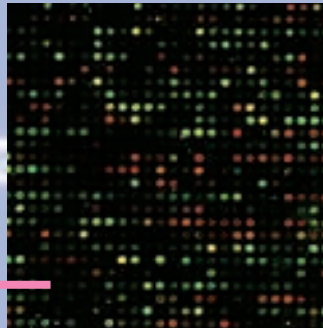


# Tracer – Spurensicherung in der Umweltforschung

Bestimmung der Isotopenzusammensetzung von Umweltchemikalien **6**



Biologische Tracer in der Ökotoxikologie **8**



Sedimente – Archive für Detergentien **10**



Interview mit Ruth Gonseth zu «Risikofaktoren im Wasser» **22**



## Tracer – Spurensicherung in der Umweltforschung

2 Detektivarbeit (Editorial)

### Leitartikel

3 Tracer – Unsichtbares sichtbar machen

### Forschungsberichte

6 Bestimmung der Isotopenzusammensetzung von Umweltchemikalien

8 Biologische Tracer in der Ökotoxikologie

10 Sedimente – Archive für Detergentien

12 RNA – ein Tracer zum Nachweis von Mikroorganismen

14 Silber als neuer Tracer für die Kieselalgenproduktion

16 Mikrostrukturen der Temperatur als Tracer für Turbulenz und Mischung

18 Unterscheidung von Grundwasserlebensräumen mit Radon als Tracer

20 Konservative Elemente auf neuen Wegen

### Forum

22 EAWAG-Infotag 2001 «Risikofaktoren im Wasser» – ein Interview mit Ruth Gonseth zum Thema

### In Kürze

24 Publikationen und Bücher

27 Vermischte Meldungen

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

**Redaktion** Martina Bauchrowitz, EAWAG

**Copyright** Abdruck, auch auszugsweise, ist mit Quellenangabe und unter Einsendung von zwei Belegexemplaren an die Redaktion gestattet.

**Erscheinungsweise** dreimal jährlich in Deutsch, Englisch, Französisch

**Fotos Titelblatt** Stadtpolizei Zürich, WWW, M. Sturm (EAWAG), S. Wey (Zürich)

**Konzept** Inform, 8005 Zürich

**Satz, Bild und Layout** Peter Nadler, 8700 Küsnacht

**Gedruckt** auf rezykliertem Papier

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

# Detektivarbeit



Bernhard Wehrli,  
 Leiter der Abteilung  
 «Oberflächengewässer»

Sherlock Holmes, Philip Maloney, Guido Brunetti, Stoner McTavish und andere Grössen des Kriminalromans verblüffen ihre Umgebung immer wieder mit ihren Fähigkeiten, aus kleinsten Spuren die fehlenden Indizien zur Lösung eines Kriminalfalles zusammenzutragen. Umweltforschung verläuft zwar meist weniger spektakulär, dennoch gehören Spurensicherung und Indizienbeweise auch bei uns zur gängigen Praxis. Viele Prozesse in unseren Gewässern laufen im Verborgenen ab. Farbloses Nitrat wird z.B. von Mikroorganismen zum unsichtbaren und geruchlosen molekularen Stickstoff abgebaut. Zwar stehen leistungsfähige analytische Methoden zur Verfügung, die nachweisen, dass Nitrat aus dem Wasser verschwindet. Das Rätsel, wie, wo und durch welche Mikroorganismen dies geschieht, bleibt aber schwer zu knacken.

Die Kriminalkommissare stehen oft vor der Alternative, die Verdächtigen zu verhaften und zu befragen oder durch Observation auf frischer Tat zu überführen. Vor ähnlichen Alternativen steht auch die Umweltforschung: Man kann die Natur ins Labor bringen, um unter möglichst kontrollierten Bedingungen mit ihr zu experimentieren. Oder man versucht, die relevanten Prozesse in der natürlichen Umwelt durch aufwändige Beobachtung zu bestimmen. Dabei leisten Tracer sehr nützliche Dienste. Sie können uns auf die richtige Spur bringen oder verborgene Vorgänge sichtbar machen. Einige der «Fahndungsmethoden» in der modernen Umweltforschung wollen wir in diesem Heft erläutern.

Die EAWAG investierte in den letzten Jahren stark in die Entwicklung der Tracer-Methoden. Unsere Arbeitsgebiete reichen von der Turbulenzforschung in der aquatischen Physik über Studien zum Abbau und zur

Verteilung von Umweltchemikalien bis hin zu Prozessen der molekularen Biologie. Diese wissenschaftliche Detektivarbeit muss sich auf eine moderne analytische Infrastruktur abstützen können. Mit verschiedenen Forschungsgruppen der ETH Zürich und kantonalen Labors hat sich eine fruchtbare Zusammenarbeit ergeben, so dass die nötige Infrastruktur gemeinsam genutzt wird. Beispielsweise ist an der EAWAG ein Massenspektrometer für die Analyse von stabilen Isotopen in organischen Molekülen zusammen mit der ETH Zürich angeschafft worden.

Das Freitagseminar der EAWAG wird im kommenden Wintersemester den Isotopen-Trackern gewidmet sein. Diese Veranstaltung dient als Treffpunkt für ein interessiertes Fachpublikum und wird ab Ende Oktober jeden Freitag von 11 bis 12 Uhr stattfinden. Es würde uns freuen, Sie dort wiederzusehen. Sie finden das Programm auf unserer Internet-Seite:

[www.eawag.ch/events/d\\_seminare.html](http://www.eawag.ch/events/d_seminare.html)





# Tracer – Unsichtbares sichtbar machen

**Tracer sind Messgrößen, die in der Umweltforschung Prozesse sichtbar machen und unbekannte Vorgänge klären. Mit Hilfe von Tracern wurde beispielsweise in der Meeresforschung das Rätsel gelöst, wo der Golfstrom endet. Ähnliche Fragestellungen im Bereich der Gewässer werden an der EAWAG mittels Isotopenmessungen bearbeitet. Aus Spuren in Umweltarchiven kann man Rückschlüsse auf Umweltveränderungen ziehen. Ein neues Entwicklungsfeld stellen Indikatoren für biologische Prozesse dar. So lassen sich mit Biomarkern die Wirkungen von Schadstoffen auf Organismen beurteilen.**

## Spuren des Golfstroms

Wir Europäer geniessen ein mildes Klima, weil der Golfstrom warmes Meerwasser aus den Tropen an unsere Küsten spült. Der Golfstrom transportiert zwanzig mal mehr Wasser als alle Flüsse der Welt gemeinsam. Irgendwo muss dieser Meeresstrom aber wieder versinken, sonst würde sich im Nordatlantik mit der Zeit ein «Wasserberg» auftürmen... In den siebziger Jahren wurde eine Serie von ozeanographischen Expeditionen gestartet, um dem Geheimnis der Meeresströmungen auf die Spur zu kommen. Dabei erwiesen sich die Temperatur und der Salzgehalt des Meerwassers als verlässliche Messgrößen. In Abbildung 1 sind zwei Längsschnitte durch den Atlantischen Ozean dargestellt [1]. Auf seinem Weg nach Norden verdunstet ein Teil des Wassers des Golfstroms, was in Westeuropa zu den bekannten häufigen Niederschlägen führt. Der Salzgehalt des Meerwassers nimmt durch die Verdunstung zu. Ausserdem kühlt sich das Wasser auf dem Weg nach Norden ab und mischt sich mit dem Wasser des Polarmeeres, wo die Bildung von Packeis den Salzgehalt ebenfalls erhöht. Nördlich von Island erreichen Temperatur und Salzgehalt einen kritischen Wert. Die Dichte des Wassers nimmt zu und der Golfstrom taucht deshalb bis auf 3000 m Wassertiefe ab und wendet sich nach Süden, man spricht von nun an vom nordatlantischen Tiefenwasser. Bei Gibraltar schichtet sich warmes, aber sehr salzhaltiges Wasser aus dem Mittelmeer über diesen Tiefenwasserstrom. Auf der Höhe

von Südafrika fliessen ihm von Süden zwei Zungen von antarktischem Wasser entgegen. Ein Teil davon ist kälter, aber weniger salzhaltig als das atlantische Tiefenwasser und fliesst auf dem Meeresgrund nach Norden. Mit den beiden Messgrößen Temperatur und Salzgehalt gelingt es also, die sehr langsamen Strömungen in grosser Meerestiefe sichtbar zu machen. Solche Messparameter, die verborgene Prozesse sichtbar machen, nennt man Tracer. Die Temperatur

eines Wasserkörpers enthält nicht nur die Spuren von grossräumigen Zirkulationsvorgängen. Entsprechend fein aufgelöste Temperaturschwankungen geben auch quantitative Hinweise auf kleinräumige turbulente Mischungsprozesse. Der Beitrag von A. Wüest auf Seite 16 illustriert, wie solche Temperatur-Mikrostrukturmessungen in einem See ausgewertet werden können.

## Quellen und Senken

Die Fragen, woher das Wasser einer Quelle stammt oder wohin ein versickernder Bach fliesst, haben die Menschen seit dem Altertum beschäftigt. Markierungsversuche sind in der Gewässerforschung schon fast 2000 Jahre alt. Bereits in römischer Zeit wurde das Wasser des Jordan mit Spreu markiert, um die unterirdischen Fliesswege einer Karstquelle aufzuspüren [2]. Seit etwa 50 Jahren verwendet man zu diesem Zweck fluoreszierende Farbstoffe als Tracer, die dem zu untersuchenden System von aus-

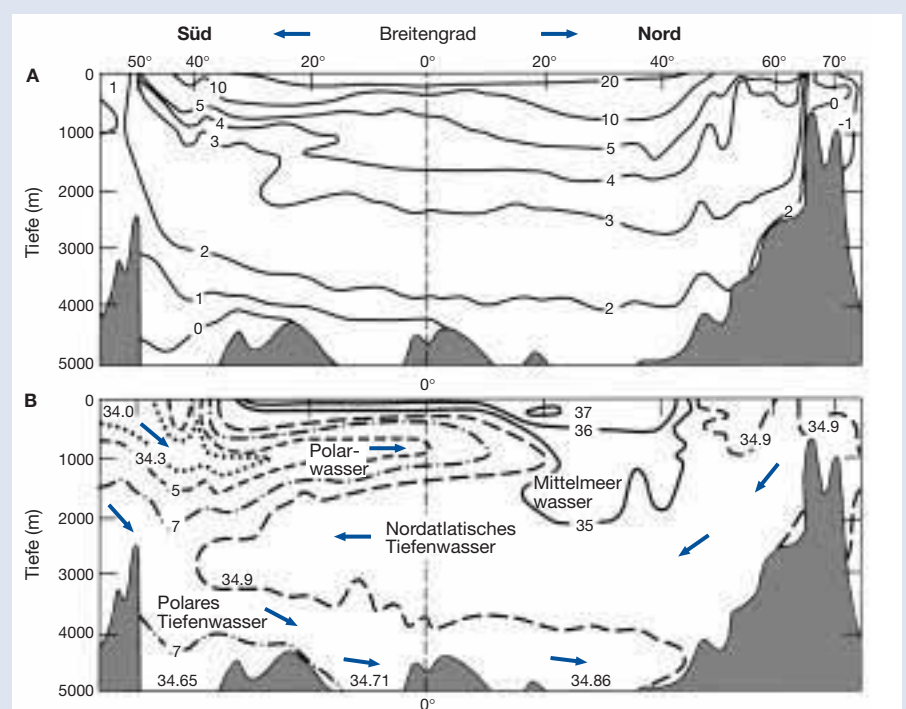


Abb. 1: Längsschnitt durch den Atlantischen Ozean. Linien kennzeichnen Bereiche (A) gleicher Temperatur ausgedrückt in °C und (B) gleicher Salinität ausgedrückt in ‰.

sen zugegeben werden. Eleganter ist es natürlich, Stoffe zu messen, die bereits in der Umwelt vorkommen. Solche Tracer können sowohl geogen (von natürlicher Herkunft) als auch anthropogen (vom Menschen hergestellt) sein. Ein Beispiel eines geogenen Tracers ist das Verhältnis der Sauerstoffisotope  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  im Regenwasser [3], das von der Höhe abhängt, in welcher der Niederschlag fällt (Abb. 2). Dank technischer Innovationen bei der Probenaufbereitung sind Messungen der Isotopensignale des Wassers heute wesentlich weniger aufwändig als noch vor 10 Jahren. Das Verhältnis der Sauerstoffisotope gibt uns eine gute Schätzung, aus welcher mittleren Höhenlage das Wasser in einem Fließgewässer oder Grundwasserleiter stammt.

### Auf der Suche nach der vergangenen Zeit

Informationen über Aufenthaltszeiten von Wasser im Grundwasserleiter sind wichtig in der Trinkwassergewinnung, bei der Risikoanalyse von Schadenfällen und in der Analyse von Ökosystemen, die vom Grundwasser abhängen – wie z.B. Auen. Ähnlich wie ein Detektiv den Verdächtigen fragt

«Wo waren Sie am 23. September um 19:30 Uhr?» interessiert den «Umwelt-Detektiv» «Wie lange war dieses Wasser im Grundwasserleiter unterwegs?» Für diese Art von Fragestellung bieten sich verschiedene anthropogene Tracer an. Freon oder Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW) gab es in der Vergangenheit praktisch nicht. Dank ihrer speziellen Eigenschaften wurden FCKW immer mehr als Treibgas in Spraydosen und als Kühlmittel in Kühlschränken eingesetzt. Als Folge davon stieg die atmosphärische Konzentration kontinuierlich an (Abb. 3), bis ihre zerstörenden Eigenschaften für die Ozonschicht erkannt wurden [4]. Inzwischen ist die Produktion von Freon durch das Protokoll von Montreal limitiert und es werden Ersatzstoffe eingesetzt. Zu jedem Zeitpunkt der letzten 50 Jahren gehört eine definierte FCKW-Konzentration in der Atmosphäre und eine entsprechende Gleichgewichtskonzentration im Wasser. Misst man in einer Quelle, in einem Grundwasserleiter oder in der Tiefe eines Sees die Freon-Konzentration, so kann man abschätzen, wann dieses Wasser das letzte Mal in Kontakt mit der Atmosphäre war. Ausser FCKW eignen sich auch Edelgase für die Bestimmung des Wasseralters. Der Beitrag von R. Kipfer auf Seite 20 erläutert den Einsatz dieser Elemente in der Grundwasserdatierung.

Die bekanntesten Tracer für die Datierung und die Bestimmung von Zeitkonstanten bei Umweltprozessen sind Radioisotope, die, dem Gesetz des radioaktiven Zerfalls folgend, mit einer genau bekannten Halbwertszeit zerfallen. In der Gewässerforschung interessiert z.B. die Frage, wie schnell der Wasseraustausch zwischen einem Bach und dem Porenraum im Kiesbett abläuft. Für ein funktionsfähiges Fließgewässer ist ein intensiver Austausch mit dem ufernahen Grundwasser zentral. Der Porenraum im Gewässerbett (das Interstitial) bietet einen wichtigen Lebensraum für Gewässerorganismen und steuert den Nährstoffaustausch zwischen Gewässer und Umland. Der Artikel von E. Hoehn auf Seite 18 diskutiert, wie mit Hilfe des natürlichen Radioisotops Radon, die Grundwasserhabitate einer Flusssauere erkannt werden können. Zum Glück stehen uns heute extrem empfindliche Nachweismethoden für Radioisotope zur Verfügung. Damit können noch kleinste Mengen von radioaktivem Kohlenstoff  $^{14}\text{C}$  im Bereich bis zu  $10^{-15}\text{g}$  (oder rund 1 Million Atome) nachgewiesen werden. Die Entwicklung der Beschleuniger-Massenspektrometrie hat den Anwendungsbereich solcher Tracer- und Datierungsmethoden drastisch ausgedehnt.

### Stöbern in Umweltarchiven

In anderen Projekten soll die zeitliche Dimension von Umweltprozessen untersucht werden. Hier stehen die «Umwelt-Detektive» vor einem neuen Problem: Um das Verhalten eines Systems über lange Zeiten zu studieren, benötigt man auch Proben über die entsprechenden Zeiträume. Da niemand an Forschungsprojekten interessiert ist, die mehr als ein paar Jahre dauern, studiert man langsame Veränderungen, indem man ihre geschichtliche Entwicklung rekonstruiert. Allerdings kann im Normalfall nicht davon ausgegangen werden, dass jemand in weiser Voraussicht die geeigneten Proben gesammelt oder gar die nötigen Messungen durchgeführt hat. Deshalb ist man auf Archive angewiesen, in denen die relevante Information zeitlich geordnet gespeichert ist. So befindet sich zum Beispiel auf dem Boden unserer Seen ein Sediment, das kontinuierlich Schicht um Schicht gebildet wird und in dem die verschiedensten Informationen über die chemischen, physikalischen und biologischen Vorgänge im See und seiner Umgebung gespeichert sind (Abb. 4). Diese Informationen gilt es zu lesen und zu interpretieren. Im Beitrag von W. Giger auf Seite 10 wird gezeigt, welche Spuren unsere Waschmittel im Sediment hinterlassen und wie sich aus Sedimentanalysen Rückschlüsse über Änderungen in der Produktzusammensetzung und den Abbau der Stoffe in Kläranlagen ziehen lassen. Die Sedimente enthalten aber auch Indizien über natürliche Prozesse. Oft verwendet man geochemische Indikatoren, um die Intensität natürlicher Prozesse aus Umweltarchiven zu rekonstruieren. Der Beitrag von G. Friedl auf Seite 14 illustriert dieses Vorgehen. Andere Forschungsgruppen der EAWAG arbeiten zur Zeit an internationalen Projekten zur Rekonstruktion weit vergangener Umweltbedingungen. Dazu gehört die Analyse von Eisbohrkernen aus Grönland und der Sedimente des Baikalsees in Sibirien. Solch interdisziplinäre Programme setzen sich zum Ziel, die heutigen und zukünftigen Umweltveränderungen besser

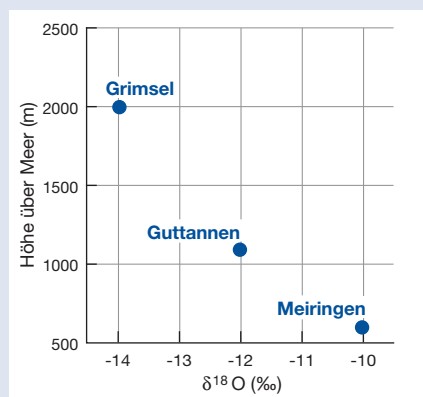


Abb. 2: Das Sauerstoffisotop  $\delta^{18}\text{O}$  im Niederschlag von drei benachbarten Stationen mit unterschiedlicher Höhenlage.  $\delta^{18}\text{O}$ : Abweichung des  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnisses von einem Standard in ‰.

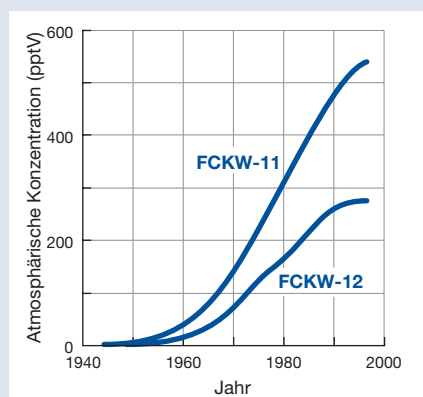


Abb. 3: Anstieg der atmosphärischen FCKW-Konzentrationen (FCKW-11 und FCKW-12) ab 1950. Einheit pptV =  $10^{-9}$  Volumenanteile.

zu verstehen, indem man sie mit jenen der letzten Jahrtausende vergleicht. Das Beryllium-Radioisotop ( $^{10}\text{Be}$ ) im Grönlandeis, das durch die kosmische Strahlung in der Atmosphäre gebildet wird [5], dient beispielsweise als Tracer für die Aktivität der Sonne in der Vergangenheit. Die Daten erlauben es, den Einfluss der Sonne auf die Klimaentwicklung genauer abzuschätzen, um so den zivilisatorisch verursachten Klimawandel zu quantifizieren. Ein Vergleich von  $^{10}\text{Be}$  mit  $^{14}\text{C}$  hat zudem Hinweise für eine verminderte globale Tiefenwasserbildung am Ende der letzten Eiszeit ergeben [6], d.h., auch der Golfstrom hat offensichtlich eine bewegte Geschichte!

## Einblick in die komplexe Biosphäre

Die Biosphäre stellt ein dynamisches System von ausserordentlicher Komplexität dar. Angetrieben durch die Sonne, laufen unzählige biologische Prozesse auf verschiedenen zeitlichen und räumlichen Ebenen ab, die zu einem grossen Teil gekoppelt sind. Drei methodische Entwicklungen helfen mit, gezielt nach einzelnen Prozessen zu fahnden: stabile Isotope, Gensonden

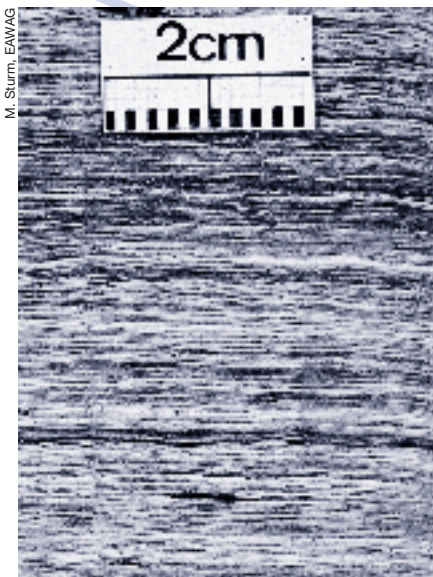


Abb. 4: Sedimentkern aus dem Baldeggersee.

und Biomarker. Bei biologischen Prozessen wie Photosynthese oder Denitrifikation werden jeweils die leichteren Isotope eines Elements enzymatisch schneller umgesetzt. Dies führt in der Regel zu einer Anreicherung der biologischen Produkte mit leichteren Isotopen ( $^{12}\text{C}$  oder  $^{14}\text{N}$ ) und einer Akkumulation der schweren Isotope in der Ausgangssubstanz ( $^{13}\text{C}$  oder  $^{15}\text{N}$ ). Aus einer Verschiebung der natürlichen Isotopenverhältnisse lassen sich deshalb Rückschlüsse über die Art und Intensität der biologischen Prozesse ziehen. Andererseits kann man auch Substanzen als Tracer einsetzen, welche mit einem stabilen Isotop angereichert wurden, z.B. Nitrat ( $^{15}\text{NO}_3$ ). Tracer mit stabilen Isotopen haben den Vorteil, dass sie keine Strahlung abgeben und deshalb ohne Bedenken in der Umwelt eingesetzt werden können. Nitrat kann über verschiedene Wege biologisch verwendet werden. Heterotrophe Mikroorganismen produzieren daraus Luftstickstoff ( $\text{N}_2$ ) oder Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), Pflanzen nehmen Nitrat als Nährstoff auf und produzieren damit organischen Stickstoff. Mit Hilfe eines Massenspektrometers lassen sich unter günstigen Bedingungen die Quellen und Senken von natürlichem Nitrat in der Umwelt verfolgen [7]. Mit markiertem Nitrat können z.B. Umsatzraten der Denitrifikation in Gewässern bestimmt werden [8]. Der Beitrag von L. Zwank auf Seite 6 diskutiert die Anwendung von stabilen Isotopen als Tracer für den Abbau von Umweltchemikalien im Grundwasser. Dabei geht es oft um die Fragestellung, ob eine verminderte Schadstoffkonzentration entlang eines Fliessweges auf Verdünnung oder mikrobiellen bzw. chemischen Abbau zurückzuführen ist. Ein biologischer Abbau lässt sich in der Regel an einer deutlichen Verschiebung der Isotopenverhältnisse erkennen.

Die moderne mikrobielle Ökologie interessiert sich jedoch nicht nur für die Frage, welche Substanzen mit welcher Rate umgesetzt werden. Man möchte auch danach fahnden, welche Mikroorganismen wann und wo aktiv sind. Mit Hilfe von Gensonden ist es heute möglich, die spezifische Verteilung der Mikroorganismen in Umweltproben zu analysieren. Dazu wird eine kurze genetische Sequenz von ribosomaler RNA mit einem Fluoreszenzfarbstoff markiert. Dieser Typ von molekularbiologischem Tracer markiert spezifische Gruppen, z.B. Methanbakterien in einer Wasser- oder Sedimentprobe, die danach mikroskopisch analysiert werden. Der Vorteil dieser Technik liegt u.a. darin, dass aktive Mikroorganismen erfasst werden können, welche sich unter Laborbedingungen nicht kultivieren lassen. Im

Beitrag von K. Zepp auf Seite 12 wird dieses Verfahren dargestellt.

Die immer besser zugängliche genetische Information von Organismen liefert eine zuverlässige Identifikation der Akteure im komplexen Zusammenspiel der Biosphäre. Noch vielfältiger ist jedoch die Information, welche sich in den Proteinen und im Stoffwechsel eines Organismus widerspiegelt. Hier setzt ein neues Tracer-Konzept an – jenes der Biomarker. Durch die Analyse von Substanzen aus dem biochemischen Stoffhaushalt eines Organismus lassen sich zum Beispiel Schlüsse ziehen, ob das Lebewesen einem giftigen Schadstoff ausgesetzt war. Mehr zu diesem neuen Ansatz finden Sie im Beitrag von R. Eggen auf Seite 8.

Die kurze Übersicht hat sicher gezeigt, dass sich die verschiedensten Tracermethoden zu sehr scharfen Werkzeugen der Umweltforschung entwickelt haben. Der Erfolg dieser Forschung hängt jedoch zentral auch davon ab, dass relevante, spannende und zukunftsgerichtete Fragen gestellt und bearbeitet werden.



Jürg Beer, Physiker und Leiter der Arbeitsgruppe «Radioaktive Tracer» in der Abteilung «Oberflächengewässer». Lehrbeauftragter an der ETH Zürich. Forschungsgebiet: Kosmogene Radionukleotide, Einfluss der Sonnenaktivität auf das Klima.



Bernhard Wehrli, Chemiker und Leiter der Abteilung «Oberflächengewässer». Professor für aquatische Chemie an der ETH Zürich. Forschungsgebiet: Nährstoff- und Kohlenstoffkreisläufe in Gewässern.

- [1] Broecker W.S., Peng T.-H. (1982): Tracers in the sea. LDGO, Columbia University, New York, 690 p.
- [2] Käss W. (1992): Geohydrologische Markierungstechnik. Borntraeger, Berlin, 519 S.
- [3] Siegenthaler U., Oeschger H. (1980): Correlation of  $^{18}\text{O}$  in precipitation with temperature and altitude. *Nature* 285, 314-317.
- [4] IPCC (1996): Climate Change 1995. Cambridge Univ. Press, 878 p.
- [5] Beer J., Mende W., Stellmacher R. (2000): The role of the sun in climate forcing. *Quaternary Science Review* 19, 403-415.
- [6] Muscheler R., Beer J., Wagner G., Finkel R. C. (2000): Changes in deep-water formation during the Younger Dryas event inferred from  $^{10}\text{Be}$  and  $^{14}\text{C}$  records. *Nature* 408, 567-570
- [7] Mengis M., Walther U., Bernasconi S.M., Wehrli B. (2001): Limitations of using  $\delta^{18}\text{O}$  for the source identification of nitrate in agricultural soils. *Environmental Science and Technology* 35, 1840-1844.
- [8] Steingruber S.M., Friedrich J., Gächter R., Wehrli B. (2001): Measuring denitrification in sediments with the  $^{15}\text{N}$  isotope pairing technique ( $^{15}\text{N}$  IPT): a review. *Applied and Environmental Microbiology*, in press.



# Bestimmung der Isotopenzusammensetzung von Umweltchemikalien

## Neue Perspektiven in der Schadstoffhydrologie

**Methoden zur Bestimmung der isotopischen Zusammensetzung chemischer Verbindungen eröffnen aufgrund verbesserter Nachweisgrenzen neue Perspektiven für die Beurteilung von belastetem Grundwasser. Damit ist die Untersuchung von Umweltschadstoffen, die in geringen Konzentrationen vorkommen, in greifbare Nähe gerückt. Die EAWAG will deshalb die analytischen Verfahren für eine Anwendung in der Schadstoffhydrologie optimieren.**

Grundwasserverunreinigungen durch organische Substanzen sind in industrialisierten Ländern ein häufiges Problem. Stoffe, die beispielsweise in der Metallentfettung, der chemischen Reinigung oder auch als Treibstoffe in grossem Umfang verwendet werden, können direkt aus Punktquellen (Unfälle, Tankleckagen) oder über diffuse Wege (atmosphärische Deposition, Strassenabläufe) in das Grundwasser gelangen und dessen Nutzung als Trinkwasserreservoir gefährden.

### Probleme bei der Sanierung von belastetem Grundwasser

Bei der Sanierung von verunreinigtem Grundwasser gewinnen *In-situ*-Verfahren immer mehr an Bedeutung. Darunter versteht man Methoden, die darauf beruhen, dass die Verunreinigung direkt im Untergrund abgebaut wird, entweder durch natürliche oder durch stimulierte Prozesse. Die finanziellen Vorteile gegenüber aufwändigen *Ex-situ*-Sanierungsmassnahmen, welche einen Aushub des kontaminierten Materials bedingen, sind beträchtlich. Im einfachsten Fall von leicht abbaubaren Substanzen genügt es, die Konzentrationen der Schadstoffe im Verlauf der Zeit im Grundwasser zu beobachten, um festzustellen, ob und wie schnell sie abgebaut werden. Oft ist ein schlüssiger Nachweis des *In-situ*-Abbaus jedoch schwierig. Die herkömmlichen Ansätze basieren auf einer Massenbilanzierung der Schadstoffe im Grundwasser. Im Fall von langsam abbaubaren Substanzen führt dieser Ansatz jedoch zu sehr unzuverlässigen Resultaten, da über lange Zeiträume bilanziert werden muss und die Ausdehnung der Schadstofffahne gross und oft

nur ungenügend bekannt ist. Selbst in Zonen mit überschaubaren hydrogeologischen Bedingungen und einem dichten Messnetz lassen sich Abbau und Transformationsraten im Grundwasser auf diese Weise meist nicht zweifelsfrei ermitteln. Wird eine Konzentrationsabnahme festgestellt, kann in der Regel nicht entschieden werden, ob sie durch Verdünnung, Ausgasung, Sorption, mikrobiellen oder abiotischen Abbau zustande gekommen ist. Erschwerend kommt hinzu, dass durch die Transformationsprozesse nicht nur harmlose Produkte entstehen, sondern auch Substanzen gebildet werden können, die schwerer abbaubar und giftiger sind als die

Ausgangsstoffe (Abb. 1). Um die Anwendbarkeit der so genannten «monitored natural attenuation»-Sanierungsverfahren auch auf komplexe Schadensfälle auszudehnen, bedarf es weiterer Informationen.

### Beurteilung des Schadstoffverhaltens durch die Einzelstoffisotopie

Eine elegante Möglichkeit zusätzliche Hinweise auf die Wirksamkeit von *In-situ*-Abbauprozessen zu bekommen, ist die Bestimmung der stabilen Isotopenzusammensetzung der einzelnen Schadstoffe (Einzelstoffisotopie). Die meisten Elemente besitzen stabile Isotope, z.B. kommt das C-Atom sowohl mit der Masse 12 als auch mit der Masse 13 vor. Beide Isotope liegen folglich auch in organischen Molekülen in bestimmten Verhältnissen ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) vor. Die Isotopenverhältnisse der Elemente H, C, N, O, S und Cl lassen sich heute für einzelne organische Verbindungen in umweltrelevanten Konzentrationsbereichen bestimmen. Unterschiedliche Transport- und Umwand-

Unfalltechnischer Dienst, Stadtpolizei Zürich



Nach der Entgleisung eines Tankzuges im März 1994 in der Nähe des Bahnhofs Zürich-Affoltern versickerten schätzungsweise 70 Tonnen Benzin im Erdreich.

lungsprozesse im Grundwasser verändern die Isotopensignatur der Elemente in den Schadstoffen auf unterschiedliche Weise. Die Stabilität einer chemischen Bindung, z.B. zwischen den Atomen Kohlenstoff und Wasserstoff, wird durch die Isotopenzusammensetzung beeinflusst. Bindungen zwischen leichten Bindungspartnern werden schneller gespalten als Bindungen zwischen schweren Isotopen (Abb. 2). Da die chemische Umwandlung der Moleküle je nach Isotopengehalt der einzelnen Elemente unterschiedlich schnell verläuft, kommt es während des Abbaus zu einer Verschiebung (Fraktionierung) der Isotopenverhältnisse für jedes Element im Vergleich zum Ausgangsstoff. Die Isotopensignatur einer Verbindung als Funktion des Ortes und der Zeit im Grundwasser dient daher als Tracer für die Art und Geschwindigkeit der vorherrschenden Abbauprozesse (Abb. 3) [1–3]. Ausserdem können Schadstoffe unterschiedlicher Herkunft in Bezug auf ihre isotopische Zusammensetzung von einander abweichen [4]. Mit Hilfe der Isotopensignatur ist es somit auch möglich, die Quelle von Verschmutzungen und damit den Verursacher zu identifizieren.

## Einzelstoffisotopie als Forschungsprojekt an der EAWAG

Die Untersuchung der Isotopensignatur von Grundwasserschadstoffen ermöglicht eine neue Vorgehensweise in der Schadstoffhydrologie. Dabei werden die Grundwasserkontaminanten selbst als Tracer genutzt. In der Abteilung «Wasserressourcen und Trinkwasser» der EAWAG wird die Einzelstoffisotopie gegenwärtig als neue analytische Methode für den Einsatz in der Schadstoffhydrologie entwickelt. Die Analysen werden mit einem so genannten GC-IRMS (gas chromatograph-isotope ratio mass spectrometer) durchgeführt, das vor kurzem gemeinsam mit der ETH Zürich angeschafft wurde.

In einem Mitte 2000 gestarteten Projekt geht es um die Charakterisierung der Isotopieeffekte, die bei verschiedenen Abbauprozessen der Lösungsmittel Trichlorethylen und Perchlorethylen und des Benzinzusatzstoffs Methyltertiäbutylether (MTBE) auftreten. Es werden sowohl Labor- als auch Feldexperimente durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden zur Identifizierung der Abbauprozesse, zur Quantifizierung der Abbauraten und zur Bestimmung der Herkunft der Schadstoffe herangezogen. Um das Verhalten dieser persistenten Schadstoffen im Untergrund quantitativ zu erfassen, wird die Einzelstoff-

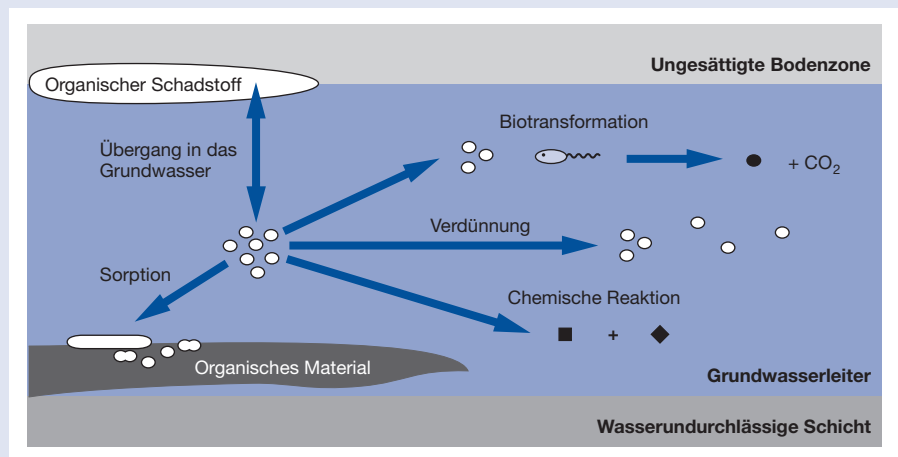


Abb. 1: Transport- und Transformationsprozesse organischer Schadstoffe im Untergrund.

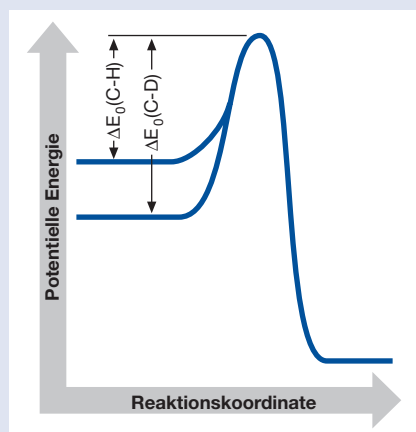


Abb. 2: Einfluss der isotopischen Zusammensetzung auf die Bindungsenergien und Reaktionsraten. Die potentielle Energie einer Kohlenstoff-Deuterium-Bindung (C–D) ist geringer als die einer Kohlenstoff-Wasserstoff-Bindung (C–H). Dadurch wird, bei Raumtemperatur, die C–H-Bindung 7-mal schneller gespalten als die C–D-Bindung. Beim Abbau einer Substanz werden also diejenigen Moleküle bevorzugt reagiert, die aus leichten Isotopen zusammengesetzt sind. Gleichzeitig werden die schweren Isotope in der Fraktion des Ausgangsstoffs angereichert (Beispiel siehe Abb. 3).

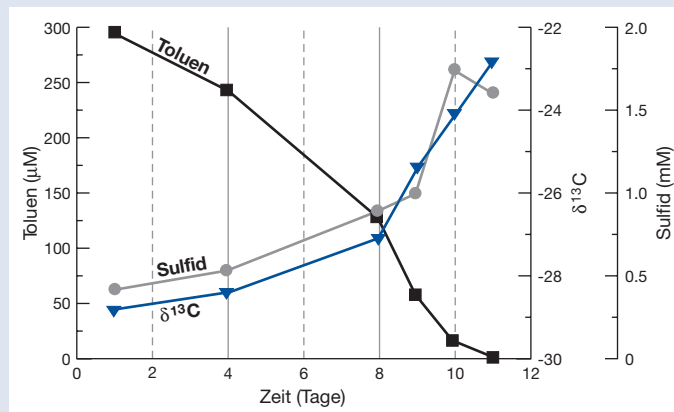


Abb. 3: Abbau von Toluol unter anaeroben, Sulfid reduzierenden Bedingungen [3]. Die Abnahme von Toluol korreliert mit der Bildung von Sulfid und ergibt eine geschlossene Elektronenbilanz. Der anaerobe Bioabbau von Toluol bewirkt eine Isotopenfraktionierung: Der  $\delta^{13}\text{C}$ -Wert des Resttoluens nimmt zu, d.h. das verbleibende Toluol wird an schweren C-Isotopen angereichert.

isotopie mit Methoden der Grundwasserdatierung und Grundwassermodellierung kombiniert.



Luc Zwank, Umweltnaturwissenschaftler, ist am oben beschriebenen EAWAG-Projekt im Rahmen eines Doktorats in der Arbeitsgruppe «Schadstoffhydrologie» der Abteilung «Wasserressourcen und Trinkwasser» beteiligt.

In Zusammenarbeit mit: Torsten Schmidt, Rolf Kipfer, und Stefan Haderlein

- [1] Bloom Y., Aravena R., Hunkeler D., Edwards E., Frappe S.K. (2000): Carbon isotope fractionation during microbial dechlorination of trichloroethene, *cis*-1,2-dichloroethene, and vinyl chloride: implications for assessment of natural attenuation. *Environmental Science and Technology* 34, 2768–2772.
- [2] Dayan H., Teophilo A., Abrajano J., Sturchio N.C., Winsor L. (1999): Carbon isotopic fractionation during reductive dehalogenation of chlorinated ethenes by metallic iron. *Organic Geochemistry* 30, 755–763.
- [3] Meckenstock R.U., Morasch B., Warthmann R., Schink B., Annweiler E., Michaelis W., Richnow H.H. (1999):  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  isotope fractionation of aromatic hydrocarbons during microbial degradation. *Environmental Microbiology* 1, 409–414.
- [4] BenetEAU K.M., Aravena R., Frappe S.K. (1999): Isotopic characterization of chlorinated solvents – laboratory and field results. *Organic Geochemistry* 30, 739–753.

# Biologische Tracer in der Ökotoxikologie

**Biomarker sind biochemische oder physiologische Indikatoren, die als Folge von physikalischem, biologischem oder chemischem Stress nachweisbar sind. Biomarker dienen somit als Tracer für Reaktionen, die auf unterschiedlichen biologischen Ebenen – Moleküle, Zellen, Organe – ablaufen können. In diesem Beitrag geht es um molekulare Biomarker, die nach Einwirkung von Schadstoffstress induziert werden. Ihr Nachweis ermöglicht eine frühzeitige Abschätzung der potenziellen negativen Auswirkungen auf Lebewesen und Ökosysteme.**

Trotz verbesserter gesetzlicher Schutzmassnahmen gelangen auch heute noch zahlreiche schädliche Chemikalien in die Umwelt. Diese Schadstoffe oder Schadstoffgemische liegen häufig in sehr geringen Konzentrationen vor, sodass die Abschätzung des toxischen Potenzials stark erschwert ist. Hier finden äusserst empfindliche biologische Methoden Einsatz, die mögliche Schadstoffeffekte auf zellulärem Niveau nachweisen.

## Die zelluläre Stressreaktion

Die ersten Wechselwirkungen zwischen Schadstoffen und biologischen Systemen finden auf zellulärer Ebene statt, wobei Proteine als Sensoren wirken (Abb. 1). Einige Sensoren nehmen Schadstoffe direkt wahr, andere erkennen erst die Folgen der Schadstoffeinwirkung, z.B. Schäden an Zellkomponenten (Membranen, Proteine oder DNA) oder die Verschiebung des Stoffwechsellgleichgewichts durch Änderung von pH, osmotischem Wert oder Redoxzustand. Registriert der Sensor einen Schadstoffstress, wird eine zelluläre Stressreaktion ausgelöst. Dabei transferiert der Sensor das Signal auf Regelemente (Promotoren) bestimmter Stressgene, die dadurch aktiviert werden. Als Folge wird die entsprechende Boten-RNA (messenger RNA, mRNA) gebildet, die an den Ribosomen als Matrize bei der Synthese der Stressproteine dient (Abb. 1). Stressproteine haben die Aufgabe, Schadstoffe oder ihre Abbauprodukte zu entfernen, geschädigte Zellkomponenten zu reparieren oder zu ersetzen und das Stoffwechsellgleichgewicht wiederherzustellen.

Gelingt dies, ist der Stress überstanden. Gelingt dies nicht, kann sich der Schadstoffstress auch auf einer höheren Organisationsebene – Organ, Organismus, Population, Lebensgemeinschaft, Ökosystem – manifestieren.

## Molekulare Stressparameter als Biomarker

Im Verlauf einer zellulären Stressreaktion können verschiedene molekulare Parameter gemessen werden. Sie dienen als Biomarker zur Abschätzung der Toxizität von Einzelchemikalien, Chemikaliengemischen und komplexen Umweltproben.

Eine Möglichkeit besteht darin, die Konzentration oder Enzymaktivität von Stressproteinen nach Schadstoffeinwirkung zu messen. Das Stressprotein Cytochrom-P450 Monooxygenase ist ein häufig verwendeter Biomarker für verschiedene organische Schadstoffe wie PCB, Dioxin oder

Dibenzofurane. Es kommt sowohl bei Wirbeltieren als auch Wirbellosen vor und wird in Zellen oder Zelllinien von Labortieren aber auch in Tieren aus Freilandproben gemessen [1]. Cytochrom-P450 Monooxygenase spielt bei Entgiftungsreaktionen eine zentrale Rolle im Stoffwechsel. Deshalb nimmt die Menge und Aktivität dieses Stressproteins nach Schadstoffexposition deutlich zu.

Eine weiteres Verfahren ist die Bestimmung der mRNA-Konzentration [2]. Änderungen der mRNA-Konzentrationen können mit molekularbiologischen Methoden spezifisch, quantitativ, empfindlich und rasch nachgewiesen werden (Abb. 2).

Im Zuge des rasanten Fortschritts in den biomolekularen Wissenschaften wurde auch die Entwicklung von neuen Biomarker-Methoden in den letzten Jahren wesentlich vorangetrieben [2]. Statt Konzentrationen und Enzymaktivitäten der meist schwer bis kaum nachweisbaren Stressproteine zu messen oder mit technisch anspruchsvollen Verfahren die mRNA-Konzentration zu bestimmen, werden mit den neuartigen Methoden die Genaktivitäten direkt analysiert. Dazu werden Promotoren bekannter Stressgene mit so genannten Reportergenen verknüpft. Reportergene kodieren für einfach nachweisbare Proteine, z.B. das Enzym Luziferase, das Licht produziert, oder das «Grün Fluoreszierende Protein» (GFP), das

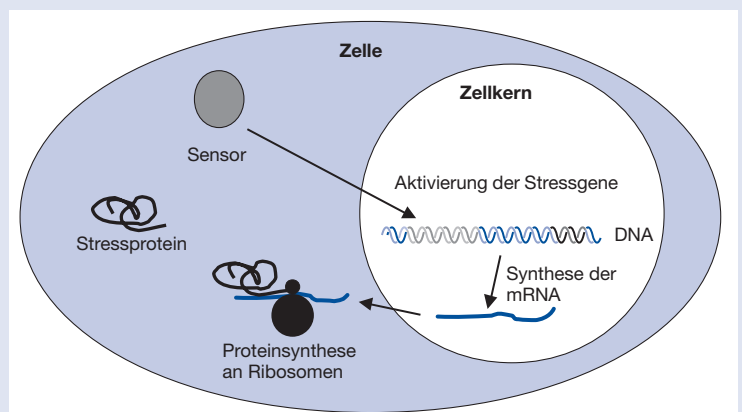


Abb. 1: Zelluläre Reaktionskette von der Stresswahrnehmung bis zur Synthese von Stressproteinen.





nach seiner Eigenschaft, bei Anregung durch Licht grün zu fluoreszieren, benannt ist. Die Promotor-Reporter-Gen-Konstrukte werden z.B. in Bakterien- oder Hefezellen eingeschleust. Setzt man diese Biomarker-Systeme einer schadstoffbelasteten Probe aus, wird der Promotor des Stressgens und damit das Reporter-Gen aktiviert und anschliessend das Reporterprotein syntheti-

siert [3]. Abbildung 3 zeigt die Aktivierung der Luziferase in rekombinanten Bakterienzellen nach Exposition mit den Schadstoffen Wasserstoffperoxid und Catechol [4]. Neben der leichten Nachweisbarkeit der Reporterproteine liegt ein weiterer grosser Vorteil derartiger Testsysteme in der hohen Empfindlichkeit. Selbst geringste Schadstoffkonzentrationen – wobei meist ein noch kleinerer Anteil die eigentliche bioverfügbare und stressauslösende Fraktion darstellt – können nachgewiesen werden [5].

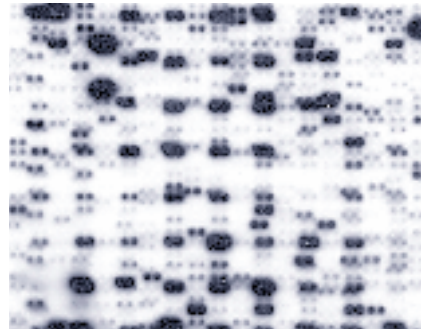


Abb. 4: Genanalyse mit DNA-Chip. Jeder Punkt repräsentiert ein Gen. Je dunkler der Punkt, desto höher die Genaktivität.

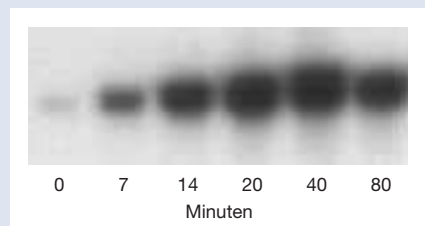


Abb 2: Unter oxidativem Stress (z.B. bei Behandlung mit Schadstoffen, die die Bildung freier Sauerstoffradikale bewirken) steigt die Konzentration der Glutathionperoxidase-mRNA in der Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii* im Verlauf der Zeit deutlich an. Es wird angenommen, dass die Glutathionperoxidase ein Schlüsselenzym in der Abwehr von oxidativem Stress ist.

### Biomarker der Zukunft

Mit den oben beschriebenen Methoden werden hauptsächlich einzelne Stressgene oder -proteine analysiert. Ist die Zusammensetzung einer schadstoffbelasteten Probe jedoch unbekannt, z.B. bei Umweltpollen, wäre es interessant, eine Vielzahl von Stressgenen und -proteinen auf ihre Aktivitäten zu überprüfen und somit auf den Schadstoff rückschliessen zu können. Darüber hinaus ist häufig nur eine einzige Wirkungsweise eines Schadstoffs beschrieben, obwohl *in vivo* komplexe Wirkungsmuster mit weiteren, heute noch unbekanntem zellulären Effekten auftreten können [6]. Hier setzen neue Technologien an, die auf einer umfassenden Gen- oder Proteinanalyse beruhen. Auf so genannten DNA-Chips werden eine Vielzahl von Genen oder Teile davon fixiert und untersucht (Abb. 4). Mit der vollständigen Sequenzierung ganzer Genomsequenzen rücken die Techniken der Genomanalyse (Genomics) immer mehr in den Mittelpunkt der Forschung. Parallel dazu wurde die Proteomanalyse (Proteomics) entwickelt, mit der die Gesamtheit der Proteine einer Zelle charakterisiert werden kann. Mit Hilfe leistungsstarker Verfahren können heute bereits mehr als 10 000 verschiedene Proteine aufgetrennt werden. Diese neuen Methoden erlauben nicht nur das Aufspüren neuer Stressgene oder -proteine, sondern auch die ganzheitliche Betrachtung der zellulären Stressreaktion, die durch ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Faktoren charakterisiert ist.

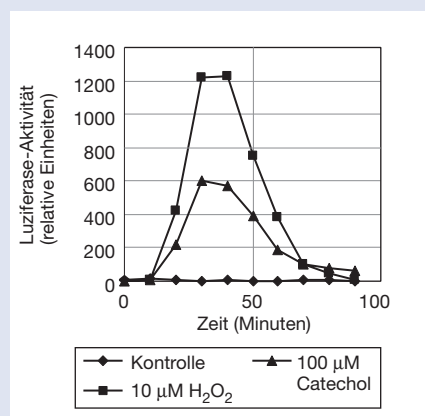


Abb. 3: Anwendung eines rekombinanten Biomarker-Systems zum Nachweis von Schadstoff-induzierter Peroxidproduktion. Der Promotor eines Peroxid-induzierten Stressgens wurde mit dem Reporter-Gen Luziferase verknüpft und in *Escherichia coli* eingeschleust. Erhöhte Peroxidmengen in der Zelle haben eine Erhöhung der Luziferase-Aktivität zur Folge. Auch die Behandlung der Zellen mit dem Schadstoff Catechol führt zu einer erhöhten Luziferase-Aktivität, weil durch eine chemische Reaktion bei Anwesenheit von Catechol in den Zellen Peroxid gebildet wird [4].



Rik I.L. Eggen, Molekularbiologe und Leiter der Abteilung «Umwelt-Mikrobiologie und molekulare Ökotoxikologie». Forschungsgebiet: Molekulare Mechanismen der Schadstoff-einwirkungen, Entwicklung bioanalytischer Methoden.

[1] Bucheli T.D., Fent K. (1995): Induction of cytochrome P450 as a biomarker for environmental contamination in aquatic ecosystems. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology* 25, 201–268.

[2] Power M., van der Meer J.R., Tchelet R., Egli T., Eggen R.I.L. (1998): Molecular methods can contribute to assessments of toxicological risks and bioremediation strategies. *Journal of Microbiological Methods* 32, 107–119.

[3] Eggen R.I.L. (2001): *Moderne biologische Analyse: Potenzial, Entwicklung und Anwendung*. Gas Wasser Abwasser 3, 167–171.

[4] Schweigert N., Belkin S., Leong-Morgenthaler P., Zehnder A.J.B., Eggen R.I.L. (1999): Combinations of chlorocatechols and heavy metals cause DNA degradation *in vitro* but must not result in increased mutation rates *in vivo*. *Environmental & Molecular Mutagenesis* 33, 202–210.

[5] Jaspers M.C.M., H. Harms, van der Meer J.R. (1999): Prokaryotic whole-cell living bioreporters expressing bioluminescence upon the presence of bioavailable concentrations of specific pollutants. In: Fass R., Flashner Y., Reuveny S. (eds), *Novel approaches for bioremediation of organic pollution*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, p. 137–150.

[6] Schweigert N., Zehnder A.J.B., Eggen R.I.L. (2001): Chemical properties of catechols and their molecular modes of toxic action in cells, from microorganisms to mammals. *Environmental Microbiology* 3, 81–91.

# Sedimente – Archive für Detergentien

**Früher verwendete, schwer abbaubare Chemikalien aus Wasch- und Reinigungsmitteln (Detergentien) sind in Seesedimenten abgelagert. Diese Stoffe können heute als Tracer genutzt werden, um die Geschichte ihres Eintrags nachträglich zu beschreiben. Damit ist auch eine Erfolgsbeurteilung verschiedener Reduktionsmassnahmen möglich. Konzentrationsabnahmen im Sediment konnten sowohl auf Änderungen der Produktzusammensetzung als auch auf ein verbessertes Eliminationsverhalten in den Kläranlagen zurückgeführt werden.**

Seesedimente enthalten Informationen über Umweltchemikalien, die, an Partikel gebunden, sedimentierten. Zu diesen Stoffen gehören neben den Schwermetallen und den lipophilen, persistenten organischen Verunreinigungen auch waschaktive Substanzen, so genannte amphiphile Tenside und ihre lipophilen Abbauprodukte.

## Waschaktive Substanzen – Produktentwicklung seit den 50er Jahren

In den 50er Jahren wurde die Seife in Wasch- und Reinigungsmittel durch synthetische Tenside ersetzt. Die ersten in grossen Mengen auf petrochemischer Basis hergestellten Tenside waren die Tetrapropylbenzolsulfonate (TPS, verzweigte Alkylbenzolsulfonate, Abb. 1). Leider sind sie sowohl unter aeroben als auch unter anaeroben Bedingungen schlecht abbaubar und der massive Eintrag dieser Stoffe in die Oberflächengewässer führte dort zu unerwünschten Schaumbildungen. Deshalb wurden die TPS ab Mitte der 60er Jahre durch die linearen Alkylbenzolsulfonate (LAS, Abb. 1) ersetzt. Die LAS sind biologisch unter aeroben Bedingungen gut und rasch abbaubar und stellen weltweit die wichtigsten Tenside dar. Eine weitere bedeutende Gruppe sind die Nonylphenolpolyethoxylate (NPnEO), die in den 70er und 80er Jahren in der Schweiz in grossen Mengen als nichtionische Tenside in Detergentien eingesetzt wurden. Beim biologischen Abbau der NPnEO in kommunalen Kläranlagen entsteht u.a. das lipophile persistente Umwandlungsprodukt Nonylphenol (NP, Abb. 1). NP ist wesentlich

giftiger als die Ausgangssubstanz und besitzt zudem eine endokrine Wirkung, d.h. es greift störend in das Hormonsystem von Mensch und Tier ein.

Der wichtigste Wirkstoff in Weichspülmitteln war bis Anfang der 90er Jahre das kationische Tensid Dialkyl(C<sub>16</sub>-C<sub>18</sub>)dimethylammoniumchlorid (DHTDMAC, Abb. 1). Die Substanz ist jedoch toxisch für aquatische Organismen und reichert sich im Klärschlamm an. In der Schweiz und in anderen europäischen Ländern wurde das DHTDMAC deshalb durch besser abbaubare kationische Tenside, die so genannten Esterquats, ersetzt.

## Tenside als Tracer im Sediment

Da Inhaltsstoffe von Wasch- und Reinigungsmitteln als Masschemikalien in erheblichen Mengen in das Abwasser gelangen, verdienen sie hinsichtlich Verhalten und Verbleib besonderes Augenmerk. Ziel der vorliegenden Untersuchung war es deshalb abzuschätzen, in welchem Ausmass die Substanzen TPS, LAS, NP und DHTDMAC in die Gewässer gelangten und den Erfolg von Reduktionsmassnahmen zu überprüfen. Da die untersuchten Substanzen, bedingt durch ihre Persistenz unter anoxischen Bedingungen, zu einem wesentlichen Teil unverändert im Sediment archiviert wurden, dienen sie heute als Tracer, die es erlauben die Geschichte ihres Eintrags nachzuvollziehen. Die einzelnen Schichten eines datierten Seesedimentkerns aus dem Wohlensee bei Bern wurden auf ihren Gehalt an TPS, LAS, NP und DHTDMAC untersucht [1–4]. Die Tiefenprofile dieser Stoffe

sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Zeitmarken bei 1963 und 1986 im Sedimentkern basieren auf Messungen von Cs-137 [5].

## Änderungen der Produktzusammensetzung

Die kontinuierlich zunehmenden TPS-Konzentrationen in Sedimentschichten vor 1963 dokumentieren, dass die TPS in den 50er Jahren in Gebrauch genommen wurden. Der Maximalwert von 3,4 mg TPS pro kg Trockensubstanz (TS) wurde in der ersten Hälfte der 60er Jahre erreicht. Als Antwort auf das durch TPS verursachte Umweltproblem der Schaumbildung kam es in vielen Ländern Mitte der 60er Jahre zum freiwilligen Verzicht auf die Verwendung von TPS und zu gesetzlichen Vorschriften, die einen 90%igen Primärabbau von grenzflächenaktiven Waschmittelbestandteilen verlangen. TPS wurde deshalb in der Schweiz ab diesem Zeitpunkt nicht mehr verwendet, so dass die TPS-Konzentrationen im Sediment nach 1965 unter die Nachweisgrenze zurückgingen (Abb. 2).

Das Tiefenprofil von NP zeigt, dass die NPnEO-Tenside in der Schweiz etwa Mitte der 60er Jahre eingeführt wurden. NP-Sedimentkonzentrationen von 0,3–0,48 mg/kg TS reflektieren den substantiellen Eintrag ab 1960 bis Mitte der 80er Jahre (Abb. 2). Aufgrund einer Risikoabschätzung nach EU-Methoden wurde ein PNEC-Wert (predicted no effect concentration) von 0,3 mg NP pro kg Nasssediment ermittelt [6]. Dieser

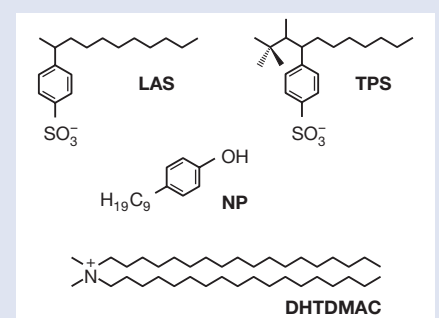


Abb. 1: Chemische Strukturen der untersuchten Detergentien.

Wert wird bis 1986 klar überschritten. Mit der Einführung der Schweizerischen Verordnung über umweltgefährdende Stoffe von 1986, in welcher der Einsatz der NPnEO in Textilwaschmitteln verboten wurde, und dem gleichzeitigen freiwilligen Verzicht auf NPnEO in Haushaltsreinigungsmitteln sinken die NP-Konzentrationen im Sediment ab Mitte der 80er Jahre wieder ab (Abb. 2). Sie liegen seit Beginn der 90er Jahre mit Werten von 0,05–0,08 mg/kg TS deutlich unter dem PNEC-Wert.

Illustrations- und Photopress AG, Zürich



Bilder wie diese aus den frühen 60er Jahren gehören glücklicherweise der Vergangenheit an.

## Einfluss des Kläranlagenausbaus

Nach dem Verbot der persistenten TPS zu Beginn der 60er Jahre wurde diese Stoffgruppe durch die leichter abbaubaren LAS ersetzt. Die Einführung der LAS wird durch steigende LAS-Gehalte im Sediment dokumentiert. Maximalwerte von bis zu 2,4 mg LAS/kg TS werden Ende der 60er Jahre gefunden (Abb. 2). Zu Beginn der 70er Jahre wurde die kommunale Abwasserreinigungsanlage der Stadt Bern in Betrieb genommen. Sie ist mit Abstand die wichtigste Kläranlage im Einzugsgebiet der Aare, zu dem auch der Wohlensee gehört. Anionische Tenside wie die LAS werden in der aeroben biologischen Klärstufe und durch Sorption am Klärschlamm relativ gut eliminiert. Es ist deshalb nicht überraschend, dass die LAS-Konzentrationen im Sediment des Wohlensees durch die Einführung der Abwasserreinigung nach 1970 wieder abnehmen (Abb. 2).

Das Tiefenprofil für DHTDMAC zeigt, dass dieser Stoff in der Schweiz seit Ende der 60er Jahre in Gebrauch war. Maximale

DHTDMAC-Konzentrationen um 70 mg/kg TS treten in Schichten auf, die in der Zeit von 1970 bis Anfang der 80er Jahre sedimentierten. Eine erste deutliche Reduktion der DHTDMAC-Werte erfolgt zu Beginn der 80er Jahre. Sie stimmt zeitlich überein mit der Einführung einer Phosphatfällung und anschließender Flockungsfiltration im Vorklärbereich der Kläranlage Bern. Ab Anfang der 90er Jahre kommt es zu einer weiteren Erniedrigung der DHTDMAC-Werte, die mit dem Austausch der DHTDMAC durch die Esterquats erklärt werden kann.

Die hier vorgestellte Studie zeigt, dass jüngere Sedimente gute Archive sind, um die frühere Belastung der Gewässer durch Tenside abzuschätzen, und die Auswirkungen von Reduktionsmassnahmen zu verfolgen. Die Einführungen gesetzlicher Verbote, freiwillige Änderungen der Produktzusammensetzung und die Inbetriebnahme oder Verbesserung der Abwasserreinigung in

Kläranlagen führten zur Herabsetzung der Tensidkonzentrationen in der aquatischen Umwelt.



**Walter Giger, Chemiker und Titularprofessor für Umweltchemie an der ETH Zürich und der Universität Karlsruhe, Leiter der Abteilung «Chemische Problemstoffe» an der EAWAG. Forschungsgebiet: Auftreten und Verhalten chemischer Problemstoffe im Abwasser, Gewässer und Trinkwasser.**



**Alfredo C. Alder, Chemiker und wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung «Chemische Problemstoffe». Forschungsgebiet: Vorkommen und Verhalten organischer Problemstoffe (insbesondere Detergentien und Arzneimittel) in der Abwasserreinigung und in Oberflächengewässern**

In Zusammenarbeit mit: René Reiser, Christian Schaffner, Marijan Ahel, Achim Albrecht

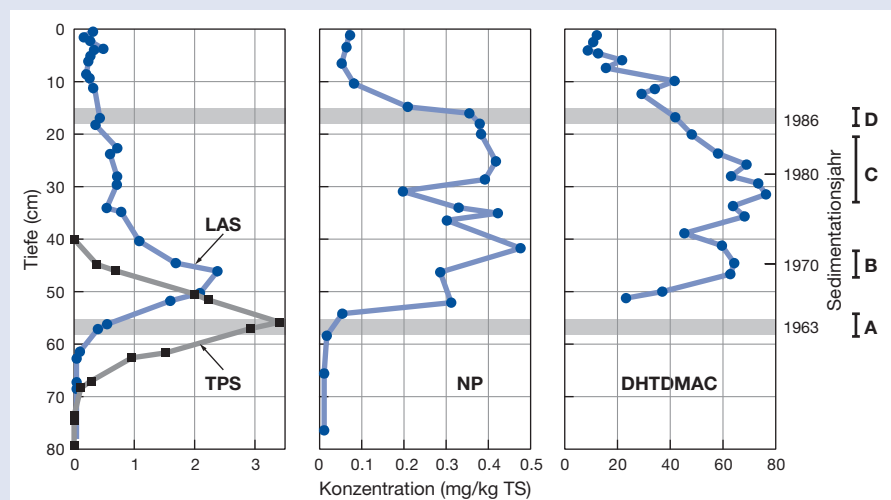


Abb. 2: Konzentrationsprofile von TPS, LAS, NP und DHTDMAC in einem datierten Sedimentkern aus dem Wohlensee, Kanton Bern, Schweiz.

Die Konzentrationsrückgänge im Sediment werden verursacht durch verschiedene, zeitlich verschobene Reduktionsmassnahmen. A: Ersatz von TPS durch LAS (1964); B: Bau der Kläranlage der Region Bern (1970); C: Einführung Phosphatfällung und Flockungsfiltration (ab 1978); D: NPnEO-Verbot durch die schweizerische Stoffverordnung (1986). Messungen von Cs-137 ergaben die Zeitmarken bei 1963 und 1986.

- [1] Reiser R., Toljander H.O., Giger W. (1997): Determination of alkylbenzenesulfonates in recent sediments by gas chromatography/mass spectrometry. *Analytical Chemistry* 69, 4923–4930.
- [2] Fernández P., Alder A.C., Suter M.J.-F., Giger W. (1996): Determination of the quaternary ammonium surfactant ditallowdimethylammonium in digested sludges and marine sediments by supercritical fluid extraction and liquid chromatography with postcolumn ion-pair formation. *Analytical Chemistry* 68, 921–929.
- [3] Reiser R., Toljander H., Albrecht A., Giger W. (1997): Alkylbenzenesulfonates in recent lake sediments as molecular markers for the environmental behavior of detergent-derived chemicals. In: Eganhouse R.P. (ed.), *Molecular markers in environmental geochemistry*. American Chemical Society Symposium Series, Washington DC, 13, 196–212.
- [4] Alder A.C., Giger W., Reiser R., Schaffner, C., Ahel M., Albrecht A. (2001): Detergentchemikalien in Seesedimenten. *Münchner Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flussbiologie* 54, 289–301.
- [5] Albrecht A., Reiser R., Lück A., Stoll J.-M.A., Giger W. (1998): Radiocesium dating of sediments from lakes and reservoirs of different hydrological regimes. *Environmental Science and Technology* 32, 1882–1887.
- [6] European Commission. (2001): Draft European Union Risk Assessment Report: Nonylphenol and Phenol, 4-nonyl-, branched.



# RNA – ein Tracer zum Nachweis von Mikroorganismen

In der Gruppe «Molekulare Ökologie» an der EAWAG in Kastanienbaum wird unter anderem 16S rRNA – ein Strukturelement der Ribosomen – als Tracer verwendet, um Fragen des Kohlenstoffkreislaufs in anaeroben Sedimenten zu untersuchen. Zwei Beispiele werden hier vorgestellt. Mit Hilfe der Fluoreszenz-*in-situ*-Hybridisierung konnten in etwa 150 Jahre alten Sedimenten des Baldeggersees aktive Bakterien identifiziert werden. Eine Untersuchung des Sediments vom Rotsee charakterisierte zwei Populationen Methan bildender Archaeen, deren Tiefenverteilung im Sediment von der Qualität des verfügbaren organischen Material abhing.

## RNA als molekularer Tracer

Nach aktuellen Schätzungen sind weniger als 1% der in der Natur vorkommenden Prokaryonten (Bakterien der Domänen Bacteria und Archaea) über Kultivierungsansätze identifizierbar. Allerdings gelingt es heute mit Hilfe molekularer Tracer, bisher nicht kultivierbare Bakterien in der Umwelt nachzuweisen.

Ribonukleinsäuren (RNA) lassen sich aufgrund ihrer spezifischen Struktur und Funk-

tion in mRNA, tRNA und rRNA einteilen. Wird ein Protein benötigt, transportiert die mRNA (Boten- bzw. messenger-RNA) die genetische Information als Kopie an die Ribosomen, wo die Proteinbiosynthese stattfindet. Die tRNA (Transfer-RNA) bringt die nötigen Aminosäuren zu den Ribosomen, die dort zu einem Protein verknüpft werden. Ribosomen enthalten als Strukturelemente rRNA (ribosomale RNA) verschiedener Grösse (5S, 16S und 23S rRNA;

S = Svedberg-Einheit: Geschwindigkeit, mit welcher suspendierte Biomoleküle beim Zentrifugieren unter Standardbedingungen sedimentieren).

Besonders die 16S rRNA (Abb. 1) ist als Tracer in der molekularen Ökologie interessant [1]. Die vergleichende Sequenzanalyse der 16S rRNA, isoliert aus verschiedensten Prokaryonten, zeigte, dass es konservierte, aber auch hoch variable Regionen gibt [2]. Bestimmte konservierte Bereiche haben z.B. bei allen Bacteria die gleiche Sequenz, während variable Regionen für bestimmte Bakteriengruppen typisch sind. Aufgrund dieser Information können Gensonden mit unterschiedlicher Selektivität definiert werden. Gensonden sind Nukleinsäureketten mit einer Länge von etwa 20 Nukleotiden, die komplementär zur gewünschten Zielregion auf der rRNA sind. Mittlerweile ist eine enorme Vielzahl von Gensonden publiziert worden [3], die eine selektive Identifizierung unterschiedlichster Bakteriengruppen ermöglichen (Beispiele in Abb. 1). In der Fluoreszenz-*in-situ*-Hybridisierung [4] werden die Gensonden mit einem fluoreszierenden Farbstoff markiert und in hoher Kopienzahl mit der Umweltprobe vermischt. Die Sonden diffundieren in die prokaryontischen Zellen und binden (hybridisieren) an die rRNA, ohne dabei die Struktur der Zellen zu zerstören. Die so markierten Zellen können schliesslich im Fluoreszenzmikroskop sichtbar gemacht und durch Auszählen quantifiziert werden (Abb. 2).

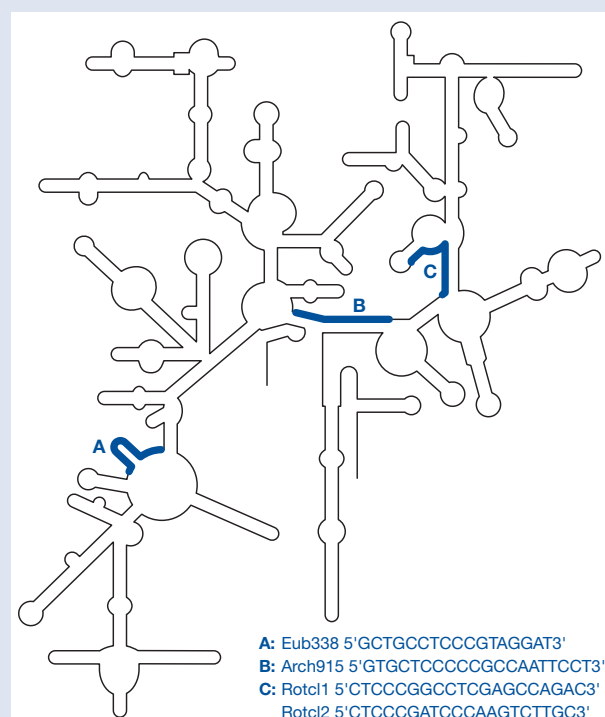


Abb. 1: Zweidimensionale Struktur der 16S rRNA von *Escherichia coli* mit konservierten Abschnitten (A und B) und einem variable Bereich (C) an die unterschiedliche Gensonden binden. Eub338 detektiert Bakterien der Domäne Bacteria, Arch915 weist Bakterien der Domäne Archaea nach und die Gensonden Rotc1 und Rotc2 identifizieren zwei unterschiedliche Populationen methanogener Archaea.



Abb. 2: *In-situ*-Hybridisierung einer Sedimentprobe mit der Archaea-spezifischen Gensonde Arch915 [5]. Die detektierten Archaea sind mit einem Pfeil gekennzeichnet.

## Aktive Bakterien in 150 Jahre alten Sedimentschichten

In einem Sedimentkern aus dem Baldeggersee untersuchten wir das Vorkommen stoffwechselaktiver Bakterien mit Hilfe der Fluoreszenz-*in-situ*-Hybridisierung. Dabei wurde unter anderem die Gensonde Eub338 [5] eingesetzt, die alle Bakterien der Domäne Bacteria detektiert (Abb. 1). Die Bakterien-dichte ist in den ersten Zentimetern des Sediments am höchsten und nimmt mit zunehmender Tiefe kontinuierlich ab. Schichten unterhalb von 40 cm mit einem Alter von über 150 Jahre wiesen nur sehr geringe Zellzahlen auf (Abb. 3). Mit erfolgreichen

Kultivierungsversuchen konnten wir zeigen, dass sogar in tieferen, bis zu 6000 Jahre alten Sedimentschichten noch aktivierbare Bakterien vorkommen, die organisches Material vollständig abbauen können.

## Methanogene Bakterien im Sediment des Rotsees

In einer anderen Studie untersuchten wir, welche spezifischen methanogenen Archaeen beim anaeroben Abbau von organischem Material im Sediment des Rotsees beteiligt sind [6]. Zunächst mussten aber für die dort vorkommenden methanogenen Archaeen selektive Gensonden gefunden werden. Deshalb wurde die gesamte DNA aus den oberen 10 cm eines Sedimentkerns isoliert. Sie diente als Matrize in einer selektiven Polymerase-Kettenreaktion (PCR), wobei die 16S-rRNA-Gene der im Sediment vorliegenden methanogenen Archaea vervielfältigt wurden [7]. Nach anschließender Sequenzanalyse der PCR-Fragmente konnten zwei spezifische Gensonden synthetisiert werden: Rotcl1 identifiziert eine Gruppe methanogener Archaea, die aus CO<sub>2</sub> und

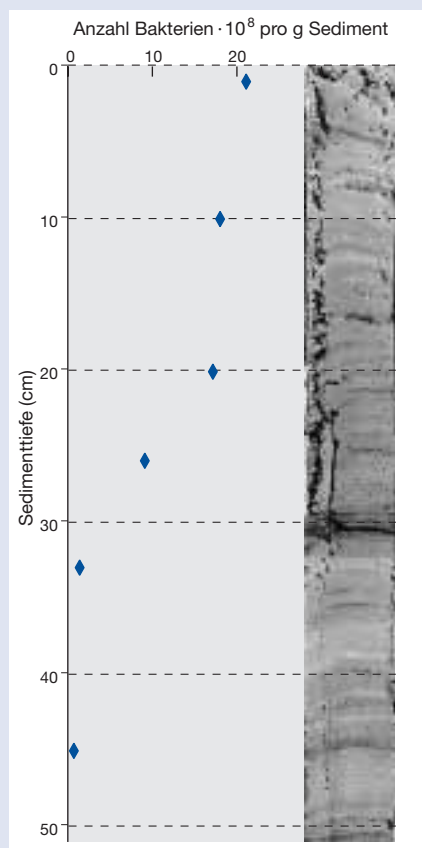
H<sub>2</sub> Methan (CH<sub>4</sub>) bilden, während Rotcl2 methanogene Archaea nachweist, die Acetat zu CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub> umsetzen (Abb. 1). Die Gensonden Rotcl1 und Rotcl2 wurden schliesslich eingesetzt, um mit Hilfe der Fluoreszenz-*in-situ*-Hybridisierung die Tiefenverteilung der beiden Populationen im Sedimentkern zu analysieren (Abb. 4). Das Resultat zeigte, dass Acetat verwertende Archaeen in allen Tiefen dominieren. Dagegen waren methanogene Archaea, die CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> zu Methan umsetzen, auf die oberen 2 cm des Sediments beschränkt. Diese Bakterien scheinen also auf frisch sedimentiertes organisches Material angewiesen zu sein.

## Das sind unsere Ziele

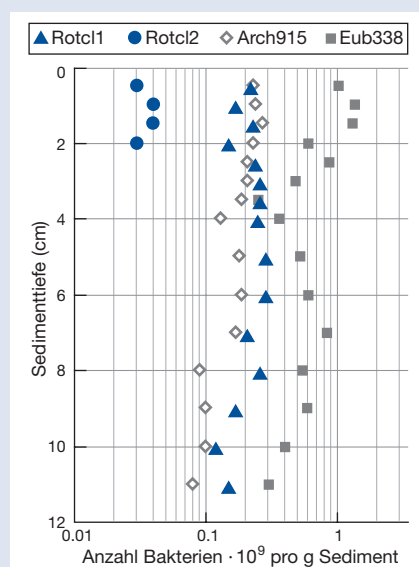
Die vorgestellten Projekte zeigen, wie divers die Fragestellungen sind, bei deren Lösung rRNA als Tracer eingesetzt wird. Die Gruppe «Molekulare Ökologie» an der EAWAG Kastanienbaum setzt diese Methoden in Kombination mit chemischen Analysen ein, um in einem interdisziplinären Ansatz bakterielle Lebensräume in natürlichen aquatischen Systemen möglichst umfassend zu charakterisieren.



**Kornelia Zepp, Biologin und Leiterin der Arbeitsgruppe «Molekulare Ökologie» in der Abteilung «Oberflächengewässer». Forschungsgebiet: Populationsdynamik Methan bildender Archaeen und Sulfat reduzierender Bakterien und deren Bedeutung für den anaeroben Abbau organischen Materials.**



**Abb. 3:** Anzahl Bakterien in den oberen 50 cm eines Sedimentkerns aus dem Baldeggersee (bezogen auf die Sedimenttrockenmasse). Die Bakterien wurden mit Hilfe der Fluoreszenz-*in-situ*-Hybridisierung sichtbar gemacht und anschliessend im Fluoreszenzmikroskop ausgezählt. Die verwendete Gensonde ist Eub338 [5].



**Abb. 4:** Verteilung verschiedener Bakteriengruppen im Sediment des Rotsees (bezogen auf die Sedimenttrockenmasse). Identifizierung durch die Fluoreszenz-*in-situ*-Hybridisierung mit verschiedenen Gensonden.

[1] Olsen G.J., Lane D.J., Giovannoni S.J., Pace N.R., Stahl D.A. (1986): Microbial ecology and evolution: a ribosomal RNA approach. *Annual Review of Microbiology* 40, 337–365.

[2] Woese C.R. (1987): Bacterial evolution. *Microbiological Reviews* 51, 221–271.

[3] Larsen N., Olsen G.J., Maidak B.L., McCaughey M.J., Overbeek R., Macke T.J., Woese C.R. (1993): The ribosomal database project. *Nucleic Acids Research* 21, 191–198.

[4] Amann R.I., Ludwig W., Schleifer H.-H. (1995): Phylogenetic identification and *in situ* detection of individual microbial cells without cultivation. *Microbiological Review* 59, 143–169.

[5] Stahl D.A., Amann R.I. (1991): Development and application of nucleic acid probes. In: Stackebrandt E., Goodfellow M. (eds.), *Nucleic acid techniques in bacterial systematics*. John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 205–248.

[6] Zepp Falz K., Holliger C., Grosskopf R., Liesack W., Nozhevnikova A.N., Müller B., Wehrli B., Hahn D. (1999): Vertical distribution of methanogens in the anoxic sediment of Rotsee (Switzerland). *Applied and Environmental Microbiology* 65, 2402–2408.

[7] Grosskopf R., Janssen P.H., Liesack W. (1998): Diversity and structure of the methanogenic community in anoxic rice paddy soil microcosms as examined by cultivation and direct 16S rRNA gene sequence retrieval. *Applied and Environmental Microbiology* 64, 960–969.

# Silber als neuer Tracer für die Kieselalgenproduktion

**In Sedimenten von Ozeanen und Seen ist die Geschichte der Gewässer, der umgebenden Landmassen und des Klimas aufgezeichnet. Die Kunst der Paleoozeanographie und -limnologie besteht darin, diese Archive richtig zu interpretieren. Metalle dienen als Tracer, um das Ausmass der Primärproduktion und die Redoxbedingungen zur Zeit der Ablagerung zu beschreiben. Neu ist die Verwendung von Silber als spezifischer Anzeiger für die Produktion von Kieselalgen.**

In der chemischen Paleoozeanographie und zunehmend auch in der Paleolimnologie wird in Sedimentabfolgen nach Indikatoren gesucht, mit denen sich die Bedingungen zur Zeit der Ablagerung rekonstruieren lassen. Das Auftreten von organischen Lagern im Sediment kann entweder das Resultat von erhöhter Primärproduktion oder von verminderter Dekomposition infolge Sauerstoffmangel im Tiefenwasser zur Zeit der Ablagerung sein [1]. Die Herausforderung ist, zwischen verschiedenen Signalen zu unterscheiden.

## Metalle als Indikatoren

In marinen Sedimenten werden redox-sensitive Spurenmetalle wie **Rhenium** (Re), **Molybdän** (Mo), **Uran** (U) und **Cadmium** (Cd) seit einigen Jahren als Tracer verwendet [2]. Wichtig ist, dass der Kreislauf dieser Metalle im Wasser und im Sediment möglichst genau bekannt ist.

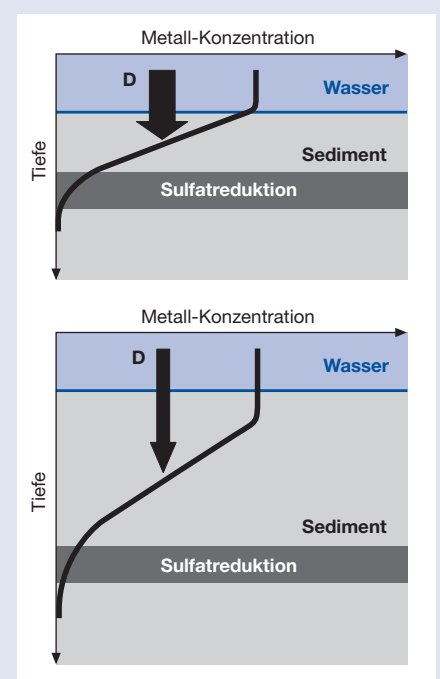
Re, U und Mo verhalten sich im Meerwasser weitgehend konservativ, d.h. sie gehen weder chemische noch biologische Reaktionen ein. Sie gelangen durch Diffusion aus dem Tiefenwasser in das Sediment, werden dort reduziert und akkumulieren. Re wird bei suboxischen Bedingungen reduziert, d.h. dann, wenn kein Sauerstoff mehr vorhanden ist, aber auch noch keine Sulfatreduktion stattfindet. Die Reduktion von U und Mo geschieht bei anoxischen Bedingungen, d.h. wenn bereits auch Sulfat zu Sulfid reduziert wird. Die Position der Sulfat reduzierenden Zone (Redoxfront) bestimmt die Diffusionsrate der Metalle (Abb. 1). Liegt die Zone der Sulfatreduktion tief im Sediment, so ist der Diffusionsweg für die Metalle lang und der Gradient flach. Unter diesen Bedingungen diffundieren also nur geringe Mengen Re, U und Mo in das Sediment und werden dort reduziert und festgelegt. Im Gegensatz dazu wird bei geringer Tiefe der Sulfat reduzierenden Zone mehr Re, U und Mo im Sediment fixiert. Die Akkumulation dieser Metalle hängt somit von der Position der Eindringtiefe des Sulfats ab und damit vom Redoxzustand der Wasser-Sediment-Grenzschicht. Re, U und Mo dienen daher als Tracer für Paleo-Redoxbedingungen im Tiefenwasser.

Cd hingegen wird ähnlich wie Phosphor vom Phytoplankton aufgenommen und nimmt am biologischen Kreislauf teil. Dabei gelangt es mit den sinkenden organischen Partikeln in das Sediment. Beim Abbau des organischen Materials im Sediment wird Cd wieder freigesetzt. Das gelöste Cd diffundiert in die Wassersäule und geht somit aus dem Sediment verloren. Falls aber freies

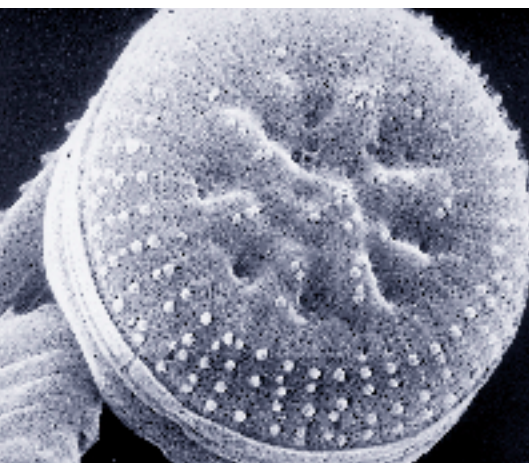
Sulfid vorhanden ist, reagiert es zum schwer löslichen Cadmiumsulfid ( $CdS$ ) und wird im Sediment festgesetzt. Geringste Konzentrationen von Sulfid genügen, um das Cd-Signal im Sediment zu erhalten. Daher ist Cd ein geeigneter Tracer für die Primärproduktion.

## Silber bindet an Schalen von Kieselalgen

**Silber** (Ag) verhält sich ähnlich wie Cd. Es wird vom Phytoplankton aufgenommen, gelangt in das Sediment und wird dort als Silbersulfid ( $Ag_2S$ ) entsprechend dem CdS festgesetzt. Für beide Metalle gilt, dass freies Sulfid, und damit Sulfatreduktion, im Sediment vorhanden sein muss, damit Ag- bzw. Cd-Sulfide ausfallen können. Unter diesen Bedingungen bleibt das Cd- und Ag-Signal der Primärproduktion erhalten. Die Konzentration der beiden Metalle ist,



**Abb. 1:** Die Eindringtiefe von Sulfat im Sediment definiert die Redoxfront. Liegt die Redoxfront direkt unterhalb der Sediment-Wasser-Grenze, ist die Diffusion (D) von gelösten Metallen in das Sediment gross; liegt sie tief im Sediment, ist die Diffusion gering.



Silikatschale der Kieselalge *Cyclotella stelligera*.



wie bei Re, U und Mo, von der Tiefe der Redoxfront abhängig.

Im Gegensatz zu Cd wird Ag jedoch nicht in das Zellinnere von Algen aufgenommen, sondern vorwiegend an die Schalenstruktur gebunden. In Laborversuchen wurde gezeigt, dass die Bindung an Silica-Schalen von Kieselalgen (Diatomeen) stärker ist als an Kalkschalen (z.B. Coccolithophoren) [3]. Daraus wurde die Hypothese abgeleitet,

dass Ag nicht nur als Tracer für die Primärproduktion verwendet werden kann, sondern auch ein spezifischer Anzeiger für die Produktion von Kieselalgen ist. In der hier vorliegenden Untersuchung wird diese Hypothese überprüft [4].

### Silber in sedimentierenden Partikeln

Zunächst wurde getestet, ob Ag tatsächlich von Diatomeen gebunden wird und mit dem toten Algenmaterial absedimentiert. Deshalb wurden im offenen Wasser des Saanich Inlet (British Columbia, Kanada) Sedimentfallen unterhalb der durchlichteten Zone exponiert. Die Sedimentfallen wurden monatlich geleert und das Material auf seinen Gehalt an biogenem Silica und Ag untersucht. Während der Sommermonate kommt es zu einem Anstieg der Sedimentationsrate von Silica als Folge einer erhöhten Diatomeen-Produktion. Gleichzeitig steigt auch die Ag-Konzentration an (Abb. 2). Die maximale Ag-Konzentration war bis zu 12-mal höher, als die mittlere Konzentration in Sedimenten. Vergleichbar hohe Konzentrationen sind nur aus Gebieten mit starker anthropogener Belastung bekannt, z.B. in den Sedimenten vor Long Island bei New York, die von der Tiefseeabwässereinleitung beeinflusst werden. Die hohen Ag-Konzentrationen in dem untersuchten, kaum belasteten Gewässer lassen deshalb auf eine intensive Aufnahme von Ag durch Diatomeen schließen.

sodische Erhöhungen der Primärproduktion zurück und zeichnen sich durch eine hohe Silica-Konzentration aus.

Die Konzentrationen von Ag und Cd wurden in den einzelnen Schichten des Sedimentkerns bestimmt. Abbildung 3 zeigt, dass die Muster der Konzentrationsprofile für beide Metalle ähnlich sind. In vielen Horizonten finden sich erhöhte Konzentrationen, was auf erhöhte Primärproduktion zur Zeit der Ablagerung schließen lässt. Die Analyse der Ag/Cd-Verhältnisse zeigt, dass sich die Horizonte in zwei «Typen» einteilen lassen: Neben Horizonten, die einen Ag/Cd-Wert um 0.2 haben, gibt es 3 Horizonte mit Ag/Cd-Werten um 0.4, in denen Ag im Vergleich zu Cd angereichert ist. Da diese drei Horizonte den oben erwähnten Diatomeenlagen entsprechen, lässt sich das erhöhte Ag/Cd-Verhältnis eindeutig einer höheren Diatomeenproduktion zuordnen. Die Ergebnisse zeigen damit zum ersten mal die völlig neue Anwendung von Ag als Tracer für Diatomeenproduktion.

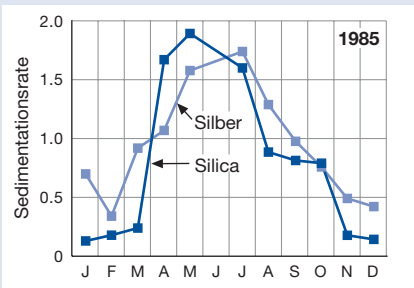


Abb. 2: Sedimentationsraten von biogenem Silica (dunkelblau, g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) und partikulärem Silber (hellblau, µg m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) im offenen Wasser vor Saanich Inlet (British Columbia, Canada).

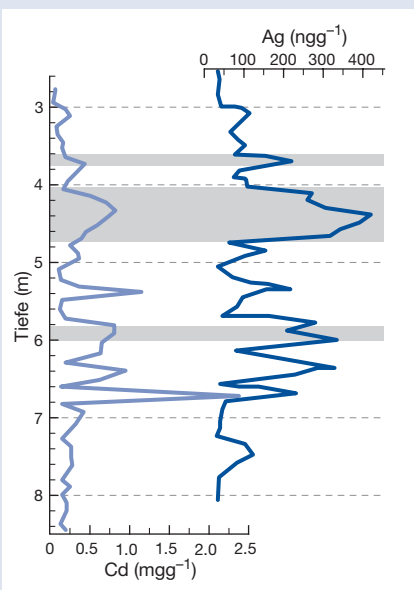


Abb. 3: Cd- und Ag-Profil des Sedimentkerns aus dem Pazifik (Seamount Patton-Murray, Golf von Alaska). Die grauen Bereiche bezeichnen das Vorkommen von Diatomeenlagen.

### Silberkonzentration – ein Mass für die Diatomeenproduktion

In marinen Sedimenten werden Diatomeenschalen oft komplett aufgelöst, somit ist ein Rückschluss auf die frühere Primärproduktion schwierig. Deshalb wurde als nächster Schritt getestet, ob sich Ag als spezifischer Tracer zum Nachweis der Diatomeenproduktion eignet. Als Testobjekt wurde ein 8 m langer Sedimentkern aus dem Golf von Alaska gewählt, in dem nachweislich drei Diatomeenlagen erhalten geblieben sind (Abb. 3, graue Bereiche). Sie gehen auf epi-



Gabriela Friedl, Geologin und Leiterin der Arbeitsgruppe «Sedimentchemie» in der Abteilung «Oberflächengewässer». Die vorgestellten Resultate wurden im Rahmen eines Postdoktorats an der University of British Columbia, Vancouver, Kanada erarbeitet.

Koautor: Tom Pedersen, Department of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia, Vancouver.

- [1] Calvert S.E., Pedersen T.F. (1992): Organic carbon accumulation and preservation in marine sediments: How important is anoxia? In: Whelan J.K., Farrington J.W. (eds.), Organic matter: productivity, accumulation and preservation in recent sediments. Columbia University Press, New York, 533 pp.
- [2] Crusius J., Calvert S., Pedersen T.F., Sage D. (1996): Rhenium and molybdenum enrichments in sediments as indicators of oxic, suboxic and sulfidic conditions of deposition. *Earth & Planetary Science Letters* 145, 65–78.
- [3] Fisher N.S., Wente M. (1993): The release of trace elements by dying marine phytoplankton. *Deep-sea Research* 40, 671–694.
- [4] Friedl G., Pedersen T.F., Crusius J., Donald D. (2001): Enrichment of silver in marine sediments as an indicator of high paleoproductivity. *Paleoceanography*, eingereicht.

# Mikrostrukturen der Temperatur als Tracer für Turbulenz und Mischung

**Die kleinsten Temperaturvariationen in Gewässern reichen über Bruchteile von Millimetern. Diese so genannten Temperaturmikrostrukturen können als Tracer verwendet werden, um turbulente Vermischung und deren kleinräumige Dynamik zu erfassen. Mit dieser Methode ist es möglich, verschiedene Einflüsse, z.B. Wind und Abkühlung, bei der Durchmischung von Gewässern auseinander zu halten.**

Bei der klassischen Tracer-Anwendung schliesst man aus der zeitlichen Entwicklung von Konzentrationen, welche an verschiedenen Orten gemessen werden, auf die Ausbreitung und die Umsatzraten von Stoffen. In «stehenden» Gewässern wie Seen, Meere und Ästuarien, die praktisch immer dichteschichtet sind und meist deutliche Temperaturgradienten aufweisen, lassen sich Temperaturvariationen  $\Delta T'$  (Abb. 1) als natürliche Tracer verwenden. Da sich die Temperatur über Zeiträume von Sekunden bis Minuten vollständig konservativ verhält, sind deren Variationen  $\Delta T'$  somit ein direktes Abbild der turbulent verlaufenden Transportvorgänge. Diese beiden Eigenschaften bilden die Grundlage der Temperaturmikrostruktur-Methode, welche zum Ziel hat, aus einem grossen Set von gemessenen  $\Delta T'$  auf Mischungsrate zu schliessen. Bei Schichtung verlaufen die turbulenten Strömungen vor allem horizontal und der vertikale Wasseraustausch ist stark vermindert. Trotzdem ist die turbulente Vermischung auch in vertikaler Richtung meist hundert- bis millionenfach grösser als die stets präsente molekulare Diffusion ( $K_T$  oder  $K_S$ , Tab. 1). Da vertikale Stoffflüsse üblicherweise, analog zu molekularen, durch das Produkt von turbulenter Diffusivität  $K_v$  ( $m^2 s^{-1}$ ) mal Konzentrationsgradienten  $\partial C/\partial z$  ( $mol m^{-4}$ ,  $z$  = Tiefe) quantifiziert werden, kommt der Erfassung von  $K_v$  grosse praktische Bedeutung zu.

## Das Prinzip

Welcher Zusammenhang besteht zwischen den Mikrostrukturen der Temperatur und der Mischungsrate? Die grundsätzliche Idee ist in Abb. 1 am Beispiel eines Temperatur-

profils aus dem Neuenburgersee dargestellt. In einem Temperaturgradienten  $\partial T/\partial z$  weisen benachbarte Wasserpakete unterschiedliche Temperaturen auf. Werden diese turbulent vermischt, so entstehen Variationen  $\Delta T'$  von der Grösse  $\Delta T' \approx L' \cdot (\partial T/\partial z)$ , wobei  $L'$  die Auslenkung eines Wasserpaketes aus seiner Ruhelage bezeichnet. Gelingt es,  $\Delta T'$  und den vertikalen Gradienten  $\partial T/\partial z$  *in situ* mit hoher Auflösung zu messen, so gewinnt man Informationen über die Ausdehnung  $L'$  und die Häufigkeit der turbulenten Wirbel (Abb. 1). Beide Informationen können durch zwei unterschiedliche statistische Modelle (siehe Kästen) in Mischungsrate ( $m^2 s^{-1}$ ) und turbulente Energiedissipationen ( $W kg^{-1}$ ) umgerechnet werden [Details in 1]. Die Wirbelgrössen variieren dabei, abhängig von der Schichtung und der vorhandenen Energie, von Millimetern bis mehrere Meter, wie beispielsweise im Ozean oder im Baikalsee. Variationen über räumliche Distanzen von weniger als 1 m werden als *Temperaturmikrostrukturen* bezeichnet.

## Die Messung

Zentral für das Erfassen von Turbulenz ist die vollständige Auflösung der Temperatur- und Geschwindigkeitsmikrostrukturen im Millimeter-Bereich. Profile werden üblicherweise mit frei sinkenden oder frei steigenden Sonden von einem Schiff aus oder heute sogar frei treibend mit Satelliten kommunizierend aufgenommen. Dabei muss die Sonde mit einer Geschwindigkeit, die deutlich grösser ist als die turbulente Geschwindigkeit  $w'$  (Tab. 1) bewegt werden, jedoch erfordert die thermische Trägheit des Temperatursensors von ca. einer Hundertstel-

sekunde eine möglichst geringe Geschwindigkeit. Der Kompromiss ist eine Sonden-geschwindigkeit von 5 bis 10  $cm s^{-1}$ , womit Temperaturprofile mit einer vertikalen Auflösung von ca. 0,5 bis 1 mm erfasst werden können. Wichtig ist, dass die schnell reagierenden T-Sensoren an der Spitze der Sonde angebracht sind, um das Profil (Abb. 1) ungestört zu erfassen.

## Die Anwendung

Die turbulente Diffusion in geschichteten Gewässern ist von vielfältiger Bedeutung. Im Meer beeinflusst sie beispielsweise das Schicksal klimarelevanter Gase und den Wärmetransport zwischen dem Äquator und den Polen. In Seen wirkt sie auf die Verteilung von Nähr- und Schadstoffen, die Algenproduktion, den Transport von Sauerstoff und anderen Redox-Parametern und beeinflusst letztlich die Bildung von Sedimenten. Die experimentelle Erfassung der vertikalen Diffusivität in natürlichen Gewässern ist heikel, da die Mischung gegen die Dichteschichtung langsam abläuft und zudem zeitlich und räumlich sehr heterogen ist. Wie Abb. 1 zeigt, wechseln sich turbulente und inaktive Bereiche ab.

**Coxzahl-Methode:** Bei dieser Methode werden die Gradienten der Temperaturvariationen  $\Delta T'$  (genauer  $[\partial T'/\partial z]^2$ ) mit den mittleren Gradienten  $[\partial T/\partial z]^2$  verglichen. Diese Verhältniszahl (die so genannte Coxzahl) ist ein Mass dafür, wieviel mal grösser die turbulente Mischungsrate verglichen mit der molekularen Rate ist (siehe Tab. 1 für typische Grössen).

**Dissipations-Methode:** Bei diesem Verfahren wird die Information, die in der «Feinheit» der Struktur der vorhandenen Temperaturfluktuationen steckt, ausgenutzt. Je intensiver die Turbulenz ist, desto kleiner können die kleinstmöglichen Wirbel sein, bevor sie von der Viskosität des Wassers geglättet werden. Aus diesen kleinsten Strukturen wird dann auf die Dissipation turbulenter Energie (Tab. 1) geschlossen. Die Dissipation ist das klassische Mass für die Intensität von Turbulenz in natürlichen Systemen.

Symbol	Eigenschaft	Typischer Bereich
$\Delta T'$	Temperaturvariationen (lokal) in Gewässern	0,0001 bis 0,1 °C
$K_v$	Vertikale turbulente Diffusivität (Mischungsrate $K_v = w' \cdot L'$ )	$10^{-7}$ bis $10^{-4}$ m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$K_T$	Molekulare Diffusivität der Temperatur	$1,4 \cdot 10^{-7}$ m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$K_S$	Molekulare Diffusivität gelöster Stoffe	um $10^{-9}$ m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$L'$	Vertikale Grösse von Wirbeln	cm bis mehrere m
$w'$	Vertikale Geschwindigkeiten von Wirbeln ( $w' = (\epsilon/N)^{1/2}$ )	0,01 bis 10 cm s <sup>-1</sup>
$\epsilon$	Dissipation turbulenter Energie in Wärme	$10^{-11}$ bis $10^{-6}$ W kg <sup>-1</sup>
$N^2$	Stabilität der Wassersäule ( $N^2 = -1/\rho \cdot \partial \rho / \partial z$ )	$10^{-9}$ bis $10^{-2}$ s <sup>-2</sup>

Tab. 1: Grössenbereiche turbulenter Eigenschaften in geschichteten Gewässern.

Üblicherweise werden vertikale Mischungs-raten «indirekt» durch die zeitliche Verbreitung eines Tracers oder über den Wärmehaushalt bestimmt. Dabei wird jedoch über die Wirkung aller turbulenten Mischungsereignisse, welchen der Tracer ausgesetzt

ist, gemittelt. Durch die indirekte Messung ist es jedoch nicht möglich, besonders turbulente oder inaktive Zonen zu identifizieren und die Mischungsintensität spezifisch an einem Ort oder zu einem festen Zeitpunkt zu erfassen. Bei der direkten Messung durch

die Temperaturmikrostruktur-Methode dagegen werden auch turbulente Ereignisse erfasst und können zeitlich und räumlich aufgelöst werden. Damit konnte beispielsweise die Rolle der Bodengrenzschicht für die turbulente Mischung im Hypolimnion von mittleren und kleinen Seen (Abb. 2) aufgezeigt werden [2]. Messungen im Baikalsee [3] und in den Randmeeren zeigen, dass auch in grossen Gewässern die vertikale Vermischung weitgehend durch Prozesse am Sediment bestimmt wird.

Die Methode erlaubt zudem, Turbulenz unter verschiedenen physikalischen Randbedingungen getrennt zu untersuchen. Es wird möglich, unterschiedliche physikalische Mischungsprozesse in Modellen richtig zu parametrisieren sowie Wege und Verweilzeiten der mechanischen Energie zu bestimmen. Damit kann z.B. die Wirkung des Windes und die Wirkung der Abkühlung sauber auseinander gehalten werden – eine Aufgabe, die mit klassischen Tracern kaum zu realisieren ist.

Die Arbeit wurde langfristig vom Schweizerischen Nationalfonds und der EAWAG unterstützt.



**Alfred Wüest, Physiker und Leiter der Abteilung «Angewandte Gewässerökologie».** Er unterrichtet das Fach «Aquatische Physik» an der ETH Zürich. Forschungsgebiet: Mischungsprozesse in Seen und Flüssen, Einfluss physikalischer Prozesse auf biogeochemische Kreisläufe in Gewässern.

**Koautoren:** Tobias Jonas, Andreas Lorke, Michael Schurter

- [1] Gloor M., Kocsis O., Omlin M., Schurter M., Wüest A. (1995): Temperaturmikrostrukturen – Eine Methode zur Bestimmung der Mischungsintensität in geschichteten Gewässern. Gas Wasser Abwasser 75, 1087–1096.
- [2] Wüest A., Piepke G., van Senden D.C. (2000): Turbulent kinetic energy balance as a tool for estimating vertical diffusivity in wind-forced stratified waters. Limnology & Oceanography 45, 1388–1400.
- [3] Ravens T.M., Kocsis O., Wüest A., Granin N. (2000): Small-scale turbulence and vertical mixing in Lake Baikal, Limnology & Oceanography 45, 159–173.

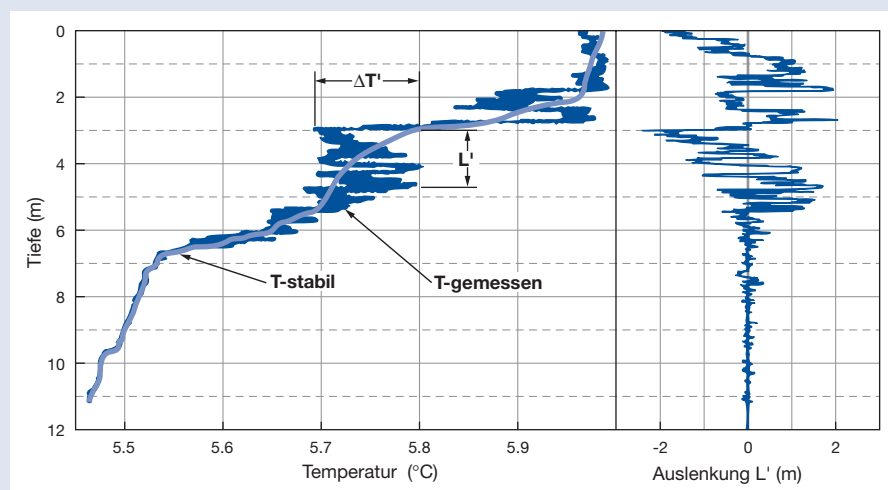


Abb. 1: Temperaturprofil aus dem Neuenburgersee (links, T-gemessen) und die entsprechenden Auslenkungen  $L'$  (rechts). Die Auslenkungen  $L'$  erreichen Längen bis zu 2 m relativ zur stabilen (turbulenzfreien) Ruhelage (links, T-stabil). Die Temperaturvariationen  $\Delta T'$  entstehen durch Verwirbelung benachbarter Wasserpakete mit unterschiedlicher Temperatur.

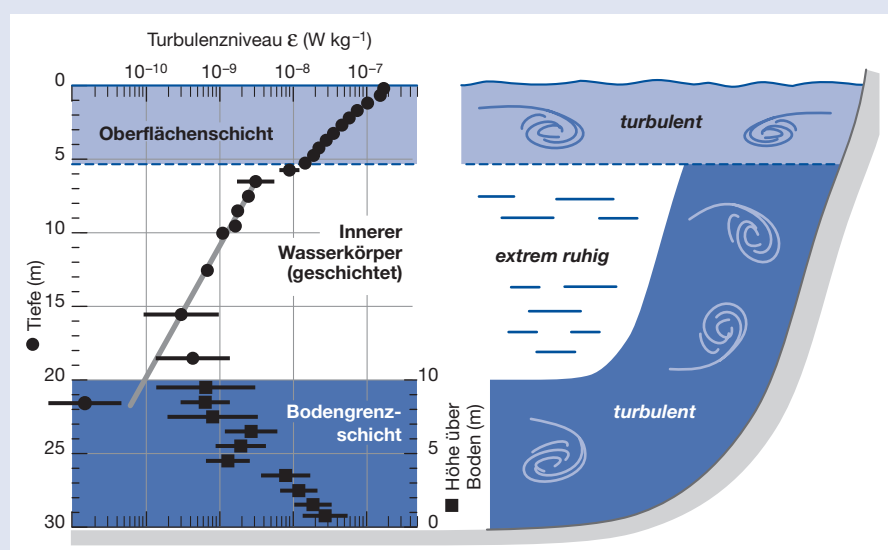


Abb. 2: Typisches Profil der Turbulenzintensität in einem See (hier Alpnachersee). An der Oberfläche wird turbulente Energie durch direkte Einwirkung von Wind und Abkühlung erzeugt. Die Energie nimmt mit zunehmender Tiefe ab und wird zusätzlich durch die Dichteschichtung gedämpft. Im inneren Wasserkörper ist es deshalb extrem ruhig. Über dem Seegrund steigt das Turbulenzniveau durch die Bodenreibung wieder stark an.



# Unterscheidung von Grundwasser-Lebensräumen mit Radon als Tracer

**Auen beherbergen ein komplexes Netzwerk aquatischer Lebensräume, welche sowohl von Oberflächenwasser als auch von Grundwasser gespeist werden. Mit Hilfe der Radonmethode ist es möglich, Lebensräume zu erkennen, die durch Grundwasser geprägt sind. In der «Mittleren Aue» des Bleniotals konnten wir mit dieser Methode und durch gleichzeitige Bestimmung der Sulfatkonzentrationen drei Grundwassertypen unterscheiden, die durch unterschiedliche Anteile frisch infiltrierten Oberflächenwassers charakterisiert sind.**

Flussauen sind Bereiche von Gewässersystemen, die periodisch von Wasser überflutet werden [1]. Auen treten vielerorts in kiesigen Talebenen auf und haben je nach Grundwasserstand sowie Dauer und Frequenz der Überflutungen eine charakteristische Lebensgemeinschaft von Pflanzen und Tieren. In Auengebieten herrscht ein starker Austausch zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser: Oberflächenwasser kann in das Grundwasser infiltrieren und Grundwasser umgekehrt exfiltrieren.

## Radon als Tracer im Grundwasser

Grundwasser-Lebensräume in Auen sind geprägt durch unterschiedlich hohe Mischanteile von Oberflächen- und Grundwasser und durch wechselnde Aufenthaltszeiten dieses Mischwassers [1]. Mit Hilfe des

natürlich vorkommenden Tracers Radon können beide Einflussgrößen abgeschätzt werden. Grundwasser enthält natürlicherweise das radioaktive Edelgas Radon in messbaren Konzentrationen (Isotop Rn-222, im folgenden Rn genannt; siehe Kasten). Demgegenüber enthält Oberflächenwasser nahezu kein Rn, weil es in die Atmosphäre ausgast. Bei seinem Transport im Untergrund konzentriert sich Rn in frisch infiltriertem Wasser in den ersten ca. 15 Tagen bis zu einem gleichbleibenden Wert auf (Abb. 1) [2].

## Grundwassereinfluss in den Auen des Bleniotals

Eine Fallstudie der EAWAG in den «Mittleren Auen» des Bleniotals (Acquarossa – Ponto Valentino, Kanton Tessin; Abb. 2) hatte das Ziel herauszufinden, in welchem Ausmass aquatische Auenlebensräume von Grundwasser geprägt sind. Ein Teil der Mittleren Auen wird durch Hangwasser gespeist [3]. Hangwasser ist Grundwasser, das von den Talhängen her in Richtung Talsohle fliesst und in Form von Quellen in der Aue oder im Fliessgewässer austritt. Dies ist z.B. im Gehängeschutt des Seitenbachs Uregn der Fall. Daneben gibt es Quellen und Wasseranstöße sowohl im Bett als auch an den Ufern des Brenno, die durch Flusssohlen-Grundwasser gespeist werden. Dieses Wasser ist durch einen relativ hohen Anteil an frisch infiltriertem Oberflächenwasser gekennzeichnet.

An drei Tagen (Juli und Oktober 1999, April 2000) wurden 9 Untersuchungsstellen in der Mittleren Aue beprobt. An diesen Stellen

wurde mit Unterwasserpumpen Grundwasser aus Probenahmerohren von bis zu 10 m Tiefe entnommen. Zum Vergleich wurde Wasser aus zwei Quellen im Sulfatgestein der Trias sowie Oberflächenwasser aus dem Seitenbach Uregn und dem Hauptgerinne des Brenno untersucht (Abb. 1). Die Rn-Konzentrationen in den Wasserproben wurden mit einem Halbleiter-Detektor direkt im Feld bestimmt.

### Radon

Das radioaktive Isotop Radon-222 (Halbwertszeit 3,8 Tage) entsteht aus Radium-226 in der natürlichen radioaktiven Zerfallsreihe von Uran-238. Chemisch gesehen ist Radon ein reaktionsträges Edelgas. Es besitzt ein grosses Durchdringungsvermögen: Wo in durchlässigem Gestein Uran und/oder Radium vorhanden ist, kann Radon durch Diffusions- und Rückstosskräfte freigesetzt werden (Emanation). Dadurch gelangt es in das Grundwasser oder Bodengas, von wo es in die Atmosphäre ausgast.

Die Radioaktivität wird gemessen als Anzahl Zerfallsakte pro Sekunde, mit der Einheit Becquerel (Bq). Die Aktivitätskonzentration in Grundwasser wird als Bq/l beschrieben.

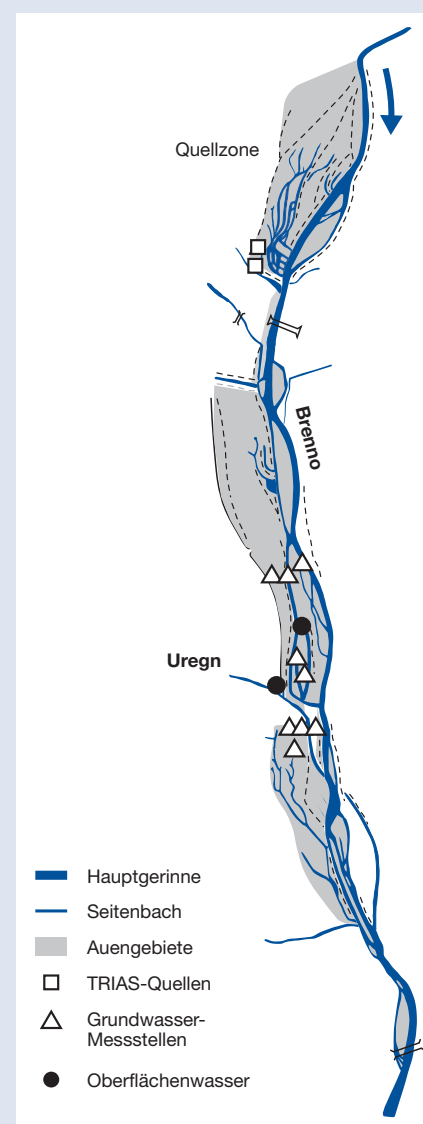


Abb. 1: Kartenausschnitt des Gebiets Mittlere Aue im Bleniotal (Kanton Tessin) mit Probenahmestellen.

## Drei verschiedene Grundwassertypen

Die gemessenen Rn-Konzentrationen lagen zwischen 5 und 45 Bq/l (Einheit Bq; siehe Kasten). Wie erwartet, enthielt das Oberflächenwasser aus dem Brenno und dem Uregn nahezu kein Rn. Dagegen enthielten die Proben aus den beiden Triasquellen erwartungsgemäss hohe Rn-Konzentrationen (>33 Bq/l), da es sich bei diesem Wasser um älteres, unvermisches Grundwasser handelt. Die Proben aus den 9 Grundwasser-Entnahmestellen enthielten Mischwasser mit Rn-Werten zwischen 5 und 33 Bq/l. Aufgrund der breiten Streuung der Werte lässt sich in den Mischwasserproben kein eindeutiges Muster erkennen. An manchen Probenahmestellen veränderte sich zudem die Rn-Konzentration zwischen zwei Probenahmedaten. Ein besseres Verständnis, ob es sich um verschiedene Grundwassertypen handelt, lieferte die zusätzliche Bestimmung der Sulfatkonzentrationen ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).



Die «Mittleren Auen» im Blenioal, Kanton Tessin.

Das Wasser des Brenno ist bekannt für relativ hohe  $\text{SO}_4^{2-}$ -Konzentrationen als Folge der Auflösung von Gips- und Anhydritgesteinen der Trias in höhergelegenen Teileinzugsgebieten [4, 5]. Tatsächlich lagen die  $\text{SO}_4^{2-}$ -Werte in den meisten Proben zwischen 1 und 2,5 mmol/l. Hingegen enthielten einige der Grundwasserproben und das Wasser des Uregn nur wenig  $\text{SO}_4^{2-}$  (<1 mmol/l). Abbildung 3 zeigt, dass sich durch den Vergleich der Rn- und  $\text{SO}_4^{2-}$ -Konzentrationen drei Grundwassertypen unterscheiden lassen: Die erste Gruppe beinhaltet Wasserproben mit tiefen  $\text{SO}_4^{2-}$ - und mittleren Rn-Konzentrationen. Hier scheint es sich um relativ altes Grundwasser zu handeln, das wahrscheinlich durch Hangwasser aus dem Gehängeschutt des Seitenbachs Uregn gespeist wird. Die niedrigen  $\text{SO}_4^{2-}$ -Konzentrationen sprechen für eine nur schwache Infiltration von Oberflächenwasser. In der zweiten Gruppe wurden Proben mit mittleren  $\text{SO}_4^{2-}$ - und tiefen Rn-Konzentrationen zusammengefasst. Diese

Kombination lässt auf recht junges Mischwasser schliessen, wobei ein relativ hoher Anteil Brennowasser in das Grundwasser infiltriert ist. Die dritte Gruppe schliesslich enthält die Wasserproben aus den Triasquellen, die sowohl durch hohe  $\text{SO}_4^{2-}$ - als auch durch hohe Rn-Konzentrationen charakterisiert sind.

Damit erlaubt die Radonkonzentration, hier in Kombination mit der  $\text{SO}_4^{2-}$ -Konzentration, Mischungsverhältnisse und Wasseralter des Grundwassers abzuschätzen. Je nach Grundwasserqualität erwartet man in diesen unterirdischen Lebensräumen unterschiedliche Lebensgemeinschaften. Eine umfassende Charakterisierung der Grundwasser-Lebensräume beinhaltet deshalb neben den hier vorgestellten hydrologischen Aspekten auch detaillierte biologische und geochemische Untersuchungen.

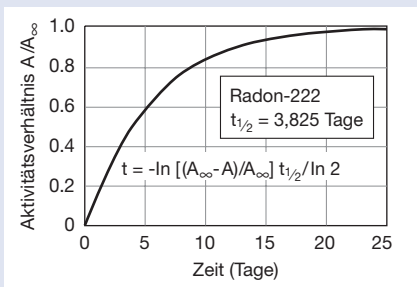


Abb. 2: Gesetz, das den Anstieg der Rn-Konzentration im Verlauf der Zeit erklärt: Nach 15 Tagen (ca. 4 Halbwertszeiten,  $t_{1/2}$ ) sind 94% einer gleichbleibenden Aktivitätskonzentration (steady state  $A_{\infty}$ ) erreicht. Mit der in einer Wasserprobe gemessenen Konzentration  $A$  wird über die Formel das Verhältnis der Aktivitätskonzentrationen  $A/A_{\infty}$  und damit die Aufenthaltszeit  $t$  der entsprechenden Grundwasserprobe bestimmt.

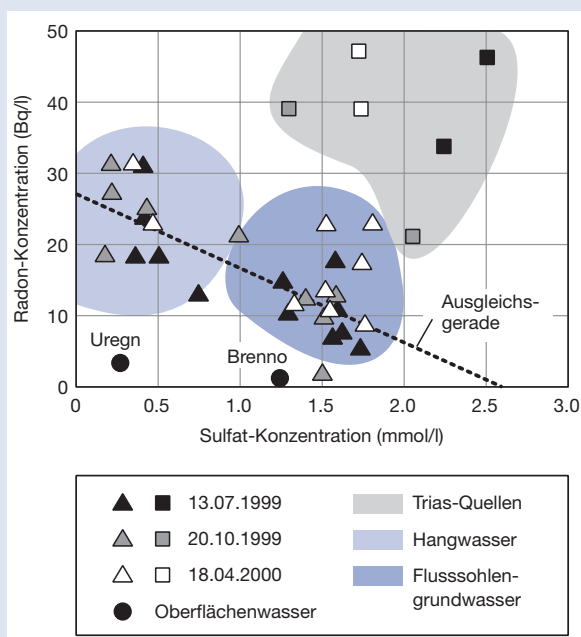


Abb. 3: Ermittlung der Grundwassertypen mit Radon und Sulfat. Dreiecke: Proben aus Grundwasserstellen, Quadrate: Proben aus Trias-Quellen.

- Hellblaue Wolke: relativ altes Mischwasser mit niedrigem Oberflächen- und hohem Grundwasseranteil (11 Proben aus 4 Stellen).
  - Dunkelblaue Wolke: relativ junges Mischwasser mit hohem Oberflächen- und niedrigem Grundwasseranteil (18 Proben aus 8 Stellen).
- Ausgleichsgerade aller 29 Messwerte:  $y = -9.5x + 27$ ;  $r = -0.68$ .
- Graue Wolke: älteres unvermisches Grundwasser aus Triasquellen (6 Proben aus 2 Stellen).



Eduard Hoehn, Hydrogeologe, wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung «Wasserressourcen und Trinkwasser», Leiter der Auengruppe im Querprojekt «Ökostrom», Forschungsgebiet: Austausch zwischen Grund- und Oberflächenwasser, Grundwassererschmutzung, Tracermethoden.

Koautoren: Tom Gonser, Doris Hohmann und Ruth Stierli

- [1] Brunke M., Gonser T. (1997): The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater, *Freshwater Biology* 37, 1–33.
- [2] Hoehn E., von Gunten H.R. (1989): Radon in groundwater – a tool to assess infiltration from surface waters to aquifers. *Water Resources and Research* 25, 1795–1803.
- [3] Holocher J., Kipfer R., Matta V., Aeschbach-Hertig W., Beyerle U., Hofer M. Combined hydrochemical and isotopic investigations to determine the hydrological system of an alpine floodplain, Valle di Blenio, Switzerland. Eingereicht bei *Ground Water*.
- [4] Mazor E., Vuataz F. (1990): Hydrology of a spring complex, studied by geochemical time-series data, Acquarossa, Switzerland. *Applied Geochemistry* 5, 563–569.
- [5] Pastorelli S., Marini L., Hunziker J.C. (1999): Water chemistry and isotope composition of the Acquarossa thermal system, Ticino, Switzerland. *Geothermics* 28, 75–93.

# Konservative Elemente auf neuen Wegen

**Ein neues Modell für den Gasaustausch im Grundwasser, das von einem Gleichgewicht zwischen Wasser und eingeschlossener Bodenluft ausgeht, liefert eine physikalisch begründete Erklärung für das Auftreten von Luftüberschüssen im Grundwasser. Es ermöglicht damit eine sinnvolle Interpretation der atmosphärischen Gaskonzentrationen und eine verbesserte Quantifizierung von radiogenem Helium, so dass die Datierung von jungem Grundwasser genauer wird.**

In den letzten 3 Jahrzehnten wurden Tracerbasierte Methoden erfolgreich eingesetzt, um die Tiefenwasserbildung in Ozeanen und grossen Seen [1, 2] zu untersuchen. Gemessen werden konservative Spurengase wie z.B. Edelgase. Verfolgt man die Konzentrationsänderungen dieser transienten Tracer im Verlauf der Zeit, lassen sich einfache Gesetzmässigkeiten erkennen:  $^3\text{He}$  reichert sich im Wasser an, da das im Wassermolekül gebundene radioaktive Wasserstoffisotop Tritium ( $^3\text{H}$ ) zu  $^3\text{He}$  (Helium) zerfällt. Entsprechend kann aus den transienten Tracerkonzentrationen im Wasser auf die Zeitspanne geschlossen werden, die verstrichen ist, seitdem das Wasser zuletzt mit der Atmosphäre Gase ausgetauscht hat (Wasseralter).

Es lag auf der Hand, diese wirkungsvollen Tracerkonzepte auch auf Grundwasser zu übertragen, um dessen Aufenthaltszeiten und Erneuerungsraten zu bestimmen. Da der Gasaustausch zwischen Bodenluft und Grundwasser aber weit komplexer verläuft als in offenen Gewässern, waren die ozeanischen Tracerkonzepte nicht ohne weiteres übertragbar. Insbesondere erschwert das Auftreten von Luftüberschüssen die Anwendung der  $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$ -Datierung. Die Gruppe «Umweltisotope» an der EAWAG hat sich deshalb in den letzten Jahren darauf konzentriert, den Gasaustausch zwischen Atmosphäre, Bodenzone und Grundwasser besser zu verstehen.

## «Excess air» im Grundwasser

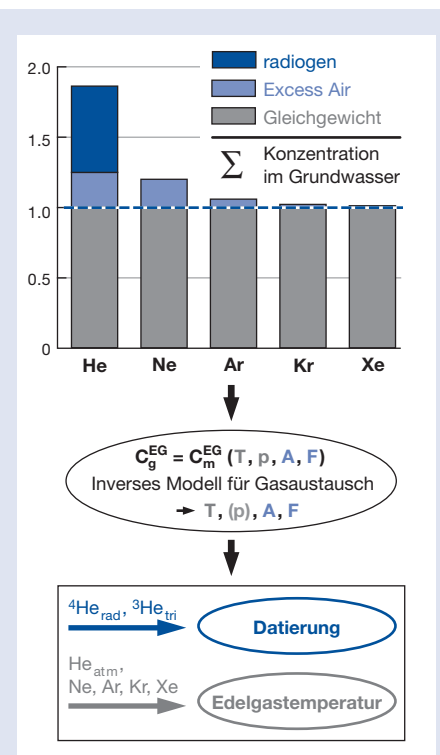
Da die Löslichkeiten der Edelgase im Wasser stark von der Temperatur abhängen, sind deren Gleichgewichtskonzentrationen

ein direktes Mass für die Temperatur während des Gasaustausches. Im Gegensatz zu offenen Gewässern sind im Grundwasser die Konzentrationen der atmosphärischen Edelgase klar höher als die entsprechenden Gleichgewichtskonzentrationen (Abb. 1). Daher müssen für die Temperaturbestimmung die gemessenen Edelgaskonzentrationen in die Gleichgewichtskonzentrationen, welche die paläoklimatische Information enthalten, und in die Überschusskomponenten aufgespalten werden. Der Überschuss ist in etwa atmosphärisch zusammengesetzt und wird als Überschussluft oder «excess air» bezeichnet. Obwohl das Auftreten von «excess air» im Grundwasser seit Jahrzehnten bekannt ist und die Anwendung von atmosphärischen Edelgasen zur Bestimmung der Temperatur eingeschränkt, wurde kaum versucht zu verstehen, wie «excess air» im Grundwasser gebildet wird.

Im Wasser sind die Edelgase Neon (Ne), Argon (Ar), Krypton (Kr) und Xenon (Xe) rein atmosphärischen Ursprungs; wogegen Helium (He) auch nicht-atmosphärische Quellen besitzt. Ohne He stehen damit 4 atmosphärische Edelgaskonzentrationen zur Lösung eines Gleichungssystems für den Gasaustausch im Grundwasser zur Verfügung (Abb. 1), das durch 3 wesentliche freie Parameter beschrieben wird: Temperatur, Menge «excess air» und deren Fraktionierung (die gegenüber Luft veränderte Zusammensetzung). Der Druck ist durch die Höhe des Infiltrationsgebietes oft eindeutig festgelegt und ist damit im Allgemeinen bekannt. Diese Gleichungen lassen sich mit geeigneten statistischen Verfahren iterativ

lösen, um die Temperatur und die anderen freien Parameter zu bestimmen [3].

Zur Beschreibung der Konzentrationen der atmosphärischen Edelgase im Grundwasser wurden verschiedene physikalisch mehr oder weniger begründbare Modelle vorgeschlagen. In den meisten Fällen vermochte jedoch keines dieser Modelle die atmo-



**Abb. 1: Modell zur Erklärung der Edelgasübersättigung im Grundwasser.**

Die gemessenen Gaskonzentrationen ( $\Sigma$ ) sind klar grösser als die zu erwartenden atmosphärischen Gleichgewichtskonzentrationen (grau), welche durch den Luftdruck ( $p$ ), die mittlere Temperatur ( $T$ ) und die gasspezifische Löslichkeit bestimmt sind. Je leichter das Edelgas, um so stärker ist seine Anreicherung («excess air»,  $A$ , hellblau). Die relativen Überschüsse der rein atmosphärischen Edelgase ( $\text{Ne, Ar, Kr, Xe}$ ) gleichen der Zusammensetzung der Luft, sind aber zu Gunsten der schweren Edelgase angereichert ( $F$ , Fraktionierung). He wird zusätzlich als einziges Edelgas auch durch radioaktive Zerfallsprozesse erzeugt ( $^4\text{He}$ :  $\text{U-, Th-Zerfall}$ ,  $^3\text{He}$ :  $^3\text{H-Zerfall}$ ).

In das Modell gehen die Parameter  $T, A, F$  und  $p$  sowie die Konzentrationen der 4 atmosphärischen Edelgase,  $\text{Ne, Ar, Kr, Xe}$  ( $C^{\text{EG}}, g = \text{gemessen}, m = \text{modelliert}$ ) ein. Durch statistische Methoden kann mit Hilfe des Modells die atmosphärische und radiogene He-Komponente errechnet werden, so dass das Grundwasser schlüssig datiert werden kann.



sphärischen He-Überschüsse zu erklären, die sich in geeigneten jungen Grundwässern aus den gemessenen  $^3\text{He}$ - und  $^4\text{He}$ -Konzentrationen rekonstruieren lassen [3].

### «Entrapped air» im Boden

Es galt nun, neue Ansätze für den Gasaustausch im Grundwasser zu entwickeln, die sich stärker an den realen Luft/Wasser-Verhältnissen im Boden orientieren, und die als Clou auch für He realistische Vorhersagen liefern.

Entgegen dem Wortgebrauch weist das Bodenprofil einen kontinuierlichen Übergang zwischen der ungesättigten (luft- und wassergefüllter Porenraum) und der gesättigten Zone (nur wassergefüllter Porenraum) auf. In diesem Grenzbereich der quasigesättigten Zone bleiben typischerweise 10–20% des Porenraumes weiterhin durch Luft besetzt. Die Porenluft bleibt dort gefangen und ist immobilisiert. Diese so genannte «entrapped air» kontrolliert im Boden massgeblich die Grundwasserneubildung, da die gefangene Luft zumindest vorübergehend eine wirksame Barriere gegen Infiltration darstellt.

Obwohl «entrapped air» in der Bodenkunde gut untersucht ist, haben erst unsere Arbeiten «excess air» und «entrapped air» funktional in Beziehung gesetzt und den Gasaustausch im Grundwasser so auf eine neue Basis gestellt [4, 5]. Die Strömungsgeschwindigkeiten des Wassers in der quasigesättigten Zone sind sehr klein (m pro Tag oder weniger); zusätzlich ist der Druck in dieser Zone wegen der hydrostatischen Überlast gegenüber dem Luftdruck um 5–10% erhöht. Es darf deshalb angenommen werden, dass sich wegen des lokal erhöhten Druckes ein neues Gleichgewicht zwischen der eingeschlossenen Bodenluft und dem umgebenden Wasser einstellt, wobei jedes Gas sein spezifisches Lösungsgleichgewicht erreicht. Da die «entrapped air» relativ zum Wasser ein begrenztes Gasreservoir darstellt und gleichzeitig der Blasendruck dem äusseren Druck entsprechen muss, stellen sich die Partialdruckverhältnisse in den Blasen neu ein. Die Elementzusammensetzung in den Gasblasen wird im Vergleich zu unfraktionierter Luft in Richtung der leichten Edelgase verschoben. Im Wasser dagegen sind gegenüber reiner «excess air» die schweren und besser löslichen Edelgase angereichert (Abb. 1). Dieses neue Gasaustauschmodell, das ein Gleichgewicht zwischen Grundwasser und «entrapped air» postuliert, sagt genau jenes Muster der relativen Edelgasüberschüsse vorher, das für Grundwasser typisch ist. Insbesondere werden die Edelgasüberschüsse mit physikalisch direkt beobachtbaren Grössen in der quasigesättigten Zone, z.B. dem durch infiltrierendes Grundwasser erzeugten Überdruck, in Beziehung gesetzt (Abb. 2), wodurch «excess air» als zusätz-

liches Proxi der paleoklimatischen Interpretation zugänglich wird [5–7]. Weiter sagt das vorgeschlagene Modell als zur Zeit einziges Konzept im statistischen Sinne «realistische» atmosphärische He-Konzentrationen vorher.

### Fazit: Genaue Datierung von Grundwasser

Rückblickend hat der neue Ansatz nicht nur die Vorstellungen über den Gasaustausch im Grundwasser erweitert und damit die Temperaturbestimmung mittels Edelgasen auf eine physikalisch fundiertere Basis gestellt, sondern er verbessert auch die Qualität der  $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$ -Datierung von jungem Grundwasser deutlich. Daraus ergeben sich kleinere und somit plausiblere Wasseralter, wogegen die alten Fraktionierungsansätze oft unrealistisch grosse Aufenthaltszeiten lieferten.



Rolf Kipfer, Umweltphysiker und Leiter der Arbeitsgruppe «Umweltisotope». Forschungsgebiet: Umwelttracer-Methoden im Grundwasser und in Seen, numerische Methoden der Datenanalyse und Modellierung aquatischer Systeme.

Koautoren: Werner Aeschbach-Hertig, Urs Beyerle, Matthias Brennwald, Markus Hofer, Johannes Holochoer, Frank Peeters

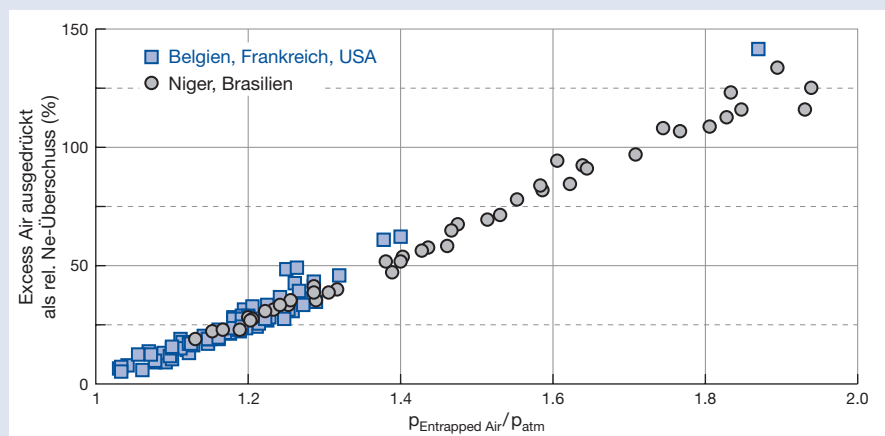


Abb. 2: «Excess air» im Grundwasser aus verschiedenen geographischen Breiten. Grundwasser aus ariden Regionen (Niger, Brasilien) weist generell mehr «excess air» auf als Grundwasser aus gemässigten Zonen (Belgien, Frankreich, USA). Z.B. zeigen Grundwasserproben aus dem Niger, die mehr als 5000 Jahre alt sind, ausserordentlich viel «excess air». Paleoklimatischen Hinweisen zufolge war das Klima damals im Gebiet der heutigen Sahel Zone klar feuchter («green Sahara») als heute. Wahrscheinlich kam es unter diesen feuchteren Bedingungen auch zu verstärkter Grundwasserneubildung und grösseren zeitlich intermittierenden Grundwasserspiegelschwankungen. Die daraus resultierende vergrösserte hydraulische Überlast erhöhte den Druck in der quasigesättigten Zone, so dass sich letztlich mehr «excess air» im Grundwasser löste [6].

- [1] Hohmann R., Kipfer R., Kocsis O., Peeters F., Schurter M., Sturm M., Imboden D. (1996): Den Geheimnissen des Baikalsees auf der Spur. In: EAWAG-Jahresbericht, Dübendorf, S. 3–8.
- [2] Imboden D. (1994): Der Vierwaldstättersee – fast ein helvetischer Ozean. In: EAWAG-Jahresbericht, Dübendorf, S. 7–12.
- [3] Aeschbach-Hertig W., Peeters F., Beyerle U., Kipfer R. (1999): Interpretation of dissolved atmospheric noble gases in natural waters. *Water Resources Research* 35, 2779–2792.
- [4] Aeschbach-Hertig W., Peeters F., Beyerle U., Kipfer R. (2000): Palaeotemperature reconstruction from noble gases in ground water taking into account equilibration with entrapped air. *Nature* 405, 1040–1044.
- [5] Holochoer J., Peeters F., Aeschbach-Hertig W., Beyerle U., Braunwald M., Hofer M., Kipfer R. (2000): New insights into the processes controlling the formation of excess air in ground water. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union, San Francisco*, 81, F 441.
- [6] Aeschbach-Hertig W., Beyerle U., Holochoer J., Peeters F., Kipfer R. (2001): Excess in groundwater as a potential indicator of past environmental changes. In: International conference on the study of environmental change using isotope techniques, IAEA, Vienna, p. 34–36.
- [7] Peeters F., Beyerle U., Aeschbach-Hertig W., Holochoer J., Kipfer R. (2000): Recharge temperature, excess air fractionation and groundwater dating: improving the analysis by including noble gas isotopes, *EOS, Trans. Am. Geophys. Union, San Francisco*, 81, F 440–441.

# EAWAG-Infotag 2001 «Risikofaktoren im Wasser»

## Ein Interview mit Ruth Gonseth zum Thema

**Frau Dr. Ruth Gonseth war als Vertreterin der Grünen Partei von 1991 bis Mai 2001 im Nationalrat. In dieser Funktion hat sie sich intensiv mit der Problematik von Schadstoffen in Gewässern auseinandergesetzt und die parlamentarischen Vorstösse «Stoffe mit endokriner Wirkung. Forschungsbedarf» und «Reduktion von hormonaktiven Substanzen» eingereicht. Weiter führt Frau Gonseth eine Praxis für Dermatologie und ist aktiv im Verband der «Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz» tätig. Die EAWAG news befragte sie zu den Motiven ihres Engagements, der internationalen Rolle der Schweiz und den Aufgaben der Forschung.**

**EAWAG news: Sie sind sehr engagiert in der Schadstoffproblematik. Was sind Ihre Motive?**

**Ruth Gonseth:** Mich beschäftigt diese Thematik schon seit einiger Zeit. Ich habe immer wieder aufgehört, wenn Berichte durch die Presse gingen, dass Chemikalien, die in die Umwelt gelangen, selbst in kleinsten Konzentrationen eine schädigende Wirkung auf Tiere und Menschen haben können. Gleichzeitig sehe ich die Problematik immer auch aus dem Blickwinkel der Ärztin. Ich bin sehr beunruhigt über die Zunahme von Störungen der weiblichen und männlichen Reproduktion oder über die steigende Zahl von Brustdrüsen-, Hoden- und

Prostatakrebs, was auch mit endokrinen Umweltschadstoffen in Zusammenhang gebracht wird. Ich bin allerdings erst wirklich aktiv geworden, nachdem ich den Bericht des BUWAL «Stoffe mit endokriner Wirkung in der Umwelt» gelesen hatte, an dem auch die EAWAG beteiligt war. Das ist ein Statusbericht, aus dem vor allem hervorgeht wieviel man nicht weiss. Ich war erschrocken, dass die Schweiz bisher nur etwa 500 000 Franken in 5 Jahren für die Erforschung dieser ganz wichtigen Fragen ausgegeben hat. Darum habe ich 1999 die erste Interpellation eingereicht, und nachdem der Bundesrat im Frühjahr 2000 noch keine überzeugenden Massnahmen eingeleitet hatte, habe

ich noch einmal nachgehakt. Zudem war zwischenzeitlich der Bericht der OECD erschienen, in dem aufgezeigt wird, dass der Verlust von Tier- und Pflanzenarten in der Schweiz stärker ist als in anderen Ländern, und dass dies neben anderen Gründen auch mit der Verschmutzung der Gewässer zu tun haben könnte. 45 von 54 Fischarten sind in der Schweiz gefährdet. Das ist eine schockierende Zahl!

**Sind Sie mit dem Ausgang Ihrer Interpellationen zufrieden?**

Ja, da bin ich vorerst glücklich. Der Bundesrat hat nach meinem nochmaligen Nachfragen das nationale Forschungsprogramm «Hormonaktive Stoffe in der Umwelt – Bedeutung für Menschen und Tiere» beschlossen. Damit stellt der Bund in den nächsten 5 Jahren 15 Millionen Franken für Forschung bereit. In der Schweiz gibt es auf diesem Gebiet sehr gute Forscherinnen und Forscher, die jetzt mit diesem Geld in der Lage sind, wichtige Grundlagen zu erarbeiten.

**In der Forschung ist also einiges in Gang gekommen. Darüber hinaus, welche konkreten Massnahmen sollte der Staat kurz- bis mittelfristig zur Verminderung des Schadstoffproblems einleiten?**

Wichtige Voraussetzung für Entscheidungen ist die Erstellung eines umfassenden Schadstoff-Emissionsregisters. Darin sollten die Mengen und potenziellen Risiken von Umweltschadstoffen erfasst werden, so wie es für Luftschadstoffe ja bereits geschieht. Wir würden wahrscheinlich wirklich erwachen, wenn wir aufgelistet sehen, wieviel Schadstoffe tatsächlich in die Umwelt und in das Wasser gelangen.

Gleichzeitig müssen viele Stoffe, die bereits im Verkehr sind, neu auf eine mögliche Hormonaktivität überprüft werden, wie dies jetzt beispielsweise bei Sonnenschutzfiltern geschieht. In den Fällen, in denen bereits eindeutig schädigende Wirkungen auf Lebewesen oder die Umwelt nachgewiesen sind, z.B. bei den Nonylphenolen aus Reinigungsmitteln, vertrete ich das consequente gesetzliche Verbot dieser Stoffe.



Fotos: S. Wey, Zürich

«Das Verursacherprinzip, Lenkungsabgaben und eine strengere Haftpflicht müssen eingeführt werden.»

## Der EAWAG-Infotag

### «Risikofaktoren im Wasser – Eintrag, Verhalten und Beurteilung»

findet am Mittwoch, 19. September 2001, an der EAWAG in Dübendorf statt.

Weitere Informationen erhalten Sie unter der Telefonnummer 01-823 53 92 oder im Internet unter [www.eawag.ch/events/infotag](http://www.eawag.ch/events/infotag)



«Wasser ist ein öffentliches und allgemeines Gut.»

Aber es darf nicht nur bei einer nachträglichen Syptombekämpfung bleiben. Hersteller und Vertreiber der Substanzen müssen stärker in die Verantwortung genommen werden. Das Verursacherprinzip, Lenkungsabgaben und eine strengere Haftpflicht müssen eingeführt werden. Dann wäre die Industrie wirklich motiviert und verpflichtet, neue Substanzen umfassend zu testen und beim kleinsten Zweifel, auf eine Ingebrauchnahme der Stoffe zu verzichten.

#### Glauben Sie, dass sich das Verursacherprinzip durchsetzen lässt?

Ja das wird schwer werden, denn die Lobby der produzierenden Industrie ist sehr stark. Gleichzeitig haben viele Anwender von Chemikalien auch kein Interesse an durchgreifenden Massnahmen. Beispielsweise ist unsere Intensivlandwirtschaft ein riesiges

Problem. Pestizide, die in der Landwirtschaft immer noch in grossen Mengen gebraucht werden, gelangen in die Umwelt. Unser Ziel muss sein, von diesen Giften wegzukommen. Deshalb setze ich mich für den Bio-Landbau ein. Die steigende Nachfrage der Konsumentinnen und Konsumenten nach Bio-Produkten ist sicher eine grosse Chance, hier eine grundlegende Wende herbeizuführen. Die Konkurrenzfähigkeit von Bio-Produkten sollte jedoch durch Lenkungsabgaben auf Pestiziden noch gesteigert werden.

#### Das Schadstoffproblem ist ein globales Problem. Welche politischen Ziele sollte die Schweiz auf internationaler Ebene verfolgen?

Die Schweiz muss sich in internationalen Gremien engagieren. Ein dringendes Ziel ist, Schadstoffgrenzwerte auf internationaler Ebene zu vereinbaren. Wir in der Schweiz sind gut dran, wir sind im Wasserschloss von Europa, aber die Länder, die beispielsweise weiter rheinabwärts liegen, haben immer noch grosse Probleme. Obwohl die Schadstoffkonzentrationen im Rhein in den vergangenen Jahren kontinuierlich abgenommen haben, kann noch keine Entwarnung gegeben werden. Deshalb ist die Arbeit der «Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins» so wichtig. Sie führt die verschiedenen Rheinanliegerstaaten am runden Tisch zusammen, wo man gemeinsam nach Lösungen sucht.

Das zweite ganz wichtige Problem liegt in den Ländern des Südens. Viele Menschen haben keinen Zugang zu unbelastetem Trinkwasser. Wir wissen, dass Wasser im 21. Jahrhundert noch knapper und damit zum Konfliktstoff werden wird. Hier sind wir als privilegiertes Land verpflichtet, Know-how weiterzugeben. Dringend wäre beispielsweise die Abwasserreinigung, welche sogar in den grossen Städten völlig fehlt. Wasserspar-Technologien wären für den Bereich der Landwirtschaft nötig, denn etwa zwei Drittel des Wassers in der Landwirtschaft wird vergeudet – es verdunstet –, obwohl sinnvollere Bewässerungssysteme

Abhilfe schaffen könnten. Die Schweizer Forschung ist also auch auf diesem Sektor gefordert.

#### In Ihrem parlamentarischen Vorstoss für eine internationale Wasserkonvention fordern Sie aber auch die Politiker auf, aktiv zu werden. Was sind die Ziele dieser Konvention?

Ich möchte, dass sich der Bundesrat in den zuständigen Gremien, z.B. bei RIO 2002, für eine internationale Wasserkonvention einsetzt. Die Hauptpunkte dieser Konvention sind, dass Wasser als öffentliches und allgemeines Gut wirksam geschützt wird, und dass der Zugang zu sauberem Trinkwasser als Menschenrecht verankert wird. Dieses Menschenrecht zu garantieren, braucht sehr grosse Anstrengungen, besonders weil es weltweit starke Privatisierungstendenzen bei der Wasserversorgung gibt. Das heisst nicht, dass ich gegen eine Zusammenarbeit mit privaten Firmen bin, aber die Aufsicht über die Wasserversorgung muss Aufgabe des Staates bleiben.

#### Zum Abschluss die Frage: Welche Hausaufgaben möchte die Politikerin Ruth Gonseth den Forschenden aufgeben?

Ich bin sehr froh, dass das nationale Forschungsprogramm «Hormonaktive Stoffe in der Umwelt» vom Bund finanziert wird. Dringend ist es jetzt, die fehlenden wissenschaftlichen Grundlagen zu erarbeiten, den Ursachen für Artenschwund, Krebszunahme usw. hartnäckig auf den Grund zu gehen. Ich bin aber auch der Meinung, dass die Wissenschaft dieses Thema verstärkt öffentlich diskutieren muss, damit die Sorglosigkeit im Umgang mit Wasser abnimmt.

Zweitens glaube ich, dass politische Handlungsanweisungen vermehrt auch von WissenschaftlerInnen kommen müssen. Der Wissenstransfer, der ja innerhalb der Forschungsgemeinde durch die wissenschaftlichen Fachzeitschriften sehr gut funktioniert, muss unbedingt auch zwischen den Forschenden und der Politik stattfinden.

Ich danke Ihnen herzlich für das Gespräch.  
Interview: Martina Bauchrowitz



# Publikationen und Bücher

Separata bitte mit dem in der Mitte eingehafteten Talon bestellen.

- 2870 **Von Gunten U., Salhi E.** (2000): Bromat im Trinkwasser – Ein Problem in der Schweiz? Gas, Wasser, Abwasser 80 (10), 705–710.
- 2871 **Zah R., Niederöst M., Uehlinger U.** (2000): Application of photogrammetry in freshwater ecology: analysing the morphology of a high Alpine flood-plain. Internat. Arch. Photogramm. & Remote Sensing 23 (B7), 1739–1746.
- 2872 **Magnuson J.J., Robertson D.M., Benson B.J., Wynne R.H., Livingstone D.M., Arai T., Assel R.A., Barry R.G., Card V., Kuusisto E., Granin N.G., Prowse T.D., Stewart K.M., Vuclin-ski V.S.** (2000): Historical trends in lake and river ice cover in the northern hemisphere. Science 289, 1743–1746.
- 2873 **Boller M., von Gunten U., Pianta R., Solcà L.** (2000): Modelling full scale advanced micropollutant oxidation. In: Chemical water and wastewater treatment VI, Proc. 9<sup>th</sup> Gothenburg Sympos. October 2–4, Istanbul, Turkey (Eds. H. Hahn et al.) Springer Verlag, Berlin, pp. 125–136.
- 2874 **Bundi U., Peter A., Truffer B., Wagner W., Mauch U., Scheidegger A.** (2000): The quality of aquatic ecosystems as an indicator for sustainable water management – country paper of Switzerland. In: Let the fish speak: the quality of aquatic ecosystems as an indicator for sustainable water management (Ed. J.A. van de Kraats). EurAqua technical review No. 4, pp. 205–215.
- 2875 **Bundi U.** (2000): Nachhaltige Wassernutzung in der Schweiz, in Europa und weltweit. Thema Umwelt (Hrsg. PUSCH – Praktischer Umweltschutz Schweiz) H. 1, 22–23.
- 2876 **Holm P.** (2000): Der Fischfangrückgang in den schweizerischen Fließgewässern – Auslöser des Projektes «Fischnetz» und Konsequenzen für die Forschung. In: Festschrift 100 Jahre Sportfischer-Verein (Hrsg. Sportfischer-Verein, Bern), S. 109–113.
- 2877 **Känel B., Bundi U., Peter A.** (2000): Ansätze zur ökomorphologischen Analyse und Verbesserung von Fließgewässer-Systemen. Protokoll der 34. Tagung des Cerc'l'eau der Vereinigung der kantonalen GewässerschutzlimnologInnen und -chemikerInnen, 23. März in Neuchâtel, 7 S.
- 2878 **Biedermann R., Bundi U., Traber H.** (1999): Wege zu einer nachhaltigen Landwirtschaft im Klettgau. Mitt. Naturforsch. Ges. Schaffhausen 44, 21–30.
- 2879 **Bonting C.F.C., Gerards R., Zehnder A.J.B., Kortstee G.J.J.** (1999): Purification and properties of pyrophosphatase of *Acinetobacter johnsonii* 210A and its involvement in the degradation of polyphosphate. Biodegradation 10, 393–398.
- 2880 **Burkhardt-Holm P., Bloesch J.** (2000): Fish as bioindicators for pollutants in the Danube River: an approach. Proc. 33<sup>rd</sup> Internat. Assoc. Danube Res. Conf. Osijek, September 3–9, Croatia. Grafika, Osijek, pp. 375–382.
- 2881 **Jaggy M., Schenker R., Riet R., Schenker F.** (2000): Voruntersuchung einer Schiessanlage – Vorgehen am Beispiel des belasteten Standorts Grosswiyer, Goldau SZ. Schriftenreihe Umwelt-Materialien Nr. 124 (Altlasten/Gefährdungsabschätzung), BUWAL Bern, 49 S.
- 2882 **Krušpán P.R.** (2000): Natürliche und technische Petrogenese von Puzzolanen: Ein Beitrag zur Herstellung mineralischer Sekundärrohstoffe. Diss. ETHZ No. 13 732, Zürich.
- 2883 **Faist M.** (2000): Ressourceneffizienz in der Aktivität Ernähren: Akteurbezogene Stoffflussanalyse. Diss. ETHZ No. 13 884, Zürich.
- 2884 **Kasemir B., Toth F., Masing V.** (2000): Climate policy, venture capital and european integration. J. Common Market Studies 38 (5), 891–903.
- 2885 **Beer J.** (2000): Neutron monitor record in broader historical context. Space Sci. Rev. 93, 107–119.
- 2886 **Beer J.** (2000): Long-term indirect indices of solar variability. Space Sci. Rev. 94, 53–66.
- 2887 **Sigg L., Xue H., Kistler D., Schönenberger R.** (2000): Size fractionation (dissolved, colloidal and particulate) of trace metals in the Thur river, Switzerland. Aquatic Geochemistry 6, 413–434.
- 2888 **Ahel M., Molnar E., Ibric S., Giger W.** (2000): Estrogenic metabolites of alkylphenol polyethoxylates in secondary sewage effluents and rivers. Water Sci. Technol. 42 (7–8), 15–22.
- 2889 **Strauss M., Larmie S.A., Heinss U., Montanero A.** (2000): Treating faecal sludges in ponds. Water Sci. Technol. 42 (10–11), 283–290.
- 2890 **Arscott D.B., Tockner K., Ward J.V.** (2000): Aquatic habitat diversity along the corridor of an alpine floodplain river (fiume Tagliamento, Italy). Arch. Hydrobiol. 149 (4), 679–704.
- 2891 **Donath U., Robinson C.T.** (2001): Ecological characteristics of lake outlets in Alpine environments of the Swiss Alps. Arch. Hydrobiol. 150 (2), 207–225.
- 2892 **Gruber N., Wehrli B., Wüest A.** (2000): The role of biogeochemical cycling for the formation and preservation of varved sediments in Soppensee (Switzerland). J. Paleolimnology 24, 277–291.
- 2893 **Wüest A., Carmack E.** (2000): A priori estimates of mixing and circulation in the hard-to-reach water body of Lake Vostok. Ocean Modelling 2, 29–43.
- 2894 **Pinkernell U., Nowack B., Gallard H., von Gunten U.** (2000): Methods for the photometric determination of reactive bromine and chlorine species with abts. Water Res. 34 (18), 4343–4350.
- 2895 **Looser P.W., Berg M., Fent K., Mühlemann J., Schwarzenbach R.P.** (2000): Phenyl- and butyltin analysis in small biological samples by cold methanolic digestion and GC/MS. Anal. Chemistry 72 (12), 2436–2441.
- 2896 **Uehlinger U.** (2000): Resistance and resilience of ecosystem metabolism in a flood-prone river system. Freshwater Biol. 45, 319–332.
- 2897 **Landini P., Volkert M.R.** (2000): Regulatory responses of the adaptive response to alkylation damage: a simple regulon with complex regulatory features. J. Bacteriol. 182 (23), 6543–6549.
- 2898 **Volkland H.-P., Harms H., Müller B., Repphun G., Wanner O., Zehnder A.J.B.** (2000): Bacterial phosphating of mild (unalloyed) steel. Appl. Environ. Microbiol. 66 (10), 4389–4395.
- 2899 **Hoehn E., Johnson C.A., Huggenberger P., Amirbahman A., Peter A., Zweifel H.R.** (2000): Investigative strategies and risk assessment of old unlined municipal solid waste landfills. Waste Managem. Res. 18, 577–589.
- 2900 **Kasemir B., Dahinden U., Swartlin A.G., Schüle R., Tabara D., Jaeger C.C.** (2000): Citizens' perspectives on climate change and energy use. Global Environ. Change 10, 169–184.
- 2901 **Zobrist J., Dowdle P.F., Davis J.A., Orem-land R.S.** (2000): Mobilization of arsenite by dissimilatory reduction of adsorbed arsenate. Environ. Sci. Technol. 34 (22), 4747–4753.
- 2902 **Looser P.W., Fent K., Berg M., Goudsmit G.-H., Schwarzenbach R.P.** (2000): Uptake and elimination of triorganotin compounds by larval midge *Chironomus riparius* in the absence and presence of aldrich humic acid. Environ. Sci. Technol. 34 (24), 5165–5171.
- 2903 **Ingallinella A.M., Sanguinetti G., Fernandez R.G., Strauss M., Montanero A.** (2000): Cotreatment of sewage and septage in stabilization ponds. International Conference on Waste Stabilisation Ponds, Cali, Colombia, October.
- 2904 **Montanero A., Strauss M.** (2000): Faecal sludge management – strategic aspects and treat-

ment options. International Workshop on Biosolids Management and Utilization at Nanjing and to the Forum on Biosolids Management and Utilization at Hongkong, 14 pp.

2905 **Montangero A., Strauss M.** (2000): When septic tanks are full – challenges in faecal sludge management and treatment. AIDIS Conference, Mendoza, Argentina, 14 pp.

2906 **Strauss M., Heinss U., Montangero A.** (2000): On-site sanitation: when the pits are full – planning for resource protection in faecal sludge management. In: Water, sanitation and health – resolving conflicts between drinking-water demands and pressures from society's wastes (Eds. I. Chorus et al.) Schriftenreihe des Vereins Wasser-, Boden- und Lufthygiene 105, IWA Publishing House and WHO Water Series pp. 353–360.

2907 **Montangero A., Strauss M., Dembélé A.** (2000): Gestion des boues de vidange: Parent pauvre de l'assainissement et défi à relever. 12e conférence des centres du réseau international de formation à la gestion de l'eau et des déchets (RIF/ITN) d'Afrique, Ouagadougou, Burkina Faso, 12 pp.

2908 **Goss K.-U., Schwarzenbach R.P.** (2001): Linear free energy relationships used to evaluate equilibrium partitioning of organic compounds. Environ. Sci. Technol. 35 (1), 1–9.

2909 **Wick L.Y., Colangelo T., Harms H.** (2001) Kinetic of mass transfer-limited bacterial growth and solid PAHs. Environ. Sci. Technol. 35 (2), 354–361.

2910 **Wagner G., Masarik J., Beer J., Baumgartner S., Imboden D., Kubik P.W., Synal H.-A., Suter M.** (2000): Reconstruction of the geomagnetic field between 20 and 60 kyr BP from cosmogenic radionuclides in the GRIP ice core. Nuclear Instruments and Methods in Physics Res. B 172, 597–606.

2911 **Schweigert N., Hunziker R.W., Escher B.I., Eggen R.I.L.** (2001): Acute toxicity of (chloro-) catechols and (chloro-)catechol-copper combinations in *Escherichia coli* corresponds to their membrane toxicity *in vitro*. Environ. Toxicol. Chem. 20 (2), 239–247.

2912 **Eichler A., Schwikowski M., Gäggeler H.W., Furrer V., Synal H.-A., Beer J., Saurer M., Funk M.** (2000): Glaciochemical dating of an ice core from upper Grenzgletscher (4200 m a.s.l.). J. Glaciology 46 (154), 507–516.

2913 **Beer J.** (2000) Solar activity: long-term records. In: Encyclopedia of astronomy and astrophysics (Eds. O. Sol et al.) Nature Publishing Group, Vol. 3, pp. 2475–2479.

2914 **Wüest A.** (2000): Archaisches Leben im verborgenen Extrem? Anspruchsvolle Erkundung eines einzigartigen Ökosystems. Neue Zürcher Zeitung, Nr. 261, 8. November.

2915 **Wedekind C., Müller R., Steffen A., Eggler R.** (2001): A low-cost method of rearing multiple batches of fish. Aquaculture 192, 31–37.

2916 **Yang H., Zehnder A.J.B.** (2001): China's regional water scarcity and implications for grain supply and trade. Environ. Planning A 33, 79–92.

2917 **Malard F., Tockner K., Ward J.V.** (2000): Physico-chemical heterogeneity in a glacial riverscape. Landscape Ecology 15, 679–695.

2918 **Pianta R., Boller M., Urfer D., Chappaz A., Gmünder A.** (2000): Costs of conventional vs. membrane treatment for karstic spring water. Desalination 131, 245–255.

2919 **Bucheli-Witschel M., Egli T.** (2001): Environmental fate and microbial degradation of aminopolycarboxylic acids. FEMS Microbiol. Rev. 25, 69–106.

2920 **Goudsmit G.-H., Lemcke G., Livingstone D.M., Lotter A.F., Müller B., Sturm M.** (2000): Hagelseewli: a fascinating high mountain lake – suitable for palaeoclimate studies? Verh. Internat. Verein. Limnol. 27, 1013–1022.

2921 **Emmenegger L., Schönenberger R., Sigg L., Sulzberger B.** (2001): Light-induced redox cycling of iron in circumneutral lakes. Limnol. Oceanogr. 46 (1), 49–61.

2922 **Muscheler R., Beer J., Wagner G., Finkel R.C.** (2000): Changes in deep-water formation during the younger dryas event inferred from <sup>10</sup>Be and <sup>14</sup>C records. Nature 408, 567–570.

2923 **Bernet D., Schmidt H., Wahli T., Burkhardt-Holm P.** (2001): Effluent from a sewage treatment works causes changes in serum chemistry of brown trout (*Salmo trutta* L.). Ecotoxicol. Environ. Safety 48 B, 140–147.

2924 **Durner R., Zinn M., Withold B., Egli T.** (2001): Accumulation of poly(R)-2-hydroxyalkanoates in *Pseudomonas oleovorans* during growth in batch and chemostat culture with different carbon sources. Biotechnol. Bioeng. 72 (3), 278–288.

2925 **Xue H.B., Jansen S., Prasch A., Sigg L.** (2001): Nickel speciation and complexation kinetics in freshwater by ligand exchange and DPCSV. Environ. Sci. Technol. 35 (3), 539–546.

2926 **Zehnder A.J.B.** (2001): 21<sup>st</sup> century, a challenge for microbes, engineers, and environmental scientists. The Internat. Symposium of the COE, University of Tokyo, February 5–7.

2927 **Kipfer R., Peeters F.** (2000): Some speculations on the possibility of changes in deep-water renewal in Lake Baikal and their consequences. In: Lake Baikal, (Ed. K. Minoura) Elsevier, Amsterdam, pp. 273–280.

2928 **Muscheler R.** (2001): Letzte Kaltphase mit reduzierter Ozeanströmung. Neue Zürcher Zeitung, Nr. 1, 3. Januar.

2929 **Burkhardt-Holm P., Studer C.** (2000): Hormonaktive Stoffe im Abwasser – Sind Fische und andere wasserlebende Tiere betroffen? Gas, Wasser, Abwasser 80, 504–509.

2930 **Gächter R.** (2000): Zehn Jahre Seenbelüftung. Ein Erfahrungsbericht. Gewässerökologie Norddeutschlands 4, 158–165.

2931 **Pimenov N.V., Rusanov I.I., Yusupov S.K., Fridrich J., Lein A.Y., Wehrli B., Ivanov M.V.** (2000): Microbial processes at the aerobic-anaerobic interface in the deep-water zone of the Black Sea. Microbiology 69 (4), 436–448.

2932 **Ivanov M.V., Lein A.Y., Miller Y.M., Yusupov S.K., Pimenov N.V., Wehrli B., Rusanov I.I., Zehnder A.J.B.** (2000): The effect of microorganisms and seasonal factors on the isotopic composition of particulate organic carbon from the Black Sea. Microbiology 69 (4), 449–459.

2933 **Balmer H., Hoehn E., Boller M.** (2001): Zuströmbereiche für Grundwassererfassungen – Konzeptionelle Überlegungen zu Zweck und Abgrenzung. Gas, Wasser, Abwasser 81, 21–28.

2934 **Brancelj A., Sisko M., Lami A., Appleby P., Livingstone D.M., Rejec-Brancelj I., Ogrin D.** (2000): Changes in the trophic level of an Alpine lake, Jezero v. Ledvici (NW Slovenia), induced by earthquakes and climate change. J. Limnol. 59 (Suppl. 1), 29–42.

2935 **Lotter A.F., Hofmann W., Kamenik C., Lami A., Ohlendorf C., Sturm M., van der Knapp W.O., van Leeuwen J.F.N.** (2000): Sedimentological and biostratigraphical analyses of short sediment cores from Hagelseewli (2339 m a.s.l.) in the Swiss Alps. J. Limnol. 59 (Suppl. 1), 53–64.

2936 **Ohlendorf C., Bigler C., Goudsmit G.-H., Lemcke G., Livingstone D.M., Lotter A.F., Müller B., Sturm M.** (2000): Causes and effects of long periods of ice cover on a remote high Alpine lake. J. Limnol. 59 (Suppl. 1), 65–80.

2937 **Ventura M., Camerero L., Buchaca T., Bartumeus F., Livingstone D.M., Catalan J.** (2000): The main features of seasonal variability in the external forcing and dynamics of a deep mountain lake (Redó, Pyrenees). J. Limnol. 59 (Suppl. 1), 97–108.

2938 **Burgherr P.** (2000): Spatio-temporal community patterns of lotic zoobenthos across habitat gradients in an Alpine glacial stream ecosystem. Diss. ETHZ Nr. 13 829, Zürich.

2939 **Weirich D.** (2000): Influence of organic ligands on the adsorption of copper, cadmium, and nickel on goethite. Diss. ETHZ Nr. 13 917, Zürich.

2940 **Zah R.** (2000): Patterns, pathways, and trophic transfer of organic matter in a glacial stream ecosystem in the Alps. Diss. ETHZ Nr. 13 998, Zürich.

2941 **Burgherr P.** (2000): Struktur der Wirbellosenfauna an der Flusssohle eines voralpinen Fließgewässers (Necker SG). Ber. St.Gall. Naturwiss. Ges. 89, 137–154.

2942 **Enz C.A., Schäffer E., Müller R.** (2000): Growth and survival of Lake Hallwil whitefish (*Coregonus* sp.) larvae reared on dry and live food. Arch. Hydrobiol. 148 (4), 499–516.

2943 **Livingstone D.M., Hajdas I.** (2001): Climatically relevant periodicities in the thicknesses of biogenic carbonate varves in Soppensee, Switzerland (9740–6870 Calendar yr BP). J. Paleolimnol. 25, 17–24.

2944 **Mattle N., Kinzelbach W., Beyerle U., Huggenberger P., Hoosli H.H.** (2001): Exploring an aquifer system by integrating hydraulic, hydrogeologic and environmental tracer data in a three-dimensional hydrodynamic transport model. J. Hydrol. 242, 183–196.

2945 **Johnson C.A., Schaap M.G., Abbaspour K.C.** (2001): Model comparison of flow through a municipal solid waste incinerator ash landfill. J. Hydrol. 243, 55–72.

2946 **Tockner K., Malard F., Ward J.V.** (2000): An extension of the flood pulse concept. Hydrol. Process. 14, 2861–2883.

2947 **Gurnell A.M., Petts G.E., Hannah D.M., Smith B.P.G., Edwards P.J., Kollmann J., Ward J.V., Tockner K.** (2001): Riparian vegetation and

- island formation along the gravel-bed Fiume Tagliamento, Italy. *Earth Surf. Process. Landforms* 26, 31–62.
- 2948 **Genoni G.P., Behra R., Montague C.L., Güttinger H., Ternay-Aegerter R.** (2001): Complex dynamics of adaptation in a nonaxenic *Microcystis* culture – 1. Effects of dinitrophenol on population growth. *Ecotoxicol. Environ. Safety* 48, 235–240.
- 2949 **Montague C.L., Behra R., Bosma T.N.P., Genoni G.P., Güttinger H.** (2001): Complex dynamics of adaptation in a nonaxenic *Microcystis* culture – 2. Computer simulation of dinitrophenol effects. *Ecotoxicol. Environ. Safety* 48, 241–254.
- 2950 **Wagner G., Livingstone D.M., Masarik J., Muscheler R., Beer J.** (2001): Some results relevant to the discussion of a possible link between cosmic rays and the earth's climate. *J. Geophys. Res.* 106 (D4), 3381–3387.
- 2951 **Beer J.** (2000): Polar ice as an archive for solar cycles and the terrestrial climate. Proc. 1<sup>st</sup> Solar and Space Weather Euroconference, Santa Cruz de Tenerife, Tenerife, Spain.
- 2952 **Beardall J., Berman T., Heraud P., Kadiri M.O., Light B.R., Patterson G., Roberts S., Sulzberger B., Sahan E., Uehlinger U., Wood B.** (2001): A comparison of methods for detection of phosphate limitation in microalgae. *Aquatic Sci.* 63, 107–121.
- 2953 **Kominkova D., Kuehn K.A., Büsing N., Steiner D., Gessner M.O.** (2000): Microbial biomass, growth, and respiration associated with submerged litter of *Phragmites australis* decomposing in a littoral reed stand of a large lake. *Aquatic Microb. Ecol.* 22, 271–282.
- 2954 **Eggen R.I.L.** (2001): Moderne biologische Analyse. *Gas, Wasser, Abwasser* 81 (3), 167–171.
- 2955 **Soldo D.** (2000): Tolerance analyses in algal communities and populations exposed to pollutants. Diss. ETHZ No. 13 768, Zürich.
- 2956 **Gerecke A.C.** (2001): Phenylurea herbicides in the aquatic environment – sources and elimination processes. Diss. ETHZ No. 14 111, Zürich.
- 2957 **Lendenmann U., Senn H., Snozzi M., Egli T.** (2000): Dynamics of mixed substrate growth of *Escherichia coli* in batch culture: the transition between simultaneous and sequential utilisation of carbon substrates. *Acta Universitatis Carolinae Environmentalia* 14, 21–30.
- 2958 **Klein B., Tockner K.** (2000): Biodiversity in springbrooks of a glacial flood plain (Val Roseg, Switzerland). *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 27, 704–710.
- 2959 **Robinson C.T., Gessner M.O.** (2000): Leaf breakdown in an Alpine spring brook. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 27, 744–747.
- 2960 **Frutiger A., Niederhauser D.** (2000): Effects of water abstraction on new-winged midges (Diptera: Blephariceridae). *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 27, 942–946.
- 2961 **Reichert P., Borchardt D., Henze M., Rauch W., Shanahan P., Somlyódy L., Vanrolleghem P.** (2001): River water quality model no. 1 (RWQM1): II. Biochemical process equations. *Water Sci. Technol.* 43 (5), 11–30.
- 2962 **Jacquinot P., Müller B., Wehrli B., Hauser P.C.** (2001): Determination of methane and other small hydrocarbons with a platinum-nafion electrode by stripping voltammetry. *Analytica Chimica Acta* 432, 1–10.
- 2963 **Oellers S., Singer H. P., Fässler P., Müller S.R.** (2001): Simultaneous quantification of neutral and acidic pharmaceuticals and pesticides at the low-ng/l level in surface and waste water. *J. Chromatogr. A* 911, 225–234.
- 2964 **Weyhenmeyer G.A., Bloesch J.** (2001): The pattern of particle flux variability in Swedish and Swiss lakes. *Sci. Total Environ.* 266, 69–78.
- 2965 **Schweigert N., Zehnder A.J.B., Eggen R.I.L.** (2001): Chemical properties of catechols and their molecular modes of toxic action in cells, from microorganisms to mammals. *Environ. Microbiol.* 3 (2), 81–91.
- 2966 **Egli K., Fanger U., Alvarez P.J.J., Siegrist H.-R., van der Meer J.R., Zehnder A.J.B.** (2001): Enrichment and characterization of an anammox bacterium from a rotating biological contactor treating ammonium-rich leachate. *Arch. Microbiol.* 175, 198–207.
- 2967 **Andren A.W., Mackay D., DePinto J.V., Fox K., Thibodeaux L.J., McLachlan M., Haderlein S.** (2000): Inter-media partitioning and transport. In: Evaluation of persistence and long-range transport of organic chemicals in the environment (Eds. G. Klecka et al.) *Soc. Environ. Toxicol. Chem. (SETAC)*, pp. 131–168.
- 2968 **Royer T.V., Robinson C.T., Minshall G.W.** (2001): Development of macroinvertebrate-based index for bioassessment of Idaho Rivers. *Environ. Managem.* 27 (4), 627–636.
- 2969 **Larsen T.A., Boller M.A.** (2001): Perspectives of nutrient recovery in DESAR concepts. In: Decentralised sanitation and reuse: concepts, systems and implementation (Eds. P. Lens et al.). IWA Publishing, London, pp. 387–410.
- 2970 **Bosma T.N.P., Harms H., Zehnder A.J.B.** (2001): Biodegradation of xenobiotics in environment and technosphere. In: The handbook of environmental chemistry, Vol. 2, Part K, Biodegradation and persistence, (Ed. B. Beek) Springer-Verlag, Berlin.
- 2971 **Canonica S., Freiburghaus M.** (2001): Electron-rich phenols for probing the photochemical reactivity of freshwaters. *Environ. Sci. Technol.* 35 (4), 690–695.
- 2972 **Larsen T., Alder A., Eggen R., Maurer M., Muncke J., Peters I.** (2001): Testlauf im Kraftwerk 1. *Magazin UniZürich* 1/01 – *Bull. ETHZ* Nr. 281, 47–49.
- 2973 **Alder A.C., Giger W., Reiser R., Schaffner C., Ahel M., Albrecht A.** (2001): Detergentien-chemikalien in Seesedimenten. In: *Moderne Wasch- und Reinigungsmittel – Umweltwirkungen und Entwicklungstendenzen. Münchner Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flussbiologie, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München, Band 54, 289–301.*
- 2974 **Larsen T.A., Udert K.M.** (1999): Urinseparierung – ein Konzept zur Schliessung der Nährstoffkreisläufe. *Wasser & Boden* 51 (11), 6–9.
- 2975 **Tillman D.** (2000): Entscheidungsabläufe in der Wasserversorgung. 4. Lippuner Seminar in Vaduz FL: Fachtagung Wasser 2000 «Wasserverteilung». Verlag Lippuner, Bad Ragaz, S. 21–24.
- 2976 **Boller M.** (2000): Nutzen der Netzwerkanalyse für die Qualitätssicherung in der Wasserversorgung. 4. Lippuner Seminar in Vaduz FL: Fachtagung Wasser 2000 «Wasserverteilung». Verlag Lippuner, Bad Ragaz, S. 25–31.
- 2977 **Schmidt T.C., Duong H.-A., Berg M., Haderlein S.B.** (2001): Analysis of fuel oxygenates in the environment. *Analyst* 126, 405–413.
- 2978 **Larsen T.A.** (1999): Nährstoffkreisläufe in der Siedlungswasserwirtschaft. *Schweiz. Ingenieur & Architekt* 19, 394–392.
- 2979 **Zehnder A.J.B.** (2001): Sind wir zur Nachhaltigkeit bereit? *Gaia* 10 (1), 25–26.
- 2980 **Jung D.K.J., Klaus T., Fent K.** (2001): Cytochrome P450 induction by nitrated polycyclic aromatic hydrocarbons, azaarenes, and binary mixtures in fish hepatoma cell line PLHC-1. *Environ. Toxicol. Chem.* 20 (1), 149–159.
- 2981 **Boller M.** (2001): Belastung des Regenwassers mit Schadstoffen und neue technische Reinigungsverfahren mit Adsorbentien. VSA-Hauptmitgliederversammlung 30. März, Entsorgung des Regenwassers, 1–15.
- 2982 **Steingruber S.M.** (2001): Nutrient transformations in a wetland pond. Diss. ETHZ No. 13 939, Zürich
- 2983 **Rinke K., Robinson C.T., Uehlinger U.** (2001): A note on abiotic factors that constrain periphyton growth in Alpine glacier streams. *Internat. Rev. Hydrobiol.* 86 (3), 361–366.
- 2984 **Stemmler K., Glod G., von Gunten U.** (2001): Oxidation of metal-diethylenetriamine-pentaacetate (DTPA)-complexes during drinking water ozonation. *Water Res.* 35 (8), 1877–1886.
- 2985 **von Gunten U., Driedger A., Gallard H., Salhi E.** (2001): By-products formation during drinking water disinfection: a tool to assess disinfection efficiency? *Water Res.* 35 (8), 2095–2099.
- 2986 **Schmidt-Posthaus H., Bernet D., Wahli T., Burkhardt-Holm P.** (2001): Morphological organ alterations and infectious diseases in brown trout *Salmo trutta* and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* exposed to polluted river water. *Diseases Aquat. Org.* 44, 161–170.
- 2987 **Mengis M., Walther U., Bernasconi S.M., Wehrli B.** (2001): Limitations of using  $\delta^{18}\text{O}$  for the source identification of nitrate in agricultural soils. *Environ. Sci. Technol.* 35 (9), 1840–1844.

## Bücher

- Jaggy M., Schenker R., Tietz R., Schenker F.** (2000): Voruntersuchung einer Schiessanlage – Vorgehen am Beispiel des belasteten Standorts Grosswiyer, Goldau SZ. *Schriftenreihe Umwelt-Materialien* Nr. 124 (Altlasten/ Gefährdungsabschätzung), BUWAL Bern, 49 Seiten. [2881]
- Larsen T.A., Gujer W.** (2000): Waste design and source control lead to flexibility in wastewater management. Preprint 1<sup>st</sup> IWA World Water Congress, Paris, Book 5, pp. 93–300.
- Sigg L., Behra P., Stumm W.** (2000): *Chimie des milieux aquatiques*, Dunod, Paris, 3ème éd., 567 p.



## Die EAWAG an der Hannover Messe 2001

Vom 23. bis 28. April präsentierte sich die EAWAG am Gemeinschaftsstand des ETH-Bereichs und der Initiative «Technologiestandort Schweiz» an der Hannover Messe. Ziel war, die EAWAG einem breiten internationalen Publikum vorzustellen und einen Beitrag zum Wissens- und Technologietransfer zu leisten.

In einem sehr ansprechend gestalteten Umfeld hatte die EAWAG die Gelegenheit, ihre Aktivitäten in den Bereichen Forschung, Lehre und Beratung darzustellen. Mittelpunkt des EAWAG-Stands war das Projekt «Kupfer in der Umwelt – neue Filter verhindern die Ausbreitung» von Michele Steiner. Kupfer weist hervorragende Baueigenschaften auf und wird deshalb für Dächer,

Fassadenhüllen und Wasserleitungen verwendet. Via Regenwasser und Klärschlamm gelangt es in Böden und Gewässer und zeigt dort auf verschiedene Organismen eine toxische Wirkung. Um die Verbreitung von Kupfer in der Umwelt zu verhindern, empfiehlt die EAWAG die Verwendung eines neuen Eisenhydroxid-Kalksand-Filters zur Immobilisierung von Kupfer.

Durch den Auftritt der EAWAG an der Hannover Messe konnte die Kupferproblematik und das Filtersystem einer breiten Öffentlichkeit bekannt gemacht werden. Ausserdem wurden eine Reihe interessanter Kontakte geknüpft, wobei auch der Einsatz des neuartigen Filters in anderen Bereichen diskutiert wurde.



## Aquatic Sciences mit neuem Gesicht

Die Zeitschrift *Aquatic Sciences* baut auf eine lange Tradition. Bereits 1920 wurde sie unter dem Namen *Zeitschrift für Hydrologie* von der Hydrobiologischen Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft ins Leben gerufen. Seitdem stellte die EAWAG die meisten Redaktoren.

Im Jahr 2002 wird *Aquatic Sciences* mit neuem Fokus, Format und Editorial Board erscheinen. Anlass für die Neuausrichtung war der Wunsch einer stärkeren internationalen Verbreitung. Entsprechend dem neuen Untertitel – *Research Across Boundaries* – soll künftig vermehrt grenzüberschreitende Forschung publiziert werden, die sich mit aquatischen und angrenzenden Umweltsystemen und deren Beeinflussung durch den Menschen befasst. Forschungsergebnissen zur nachhaltigen Bewirtschaftung natürlicher Gewässer wird ein besonderes Augenmerk gelten.



*Aquatic Sciences – Research Across Boundaries* publiziert neben Originalartikeln auch Übersichtsbeiträge. Darüber hinaus werden Sonderhefte spezifischen aktuellen Themen gewidmet sein. Sie sind herzlich eingeladen, Ihre Manuskripte und Vorschläge für Sonderhefte zur Publikation in *Aquatic Sciences* einzusenden.

Weitere Informationen finden Sie unter:

[http://www.eawag.ch/publications/aquatic\\_sciences/](http://www.eawag.ch/publications/aquatic_sciences/)

## CEAC-Workshop: Nachweis chemischer Problemstoffe

Der diesjährige Sommerworkshop des Kompetenzzentrums für analytische Chemie der ETH Zürich (CEAC = Center of Excellence in Analytical Chemistry) fand am 12. und 13. Juli in der AKADEMIE der EAWAG und EMPA statt. Thema waren «Analytische Trenn- und Nachweismethoden im neuen Jahrtausend». Spezialisten aus den Bereichen Umwelt-, Nahrungsmittel- und Dopinganalyse gaben eine Übersicht über neuere Entwicklungen und aktuelle Anwendungen chemischer und biologischer Verfahren. So ordneten die Fachleute den direkt gekoppelten Verfahren, die

Trenn- und Nachweistechiken miteinander kombinieren (z.B. GC/MS), einen grossen Stellenwert zu. Die vorgestellten Methoden dienen dem Nachweis hochaktueller Problemstoffe. Dazu gehören u.a. persistente organische Schadstoffe, hormonaktive Substanzen, das als Dopingmittel bekannte Peptidhormon Erythropoietin (EPO) sowie genveränderte Organismen und die BSE verursachenden Prionen.

Der Workshop wurde von Walter Giger und Hans-Peter Kohler von der EAWAG sowie Peter Schmid von der EMPA organisiert.

Informationen unter: [www.ceac.ethz.ch](http://www.ceac.ethz.ch)

## PKD – c'est quoi?

«Proliferative kidney disease» – eine Nierenerkrankung macht unseren Fischen zu schaffen und könnte für die Rückgänge der Fänge und die oft beobachtete verschlechterte Fitness der Fische in den Schweizer Flüssen mitverantwortlich sein. Im Rahmen des Projekts «Fischnetz» werden mögliche Zusammenhänge untersucht.

Im Juli lud «Fischnetz» führende internationale Experten zu einem Workshop an die EAWAG in Kastanienbaum ein. An zwei Arbeitstagen wurde durch Referate und Diskussionen der aktuelle Stand des Wissens zusammengetragen und bestehende Wissenslücken identifiziert. Man weiss heute, dass der Zwischenwirt des die Krankheit hervorrufenden Parasiten, ein Moostierchen, verschmutzte, langsam fliessende, warme Gewässer bevorzugt. Dies bildete,

gemeinsam mit Informationen zu schweizspezifischen Gegebenheiten, die Basis für die Entwicklung von Massnahmenempfehlungen. Sie werden in Kürze an die verantwortlichen Stellen weitergegeben, um der Ausbreitung der PKD entgegenzuwirken.



## «Festival des Wissens»

Vom 4. bis 12. Mai fand in der grossen Halle des Zürcher Hauptbahnhofs das «Festival des Wissens» der Zürcher Hochschulen statt. Es war Teil eines von der Stiftung «Science et Cité» an zehn Orten in der Schweiz durchgeführten Anlasses zur Förderung des Dialogs zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit.

Die EAWAG war mit den Projekten «Solare Wasserdesinfektion» (SODIS) und «NoMix-Toilette» am Festival präsent. Sowohl das ungewöhnliche WC, welches der separaten Sammlung von Urin dient, als auch die verblüffend einfache SODIS-Technologie zogen

sehr viele Besucherinnen und Besucher an. Die Möglichkeit, mit den Forschenden in



direkten Kontakt zu kommen und generell etwas über die Aktivitäten der EAWAG zu erfahren, wurde intensiv genutzt. Gross war auch das Interesse am vorgestellten Pilotprojekt «Runder Tisch», einem Gesprächsforum, an dem Forschende der EAWAG und BürgerInnen teilnehmen.

Mit etwa 100 000 BesucherInnen, die durchschnittlich 30 Minuten am Festival verweilten, und einem beachtlichen nationalen Medieninteresse war das erste Zürcher «Festival des Wissens» ein grosser Erfolg.

[www.eawag.ch/events/science\\_et\\_cite/](http://www.eawag.ch/events/science_et_cite/)

## Schweiz und EAWAG setzen internationalen Standard bei Ökostrom-Zertifizierung

Am 27. Juni 2001 diskutierten in Zürich rund 40 Fachleute aus ganz Europa, USA, Kanada und Japan über die Zukunft einer umweltgerechten Wasserkraftnutzung. Dabei lag der Schwerpunkt der «Second International Conference on Hydropower as Green Electricity» auf der Etablierung glaubwürdiger und international vergleichbarer Verfahren zur Ökostrom-Zertifizierung. Übereinstimmend kamen die Delegierten zum Schluss, dass simple Zertifizierungsansätze, wie sie zur Zeit in verschiedenen europäischen Ländern zur Anwendung kommen, auf Dauer nicht tragfähig sind. Da sich diese Methoden auf eine schlichte

Leistungs- oder Altersbegrenzung beziehen, ignorieren sie v.a. lokale und regionale Eingriffe in die Gewässerökosysteme.

Dagegen erwies sich der schweizerische Ansatz mit dem Ökolabel *naturemade star* als wegweisende Alternative, um zwischen wissenschaftlicher Glaubwürdigkeit und praxisorientierter Umsetzung zu vermitteln. Die Zertifizierung der Wasserkraftanlagen für *naturemade star* basiert auf dem von der EAWAG entwickelten *greenhydro*-Verfahren. Das Zertifizierungsverfahren hat sich bereits an mehreren Schweizer Wasserkraftanlagen als praxistauglich erwiesen, was u.a. von einem Vertreter der EWZ (Elektrizitätswerk der Stadt Zürich) dargelegt wurde. Nach Ansicht des Vertreters der «World Commission on Dams» ist der schweizerische Ansatz daher geeignet, die Funktion einer «internationalen Richtlinie zur Ökostrom-

## greenhydro ●●

Umweltgerechte Wasserkraftnutzung nach EAWAG-Verfahren

Zertifizierung von Wasserkraftanlagen» auszuüben. Alle Fachleute waren sich einig, dass das Netzwerk der anwesenden Interessengruppen weiterhin v.a. dazu genutzt werden muss, nun möglichst rasch zu einem international vergleichbaren Labelkonzept bei der Zertifizierung der «grünen» Wasserkraft zu kommen.

Weitere Informationen unter: Bratrich C., Truffer B. (2001): Ökostrom-Zertifizierung für Wasserkraftanlagen – Konzepte, Verfahren, Kriterien. EAWAG Ökostrom Publikationen 6, 1–113.

[www.hydropower.ch](http://www.hydropower.ch), [www.naturemade.org](http://www.naturemade.org)



## 2. Nautentreffen in Gersau

Am 7. und 8. Juli fand auf dem Vierwaldstättersee das 2. Nautentreffen statt. Die Lastschiffe trafen sich in Gersau. André Steffen

und Daniel Steiner vom limnologischen Forschungszentrum in Kastanienbaum präsentierten die EAWAG mit dem Thema «Leben im Wasser» auf der Naue «Unterwalden». Die beiden Techniker leiteten die Gäste mit grossem Engagement durch die Ausstellung und beantworteten kündigt zahllose Fragen. Ein Film und diverse Poster beschrieben die Organisation und die Forschungstätigkeiten der EAWAG. Durch eine Powerpoint-Vorführung erschloss sich den Besucherinnen und Besuchern die Welt des Phyto- und Zooplanktons. Höhepunkt war jedoch der Mikroskopieraum, in dem die grossen und kleinen Gäste das Plankton in

frischen Wasserproben aus dem See unter Stereolupen betrachten konnten. Kaum ein freier Platz war dort zu ergattern. Insgesamt wurden mehr als 3000 Gäste am 2. Nautentreffen gezählt.



### Neue Redaktorin



**Martina Bauchrowitz ist seit März 2001 für die Redaktion der EAWAG news verantwortlich. Fragen oder Anregungen können jederzeit direkt an sie gerichtet werden.**

**E-Mail: [martina.bauchrowitz@eawag.ch](mailto:martina.bauchrowitz@eawag.ch)**