

**Klimainformationen aus polaren Eiskernen**

Jürg Beer und Stephan Baumgartner

**Seesedimente als Umweltarchive  
Was ist natürlich, was vom Menschen verursacht?**

Michael Sturm und André F. Lotter

**Entstehung natürlicher Sedimentarchive**

Jürg Bloesch und Bernhard Wehrli

**Umwandlungen von organischen Verunreinigungen in sauerstofflosen Sedimenten**

Christof Holliger und René P. Schwarzenbach

**Die Rolle der Siedlungsentwässerung bei der Schadstoffanreicherung in Böden**

Markus Boller

**Langzeitverhalten von Deponien – Konsequenzen für die Praxis**

Annette Johnson, Peter Huggenberger und Thomas Lichtensteiger.

**Altlasten: Lösungsansätze aus Sicht der Umweltwissenschaften und des Risk Managements**

Alexander J.B. Zehnder und Hans R. Wasmer

**Forschung/Weiterbildung**

Donauforschung  
Das Neueste vom Forschungsschwerpunkt  
Das neue Nachdiplomstudium hat begonnen  
Klimaveränderung und alpine Regionen  
CLEAR Klimaveränderung und alpine Regionen

**EAWAG-Intern**

Evaluation der EAWAG durch eine internationale Expertengruppe  
Berufung nach Münster  
Otto Jaag Gewässerschutzpreis  
Ökomorphologische Bewertung und Entwicklung von Fließgewässern

**Buchbesprechung**

Taming the Dragon

**EAWAG-Publikationen**

## EAWAG



Die EAWAG news sind das Informationsbulletin der EAWAG

**Herausgeberin**  
Vertrieb und © by: EAWAG, CH-8600 Dübendorf  
Tel.: +41-1-823 55 11  
Fax: +41-1-823 53 75

**Redaktion**  
Diana Hornung, EAWAG

**Copyright**  
Abdruck, auch auszugsweise, ist unter Benachrichtigung der Herausgeberin und der AutorInnen und mit Quellenangabe «Abdruck aus den EAWAG news 38 D, 1995» gestattet

**Erscheinungsweise**  
zweimal jährlich in deutsch, englisch und französisch

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

**Gedruckt**  
auf Umweltschutzpapier

**Abonnemente und Adressänderungen**  
NeuabonnentInnen willkommen! Bitte Bestellatoln auf der letzten Seite beachten.

**Legende zum Titelbild**  
Auf der Einladung zum Infotag stand «Umweltarchive - Ordnung und Chaos». Das Bild zeigt die Luftströmung um ein idealisiertes Gebirge. Dabei treten im Windschatten der «geordneten» Strömungen «chaotische» Wirbel auf (von oben gesehen, siehe Beitrag «Klimaveränderung und alpine Regionen» von Urs Dahinden).  
*Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Christoph Schär, Institut für Atmosphärenphysik, ETH Zürich.*



Stefan Wiry

Lieber Leser und liebe Leserin

Seit ein paar Jahren organisiert die EAWAG im Herbst einen Infotag. Jeweils im Frühjahr setzt ein Prozess ein, der im Sommer an Intensität gewinnt und im September in der gemeinsamen Tagung gipfelt. Wir arbeiten auf unterschiedlichsten Ebenen: Am Anfang existiert eine thematische Idee, darum herum wird ein Netz von Referaten gespannt. Die Inhalte werden bestimmt und in eine logische Abfolge gebracht. Nicht zuletzt werden dann in der anstrengenden Schlussphase die Abstimmung der Themen und ihre Relevanz für die Praxis überprüft. Auch die visuelle Umsetzung des darzubietenden Stoffes gibt oft Anlass zu lebhaften Diskussionen und bietet ein breites Feld für gegenseitige Kritik. Hier steigen die Ansprüche mit der technischen Entwicklung. Und immer wieder taucht die Frage nach dem Sinn des Aufwandes auf.

Dieser spannende Prozess ist nicht immer ganz harmonisch, zwischendurch gibt es Ärger und heisse Köpfe; Toleranz, Energie und persönliches Engagement sind von jedem Einzelnen gefordert. Zu reden gibt immer die Wahl des Titels. Er soll kurz, themagerecht, medienwirksam, «süf-

fig» und ansprechend sein. Nicht immer ist es einfach, wissenschaftliche Seriosität öffentlichkeitswirksam umzusetzen.

Bereits ab Juli herrscht bei der Organisation emsiges Treiben. Hinter den Kulissen wird telefoniert, verhandelt, geschrieben und bestellt, denn was wäre eine Tagung ohne Kaffee und «Gipfeli», ohne Büchertisch und Medienkonferenz. Alles muss funktionieren, nicht zuletzt die labilen Hellraumprojektoren.

Am Tag selber ist die Stimmung vergleichbar einem Galaabend an der Oper – selbst die geübtesten Rednerinnen und Redner sind leicht nervös, und das ist auch gut so. Anspannung, Stimmung und Freude liegen eng beieinander und bilden die beste Voraussetzung, um die fachlichen Botschaften erfolgreich hinüberzubringen.

Der Wissenschaftler und die Wissenschaftlerin sind gefordert, ihre Resultate verständlich aufzubereiten und die eigene Begeisterung nach aussen zu vermitteln. Gelingt dies, wird dadurch die Wirkung der anderen Aktivitäten der Public Relations wesentlich verstärkt, und es entstehen positive Rückkoppelungen: Die Beteiligten erhalten Echo, Anerkennung und Bestätigung für eine Forschungstätigkeit, deren Sinn nicht immer leicht einsehbar ist.

*Theresa Büsser*

Theresa Büsser  
Public Relations EAWAG

Jürg Beer und Stephan Baumgartner

# Klimainformationen aus polaren Eiskernen



Jürg Beer

## Umweltarchive: Ordnung und Chaos

Der Infotag 1994, eine Veranstaltung aus der Reihe Praxisorientierte EAWAG Kurse (PEAK), trug den Titel «Umweltarchive – Ordnung und Chaos; Natürliche und vom Menschen verursachte Ablagerungen als Grundlage für umweltverträgliche Entwicklungen». Dieses Heft enthält die bearbeiteten Referate, die Mitte 1995 auch in Französisch und Englisch erhältlich sein werden.

Seesedimente, die Eismassen der Pole, durch Verwitterung entstandene Böden sowie die in grosser Zahl vom Menschen erschaffenen Abfalldeponien sind die Umweltarchive, die der EAWAG-Infotag vom 20. Sept. 1994 thematisiert hat. Während künstliche Deponien eine chaotische Struktur aufweisen, sind die natürlichen Ablagerungen in zum Teil hohem Masse geordnet. Sie speichern vielfältige Informationen über vergangene Umweltbedingungen und erlauben uns somit einen Einblick in die Erdgeschichte. Die Kenntnis dieser Geschichte lässt uns die Konsequenzen heutiger menschlicher Eingriffe in die Natur abschätzen und Prognosen für die Zukunft ableiten. Beides ist unerlässlich beim Erstellen der künftigen Richtlinien für ein umweltverträgliches Handeln.

«Der Mensch verändert das Klima», heisst es. Aber das Klima hat sich auch früher schon ohne menschliche Einflüsse verändert. Woher wissen wir denn, dass es wirklich so ist? Daten aus natürlichen Archiven helfen, die brennenden Fragen der Klimaforschung zu beantworten.

## Natürliche Klimaänderungen

Das Klima wird sehr stark durch die kurzfristig wohlgeordneten Bewegungen der Erde um ihre eigene Achse, den Tagesgang, sowie um die Sonne, den Jahresgang, bestimmt. Längerfristige Störungen der Erdbahnparameter durch die übrigen Planeten sind ebenfalls noch über Jahrmillionen exakt berechenbar und führen nach der Theorie von Milanković zu Klimaänderungen mit Perioden von ca. 100'000, 40'000 und 20'000 Jahren [1].

Demgegenüber zeigen lokale Wetterentwicklungen ein stark chaotisches Verhalten und sind auch mit den besten Computermodellen nicht auf mehr als ein paar Tage hinaus verlässlich voraussagbar.

## Menschliche Einflüsse

Mit der industriellen Revolution im letzten Jahrhundert hat sich eine für die Natur und den Menschen völlig neuartige Situation ergeben. Während Klimaänderungen bisher als natürliche Prozesse zu betrachten waren, stellt sich nun die Frage, ob durch die immer stärkeren Eingriffe der Menschen in

die Umwelt nicht auch das Klima langfristig beeinflusst wird – mit all den negativen Folgen, die mit jeder abrupten Änderung von Umweltbedingungen verknüpft sind.

Ein typisches Beispiel für wesentliche Eingriffe des Menschen in natürliche Systeme sind Störungen der geochemischen Kreisläufe. So werden durch die intensive Nutzung fossiler Brennstoffe in den letzten Jahrzehnten grosse Mengen von Kohlendioxyd ( $\text{CO}_2$ ) in die Atmosphäre abgegeben, die zum deutlichen globalen Anstieg dieses treibhausaktiven Gases führt, wie die bekannten Messungen auf Mauna Loa zeigen (Fig. 1). Auch werden durch die Menschen immer mehr neue, natürlicherweise nicht vorkommende chemische Verbindungen hergestellt und in Deponien gelagert, deren langfristiges Verhalten in der Umwelt nicht oder nur ungenügend bekannt ist.

## Natürliche versus menschliche Klimaänderungen

Damit stellen sich zwei grundsätzliche Fragen. Führen solche menschliche Tätigkeiten zu Klimaänderungen und

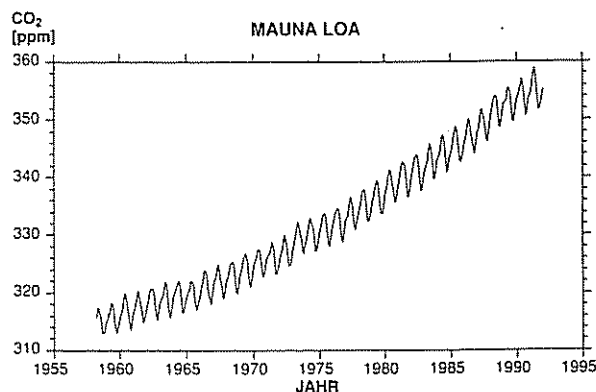


Fig. 1  
Messungen der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre zeigen einen deutlichen Anstieg als Folge der Nutzung fossiler Brennstoffe [2].

falls ja, wie kann man sie von natürlichen Änderungen unterscheiden?

Neben diesen grundsätzlichen gibt es aber auch ganz praktische Fragen. Geht man davon aus, dass sich als Folge menschlicher Aktivitäten das Klima erwärmt (Treibhauseffekt), so muss auch mit einer Zunahme extremer Niederschlagsereignisse und damit verbunden mit vermehrtem Hochwasser, mehr Lawinen und Berggrutschen gerechnet werden. Genaue Prognosen sind allerdings aufgrund der chaotischen Eigenschaften des Klimasystems unmöglich.

Wie kann man feststellen, ob die zur Zeit beobachtete globale Erwärmung anthropogen bedingt ist oder ob es sich lediglich um eine natürliche Schwankung handelt? Ein Ansatzpunkt besteht darin, durch eine Vielzahl von direkten Messungen und der Modellierung der beteiligten physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse das heutige Wettergeschehen möglichst realistisch zu beschreiben und zukünftige Ent-

wicklungen zu simulieren, wobei aber die ausserordentliche Komplexität des Klimasystems das Ganze sehr erschwert.

Ein weiterer komplementärer Ansatzpunkt, der vor allem auch zur Klärung der Frage anthropogener Klimaänderungen einen wesentlichen Beitrag leisten kann, ist die Rekonstruktion des Klimas und seiner Variabilität zu vorindustriellen Zeiten, als der Einfluss des Menschen noch mit Sicherheit vernachlässigbar war.

### Umweltarchive liefern den Schlüssel

Informationen über die Klimageschichte können entweder über direkte und indirekte menschliche Aufzeichnungen oder aus natürlichen Archiven gewonnen werden. Seit die Menschen beständige Schriftzeichen verwendet haben, gibt es vereinzelte Aufzeichnungen über das Wetter; z.B. Ernteerträge, die bis zu einem gewissen Grade Klimaänderungen widerspiegeln. Zusätzlich zu diesen menschlichen Informationen stellt uns die Umwelt auch natürliche Archive zur Verfügung, deren Informationsgehalt wir mit immer empfindlicheren Methoden zunehmend besser zu entschlüsseln gelernt haben.

Ein wichtiges Archiv stellen Seesedimente dar, die kontinuierlich durch absinkende Partikel gebildet werden. Art, Grösse und Zusammensetzung der Partikel, sowie eingelagerte biologische Strukturen reflektieren die Umweltbedingungen, die zur Zeit der Sedimentbildung geherrscht haben (siehe Beitrag Sturm und Lotter).

Auf hohen Gebirgen und in polaren Gebieten, in denen die Temperatur das ganze Jahr hindurch immer unterhalb des Gefrierpunktes liegt, bleibt der Schnee Jahresschicht um Jahresschicht liegen und bildet langsam durch den Druck neuer Schichten das Archiv Eis. Im Eis eingeschlossen sind damit Proben aller festen, flüssigen und sogar gasförmigen Bestandteile der Atmosphäre. Untersuchungen an Gasblasen im Eisbohrkern von Vostok (Antarktis) zeigen, dass zwar der Gehalt der Treib-

hausgase  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  in der Atmosphäre über die letzten 150'000 Jahre geschwankt hat, dass aber bei weitem nie solche hohen Konzentrationen aufgetreten sind, wie wir sie heute messen! (Fig. 2)

Interessanterweise glich während der betrachteten Zeitperiode der Verlauf der Treibhausgaskonzentrationen sehr demjenigen der Temperatur. Die Temperaturkurve wird mithilfe von Messungen des Isotopenverhältnisses  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  im Eis gewonnen. Dieses ändert sich als Folge von temperaturabhängigen Fraktionierungseffekten bei der Kondensation von Wasserdampf. Die hochaufgelösten  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  Messungen am Eiskern aus Summit in Grönland zeigen sehr eindrücklich, wie instabil das Klima während der letzten Eiszeit (vor mehr als 10 Jahrtausenden) war und wie vergleichsweise stabil es seither ist (Fig. 3).

### Die Rolle der Sonne

Weitere Informationen aus dem Eis, die erst dank der Entwicklung der extrem empfindlichen Beschleuniger-Massenspektrometrie-Methode entziffert werden konnten, beziehen wir aus der Sonne. Sie stellt den Motor dar, der das Klimageschehen antreibt. Bereits geringste Änderungen der auf die Erdatmosphäre auftreffenden solaren Strahlungsleistung führten zu entsprechenden Änderungen innerhalb des Klimasystems. Ein Beispiel: Bereits geringfügige Störungen der Erdbahnparameter durch die übrigen Planeten werden allgemein als Ursache für die beobachteten zyklischen Wechsel zwischen Warm- und Eiszeiten betrachtet (Theorie von Milanković).

Seit Satelliten die Erde umkreisen, ist auch klar geworden, dass die von der Sonne abgestrahlte Leistung ebenfalls im Promillbereich schwankt und zwar offensichtlich im Rhythmus der sog. 11-Jahres Sonnenflecken- oder Schwabezyklus. Dieses relativ neue Ergebnis ist von grosser Tragweite, bedeutet es doch nicht nur, dass die Solarkonstante nicht wirklich konstant ist, sondern auch, dass nebst Schwankungen des

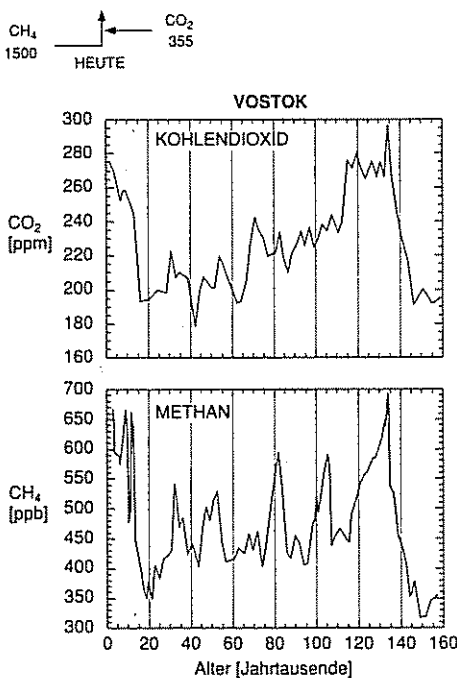


Fig. 2 Die Analyse der im Eiskern von Vostok eingeschlossenen Luftblasen zeigt deutliche Schwankungen der Treibhausgase  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  während der letzten 160'000 Jahre [3,4]. Die heutigen Konzentrationen (355 ppm  $\text{CO}_2$  und 1500 ppb  $\text{CH}_4$ ) wurden aber bei weitem nie erreicht.

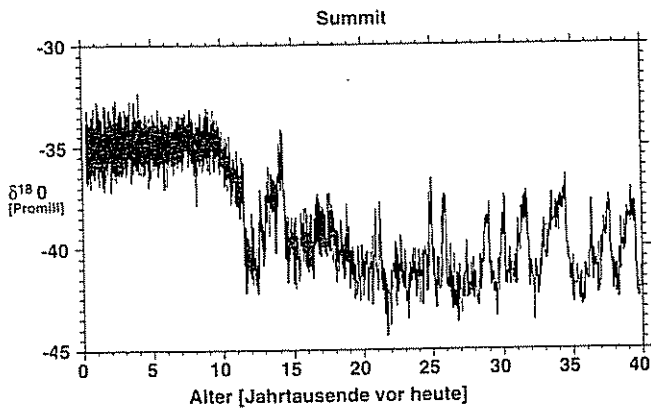


Fig. 3  
Die Änderung des  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  Verhältnisses ( $\delta^{18}\text{O}$ ) in Eis (angegeben in Promille relativ zu einem Standard, welcher das mittlere Verhältnis von Ozeanwasser darstellt) reflektiert die Temperatur (je negativer der  $\delta^{18}\text{O}$ -Wert, desto kälter das Klima). Während die Temperatur in Zentralgrönland zwischen 40'000 und 10'000 Jahren vor heute sprunghafte Änderungen zeigt, scheint sie während der letzten 10'000 Jahre relativ stabil zu sein [5].

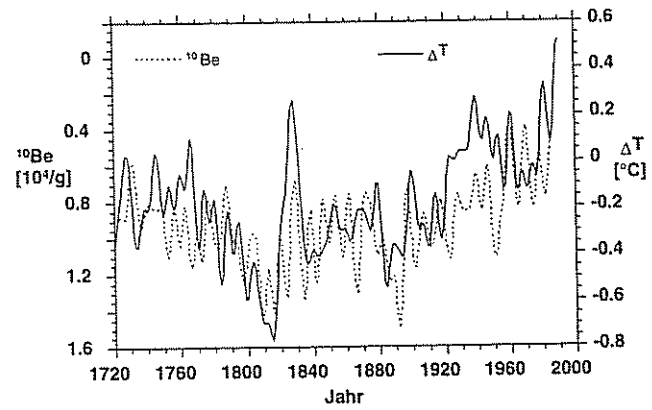


Fig. 4  
Die relativ gute Übereinstimmung zwischen der in grönländischem Eis gemessenen  $^{10}\text{Be}$  Konzentration mit der mittleren nordhemisphärischen Temperatur legt die Vermutung eines Zusammenhangs zwischen Solarkonstante und Klimaänderung nahe [6].

Treibhausgas- und Aerosolgehalts in der Atmosphäre auch Änderungen der Solarkonstante zu Klimaschwankungen führen können.

### Wie konstant ist die Solarkonstante?

Woher aber wissen wir, ob und wie stark sich die Solarkonstante in der Vergangenheit geändert hat? Auch hier enthält das Archiv Eis wieder Informationen, die allerdings nur sehr indirekt sind. Während Zeiten verstärkter Sonnenaktivität, wenn die Sonne etwas «wärmer» scheint, strömt von ihr auch vermehrt Sonnenwind ins All, der das ganze Sonnensystem ausfüllt. Im Sonnenwind «eingefroren» befinden sich magnetische Felder, die sich abschirmend auf die geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung auswirken und damit den kosmischen Strahlungsfluss reduzieren. Dadurch dringen weniger Strahlungsteilchen in die Erdatmosphäre ein, in der sie durch Kernreaktionen Radiosotope wie z.B.  $^{10}\text{Be}$  und  $^{14}\text{C}$  erzeugen.  $^{10}\text{Be}$  lagert sich relativ schnell an atmosphärische Aerosole an und gelangt schliesslich über den Niederschlag (Regen, Schnee) auf den Erdboden, wobei ein Teil davon auch im Eis gespeichert wird. Es kann deshalb angenommen werden, dass während Perioden starker Sonnenaktivität aufgrund der Abschirmwirkung des Sonnenwindes weniger  $^{10}\text{Be}$  produziert wird und die Konzentration im Eis

abnimmt, während ruhige Perioden umgekehrt zu einer Erhöhung der Konzentration führen. Man muss sich bewusst sein, dass auch die atmosphärischen Transport- und Depositionsprozesse zu Änderungen der  $^{10}\text{Be}$  Konzentration im Eis führen können und deshalb eine eindeutige und perfekte Rekonstruktion der Geschichte der Sonnenaktivität nicht ohne weiteres möglich ist. Trotzdem sind die bisherigen Ergebnisse ermutigend.

Geht man davon aus, dass der von Satelliten während der letzten 15 Jahre gemessene Zusammenhang zwischen der Solarkonstanten und der Sonnenaktivität auch in früheren Zeiten gültig war, so erwartet man während Zeiten mit wenig Sonnenaktivität eher kühlere Klimabedingungen. Ein Vergleich der an einem Eisbohrkern aus Grönland gemessenen  $^{10}\text{Be}$ -Konzentrationskurve mit einer aus vielen einzelnen Datenreihen zusammengestellten Durchschnitts-Temperaturkurve für die nördliche Hemisphäre zeigt einen Grad der Übereinstimmung (Fig. 4), der zumindest eine Fortsetzung dieser noch in den Anfängen stekenden Untersuchungen rechtfertigt.

### Fazit, Warnung

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Aufzeichnungen in natürlichen Archiven ganz klar zeigen, dass das Klima sich immer und zeitweise recht dramatisch geändert hat. Sie zeigen

aber auch, dass die Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre heute Werte aufweisen, die weit über denjenigen liegen, die während der letzten ca. 200'000 Jahre beobachtet wurden. Dies und gerade auch die Tatsache, dass wir über die Konsequenzen unseres Handelns noch lange nicht genau Bescheid wissen, sollte uns eine Warnung sein, vorsichtiger mit unserer Umwelt umzugehen.

- [1] Imbrie, J., & Imbrie, K. O. (1986). *Ice Ages: Solving the Mystery*. Harvard University Press.
- [2] Keeling, C. D., Bacastow, R. B., Carter, A. F., Piper, S. C., Whorf, T. P., Heimann, M., Mook, W. G., & Roeloffzen, H. (1989). A Three-Dimensional Model of Atmospheric CO Transport Based on Observed Winds: 1. Analysis of Observational Data. *Geophysical Monograph*, 55, 165–363.
- [3] Barnola, J. M., Raynaud, D., Korotkevich, Y.S., & Lorius, C. (1987). Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature*, 329, 408–414.
- [4] Chappellaz, J., Barnola, J. M., Raynaud, D., Korotkevich, Y. S., & Lorius, C. (1990). Ice-core record of atmospheric methane over the past 160,000 years. *Nature*, 345, 127–131.
- [5] Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dansgaard, W., Fuhrer, K., Gundestrup, N., Hammer, C. U., Iversen, P., Jouzel, J., Stauffer, B., & Steffensen, J. P. (1992). Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core. *Nature*, 359 (6393), 311–313.
- [6] Beer, J., Baumgartner, S., Dittrich-Hannen, B., Hauenstein, J., Kubik, P., Lukaszczuk, C., Mende, W., Stellmacher, R., & Suter, M. (1994). *Solar Variability Traced by Cosmogenic Isotopes*. Boulder: Cambridge University Press.

Michael Sturm und André F. Lotter

# Seesedimente als Umweltarchive

## Was ist natürlich, was vom Menschen verursacht?



Michael Sturm

Nehmen wir an, die Behörden eines Bergkantons müssten sich der Frage nach der Häufigkeit von Extremhochwässern in den vergangenen Jahrzehnten und Jahrhunderten stellen, ohne dass ihnen zur Beantwortung dieser Frage ausreichende, zeitlich weit zurückreichende instrumentelle Messreihen zur Verfügung stünden. Nehmen wir ausserdem an, die Anstösser-Gemeinden eines Sees würden, besorgt über den Zustand ihres Sees, Sanierungsmöglichkeiten diskutieren und müssten deshalb die frühere Seegeschichte kennen; Untersuchungen der früheren Wasserqualität wären aber keine vorhanden. In beiden Fällen könnten die in den Sedimenten dieser Seen archivierten Umweltinformationen Antworten auf die gestellten Fragen liefern.

### Sedimentarchive

Ähnlich wie Eisbohrkerne (vgl. den Beitrag von Beer & Baumgartner) stellen auch Seesedimente geordnete, natürliche Archive vergangener Umweltbedingungen dar. Handelt es sich bei den im Eis gespeicherten Informationen aber hauptsächlich um physikalische Signale der globalen Atmosphäre, so archivieren Sedimente zusätzlich

Informationen einer ganzen Reihe von biologischen, geochemischen und anthropogenen Umweltprozessen. Verschiedene dieser Prozesse, welche die Entstehung von Seesedimenten beeinflussen, sind in Fig. 1 schematisch dargestellt.

### Allochthone Feststoffe

Über Flüsse und Bäche gelangt der weitaus grösste Anteil der *allochthonen* (see-extern) gebildeten Feststoffe in einen See. Ihre Ablagerung im See erfolgt in charakteristischen Lagen, welche aussergewöhnliche Ereignisse (Hochwässer, Murgänge etc.) oder jahreszeitliche Schwankungen belegen; in den Mündungsbereichen der Zuflüsse kommt es zur Bildung von Schuttfächern und Delten. Zusätzlich gelangen allochthone Frachten, partikulär oder gelöst, aber auch über die Atmosphäre durch Wind-, Regen- und Schnee-Verfrachtung (Pollen, vulkanische Aschen, Aerosole etc.), über diffusen Eintrag (Grundwasser, Bodenentwässerung) und schliesslich über künstliche Einleitungen, z.B. aus Kläranlagen, in die Seen.

### Autochthone Feststoffe

Der Grossteil der *autochthonen*, also seeintern gebildeten Partikel entsteht

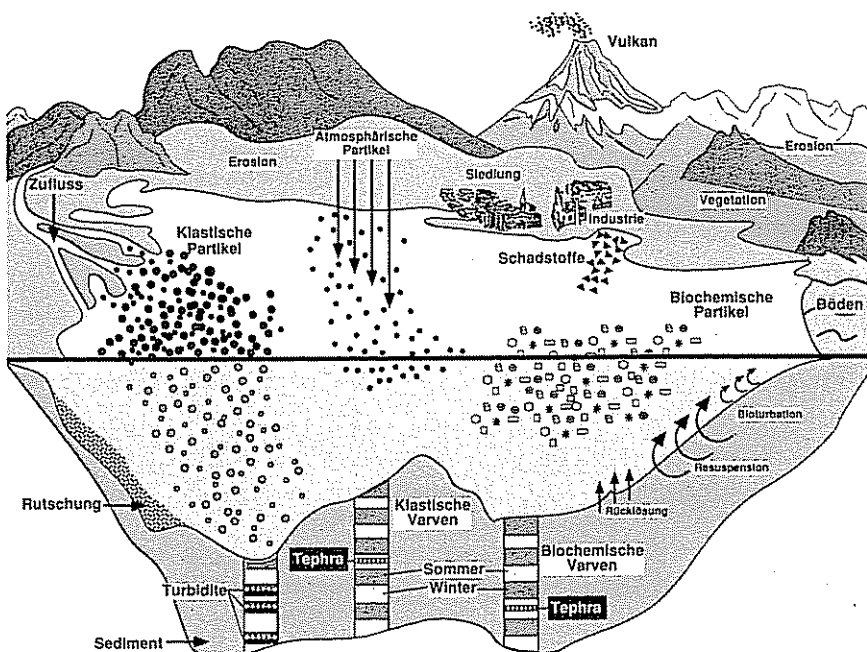


Fig. 1 Die Beeinflussung der Sedimentbildung in einem Seebecken durch externe und interne Umweltfaktoren.

im Frühling und Sommer bei der Algenproduktion im Epilimnion eines Sees. Zusätzlich können aber auch biogeochemisch ablaufende Rücklösungs-, bzw. Ausfällungsprozesse, oder physikalische Umlagerungsprozesse (Rutschungen, Resuspension, Bioturbation) die Sedimentbildung in einem See beeinflussen (vgl. dazu den Beitrag von Bloesch & Wehrli).

## Die Bildung von Jahreslagen (Varven)

Sedimentbildungsprozesse, die sich jährlich oder saisonal wiederholen, führen unter bestimmten Bedingungen zur Ablagerung regelmässig geschichteter, zyklischer, hell/dunkel gefärbter Sedimentabfolgen (siehe hierzu Fig. 5). Solche Sedimentstrukturen werden mit einem aus dem Schwedischen stammenden Wort als *Varven* bezeichnet [1]. Sie repräsentieren immer die Dauer eines Jahres und lassen sich daher ausserordentlich gut für eine genaue Datierung von Sedimenten verwenden. Der Aufbau der zwei wichtigsten Varventypen, die in Seen auftreten können, ist in Fig. 2 schematisch dargestellt.

### Biochemische Varven

*Biochemische Varven* treten in eutrophen Seen und unter anaeroben (sauerstoff-freien) Bedingungen auf. Sie werden durch die jahreszeitliche Abfolge von Partikeln charakterisiert, die ihre Bildung biologischen und chemischen Prozessen verdanken [2, 3, 4]. Die Frühjahrs-/Sommerlagen werden durch biogen ausgefällte Kalzite ( $\text{CaCO}_3$ ) hell gefärbt. Gleichzeitig mit diesen bis 40 mm grossen Kalzit-Kristallen werden zentrische Diatomeen (kreisförmige Kieselalgen) abgelagert. In den Monaten August und September kommt es dann zur Sedimentation der für diese Monate typischen pennaten (länglichen) Diatomeen und kugelförmigen Chrysophyceen-Zysten. Die Ablagerungen der Herbst- und Wintermonate werden durch nicht abgebautes organisches Material charakterisiert, das für die Dunkelfärbung der «Win-

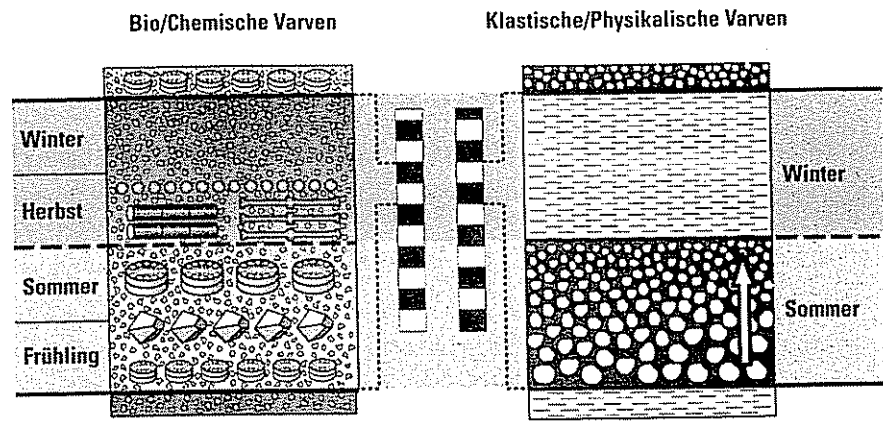


Fig. 2

Schematischer Aufbau von biochemischen bzw. klastisch-physikalischen Varven (Jahreslagen). Bildung und Erhaltung biochemischer Varven erfolgt in eutrophierten Seen unter anoxischen Bedingungen. Klastisch-physikalische Varven entstehen in oligotrophen, zufluss-kontrollierten Seen (weitere Erklärungen vgl. Text).

- Calcit-Kristalle
- zentrische Kieselalgen
- pennate Kieselalgen
- Goldalgen-Zysten

ter»-Lage der biochemischen Varven verantwortlich ist.

### Klastisch-physikalische Varven

*Klastisch-physikalische Varven* treten ausschliesslich in Zufluss-dominierten, oligotrophen Seebecken auf und verdanken ihre Entstehung dem jahreszeitlichen Wechsel der Feststoff-Zufuhr [5]. Die «Sommer»-Lagen sind dunkel und bestehen aus Partikeln der Frühjahrs-Schneeschnmelzen und Sommer-Hochwässer, welche gleichzeitig vermehrt organisches Material in Form von Holz- und Blattresten in den See transportieren. Von unten nach oben (also vom Frühjahr zum Spätsommer hin) ist in der dunklen «Sommer»-Lage oft eine Korngrössengradierung von grob zu fein feststellbar. Die helle, textuell homogene «Winter»-Lage enthält hauptsächlich feine Tonpartikel, praktisch kein organisches Material und repräsentiert damit die nahezu sedimentationsfreie Zeit des Jahres.

### Paläolimnologie

Sedimentologische Signale von Seesedimenten, wie sie Varven, Rutschungsablagerungen und Deltasedimente darstellen, lassen sich mit den biologischen (Pollen, Diatomeen) chemischen (Nährstoffe, Haupt- und Spurenelemente) und physikalischen (Isotope) Parametern von Sedimentarchiven ergänzen und in Zusammenhang bringen. Die integrale Auswertung aller dieser «paläolimnologischen», also aus der «alten Seegeschichte» stammenden

Informationen, gibt Auskunft über den Ablauf natürlicher oder vom Menschen verursachter Prozesse, über die in der Vergangenheit abgelaufenen Umweltveränderungen und über das zeitliche und räumliche Ausmass solcher Veränderungen. An je einem Beispiel aus dem Urnersee und aus dem Soppensee wird dies im Folgenden beispielhaft erläutert.

### Der Urnersee

Mit seinem steilen Relief, den grossen Zuflüssen und seinen 200 m Wassertiefe gehört der Urnersee zu denjenigen alpinen Seen, deren Sedimentation hauptsächlich durch physikalische Prozesse bestimmt wird. Entsprechend seiner Lage in einem tektonisch aktiven Gebiet mit glazial angelegten Hangneigungen und intensiver Erosionstätigkeit kommt es im Einzugsgebiet und auch im Seebereich selbst immer wieder zu katastrophalen Ereignissen wie Erdbeben, Hochwässern oder Felsstürzen. Solche natürliche Ereignisse haben auch in den Sedimenten des Urnersees charakteristische Spuren hinterlassen. In Sedimentkernen, die mit einer Länge bis zu 9 m einen Zeitbereich von ungefähr 1000 Jahren umfassen, konnten bisher die Auswirkungen von etwa 20 unterschiedlichen Umwelt-Ereignissen nachgewiesen werden [6]. Dazu gehören die lokalen Felsstürze vom Axen (14./15.1801), von der Schwandenflue (8.12.1769) oder die lokalen Ablagerungen des Aushubmaterials der Strassen- und Eisenbautunnel zwi-

schen Brunnen und Sisikon (1958, 1951/52, 1862–1864). Aber auch Auswirkungen überregionaler und globaler Ereignisse wie die Erdbeben von 1774, 1755 und 1601, bzw. die Deposition radioaktiver fallout Produkte ( $^{134},^{137}\text{Cs}$ ) nach den atmosphärischen Bombentests (1963) und nach der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl (25.4.1986) lassen sich in den Ablagerungen des Urnersees nachweisen.

**Hochwasser 1987**

Der ausserordentliche Hochwassersommer des Jahres 1987, der im gesamten Alpengebiet zu grossen Überschwemmungen, massiven Zerstörungen und Unterbrechungen der Verkehrswege geführt hat, ist in den Urnerseesedimenten ebenfalls klar dokumentiert. Die Schadenssumme allein in der Schweiz überstieg 1.2 Milliarden Franken [6], und besonders das Reusstal im Kanton Uri war über Wochen durch die Auswirkungen des Hochwassers vom 24./25. August 1987 in Mitleidenschaft gezogen. Eine Analyse der einzelnen Hochwasserlagen in den Sedimentkernen aus dem Urnersee

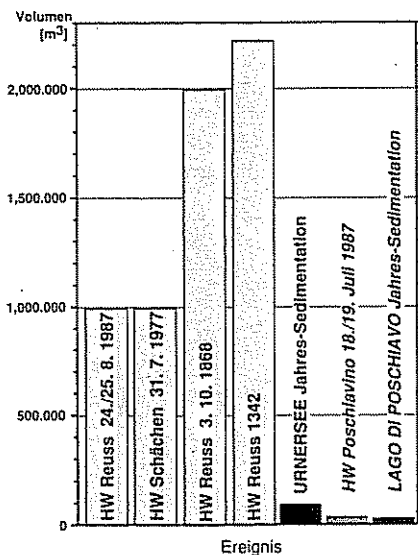


Fig. 3 Volumensvergleich der Sediment-Ablagerungen, welche durch die grössten Hochwässer in den letzten tausend Jahren im Urnersee abgelagert wurden. Als Vergleich sind die Volumina der Hochwasserablagerungen von 1987 im Lago di Poschiavol GR und die jährlichen Sedimentationsraten der beiden Seen angegeben.

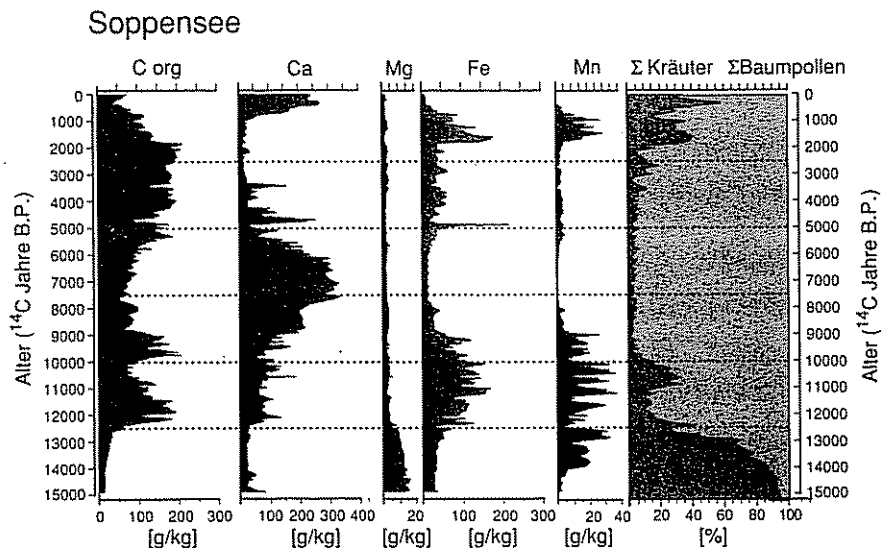


Fig. 4 Das Sedimentarchiv des Soppensees im Verlauf der letzten 15'000 Jahre. Die Darstellung zeigt von links die Entwicklung verschiedener biologischer und chemischer Umweltparameter: Konzentration (in g/kg) von organischem Material ( $C_{org}$ ), Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Eisen (Fe), Mangan (Mn) und prozentualer Anteil von Kräuterpollen gegenüber Baumpollen.

zeigte aber, dass das Reuss-Hochwasser von 1987 nicht das grösste Hochwasser-Ereignis in der Geschichte des Urnersees darstellt (Fig. 3). Mit einem Sedimentvolumen von 1 Mio.  $m^3$  ist es nämlich vergleichbar mit dem Hochwasser des Schächlen vom 31.7.1977. Das Reuss-Hochwasser vom 3.10.1868 lagerte sogar die doppelte Feststoffmenge von 2 Mio.  $m^3$  im Urnersee ab. Das bisher grösste Hochwasser der Reuss, das ein Volumen von 2.2 Mio.  $m^3$  erreichte, ereignete sich jedoch im Sommer des Jahres 1342, als andauernde Starkniederschläge nicht nur in den Alpen, sondern auch in weiten Teilen Europas zu katastrophalen Überschwemmungen führten [8]. Die Sedimente des Urnersees zeigen, dass pro Jahrhundert zwar durchschnittlich 10 Hochwässer auftreten können, dass katastrophale Extremereignisse in den letzten 1000 Jahren aber nur dreimal aufgetreten sind: 1987, 1868 und 1342. Trotzdem ist die Bedeutung von Hochwässern für die Sedimentakkumulation im Urnersee gross; allein die in Fig. 3 dargestellten Grosseignisse sind für das über 60-fache des durchschnittlichen Jahres-Feststoffvolumens von 0.1 Mio.  $m^3$  verantwortlich.

**Der Soppensee**

Im Alpenvorland des Kantons Luzern liegt auf 596 m ü. M. der nur etwa ein Quadratkilometer grosse Soppen-

see. Sein heute 27 m tiefes Becken stellt eine glaziale Reliktstruktur dar, die während der raschen Rückzugsphase des letzten Reussgletschers vor ca. 15'000 Jahren angelegt wurde [9]. Seit dieser Zeit wurde im Soppensee ein ca. 8 m mächtiges Sedimentprofil abgelagert, das seine Entstehung hauptsächlich autochthonen, biogeochemischen Sedimentbildungs-Prozessen verdankt. Die Sedimente dieses kleinen Sees sind in verschiedener Hinsicht aussergewöhnlich und seit 1986 Gegenstand einer ganzen Reihe von interdisziplinären, paläoökologischen Forschungsprojekten.

**15'000 Jahre Vegetationsgeschichte**

Das Sedimentarchiv des Soppensees dokumentiert lückenlos die Umweltgeschichte der letzten 15'000 Jahre. Die Auswertung zeitlich hochauflösender Pollenprofile zeigt, dass nach dem Rückzug der Gletscher die Vegetation im Einzugsgebiet des frühen Soppensees durch eine kälteresistente, offene und baumlose Pflanzenvergesellschaftung («Steppentundra») gekennzeichnet war. Die deutliche Zunahme der Baumpollen vor 12'700 Jahren (Fig. 4) belegt eine rasche und nachhaltige Klimaerwärmung. Eine erneute, etwa 1000 Jahre dauernde Kälteperiode, die sogenannte Jüngere Dryas, ging dann vor etwa 10'000 Jahren zu Ende; gefolgt vom eigentlichen nacheiszeitlichen Klimaoptimum mit der nahezu

vollständigen Abnahme der Krauserpollen. Erste Anzeichen menschlicher Präsenz finden sich im Bereich des Soppensees bereits vor etwa 6000 Jahren in Form von Getreide-Pollen. Stärkere Auswirkungen menschlicher Tätigkeit auf die Umwelt (z.B. durch Rodungen) lassen sich ab dem Ende der Bronzezeit vor etwa 3000 Jahren belegen. Die Kolonisation des Schweizer Mittellandes durch die Römer und die damit verbundenen, noch deutlicheren anthropogenen Umweltveränderungen setzten vor 2000 Jahren ein, wie die Veränderung des Pollenspektrums von Baum- und Strauchpollen hin zu Krauser- und Getreidepollen belegen (Fig. 4).

#### 15'000 Jahre Seegeschichte

Das dynamische Bild der Vegetation wird durch den Verlauf verschiedener geochemischer Parameter in den Seesedimenten ergänzt. War der See in seiner frühen Phase noch oligotroph und hauptsächlich durch allochthone Feststoffzufuhr beeinflusst, setzte bereits vor etwa 12'700 Jahren eine dramatische Änderung ein, hin zu nährstoffreichen, anoxischen Seeverhaltnissen. Diese Entwicklung ist in Fig. 4 durch den Rückgang von Mg und der gleichzeitig einsetzenden, sprunghaften Zunahme von  $C_{org}$ , Ca und Fe dokumentiert. Die bereits in der Vegetationsentwicklung festgestellte Kaltphase der jüngeren Dryas manifestierte sich auch im See durch eine deutliche Abnahme der Primärproduktion mit einem entsprechenden Rückgang von organischem Kohlenstoff in den Sedimenten. Die vor 10'000 Jahren einsetzende Wiedererwärmung führte dann erneut zu einem eutrophen, anoxischen Seezustand, der auch heute noch besteht. Der Soppensee bildet damit ein Beispiel für eine natürliche Seen-Eutrophierung, die über Jahrtausende angehalten hat und von menschlichen Einflüssen weitgehend unbeeinflusst war.

#### Tausende von Jahreslagen

Die palaolimnologische Sensation des Soppensees stellen die über viele tausende von Jahren auftretenden bioche-

mischen Varven dar (Fig. 5). Ihre Bildung und Erhaltung, die eutrophe Seeverhaltnisse mit sauerstofffreiem Tiefenwasser voraussetzten (siehe oben), begann vor etwa 12'000 Jahren. Mit dem Nachweis, dass es sich um echte Jahreslagen handelt [4], konnten sie zu der Erweiterung der  $^{14}C$ -Kalibrationskurve und zur Ausarbeitung einer genauen Chronologie der Soppensedimente verwendet werden [10]. In den Ablagerungen des heutigen Soppensees können keine Varven mehr festgestellt werden, auch wenn die Bedingungen für die Bildung von biochemischen Varven gegeben wären: Die Larve einer *Chaoborus*-Art zerstört die vorhandene Varvenschichtung und liefert damit ein Beispiel, dass auch unter anaeroben Bedingungen Bioturbation möglich ist.

#### Die Bedeutung von Sedimentarchiven

Die Auswertung ökologischer Archive, wie sie Seesedimente darstellen, erlaubt es, Antworten auf die am Beginn gestellten Fragen zu geben. So belegen die Ablagerungen des Urnersees, dass Extremereignisse wie z.B. Hochwässer in einer tektonisch aktiven Gebirgsregion mit steilem Relief zwar selten vorkommen, aber nicht einzigartig sind. Und auch die Ergebnisse der Untersuchungen aus dem Soppensee zeigen, dass Seen bereits seit vielen Jahrtausenden natürlicherweise nährstoffreich und anoxisch sein können. Sie zeigen auch, dass natürliche und menschliche Ursachen von Umweltveränderungen auseinander gehalten werden können.

Sedimentarchive sind daher nicht nur eine wichtige Ergänzung für die Interpretation von ökologischen Prozessen, sondern sie bilden auch die Grundlage für die

- Beurteilung von Stabilität und Dynamik von Umweltsystemen;
- Abschätzung von ökologischen Risiken
- Planung von Massnahmen sowie die
- Formulierung von Schutzziele vor dem Hintergrund natürlicher Bedingungen.

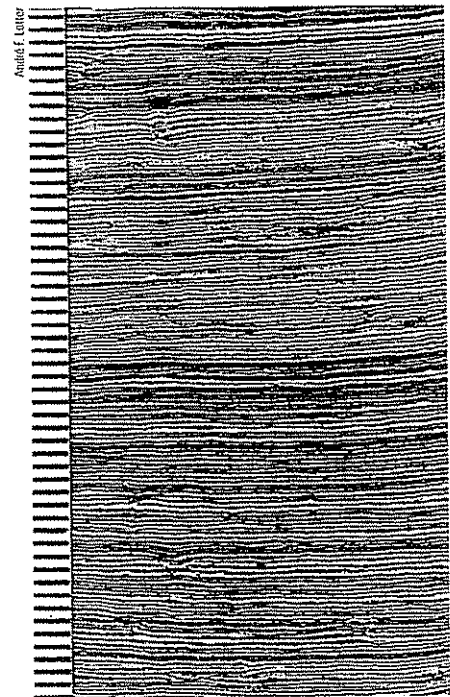


Fig. 5

Fotografie eines Sedimentkerns aus dem Soppensee mit biochemischen Varven. Deutlich ist die regelmässige, sich zyklisch wiederholende hell/dunkle Jahresschichtung zu erkennen, deren heller Teil die «Sommer»- und deren dunkler Teil die «Winter»-Lage repräsentiert. Die Skala ist in mm angegeben.

- [1] De Geer, G. (1912): A geochronology of the last 12,000 years. Proc. 11th Int. Geological Congress 1910: 241–253.
- [2] Kelts, K. and K.J. Hsu (1978): Freshwater carbonate sedimentation. In: A. Lerman, (ed.), Lakes: Geology, Chemistry, Physics. New York, Springer. pp. 295–323.
- [3] Bloesch, J. and M. Sturm (1986): Settling Flux and Sinking Velocities of Particulate Phosphorus (PP) and Particulate Organic Carbon (POC) in Lake Zug, Switzerland. Sediments and Water Interactions. In: P. Sly, (ed.), Sediments and Water Interactions. New York, Springer. pp. 481–490.
- [4] Lotter, A.F. (1989): Evidence of Annual Layering in Holocene Sediments of Soppensee, Switzerland. Aquatic Sciences 51: 19–30.
- [5] Sturm, M. (1979): Origin and composition of clastic varves. In: Ch. Schlüchter, (ed.), Moraines and Varves. Rotterdam, Balkema. pp. 281–285.
- [6] Siegenthaler, C. and M. Sturm (1991): Die Häufigkeit von Ablagerungen extremer Reuss-Hochwasser. Die Sedimentationsgeschichte im Urnersee seit dem Mittelalter. Mitt. Bundesamt für Wasserwirtschaft. 4: 127–139.
- [7] BWW (1991): Ursachenanalyse der Hochwasser 1987 – Ergebnisse der Untersuchungen. Mitt. Bundesamt für Wasserwirtschaft 5: 3–47.
- [8] Pfister, C. and S. Hächler (1991): Historische Hochwasser. Mitt. Bundesamt für Wasserwirtschaft 4: 121–126.
- [9] Hantke, R. (1967): Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete. Vierteljahresschrift der Naturf. Ges. in Zürich 112: 91–122.
- [10] Hajdas, I. (1993): Extension of the radiocarbon calibration curve by AMS dating of laminated sediments of Lake Soppensee and Lake Holzmaar, ETHZ Diss. Nr. 10157.

Jürg Bloesch und Bernhard Wehrli

# Entstehung natürlicher Sedimentarchive

Über geologische Zeiträume werden unsere Seen verlanden bzw. verschwinden, denn jedes Jahr werden am Seeboden einige Millimeter frisches Sediment abgelagert. Die Seesedimente archivieren so vielfältige Informationen über das Ökosystem «See» und sein Einzugsgebiet. In diesem Artikel befassen wir uns mit der Sedimentbildung und der aktuellen Funktion der Sedimente im Stoffhaushalt der Seen. Wer Sedimentarchive interpretieren will, muss deshalb die Prozesse der Sedimentbildung kennen.



Jürg Bloesch

## Herkunft und Sedimentation der Partikel

Beispielhaft haben wir das Schicksal von absinkenden Partikeln im 200 m tiefen Südbecken des Zugersees auf ihrem Weg ins Sediment verfolgt [1]. Die sedimentierenden Partikel stammen entweder aus dem Einzugsgebiet (allochthon) oder werden im See selber gebildet (autochthon) (vgl. Fig. 1 im Beitrag von Sturm & Lotter). Insbesondere bei Hochwasser schwimmen die Zuflüsse grosse Mengen von erodierten Bodenpartikeln und Nährstoffen in den See. Die kleineren und grösseren Deltas sind sichtbare Zeugen davon. Dabei handelt es sich nebst pflanzlichem Debris vorwiegend um Mineralien, v.a. Oxide und Silikate. Zusätzlich produziert das Ökosystem «See» aus Algen und Zooplankton einen «Regen» von absinkenden Partikeln, die aus toter Biomasse (organischem Kohlenstoff) und frisch gefällttem Kalk bestehen. Dabei wirken Kieselalgen als «Kristallisationskeime» für die Kalzit-Fällung, indem sie durch ihre Photosynthese lokale Kalk-Übersättigungen schaffen («biogene Entkalkung»).

Auf dem Weg ins dauerhafte Sedimentarchiv sind die absinkenden Partikel verschiedenen Umwandlungsprozessen unterworfen. Prozesse wie Auflösung, Ausfällung, Adsorption (Scavenging), Koagulation, bakterieller Abbau und Aggregatbildung sind sehr wirksam. Dies wird z.B. durch die starke Veränderung des C:P-Verhältnisses des partikulären Materials im Vertikal-

profil veranschaulicht: Im Epilimnion liegt das C:P-Verhältnis weit über demjenigen der Algenbiomasse von 106:1, im Hypolimnion kann es jedoch bis auf 50:1 vermindert werden [2]. Die absinkenden Partikel geben einerseits durch Abbauprozesse Kohlenstoff ab,

nehmen andererseits Phosphor durch Adsorption und festsitzende, mineralisierende Bakterien auf.

Auch die Fressaktivität des Zooplanktons trägt wesentlich zur Partikeltransformation bei [3]: Die Bildung von «fecal pellets» durch das Zooplank-

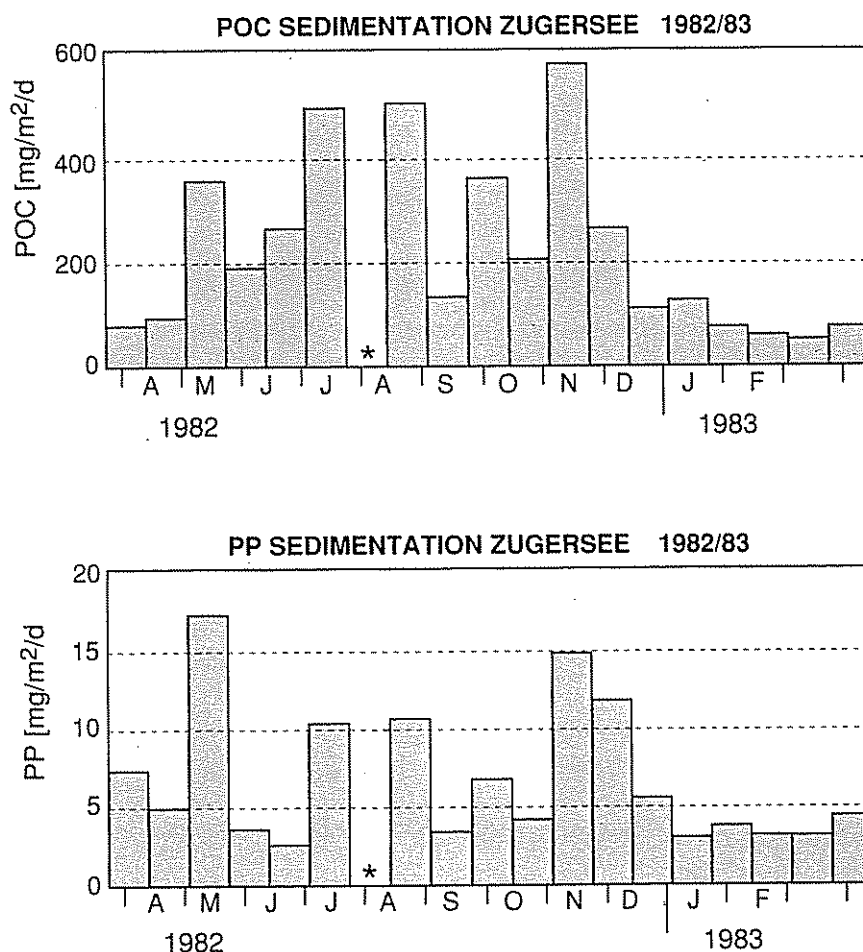


Fig. 1 Jahreszeitlicher Verlauf der Sedimentation von partikulärem organischen Kohlenstoff (POC) und partikulärem Phosphor (PP) im Zugersee, 1982/83. Die höchsten Werte werden während der höchsten Algenproduktion gemessen.

Sedimentation Trockengewicht	770 g m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>
Sedimentation Frischgewicht (f = 3.3)	2'540 g m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>
Sedimentvolumen (f = 2.9)	2'230 cm <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> = 2.2 mm a <sup>-1</sup>

Tab. 1

Sedimentation und Sedimentzuwachs im Zugersee (f = Umrechnungsfaktor).

ton erhöht die Absinkgeschwindigkeit von Algenmaterial. Die Sinkgeschwindigkeit der Partikel bestimmt deren Aufenthaltszeit im Wasser. Sie ist nicht nur abhängig von der Grösse, Dichte und Form der Partikel, sondern auch von der Temperatur, Dichte, Viskosität und Turbulenz des Wassers. Die grundlegende Formel von Stokes zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit kann jedoch nur bedingt verwendet werden, da die meisten Partikel nicht rundum runde Kugeln sind. Die meisten Algen sinken typischerweise mit einer Geschwindigkeit bis zu einigen Metern pro Tag [4]. Kleinere Algen und Mineralpartikel bleiben jedoch länger in Schwebelage und sinken höchstens einige Zentimeter bis Dezimeter pro Tag. Die absinkenden Algen brauchen deshalb im 200 m tiefen Zugersee einige Tage bis Wochen, bis sie den Seegrund erreicht haben.

Mit Sedimentfallen lassen sich die Stoffflüsse und der Abbau der absinkenden Partikel in verschiedenen Wassertiefen bestimmen. Das Sedimentmaterial im Zugersee wird, wie in den meisten Mittellandseen, zum grössten Teil im See produziert. Die Zuflüsse, welche z.B. das Sedimentationsgeschehen im Vierwaldstättersee oder im alpinen Öschinensee dominieren [5,6], spielen im Zugersee nur eine kleine Rolle. Die maximale Sedimentation findet im Sommer statt (Fig. 1), wenn Algenblüten auftreten, welche, wie oben beschrieben, zur Ausfällung von Kalk führen.

### Die Sedimente als geschichteter Reaktor

Die saisonale Variation der Sedimentationsraten führt im Sediment von eutrophen Seen wie dem Zugersee zu deutlichen Jahresschichtungen. Dabei entspricht die helle Schicht (= Kalk) der Sommerablagerung, die dunkle Schicht (= organische Substanz) der Winterschicht (siehe Fig. 4 im Beitrag von Sturm & Lotter). Bei genügender

der Sauerstoffversorgung am Seegrund können solche Jahreslagen durch grabende Würmer und Insektenlarven zerstört werden («Bioturbation»). Dies ist der Fall in oligotrophen oder belüfteten eutrophen Seen. Ferner lösen starke Windereignisse Wellen und interne Strömungen aus, welche die Sedimente in flachen Seebereichen aufwirbeln und dabei die «Archivinformation» verwischen [7]. Die resuspendierten Sedimente werden meistens zur Seemitte hin transportiert, wo sie sich erneut ablagern.

Mit Hilfe einer Umrechnung der sedimentierenden Trockensubstanz in Frischgewicht und Volumen, welche die Kompaktion der Sedimente berücksichtigt [4], kann die jährliche Sedimentationsrate in eine jährliche Akkumulationsrate umgewandelt werden (Tab. 1). Normalerweise beträgt der jährliche Sedimentzuwachs in unseren Seen 3 bis 10 mm; die geschätzten 2.2 mm für den Zugersee liegen demnach am unteren Teil der Skala.

Der Flux des partikulären organischen Kohlenstoffs (POC) lässt sich im Zugersee wie folgt quantifizieren (Fig. 2): Die Primärproduktion beträgt etwa 440 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> und ist im Vergleich zu einem oligotrophen See sehr hoch (z.B. Vierwaldstättersee mit etwa 150 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> und Öschinensee mit etwa 11 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> [6]). Davon werden nur etwa 21% ins Sediment eingelagert, etwa 348 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> werden vor allem im kleinen «epilimnischen» Kreislauf und zum Teil noch während des Absinkens im Hypolimnion mineralisiert. Der ins Sediment gelangende POC ist eine Energie- und Nahrungsquelle für benthisch lebende Tiere und Bakterien.

Nach der Ablagerung der Sedimente beginnt die Diagenese: die Sedimente werden durch chemische und biologische Prozesse verändert. Mit Flusskammern und Dialyseplatten lässt sich die Freisetzung von Stoffen am Seegrund messen. Rund 57% des abgelagerten Kohlenstoffs wird in den obersten Mil-

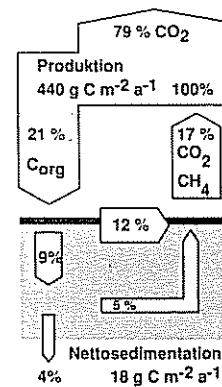


Fig. 2  
Produktion und Mineralisation von partikulärem organischem Kohlenstoff im Zugersee. Schematisch dargestellt sind die Prozesse in der Wassersäule und in den obersten 15 cm des Sediments.

limetern des Sediments innerhalb von 1 bis 2 Jahren bakteriell abgebaut, weitere 24% im Bereich von 0.5 bis 15 cm (Fig. 2). Durch die raschen Abbauvorgänge im obersten aeroben Bereich wird Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) gebildet. Die langsameren Abbauvorgänge im tieferen anaeroben Bereich produzieren Methan (CH<sub>4</sub>). Nur 19% des abgelagerten organischen Materials oder 4% der aktuell produzierten Biomasse werden über geologische Zeiträume im Sediment gespeichert. Andere Stoffe, wie z.B. die Schalen von Kieselalgen, Pollenkörner, Asche von Vulkanausbrüchen oder Radionuklide aus der Atmosphäre, bleiben als «Fingerabdruck» im Sediment weitgehend erhalten.

### Seesedimente: Altlast oder Endlager?

Nebst natürlichen Partikeln werden auch zivilisatorisch bedingte Schwermetalle und organische Chemikalien im Sediment festgelegt. Mit Untersuchungen von Schadstoffen in datierten Sedimentkernen lässt sich der Anstieg

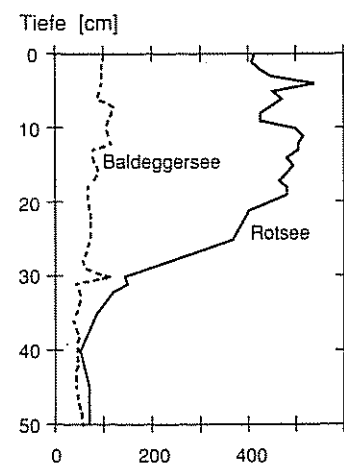


Fig. 3  
Zink-Konzentrationen in den Sedimenten des Baldeggensees und des Rotsees. [Unpublizierte Daten von M. Sturm.]

der zivilisatorischen Belastung der Gewässer genau dokumentieren (Fig. 3). Die chronische Zinkbelastung zum Beispiel stammt vorwiegend aus verzinkten Wasserleitungen und ist im stadtnahen Rotsee wesentlich höher als im ländlichen Baldeggersee. Es stellt sich die Frage, ob die Sedimente als «Altlasten» oder als sichere «Endlager» für anthropogene Schadstoffe zu betrachten sind. Untersuchungen über die Freisetzungsraten im Porenwasser am Seegrund ergaben, dass die meisten toxischen Schwermetalle praktisch irreversibel im Sediment gebunden bleiben. In sehr stark kontaminierten Sedimenten können jedoch diese toxischen Substanzen von den benthischen Tieren inkorporiert werden und so in die Nahrungskette gelangen («Bioakkumulation»).

Demgegenüber können Nährstoffe wie Ammonium und Phosphat durch Diffusion aus dem Sediment rückgelöst werden. Der auslösende Faktor ist dabei die intensive Mineralisation von Biomasse. Fig. 4 zeigt Phosphorgradienten im Porenwasser der Zugerseesedimente: während des ganzen Jahres diffundiert Phosphat aus dem Sediment ins Tiefenwasser. Im Sommer wird jedoch an der Sedimentoberfläche

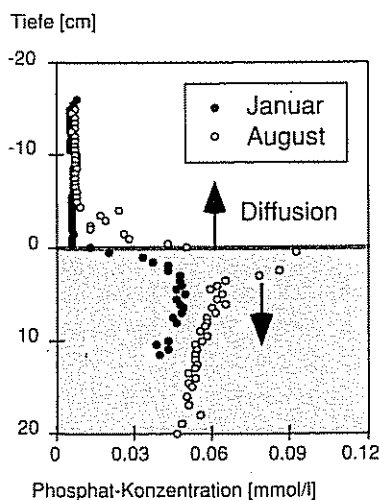


Fig. 4  
Phosphat-Konzentrationen an der Sediment-Wassergrenze und im Porenwasser der Sedimente im Nordbecken des Zugersees, 1993. Rücklösung entlang des Konzentrationsgradienten findet das ganze Jahr statt. Im Sommer diffundiert Phosphat jedoch sowohl ins überstehende Wasser als auch ins Sediment hinein.

soviel Phosphor abgelagert und freigesetzt, dass ein Teil auch ins tiefere Sediment diffundiert. Dort können Fällungsreaktionen den Nährstoff z.B. in Form von Eisen(II)phosphat, Vivianit, binden.

Während im oligotrophen See praktisch aller sedimentierende partikuläre Phosphor (PP) ins Sediment eingelagert wird, ist im eutrophen See die PP-Aufnahmekapazität der Sedimente erschöpft. Von 80 Tonnen PP, die im Zugersee jährlich zum Seegrund absinken, werden nur 20 Tonnen ins Sediment eingebaut (Fig. 5). Drei Viertel des sedimentierenden Phosphors gelangt als «interne Düngung» wieder ins Tiefenwasser des Sees. Die Aufnahmekapazität der Sedimente kann auch durch seeinterne Belüftungsmassnahmen nicht weiter gesteigert werden [8]. Diese drängen sich im Zugersee nicht auf, weil die obersten 100 m der Wassersäule genügend Sauerstoff enthalten [9]. Die Phosphor-Rücklösung lässt sich nur dann unterbinden, wenn die PP-Sedimentation kleiner wird als die Aufnahmekapazität der Sedimente. Dazu braucht es eine Begrenzung der Phosphoreinträge aus dem Einzugsgebiet. Wenn es gelingt, die Zufuhr von Phosphor langfristig deutlich unter 20 Tonnen pro Jahr zu halten, muss die Konzentration dieses Algenährstoffes langsam abnehmen. Damit verringert sich die Produktion von Algen und folglich auch die PP-Sedimentation. Allerdings benötigt der Zugersee für diese «sanfte» Sanierung etwa 40 Jahre.

Als Fazit zur Entstehungsgeschichte von Sedimentarchiven können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden: Quantität und Qualität der Sedimentarchive hängen im wesentlichen von der Partikelproduktion ab. Der Abbau von organischem Material und die Auflösung von Mineralien «löschten» einen Teil der Information, welche auf den Seegrund gelangt. Dieser Abbau setzt sich im Sediment weiter fort. In einem eutrophen See bleibt nur ein kleiner Teil der absinkenden Feststoffe für geologische Zeiträume im Sediment gespeichert. Der Rest gelangt in gelöster Form zurück in den See.

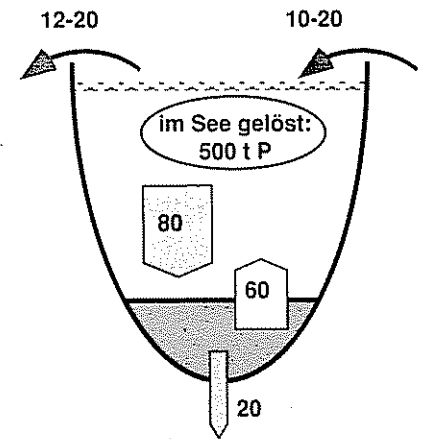


Fig. 5  
Phosphorbilanz des Zugersees in Tonnen Phosphor pro Jahr, 1988–1993.

Nur etwa ein Viertel des absinkenden partikulären Phosphors wird ins Sediment eingebaut. Die Phosphorexporte über den Abfluss und via den Einbau ins Sediment sind etwa doppelt so gross wie der Eintrag über die Zuflüsse. Deshalb nimmt der gegenwärtige Phosphorinhalt von ca. 500 Tonnen langsam ab.

- [1] Bloesch J. & M. Sturm (1986): Settling flux and sinking velocities of particulate phosphorus (PP) and particulate organic carbon (POC) in Lake Zug, Switzerland. In: P.G. Sly (Ed.), Sediments and Water Interactions, Springer New York: 481–490.
- [2] Gächter R. & J. Bloesch (1985): Seasonal and vertical variation in the C:P ratio of suspended and settling seston of lakes. Hydrobiologia 128: 193–200.
- [3] Bloesch J. & H.R. Bürgi (1989): Changes in phytoplankton and zooplankton biomass and composition reflected by sedimentation. Limnol. Oceanogr. 34: 1048–1061.
- [4] Bloesch J. (1974): Sedimentation und Phosphorhaushalt im Vierwaldstättersee (Horwer Bucher) und im Rotsee. Schweiz. Z. Hydrol. 36: 71–186.
- [5] Siegenthaler Ch. & M. Sturm (1991): Die Häufigkeit von Ablagerungen extremer Reuss-Hochwasser. Die Sedimentationsgeschichte im Urnersee seit dem Mittelalter. Mitt. Bundesamt f. Wasserwirtschaft 4: 127–139.
- [6] Bloesch J., D. Hohmann & A. Leemann (1995): Die Limnologie des Öschinensees, mit besonderer Berücksichtigung des Planktons, der Sedimentation und der Schwermetallbelastung. Mitt. Naturf. Ges. Bern, im Druck.
- [7] Bloesch J. (1994): Mechanisms, measurement and importance of sediment resuspension in lakes. Australian Journal of Marine and Freshwater Research 45: im Druck.
- [8] Gächter R. & P. Stadelmann (1993): Gewässerschutz und Seeforschung; Wege zur Genesung des Sempachersees. In: P. Stadelmann (Hrsg.), Sempachersee, Mitt. Naturf. Ges. Luzern, S. 343–378 and 467–474.
- [9] Wehrli B., A. Wüest & D. Imboden (1994): Sind biogen meromiktische Seen intern sanierbar? Fallbeispiel Zugersee. In: D. Jaeger & R. Koschel (Eds.), Verfahren zur Sanierung und Restaurierung stehender Gewässer. G. Fischer, Stuttgart, im Druck.

Christof Holliger und René P. Schwarzenbach

# Umwandlungen von organischen Verunreinigungen in sauerstofflosen Sedimenten



Christof Holliger

Yvo Weimann

*Polychlorierte Biphenyle (PCBs), chlorierte Lösungsmittel, Trinitrotoluol (TNT) und viele andere organische Verunreinigungen können in sauerstofflosen Umweltkompartimenten wie Sedimenten und Grundwasserleitern chemisch und biologisch reduziert werden. Die Produkte solcher Reaktionen können ungiftig, besser biologisch abbaubar oder aber auch giftiger als der Ausgangsstoff sein. Kenntnisse solcher Redoxprozesse sind nicht nur wichtig für die Beurteilung der Umweltverträglichkeit organischer Verbindungen, sondern auch für die Entwicklung und Anwendung von Sanierungsmassnahmen bei Verschmutzungen.*

## Abertausende organische Verbindungen in der Umwelt

In den letzten Jahrzehnten ist die Umwelt zunehmend mit organischen Verbindungen belastet worden, die nicht natürlichen Ursprungs sind. Heutzutage sind ungefähr 70'000 verschiedene synthetische Chemikalien im täglichen Gebrauch. Viele dieser alltäglichen Chemikalien (z.B. Heilmittel, Kosmetika, Lebensmittelzusatzstoffe) haben keinen grossen, direkten Einfluss auf die Umwelt. Ein Teil dieser synthetischen Verbindungen gelangt jedoch in grossen Mengen in die Umwelt, nicht nur durch spektakuläre Unfälle, sondern auch durch direkten Gebrauch in der Umwelt (Pestizide) und durch unscheinbare, diffuse Ereignisse wie leckende Vorrattanks, Verdunstung, usw. [1]. Beispiele solcher Chemikalien sind *nitroaromatische* Verbindungen wie der Sprengstoff TNT und das Pestizid Parathion sowie *halogenierte* Verbindungen wie die Pestizide Lindan und DDT, die Lösungsmittel Tri- und Perchlorethylen und die vielseitig verwendeten PCBs.

Im Folgenden werden reduktive Umwandlungen dieser beiden Gruppen von Verbindungen in sauerstofflosen Umweltkompartimenten ausführlich beleuchtet.

## Sauerstofflos ist kein Synonym für «leblos».

Sauerstofflose Bedingungen findet man vor allem in Seesedimenten und belasteten Grundwasserleitern. Das Fehlen von Sauerstoff ist die Folge eines Überangebots an abbaubarem organischem Material. Dieses Überangebot an organischem Material stammt oft vom Menschen, so zum Beispiel durch die Überdüngung der Seen und Flüsse oder die Verschmutzung von Grundwasser durch Deponiesickerwässer. Obwohl viele Lebewesen nur in Anwesenheit von Sauerstoff überleben, ist sauerstofflos kein Synonym für «leblos». Gewisse Funktionen des Sauerstoffes im Stoffwechsel von Lebewesen können bei Bakterien auch durch Nitrat, Eisen, Mangan, Sulfat oder Kohlendioxid übernommen werden. Die Abbautätigkeit der Bakterienwelt ist demnach durch die Abwesenheit von Sauerstoff nicht stillgelegt.

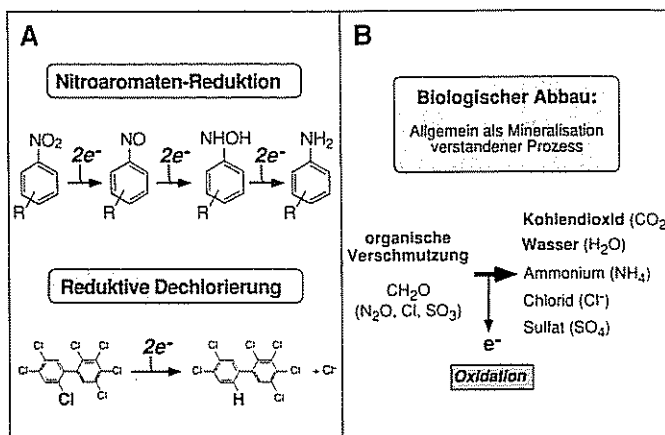
## Umwandlung von Nitroaromaten und chlorierten Verbindungen in sauerstofflosen Umweltkompartimenten

Schadstoffe wie Nitroaromaten und halogenierte Verbindungen gelangen an Partikel gebunden oder im Wasser

gelöst in Sedimente und Grundwasserleiter. Am Beispiel der PCBs konnte gezeigt werden, dass die Akkumulation von organischen Verbindungen in einem Umweltkompartiment eng gekoppelt sein kann mit der Menge, die verkauft und konsumiert wurde, selbst wenn die Verbindung nicht direkt in der Umwelt angewendet wurde oder wird. So wurden in Seesedimenten die grössten PCB-Akkumulationsraten Ende der sechziger Jahre gemessen, in der Zeit, in der auch die grössten Mengen an PCBs produziert und verkauft wurden. Synthetische Chemikalien wurden früher gerade wegen ihrer Eigenschaft, schwer abbaubar zu sein, eingesetzt. Damals wurde dann auch angenommen, dass im allgemeinen ihre Beständigkeit in Anwesenheit von Sauerstoff auch keinen Abbau unter sauerstofflosen (anoxischen) Bedingungen zulasse. Es hat sich aber gezeigt, dass Schadstoffe wie Nitroaromate und halogenierte Verbindungen unter anoxischen Bedingungen umgewandelt werden. Das Sediment eines amerikanischen Flusses wurde zum Beispiel mit dem PCB-Produkt Aroclor 1260 verschmutzt. Aroclor 1260 enthält PCBs mit fünf, sechs, sieben und acht Chlorsubstituenten an den zwei Benzolringen. Eine chemische Analyse des Sedimentes zeigte, dass nach einiger Zeit praktisch keine PCBs mehr mit sieben und acht Chlorsubstituenten im Sediment vorhanden waren, dafür umso mehr mit fünf und neu auch mit drei und vier Chlorsubstituenten. Ähnliche Beobachtungen an mit Nitroaromaten verschmutzten Standorten zeigten, dass bei diesen Verbindungen die Nitrogruppen in Aminogruppen umgewandelt wurden.

Bei beiden Umwandlungen, der Abspaltung von Chlor und der Trans-

**Fig. 1**  
 Reduktive Umwandlung von Nitroaromaten und chlorierten Verbindungen im Vergleich mit «biologischem Abbau».  
 Die Nitroaromaten-Reduktion und die reduktive Dechlorierung (A) sind im Gegensatz zum biologischen Abbau (B) Prozesse, bei denen Elektronen aufgenommen statt abgegeben werden. Diese Prozesse führen nicht zur Mineralisierung der Schadstoffe.



formation einer Nitro- in eine Aminogruppe, handelt es sich chemisch gesprochen um Reduktionen. Eine chemische Reduktion ist ein Prozess, bei dem einem Molekül Elektronen zugeführt werden (Fig. 1A). Dieser Prozess ist das Gegenteil von dem, was man landläufig unter biologischem Abbau versteht. Biologisch abbaubar heisst nämlich, dass eine Verbindung in

sind, Ammonium, Sulfat, Chlorid, usw. Diese Mineralisierung ist ein oxidativer Prozess, ein Prozess, bei dem den Molekülen Elektronen entzogen werden (Fig. 1B).

### Vor- und Nachteile der reduktiven Umwandlung von organischen Verunreinigungen

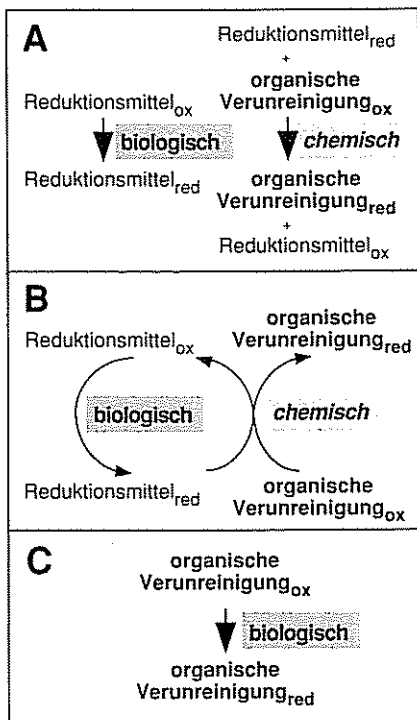
Vorteile der reduktiven Umwandlungen können sein, dass einerseits unschädliche oder relativ harmlose Verbindungen gebildet werden, oder dass andererseits Verbindungen entstehen, die in Anwesenheit von Sauerstoff gut abbaubar sind. Die reduktive Dechlorierung von Perchloroethylen ist ein gutes Beispiel für diese Vorteile. Perchloroethylen ist ein Lösungsmittel, das in der chemischen Reinigung und der Metallindustrie verwendet wird und in Anwesenheit von Sauerstoff völlig inert ist. Bei vollständiger Dechlorierung von Perchloroethylen, wird Ethylen gebildet, das relativ harmlos ist. Diese Umwandlung ist in Labor-Festbettreaktoren schon beobachtet worden und verlief noch bei 10°C mit hoher Geschwindigkeit. Ethylen als Produkt von Perchloroethylen-Dechlorierung wurde auch in einem Grundwasserleiter, der mit diesem Lösungsmittel verschmutzt wurde, gefunden, ohne dass in diesem Fall Sanierungsmassnahmen getroffen wurden. Ist die Dechlorierung hingegen unvollständig, so werden Trichloroethylen, Dichloroethylene und Vinylchlorid gebildet, die, im Gegensatz zu Perchloroethylen, in Anwesenheit von Sauerstoff abbaubar sind.

Nachteile der reduktiven Umwandlungen können sein, dass giftigere und

mobile Verbindungen als der Ausgangsstoff gebildet werden. Die Produktion von Vinylchlorid aus Perchloroethylen ist ein Beispiel einer nachteiligen reduktiven Umwandlung, bei der giftigere Produkte gebildet werden. Vinylchlorid ist erwiesenermassen krebserregend. Wird es gebildet und entweicht es einem Standort durch gleichzeitig gebildetes Gas, kann es tatsächlich zur Gefahr für Menschen und den anderen Lebewesen werden. Der Nachteil der Produktion von mobilen Verbindungen kann anhand der PCBs aufgezeigt werden. Sedimente, in welchen sich PCBs akkumuliert haben, können nämlich nicht nur Senken sein, sondern später auch zu Quellen werden. Es wurde gezeigt, dass PCB-verschmutzte Sedimente auch wieder PCBs abgeben, die Verschmutzung also nicht für immer gebunden bleibt. Diese Freisetzung von PCBs war eine Folge der Produktion von weniger chlorierten, besser wasserlöslichen PCBs durch reduktive Dechlorierung.

### Chemische und biologische Reduktionen

Für eine Anwendung der reduktiven Umwandlungen in technischen Systemen oder die genauere Vorhersage des Verhaltens eines Stoffes in der Umwelt ist ein gutes Verständnis dieser Prozesse im Hinblick auf Ausmass, Geschwindigkeit und geschwindigkeitslimitierende Schritte wichtig. Die bis heute durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die reduktiven Umwandlungen sowohl chemischer wie auch biologischer Natur sein können (Fig. 2). Chemisch soll hier in dem Sinne verstanden werden, dass kein le-



**Fig. 2**  
 Reduktive Umwandlungen von organischen Verunreinigungen als Folge von chemischen und biologischen Prozessen.  
 Reduktive Umwandlungen können rein chemische (A+B) oder rein biologische (C) Prozesse sein. Die Regeneration des Reduktionsmittels für die chemischen Reduktionen ist oft ein biologischer Prozess, der unabhängig (A) oder direkt gekoppelt (B) verläuft.  
 ox = oxidiert, red = reduziert.

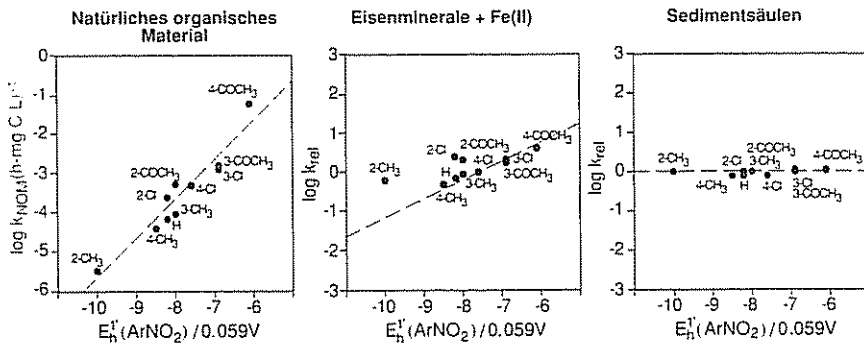


Fig. 3  
Vergleich des Einelektronenreduktionspotentials ( $E_h^1(\text{ArNO}_2)/0.059\text{V}$ ) mit den Reaktivitäten von zehn verschiedenen Nitroaromaten (y-Achsen) in drei verschiedenen Systemen.

bendes Wesen direkt an der Reduktion beteiligt ist, und biologisch, falls die Reduktion, obwohl eine chemische Reaktion, in einem Organismus durch Enzyme katalysiert wird. Bei den chemischen Reduktionen ist das Bereitstellen der Reduktionsmittel, der Stoffe also, die eigentlich die Elektronen liefern, oft ein biologischer Prozess (Fig. 2A+B). In diesen Fällen können die Prozesse der biologischen Bereitstellung des Reduktionsmittels und der eigentlichen chemischen reduktiven Umwandlung entweder unabhängig voneinander (Fig. 2A), oder aber eng aneinander gekoppelt, voneinander abhängig (Fig. 2B) verlaufen.

### Beispiel eines chemischen Prozesses: Reduktion von nitroaromatischen Verbindungen

Die Reduktion von Nitroaromaten eignet sich gut für die Diskussion von chemischen reduktiven Umwandlungen [2]. Die oft beobachtete sehr schnelle Reduktion von Nitroaromaten in Proben von anoxischen Böden oder Sedimenten weist deutlich auf einen nichtbiologischen Prozess hin. Für das Studium von Redoxprozessen sind Nitroaromaten zudem sehr geeignete Modellverbindungen. Die Übertragung des ersten Elektrons auf die nitroaromatische Verbindung ist nämlich reversibel. Das ermöglicht es, ein Einelektronenreduktionspotential zu messen. Dieses gibt an, wie schwierig es ist, einen gewissen Nitroaromaten zu reduzieren. Messungen in verschiedenen Systemen haben gezeigt, dass man mit diesem Parameter, dem Reduktionspotential für die Übertragung des er-

sten Elektrons, keine allgemein gültige Aussagen über die Reaktivitäten von Nitroaromaten in der Umwelt machen kann. (Fig. 3).

In einem System mit Schwefelwasserstoff als Reduktionsmittel und natürlichem organischem Material als Reaktionsbeschleuniger (Katalysator) wurde eine schöne Korrelation zwischen dem Einelektronenreduktionspotential ( $E_h^1(\text{ArNO}_2)/0.059\text{V}$ ) und der Umwandlungsgeschwindigkeit mit der Steigung 1 gefunden. Die Raten deckten eine Spannweite von vier Größenordnungen ab, das heisst, die reaktivste Verbindung reagierte zehntausend mal schneller als die unreaktivste Verbindung. In einem System mit reduziertem Eisen und Eisenmineralen war nur eine Differenz von Faktor hundert zwischen dem reaktivsten und unreaktivsten Nitroaromaten zu erkennen, und in einer Sedimentsäule unterschieden sich die Reaktivitäten der verschiedenen Nitroaromaten überhaupt nicht.

Obwohl sich das Einelektronenreduktionspotential nicht eignet, um allgemein gültige Vorhersagen über die Reaktivität von Nitroaromaten in der Umwelt zu machen, kann mit diesem Parameter in einem gegebenen System evaluiert werden, welche Schritte reaktionsgeschwindigkeitsbestimmend sind. In gewissen Fällen können sogar Hinweise auf die für die Reaktion verantwortlichen Reduktionsmittel gewonnen werden. In natürlichem organischem Material sind es chinonartige Strukturen, welche die Reaktion katalysieren können, in der Sedimentsäule wurden als Hauptreduktanten oberflächengebundene reduzierte Eisenspezies postuliert.

In der Sedimentsäule, in denen alle Nitroaromaten gleich reaktiv waren (Fig. 3), war die chemische reduktive Umwandlung durch reduziertes Eisen ganz eng an die biologische Regeneration des Reduktionsmittels gekoppelt. Die für alle Nitroaromaten gleichen Reaktivitäten waren eine Folge der langsamen biologischen Regeneration des reduzierten Eisens (Fig. 4). Diese Eisenreduktion ist ein anaerober Atmungsprozess, das heisst, anstatt Sauerstoff wird oxydiertes Eisen im Stoffwechsel von bestimmten Bakterien verwendet. Die Eisenreduktion in der Sedimentsäule war durch das Vorhandensein von leicht abbaubarem organischem Material limitiert. Fügt man einem solchen System Azetat (Essigsäure) zu, erhöhten sich die Umwandlungsraten unmittelbar. Das Azetat wurde sofort konsumiert, und es wurde viel mehr Nitroaromat in der gleichen Zeitspanne reduziert. Wurde der Nitroaromat weggelassen, wurde das Azetat nur noch zu einem kleinen Teil verbraucht, was deutlich die enge Verknüpfung der Nitroaromatenreduktion und der Azetatoxidation aufzeigt.

### Beispiel eines biologischen Prozesses: Reduktive Dechlorierung

Im Gegensatz zu den Nitroreduktionen sind viele reduktive Dechlorierungen von chlorierten Verbindungen rein biologische Prozesse [3]. Monatelange

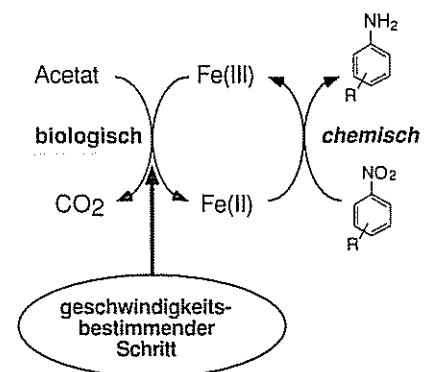


Fig. 4  
Direkte Kopplung der biologischen Oxidation von Azetat und der chemischen Reduktion von Nitroaromaten durch reduziertes Eisen (Fe(II)).

Anpassungsphasen, die nötig sind, bis überhaupt eine Dechlorierung stattfinden kann, sind ein Argument für rein biologische Prozesse. Weiter sind reduktive Dechlorierungsreaktionen oft sehr spezifisch. Das heisst, dass nur ein Chlorsubstituent an einem ganz bestimmten Platz im Molekül von einer Bakterien-Anreicherungskultur abgespalten wird. Sobald sich der Chlorsubstituent an einem anderen Platz befindet, ist keine Dechlorierung durch die gleichen Bakterien möglich. Bakterien, die solche reduktiven Dechlorierungen katalysieren, tun das entweder in einem Atmungsprozess oder aber als Seitenreaktion (Fig. 5). Im letzten Fall profitieren die Bakterien nicht vom hohen Energiegehalt der Reaktion, die sie durchführen. Eine breite Palette von Bakterien, die ohne Sauerstoff auskommen, sind zu diesen Reaktionen befähigt. Die Enzyme, die in diesen Bakterien die Dechlorierungen katalysieren, sind nicht speziell an diese Reaktionen

angepasst. Sie katalysieren normalerweise eine andere Reaktion. So ist zum Beispiel in Methanbakterien das Enzym für die reduktiven Dechlorierungen verantwortlich, das auch den letzten Schritt der Methanproduktion katalysiert.

Die Bakterien, die eine chlorierte Verbindung in einem Atmungsprozess verwenden, nutzen die Energie der reduktiven Dechlorierungsreaktion [4]. In diesen Bakterien ist die reduktive Dechlorierung an die Oxidation eines Elektronendonors wie organisches Material und molekularer Wasserstoff gekoppelt und nicht, wie in anderen Bakterien, die Reduktion von Sauerstoff, Nitrat, Eisen, Mangan, Sulfat oder Kohlendioxid. Ein Bakterium, das Perchlorethylen zu Dichlorethylen dechloriert und *Dehalobacter restrictus* genannt wird, ist sogar so spezialisiert, dass bis heute nicht bekannt ist, welchen Elektronenakzeptor dieses Bakterium verwendete, bevor Perchlorethylen in die Umwelt gelangte. Der grosse Unterschied zwischen diesen Bakterien und denjenigen, die nur in einer Seitenreaktion dechlorieren, ist, dass sie mit wesentlich höheren Raten dechlorieren. So dechloriert *Dehalobacter restrictus* Perchlorethylen zwölftausend mal schneller als ein Methanbakterium. Weiter muss der Kultur auch viel weniger Substrat (Elektronendonor) zugegeben werden. Ungefähr 90% der bei der Oxidation des Elektronendonors freigesetzten Elektronen werden für die reduktive Dechlorierung verwendet – im Gegensatz zu nur Bruchteilen von einem Prozent bei Methanbakterien. Für die Anwendung von dechlorierenden Bakterien in einem Reinigungsprozess sind deshalb Bakterien, die in einem Atmungsprozess dechlorieren, wesentlich attraktiver als Bakterien, die es nur in einer Seitenreaktion tun.

bar sind, werden unter sauerstofflosen Bedingungen reduktiv umgewandelt. Bei den Nitroaromaten bedeutet das, dass die Nitrogruppen in Aminogruppen umgewandelt werden, bei den chlorierten Verbindungen wird ein Chlor durch ein Wasserstoff ersetzt oder es wird eine Doppelbindung gebildet. Diese Umwandlungen entsprechen nicht den Prozessen, die landläufig als biologischer Abbau bezeichnet werden, nämlich die Überführung in die mineralischen Bestandteile. Die Produkte, die durch diese reduktiven Umwandlungen gebildet werden, können harmlose Verbindungen sein oder solche, die unter anderen Bedingungen durch Bakterien mineralisiert werden können. In manchen Fällen können auch Produkte gebildet werden, die wesentlich giftiger als der Ausgangsstoff sind. Die reduktiven Umwandlungen können chemische oder biologische Prozesse, oder eine direkte Kopplung beider Prozesse sein. Ein gutes Verständnis solcher reduktiver Umwandlungsprozesse ermöglicht es Aussagen über das Verhalten der oben genannten organischen Verunreinigungen in der Umwelt zu machen. Dies wiederum eröffnet der technischen und biologischen Sanierung von Altlasten ganz neue Perspektiven und Möglichkeiten.

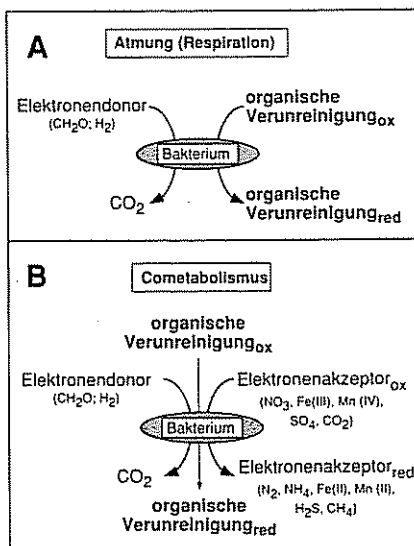


Fig. 5  
Reduktive Dechlorierung durch Bakterien, die ohne Sauerstoff leben können.  
Die reduktive Dechlorierung wird von Bakterien auf zwei Arten durchgeführt. Die einen Bakterien dechlorieren in einem Atmungsprozess (A). Die chlorierte Verbindung ist lebenswichtig für diese Organismen. Andere Bakterien dechlorieren nur in einer Seitenreaktion, sogenannte cometabolisch (B). Sie brauchen die chlorierte Verbindung nicht fürs Überleben, profitieren aber auch nicht von der energiereichen Reaktion.

### Schlussfolgerungen

Organische Verunreinigungen wie Nitroaromaten und chlorierte Verbindungen, die in Anwesenheit von Sauerstoff nur schwer oder gar nicht abbau-

- [1] Schwarzenbach, R. P., P. M. Gschwend und D. M. Imboden (1993) Environmental Organic Chemistry. John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A.
- [2] Haderlein, S. B. und R. P. Schwarzenbach (1994) Environmental Processes Influencing the Rate of Abiotic Reduction of Nitroaromatic Compounds in the Subsurface. In J. C. Spain (Ed.), Biodegradation of Nitroaromatic Compounds, Plenum Press, New York, U.S.A.
- [3] Holliger, C. und G. Schraa (1994) Physiological Meaning and Potential for Application of Reductive Dechlorination by Anaerobic Bacteria. FEMS Microbiology Reviews, in press.
- [4] Holliger, C. und W. Schumacher (1994) Reductive Dehalogenation as a respiratory Process. Antonie van Leeuwenhoek, in press.

Markus Boller

# Die Rolle der Siedlungsentwässerung bei der Schadstoffanreicherung in Böden



Markus Boller

*Das von befestigten Flächen in Siedlungen abfliessende Regenwasser ist mit Schwermetallen zeitweise stark belastet. Je nach Entwässerungssystem der Siedlungen akkumulieren die Schadstoffe entweder vordringlich in der Hydrosphäre oder in der Pedosphäre. Bei Misch- und Trennkanalesation entstehen dadurch langsam sehr diffus verteilte Schwermetalldepots in der Natur. Bei der Meteorwasserversickerung werden die Schwermetalle örtlich begrenzt, jedoch sehr schnell im Boden aufkonzentriert. Ihre Akkumulation soll in Zukunft unter besser kontrollierten Bedingungen erfolgen. Langfristig führt nur die konsequente Ursachenbekämpfung zur Vermeidung von Umweltbeeinträchtigungen durch Schwermetalle.*

## Regenwasser als Quelle von Umweltverschmutzungen ?

Die Stoffe, die mit den verschiedenen Abwässern aus Siedlungen abtransportiert werden, erzeugen Stoffflüsse, die letztlich ihre Spuren entweder in der Hydrosphäre, in der Pedosphäre oder in der Atmosphäre hinterlassen. Die historische Entwicklung der Wassertechnologie, respektive des baulichen Gewässerschutzes liegt in der Vermeidung oder Verwischung dieser Spuren. Seit unsere Gesellschaft um ca. 1920 beschlossen hat, Wasser als Transportmittel für einen Teil der Siedlungsabfälle zu benutzen, rennen wir unablässig der Vermeidung oder Verminderung der Auswirkungen von Abwassereintritten und Klärschlammdepositionen hinterher. Seit den Nachkriegsjahren kennen wir eine nicht abbreisende Folge von Massnahmen hauptsächlich technischer, dann später auch legislativer Natur, deren zeitliche Abfolge immer gedrängter wurde und noch nicht zu Ende ist. Eine der letzten Massnahmen stellt die Umstellung der Entwässerungsstrategie in Siedlungen dar, die zum Ziele hat, lokale Wasserkreisläufe

durch die Versickerung von nicht verschmutztem Abwasser zu fördern.

Wasser, das aus Siedlungen abgeleitet wird, nennt man Abwasser, unabhängig davon, ob die in die Kanalisation gelangenden Wasser als verschmutzt oder unverschmutzt bezeichnet werden. Mit Sicherheit sind die häuslichen und industriellen Abwässer, die die grossen Stoffmengen abtransportieren den verschmutzten Abwässern zuzurechnen. Etwas schwieriger wird es, wenn die durch Niederschläge erzeugten Meteorabwässer beurteilt werden müssen. Neuere Untersuchungen über die Beschaffenheit von Meteorabwasser weisen nach, dass zumindest die Abflüsse von Strassen aber zum Teil auch diejenigen von Dächern und unbefahrenen Plätzen Verunreinigungen aufweisen, die es nicht mehr erlauben, die Meteorabwässer der Kategorie der unverschmutzten Abwässer zuzuteilen. Am ehesten verdient die Bezeichnung unverschmutzt das häufig in grösseren Mengen abgeleitete Fremdwasser, das durch die kanalisierte Ableitung von Grundwasserinfiltrationen, Laufbrunnen, kleiner Oberflächengewässer, etc. entsteht.

## Der Abtransport von Abwasser erzeugt Stoffflüsse

Betrachten wir das in der Schweiz in den meisten Fällen realisierte Entwässerungssystem der Mischwasserkanalisation, in dem verschmutztes Abwasser mit Regenwasser- und Fremdwasserabläufen gemeinsam abgeführt wird, so erkennen wir prinzipiell, dass Reststoffe der Siedlungsentwässerung entweder im Gewässer (Vorfluter) manifest werden oder über die Feststoffentnahme in den Klärschlamm gelangen und damit letztlich zu einer Belastung der Pedosphäre beitragen. Ob die Wasser- oder Bodenbelastung im Fokus einer Umweltbelastung steht, ist weitgehend abhängig von den betrachteten Verunreinigungssubstanzen, das heisst von deren physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften, den chemischen Bedingungen im Abwasser und an den Grenzflächen fester Oberflächen und vom Entwässerungs- und Behandlungssystem für das Abwasser.

Das Verhalten von Substanzen im Abwasser lässt sich anhand von Massenbilanzen und von Massenflussströmen in einem Entwässerungsgebiet aufzeigen. Wichtig dabei ist die Erkenntnis, dass es Substanzen gibt, die in Bezug auf Umweltbelastung vornehmlich eine Beeinträchtigung der Hydrosphäre oder solche, die eine Belastung des Bodens darstellen. Während sich in der Hydrosphäre der Abtransport durch die fliessende Welle und durch Sedimenttransport unübersichtlich und schlecht kontrollierbar gestaltet, ergeben sich bei Bodenbelastungen und Belastungen stationärer Sedimente in Seen lokalisierbare Ver-

schmutzungen, die, falls kein Abbau der Substanzen erfolgt, zu einer Anreicherung proportional zur Zufuhrfracht führen.

Unter den Substanzen, die den Weg in die Pedosphäre gehen, nehmen die Schwermetalle eine besondere Stellung ein. Sie sind garantiert nicht abbaubar, sind zum grössten Teil an partikuläre Phasen gebunden, sind ökotoxikologisch relevant und sind zudem analytisch besser zugänglich als viele organische Substanzen. Sie sind von besonderer Bedeutung im Bereich der Siedlungsentwässerung, weil sie nicht nur über sogenannt verschmutzte Abwässer von Kommunen und Industrien emittiert werden, sondern auch in den bis heute als eher unverschmutzt bezeichneten Abwässern wie Meteorwasser von Dächern, Plätzen und Strassen in signifikanten Mengen vorhanden sind.

Unter den zahlreichen Schwermetallen, die eine Gefährdung der Umwelt darstellen, sind es vor allem die vier Metalle Cadmium, Kupfer, Blei und Zink, die im Vergleich zu den etablierten Belastungskriterien zum Beispiel in Form von Bodenrichtwerten das grösste Aufkommen in der Umwelt aufweisen. Betrachten wir in analoger Weise wie zuvor für die organischen Substanzen das Verhalten der Schwermetalle in einer Kläranlage, so zeichnet sich in Abhängigkeit des Schwermetalls und dessen Konzentrationen ein Bild, das die starke Bindung an die partikuläre Phase, das heisst die Bindung an den Klärschlamm aufzeigt. Eine Tatsache, die längst bekannt ist, jedoch im Lichte alternativer Entwässerungssysteme von Siedlungen ihre Wichtigkeit hat und

im folgenden noch eingehend diskutiert wird.

Die durch Adsorption und Fällung erkläraren Eliminationsraten führen zwangsläufig zu einer Anreicherung im Klärschlamm. Da der Schlamm in einer Abwasserreinigungsanlage viel längere Zeit im System verweilt als das Wasser, kann er sich mit Schwermetallen anreichern, wobei gegenüber den Abwasserkonzentrationen Anreicherungsfaktoren von 1000 und mehr zu verzeichnen sind.

Folgerichtig stellt sich natürlich die Frage, woher kommen die Schwermetalle und wie können sie dem Abwasser ferngehalten werden. In dieser Hinsicht wurde im letzten Jahrzehnt im Bereich industrieller und gewerblicher Abwässer viel unternommen, indem Massnahmen an der Quelle getroffen wurden, was entsprechend zu einer langsamen aber stetigen Senkung der Schwermetallgehalte in Klärschlämmen geführt hat. Demgegenüber gewannen die sogenannt diffusen Schwermetalleinträge an Bedeutung. Die Verfolgung der Schwermetalleinträge in Siedlungsgebieten weist eindeutig nach, dass substantielle Mengen aus sogenannt «nicht verschmutzten» Abwässern stammen, die durch Abspülen der Trocken- und Nassdepositionen von befestigten Flächen bei Regenwetter in die Entwässerungssysteme gelangen.

### Schwermetallflüsse im konkreten Fall

Um die Bedeutung der Schwermetalleinträge durch Meteorabwasser zu erhärten, wurde eine Fallstudie im Gebiet

der Stadt St. Gallen durchgeführt. Das gleiche Gebiet diente bereits als Studienobjekt für eine von der Abteilung Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik der EAWAG durchgeführte Fallstudie Metapolis [1], die die gesamten Stoffflüsse im Bereich von Siedlungen zum Inhalt hatte. Das Ziel war es, die an verschiedenen Stellen eines Siedlungsentwässerungssystems anfallenden Schwermetallfrachten abzuschätzen und die Bedeutung der verschiedenen Quellen zu quantifizieren.

Eine solche Massenflussanalyse gestaltet sich nicht sehr einfach. Das Einfüllen der Zahlen an den erwünschten Stellen des Fliessschemas erfordert nicht sehr einfach zugängliche Hintergrundinformationen. Verschiedene Stoffflüsse sind nicht genau bekannt und müssen geschätzt werden, andere wiederum sind durchaus messbar. Insbesondere ist die Quantifizierung der über das Meteorwasser eingetragenen Frachten mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Regenintensität und Regendauer, Dauer der vorangegangenen Trockenperiode, atmosphärische Belastung des Untersuchungsgebietes, Oberflächenbeschaffenheit, die Art der Probenerhebung usw., sind einige Parameter, die die grosse Streuung von Messresultaten bewirken und die Abschätzung von durchschnittlichen Belastungsdaten erschweren. Zum Zwecke ergänzender Informationen über Dachabläufe führt die EAWAG gegenwärtig Untersuchungen an drei unterschiedlichen Dächern in der Stadt Zürich durch. Die Ergebnisse erster Untersuchungen zeigen eine extreme Dynamik des Stoffanfalls, die sich vor allem bei Steildächern in sehr hohen Konzentrationsspitzen in der ersten halben Stunde des Regenwasserabflusses manifestieren. Neben der Dachform sind kupfer- und zinkhaltige Installationen von ausschlaggebender Bedeutung für den Konzentrations- und Frachtgang der beiden Schwermetalle.

Erst derartige Untersuchungen über den Abfluss ganzer Regenereignisse erlauben, sogenannt äquivalente mittlere Stoffkonzentrationen und jährliche Stofffrachten für Massenbilanzüber-

	Regenwasser	Dachablauf	Strassenablauf*	Trinkwasser
TSS µg/l	8.5	70	200	
Cd µg/l	1.4	0.65	1.7-5	5
Cu µg/l	11	200	90	1500
Pb µg/l	35	130	170-500	50
Zn µg/l	85	400	400	5000

\*tiefere Werte für Wohnstrassen, höhere Werte für Autobahnen

Tabelle 1

Mittlere Konzentrationen von Niederschlägen, Dach- und Strassenabwasser im Vergleich zu Trinkwassergrenzwerten

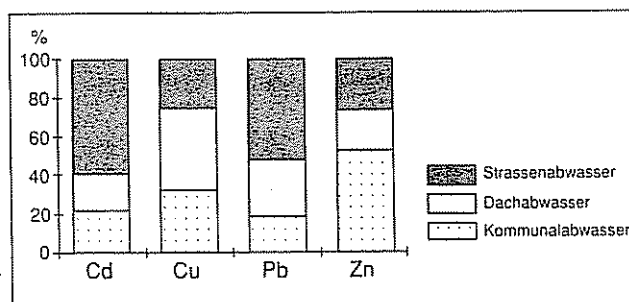
legungen zu berechnen. Aufgrund bisheriger Literaturstudien können Strassen- und Dachabwässer in der Art charakterisiert werden, wie sie in Tabelle 1 aufgezeichnet sind. Im allgemeinen ist man wenig vertraut mit der Bedeutung von Konzentrationswerten in Meteorwässern, sodass hier zum Vergleich die Trinkwassergrenzwerte als Anhaltspunkt ebenfalls angegeben sind. Wie sich zeigt, erweist sich im Vergleich zu den Trinkwasseranforderungen bereits Regenwasser als kritisch belastet, während die Abflüsse von Dächern oder Strassen die Grenzwerte zum Teil überschreiten.

Übertragen wir diese Erkenntnisse über die Meteorwasserkonzentrationen und -frachten auf das Gebiet der Fallstudie St. Gallen, so können wir die Bedeutung der diffusen Anteile der Regenwasserabflüsse im Vergleich zu den häuslichen und industriellen Beiträgen abschätzen. Die Ergebnisse in Fig. 1 zeigen, dass für alle betrachteten Schwermetalle ausser Zink die Frachtbeiträge aus den Regenwasserabflüssen überwiegen. Nicht berücksichtigt sind hier eventuell höhere Anteile an Kupfer- und Zinkinstallationen, die zu Anfangskonzentrationen von mehreren 1000 mg Me/l führen und mittlere Konzentrationen von 100–400 mg Cu/l, respektive 1000–5000 mg Zn/l ergeben können.

### Auswirkungen alternativer Entwässerungssysteme

Bisher haben wir nur das System der Mischkanalisation betrachtet, in dem das Regenwasser und damit die darin enthaltenen Schwermetallfrachten zu einem Teil über Regenwasserüberläufe direkt in die Gewässer eingeleitet werden oder aber in die Kläranlage gelangen und zu einer Anreicherung im Klärschlamm führen. Unterstützt durch das neue Gewässerschutzgesetz, sind jedoch künftig andere Siedlungsentwässerungssysteme anzustreben, deren Ziel es ist, die Meteorabwässer separat abzuführen und nach Möglichkeit dezentral am Ort des Anfalls versickern zu lassen. Für die Entwässerung

Fig. 1  
Anteile der Meteorabwässer am Gesamtaufkommen von Schwermetallen im Bereich der Siedlungsentwässerung



von Siedlungen wird die Einrichtung von Versickerungsanlagen gesetzlich vorgeschrieben, was seinen Niederschlag in den vom Verein Schweizerischer Abwasserfachleute neu herausgegebenen Richtlinien zum Generellen Entwässerungsplan von Siedlungen und in verschiedenen kantonalen Anleitungen zum Ausdruck kommt.

Grundsätzlich sind drei unterschiedliche Szenarien denkbar, die sich insbesondere in der Art der Meteorwasserableitung unterscheiden, nämlich einerseits die herkömmliche Mischwasserableitung, die Trennkanalisation mit direkter Einleitung der Meteorwässer in die Vorflut oder eben die möglichst dezentrale Versickerung des Regenwassers. Wir können nun als Extremvarianten jeweils die konsequente Verwirklichung der drei Entwässerungskonzepte über das Studiengebiet der Stadt St. Gallen legen und die daraus folgenden Stoffflüsse der Schwermetalle abschätzen und letztlich den Ort des Verbleibs der Metalle ermitteln und beurteilen.

### Mischwasserkanalisation

In der Tat unterscheiden sich wegen des substantiellen Beitrags des Regenwassers die drei Systeme ganz erheblich. Betrachten wir zuerst das Mischsystem. Da in diesem System die grössten

Frachtanteile der Schwermetalle über die Kanalisation zur Kläranlage geführt werden, ergibt sich wegen der starken Bindung an partikuläre Stoffe die bereits aufgezeigte Anreicherung im Klärschlamm. Je nach Art der Klärschlamm Entsorgung finden somit die Schwermetalle ihr Endlager in Depo-nien oder bei landwirtschaftlicher Verwertung auf landwirtschaftlich genutzten Böden. Letztere Möglichkeit wird heute wieder vermehrt genutzt und erreicht mancherorts wieder einen Anteil von 70% des Klärschlammfalls. Unter dieser Annahme ergeben sich über die natürliche Niederschlagsbelastung hinaus je nach Ausbringrate des Klärschlammes Anreicherungen, wie sie in Tabelle 2 dargestellt sind, wobei mit  $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  die maximal zulässige Ausbringrate und von  $1 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  die wohl realistische Rate dargestellt sind. Extrapoliert man die auf diese Weise berechneten Anreicherungs-raten und berücksichtigt die bereits erfolgte und nicht unerhebliche Vorbelastung landwirtschaftlicher Böden bis zur Erreichung der Bodenrichtwerte der Verordnung über Schadstoffe im Boden (VSBo, 9.6.1986), so resultieren Zeithorizonte von 100 Jahren und mehr. Trotz diesen relativ langsamen Anreicherungen ist die Schadstoffbelastung als problematisch zu bezeichnen, da die Verteilung

	Niederschlag	Klärschlammaustrag (oberste 30cm)		Bodeneintrag total (oberste 30cm)		VSBo	Hintergrundbelastung Landwirtschaft <sup>1)</sup>
		max. Rate	eff. Rate	max. Rate	eff. Rate		
	$\text{g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$\text{g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$\text{g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$\text{g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$\text{g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$\text{g ha}^{-1}$	$\text{g ha}^{-1}$
Cd	21	4.4	0.9	25.4	21.9	3600	1080
Cu	143	653	131	798	274	225000	106200
Pb	504	617	123	1121	627	225000	96300
Zn	1047	2856	571	3903	1618	900000	254250

<sup>1)</sup> Untersuchungen AGW Kt. Zürich in den ersten 20 cm des Bodens [2]

Tabelle 2

Schwermetallakkumulation in landwirtschaftlichen Böden durch Niederschläge und Klärschlammaustrag

Annette Johnson,  
Peter Huggenberger und Thomas Lichtensteiger

# Langzeitverhalten von Deponien

## Konsequenzen für die Praxis



Annette Johnson

*Mit dem Leitbild der schweizerischen Abfallwirtschaft wurde der Begriff Endlager für abzulagernde Abfälle neu definiert. Abfälle sollen nur dann abgelagert werden, wenn Luft, Wasser und Boden in ihren chemischen, physikalischen Eigenschaften langfristig nicht signifikant verändert werden.*

### Die Deponie als Archiv verstehen

Ablagerungen, die von Menschen in früheren Zeiten angelegt wurden, bilden geeignete Archive für die Beurteilung des Langzeitverhaltens von Abfallgütern. Solche Archive sind dafür insbesondere dann gut geeignet, wenn die Ablagerung relativ geordnet erfolgte, d.h. wenn nur Abfälle gleicher oder sehr ähnlicher chemisch-physikalischer Eigenschaften miteinander abgelagert wurden.

Archive sind aber auch geogene Ablagerungen (Sedimente, Gesteine, Böden, Erze). In ihnen widerspiegeln sich die Prozesse von Lösung (chemi-

scher Verwitterung), Transport und Ausfällung (Anreicherung) von natürlichen Stoffen. Aus den Kenntnissen der Eigenschaften und des Verhaltens geogener Ablagerungen, lassen sich einerseits Qualitätsanforderungen an das Deponiegut (Endlagerqualität) und andererseits Standortkriterien ableiten. Falls wir wissen, wie die entsprechenden Ablagerungen bzw. Ablagerungsgüter entstanden sind, werden Prognosen hinsichtlich des Langzeitverhaltens und der Standorteignung wesentlich verlässlicher.

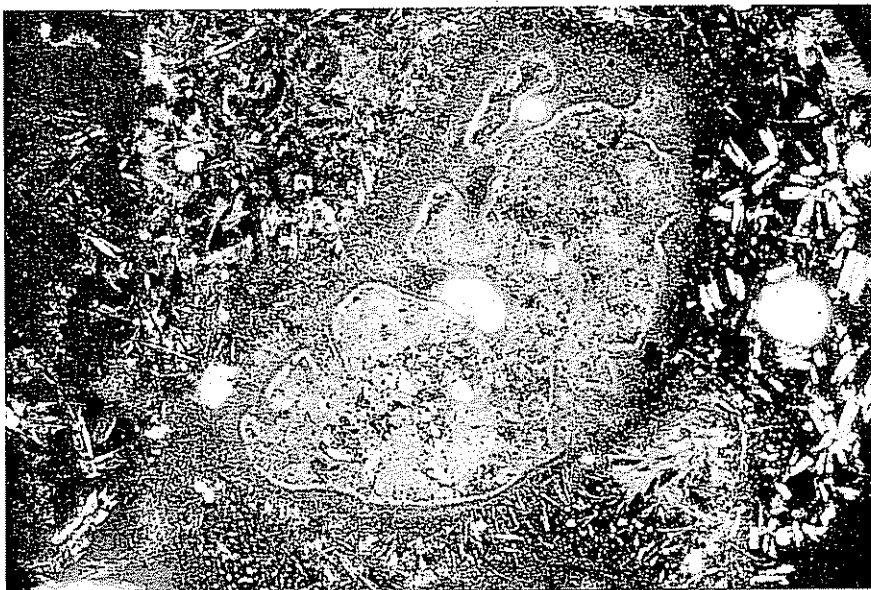
Der Wechsel weg von der direkten Deponierung von Siedlungsabfällen hin zu einer Vorbehandlung über Kehrichtverbrennungsanlagen war ein

wichtiger Schritt hin zu einer geordneteren Deponierung: Verbrennungsrückstände haben bereits wesentlich definiertere Eigenschaften als unbehandelter Siedlungsabfall und verlangen eine geringere Nachsorge [1].

Die Produkte unserer heutigen Abfallbehandlungsanlagen haben dennoch keine Endlagerqualität. Emissionen aus anorganischen Rückständen der Verbrennung bestehen hauptsächlich aus Salzen und zum Teil Schwermetallanionen. Obwohl die Schwermetallkationen in den Sickerwässern nur in geringen Konzentrationen auftreten, sind sie während Jahrhunderten zu erwarten [2]. Im Vergleich dazu liegt die Lebensdauer von technischen Barrieren in der Grössenordnung von Jahrzehnten. Es wäre also falsch, sich alleine auf die technischen Barrieren zu verlassen. Es ist deshalb essentiell, die kontrollierenden Faktoren für die Sickerwasserqualität und die Rolle des geologischen Untergrundes in ihrer Funktion als geologische Barriere zu verstehen.

Deponieplanung umfasst verschiedene technische und ökonomische Aspekte. In diesem Beitrag möchten wir nur auf zwei technische Aspekte eingehen, nämlich die Qualität des Deponiegutes und die Erkundung des Deponiestandortes. Unser Ziel besteht darin, künftige Ablagerungen so anzulegen, dass Wasser, Boden und Luft im Umfeld der Deponie in ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften nicht beeinträchtigt werden und dass die Ablagerungen nachfolgenden Generationen als Ressource zur Verfügung stehen.

Wir möchten am Beispiel der Kehrichtschlacke aufzeigen, wie sich das Langzeitverhalten aus der Kenntnis ihrer Entstehung und der Eigenschaften ableiten lässt. Im zweiten Teil wird



**Fig. 1**  
*Kehrichtschlacke im Durchlichtmikroskop (Dünnschliff)*  
*Schmelzprodukt mit getriebener, mikrokristalliner Kernzone; Gelsaum und nadeligem Kristallaufwuchs (Silikate), eingebettet in eisenoxidreicher silikatischer Matrix mit nadeligen bis stengeligen Silikatkristallen unterschiedlicher Art.*

diskutiert, welche Bedeutung die Inhomogenität des Untergrundes hat, für den Fall, dass Stoffe vom Deponiekörper freigesetzt werden.

## Beispiel Kehrichtschlacke

### Zusammensetzung

Kehrichtschlacken aus Rostfeuerungen bestehen aus Aschen, Schmelzprodukten und materialspezifischen Komponenten. Aschen und Schmelzprodukte bilden zusammen die Schlackenmatrix. Die Aschen sind ein Gemisch von:

- anorganischen Rückständen aus der Verbrennung von Kunststoffen, Papier, Karton und pflanzlich/tierischen Abfällen,
- Russpartikeln aus der unvollständigen Verbrennung,
- nichtbrennbaren Staubpartikeln, die mit dem Abfall in den Ofen eingebracht werden, und
- feinkörnigem Abrieb aus Bruchglas, Keramik, Gesteins- und Metallkomponenten, bzw. derer Korrosionsprodukte.

Gemeinsames Merkmal aller Aschepartikel ist ihre geringe Korngrösse: Die Partikelgrössen liegen in den Bereichen von Ton (<0.002 mm), Silt (bis 0.063 mm) und Sand (bis 2 mm).

Die Partikel mit Durchmesser von über 2 mm lassen sich als separate Komponenten erfassen und einer spezifischen Materialkategorie zuordnen. Es sind dies insbesondere Bruchglas, Keramik, Gesteinsbruchstücke, Metallteile und nicht oder nicht vollständig mineralisierte organische Resten.

Die Schmelzprodukte treten als mm- bis cm-grosse, unregelmässig geformte Klumpen auf. Es handelt sich um erstarrte Schmelzen überwiegend silikatischer Zusammensetzung. Die Art und Assoziation der Festkörperphasen wechselt im mm-Bereich oder noch kleinräumiger. Diese Phasen entstehen bei der Abkühlung der Schmelzen. Sie sind zum grösseren Teil amorph (glasartig) mit vielfältigen Auskristallisationen (Silikate und Oxide). Wie sich aus der Zusammensetzung und Geometrie der Schmelzprodukte ableiten lässt, sind es Produkte kleinräumiger Auf-

schmelzung im Rostofen der Kehrichtverbrennungsanlage, KVA [3].

Silizium, Kalzium, Eisen, Aluminium, Kalium und Magnesium machen als Oxide diese Hauptkomponenten etwa 95% des Gesamtgewichtes der Kehrichtschlacke aus. Die Konzentrationen potentiell umweltbelastender Stoffe, wie Salze, organische Stoffe und Schwermetalle sind gegenüber der geogenen Referenz (Gesteine der Erdkruste) um Grössenordnungen erhöht. Sie befinden sich im g/kg Bereich. Ihr Auswaschverhalten hängt in unterschiedlichem Masse vom Verhalten der Hauptkomponenten ab. Die Konzentrationen der löslichen Salze werden eher durch physikalische Prozesse bestimmt (Wasser-/Wärmehaushalt). Die physikalischen Prozesse können aber ihrerseits durch die Reaktivität der Hauptkomponenten beeinflusst sein (Wärmeentwicklung). Das Verhalten der organischen Verbindungen hängt neben den Milieubedingungen auch von der Zusammensetzung und den Abbauprozessen des organischen Ausgangsmaterials ab [4].

Für die Mobilität der Schwermetalle sind hauptsächlich die Hauptkomponenten massgebend. Sie kontrollieren die Sickerwasserzusammensetzung (vor allem pH) sowie Adsorptions- und Kationaustausch-Kapazität der Kehrichtschlacke.

Prognosen über die Sickerwasserzusammensetzung können nur mittels Kenntnissen der geochemischen Eigenschaften der Kehrichtschlacke gemacht werden. Ihre Zusammensetzung und ihr Verhalten als Funktion der Zeit sind massgebend für die Sickerwasserqualität und die allfällige Freisetzung von Schwermetallen in den Untergrund.

### Langzeitverhalten der Kehrichtschlacke

Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass die leichtlöslichen Salze die

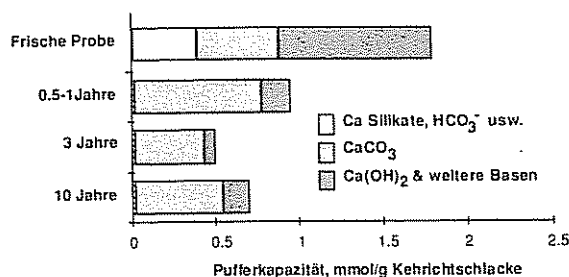


Fig. 2  
Pufferkapazität von frischer und gelagerter Kehrichtschlacke. Die gelagerten Proben stammen von der Deponie Riet, Winterthur.

Sickerwasserzusammensetzung dominieren. Natrium und Kalium treten als Hauptkationen im Eluat auf. Gegenionen sind Hydroxid, Chlorid und Sulfat. Die Konzentration von Kalzium wird in der Regel durch die Ausfällung von Gips kontrolliert. Basische Eigenschaften sind typisch für Verbrennungsrückstände. Die meisten Schwermetalle bleiben praktisch immobil, obwohl im stark basischen pH-Bereich negativ geladene Hydroxidkomplexe die Löslichkeit der Schwermetalle begünstigen.

Dabei muss erwähnt werden, dass die bisherigen Untersuchungen, obwohl sie über ein Zeitraum bis zu 20 Jahre angedauert haben, als Momentaufnahmen zu werten sind.

### Was passiert in der deponierten Schlacke?

Die glasartigen Neubildungen aus der Kehrichtverbrennungsanlage sind wenig stabil. Nach der Ablagerung beginnen sie unter den veränderten Bedingungen der Deponie zu reagieren (Fig. 1). Nach Tagen bis Monaten setzt eine Hydratation ein (Gelbildung). Es bilden sich gelartige Hüllen um die einzelnen Schmelzprodukte. Daraus beginnen aus der Zementchemie bekannte Kalziumsilikathydrat-Phasen auszukristallisieren. Ähnliche Vorgänge sind auch aus der Umwandlung vulkanischer Gläser bekannt. Kleine Partikel mit grosser Oberfläche reagieren schnell. Massigere Schmelzprodukte brauchen länger. Je grösser und vielfältiger die Kontaktflächen zwischen den Partikeln sind, desto grösser ist die Reaktivität. In Kehrichtschlacken reagieren vorerst mit der Asche vermischte kleine Schmelzproduktpartikel. Sie führen innert Monaten zu einer Verfestigung der Ablagerungen. Weil aber die Schmelzprodukte in der Schlackendeponie überwiegend massig auftreten, ist nach Jahrzehnten der Grossteil noch

immer in unveränderter Form vorhanden. Entsprechend bleibt deren Reaktionspotential über sehr viel grössere Zeiträume erhalten. Ausser diesen tragen weitere Inhaltstoffe, z.B. Eisen und Aluminiummetall, zur langfristigen Reaktivität bei.

In der unter freiem Himmel gelagerten Kehrriechtschlacke laufen Reaktionen ab, die die basischen Eigenschaften neutralisieren und langfristig zu sauren Bedingungen führen. Eine Reduktion der Säure-Pufferkapazität wurde bei der Lagerung von frischen Schlacken schon innerhalb von Wochen beobachtet [5]. Titrations von Schlacken, die bis zu 10 Jahren in der Deponie Riet gelagert wurden, zeigen, dass die Pufferkapazität gegenüber frische Schlacke wesentlich kleiner ist und ausschliesslich aus Kalziumkarbonat besteht (Fig. 2).

Da die basischen Eigenschaften frischer Schlacke hauptsächlich durch die Kalziumverbindungen bedingt sind, hat die Reaktivität der Kalziumverbindungen einen grossen Einfluss auf die Entwicklung der Pufferkapazität und damit auf das Langzeitverhalten. Kalzium ist zu etwa einem Sechstel als Kalziumcarbonat, einem Sechstel als Hydroxid oder lösliche basische Kalziumsilikate und zu zwei Dritteln als weniger lösliche Verbindungen, wahrscheinlich auch Kalziumsilikate, vorhanden [6]. Die Neubildung von unlöslichen Kalzium-Verbindungen ist ein dominanter Prozess in Schlackenablagerungen, welche sich in Schlackenablagerungen über die ersten Jahre erstreckt. Sie steht im direkten Wettbewerb mit der Bildung von Kalziumcarbonat.

Der Abbau der Pufferkapazität wird durch die Zufuhr von Säuren, interne Neutralisationsreaktionen und die Auswaschung von Basen bewirkt. Die auffällige Reduktion der Pufferkapazität in den ersten Jahren wird höchstwahrscheinlich durch interne Neutralisationsprozesse und Einbindung von Kalzium in unlöslichen Verbindungen verursacht. Säuren die über die nasse Deposition in den Schlackenkörper eingetragen werden oder durch Reaktionen im Schlackenkörper entstehen, spielen eine eher untergeordnete Rolle.

Die interne Säureproduktion, die durch die Oxidation von Eisensulfiden verursacht wird, dürfte nur zu einer geringen Abnahme der Pufferkapazität bis zu etwa 5% führen. Hingegen dürfte ein Abbau des organischen Kohlenstoffes (durch mikrobielle Prozesse) einen grösseren Einfluss auf die Pufferkapazität haben [5]. Allerdings ist über die Kinetik wenig bekannt. Die Auswaschrates von Basen hängt von deren Löslichkeit ab. In älteren Ablagerungen ist Kalziumcarbonat, deren Löslichkeit vom Kohlendioxidpartialdruck kontrolliert wird, der dominante Puffer.

#### Schwermetall-Mobilität

Die Reaktivität der Kehrriechtschlacke hat eine Bedeutung für die Mobilität der Schwermetalle. Schwermetallkationen, deren Mobilität durch Bildung von schwerlöslichen Festphasen und Adsorptionsvorgängen begrenzt ist, werden als Folge des Abbaus der Pufferkapazität freigesetzt. Aus den obigen Überlegungen kann geschlossen werden, dass die Pufferkapazität zwischen dem Karbonatgehalt und dem gesamten basischen Kalziumgehalt der frischen Schlacke liegen könnte, solange keine Ansäuerung über den Abbau von organischen Verbindungen geschieht. Ausgehend von einem homogen reagierenden Block ohne bevorzugte Sickerwege mit einem Kalziumcarbonatgehalt von etwa 0.5 mmol/g (5%) und einem jährlichen Wassereintrag (pH 4.3) von 400 L/m<sup>2</sup> ergibt sich bei einem CO<sub>2</sub>-Partialdruck von 0.0003 atm eine Neutralisierungsrate (Summe der ausgetragenen Kalziumionen und der eingetragenen Säure) von etwa 0.2 mol·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>. Dies bedeutet, dass der Karbonatpuffer in einer Schichtdicke von etwa 1m nach etwa 4000 Jahren erschöpft ist. Es muss aber erwähnt werden, dass präferentielle Sickerwege, unbekannt Reaktionen oder Kinetik eine Prognose erschweren. Äussere Einflüsse spielen bei geringmächtigen Ablagerungen eine weit grössere Rolle als bei mächtigen Ablagerungen in einer Monodeponie.

Für die Praxis bedeutet dies, dass bei der heutigen Qualität der Schlacke

die Ablagerung in einer Deponie einer Ablagerung in einer geringmächtigen Strassenschicht vorzuziehen ist.

#### Der Deponiestandort

Ursprünglich wurden als Deponiestandorte generell Gruben gewählt, die anschliessend an die Ausbeutung ihrer Rohstoffe (Ton, Sand, Kies, Kalk) mit Deponiegut unterschiedlichster Zusammensetzung aufgeschüttet wurden. Diese Kategorie von Deponie-Standorten finden wir heute in den Altlastenkatastern wieder.

Besser geeignet und gesetzlich vorgeschrieben sind Standorte, deren geologischer Untergrund aus schlecht durchlässigen Sedimenten besteht oder in denen die austretenden Deponie-Sickerwässer keine Grundwasservorkommen oder Fliessgewässer beeinträchtigen können.

Das Ziel des Leitbildes für die schweizerische Abfallwirtschaft [EKA, 1986] und der Technischen Verordnung über Abfälle (TVA), ist es, die Abfälle in einen stabilen chemisch-physikalischen Zustand zu überführen. Dies würde die Suche nach geeigneten Deponiestandorten stark erleichtern.

Auch dann noch werden aber in Zukunft hochkonzentrierte Rückstände anfallen, die nur unter speziellen Bedingungen (z.B. pH oder Oxidationsbedingungen) über lange Zeiträume stabil bleiben. Die geologische Standortauswahl bleibt also von Bedeutung. Einerseits haben die geogenen Wirtsgesteine einer Deponie die Funktion einer weiteren Barriere, andererseits müssen sie stabile Lagerungsverhältnisse garantieren. Die Standortauswahl verlangt Kenntnisse der Gesteins-Wasser-Wechselwirkungen und der Wasserwege. In beiden Fällen spielt die Inhomogenität des Untergrundes eine wesentlich Rolle. Unter Inhomogenitäten des Untergrundes verstehen wir z.B. die räumliche Anordnung der unterscheidbaren Lithologien (Gesteinseinheiten), die Verteilung der hydraulischen Eigenschaften, die Verteilung der Oberflächen-Eigenschaften der Mineralien.

### Inhomogener Untergrund

Inhomogenität sei am Beispiel von glazialen Ablagerungen, die häufig als Deponie-Standorte ausgewählt wurden, verdeutlicht. Glaziale Ablagerungen umfassen viele mögliche Elemente:

- Grundmoränen (dichte, feinkörnige Sedimente mit gröberen Klasten Gesteinskomponenten), oft schlecht durchlässig)
- Stirn-Moränen (heterogener Aufbau, teilweise mit Rutschungssedimenten, verschiedene Typen von schlecht sortierten Sedimenten mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten)
- Seesedimente (Sande, Silte, Tone, eher gering durchlässig)
- fluviale Ablagerungen in Eistunnel (häufig Schotter, eher hohe Durchlässigkeiten)
- Schmelzwasserströme (Flussebenen im Vorfeld der Gletscher, Schotter, Sande, vielfach hohe Durchlässigkeiten, grosse Heterogenitäten) usw.

Ein wesentliches Merkmal solcher komplexer Systeme sind die kurzen Distanzen, in denen die Änderungen der Lithologien auftreten können [7]. Dies macht Prognosen über die geologischen Strukturen ausserordentlich schwierig. Diese Schwierigkeiten sind am folgenden Beispiel angedeutet. Fig. 3 zeigt zwei Bohrkern, wie sie bei einer Deponie im Abstand von ca. 20–30 m entnommen wurden. Wie verlaufen die unterscheidbaren Lithologien dazwischen? Dürfen die unterscheidbaren Horizonte zwischen den beiden Bohrungen einfach interpoliert werden? Das vervollständigte Bild, eine Ansicht einer Kiesgrube im oberen Thurtal, gibt eine deutliche Antwort.

Da es praktisch unmöglich ist, die Inhomogenitäten des Untergrundes je vollständig zu kennen, sind wir auf konzeptionelle Modelle der Entstehung einer bestimmten Ablagerung (Faziesmodelle) angewiesen. Dies ist möglich, weil die Inhomogenitäten des Untergrundes einer bestimmten Logik folgen, die durch selektive Sortierungsprozesse während des Transportes und der Ablagerung der Sedimente bestimmt wurde. Die zahlreichen Mög-

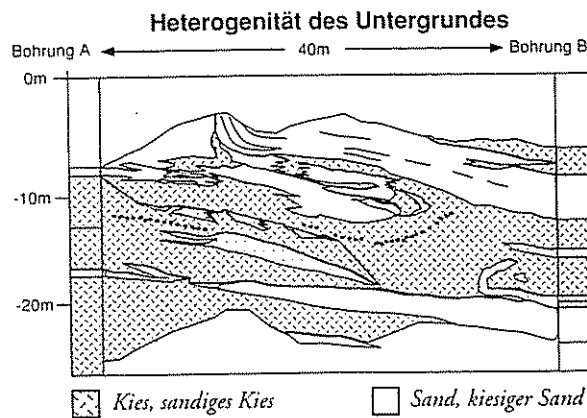


Fig. 3  
Kiesgrube Jonschwil (Thurtal). Komplexe Verformungen der Sedimentabfolgen deuten auf Eistektonik oder Rutschungen (slumps) als mögliche Ursache hin.

lichkeiten und Kombinationen von Prozessen lassen das Endprodukt vielleicht als chaotisch erscheinen.

Solche sogenannten Faziesmodelle liefern uns Angaben über die wahrscheinliche Anordnung und Dimension von Sedimentabfolgen. Dabei spielen Überlegungen zur Genese eines bestimmten Sedimenttyps sowie seiner möglichen Nachbarn eine Rolle. Aus Sedimentstrukturen in Bohrkernen lassen sich gewisse Rückschlüsse auf das Ablagerungsmilieu und mögliche benachbarte Milieus ziehen, vorausgesetzt, es gelingt, die Sedimentstrukturen während des Bohrvorgangs weitgehend zu erhalten. Dies ist bei feinkörnigen Ablagerungen teilweise möglich, bei grobkörnigen Gesteinen (Grobklastika) nach wie vor ein ungelöstes Problem.

Die Erkundung der Inhomogenitäten stützt sich heute neben den Bohrungen weitgehend auf ultrahochoflösende geophysikalische Methoden wie Seismik, Georadar, elektromagnetische und elektrische Methoden [8]. Zusammen können diese Methoden das scheinbare Chaos etwas entschlüsseln. Zusammenfassend sind Modelle bzw. Überlegungen zur Genese der Ablagerungssequenzen für uns nichts anderes als Karten, welche die Wege bei der Erforschung des Unbekannten angeben, also beispielsweise eine Optimierung von Probenahmestandorten erlauben.

### Schlussfolgerungen

Das Verständnis der Entstehung und Eigenschaften des Deponiegutes sowie des Untergrundes ist eine wichtige Voraussetzung für die Planung neuer Deponien.

In der Kombination petrologischer, geochemischer und hydrologischer Kenntnisse lässt sich das Langzeitverhalten eines Deponiegutes verlässlicher abschätzen. Nur mit Kenntnissen der Gesteineigenschaften bezüglich Durchlässigkeit oder Wechselwirkungen mit Sickerwasserinhaltsstoffen kann der Untergrund in seiner Funktion als geologische Barriere verstanden werden.

Zudem ermöglichen die Kenntnisse der geologischen Eigenschaften und der Genese des geogenen Umfeldes, einen Standort in bezug auf die Konstanz der Lagerungsbedingungen zu beurteilen. Solche Beurteilungsansätze geben auch Impulse für die Optimierung der Behandlungstechnologien.

- [1] Baccini P., Belevi H. und Lichtensteiger T. (1992) Die Deponie in einer ökologisch orientierten Volkswirtschaft. Gaia, 1, 34.
- [2] Belevi H. und Baccini P. (1991) Long-Term assessment of leachates from municipal solid-waste landfills and bottom ash monofills, J. Resource Manag. Technol., 19, 68–73.
- [3] Deponierung fester Rückstände aus der Abfallwirtschaft (1994), P. Baccini und B. Gamper (Hrsg.), vdf.
- [4] Johnson C.A., Brandenberger S. und Baccini P. (1994) The acid neutralizing capacity of municipal waste incinerator bottom ash, Von Environ. Sci. Technol. akzeptiert.
- [5] Agustoni N., Belevi H., Egli TH., Baccini P. (1991), Influences of biodegradation of organic compounds on the long-term behaviour of bottom ash monofills. Final report BIOMEGA, EAWAG Project (unveröffentlicht)
- [6] Belevi H., Stämpfli D.M. und Baccini P. (1992) Chemical behaviour of municipal solid waste incinerator bottom ash in monofills, Waste Manag. Res., 10, 153–167.
- [7] Huggenberger P. (1992) Requirements for waste disposal in the Molasse. Symposium Swiss Molasse Basin Ecol. Geol. Helv., 85(3), 765–798.
- [8] Huggenberger P., Meier E. und Pugin (1994) Ground-probing radar as a tool for heterogeneity estimation in gravel deposits: advances in data processing and facies analysis. J. Appl. Geophys., 31, 171–184.

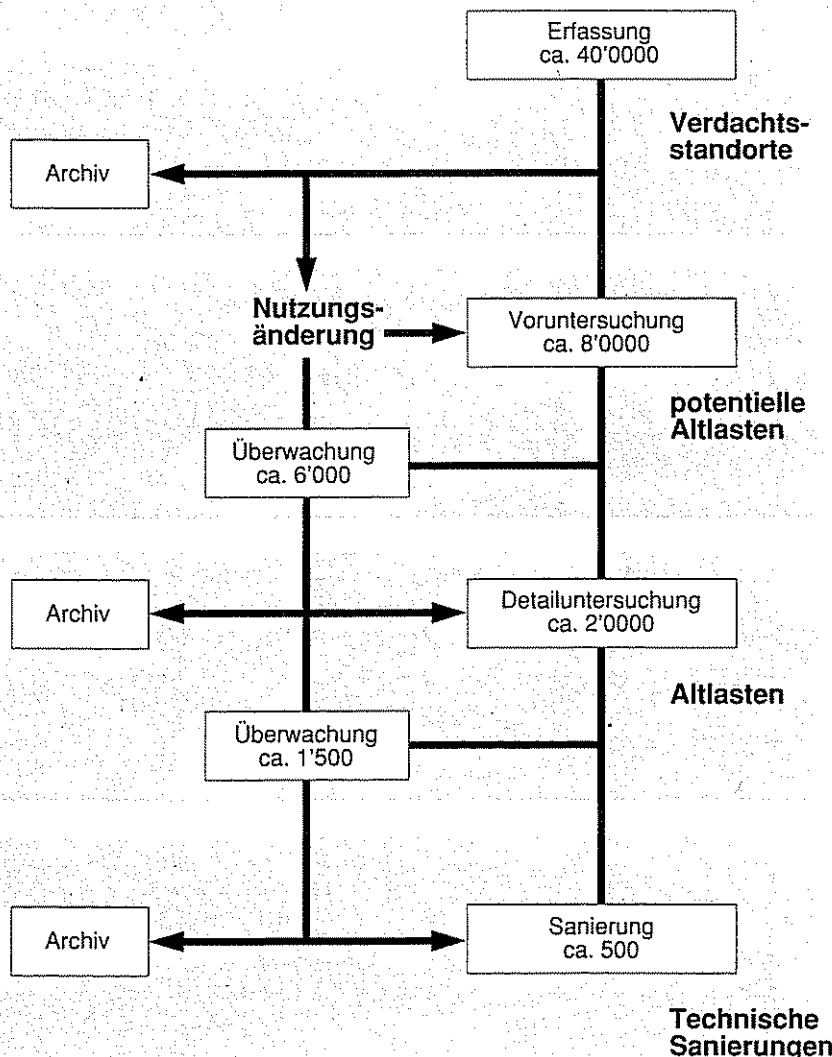
# Altlasten:

## Lösungsansätze aus Sicht der Umweltwissenschaften und des Risk Managements



Alexander J.B. Zehnder

Basierend auf den kantonalen Erhebungen bzw. Schätzungen rechnet das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) mit ca. 30'000 bis 40'000 vermutlichen Altlastenstandorten in der Schweiz. Von diesen müssen voraussichtlich 20% im Detail untersucht werden. Für ca. 500 Altlasten werden aufwendige Sanierungsmassnahmen erforderlich sein, deren Gesamtkosten auf ca. 4 Milliarden Franken veranschlagt werden. Bei einer Verteilung dieser Kosten über 20 Jahre entfielen für die Sanierungsaktion auf jede Person in der Schweiz pro Jahr 30 Franken. Die Schweiz steht heute erst am Beginn einer systematischen Altlastensanierung. Dabei sind sowohl auf wissenschaftlicher wie auch auf politischer Ebene Probleme zu lösen.



### Angestrebte Ziele

Im Sinne des Zweckartikels des Umweltschutzgesetzes (USG) geht es bei bereits identifizierten Altlasten darum, «Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume gegen schädliche oder lästige Einwirkungen zu schützen und die Fruchtbarkeit des Bodens zu erhalten». Die in diesem Gesetz formulierten ideellen Schutzziele wurden in zahlreichen Verordnungen konkretisiert.

### Auftretende Probleme

Beim Versuch, die Ziele durch präzise, wissenschaftliche Fragestellungen festzulegen, tauchen in der Regel folgende Probleme auf:

1. Die Schadstoffe (Art, Menge, Eigenschaften), d.h. die eigentliche Gefahr bzw. das *Gefahrenpotential*, sind nicht bekannt.
2. Die physikalischen, chemischen, biologischen und (hydro-) geologischen Informationen in und rund um die Altlast fehlen oder sind nur lückenhaft vorhanden. Dadurch können über die Ausbreitung und die *Wirkungspfade* (Wege der Freisetzung der Stoffe) im besten Fall nur Hypothesen aufgestellt werden. Diese Wege hängen sowohl vom geographischen Ort, der Struktur, der

Fig. 1  
Konzept für die Beurteilung von Altlasten (aus [1])

Chemie und Biologie des Bodens und Untergrundes als auch von den Eigenschaften der Schadstoffe selbst ab.

3. Die Umschreibung einer *Gefährdung* impliziert eine auf eine bestimmte Situation oder ein bestimmtes (Schutz-) Objekt gerichtete Gefahr. Dabei stellt sich nicht nur die Frage nach dem Risiko, sondern auch nach der Umschreibung der Schutzziele.

Die Umschreibung von Schutzzielen ist nicht nur eine philosophische Grundsatzklärung. Sie bildet die Basis für die Entscheidungen, ob eine Verdachtsfläche eine Altlast ist, ob diese Altlast saniert werden muss, und bis zu welchem Grad eine Sanierung im speziellen Fall nötig ist. Das tönt relativ einfach. Die Definition von Schutzzielen wird aber erschwert, einerseits durch die Frage nach dem Risiko und andererseits, eng damit verbunden, dem rationalen Umgang mit Unsicherheiten. Politiker tun sich im allgemeinen schwer mit der Qualifikation eines Schadenausmasses und der Toleranz von Unsicherheiten. Ob ein Schadenausmass gering, marginal, kritisch oder katastrophal ist und wieviel Unsicherheit noch akzeptabel ist, sind politische Entscheide, für welche die gewählte Behörde die Verantwortung übernehmen muss. Ohne diese Entscheide oder zumindest einen Konsens, wie solche Entscheide getroffen werden, kann die Altlastenproblematik in der Schweiz nicht effizient gelöst werden.

Viele Erkenntnisse aus den Umweltwissenschaften, aus der Umwelttechnik und aus dem Risk Engineering können im Rahmen der Altlastenproblematik sinnvoll eingesetzt bzw. weiterentwickelt werden.

Im folgenden haben wir einige Gedanken und Ideen zu den oben erwähnten Problemen und zum weiteren Vorgehen formuliert.

## Gefahrenpotential

Aufgrund der historischen Entwicklung und der heutigen Wirtschaftsstruktur ist in der Schweiz mit folgen-

den Schadstoffen und Altlastentypen zu rechnen:

- Mineralöle, Treibstoffe (aus Lager- und Umschlagplätzen, Unfällen entlang von Transportwegen)
- Chlorierte Kohlenwasserstoffe (aus chemischen Reinigungen, metallverarbeitenden Industrien, Produktion von Elektronikbestandteilen)
- Agrochemikalien (Produktion, Lagerung, Verteilung von Düngemitteln und Pestiziden)
- Schwermetalle (aus galvanischen Betrieben, Gerbereien)
- Schadstoffgemische bei Alt-Standorten von Chemie- und Gaswerken
- Deponien (zugedeckte, in bezug auf den genauen Inhalt unbekannte und unkontrollierte Ablagerungen von Abfallstoffen aus Haushalten, Gewerbe und Industrie).

Keine oder nur spärliche Informationen sind vorhanden über Altlasten aus der Rüstungsindustrie sowohl bei Produktionsstätten als auch bei Testgeländen oder bei Entsorgungsplätzen. Da die Schweiz ein rohstoffarmes Land ist, können grossflächige Altlasten aus der Gewinnung von Rohstoffen (Erze, fossile Brennstoffe, Grundstoffchemikalien) praktisch ausgeschlossen werden.

Im Altlastenkataster des Kantons Aargau z.B. sind total 3565 Altlastenverdachtsflächen, verteilt über 232 Gemeinden, aufgeführt. Diese Verdachtsflächen können wie folgt typisiert werden: 29% offene, unverfüllte (d.h. noch nicht volle) Gruben, 18% Kehrichtdeponien, 24% Aushub-, Bauschutt- und Inertstoffdeponien, 7% Multikomponenten-Deponien ohne Bauschutt, 5% Kehrichtdeponien mit Sondermüll, 1% Sondermülldeponien, 5% Deponien mit unbekanntem Inhalt, 8% kontaminierte Industriestandorte und 3% Standorte mit wasergefährdenden Flüssigkeiten.

In einer alten Industriestadt wie Winterthur wurden 850 Verdachtsflächen identifiziert. Davon sind 200 Auffüllungen, 50 Unfallstandorte und 500 Industriestandorte.

Diese Zahlen zeigen, wie zahlreich und unterschiedlich die Altlasten in der Schweiz sind. Die meisten Kantone

haben in der Zwischenzeit ihre Verdachtsflächen identifiziert oder sind daran, dies zu tun. Einige haben mit dem Aufstellen eines Altlastenkatasters erst begonnen.

Das BUWAL [1] hat ein Konzept für das Vorgehen bei der Beurteilung von Altlasten ausgearbeitet. Das Vorgehen ist in vier Phasen unterteilt (Fig. 1):

1. Erfassung und Erstbewertung von Verdachtsstandorten mit dem Ziel einer raschen und kostengünstigen Erfassung zahlreicher risikobehafteter Standorte und einer Prioritätenfestlegung für den weiteren Handlungsbedarf mittels qualitativer Risikobewertung.
2. Voruntersuchung und Zwischenbewertung mit dem Ziel einer schutzgutbezogenen Abklärung der Umweltgefährdungen im Einzelfall.
3. Detailuntersuchungen und abschliessende Bewertung zur Abklärung der Sanierungsbedürftigkeit einer Altlast.
4. Sanierungsprojekt, Sanierung und Nachkontrolle.

Heute ist in der Schweiz die erste Phase noch nicht vollständig abgeschlossen. In jeder Phase muss nun eine dem Ausscheidungsprozedere angepasste Gefährdungs-Evaluation durchgeführt werden. Im Prinzip geht es jeweils darum, innerhalb definierter Systemgrenzen die Gefahren zu identifizieren bzw. die Wirkungspfade zu kennen und die Eintretenswahrscheinlichkeit abzuschätzen (Fig. 2). Die Evaluation wird mit jeder Phase aufwendiger und kostspieliger. Die Herausforderung besteht insbesondere darin, in den Phasen 2, 3 und 4 mit vertretbarem Aufwand einen Entscheid über die Einstufung einer Altlast zu fällen bzw. den weiteren Handlungsbedarf zu formulieren.

## Wirkungspfade

Informationen über Wirkungspfade basieren auf streng natur- und ingenieurwissenschaftlichen Kriterien. Die Wege der Freisetzung von Stoffen hängen von zwei Faktoren ab, nämlich den Stoffeigenschaften selbst und der Art und Zusammensetzung des Unter-

## Risiko-Evaluation von Altlasten

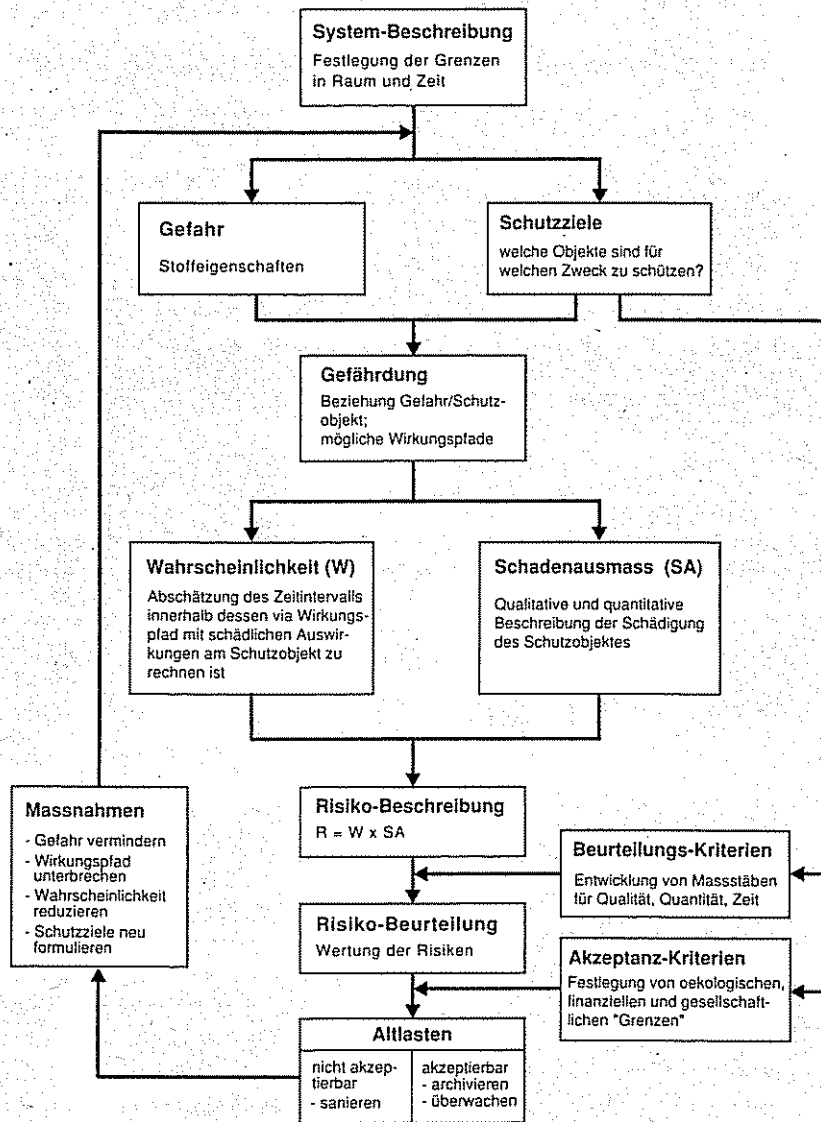


Fig. 2  
Schema für die Risiko-Evaluation von Altlasten.

grundes bzw. der Umgebung, in welcher sich die Altlast befindet.

Die verschiedenen Stoffe können auf Grund ihrer Eigenschaften in sechs Klassen eingeteilt werden:

- (i) wasserlöslich, mobil, flüchtig und reaktiv bzw. abbaubar; dazu gehören Bestandteile von Benzin oder Abbauprodukte aus Kehrtrichtdeponien.
- (ii) wasserlöslich und mobil; z.B. Bestandteile von Benzin und Heizöl.
- (iii) wasserlöslich, sorbiert stark, flüchtig und reaktiv bzw. abbaubar; z.B. Aceton, Toluol, Xylol etc.
- (iv) wasserlöslich, sorbiert stark, nicht flüchtig, ev. reaktiv und abbaubar;

z.B. Nitroverbindungen, chlorierte Phenole.

- (v) wasserunlöslich, leichter als Wasser; z.B. Benzin als Ganzes und andere Treibstoffe.
- (vi) wasserunlöslich, schwerer als Wasser; dazu gehören chlorierte Lösungsmittel und polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK).

Im englischen Sprachgebrauch wird für die Klassen (v) und (vi) die Abkürzung LNAPL (less-dense-than-water non-aqueous-phase-liquid) bzw. DNAPL (denser-than-water non-aqueous-phase-liquid) gebraucht.

Der Boden kann in fünf Kategorien eingeteilt werden:

- (i) homogen, einschichtig;
- (ii) homogen, mehrschichtig;
- (iii) heterogen, einschichtig;
- (iv) heterogen, mehrschichtig
- (v) zerklüftet.

In der Schweiz kommen von homogenen Schotterablagerungen bis zu zerklüftetem Karst alle Kategorien vor. Es müssen also in jedem Falle die hydrogeologischen Bedingungen abgeklärt werden.

Die obigen Klassifizierungen erlauben nicht nur, die Wege der Freisetzung abzuschätzen und damit mögliche Gefahren zu identifizieren, sondern teilweise auch die Schwierigkeiten bei der Sanierung kontaminierter Böden vorherzusagen (Tabelle 1).

### Das Risiko einer Altlast oder Sanieren – mit welchem Risiko?

Die Bedeutung der bei der Altlasten-Problematik zu treffenden Entscheide wird offensichtlich, wenn man den in Fig. 1 geschilderten Phasen die mutmasslichen Kosten zuordnet:

- Erfassung von 40'000 Verdachtsflächen: ca. 50 Mio
- Voruntersuchung von 8'000 potentiellen Altlasten: ca. 250 Mio
- Detailuntersuchung von 2'000 Altlasten: ca. 500 Mio
- Sanierung von 500 Altlasten: ca. 2'500 Mio

Werden bei diesen Ausscheidungsverfahren nicht die «richtigen» Altlasten saniert, so ist bereits bei einer Fehler-rate von 10% (d.h. 50 von 500 Altlasten) mit möglichen Fehlinvestitionen in der Grössenordnung von 250 Mio zu rechnen.

Die im klassischen Risk Engineering gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit Unsicherheiten können auch in der Altlasten-Problematik angewendet werden. Die nachfolgenden Ausführungen nehmen Bezug auf den in Fig. 2 skizzierten Ablauf.

An den Anfang gehört eine System-Beschreibung, d.h. eine (eventuell zu sanierende) Altlast muss als System bezüglich Raum, Mensch und Umwelt sowie Zeit abgegrenzt werden.

Die in der Altlast vorhandenen Stoffe stellen eine Gefahr dar, die sich möglicherweise nachteilig auf die Schutzziele auswirken kann. Man spricht von einer Gefährdung, wenn ein Gefahrenpotential mit einem zu schützenden Objekt in Beziehung gebracht wird.

Im engeren Sinn wird ein Risiko R mit der bekannten Formel als Multiplikation der Wahrscheinlichkeit (W) mit dem Schadenausmass SA ( $R=W \times SA$ ) beschrieben. Die Anwendung dieser einfachen Formel auf die Altlasten bringt eine Menge Probleme mit sich.

Die Wahrscheinlichkeit W ist ein Mass dafür, ob eine Freisetzung von Schadstoffen eintreten kann oder nicht. Daher müssen die möglichen Wirkungspfade eruiert werden und «worst case scenarios» sollten formuliert werden können. Mit der Wahrscheinlichkeit W wird also nicht das mögliche Vorhandensein eines Schadstoffes beschrieben, sondern ein Zeitintervall festgelegt, innerhalb dessen der Wirkungspfad zu einer effektiven Verkoppelung von Ursache und Wirkung führen kann. Es ist sicher pragmatisch vertretbar, bei Altlasten mit Zeiträumen von zehn bis tausend Jahren zu rechnen. Dies entspricht Wahrscheinlichkeiten von  $10^{-1}$  bis  $10^{-3}$ ; es ist daher nicht sinnvoll, mit Wahrscheinlichkeiten von  $10^{-4}$  bis  $10^{-7}$  operieren zu wollen.

Das Schadenausmass hängt direkt vom Schadstoffpotential ab, ist aber indirekt auch eine Funktion des Schutzziels bzw. des Wertes, der dem zu schützenden Objekt zugemessen wird. Ein typisches Schadenausmass könnte wie folgt umschrieben werden: «Ein für die Grundwassernutzung massgebender Grenzwert wird in einem Grundwasserstrom während 10 Jahren um einen Faktor 50 überschritten».

Da die Gefahr (Art und Menge der Schadstoffe) in der Regel nicht bekannt ist, bzw. die Bestimmung des Schadstoffpotentials von Stoffgemischen mit vielen Unsicherheiten behaftet ist, müssen verschiedene Werte (Maxima, Minima, Bandbreiten) angenommen werden. Für das Schadenausmass SA ergibt sich somit nicht eine einzige

Grösse, sondern eine ganze Serie  $SA_1, SA_2 \dots SA_n$ , bzw. eine Bandbreite von  $SA_{min}$  bis  $SA_{max}$ . Wie oben bereits angedeutet, wäre es unzweckmässig, die Unsicherheiten bezüglich Schadstoffpotential auch mittels Wahrscheinlichkeiten umschreiben zu wollen. Ein derartiges Vorgehen brächte höchstens Verwirrung und ausserdem stünde nicht die Lösung eines Problems, sondern die Methodik im Zentrum.

Das Risiko einer Altlast sollte demzufolge nicht mit einer einzigen Funktion (Kurve)  $R=W \times SA$ , sondern mit einer Kurvenschar  $R_i=W \times SA_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) beschrieben werden. Diese Kurvenschar kann diagrammartig (Wahrscheinlichkeit versus Schadenausmass) dargestellt werden, und es kann dabei auch der Versuch mit Akzeptanzlinien gewagt werden. Akzeptanzlinien müssen nur für den Bereich der relevanten Wahrscheinlichkeiten von  $10^{-1}$  bis  $10^{-3}$  festgelegt werden.

Es ist zu erwarten, dass bei einem derartigen Vorgehen auch ein Konsens hinsichtlich Risiko-Akzeptanz erzielt werden kann. Die vom Risiko Betroffenen haben die Möglichkeit, bei der Risiko-Diskussion mitzuwirken, die einzelnen Schritte sind (trotz der vielen Unsicherheiten) verständlich dargestellt, und das ganze Prozedere der Entscheidungsfindung ist transparent und nachvollziehbar. Im Gegensatz zur Darstellung von Risiken im

Bereich Kernenergie, wo die sogenannten «Risikoschwänze»  $0 \times \infty$  bzw.  $\infty \times 0$  im Vordergrund der Diskussion stehen, sollte bei Altlasten ein konstruktiver Risiko-Dialog eher möglich sein.

Im klassischen Risiko-Management geht es darum, mittels geeigneter Massnahmen die Risiken soweit zu reduzieren, dass diese innerhalb der Akzeptanzlinien liegen. Die Massnahmen sind jeweils mit Kosten verbunden. Mittels Kosten-Nutzen-Analysen oder Grenzkosten können die Massnahmen optimiert werden. Ob mit diesen traditionellen Methoden auch im Bereich Altlasten gearbeitet werden kann, bleibt vorläufig eine offene Frage. Die Zweifel an der Tauglichkeit eines derartigen Vorgehens sind noch stets gross, da es fraglich ist, ob mit statistischen Methoden ideelle und ökonomische Fragen der Zukunft wie Wertvorstellungen und Zahlungsbereitschaft für Umweltgüter überhaupt sinnvoll angepackt werden können.

Eines wird aus diesen Überlegungen deutlich: Die Altlasten-Problematik kann längerfristig und nachhaltig nicht durch Naturwissenschaftler und Ingenieure allein gelöst werden. Ökonomen werden immer wichtigere Gesprächspartner. Sinnvolle politische Entscheide in der Altlasten-Problematik können nur aufgrund einer sauberen Quantifizierung der Gefährdung und ihres Risikos und der damit ver-

	wasserlöslich mobil abbaubar/flüchtig	wasserlöslich mobil	wasserlöslich sorbiert stark abbaubar/flüchtig	wasserlöslich sorbiert stark nicht flüchtig ev. abbaubar	nicht wasserlöslich leichter als Wasser LNAPL	nicht wasserlöslich schwerer als Wasser DNAPL
homogen einschichtig	1*	1-2	2	2-3	2-3	3
homogen mehrschichtig	1	1-2	2	2-3	2-3	3
heterogen einschichtig	2	2	3	3	3	4
heterogen mehrschichtig	2	2	3	3	3	4
zerklüftet	3	3	3	3	4	4

\* 1 bedeutet geringe, 4 bedeutet sehr grosse Schwierigkeiten

Tabelle 1

Relative Schwierigkeit bei der Sanierung kontaminierter Grundwasserträger und Böden als Funktion ihrer geologischen Beschaffenheit und der Stoffeigenschaften (Verändert aus [2]).

bundenen Kosten gefällt werden. Letztlich wird aber entscheidend sein, ob es gelingt, zwischen ExpertInnen, Betroffenen und Verantwortlichen einen Dialog aufzubauen und Konsens-Lösungen zu realisieren.

## Blick über die Grenzen

Die Schweiz kann am meisten von den Erfolgen und Fehlern in Holland, Deutschland und den USA lernen.

In Holland werden kontaminierte Standorte mit Untersuchungsergebnissen oberhalb gesetzlich festgeschriebener Grenz- oder Richtwerte in jedem Fall saniert. Allerdings erweist sich diese Praxis als sehr unhandlich, da nur die Verunreinigungen bestimmt und dann nach starrem Muster gehandelt wird. Dabei wird jede entdeckte Fläche saniert, ohne Spielraum für unterschiedliches Handeln je nach Umfang der von der Altlast ausgehenden Gefahr oder der späteren Nutzung. Die Holländer sind momentan daran, die entsprechenden Gesetze und Verordnungen zu revidieren. In Holland werden jährlich rund 200 Millionen Gulden (ca. 154 Mio. SFrs.) durch den Staat für Sanierungen ausgegeben, und von 1986 bis 1994 lief ein 60 Millionen-Forschungsprogramm über Boden-sanierung.

In Deutschland wurden abgestufte Verfahren entwickelt, die anhand der bedrohten Schutzgüter und in gewissem Rahmen auch anhand der Nutzung Prioritäten setzen. Damit wurde gewährleistet, dass jede Altlast individuell angesehen wird. Solche mit schwerwiegenden Auswirkungen werden so auch vorrangig saniert. In Deutschland wurden in den letzten 12 Jahren durch das Bundesamt für Forschung und Technologie (BMFT) 200 Millionen D-Mark in Sanierungsprojekte und Technologieentwicklung investiert.

Im Bereich des Superfund in den USA sind bis heute 10 Millionen m<sup>3</sup> Boden saniert worden. Dies entspricht beinahe dem mutmasslichen Aushub der NEAT Gotthardlinie (14 Millionen m<sup>3</sup>). Die Amerikaner haben aber

auch im konzeptionellen Bereich grosse Fortschritte erzielt. Die jüngsten Entwicklungen der EPA (Environmental Protection Agency), nämlich der Superfund Accelerated Cleanup Model (SACM)[3] und der Leitfaden zur Festlegung von Sanierungszielen (Data Quality Objectives = DQO) [4], sind für die effiziente Anwendung von Risiko-evaluationen bei Sanierungen vielversprechend. Das SACM ist in erster Linie für die Anwendung durch die Behörden gedacht und optimiert deren Vorgehen. Das DQO legt Spielregeln fest, die es den verschiedenen Betroffenen bei einem Sanierungsfall erlauben, sich zügig über die Sanierungsziele einig zu werden. Die vier Schlüsselemente bei der DQO sind:

1. Strikte Trennung von politischen «Risiko-Zielen» und der technischen Diskussion von Alternativen.
  2. Übersetzung der politischen Forderungen – inkl. der schwierigen Definition der Toleranz von Ungewissheiten – in spezifische, konkrete und messbare Sanierungskriterien.
  3. Festlegung der zwischen allen Betroffenen erzielten Einigung in bezug auf kritische Anforderungen und Vorgaben der Sanierung.
  4. Einsatz des gesamten Arsenalen von technischen Optimierungsmöglichkeiten für die effizienteste Sanierung.
- Es wäre zu überlegen, ob nicht für die Schweiz ein DQO in abgewandelter Form gewisse Schwierigkeiten bei der Risiko-Evaluation lösen könnte.

## Schlussfolgerungen

*1. Die Abschätzung des Gefährdungspotentials einer Altlast hat auf der qualitativen und quantitativen Kenntnis der physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse in Raum und Zeit und den gegebenen (hydro-) geologischen Verhältnissen zu basieren.*

Die Frage ist, welche Detailkenntnisse nötig sind. Hier ist ein pragmatisches Vorgehen angesagt. Die Erfahrung wird uns lehren, welche Informationen zu einer Abschätzung genügen, und

wieviel Unsicherheiten wir uns erlauben können. Bereits Immanuel Kant hat gesagt, dass die Notwendigkeit zu entscheiden stets grösser ist als das Mass der Erkenntnis.

Zur Abschätzung des chemischen Risikos wurde in den USA ChemRisk® [5] entwickelt. ChemRisk® ist ein Hilfsmittel zur objektiven Beurteilung der chemischen Gefährdung, die von kontaminierten Standorten ausgeht. Dieses Hilfsmittel basiert auf einem naturwissenschaftlich-technischen Vorgehen, bei dem die Exposition des Menschen durch die vorliegenden Schadstoffe modelliert wird. Dabei werden Umweltverhalten, Toxikologie sowie sämtliche abschätzbaren Ausbreitungspfade der vorhandenen Schadstoffe berücksichtigt, um die Gefährdung durch eine Altlast spezifisch abzuschätzen. ChemRisk® wird von der EPA routinemässig angewendet.

*2. Aufgrund der Gefahrenabschätzung sind den Verhältnissen entsprechende Schutzziele zu formulieren.*

Eine solche Vorgehensweise erlaubt, jede Altlast individuell zu beurteilen und eine mögliche Sanierung optimal auf die spätere Nutzung abzustimmen. Es ist z. B. nicht nötig, dass ehemalige Industriestandorte den Qualitätsanforderungen für einen Kinderspielplatz oder für landwirtschaftliche Nutzung genügen müssen. Eine individuelle Behandlung von Altlasten erlaubt, die zur Verfügung stehenden Finanzmittel auf die dringlichsten Fälle zu konzentrieren.

*3. Sanierungen müssen ökologisch sinnvoll (nachhaltig), finanziell und technisch machbar und gesellschaftlich akzeptabel sein.*

Die beiden Punkte in dieser Schlussfolgerung sind «ökologisch sinnvoll» und «gesellschaftlich akzeptabel». Für das erste ist der Zweckartikel des Umweltschutzgesetzes massgebend. Ein gewisser Pragmatismus sollte hier jedoch nicht ausser Acht gelassen werden. Die gesellschaftliche Akzeptanz

hängt sicher von der Information der Bevölkerung und der Ausgewogenheit des gesamten Sanierungspaketes ab. Die Ausgewogenheit muss auf nachvollziehbaren Kriterien beruhen. Hier könnte ein angepasstes DQO hilfreich sein.

*4. Limitierend für die Sanierung von Altlasten in der Schweiz sind*

- a) Kenntnisse über das Gefährdungspotential in Raum und Zeit,*
  - b) die Zeit bis zur Wirkung von Massnahmen und*
  - c) die finanziellen Mittel.*
- Technologieentwicklungen sind nicht limitierend.*

Unser beschränktes Wissen über das Gefährdungspotential, die Wirkung von Massnahmen und die begrenzten finanziellen Mittel verlangen geradezu eine konzertierte Aktion in der Schweiz. Der Bund muss dabei eine klare Führungsrolle übernehmen, natürlich unter Einbezug der Kantone und der Privatwirtschaft und unter optimaler Ausnutzung des bereits bestehenden Know-hows.

Die Sanierungstechnologie ist heute international schon sehr weit fortgeschritten, und viele Firmen wenden diese mit Erfolg an. Staatlich unterstützte Altlastenprogramme sollten darum nicht auf Technologieentwick-

lung ausgerichtet sein. Gewisse Freiräume für Innovationen müssen bei jeder Sanierung jedoch gewährleistet sein.

*5. Altlasten sind ein nationales Problem.*

Die Identifikation und Sanierung von Altlasten sprengt in vielen Fällen die Mittel und Möglichkeiten von Kantonen, Gemeinden und Privaten. Altlasten sind in vielen Fällen kein lokales Problem, austretende Chemikalien können Grundwasservorkommen verschmutzen, die als Trinkwasservorkommen und -reserven regionale bis überregionale Bedeutung haben. Die Entwicklung von Beurteilungskriterien und die Schaffung von Voraussetzungen für prospektive Gefährdungsevaluationen übersteigen die Möglichkeit der meisten Kantone und verlangen ein koordiniertes Vorgehen unter Einbezug aller Beteiligten und den Beitrag der Wissenschaftler und Ingenieure der Hochschulen sowie das Forschungs- und Technologiepotential unserer Industrie.

**Wie weiter?**

Der Bund hat nun die Führung in der Altlastenproblematik zu übernehmen. Es müssen Prioritäten und Zeitrahmen

für die Altlastensanierung festgelegt werden. Für die Erarbeitung von Grundlagen und Entscheidungskriterien zur Lösung der Altlastenproblematik muss u.a. auch eine finanzielle Basis geschaffen werden. In der Revision des Umweltschutzgesetzes sind die entsprechenden finanziellen Instrumente vorgesehen.

- [1] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). 1994. Altlasten-Konzept für die Schweiz: Ziele und Massnahmen. Schriftenreihe Umwelt Nr. 220. Herausgegeben vom BUWAL, Bern.
- [2] National Research Council (NRC). 1994. Alternatives for Ground Water Cleanup. National Academy Press, Washington, D.C.
- [3] Environmental Protection Agency (EPA). 1992. Guidance on Implementation of the Superfund Accelerated Cleanup Model under CERCLA and the NCP. OSWER Directive No. 9302.1-03. US EPA, Washington, D.C.
- [4] Environmental Protection Agency (EPA). 1993. Guidance for Planning for Data Collection in Support of Environmental Decision Making - Using the Data Quality Objectives Process (DQO). EPA QA/G-4. US EPA, Washington, D.C.
- [5] Bachmann, A. 1995. Crucial Needs for Environmental Risk Assessment (ChemRisk®). Proc. SCOPE/UNEP Workshop on Soil and Groundwater Pollution. *in press*.

Einen ausführlichen Überblick über die Altlastenproblematik bietet eine Arbeit, die im Rahmen des FoSP «Nachhaltige Ressourcenbewirtschaftung – am Beispiel Gewässer und anthropogene Sedimente» im August letzten Jahres an der EAWAG fertiggestellt wurde:

**Michael Nay (1994):**

**Literaturstudie Altlasten. EAWAG, Dübendorf**

Inhalt: Altlastenbearbeitung v.a. in der Schweiz und Deutschland; Erfassung und Bewertung; Probenahme und Analytik; altlastenrelevante Forschungsprojekte; Überblick über Sanierungs- und Sicherungsverfahren.

Diese interne Studie umfasst ca. 400 Seiten und ist daher nur auf Diskette direkt beim Autor (Tel. 01-823 51 55) zum Selbstkostenpreis von Fr. 50.- inkl. MWSt erhältlich.

Tagung der Internationalen Arbeitsgemeinschaft Donauforschung (IAD)  
vom 29. Aug. bis 2. Sept. 1994 in Zuoz

## Donauforschung

Die IAD\* ist eine Dachorganisation, welche die wissenschaftliche Forschung und Entwicklung der heute 14 Donauländer (von Deutschland bis zum Schwarzen Meer bzw. Rumänien und Ukraine) in einer lockeren Struktur zusammenfasst. Seit ihrer Gründung im Jahr 1956, bei der die Schweiz durch Prof. Otto Jaag (der erste Direktor der EAWAG) mitbeteiligt war, bis zur Neuorganisation des europäischen Ostens Ende der Achtziger Jahre war die IAD eine der wenigen Organisationen, welche ihren Mitgliedern, vorab Limnologen und Wasserwirtschaftlern, ermöglichte, regelmässige persönliche Kontakte zu pflegen. Die häufigen, zeitlich auf die Weltkongresse der S.I.L. abgestimmten etwa jährlichen Arbeitstagungen wurden seither – als bewährte Institution – im Turnus weitergeführt. 1994 war die Schweiz an der Reihe, die Tagung einzurichten. Diese Aufgabe fiel an den Landesvertreter Prof. H. Ambühl, der dank der Mithilfe von Dr. Hans Rudolf Birgi (einem erfahrenen Tagungsorganisator) und dessen bewährter MitarbeiterInnen-Crew Christa Jolidon und Heinz Bachmann die Tagung vorbereitete und im Lyceum Alpinum in Zuoz im Engadin (dem einzigen schweizerischen Einzugsgebiet der Donau) realisierte.

Zur praktischen Durchführung ist zu bemerken, dass die IAD etwas anderen Gewohnheiten folgt als bei internationalen Fachkonferenzen dieser Grösse (rund 100 TeilnehmerInnen) üblich. So werden die wissenschaftlichen Beiträge («Kurzreferate» von 2–5 Seiten) vor der Veranstaltung gedruckt und (gewissermassen als Rohmaterial) abgegeben, aber nicht vorge-

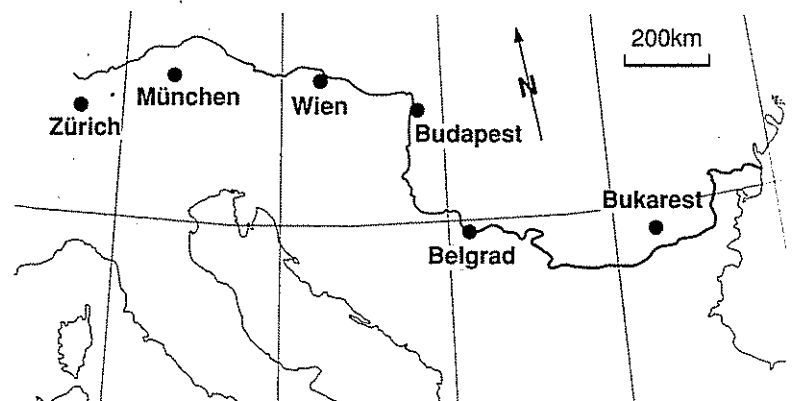
tragen, um die Konferenz nicht zu zersplittern. Sie werden aber durch die Leiter der Fachgruppen zu «Übersichtsreferaten» aufgearbeitet und diese im Plenum vorgetragen. Die Konferenz besteht (neben Fachgruppensitzungen und Exkursionen) praktisch nur aus Plenarsitzungen. Die Übersichtsvorträge werden nachher in Buchform veröffentlicht. Mit dieser Organisations- und Editionsarbeit leistet die EAWAG namentlich für die zum Teil noch tief in finanzieller Notlage steckenden Donauländer eine willkommene Entwicklungshilfe.

Auf einer ganztägigen Exkursion wurden die Kraftwerksanlagen «Punt dal Gall»/Livigno-Ova Spin (am Spöl), Pradella und Martina (am Inn) vorgeführt; zu diesem eindrucksvollen Tag hatten die «Engadiner Kraftwerke AG» eingeladen. Eine zweite Exkursion führte per Bahn über den Berninapass nach Poschiavo, wo nebst allen landschaftlichen Sensationen die Probenahme von Plankton demonstriert und das Probenmaterial mikroskopiert wurde.

Über die Forschungsproblematik der Donau und ihrer Nebengewässer ist zu sagen, dass mit dem Bau vieler Stau- und Kraftwerksanlagen ein ökologischer «Umbau» von grösstem Ausmass im Gang ist. In wenigen Jahrzehnten wurde die österreichische Donaustrecke in

eine fast ununterbrochene Kette von Stauseen verwandelt, gefolgt von der Kraftwerksanlage Gabčíkovo und den beiden riesigen Anlagen im «Eisernen Tor». Gleichzeitig wird die Donau (wenigstens in gewissen Abschnitten) für die Abwasserentsorgung in einem Ausmass missbraucht, wie wir es in der Schweiz auch auf dem Höhepunkt der Flussverunreinigung in den Siebziger Jahren nie gekannt haben. Die Fischerei, in den Ostländern sehr viel bedeutender als bei uns, leidet darunter existentiell. Nach den IAD-Arbeiten ist man sich dieser Missstände sehr wohl bewusst und tut das unter den heutigen Umständen Möglichste, auch politisch wirksam zu werden, um den Gewässerschutz voran zu treiben. So kann es denn auch nicht erstaunen, dass die «Gewässergüte», bei uns vor Jahrzehnten zwar auch ein wichtiger, aber oft verkannter und gemiedener Begriff, an der mittleren und unteren Donau eine völlig zentrale Bedeutung hat, und nach dem sich die heutige Gewässerforschung zu einem guten Teil ausrichtet.

Wer sich im Detail informieren möchte, soll in die «Limnologischen Berichte Donau 1994» Einblick nehmen (Band I: Wissenschaftliche Kurzreferate, ca. 450 p., Wien/Dübendorf; Band II: Übersichts- und Gastreferate, in Vorbereitung). *Heinz Ambühl*



Die Donau von der Quelle zur Mündung

\* IAD = Internationale Arbeitsgemeinschaft Donauforschung der Internationalen Vereinigung der Limnologen IVL = SIL = Societas internationalis limnologiae

## Das neue Nachdiplomstudium hat begonnen

Am 17. Oktober 1994 haben 10 Studenten und Studentinnen aus unterschiedlichsten Disziplinen (Bau-, Kultur- und Chemieingenieurwesen, Erdwissenschaften, Geologie, Biologie) das neu konzipierte Nachdiplomstudium Siedlungswasserwirtschaft und Gewässerschutz an der ETHZ begonnen. In einer Einführungswoche beteiligen sich jeweils die StudentInnen im Rahmen einer Dissertation an Messungen im Felde. Diese Woche liegt vor dem Beginn des Semesters und hat zum Ziel, dass sich die NachdiplomstudentInnen gegenseitig kennenlernen. Wäh-

rend des Semesters werden sie nach individuellem Studienplan reguläre Vorlesungen der ETHZ besuchen und hätten es schwer, sich gegenseitig zu erkennen und Kontakte zu knüpfen.

Neben dem Besuch der Vorlesungen werden diese StudentInnen auch an den PEAK-Kursen der EAWAG sowie anderen Weiterbildungsveranstaltungen der ETHZ teilnehmen. In einer Diplomarbeit, die ca. 3 Monate dauert, soll das Gelernte integriert und in die Anwendung umgesetzt werden.

Dieses neue Nachdiplomstudium schliesst an die Erfahrungen

mit dem früheren Studium an, es profitiert aber von den vielen Vorlesungen, die in den letzten Jahren an der ETHZ insbesondere für die Ausbildung der UmweltingenieurInnen und der Umweltnaturwissenschaftler geschaffen wurden. Der Studiengang wurde auf ein volles Kalenderjahr verlängert, es muss nun eine Diplomarbeit verfasst werden und es besteht die Möglichkeit, dass der ETH Rat den erfolgreichen Abschluss mit einem neu geschaffenen Titel «krönt».

W. Gujer, Leiter des NDS

## Das Neueste vom Forschungsschwerpunkt

Die EAWAG macht gegenwärtig einen wesentlichen Entwicklungsprozess durch. Zunehmend tritt die Einsicht in den Vordergrund, dass zur langfristigen Erhaltung der Lebensgrundlagen von Mensch und Natur eine aktive Bewirtschaftung unserer natürlichen Ressourcen absolut notwendig ist. Die EAWAG hat sich daher zum Ziel gesetzt, massgeblich zur Erforschung der wissenschaftlichen Grundlagen und zur Umsetzung von Konzepten für eine nachhaltige Nutzung der Ressourcen beizutragen. Die Komplexität dieser Aufgabe macht eine Konzentration unserer Kräfte in diesem Bereich und eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Fachdisziplinen notwendig.

Um diese Vorgaben zu erfüllen, hat die EAWAG 1993 beschlossen, ein Forschungsprogramm «Nachhaltige Ressourcenbewirtschaftung – am Beispiel Gewässer und anthropogene Sedimente» durchzuführen. Dieser Forschungs-

schwerpunkt, hat zum Ziel, umsetzungsorientierte Konzepte für die nachhaltige Nutzung regionaler Ressourcen zu erarbeiten. Hintergründe und Zielsetzungen des Forschungsschwerpunktes wurden in der EAWAG news 35 bereits im Detail beschrieben. In diesem Artikel soll eine erste Bilanz der bisherigen Erfahrungen gezogen werden.

### Gründe für die Wahl der Region «Töss» als Untersuchungsgebiet

- Typische Struktur für eine Region des Schweizer Mittellandes
- Genügende Grösse um zu allgemeingültigen Aussagen zu gelangen (ca. 430 km<sup>2</sup>)
- Stark unterschiedliche Nutzungsarten und -intensitäten in den Subregionen
- Industrielles und politisches Zentrum inmitten der Region (Winterthur)
- Geschlossener Wasserkreislauf innerhalb des Einzugsgebietes der Töss

### Definition von «Nachhaltigkeit» nach World Commission on Environment and Development (WCED)

*«Nachhaltig ist eine Entwicklung bzw. eine Aktivität dann, wenn sie die gegenwärtigen Bedürfnisse befriedigt, ohne die Möglichkeit kommender Generationen zu beeinträchtigen, ihre Bedürfnisse zu befriedigen.»*

- Vorhandensein zahlreicher Grundlagendaten

### Regionenwahl und Vorstudien

Die erste Phase des Forschungsschwerpunktes war geprägt von der Suche und dem Versuch einer Definition der wesentlichen Forschungsfragen in Bezug auf regionale Nachhaltigkeit: Welches sind die zentralen Umweltprobleme, die den Prinzipien der Nachhaltigkeit entgegenstehen; welche

Schlüsselprozesse sind verantwortlich für diese Probleme? Auch wurde eine Region gesucht, die sich zur Untersuchung dieser Fragen besonders eignet. Die Wahl fiel schliesslich auf die Region Töss, mit der Stadt Winterthur als wirtschaftlichem und industriellem Zentrum. Die Gründe für die Wahl dieser Region wurden vorhin erläutert. Die Region umfasst das hydrologische Einzugsgebiet der Töss und ihrer Zuflüsse.

Eine Analyse des Umweltzustandes und der Ressourcennutzung in der Region Töss hat verschiedene Bereiche aufgezeigt, in denen heute nicht nachhaltig mit den Ressourcen umgegangen wird:

- zunehmende quantitative Übernutzung der Grundwasservorkommen,
- steigende Belastung des Grundwassers mit Schadstoffen (z.B. Nitrat),
- zunehmende Beeinträchtigung der landschaftlichen Vielfalt mit erheblichen Konsequenzen für natürliche Ökosysteme und die Biodiversität,
- steigende Schadstoffkonzentrationen in Luft und Boden, hauptsächlich verursacht durch übermässigen Verbrauch fossiler Energien und durch industrielle Aktivitäten, und
- Gefährdung der Grundwasserqualität durch zahlreiche Altlasten.

### Forschungsziele

In einer ersten Phase geht es darum, die Zusammenhänge zwischen wichtigen menschlichen Aktivitäten (Wasser- und Landnutzung, Abfallentsorgung) und den Veränderungen auf die Umwelt zu erkennen und zu verstehen. Dazu sind einerseits naturwissenschaftlich-technische Untersuchungen notwendig. Andererseits werden die menschlichen Aktivitäten stark von ökonomischen und soziokulturellen Faktoren geprägt. Der

Forschungsschwerpunkt will daher auch in diesen Bereichen zu einem besseren Verständnis der wesentlichen Zusammenhänge beitragen. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen sollen sodann Strategien für eine nachhaltige Entwicklung und für eine zukünftige, umweltgerechte Nutzung der Ressourcen auf regionaler Ebene erarbeitet werden.

Konkret sollen die Arbeiten es ermöglichen, umsetzungsorientierte Konzepte und Strategien zu entwickeln für:

- eine langfristig gesicherte Versorgung mit sauberem Trinkwasser aus den regionalen Grundwasservorkommen.
- die Wiederherstellung ökologisch funktionsfähiger Strukturen des regionalen Gewässernetzes, um selbsttragende natürliche Organismengemeinschaften zu ermöglichen.
- eine Begrenzung des Schadstoffgehaltes in den Umweltkompartimenten auf einem tiefen Niveau.

### Forschungsthemen

Um diese Ziel zu erreichen, wurden im Rahmen des Forschungsschwerpunktes bisher rund 20 Projekte in Angriff genommen, welche sich in drei Teilbereiche und einen Integrativen Teil gliedern.

Im Teilbereich «Anthropogene Sedimente» wird das von einer alten Hausmülldeponie ausgehende Gefährdungspotential für die Umwelt untersucht. Dabei werden die von diesen anthropogenen Sedimenten ausgehenden Substanzen charakterisiert und der Transport und die Umwandlung dieser Substanzen im Untergrund und im Grundwasser verfolgt.

Im Teilbereich «Grundwasser» wird untersucht, welche Auswirkungen Substanzen, die durch menschliche Aktivitäten in die Umwelt gelangen, auf die Qualität des Grundwassers haben. Im Be-

sonderen interessieren die Effekte der mit dem Regenwasser in Versickerungsanlagen gelangende Schwermetalle und organische Substanzen auf die Grundwasserqualität. Die in solchen Anlagen, im Untergrund und im Aquifer ablaufenden Umwandlungs- und Transportprozesse von Schadstoffen werden erforscht. Zudem interessiert der Einfluss einer vermehrten Meteorwasserversickerung auf die Menge des nutzbaren Grundwassers.

Im Teilbereich «Gewässersysteme» soll die Bedeutung der Struktur und Durchgängigkeit des regionalen Gewässernetzes und der Übergänge zum terrestrischen Bereich und zum Grundwasser für die Erhaltung vielfältiger Lebensräume und als Verbindungselement innerhalb des Naturraumes untersucht werden.

Im «Integrativen Teil» schliesslich werden die Zusammenhänge zwischen den menschlichen Aktivitäten und dem regionalen Umweltzustand erforscht. Zudem versuchen wir, die sozialen und ökonomischen Mechanismen zu verstehen, die bisher zu einem nicht-nachhaltigen Umgang mit den natürlichen Ressourcen geführt haben. Darauf abgestützt wollen wir Strategien für eine nachhaltige Ressourcenbewirtschaftung entwickeln.

Wie die Übersicht über die gegenwärtigen Forschungsbereiche zeigt, konzentriert sich die EAWAG in ihrer Forschung im wesentlichen auf ihren angestammten Kompetenzbereich, nämlich auf den Bereich des Wassers. Damit kann die Frage regionaler Nachhaltigkeit natürlich nicht im vollen Umfang abgedeckt werden und es können kaum gesamtheitliche Konzepte für eine nachhaltige Ressourcennutzung erwartet werden. Für ein gesamtheitliches Verständnis wären zusätzlich notwendig:

- Konzepte für eine nachhaltige Energienutzung und deren so-

Bericht von der ersten CLEAR Konferenz vom 4. bis 9. September 1994,  
Centro Stefano Franscini, Monte Verità, Ascona

## Klimaveränderung und alpine Regionen

zialen und ökonomischen Konsequenzen,

- Vertiefteres Verständnis der Bedeutung terrestrischer Lebensräume für die Biodiversität und für das regionale Naturgefüge, und
- Angaben zur Bedeutung der Landwirtschaft, der Siedlungsstrukturen und des Verkehrs auf Boden- und Grundwasserqualität.

Durch die Beteiligung anderer Institutionen wie Hochschulen, Forschungsanstalten, Verwaltung und Behörden sowie der Privatwirtschaft soll jedoch ein umfassendes Verständnis möglich werden. Kontakte zum Kanton Zürich, der Stadt Winterthur, der ETH Zürich, und privaten Ingenieurbüros wurde bereits geknüpft und sollen vertieft und ausgeweitet werden.

Walter Wagner

*Klimatische Veränderungen sind bis heute hauptsächlich als globales Umweltrisiko untersucht worden. Wenig ist bekannt über die regionalen Aspekte von Klimaveränderungen. Die erste CLEAR Konferenz hat versucht, diese Lücke zu schliessen, in dem sie sich auf den alpinen Raum konzentriert hat, der sehr sensitiv auf Klimaveränderungen reagiert.*

### Alpen als sensitiver Klimabereich

Die Alpen stellen für Klimafor-schende eine besondere Herausforderung dar. Zwei Beispiele sollen dies illustrieren: Erstens werden die Alpen wegen ihrer spezifischen Form und Lage als sogenannter «Nussgipfel im Westwind» sowohl über- als auch umströmt. Bekanntlich begünstigt eine Überströmung Niederschläge, während bei der Umströmung die vorbeifliessende Luft ihre Feuchtigkeit weitgehend behalten kann. Die Modellierung dieser Effekte und deren mögliche Veränderungen sind von zentraler Bedeutung für die Abschätzung der Niederschlagsentwicklung in einem künftigen Klima (siehe Fig. 1)

Die untenstehenden Abbildungen illustrieren dieses Verhalten anhand der Um- und Überströmung eines idealisierten Gebirges. Die Anströmung erfolgt von links nach rechts. Die Diagramme zeigen die instantanen Stromlinien sowohl von der Seite (obere zwei Figuren) und von oben (untere zwei Figuren). Dargestellt ist sowohl die Überströmung (linke zwei Figuren) als auch die Umströmung (rechte zwei Figuren). Man beachte die geringe vertikale Auslenkung der Luftpakete im Falle der Umströmung.

Ein zweites Beispiel für die Herausforderung einer regional orientierten Klimaforschung stammt aus dem Bereich der Biologie. Pflanzen werden durch eine Erhöhung der Durchschnittstemperaturen gezwungen, in höhere Lagen zu migrieren. Wie schnell können bestimmte Gebirgspflanzen wandern? Eine Antwort auf diese Fragen kann anhand von historischen Daten über die Fauna von verschiedenen Alpengipfeln gegeben werden: Zumindest eine Reihe von Pflanzenarten hat mit dem bisher beobachteten Klimawandel und der damit erzwungenen Aufwärtsmigration mithalten können[1].

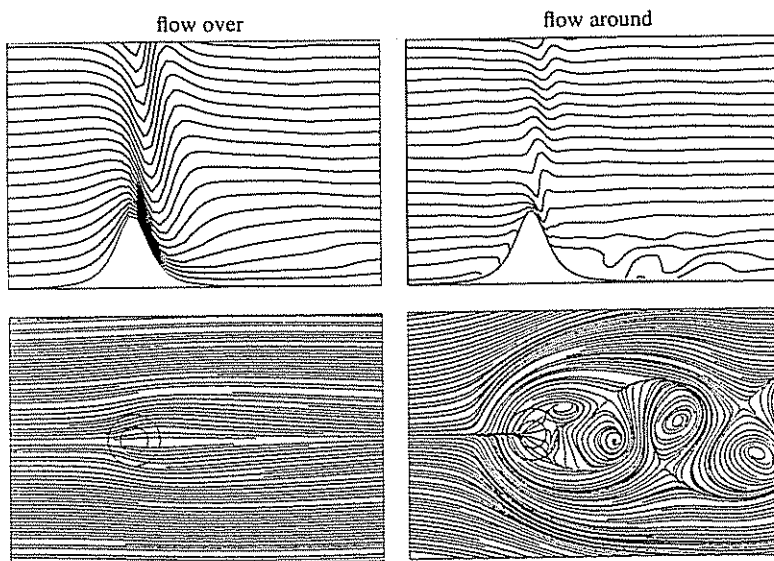


Fig. 1  
Die Alpen als vereinfachtes Modell von der Seite (obere zwei Figuren) und von oben (untere zwei Figuren). Dargestellt ist die Druckverteilung bei Überströmung (linke zwei Figuren) und bei Umströmung (rechte zwei Figuren). Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Christoph Schär, Institut für Atmosphärenphysik, ETH Zürich.

### Interdisziplinariät

Klimaveränderungen umfassen sowohl physikalische und biologische als auch sozialwissenschaftliche Aspekte, die in enger Verbindung zueinander stehen. Zur Untersuchung dieses komplexen Forschungsfeldes ist der Einbezug

Forsetzung S. 37

Forschung/Weiterbildung

## CLEAR Climate and Environment in Alpine Regions

CLEAR ist ein koordiniertes Projekt des Schwerpunktprogramms Umwelt, das im Rahmen von neun Teilprojekten physikalische, biologische und sozialwissenschaftliche Aspekte von Klimaveränderungen untersucht. Der CLEAR-Prozess umfasst weitere 12 Projekte des Moduls 1 des Schwerpunktprogramms Umwelt, die ebenfalls an den CLEAR Aktivitäten

beteiligt sind. Sprecher des koordinierten Projekts ist Huw Davies, Institut für Atmosphärenphysik, ETH Zürich. Koordiniert werden diese insgesamt 21 Projekte durch Carlo Jaeger und Urs Dahinden von der Gruppe Humanökologie an der EAWAG. Die geplanten Veröffentlichungen werden von Peter Cebon, Postdoktorand der Gruppe Humanökologie, betreut.

Drei der unten aufgeführten Projekte (Dürrenberger, Lotter, Pahl) werden von MitarbeiterInnen der EAWAG geleitet. Die Projekte Pahl [2] und Dürrenberger [3] sind in den EAWAG NEWS bereits einmal vorgestellt worden. Resultate aus dem Projekt Lotter finden sich in der vorliegenden Ausgabe.

### Am CLEAR-Prozess beteiligte Projekte

#### Koordiniertes Projekt CLEAR «Climate and Environment in Alpine Regions»

(Sprecher: Huw C. Davies)

**Brassel, Kurt E.**, Geographisches Institut, Universität Zürich: Integration von Umweltdaten mit heterogenem Raum- und Zeitbezug

**Dürrenberger, Gregor**, Humanökologie EAWAG, Dübendorf: Innovative responses to anticipated climate change  
**Fischlin, Andreas**, Institut für terrestrische Ökologie ETH, Schlieren: Alpine forest ecosystems in a changing climate – paleoclimatic model validation and sensitivity analysis

**Gyalistras, Dimitrios**, Institut für terrestrische Ökologie ETH, Schlieren: Case studies in bioclimatic scenarios derivation

**Ohmura, Atsumu**, Geographisches Institut ETH Zürich: Numerical model studies of the influence of the Alps on climate

**Pahl-Wostl, Claudia**, Umweltphysik EAWAG, Dübendorf: Reconstruction and modelling of the longterm dynamics of ecosystems

**Ratti, Remigio**, Istituto di Ricerca Economica IRE Bellinzona: Mobility economics – climate change – agents (MECCA)

**Schär, Christoph**, Institut für Atmosphärenphysik ETH Zürich: Alpine climate and climate change: a study of some key atmospheric processes

**Tschannen, Olivier**, Institut de sociologie et de science politique, Université de Neuchâtel: Social and cognitive processes in regional milieus in response to global environmental problems

#### Koordiniertes Projekt «Change- ments environnementaux et modifications de l'écozone sub- alpin/alpin: établissement d'un modèle d'évaluation à l'aide des végétaux et du sol»

(Sprecher: Jean-Paul Theurillat)

**Geisler, Patricia**, Conservatoire et Jardin Botaniques, Chambésy-Genève: Changements environnementaux dans l'écozone des étages subalpin-alpin: réaction et bioindication des bryophytes

**Gobat, Jean-Michel**, Laboratoire d'écologie végétale, Université de Neuchâtel: Modification de l'écozone subalpin/alpin: réaction du sol, notamment de sa fraction organique

**Küpfer, Philippe**, Institut de botanique, Université de Neuchâtel: Le polymorphisme génétique intraspécifique dans l'écozone subalpin/alpin: un indice révélateur des potentialités d'adaptation aux changements environnementaux

**Spichiger, Rodolphe**, Conservatoire et Jardin Botaniques, Chambésy-Genève: Case studies in bioclimatic scenarios derivation and sensitivity of plant distribution

**Theurillat, Jean-Paul**, Conservatoire et Jardin Botaniques, Chambésy-Genève: Changements environnementaux et modifications de l'écozone subalpin/alpin: réaction de la couverture végétale

#### Koordiniertes Projekt «Umwelt- dynamik in Vergangenheit und Gegenwart»

(Sprecher: André F. Lotter)

**Ammann-Moser, Brigitta**, Systematisch-Geobotanisches Institut, Universität Bern: Fire-history in central and southern Alps

**McKenzie, Judith**, Geologisches Institut, ETH Zürich: Lakustrische Ablagerungen als Monitoren von Dynamik im Grenzbereich Atmosphäre-Erdoberfläche: Kalibration chemisch-physikalischer Tracer, Teilstudiengruppen (LAMODATE)

**Lotter, André F.H.**, EAWAG/ETH Umweltphysik und Systematisch-Geobotanisches Institut, Universität Bern: Lake sediments as proxy-archives for the reconstruction of environmental dynamics in space and time: calibration

**Pfister, Christian**, Forschungsstelle Regional- und Umweltgeschichte, Universität Bern: Regionale Klimaveränderungen im südöstlichen Schweizer Alpenraum zwischen 1400 und 1900 im Lichte historischer Proxy-Daten

**Stauffer, Bernhard**, Physikalisches Institut, Universität Bern: Rekonstruktion von Klimaschwankungen durch die Analyse von Eisbohrkernen

#### Einzelprojekt:

**Fröhlich, Claus**, Physikalisch-Meteorologisches Observatorium, Davos: Klimatologie der Ultraviolett-Strahlung und ihre langfristigen Veränderungen

einer Vielzahl von Disziplinen denn auch kaum umstritten. Unklar ist allerdings, wie die Integration dieser Disziplinen geschehen soll. Soll sie vor allem als Datensammlung gestaltet werden, die in einem gemeinsamen Computermodell ausgewertet wird? Diese Vorgehensweise birgt einige Probleme, da sich sowohl die Qualität der Daten als auch ihr Geltungsbereich von Disziplin zu Disziplin erheblich unterscheiden. Im Rahmen des CLEAR Prozesses (siehe Kasten) wurde ein anderer Ansatz gewählt, indem die Integration über disziplinübergreifende Themen geschieht (z.B. regionale Perspektive oder Unbestimmtheit von künftigen Entwicklungen in natürlichen und sozialen Systemen). Wie weit dieser Ansatz von Interdisziplinarität führt, wird sich im Rahmen der geplanten Publikationen zeigen. Die bisherige Zusammenarbeit zwischen den Projekten kann als vielversprechend bezeichnet werden. Die CLEAR Konferenz war durch einen Geist der Toleranz und Offenheit zwischen den Disziplinen geprägt, der auch den ausländischen ExpertInnen positiv auffiel.

### TeilnehmerInnen und Struktur der Konferenz

Mehr als achtzig Personen haben an der ersten CLEAR Konferenz teilgenommen. Der erste Tag wurde in Zusammenarbeit mit ProClim, dem Global Change-Forum der Schweizerischen Akademie für Naturwissenschaften organisiert und war für eine breitere Öffentlichkeit konzipiert. Während den anschliessenden vier Tagen war die Teilnahme eingeschränkt auf rund fünfzig ForscherInnen aus dem CLEAR Prozess, die in Gruppen an einer gemeinsamen Publikation arbeiteten. Der Schreib- und Diskussionsprozess wurde unterstützt durch ausländische Fachleute, die zu ausgewählten Themen referierten.

### Geplante Veröffentlichungen

Die Ergebnisse der CLEAR-Forschungsarbeiten wie auch der CLEAR-Konferenz sollen in zwei englischsprachigen Bänden veröffentlicht werden: Ein erster Band richtet sich an ein breiteres Publikum in- und ausserhalb der Wis-

senschaften, wie z.B. interessierte Fachleute aus anderen Gebieten, PolitikerInnen, JournalistInnen, LehrerInnen etc. Sowohl vom Umfang als auch vom Stil soll dieser Band leicht lesbar und in Form eines Gesprächs strukturiert sein.

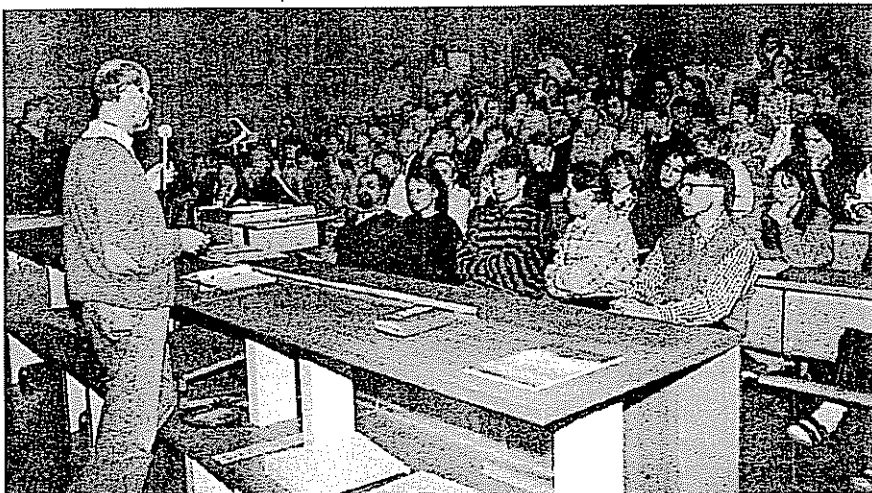
Der zweite, umfangreichere Band richtet sich an ein wissenschaftliches Publikum. Da sowohl AutorInnen als auch LeserInnen dieses Buches aus unterschiedlichen Disziplinen stammen, soll bei diesem Band eine Sprache verwendet werden, die ausserhalb der Grenzen der eigenen Fachdisziplin verstanden wird.

*Urs Dahinden*

- [1] Grabherr, Georg & Gottfried, Michael & Pauli, Harald (1994): Climate effects on mountain plants. *Nature*, Vol. 369, p. 448
- [2] Pahl Wostl, Claudia, Jaeger, Carlo C. (1994): Risikokommunikation: Das Beispiel von Klimaveränderungen. *EAWAG news*, 36D, März 1994, p. 6-8
- [3] Truffer, Bernhard, Dürrenberger, Gregor und Rothen, Silvia: Wird das «Auto der Zukunft» in der Schweiz entwickelt? Anmerkungen zum Supercars-Workshop der EAWAG vom 20./21. September 1993. *EAWAG news*, 36D, März 1994, p. 38-40

### Nachhaltigkeits-Seminar der EAWAG

## Referenten drücken die Schulbank...



*Referenten drücken die Schulbank...*  
 Reger Besuch des internen Nachhaltigkeits-Seminars der EAWAG zur gemeinsamen Weiterbildung mit anschliessender Diskussion. Ziel ist ein Diskussionsprozess zum Thema Nachhaltigkeit und Paradigmenwechsel sowie dessen Bedeutung für die EAWAG. Im wesentlichen werden die Vorträge von internen ReferentInnen gehalten.

## Evaluation der EAWAG durch eine internationale Expertengruppe

Mit der EAWAG unterzog sich erstmals eine ganze Institution des ETH-Bereichs einer Überprüfung durch eine internationale Expertengruppe. Diese Evaluation ging vom 17. bis zum 22. Juli 1994 über die Bühne.

Bei den Gutachtern handelte es sich um international anerkannte Persönlichkeiten aus Wissenschaft und Praxis. Je zwei stammen aus den USA und aus Deutschland, je einer aus Mittelamerika, Frankreich, Holland und der Schweiz. Die Evaluations-Gruppe erhielt vom Präsidenten des ETH-Rates einen Fragenkatalog, der die Themen Strategie, wissenschaftliche Qualität, Beiträge für Wissenschaft und Umweltschutz sowie Zukunftspläne umfasste.

In ihrem Bericht äussert sich die Evaluationsgruppe sehr positiv über die Leistungen der EAWAG in Forschung, Lehre und Beratung. Die Mehrjahresplanung wird nachdrücklich unterstützt. Darin sieht die EAWAG vor, ihre Tätigkeit schrittweise auf die aktive und nachhaltige Bewirtschaftung der natürlichen Ressourcen auszurichten. Dieser Richtungswechsel weg vom eher bewahrenden Schutz der Umwelt erfordert – so die Evaluationsgruppe – grosse Anstrengungen. Vor allem muss das Umdenken an der Basis der MitarbeiterInnen unterstützt und gefördert werden. Das schafft die Voraussetzungen, um neue Ansätze an der Forschungsfront umsetzen zu können.

Die EAWAG soll weiterhin Forschung, Beratung und Lehre betreiben. Die Zusammenarbeit mit Partnern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Behörden ist noch weiter auszubauen. Dabei sind auch die europäischen Kontakte zu verstärken. Aufgrund der Vorschläge der Evaluationsgruppe wird die EAWAG nun in den kommenden Monaten einige Problemfelder intensiv überprüfen. Es sind dies

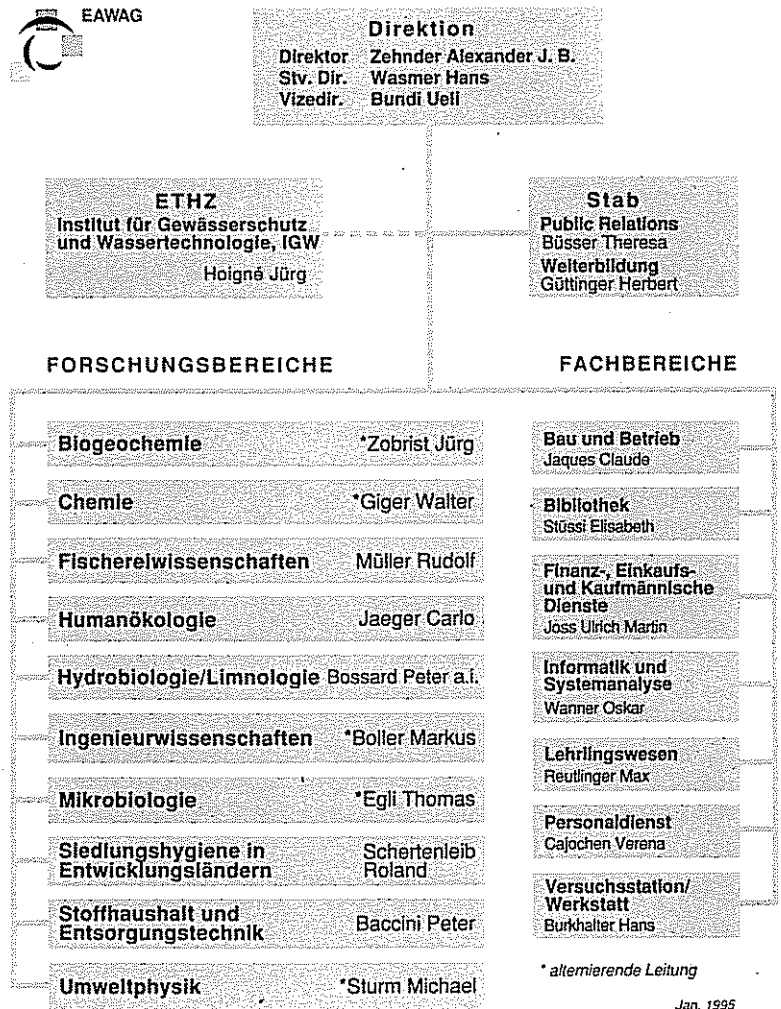
die Entwicklung der Beziehungen zwischen der EAWAG und der ETH (gemeinsam mit der ETH), die internen Konsequenzen der Ausrichtung auf eine nachhaltige Ressourcenbewirtschaftung und damit verbunden, den verstärkten Einbezug der Ökonomiewissenschaften sowie den Umgang mit interdisziplinären Fragestellungen.

Die Beratende Kommission der EAWAG, die sich mit dem Evaluationsbericht intensiv auseinandersetzt, unterstützt diesen in allen wesentlichen Punkten. Gleichzeitig möchte sich noch verstärkt hervorheben, wie unabdingbar eine Neuausrichtung des Umweltschutzes ist. Die EAWAG müsse dabei eine wissenschaftliche Führungs-

rolle übernehmen. Dank ihrer bereits gewonnenen Kompetenz im Umgang mit multidisziplinären Fragestellungen sei sie qualifiziert, vermehrt die gesellschaftlichen Zusammenhänge zwischen menschlichem Verhalten und Auswirkungen in der Natur wissenschaftlich zu ergründen. Der Evaluationsbericht wird als sehr wertvolle Unterstützung für den dafür in der EAWAG noch zu beschreitenden Weg beurteilt.

Die im Bericht aufgeführten Kritikpunkte und Empfehlungen werden wesentlich mithelfen, die Innovationskraft und die Leistungsfähigkeit der EAWAG zu erhalten und weiter zu stärken.

*Ueli Bundi*



Abteilungsleiter der Forschungsbereiche, Stand Januar 1995

## Berufung nach Münster

Frau Dr. Elisabeth I. Meyer kam als ETH-Assistentin (später Oberassistentin) der Abteilung Umweltnaturwissenschaften im Januar 1991 zu Prof. Heinz Ambühl an die Abteilung Hydrobiologie/Limnologie der EAWAG.

Parallel zur Unterrichtsassistenz, die mit Lehraufträgen verbunden war, engagierte sich Elisabeth Meyer zusammen mit KollegInnen und einer eigenen Arbeitsgruppe in der Fließgewässerforschung. Die Studien betrafen die Struktur und Dynamik von Benthosorganismen in Fließgewässern sowie ihre Verknüpfung mit anderen Komponenten des Ökosystems. Ein weiterer Schwerpunkt waren und sind die Auswirkungen von «Störungen», speziell von extremen Abfluss-Situationen (Hochwasser, Niedrigwasser/Austrocknung), die an einem voralpinen Fließgewässer (Necker, Kanton St. Gallen) und an einem Fließgewässer im Mittelland (Töss) untersucht werden.

Elisabeth Meyer habilitierte sich 1993 an der ETH Zürich mit der Schrift «Die benthischen Invertebraten in kleinen Fließgewässern am Beispiel eines Schwarzwaldbaches: Biozönotische Struktur,

Populationsdynamik, Produktion und Stellung im trophischen Gefüge». Im April 1993 erhielt sie die *venia legendi* für das Lehrgebiet Aquatische Biologie und Ökologie an der ETH Zürich.

Nach dem Altersrücktritt von Prof. Ambühl im April 1994 wurde sie als seine Interimsnachfolgerin Abteilungsleiterin des Forschungsbereichs Hydrobiologie/Limnologie der EAWAG.

Inzwischen wurde E.I. Meyer an die Westfälische Wilhelms-Universität Münster berufen, wo sie seit 1. November 1994 eine Universitätsprofessur für Limnologie innehat. Die von ihr neu ins Leben gerufene Abteilung für Limnologie ist im Fachbereich Biologie angesiedelt. In der Lehre werden zukünftig limnologische Grundvorlesungen angeboten, die durch Spezialvorlesungen, Praktika und Seminare ergänzt werden. In der Forschung wird E.I. Meyer ihre Studien auf Flachlandgewässer ausdehnen und auch hier sowohl Freiland- als auch Laboruntersuchungen zu Struktur und Funktion von Benthosorganismen in Fließgewässer-Ökosystemen durchführen. Viele Gewässer im norddeutschen Flachland sind



Stefan Wey

Neue Adresse:

Frau Prof. Dr. Elisabeth I. Meyer  
Westfälische Wilhelms-Universität  
Institut für Spezielle Zoologie und  
vergleichende Embryologie  
Abteilung für Limnologie  
Hüfferstr. 1

D-48149 Münster

Tel. 0049 251 83 38 81, Fax 83 46 68

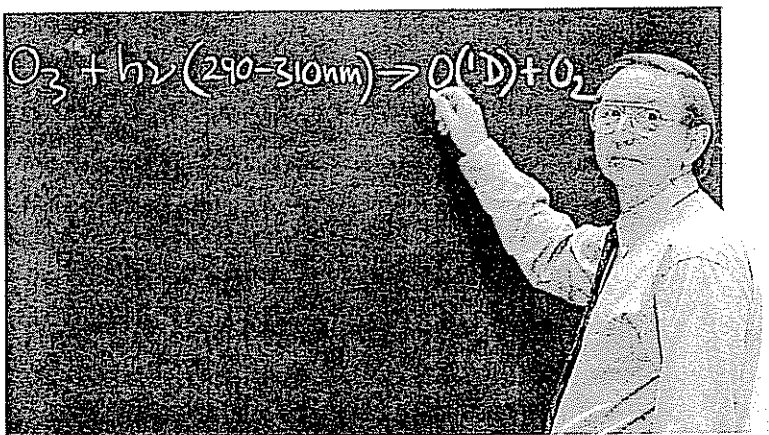
nährstoffbelastet oder verbaut, sodass auch der angewandte Aspekt nicht zu kurz kommen wird.

Ihre wissenschaftlichen und persönlichen Kontakte zur ETH Zürich und zur EAWAG wird Prof. Elisabeth Meyer auch in Zukunft aufrechterhalten. Mit den beiden wissenschaftlichen Angestellten *Eva Tania Schellenberg* und *Rainer Zah* bearbeitet sie das Projekt «Einfluss von Niedrigwasser/Austrocknung auf das Ökosystem der Töss» im Rahmen des derzeitigen EAWAG-Forschungsschwerpunktes.

Weiterhin gibt es eine multidisziplinäre Zusammenarbeit mit Kollegen an der EAWAG über quantitative Vernetzungen in Fließgewässern. Ein Beitrag hierzu ist eine Dissertation über die ökologische Funktion von Protozoen im hyporheischen Interstitial eines voralpinen Flusses.

Im Wintersemester beteiligt sie sich an der ETH Zürich an der Lehrveranstaltung «Systematik aquatischer Invertebraten», die sie selbst vor zwei Jahren im Lehrangebot etablierte.

Nachfolger im Amt des Abteilungsleiters der Abteilung Hydrobiologie/Limnologie an der EAWAG ist seit November 1994 Dr. *Peter Bossard*, der bereits während ihrer Amtszeit Stellvertreter war.



Stefan Wey

Ende 1994 verlieh der ETH-Rat den Titel eines Professors an der ETH Zürich an Alistair Kerr, geb. 1934, britischer Staatsangehöriger, Leiter der Forschungsgruppe für Atmosphärenchemie an der EAWAG und Lehrbeauftragter für Atmosphärenchemie an der Abteilung für Umweltnaturwissenschaften.

EAWAG-Intern

## Otto Jaag Gewässerschutzpreis 1991 und 1994

an Peter Krebs

Für seine ausgezeichnete Dissertation «Modellierung und Verbesserung der Strömung in Nachklärbecken» erhielt Peter Krebs im November 1991 den nicht jährlich vergebenen Otto Jaag Preis.

Mit seiner Arbeit bei Prof. Willi Gujer, EAWAG, und Prof. D. Vischer, ETHZ, ist es ihm gelungen, einfache, wirksame und praktisch anwendbare Verbesserungen in der Gestaltung der Nachklärbecken vorzuschlagen und zu dimensionieren. Bestehende und noch zu projektierende Nachklärbecken können mit seiner Beratung optimiert werden. Der physikalischen Modellierung diene eine Versuchsrinne im Laboratorium, bei der Schlamm mit einer Tonsuspension simuliert wurde, so dass der Dichteeinfluss der sich



Paul Schlegel

absetzenden Phase miteinbezogen werden konnte. Damit konnte er aufzeigen, dass der Schlammgehalt im Zufluss die Hauptursache für die in Nachklärbecken auftretende Walzenbewegung darstellt. Verbesserungen lassen sich mit folgenden Ansätzen erreichen:

- tiefliegender Einlauf zur Verringerung der potentiellen Überschussenergie
- Energiedissipationsvorrichtung im Einlaufquerschnitt zur Verwirbelung der Sohlenströmung und
- mehrere quergestellte Lochwände zum vertikalen Ausgleich des Geschwindigkeitsfeldes zwecks verbesserter Ausnutzung des Beckenvolumens sowie zur Flockungsanregung.

Ab 1991 wirkte er im Institut für Hydromechanik der Technischen Universität Karlsruhe bei Prof. Rodi in einem Forschungsprojekt über Misch- und Entmischungsprozesse mit. Seit 1994 leitet er an der EAWAG die Gruppe für Siedlungshydrologie (siehe Beitrag in den EAWAG news 37D).

an Reto von Schulthess

1994 erst wurde wieder der Otto Jaag Gewässerschutzpreis verliehen, diesmal an Reto von Schulthess für seine Doktorarbeit «Die Emission von Lachgas  $N_2O$  in denitrifizierenden Belebungsanlagen» (ETH Diss 10790, Publ. 1900).

Nach dem Biotechnologiestudium an der ETHZ absolvierte Reto von Schulthess das Nachdiplomstudium in Siedlungswasserwirtschaft und Gewässerschutz an der EAWAG. In seiner Dissertation unter der Leitung von Prof. Willi Gujer an der Abteilung für Ingenieurwissenschaften an der EAWAG untersuchte er die Emission von Lachgas in Kläranlagen.

Bei der Weiterentwicklung von Kläranlagen steht gegenwärtig die Stickstoffelimination im Vordergrund. Bisher war nicht klar, ob bei solchen Verfahren auch  $N_2O$  freigesetzt wird. Mit einer überzeugenden Kombination von Laborversuchen, numerischen Modellen und Untersuchungen auf einer



Ab Juli 1995 wird Reto von Schulthess bei der Firma Künzler und Partner, Kellerstr. 36, 6005 Luzern zu erreichen sein.

Kläranlage hat von Schulthess gezeigt, dass die Emission auf Kläranlagen vernachlässigbar klein ist (0.1–0.4% des denitrifizierten Stickstoffs), wenn die Prozessbedingungen optimiert sind. Unter anderem sollen innerhalb des Nitrifikations-Denitrifikationsverfahrens Nitritkonzentrationen von über  $2 \text{ g N m}^{-3}$  vermieden werden.

### Stichwort Lachgas

Lachgas nimmt seit 1950 weltweit mit einer Rate von 0.2–0.3% pro Jahr zu. Die seit 1880 um weitere 15 ppb gestiegene Konzentration auf 300 ppb macht es zum drittwichtigsten Treibhausgas: weltweit nach  $CO_2$  und Methan, in einem Industriestaat wie der Schweiz nach  $CO_2$  und den FCKWs. Je mehr Lachgas in die Stratosphäre gelangt, umso mehr NO wird gebildet und damit der Abbau der Ozonschicht beschleunigt. In der Schweiz gelten die folgenden Prozesse als wichtige Lachgasquellen: Emission durch Stickstoffverlust aus Böden (60–80%); Lachgasemission aus Verbrennungsprozessen (10–20%) und Emission aus Grundwasser und stehenden Gewässern.

## Ökomorphologische Bewertung und Entwicklung von Fließgewässern

Von 1991 bis 1994 entwickelte die EAWAG zusammen mit dem Kanton Zürich (Amt für Gewässerschutz und Wasserbau, Amt für Raumplanung, Fischerei- und Jagdverwaltung) ein Konzept zur Erhebung und Bewertung von Fließgewässern sowie zur Herleitung von Grundsätzen für die ökologisch orientierte Entwicklung von Bächen und Bachsystemen. Der Bericht hierzu erschien im Oktober 1994 (M. Hütte, U. Bundi, A. Peter: *Konzept für die Bewertung und Entwicklung von Bächen und Bachsystemen im Kanton Zürich*, ISBN 3-906484-10-6). Zentraler Bestandteil dieses Konzeptes ist eine neu entwickelte Methode zur Erhebung des ökomorphologischen Zustandes von Bachsystemen. Dabei werden neben morphologischen Parametern (wie Wassertiefe, Wasserspiegelbreite, Tiefen- u. Breitenvariabilität, Li-

nienführung, Sohlensubstrate u.a.) auch wasserbauliche Eingriffe (Sohlen- u. Uferverbauungen) sowie Ufervegetation und Umlandnutzung erhoben. Der Ist-Zustand wird dann mit dem Referenz-Zustand (dem «naturnahen Gewässerzustand in der vorgegebenen Kulturlandschaft») verglichen. Aus diesem Vergleich ergeben sich die Defizite. Besondere Beachtung wird dabei möglichen Durchgängigkeitsstörungen geschenkt, welche die Wanderungen von Organismen in Längsrichtung behindern oder unterbinden können. Solche Störungen sind z.B. Wehre, Abstürze oder Verrohrungen.

Weitere Methoden umfassen Biologie (Wasserpflanzen, Kleintiere und Fische), Wasserchemie, Natur- und Artenschutz sowie Aspekte des Ortsbildes. Sodann wird aufgezeigt, wie unter Berücksichtigung aller Ergebnisse die

Grundsätze für eine ökologisch fundierte Gewässerentwicklung herzuleiten sind. Im österreichischen Bundesland Tirol wird das hier erarbeitete Konzept zur Erhebung der Ökomorphologie bereits angewendet.

Auf Grundlage des für den Kanton Zürich erarbeiteten Konzeptes wird nun eine gesamtschweizerisch anwendbare Methode zur Erhebung und Bewertung des ökomorphologischen Zustandes der Fließgewässer entwickelt. Dieses Projekt wird gemeinsam von der EAWAG und dem Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) durchgeführt und etwa Mitte 1995 abgeschlossen.

In der nächsten Ausgabe der EAWAG news wird ausführlicher über diese Projekte und deren praktische Anwendung berichtet.

Michael Hütte

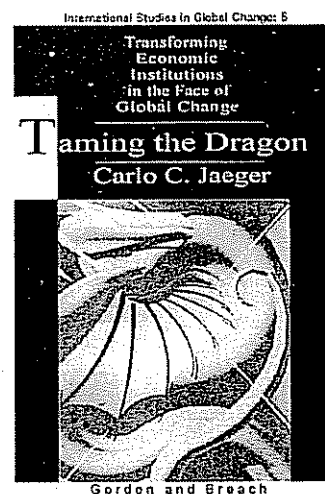
### Buchbesprechung

## Über die Natur des Menschen, quantitatives Wachstum und die nachhaltige Entwicklung der dritten Welt

Eine Schiffsreise auf der Saône soll für einige Tage die beruflichen Pflichten verdrängen, und nur ein wissenschaftliches Buch darf mit ins Gepäck. Was wählen? – Ich habe Carlo Jaegers *Taming the Dragon* (1994) eingepackt und damit dem eigenen Vorsatz quasi ein Schnippchen geschlagen, weil hier auf rund 300 Seiten zu einem feinen und intelligenten Netz versponnen wird, was sonst nur über mehrere Schriften verteilt an Ge-

danken zu finden ist, ohne die man Umweltprobleme heute nicht verstehen und erst recht nicht therapieren kann.

Die Leserschaft wird schon im Vorwort auf die Notwendigkeit interdisziplinärer Grenzüberschreitungen hingewiesen und vor den damit verbundenen Gefahren gewarnt. Wir kennen solche Warnungen, welche sich *post festum* oft eher als kokett und oberflächlich erweisen. Hier sind sie angebracht,



weil sich der Autor – sozusagen ungesichert und dem Spott des disziplinären Pharisäers ausgesetzt – in das schwierige Terrain der Soziologie, Ökonomie, Philosophie,

EAWAG-Intern

Psychologie, Naturwissenschaft und anderer Disziplinen vorwagt. Die Humanökologie, unter deren Flagge dieses Buch segelt, ist eine Wissenschaft, deren Revier noch bei weitem nicht abgesteckt ist, aber eines ist offensichtlich: sie wird auf der Strecke bleiben, falls sie nicht über die simple Addition disziplinärer Fakten hinauswächst – eine Wahrheit, die übrigens für die Umweltwissenschaften ganz allgemein gilt.

Jaegers Buch macht einen ernsthaften Versuch, interdisziplinär über die Transformation der ökonomischen Instrumente vor dem Hintergrund globaler Veränderungen nachzudenken. Man kann ein solches Buch nicht wirklich besprechen, sondern bestenfalls die potentiellen LeserInnen, dazu ermuntern, selber ein Schiff in Frankreich zu mieten... Ich werde daher jene Teile des Buches herauspicken, deren Botschaften mich persönlich besonders berührt haben. Dabei überspringe ich die ersten vier Kapitel, in denen vor allem der Soziologe Jaeger zu Wort kommt. Nicht dass sie nicht spannend wären, ganz im Gegenteil: Ein Physiker denkt ja viel zu wenig über den gesellschaftlichen und kulturellen Hintergrund nach, vor dem er seinen Theorien nachhängt, betrachtet den Menschen wohl kaum als *accountable animal* (Kapitel 2) und stellt sich wenig genug die Frage, wieso unsere Gesellschaft gerade die physikalische Art des Denkens, dieses doch oft so abstrakte «Naturverständnis» zuoberst auf die Leiter der Wissenschaften gestellt hat (zumindest bis vor kurzem noch) und wie diese Rangordnung mit der heutigen Umweltkrise zusammenhängt.

Mit Fragen über die Natur des Menschen ist eine intensive Auseinandersetzung notwendig, um auf der Handlungsebene konkret zu werden. Von letzterem handeln die zwei andern Kapitel. Carlo Jaeger muss schon sehr früh zur Ein-

sicht gekommen sein, dass das Funktionieren dieser Handlungsebene vor allem durch ökonomische Prozesse bestimmt wird. Er hat deshalb nach der Soziologie die Ökonomie zum zweiten Hauptthema seines akademischen Werdeganges gemacht. Zwei Gedankengänge ziehen sich als roter Faden durch die beiden Kapitel.

Erstens: Der Ökonomie Jaeger glaubt an das Potential der Mechanismen der freien Marktwirtschaft, weil der Soziologe die Motive menschlichen Handelns kennt und weiss, dass man diese nicht unterdrücken kann, sondern positiv nutzen muss. Jaeger zeigt auf, wie die Elemente der Marktwirtschaft einzusetzen wären, um sowohl ökologische Schäden zu vermeiden als auch mit begrenzten Ressourcen (Land, Energie, Wasser, mineralische Rohstoffe etc.) umzugehen. Dieser Prozess könnte letztlich so weit führen, dass Geld eine neue Bedeutung erhält, was einer heute als utopisch erscheinenden kulturellen Revolution gleichkäme.

Zweitens: Qualitatives Wachstum in den heutigen Industrieländern, begriffen als die Entkopplung von ökonomischen und physikalischem Wachstum, ist Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung in den Ländern der dritten Welt. Die Entwicklungspolitik, wie sie von den Ländern der ersten Welt betrieben wird, muss laut Jaeger den «physikalischen Umsatz» (den Umsatz von Energie und Rohstoffen) in den eigenen Ländern eindämmen und gleichzeitig den Unterschied zwischen den ökonomischen Potentialen der Länder der ersten bzw. dritten Welt verkleinern.

Es gibt ökonomische Modelle, um diesen Gedankengang zu analysieren. Die mathematisch interessierte LeserIn kann sich im 5. Kapitel (*Transforming the Economy*) mit entsprechenden theoretischen Ansätzen vertraut machen.

Wie alle derartigen Theorien (nicht nur in der Ökonomie) beweisen sie allenfalls die *Existenz* von Lösungen – und auch das nur unter sehr speziellen Annahmen –, aber keineswegs deren gesellschaftliche Machbarkeit, das weiss auch Jaeger. *Jürg Minsch* von der Hochschule St. Gallen warnt eindringlich vor der seiner Meinung nach zweckoptimistischen Zuversicht der Wirtschaft, dass sich mit sog. Effizienzsteigerungen die Schere zwischen wirtschaftlichem und physikalischem Wachstum fast beliebig weit öffnen lasse. Das eine tun ohne das andere lassen zu müssen – ist das die neue und eher trügerische Botschaft des westlichen Wirtschaftssystems? Ein entsprechender Verdacht, auf diese Weise abgespiesen zu werden, scheint sich auch bei den Ländern der dritten Welt auszubreiten. So befasst sich beispielsweise das Editorial vom 15. Oktober 1994 des indischen Umwelt-Journals *Down To Earth* kritisch mit der Konferenz in Kairo über Bevölkerung und Entwicklung: «... *whatever the world's population, 1 American child will continue to consume as much as 33 Indian children or 422 Ethiopians. ... Cunningly, the rich avoided any discussion on the issue and worked on the warped assumption that population, and not consumption, leads to environmental degradation.*» Hier besteht die Gefahr, dass Jaegers Botschaft mit einer simplifizierenden Art von Vorwärtsstrategie in einen Topf geworfen wird. Eine Konkretisierung gewisser Konzepte in Kapitel 5, wenigstens für ausgewählte Sparten, hätte mehr Klarheit geschaffen, wie denn ohne Wohlstandsverlust und bei wachsender Ökonomie der Energie- und Ressourcenverbrauch einzudämmen wäre.

Diesem Einwand zum Trotz sei lobend vermerkt, dass ein Ökonomie mit der Theorie für eine neue Gleichgewichts-Ökonomie,

Separata können bei der Bibliothek EAWAG bezogen werden

# EAWAG-Publikationen

wie theoretisch oder realistisch diese auch immer sei, sein Werk abgeschlossen hätte. Der Humanökologe fügt hier ein letztes Kapitel an (*Managing the Environmental Crisis*), welches den Gedankengang gleichzeitig mutig und innovativ, aber auch angreifbar macht. Jaeger reflektiert über die menschlichen und politischen Bedingungen, unter welche eine neue Ökonomie erst möglich wäre. Er glaubt nicht daran, dass Theorie oder Tat eines einzelnen, eines neuen Marx etwa, aus der Krise helfen kann. Dazu sind die Probleme viel zu komplex geworden. Die kulturelle Regeneration wird vielmehr, soll sie gelingen, das Werk vieler Menschen und Staaten sein. Und weil sich der Mensch als Einzelwesen nicht grundlegend ändern kann, so möchte ich nach der Lektüre des Buches beifügen, kann dies nur die Konstellation der *Menschengemeinschaft* zuwege bringen, sowohl was die innere Struktur der Staaten anbetrifft als auch das Verhältnis der Staaten untereinander. Schliesslich lebte im Laufe der Geschichte das gleiche *accountable animal*, was seine ethischen Prinzipien anbetrifft, in sehr unterschiedlichen kulturellen Einbettungen. Jaegers Buch enthält, neben seiner ökonomischen und entwicklungspolitischen Botschaft, implizit auch die Aufforderung, über die Erneuerung unserer politischen Strukturen nachzudenken. So gesehen erweist sich die Synchronizität der Umweltkrise und des politischen Unbehagens, wie wir beide heute insbesondere in der Schweiz diagnostizieren, nicht als Zufall, sondern auch als Chance für eine integrale Reform.

Dieter Imboden

- 1899 **Lukasczyk, C.E.:**  $^{36}\text{Cl}$  Chlor im Grönlandeis. Diss. ETHZ. Nr. 10'688. Zürich 1994.
- 1900 **von Schulthess, R.:** Die Emission von Lachgas  $\text{N}_2\text{O}$  in denitrifizierenden Belebungsanlagen. Diss. ETHZ Nr. 10'790, Zürich 1994.
- 1901 **Semadeni, M.:** Hydroxyl Radical Reactions with Volatile Organic Compounds Under Simulated Tropospheric Conditions: Tropospheric Lifetimes. Diss. ETHZ Nr. 10'809, Zürich 1994.
- 1902 **von Gunten, U., Hoigné, J.:** Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Waters: Interaction of Ozone and Hydroxyl Radical Reactions. *Environ. Sci. & Technol.* **28**, 1234–1242 (1994).
- 1903 **Kipfer, R., Aeschbach-Hertig, W., Baur, H., Hofer, M., Imboden, D.M., Signer, P.:** Injection of Mantle Type Helium Into Lake Van (Turkey): the Clue for Quantifying Deep Water Renewal. *Earth % Planetary Sci. Lett.* **125**, 357–370 (1994).
- 1904 **Junker, F., Field, J.A., Bangerter, F., Ramsteiner, K., Kohler, H.P., Joannou, C.L., Mason, J.R., Leisinger, T., Cook, A.M.:** Oxygenation and Spontaneous Deamination of 2-aminobenzenesulphonic acid in *Alcaligenes* sp. Strain O-1 With Subsequent *meta* Ring Cleavage and Spontaneous Desulphonation to 2-Hydroxymuconic Acid. *Biochem J.* **300**, 429–436 (1994).
- 1905 **Jakob, A., Zobrist, J., Davis, J.S., Liechi, P., Sigg, L.:** NADUF – Langzeitbeobachtung des chemisch-physikalischen Gewässerzustandes. *Gas, Wasser, Abwasser* **74**, 171–186 (1994).
- 1906 Untersuchungen in den Grundwassermodellanlagen der EAWAG mit drei verschiedenen Aquifers.  
**Nänny, P., Burkhalter, H.:** Markerversuche mit verschiedenen Tracern (I. Teil)  
**Nänny, P., Burkhalter, H., Zimmermann, U.:** Untersuchungen über den Transport von Bakterien (II. Teil). *Arb.gr. operationelle Hydrologie, Mitt.* Nr. 3, Bern 1994, 77 S.
- 1907 **Wegelin, M., Canonica, S., Mechsner, K., Fleischmann, T., Pesaro, F., Metzler, A.:** Solar Water Disinfection: Scope of the Process and Analysis of Radiation Experiments. *J. Water SRT – Aqua* **43**, 154–169 (1994).
- 1908 **Harms, H., Zehnder, A.J.B.:** Influence of Substrate Diffusion on Degradation of Dibenzofuran and 3-Chlorodibenzofuran by Attached and Suspended Bacteria. *Aool. Environ. Microbiol.* **60**, 2736–2745 (1994).
- 1909 **Behra, R., Genoni, G.P., Sigg, L.:** Festlegung der Qualitätsziele für Metalle und Metalloide in Fließgewässern. Wissenschaftliche Grundlagen. *Gas, Wasser, Abwasser* **73**, 942–951 (1993).
- 1910 **Ulrich, M.M., Müller, S.R., Singer, H.P., Imboden, D.M., Schwarzenbach, R.P.:** Input and Dynamic Behavior of the Organic Pollutants Tetrachloroethene, Atrazine, and NTA in a Lake: A Study Combining Mathematical Modeling and Field Measurements. *Environ. Sci. & Technol.* **28**, 1674–1685 (1994).
- 1911 **Scheidegger, A., Stöckli, A., Wüest, A.:** Einfluss der internen Sanierungsmassnahmen auf den Stoffhaushalt im Hallwilersee. *Wasser, Energie, Luft* **86**, 126–131 (1994).
- 1912 **Bally, M., Wilberg, E., Kühni, M., Egli, T.:** Growth and Regulation of Enzyme Synthesis in the Nitriloacetic Acid (NTA)-Degrading Bacterium *Chelatobacter heintzii* ATCC 29600. *Microbiology* **140**, 1927–1936 (1994).
- 1913 **Bosma, T.N.P., Zehnder, A.J.B.:** Behavior of Microbes in Aquifers. In: «Transport and Reactive Processes in Aquifers», T. Dracos, F. Stauffer (Eds.). Balkema, Rotterdam 1994, pp. 37–41.
- 1914 **Fent, K., Meier, W.:** Effects of Triphenyltin on Fish Early Life Stages. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* **27**, 224–231 (1994).
- 1915 **Meyer, E.I.:** Species Composition and Seasonal Dynamics of Water Mites (Hydracarina) in a Mountain Stream (Steina, Black Forest, Southern Germany). *Hydrobiologie* **288**, 107–117 (1994).
- 1916 **Van Veen, H.W., Abee, T., Kortstee, G.J.J., Konings, W.N., Zehnder, A.J.B.:** Translocation of Metal Phosphate via the Phosphate Inorganic Transport System of *Escherichia coli*. *Biochemistry* **33**, 1766–1770 (1994).
- 1917 **Wanner, O.:** Modeling of Mixed-Population Biofilm Accumulation. In: «Bio-

Publikationen

1917 **fouling and Biocorrosion in Industrial Water Systems**, G.G. Geesey, Z. Lewandowski & H.-C. Fleming (Eds.). CRC Press Inc., Boca Raton 1994, pp. 37-62.

1918 **Sedlak, D.L., Hoigné, J.**: Oxidation of S(IV) in Atmospheric Water by Photo-oxidants and Iron in the Presence of Copper. *Environ. Sci. & Technol.* 28, 1898-1906 (1994).

1919 **Eggen, R.I.L.**: Regulated Gene Expression in Methanogens. *FEMS Microbiology Reviews* 15, 251-260 (1994).

1920 **Imhof, A.**: Habitatsansprüche und Verhalten von *Perla grandis* RAMBUR (Plecoptera: Perlidae) und anderen räuberischen Steinfliegenlarven. Diss. ETHZ Nr. 10'895, Zürich 1994.

1921 **Poiger, T.**: Behavior and Fate of Detergent-derived Fluorescent Whitening Agents in Sewage Treatment. Diss. ETHZ Nr. 10'832, Zürich 1994.

1922 **Eberhard, J.E.**: Kinetics and Mechanisms of the OH Radical Initiated Oxidation of Volatile Organic Compounds under Simulated Tropospheric Conditions. Diss. ETHZ Nr. 10'889, Zürich 1994.

1923 **Schmidt, C.**: Isolation and Growth Physiology of N,N-dimethylaniline degrading *Sphingomonas* Species. Diss. ETHZ Nr. 10'710, Zürich 1994.

1924 **Bally, M.**: Physiology and Ecology of Nitrilotriacetate Degrading Bacteria in Pure Culture, Activated Sludge and Surface Waters. Diss. ETHZ Nr. 10'821, Zürich 1994.

1925 **Reichert, P.**: AQUASIM - a Tool for Simulation and Data Analysis of Aquatic Systems. *Water Sci. Tech.* 30, No. 2, 21-30 (1994).

1926 **Tschui, M., Boller, M., Gujer, W., Eugster, J., Mäder, C., Stengel, C.**: Tertiary Nitrification in Aerated Pilot Filters. *Water Sci. Tech.* 29, No. 10-11, 53-60 (1994).

1927 **Wanner, O., Debus, O., Reichert, P.**: Modelling the Spatial Distribution and Dynamics of a Xylene-Degrading Microbial Population in a Membran-Bound Biofilm. *Water Sci. Tech.* No. 10-11, 243-251 (1994).

1928 **Roelof van der Meer, J.**: Genetic Adaption of Bacteria to Chlorinated Aromatic Compounds. *FEMS Microbiology Reviews* 15, 239-249 (1994).

1929 **Holliger, C., Schraa, G.**: Physiological Meaning and Potential for Application of Reductive Dechlorination by anaerobic Bacteria. *FEMS Microbiology Reviews* 15, 297-305 (1994).

1930 **Van Veen, H.W., Abee, T., Kortstee, G.J.J., Konin gs, W.N., Zehnder, A.J.B.**: Phosphate Inorganic Transport (Pit) System in *Escherichia coli* and *Acinetobacter johnsonii*.

In: «Phosphate in Microorganisms, Cellular and Molecular Biology», A. Torriani-Gorini, E. Yagil, S. Silver (Eds.). ASM Press, Washington 1994, pp. 43-49.

1931 **Hug, S.J., Sulzberger, B.**: In Situ Fourier Transform Infrared Spectroscopic Evidence for the Formation of Several Different Surface Complexes of Oxalate and TiO<sub>2</sub>. *Langmuir* 10, 3587-3597 (1994).

1932 **Boller, M., Gujer, W., Tschui, M.**: Parameters Affecting Nitrifying Biofilm Reactors. *Water Sci. Tech.* 29, No. 10-11, 1-11 (1994).

1933 **Jaquet, J.-M., Schanz, F., Bossard, P., Hanselmann, K., Gendre, F.**: Measurements and Significance of Bio-Optical Parameters for Remote Sensing in Two Subalpine Lakes of Different Trophic State. *Aquatic Sci.* 56/3, 263-305 (1994).

**Schriftenreihe EAWAG Nr. 8**

**Krejci, V., Fankhauser, F., Gammeter, S., Grottker, M., Harmuth, B., Merz, P., Schilling, W.**: Integrierte Siedlungsentwässerung - Fallstudie Fehraltorf. Dübendorf 1994, VIII u. 303 S., 12 Karten. ISBN: 3-906484-09-2

**BESTELLTALON**

Bitte schicken Sie mir die

EAWAG NEWS in  deutsch  englisch  französisch

Publikationsnummern

\_\_\_\_\_

Anrede \_\_\_\_\_

Name/Vorname \_\_\_\_\_

Funktion \_\_\_\_\_

Firma/Organisation \_\_\_\_\_

Strasse und Nummer \_\_\_\_\_

Land, PLZ, Stadt \_\_\_\_\_

Telefon \_\_\_\_\_


Telefax \_\_\_\_\_

Bemerkungen

Dies ist eine Adressänderung (alte Adresse)

\_\_\_\_\_

Datum \_\_\_\_\_



**EAWAG**  
Bibliothek  
CH-8600 Dübendorf