value theory as a framework for conflict resolution in river rehabilitation. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* **13**, (2–3), 91–102.
- [04574] **Hoehn E., Cirpka O.A.** (2006): Assessing residence times of hyporheic ground water in two alluvial flood plains of the Southern Alps using water temperature and tracers. *Hydrology and Earth System Sciences* **10**, 553–563.
- [04575] **Dominguez D., Gujer W.** (2006): Evolution of a wastewater treatment plant challenges traditional design concepts. *Water Research* **40**, (7), 1389–1396.
- [04576] **Luo J., Cirpka O.A., Kitanidis P.K.** (2006): Temporal-moment matching for truncated breakthrough curves for step or step-pulse injection. *Advances in Water Resources* **29**, (9), 1306–1313.
- [04577] **Sanchez-Polo M., Rivera-Utrilla J., Salhi E., von Gunten U.** (2006): Removal of bromide and iodide anions from drinking water by silver-activated carbon aerogels. *Journal of Colloid and Interface Science* **300**, (1), 437–441.
- [04578] **Leuz A.K.** (2006): Redox reactions of antimony in the aquatic and terrestrial environment. Dissertation 16582, ETH-Zürich, Switzerland, 121 pp.
- [04579] **Töpperwien S.** (2006): Cadmium accumulation in *Scenedesmus vacuolatus* under freshwater conditions. Dissertation 16607, ETH-Zürich, Switzerland, 124 pp.
- [04580] **Franchini A.G.** (2006): Physiology and fitness of *Escherichia coli* during growth in carbon-excess and carbon-limited environments. Dissertation 16585, ETH-Zürich, Switzerland, 219 pp.
- [04581] **Schubert C.J., Durisch-Kaiser E., Wehrli B., Thamdrup B., Lam P., Kuypers M.M.M.** (2006): Anaerobic ammonium oxidation in a tropical freshwater system (Lake Tanganyika). *Environmental Microbiology*, doi: 10.1111/j.1462-2920.2006.001074.x.
- [04582] **Schubert C.J., Coolen M.J.L., Neretin L. N., Schippers A., Abbas B., Durisch-Kaiser E., Wehrli B., Hopmans E.C., Sinninghe Damsté J. S.S., Wakeham S.G., Kuypers M.M.M.** (2006): Aerobic and anaerobic methanotrophs in the Black Sea water column. *Environmental Microbiology*, doi: 10.1111/j.1462-2920.2006.01079.x.
- [04583] **Benekos I.D., Cirpka O.A., Kitanidis P.K.** (2006): Experimental determination of transverse dispersivity in a helix and a cochlea. *Water Resources Research* **42**, (7), W07406, doi: 10.1029/2005WR004712.
- [04584] **Hermann E., Schwengeler R., Rotzetter A., Steiner M., Boller M.** (2005): Behandlung von hochbelastetem Strassenabwasser. *GWA Gas, Wasser, Abwasser* **12**, 953–959.
- [04585] **Maerki M., Müller B., Wehrli B.** (2006): Microscale mineralization pathways in surface sediments: A chemical sensor study in Lake Baikal. *Limnology and Oceanography* **51**, (3), 1342–1354.
- [04586] **Kaenel B.R., Uehlinger U.** (1998): Effects of plant cutting and dredging on habitat conditions in streams. *Archiv für Hydrobiologie* **143**, (3), 257–273.
- [04587] **Shen C., Beer J., Ivy-Ochs S.D., Sun Y., Yi W., Kubik P.W., Suter M.J.F., Li Z., Peng S., Yang Y.** (2004): Be-10, C-14 distribution, and soil production rate in a soil profile of a grassland slope at Heshan Hilly Land, Guangdong. *Radio-carbon* **46**, (1), 445–454.
- [04588] **Filippini M., Buesing N., Bettarel Y., Sime-Ngando T., Gessner M.O.** (2006): Infection paradox: High abundance but low impact of freshwater benthic viruses. *Applied and Environmental Microbiology* **72**, (7), 4893–4898.
- [04589] **Müller B., Wang Y., Wehrli B.** (2006): Cycling of calcite in hard water lakes of different trophic states. *Limnology and Oceanography* **51**, (4), 1678–1688.
- [04590] **Dudgeon D., Arthington A.H., Gessner M.O., Kawabata Z.I., Knowler D.J., Leveque C., Naiman R.J., Prieur-Richard A.H., Soto D., Stiassny M.L.J., Sullivan C.A.** (2006): Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews* **81**, (2), 163–182.
- [04592] **Finger D., Jaun L., Wüest A.** (2006): Auswirkungen der Stauseen auf den Schwebstoffhaushalt und auf die Primärproduktion des Brienzersees. Veränderungen im Ökosystem Brienzersee, Schlussbericht des Teilprojektes C, 45 S.



Das genügsame Haus

«Das Gebäude der Zukunft», «Schritt zur 2000-Watt-Gesellschaft», «Visitenkarte für die Null-Energie-Architektur» – breit haben die Medien über das Forum Chriesbach berichtet. Der rote Faden durch alle Beiträge: Die Eawag erforscht die nachhaltige Nutzung der Ressource Wasser und setzt gleich selbst ein Zeichen für eine zukunftsfähige Entwicklung.

Am 1. September 2006 hat die Eawag ihren Neubau festlich eröffnet. Tags darauf nutzten rund 2500 Interessierte die Gelegenheit, das Haus mit der prägnanten Fassade aus blauen Glaslamellen eingehend zu besichtigen. Auf Informationswegen vermittelten wir den Besucherinnen und Besuchern alles Wissenswerte zum Gebäude, aber auch viel Spannendes zu Forschungsprojekten, mit denen die Eawag zur Lösung aktueller Wasserprobleme beiträgt.

Keine Heizung eingebaut. Das Besondere am Forum Chriesbach ist die konsequente Anwendung vorhandener Erkenntnisse des nachhaltigen Bauens. Nicht einzelne, auf die Spitze getriebene oder erst in Entwicklung stehende Komponenten stehen im Zentrum. Vielmehr spielen etablierte Technologien möglichst einfach zusammen. Mit Ausnahme des Erdgeschosses (Personalrestaurant, Empfang und Bibliothek) benötigt das Haus keine eigentliche Heizung. Es ist mit einer 45 cm dicken Fassade (davon 30 cm Steinwolle) und hochwertigen Fenstern so gut isoliert, dass die Wärmeverluste sehr gering sind. Alle Wärmequellen werden genutzt, von der Abwärme der Computer und Lampen bis zur Körperwärme der Mitarbeitenden. Im Winter wird die zugeführte Frischluft

in einem Erdregister mit 80 im Erdreich verlegten, rund 20 m langen Rohren vorgewärmt und zusätzlich in einem Wärmetauscher mit der Wärme der Abluft und des Serverraums erwärmt. Ausserdem kann der Luft Wärme aus dem Warmwasserspeicher beigemischt werden. Dieser wird durch die Sonnenkollektoren auf dem Dach (50 m², Vakuumröhrensystem) und die Abwärme der Kühlaggregate aus der Küche aufgeheizt. Und für die Spitzendeckung in ganz kalten Perioden kann Wärme aus dem Empa-Eawag-Arealnetz bezogen werden. Die Berechnungen gehen davon aus, dass dieser Bezug ein Äquivalent von 2500 l Erdöl pro Jahr nicht übersteigt – also kaum soviel wie ein konventionell erstelltes Einfamilienhaus benötigt.

Angenehm kühl im Sommer. 1232 mit einem Siebdruckraster versehene Glaslamellen sind ein ästhetisch innovativer Ersatz für Sonnenstoren. Fassadenweise werden sie dem Sonnenstand nachgeführt: im Winter so, dass viel Sonne auf das Gebäude trifft, im Sommer so, dass die Strahlung Fenster und Innenräume nicht aufheizen kann. An heißen Tagen wird das ganze Haus über Nacht abgekühlt, indem sich Fensterflügel in den Büros und Luken im Dach öffnen. Die Hitze entweicht

über das Atrium wie über einen Kamin und kühle Nachtluft fliesst in die Büros. Die Betondecken dienen als Speichermasse; die Lehm-trennwände helfen zusätzlich, das Raumklima auszugleichen. Selbst als im Juli mit 35 °C im Freien drückende Hitze herrschte, stiegen die Temperaturen im Forum Chriesbach nicht über 26 °C – ohne energieintensive Klimatisierung.

Die graue Energie im Auge behalten. Nachhaltiges Bauen bedeutet, den ganzen Lebenszyklus des Gebäudes zu berücksichtigen, insbesondere auch die investierte graue Energie. Relativ gesehen ist deren Anteil umso bedeutender, je tiefer der Energieaufwand für den Betrieb gehalten werden kann. Daher wurden ressourcenschonende Materialien verwendet, zum Beispiel Recyclingbeton, Trennwände in Lehm-Holz-Bauweise oder Steinholz als Bodenbelag. Auf schlecht rückbaubare Verbundwerkstoffe wurde möglichst verzichtet, bei energieintensiveren Bauteilen auf eine lange Nutzungszeit geachtet. 460 Quadratmeter Solarzellen auf dem Dach decken einen Drittel des Strombedarfs. Diese Anlage wird nach 25 Jahren rund 7,5-mal so viel Energie produziert haben, wie für ihre Herstellung benötigt wurde. Mit einem Leistungsverbrauch pro Kopf



Am 1. und 2. September feierte die Eawag die Eröffnung ihres neuen Hauptgebäudes «Forum Chriesbach». Das wohl nachhaltigste Bürogebäude der Schweiz gehört zu den Gewinnern des Solarpreises 2006 in der Kategorie «Gebäude». (Fotos: Eawag; Roger Frei, Zürich; Sandra Neuhaus, Meilen)

von rund 190 Watt für Strom und Wärme und 240 Watt für die graue Energie beweist das Forum Chriesbach, dass die 2000-Watt-Gesellschaft¹ im Gebäudebereich keine Vision mehr ist, sondern heute schon umgesetzt werden kann.

Forschen am eigenen Haus. Besonderes Gewicht kommt dem Umgang mit Wasser und Abwasser zu: Dachwasser wird im Wassergarten mit 80 m³ Inhalt gespeichert und zur Toilettenspülung benutzt. Das von den übrigen befestigten Flächen anfallende Regenwasser wird auf extensiv begrünten Flächen versickert. In allen Toiletten wird Urin separat abgeleitet und zu Forschungszwecken zentral gesammelt. So können mit der NoMix-Technologie praxisnahe

Erfahrungen gesammelt und neue Forschungsfragen im eigenen Haus angepackt werden. Mehr dazu auf der Projektseite www.novaquatis.ch und am Eawag-Infotag (siehe Kasten). Demnächst soll ausserdem der Chriesbach revitalisiert werden, der durch das Eawag-Gelände fliesst. Die ganze Umgebung, samt der neuen Eawag-Empa-Kindertagesstätte, wird damit immer mehr zum Teil eines «sustainable campus» – einer nachhaltigen Hochschullandschaft.

Kein Luxusbau. Das Forum Chriesbach wurde vom Team Bob Gysin+Partner BGP geplant und durch die Generalunternehmung Implenia erstellt. Der sechsgeschossige Bau umfasst neben den 150 Büroarbeitsplätzen einen Vortragssaal für 140 Personen, zwei Seminarräume für je 40 Personen, Sitzungszimmer und Kommunikationszonen. Ausserdem die gemeinsame Bibliothek von Eawag und Empa

sowie das Personalrestaurant aQa mit Biolabel. Im Juni 2006 wurde das Haus bezogen. Die bisherigen Erfahrungen sind positiv, einzelne Schwachstellen oder Startschwierigkeiten, wie defekte Temperaturfühler oder falsche Steuerimpulse, werden laufend ausgemerzt. Das Vorurteil, nur die öffentliche Hand könne sich ein solches Haus leisten, hat sich nicht bestätigt. Durch den bewussten Verzicht auf einen luxuriösen Innenausbau sowie auf eine wirtschaftlich nicht zu rechtfertigende völlige Energieautarkie wurde der Baukredit des Bundes von 32,7 Millionen Franken nicht ausgeschöpft. Der Kubikmeterpreis von 572 Franken (SIA, BKP2) braucht einen Vergleich mit herkömmlich erstellten Bauten nicht zu scheuen. ○ ○ ○
Andri Bryner, Eawag

Mehr Informationen und Ankündigung von öffentlichen Führungen auf: www.forumchriesbach.eawag.ch

¹ Der Bezug von 2000-Watt Dauerleistung pro Person bezieht sich auf alle Lebensbereiche, nicht nur die Arbeitsstelle. Aktuell beträgt dieser Wert in der Schweiz 5000–6000 Watt.

Eawag-Infotag: 7. März 2007

Mix oder NoMix – Urinseparierung als Alternative in der Siedlungswasserwirtschaft

Im Projekt «Novaquatis» hat die Eawag Aspekte der Urinseparierung erforscht. Die NoMix-Technologie erwies sich als ernst zu nehmende Option, und da war es nur konsequent, das neue Hauptgebäude komplett mit NoMix-WCs auszustatten. Denn trotz grosser Erfolge ist die konventionelle Siedlungswasserwirtschaft in vielen Aspekten nicht optimal: Das Abwasser wird mit Trink- und Regenwasser vermischt und kilometerweit transportiert. Nährstoffe (Stickstoff, Phosphor) gehen verloren, und die Abwasserbehandlung in den Kläranlagen hinkt hinter den Umweltproblemen her. Urinseparierung würde die Kläranlagen entlasten. Nährstoffe aus dem Urin könnten als Dünger wieder verwendet und Problemstoffe wie Medikamente und Hormone direkt entfernt werden. Ausserdem hilft die NoMix-Technologie, Wasser zu sparen und erhöht die Flexibilität des Systems.

Am Infotag werden Ergebnisse aus Novaquatis vorgestellt – von der Technologieentwicklung über ökotoxikologische und sozialwissenschaftliche Aspekte bis zu Umsetzungen in Pilotprojekten. www.eawag.ch/infotag



Ruedi Keller, Zürich

Janet Hering neue Eawag-Direktorin



Am 1. Januar 2007 übernimmt Janet Hering die Leitung der Eawag von Ueli Bundi, der das Forschungsinstitut mit 400 Mitarbeitenden seit dem 1. Juli 2004

interimistisch führt. Die 48-jährige amerikanische Wissenschaftlerin kommt vom California Institute of Technology, wo sie als Professorin für Umweltwissenschaft und -technologie tätig war. Ihre Spezialgebiete sind das biogeochemische Verhalten von Spurenmetallen und Methoden zur Aufbereitung von verunreinigtem Wasser zu Trinkwasser.

Wem gehört das Wasser?



Schon wird das neue Buch «Wem gehört das Wasser?» mit Al Gores Buch und Film zum Klimawandel verglichen. Die Eawag hat das Werk personell und finanziell unterstützt. Leicht ver-

ständig und mit verstörenden Bildern beschäftigt sich der Band fundiert mit Wasserproblemen und vor allem mit den Frage: «Ist Wasser eine handelbare Ware oder ist seine freie Verfügbarkeit ein Menschenrecht?». CHF 69.90/€ 49.90, in Deutsch oder Englisch; Verlag: Lars Müller, Baden, September 2006.

Bundespräsident besucht Eawag

Bundespräsident Moritz Leuenberger hat am 1. Dezember 2006 mit seinem Stab die Eawag besucht. Im Zentrum stand das Forum Chriesbach, das zurzeit wohl nachhaltigste Bürogebäude der Schweiz (siehe S. 30). Daran knüpfte auch Direktor Ueli Bundi an: Die Eawag arbeite an nachhaltigen Lösungen für weltweit immer akutere Wasserprobleme, sagte er, da sei es Pflicht, mit dem eigenen Gebäude voranzugehen. Die Gäste zeigten sich beeindruckt vom Neubau, aber auch vom «feu sacré», das sie an der Eawag gespürt hätten: Hier werde tatsächlich nicht nur Wasser gepredigt, sondern auch

getrunken, hiess es am anschliessenden Apéro – obwohl dort natürlich auch Wein ausgeschenkt wurde.

Fotos: Eawag



Rotkreuzpreis für Sodis

Das Schweizerische Rote Kreuz hat das Eawag-Projekt Sodis (solare Wasserdesinfektion in PET-Flaschen) und dessen Programmleiter Martin Wegelin im Juni mit dem erstmals verliehenen Rotkreuzpreis ausgezeichnet. Die anlässlich des 140-jährigen Bestehens des SRK vergebene Ehrung ist mit 25000 Franken dotiert und wird für besondere humanitäre Leistungen

vergeben. Die Jury sei beeindruckt vom persönlichen Einsatz von Sodis-Initiant Martin Wegelin: Er setze seine Forschungs- und Entwicklungsarbeit durch Partnerschaften und Fundraising erfolgreich in die Tat um. Sodis sei eine bestechende Methode zur Reduktion der (Durchfall-) Erkrankungen und der Sterblichkeit in Entwicklungsländern.

Agenda

Peak-Kurse

14.–16. März

Eawag Dübendorf

Ökotoxikologiekurs Hauptmodul R: Risiko-Abschätzung

28.–30. März

Fische in Schweizer Gewässern

25.–27. April

Cemagref Lyon

Cours d'Ecotoxicologie Module E: Evaluation des polluants

Infotag

7. März

ETH Zürich

Mix oder NoMix – Urinseparierung als neues Element der Siedlungswasserwirtschaft (siehe S. 31)

Fachtagung

25. Januar

Hotel Bern, Bern

Untersuchung und Beurteilung der Fließgewässer: Methoden, Anwendungen, Perspektiven

Vorträge

8. Januar, 15:30 Uhr

Eawag Kastanienbaum

Riverine floodplain heterogeneity as a controller of organic matter dynamics and terrestrial invertebrate distribution

Simone Langhans, Eawag

12. Januar, 11 Uhr

Eawag Dübendorf

The past, the present and the future: anthropogenic effects on Central European coregonids

Rudolf Müller, Eawag

19. Januar, 11 Uhr

Eawag Dübendorf

Can we predict the impacts of invasive species in inland waters?

Tony Ricciardi, McGill University, Canada

26. Januar, 11 Uhr

Eawag Dübendorf

Proteins as stress indicators in aquatic Organisms – an introduction to shotgun proteomics

Marc Suter, Eawag Dübendorf

2. Februar, 11 Uhr

Eawag Dübendorf

Engineering for the aquatic environment: evolution and prospects

Janet Hering, Eawag

Info unter: www.eawag.ch/veranstaltungen