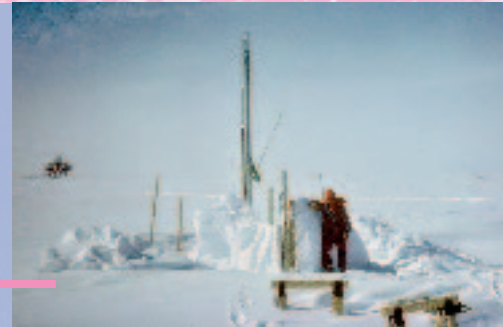
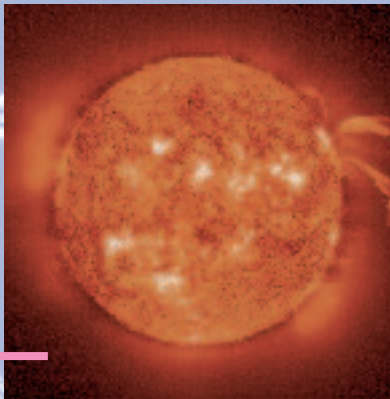


# Eisige Entdeckungen

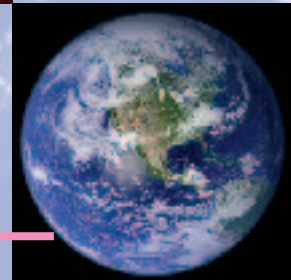
Ein weiter Weg von Grönland  
zur Messung in Zürich **6**



Sonne und Klima:  
Heisse Geschichten aus dem Eis **8**



Kosmische Strahlung und Wolken **16**



Brennendes Eis –  
Methanemissionen in die Atmosphäre **26**



## Eisige Entdeckungen

2 Ein eisiger Blick zurück in die Zukunft

### Leitartikel

3 Eis und Klima

### Forschungsberichte

6 Ein weiter Weg: Vom Grönlandeis zur Messung in Zürich

8 Sonne und Klima: Heisse Geschichten aus dem Eis

11 Wieso kam es am Ende der letzten Eiszeit zu einem erneuten Kälteeinbruch?

14 Der Kompass im Eis

16 Kosmische Strahlung und Wolken

19 Eisbedeckung von Seen und Flüssen

23 Klimaphänomen: Nordatlantische Oszillation

26 Brennendes Eis – Methanemissionen in die Atmosphäre

### Diverses

29 Publikationen

36 In Kürze

**Herausgeberin** Vertrieb und ©:  
EAWAG, Postfach 611, CH-8600 Dübendorf  
Tel. +41 (0)44 823 55 11  
Fax +41 (0)44 823 53 75  
<http://www.eawag.ch>

**Redaktion** Martina Bauchrowitz, EAWAG

**Copyright** Nachdruck möglich nach Absprache mit der Redaktion.

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

**Abbildungen** Peter Nadler, Küsnacht; Lydia Zweifel, EAWAG

**Fotos Titelblatt** M. Märki, EAWAG; Physikalisches Institut, Universität Bern; NASA; Research Center Ocean Margins, Bremen

**Konzept** Inform, 8004 Zürich

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

**Gedruckt** auf rezykliertem Papier

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

# Ein eisiger Blick zurück in die Zukunft



Martina Bauchrowitz,  
Redaktorin

Stellen Sie sich vor, Sie sind mit Freunden im Kino verabredet. Durch ein unvorhergesehenes Ereignis kommen Sie jedoch erst eine Stunde nach Filmbeginn in die Vorstellung. Kurz nachdem Sie es sich im Sessel richtig bequem gemacht haben und in die Geschichte eingetaucht sind, reisst der Film und die Vorführung muss abgebrochen werden. Sie sind sehr enttäuscht, denn sie würden gerne wissen, wie der Film ausgeht. Was können Sie tun? Sie können versuchen, den Fortgang der Geschichte zu erraten. Dabei helfen Ihnen die kurze Filmsequenz, die sie selbst gesehen haben, und die Erinnerungen ihrer Freunde, die auch den Anfang des Films verfolgt haben. Die Erzählungen ihrer Freunde sind zwar bei weitem nicht so detailliert wie ihre eigenen Eindrücke, haben aber den Vorteil, dass sie einen viel längeren Zeitabschnitt umfassen. In jedem Fall bleibt ihre Vorhersage über den Ausgang des Films eine Mutmassung.

Ähnlich geht es den WissenschaftlerInnen, die Computermodelle entwickeln, um das zukünftige Klima zu prognostizieren. Je mehr Informationen bei der Entwicklung der Modelle zur Verfügung stehen, desto zuverlässiger sind die Prognosen. Die Klimaforscher stützen sich dabei auf Datenreihen klimarelevanter Faktoren, die in der jüngeren Vergangenheit durch Beobachtungen oder instrumentelle Messungen präzise erfasst wurden. Dazu gehören z.B. die Lufttemperatur, der Auftauzeitpunkt von Seen im Frühjahr, die Sonnenaktivität oder der Vereisungsgrad der Erde. Zwei Artikel in dieser Ausgabe der EAWAG news analysieren solche historischen Aufzeichnungen zur Eisbedeckung von Seen wie sie z.B. für den St. Moritzer See seit 1832 vorliegen. Verglichen mit unserem Film entsprechen diese jüngeren Klima-

aufzeichnungen der Ihnen bekannten Filmsequenz.

Als Zeitzeugen für den Anfang der Klimageschichte befragen Klimaforscher zusätzlich Naturarchive. Vor allem die polaren Eiskappen enthalten wertvolle Informationen zu den Jahrtausende zurückliegenden klimatischen Bedingungen. Im internationalen «Greenland Ice core Project», an dem auch die EAWAG beteiligt war, wurde zwischen 1990 und 1992 ein 3 km langer Eiskern von 10 cm Durchmesser aus dem arktischen Eisschild gebohrt. Er enthält die Niederschläge der letzten 100 000 Jahre. Meter für Meter und Eisschicht für Eisschicht wurde dieser Eiskern in den letzten 12 Jahren untersucht. Allein an der EAWAG wurden einige Tausend Eisproben aufgearbeitet. Ein Teil der Resultate finden Sie in dieser EAWAG news.

Ein weiterer Faktor, der für Klimavorhersagen relevant sein könnte, ist das Verhalten von Methanhydrat. Diese eisartige Verbindung aus Wasser und Methan bildet sich bei niedrigen Temperaturen und hohem Druck z.B. in den Sedimenten der Tiefsee. Man schätzt, dass etwa 10 000 Milliarden Tonnen Methan in Form solcher Gashydrate am Grund der Weltmeere gebunden sind. Angesichts dieser gigantischen Menge wächst die Besorgnis, dass «gefrorenes» Methan frei wird, in die Atmosphäre gelangt und damit den Treibhauseffekt und die Klimaerwärmung weiter ankurbelt. Der Frage nach dem Verhalten von Methanhydrat am Meeresgrund geht auch eine Forschungsgruppe an der EAWAG nach.

Eis in verschiedener Form liefert also eine Fülle wertvoller Informationen über aktuelle und vergangene Umweltbedingungen. Nur wenn es gelingt, daraus die Anfänge des Klimafilms zu rekonstruieren, besteht die Chance, einigermaßen zuverlässige Vorhersagen für die Zukunft abzuleiten.

*Martina Bauchrowitz*

# Eis und Klima

**Etwa 80% des globalen Süsswasservorkommens liegen in Form von Eis an den beiden Polregionen fest. Dieses Eis ist ein aussergewöhnliches Umweltarchiv, das wertvolle Hinweise zum Klima der vergangenen Jahrhunderttausende enthält. Klimarelevante Informationen lassen sich zudem aus der Analyse historischer Aufzeichnungen zur Eisbedeckung von Seen entnehmen, wie sie beispielsweise für den St. Moritzer See und den Baikalsee vorliegen. Eine eher rätselhaft Substanz, die aussieht wie Eis, ist Methanhydrat. Sie lagert in den Sedimenten der Tiefsee, kann aber bei geringen Umweltveränderungen an die Oberfläche kommen. Dann wäre es möglich, dass grosse Mengen des Treibhausgases Methan in die Atmosphäre gelangen, was eine gravierende Beschleunigung der Klimaerwärmung zur Folge hätte.**

Bei Wasser denkt man gerne an rauschende Bäche oder tiefblaue Bergseen, in denen sich schneebedeckte Gipfel spiegeln. Doch Wasser tritt auch in anderen Aggregatzuständen auf, nämlich als Gas, wenn es verdunstet und zum Beispiel vom Meer aufs Land transportiert wird, oder als Schnee und Eis, wenn die Temperaturen unter null Grad liegen. Betrachtet man, wie sich das gesamte Süsswasser der Erde auf die verschiedenen Aggregatzustände verteilt, so stellt man überrascht fest, dass sich der mit Abstand grösste Teil nicht etwa in Flüssen oder Seen befindet, sondern als Eis vorhanden ist (Abb. 1).

Dieses «gefrorene» Wasser ist vorwiegend in den polaren Gebieten zu finden: 90% entfallen auf die Antarktis und auf Grönland.

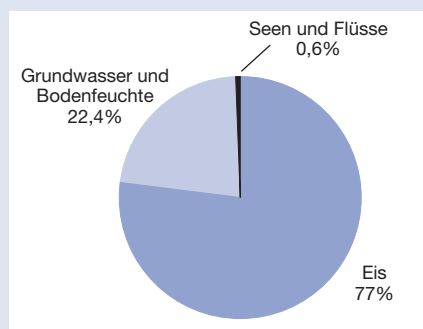


Abb. 1: Verteilung der globalen Süsswasservorkommen. Nicht dargestellt ist der Anteil des Süsswassers, der als Wasserdampf in der Atmosphäre vorkommt. Er beträgt lediglich 0,04%.

So ist der antarktische Eispanzer stellenweise fast 5 km mächtig und in Grönland erreicht die Eisschicht immerhin noch ca. 3 km. Dagegen beträgt der leider immer weiter schwindende Anteil der Gletscher in niedrigeren Breiten nur gerade 0,6%. Doch Eis ist weit mehr als nur gefrorenes Wasser. Eis liefert uns eine Fülle äusserst wertvoller Informationen über aktuelle und vergangene Veränderungen in der Umwelt. Sehr viel, was einst unter das Eis geraten ist, wartet nur darauf, hervorgeholt und untersucht zu werden [1].

## Eis als Archiv

Es gibt fast nichts, was sich nicht im Eis über lange Zeiten archivieren lässt. Aber wie wird Eis zu einem Archiv? Landeis entsteht aus Schnee. Frisch gefallener Schnee ist zunächst weich und leicht und enthält ca. 90% Luft (Abb. 2). Doch bereits nach wenigen Tagen verdichten sich die Eiskristalle zu Firn, der unter dem Druck von neuen Schneeschichten immer dichter und härter wird, bis die Firnkörner in einer bestimmten Tiefe zu Eis zusammenwachsen (Abb. 3). Schnee und Eis bestehen jedoch nicht nur aus Wasser. Denn bei der Entstehung der Wolken kondensiert der Wasserdampf in der Atmosphäre bevorzugt an Aerosolteilchen, welche die verschiedensten chemischen Substanzen enthalten können. Zudem kann eine zur Erde schwebende Schneeflocke auf ihrem Weg verschiedene Substanzen aus

der Luft aufnehmen. Und schliesslich lagern sich auf einer neuen Schneeschicht die unterschiedlichsten Dinge ab: neben Pollenkörnern und feinstem Staub aus Vulkanen oder Wüsten auch spektakuläre Grossfunde wie der Steinzeitmensch Ötzi oder eiszeitliche Mammuts.

Die Tatsache, dass alle diese Umweltproben tiefgefroren gelagert werden, ist einer der Hauptgründe, wieso Eis ein solch aussergewöhnliches Umweltarchiv darstellt [2].

## Der GRIP-Eisbohrkern

Bohrungen in die polaren Eisschilde stellen hohe Anforderungen sowohl an die Bohrtechnik als auch an die Logistik. Die Errichtung eines Bohrcamps und die Durchführung der mehrere Sommer währenden Bohrung auf 3000–4000 m ü.M., mehr als tausend Kilometer von jeglicher Zivilisation entfernt, ist fast nur im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit zu realisieren. Die ersten Tiefbohrungen, bei denen der gesamte Eispanzer bis aufs Felsbett durchbohrt wurde, liegen bereits 40 Jahre zurück. Seitdem hat es rund ein Dutzend solcher Projekte gegeben. Eine der letzten grossen Bohrkampagnen war das **Greenland Ice core Project (GRIP)** in Zentralgrönland. Von 1990 bis 1992 bohrten Wissenschaftler aus

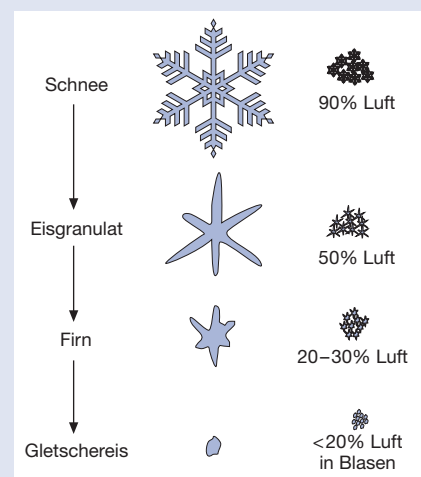


Abb. 2: Entstehung von Gletschereis aus Schnee.

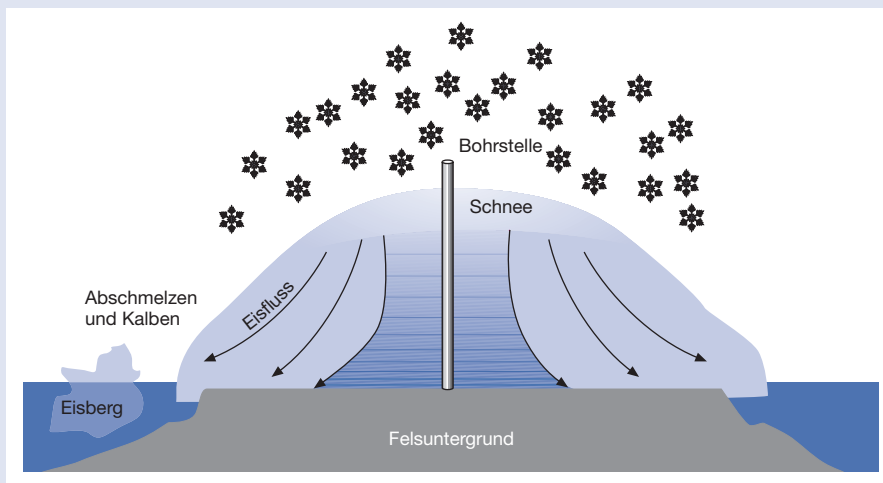


Abb. 3: Der Aufbau des polaren Eisschildes (Querschnitt). Im höher gelegenen Teil bildet sich kontinuierlich aus Schnee neues Eis, das langsam gegen die Küste fließt, wo es schmilzt oder als Eisberge auf das Meer hinaus schwimmt (dieser Vorgang wird «Kalben» genannt). Das Fließen des Eises führt dazu, dass die jährlichen Eisschichten mit zunehmender Tiefe immer dünner werden.

Belgien, Dänemark, Deutschland, England, Frankreich, Island, Italien und der Schweiz einen 3029 m langen Eiskern von 10 cm Durchmesser, der die Niederschläge der letzten 100 000 Jahre enthält.

In langen Verhandlungen wurde versucht, das Eis möglichst optimal auf die verschiedenen Forschungsgruppen aufzuteilen. Etwa 50 verschiedene Parameter sollten untersucht werden, sie reichen von Eisstrukturen über Isotope und verschiedene chemische Substanzen bis zu Staub und Vulkanasche. Diese «Quadratur des Kreises» wurde noch dadurch erschwert, dass man einen gewissen Teil des Kerns aufbewahren wollte für eventuelle Nachmessungen oder zusätzliche Parameter.

Für die Bohrung wurde ein speziell entwickelter elektrisch angetriebener mechanischer Bohrer verwendet. Dieser wurde mit Hilfe eines Stahlseils ins Bohrloch hinuntergelassen, wo er einen Kern von maximal 2,5 m Länge bohren konnte. Um zu verhindern, dass sich das Bohrloch unter dem gewaltigen Druck des Eises langsam schliessen konnte, wurde es mit einer Flüssigkeit

gefüllt, die bei  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (mittlere Jahrestemperatur an der Bohrstelle) noch nicht gefriert und die gleiche Dichte wie Eis hat. Danach wurde der Bohrer wieder an die Oberfläche geholt und der Kern herausgenommen. Nach dem Vermessen und Nummerieren wurde jedes Stück ein erstes Mal untersucht und bereits erste Teilproben entnommen. Anschliessend wurden die Kerne mittels einer Bandsäge in 55 cm lange Stücke zerschnitten, die in Plastiksäcke verpackt in gut isolierte Styroporkisten eingefüllt und für den Lufttransport nach Kopenhagen vorbereitet wurden. Dort wurden sie gemäss dem ausgehandelten Verteilungsplan zerschnitten und an die entsprechenden Forschungsgruppen zur Analyse weitergeschickt.

### Kosmogene Radionuklide im Eis

Die EAWAG interessierte sich im GRIP-Eisbohrkern u.a. für das so genannte kosmogene Radionuklid Beryllium-10 ( $^{10}\text{Be}$ ). Dabei handelt es sich um ein radioaktives Isotop des Elements Beryllium, das kontinuierlich in der Atmosphäre gebildet wird und mit dem Niederschlag auf die Erde gelangt

(siehe Kasten). Es werden jedoch nur sehr wenige dieser kosmogenen Radionuklide in der Atmosphäre gebildet: auf jeden  $\text{cm}^2$  der Erdoberfläche fallen pro Jahr im Mittel rund 1 Millionen  $^{10}\text{Be}$ -Atome. Es erstaunt deshalb nicht, dass es zu ihrem Nachweis extrem empfindliche Geräte, so genannte Beschleuniger-Massenspektrometer, braucht, die in der Lage sind, einzelne Atome zu identifizieren und zu zählen (siehe Artikel von S. Bollhalder und I. Brunner auf S. 6).

### Rekonstruktion des vergangenen Klimas

Wozu ein solcher Aufwand, nur um die paar wenigen  $^{10}\text{Be}$ -Atome zu zählen? Der Hauptgrund ist, dass man auf diese Weise etwas über die vergangene Sonnenaktivität und die Stärke des Erdmagnetfelds erfahren kann. Denn die Produktionsrate der  $^{10}\text{Be}$ -Atome in der Atmosphäre ist nicht konstant und hängt zum einen von der Sonnenaktivität ab [3]: Die kosmische Strahlung, die für die  $^{10}\text{Be}$ -Produktion in der Atmosphäre verantwortlich ist, stammt aus unserer Galaxie, die aus rund 100 Milliarden Sternen, ähnlich unserer Sonne, besteht. Wenn sie sich dem Sonnensystem nähert, trifft sie als erstes auf die Heliosphäre, einem kugelförmigen Bereich um die Sonne mit einem Radius von ca. 15 Milliarden Kilometer. Die Heliosphäre besteht aus ionisiertem Gas, dem so genanntem Sonnenwind, der von der Sonne mit hoher Geschwindigkeit wegströmt und dabei Magnetfelder von der Sonne mitträgt. Dadurch wirkt der Sonnenwind abschirmend auf die kosmische Strahlung und reduziert die  $^{10}\text{Be}$ -Produktionsrate. Mit anderen Worten: je aktiver die Sonne, desto geringer die  $^{10}\text{Be}$ -Produktion. Damit verfügen wir über eine zwar umständliche, aber einzigartige Methode, etwas über die Geschichte der Sonne und ihrer Variabilität zu lernen (siehe Artikel von M. Vonmoos auf S. 8 und R. Muscheler auf S. 11). Mit Hilfe der  $^{10}\text{Be}$ -Daten war es ausserdem möglich, eine Ende der 90er Jahre von dänischen Wissenschaftlern aufgeworfene Hypothese zu testen, die davon ausgeht, dass die

### Entstehung der kosmogenen Radionuklide

Kosmogene Radionuklide entstehen durch Prozesse, welche die Alchemisten im Mittelalter vergeblich nachzuahmen versuchten, nämlich durch die Umwandlung von Elementen, z.B. von Stickstoff in Beryllium oder von Argon in Chlor. Was den Alchemisten nicht gelang, schafft die Natur spielend. Die kosmische Strahlung, bestehend aus hochenergetischen Teilchen (Protonen und Heliumkerne), dringt in die Erdatmosphäre ein, trifft dort auf die Sauerstoff-, Stickstoff- und Argonatome der Luft und zerschlägt diese. Dabei entstehen ganze Kaskaden von neuen Teilchen, unter anderem Neutronen, die ihrerseits wieder auf Atome treffen und diese in Bruchstücke zerschlagen können. Während die neuen Bruchstücke meist instabil sind und sich sofort in stabile Isotope umwandeln, die nicht mehr von den bereits vorhandenen unterschieden werden können, bleiben  $^{10}\text{Be}$  und  $^{36}\text{Cl}$  dank ihrer langen Halbwertszeiten von 1,5 Millionen und 310 000 Jahren lange erhalten. Nach einer mittleren Aufenthaltszeit in der Atmosphäre von etwa 1 Jahr gelangen sie vor allem mit dem Niederschlag auf die Erde. Hat sich ein  $^{10}\text{Be}$ -Atom für diese Reise eine Schneeflocke ausgesucht, so kann es gut sein, dass es in einen Gletscher oder in einen polaren Eisschild gelangt.

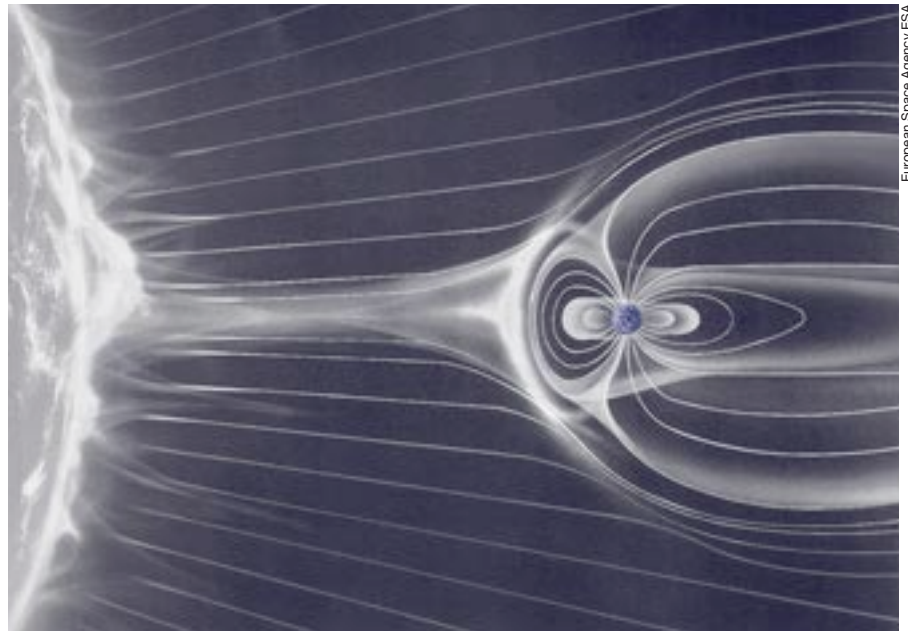


Abb. 4: Das Magnetfeld des Sonnenwindes trifft auf das Magnetfeld der Erde. Beide Magnetfelder bilden natürliche Schutzschilde, welche die kosmische Strahlung, die aus dem Weltall in die Atmosphäre eindringt, abschwächen.

kosmische Strahlung das Klima beeinflusst (siehe Artikel von J. Beer auf S. 16).

Zum anderen wird die  $^{10}\text{Be}$ -Produktionsrate durch das Erdmagnetfeld beeinflusst. Die magnetischen Feldlinien, welche die Erde von Pol zu Pol umspannen, lassen die geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung nur dann in die Erdatmosphäre eindringen, wenn diese über genügend Energie (genauer: Impuls pro Ladung) verfügen. Je stärker also das Magnetfeld, umso effektiver wird die kosmische Strahlung abgeschirmt und umso geringer ist die  $^{10}\text{Be}$ -Produktionsrate. Untersuchungen von vulkanischem Gestein und Sedimenten zeigen, dass das Erdmagnetfeld über die Jahrtausende deutlich geschwankt hat. Wie erwartet sind diese Schwankungen auch im Eis archiviert und können rekonstruiert werden (siehe Artikel von J. Beer auf S. 14).

### Eisbedeckung als Klimaparameter

Doch Eis stellt nicht nur ein wertvolles Archiv für die Sonnenaktivität und das Magnetfeld dar. Weitere Informationen zum Klima liefert es, wenn man historische Aufzeichnungen zur Eisbedeckung von Seen betrachtet (siehe Artikel von D. Livingstone auf S. 19). So wird beispielsweise seit 1443 fast lückenlos dokumentiert, wann der japanische Suwa See im Winter zufriert. Dies ist eine einzigartige Datenreihe, die in vielen klimahistorischen Studien über den nordpazifischen Raum Verwendung findet. Die längste Schweizer Datenreihe liegt für den St. Moritzer See vor und reicht zurück bis ins Jahr 1832. Eine weitere Untersuchung ging der Frage nach, ob es einen Zusammenhang zwischen der Eisbedeckung von Seen und der Nordatlantischen Oszillation gibt (siehe Artikel von D. Livingstone auf S. 23). Die Nordatlantische Oszillation ist ein über dem Nordatlantik zwischen Azorenhoch und Islandtief wirksames Klimaphänomen, das besonders im Winter ausgeprägt ist. Dann löst es starke westliche Winde aus, die warme, feuchte Meeresluft ostwärts über Europa transportieren. Die Folge sind milde,

nette Winter in Europa und weiten Teilen Zentralasiens und damit auch früher auftauende Seen in diesen Regionen [4].

### Eis aus Methanhydrat

Zu guter Letzt verlassen wir das Eis als Indikator für das vergangene Klima und wenden uns Methanhydrat zu. Dies ist eine Verbindung aus Eis (also Wasser) und Methan. Sie bildet sich bei niedrigen Temperaturen und hohem Druck, z.B. in den Sedimenten der Tiefsee, und ist auch nur unter solchen Bedingungen stabil. Im Gemeinschaftsprojekt CRIMEA beschäftigt sich eine internationale Wissenschaftsgruppe unter Beteiligung der EAWAG mit der Frage, ob dieses Methanhydrat eine Gefahr für unsere Umwelt darstellt (siehe Artikel von C. Schubert auf S. 25). Denn bereits geringfügig veränderte Umweltbedingungen – wenn z.B. die Temperatur des Tiefenwassers leicht ansteigt oder sich die Druckverhältnisse durch Meeresspiegelschwankungen verschieben – können dazu führen, dass Methanhydrat frei wird und sich zersetzt. Dann könnten grosse Mengen Methan in die Atmosphäre gelangen. Da Methan neben Kohlendioxid eines der wichtigsten Treibhausgase ist, könnten die Folgen auf das Klima gravierend sein [5].

### Ein Blick zurück in die Zukunft

Die Zukunft vorauszusagen war schon immer ein Traum der Menschheit. Während früher Propheten mit Kartenlegen und Kaffeesatzlesen nicht besonders erfolgreich waren, versuchen Wissenschaftler heute das Klima der Zukunft mittels äusserst kom-

plexer Computermodelle zu prognostizieren. Solche Computermodelle liefern aber nur dann zuverlässige Resultate, wenn sie alle wichtigen Prozesse und ihr Zusammenwirken korrekt abbilden. Dazu muss man diese aber über längere Zeiträume genau studieren. Nur wenn es uns gelingt, die Klimaänderungen der Vergangenheit zu verstehen, können wir hoffen, die Zukunft vorauszusagen. Ein guter Prophet wirft deshalb einen langen Blick zurück in die Vergangenheit.



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

- [1] Bradley R.S. (1985): Climate and climate variability. In: Quaternary Paleoclimatology – Methods of Paleoclimatic Reconstruction (ed. R.S. Bradley). Allen and Unwin, Boston, p. 11–46.
- [2] Beer J. (1995): Klimainformationen aus polaren Eiskernen. EAWAG news 38d, 3–5.
- [3] Beer J., Mende W., Stellmacher R. (2000): The role of the Sun in climate forcing. Quaternary Science Reviews 19, 403–415.
- [4] Straile D., Livingstone D.M., Weyhenmeyer G.A., George D.G. (2003): The response of freshwater ecosystems to climate variability associated with the North Atlantic Oscillation. In: The North Atlantic Oscillation – Climatic Significance and Environmental Impact (ed. J.W. Hurrell). American Geophysical Union, Washington, p. 263–279.
- [5] Kvenvolden K.A. (1988): Methane hydrates and global climate. Global Biogeochemical Cycles 2, 221–229.

# Ein weiter Weg: Vom Grönlandeis zur Messung in Zürich

**Aus Spuren in Umweltarchiven kann man Rückschlüsse auf vergangene Umweltveränderungen ziehen. Eine solch heisse Spur verfolgen wir bei unseren Untersuchungen des 3 km langen Grönland-Eisbohrkerns. Eisschicht für Eisschicht wird dabei unter anderem die Konzentration des Radionuklids Beryllium-10 ( $^{10}\text{Be}$ ) bestimmt. Anhand solcher Daten ist es möglich, Aussagen über weit zurückliegende Klimaänderungen zu machen. Etwa 10 000 Eisproben sind in den letzten Jahren in den Labors der EAWAG aufgearbeitet und im ETH/PSI-Beschleuniger-Massenspektrometer gemessen worden.**

Rund 1 Million Atome des Radionuklids Beryllium-10 ( $^{10}\text{Be}$ ) gelangen pro Jahr mit dem Niederschlag aus der Atmosphäre auf jeden  $\text{cm}^2$  der Erdoberfläche. Im Polareis werden diese  $^{10}\text{Be}$ -Atome Eisschicht für Eisschicht festgelegt. Geht man davon aus, dass im globalen Mittel rund 1 m Niederschlag fällt, bedeutet dies, dass in 1 kg Eis ungefähr 10 Millionen  $^{10}\text{Be}$ -Atome enthalten sind. Auf den ersten Blick erscheint das viel. 10 Millionen  $^{10}\text{Be}$ -Atome wiegen jedoch nur etwa  $10^{-15}$  g. Eine Menge, die vergleichbar ist mit einem einzigen Regentropfen im Bodensee. Dies nachzuweisen, ist eine Herausforderung an die Analytik. Parallel zur Entwicklung der Beschleuniger-Massenspektrometrie wurde in den letzten 15 Jahren eine elegante Probenaufbereitungsmethode (siehe Kasten) an der EAWAG

etabliert. Dieser Artikel soll Einblick in unsere routinemässig durchgeführten Arbeiten im Labor geben und beschreibt, wie die  $^{10}\text{Be}$ -Atome aus dem Eiskern extrahiert und für die Messung im Beschleuniger-Massenspektrometer an der ETH Zürich auf dem Höggerberg vorbereitet werden.

## Von der Arktis ins Labor der EAWAG

Die in Grönland gewonnenen Eisbohrkerne werden als Teilschnitte (maximal ein Viertel des Kernquerschnitts) von 55 cm Länge in Plastiksäcke eingeschweisst und in Styroporkisten verpackt nach Dübendorf geliefert, wo sie in einem Kühlraum bei  $-20^\circ\text{C}$  bis zur Aufarbeitung gelagert werden (Foto 1). Mit einer Bandsäge werden einige Eisproben in Teilproben zerschnitten (Foto 2),

um eine höhere Zeitauflösung zu erreichen. Vor der eigentlichen Verarbeitung wird jede Teilprobe zunächst mit Reinstwasser gewaschen, um Reste von Bohrflüssigkeit und andere äusserliche Verunreinigungen zu entfernen. Anschliessend werden die Eisproben in Schmelzbecher gegeben, gewogen und mit einer genau bekannten Menge des Carriers  $^9\text{Be}$  versetzt (Foto 3). In einem konventionellen Mikrowellenofen wird das Eis geschmolzen (Foto 4) und danach tropfenweise über einen Kationentauscher gegeben (Foto 5), der die Berylliumionen zurückhält. Der Kationentauscher mit den Berylliumionen kann dann problemlos einige Monate bis zum nächsten Verarbeitungsschritt gelagert werden.

Zur Weiterverarbeitung werden die Berylliumionen mit Hilfe von Säure aus dem Kationentauscher eluiert und mit Ammoniak unter Bildung von Berylliumhydroxid [ $\text{Be}(\text{OH})_2$ ] gefällt, vom Rest abgetrennt und anschliessend mit Säure wieder aufgelöst. Damit das Be in der Ionenquelle des Beschleuniger-Massenspektrometers negative Ionen liefert, muss es mit einem leitenden Metall versetzt werden. Wir verwenden dazu Silber, das in Form einer Silbernitratlösung zugegeben wird. Silber und Beryllium fallen nun gemeinsam als Hydroxid aus. Für die spektrometrische Messung muss das  $\text{Be}(\text{OH})_2$  noch oxidiert werden. Dazu trocknen wir die Proben kurz unter einer UV-Lampe vor und geben sie dann in einen Muffelofen (Foto 6), wo  $\text{Be}(\text{OH})_2$  bei  $850^\circ\text{C}$  innerhalb von zwei Stunden zu  $\text{BeO}$  oxidiert. Zum Schluss werden die Proben in ein kleines Loch von 1 mm Durchmesser in Kupfertargets gepresst (Foto 7). Nach ca. 24 Stunden sind die Berylliumproben endlich bereit (Foto 8) für die Messung im Beschleuniger-Massenspektrometer (Fotos 9 und 10).

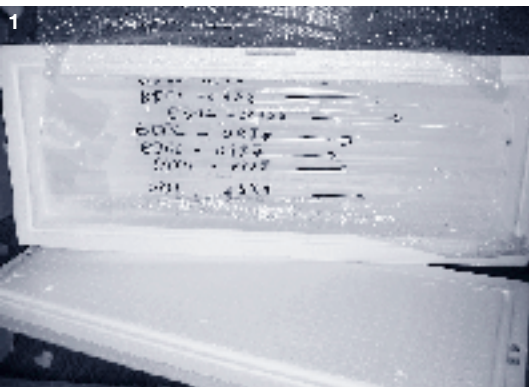
## Von der EAWAG zur Messung auf den Höggerberg

Bei unseren Proben haben wir es mit äusserst geringen Isotopenverhältnissen im Bereich von  $10^{-13}$  zu tun, die mit Hilfe

### Extraktion und Nachweis von $^{10}\text{Be}$

Traditionellerweise weist man Radionuklide über den radioaktiven Zerfall nach. Dies ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn die zu untersuchenden Radionuklide eine genügend kurze Halbwertszeit haben. Im Verlauf einer vernünftigen Messdauer von Tagen bis maximal Wochen müssen genügend Atome zerfallen, um sie ohne grössere Messfehler detektieren zu können. Genau hier liegt der Knackpunkt bei  $^{10}\text{Be}$ . Seine Halbwertszeit ist mit 1,5 Millionen Jahren viel zu lang. Pro Jahr zerfallen nämlich nur ca. 5  $^{10}\text{Be}$ -Atome der rund 10 Millionen  $^{10}\text{Be}$ -Atome pro kg Eis. Der Nachweis von  $^{10}\text{Be}$  durch die radioaktive Zerfallsmethode führt daher nicht zum Ziel.

Als Alternative bietet sich die Massenspektrometrie an. Sie macht sich die Tatsache zunutze, dass die meisten Elemente als unterschiedlich schwere Isotope vorkommen. Dies gilt auch für das Element Beryllium: neben dem radioaktiven Isotop  $^{10}\text{Be}$ , das die Atommasse 10 hat, existiert auch noch das leichtere, nicht radioaktive Isotop  $^9\text{Be}$  mit der Atommasse 9. Die Massenspektrometrie bestimmt nun, in welchem Verhältnis zwei Isotope – in unserem Fall  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  – zueinander vorkommen, so dass man anschliessend die Anzahl der gesuchten  $^{10}\text{Be}$ -Atome einfach berechnen kann. Da die Eisproben jedoch nur winzigste Spuren des  $^9\text{Be}$ -Isotops enthalten, muss für die Messungen eine bekannte Menge dieses Isotops (typischerweise 0,2 mg) zugegeben werden. Das zugefügte  $^9\text{Be}$  wirkt als so genannter Carrier und sorgt dafür, dass bei der chemischen Extraktion die wenigen im Eis vorhandenen  $^{10}\text{Be}$ -Atome mitextrahiert werden.



Fotos: Susi Lindig, Zürich

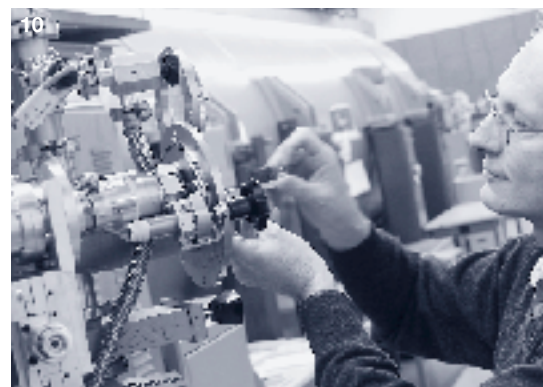
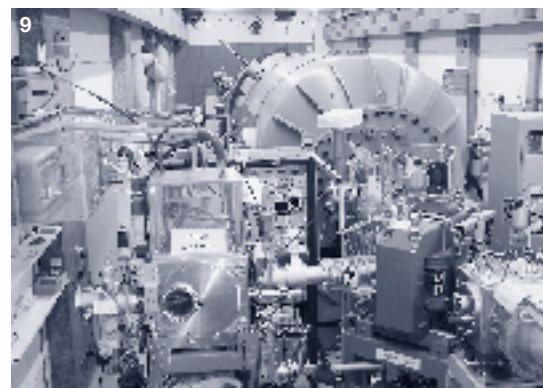
konventioneller Massenspektrometer nicht messbar sind, da sie im Hintergrundrauschen untergehen. Erst wenn Beschleunigungsspannungen von mehreren Millionen statt nur Tausenden von Volt wie bei herkömmlichen Massenspektrometern angelegt werden, wird es möglich, dass jedes einzelne Atom vom Detektor nicht nur gezählt, sondern auch aufgrund seiner Masse und Kernladungszahl identifiziert werden kann. Nur so erreicht man, dass der Detektor die seltenen  $^{10}\text{Be}$ -Atome von den viel häufigeren anderen Atomen unterscheiden kann. Die eigentliche Messung dauert nur etwa 15 Minuten. Solche Hochenergie-Massenspektrometer benötigen als zentrale Einheit einen Beschleuniger und heissen deshalb Beschleuniger-Massenspektrometer. Eines der weltweit ersten Exemplare steht an der ETH Zürich auf dem Höggerberg und wird von der ETH Zürich und dem Paul Scherrer Institut gemeinsam betrieben. Das Herzstück, der Tandem-Beschleuniger, der Teilchen mit bis zu 6 Millionen Volt beschleunigt, wurde in den 60er Jahren gebaut und diente während vieler Jahre der Grundlagenforschung in der Atom- und Kernphysik.

In den letzten 15 Jahren sind an der EAWAG rund 10 000 Proben aufbereitet und mit dem Beschleuniger-Massenspektrometer gemessen worden. Damit wurden ca. 5 km Eisbohrkern analysiert und die  $^{10}\text{Be}$ -Konzentrationen der vergangenen rund 100 000 Jahre bestimmt. Die folgenden vier Artikel (Seiten 8–18) beschreiben, wie man, ausgehend von diesen  $^{10}\text{Be}$ -Rohdaten, Aussagen über weit zurückliegende Umweltveränderungen machen kann.



S. Bollhalder (links) und I. Brunner (rechts) sind Technikerinnen in der Gruppe «Radioaktive Tracer» der Abteilung «Oberflächengewässer». Sie sind dort u.a. für die routinemässige Aufbereitung der Eisproben zuständig.

Koautoren: Maura Vonmoos und Jürg Beer



# Sonne und Klima: Heisse Geschichten aus dem Eis

Dank der Paläoklimaforschung wissen wir heute, dass das Klima in der Vergangenheit nicht stabil, sondern zum Teil starken Schwankungen unterlegen war. Sonne, Vulkanismus und interne System-schwankungen waren in den letzten gut 10 000 Jahren die wichtigsten natürlichen Klimafaktoren. Seit der industriellen Revolution mischt auch der Mensch tüchtig mit und ist in den letzten 20 Jahren wohl der Hauptverursacher der steigenden Temperaturen. Um das komplexe Klimasystem verstehen und den Einfluss des Menschen auf das Klima abschätzen zu können, müssen zunächst die einzelnen natürlichen Klimafaktoren genauer unter die Lupe genommen werden. So untersucht die EAWAG, wie stark die Sonnenaktivität in der Vergangenheit variierte.

Die Sonne ist der weitaus grösste Energie-lieferant der Erde und deshalb der Motor unseres Klimasystems. Sie treibt die atmo-sphärische Zirkulation einerseits direkt durch ihre Einstrahlungsleistung an und

andererseits indirekt, indem sie die atmo-sphärische Zusammensetzung (z.B. Ozon, Wasserdampf) beeinflusst.

Dieser Energie-Input der Sonne wurde lange Zeit als konstant betrachtet und demzufolge

von den Klimatologen als «Solarkonstante» bezeichnet. Sie beträgt rund  $1367 \text{ W/m}^2$  und gibt die Intensität der Sonnenstrahlung (= Irradianz) an, die auf die Atmosphären-obergrenze in einer Distanz von 1 astro-nomischen Einheit (mittlere Distanz Sonne-Erde) trifft. Direkte Messungen der Irradianz mittels Satelliten existieren erst seit 1978. Seither zeigt sich, dass die Solarkonstante gar keine Konstante ist. Tatsächlich weist sie zyklische Schwankungen mit einer durchschnittlichen Periode von 11 Jahren und einer mittleren Amplitude von 0,1% auf (Abb. 1A) [1]. Dies ist ein klares Indiz dafür, dass der Motor unseres Klimasystems nicht gleichmässig, sondern mal stärker, mal schwächer läuft. Verknüpft sind die Ände-rungen der Irradianz mit einer schwanken- den Sonnenaktivität. Wie sah es aber vor 1978 aus, als es noch keine direkten Mes-sungen gab? Gemeinsam mit anderen in-ternationalen Forschergruppen sucht die EAWAG nach Spuren, die es ermöglichen, die Sonnenaktivität bis weit in die Vergan-genheit hinein zu rekonstruieren [2, 3].

## Sonnenflecken als Mass für die Sonnenaktivität

Erste Indizien für eine schwankende Son-nenaktivität sammelten Astronomen bereits vor 400 Jahren. Seit Erfindung des Tele-skops im Jahr 1610 werden Veränderun-gen auf der Sonnenoberfläche beobachtet und aufgezeichnet [4]. Dabei stellte man fest, dass die Anzahl der dunklen Sonnen-flecken stark variiert – sie kann zwischen 0 und ca. 300 Flecken liegen. Wie die Irradianz schwankt auch die Anzahl Sonnenflecken zyklisch mit einer Periode von rund 11 Jah-ren (Abb. 1B + 2). Die Sonnenflecken sind Ausdruck magnetischer Prozesse und somit ein direktes Mass für die Sonnenaktivität. Je aktiver die Sonne ist, desto mehr Sonnen-flecken gibt es auf ihrer Oberfläche. Dunkel erscheinen sie deshalb, weil sie eine redu-zierte Oberflächentemperatur von ca. 4000 Kelvin (entsprechen etwa  $3700^\circ\text{C}$ ) gegen-über normal ca. 5800 Kelvin (entsprechen etwa  $5500^\circ\text{C}$ ) haben und somit eine lokal

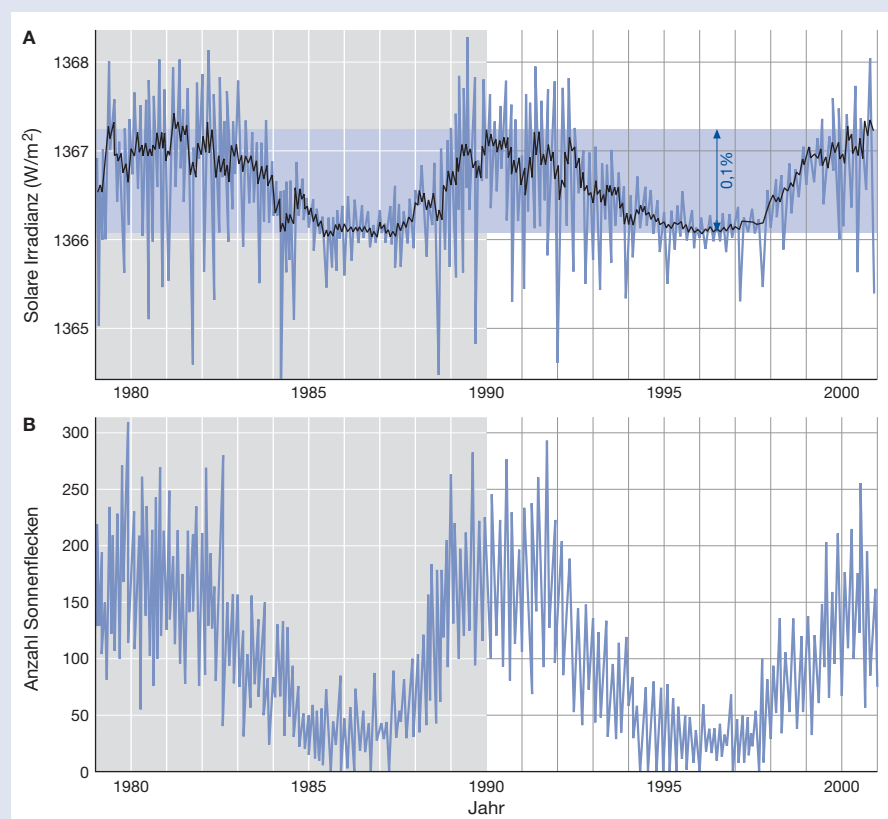


Abb. 1: Durch Satelliten gemessene Irradianz seit 1978 (A) [1] im Vergleich zur Anzahl der Sonnenflecken (B), die für den gleichen Zeitraum durch Beobachtung ermittelt wurden [4].



geringere Energieabstrahlung aufweisen. Da jedoch die Bereiche um die Flecken herum überdurchschnittlich heiss sind, ist die Abstrahlung einer Sonne mit vielen Sonnenflecken insgesamt grösser.

Dieser Zusammenhang wird auch durch die Satellitenmessungen der Irradianz bestätigt: die beiden Kurven verlaufen parallel zueinander (Abb. 1A + B). Viele Wissenschaftler hat dies darin bestärkt, aus der Anzahl Sonnenflecken die Irradianz zu rekonstruieren und damit Rückschlüsse auf Veränderungen im Klimageschehen der vergangenen 400 Jahre zu ziehen.

## Stark schwankende Sonnenaktivität in den letzten 400 Jahren

Betrachtet man die bald vierhundertjährigen Aufzeichnungen der Sonnenflecken [4], zeigt sich, dass die Sonnenaktivität deutlich stärker und unregelmässiger schwankte als bisher durch Satelliten gemessen wurde (Abb. 2). So wurden während des Maunder-Minimums von 1645–1715 fast keine und während des Dalton-Minimums von 1795–1830 nur sehr wenige Sonnenflecken beobachtet, was auf eine relativ inaktive

Sonne schliessen lässt. Seither nimmt die Anzahl der Sonnenflecken kontinuierlich zu. Lean und Kollegen wollten es genauer wissen und versuchten anhand der Anzahl Sonnenflecken die Intensität der vergangenen Sonnenstrahlung zu beziffern. Danach hat die Irradianz seit dem Maunder-Minimum um 0,24% zugenommen [2] (Abb. 3). Dies ist eine deutlich grössere Änderung als die bisher gemessenen Schwankungen. Aus der Beobachtung anderer Sonnensysteme weiss man, dass die Irradianz durchaus stark variieren kann. So kann die Abstrahlung von Sternen, die in ihren Eigenschaften der Sonne ähnlich sind, um bis zu 1% schwanken. Zudem sprechen verschiedene klimatische Spuren auf der Erde dafür, dass solche Schwankungen der Irradianz nicht unrealistisch sind. Beispielsweise fällt die so genannte Kleine Eiszeit, die von ca. 1400–1850 dauerte und von der in den Alpen grosse Moränenablagerungen riesiger Gletschervorstösse zeugen, mit einer reduzierten Sonnenaktivität zusammen. Ferner kann aus historischen Quellen entnommen werden, dass die Themse während der Kleinen Eiszeit allwinterlich zufror. Im Winter 1683/84, mitten im Maunder-Minimum, wird eine besonders dicke Eisbedeckung notiert. Ab Winter 1813/14 froh die Themse jedoch nicht mehr zu, seither ziehen sich auch die Gletscher in den Alpen wieder kontinuierlich zurück und die Anzahl Sonnenflecken nimmt stetig zu.

## Archivierung der Sonnenaktivität der letzten 11500 Jahre im Eis der Polkappen

Was aber tun, will man noch weiter als nur 400 Jahre in die Vergangenheit zurückgehen? Hier setzt die aktuelle Forschungs-

arbeit der EAWAG an. Unser Ziel ist es, die Sonnenaktivität über das gesamte Holozän, das ist die seit etwa 11 500 Jahren anhaltende Warmzeit, zu rekonstruieren. Wieder sind wir auf indirekte Hinweise angewiesen. Als Mass für die vergangene Sonnenaktivität untersuchen wir die Menge des kosmogenen Radionuklids Beryllium-10 ( $^{10}\text{Be}$ ), das durch kosmische Strahlung in der Atmosphäre produziert wurde und das nun, nachdem es mit dem Niederschlag ausgewaschen wurde, in den Eiskappen der Pole nachweisbar ist (siehe Leitartikel S. 4). In diesen mächtigen Eisarchiven kann man in einer relativ kurzen vertikalen Ausdehnung sehr weit in die Vergangenheit zurückgehen, da die einzelnen Jahreslagen durch den Druck der darüber liegenden jüngeren Eisschichten und durch das Eisfließen stark ausgedünnt wurden. Der von der EAWAG untersuchte GRIP-Eisbohrkern aus Grönland ist ca. 3 km lang und umfasst etwa 100 000 Jahre. In einer Sisyphusarbeit wurde darin zunächst – Lage für Lage – die  $^{10}\text{Be}$ -Konzentration bestimmt (siehe Artikel von S. Bollhalder und I. Brunner, S. 6). Beachtet man zwei wichtige Zusammenhänge, kann man in einem anschliessenden Schritt ausgehend von der  $^{10}\text{Be}$ -Konzentration auf die Sonnenaktivität zurückschliessen:

- Die  $^{10}\text{Be}$ -Produktion hängt nicht nur von der Sonnenaktivität, sondern auch von Schwankungen des Erdmagnetfelds ab. Will man also die Sonnenaktivität rekonstruieren, muss der Einfluss des Magnetfelds herausgerechnet werden.
- Die im Eis messbare  $^{10}\text{Be}$ -Konzentration wird sowohl von der in der Atmosphäre produzierten  $^{10}\text{Be}$ -Menge als auch von der Niederschlagsmenge beeinflusst – je grösser die Niederschlagsmenge, desto stärker wird

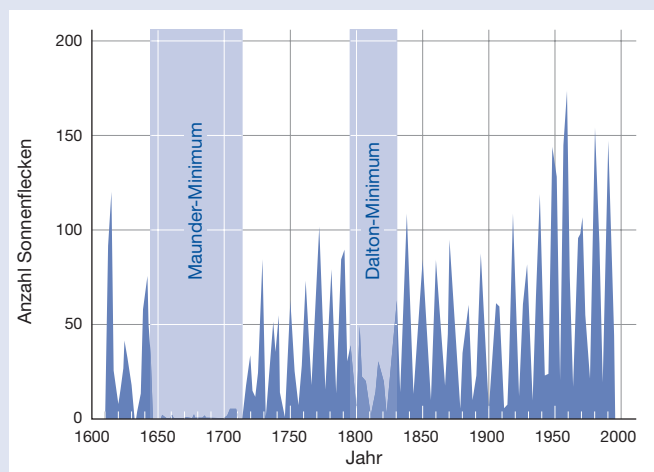


Abb. 2: Die Anzahl der Sonnenflecken seit 1610 [4], dargestellt sind die jährlichen Mittelwerte. Je aktiver die Sonne, desto mehr Sonnenflecken entstehen auf ihrer Oberfläche. Neben dem deutlichen 11-Jahres-Zyklus ist ein zunehmender Trend in der Aktivität seit Beginn des 18. Jahrhunderts feststellbar.

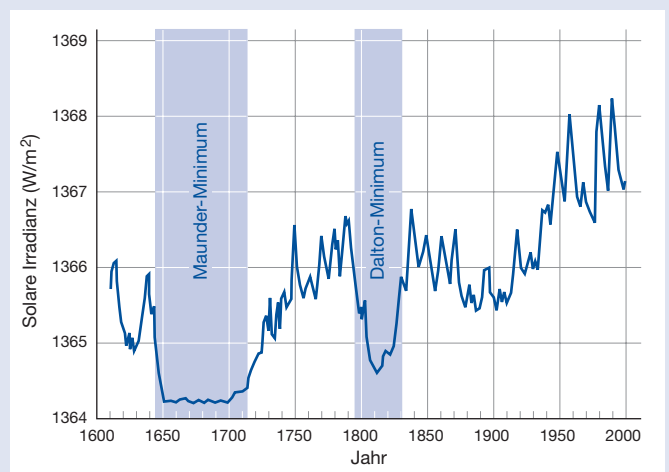


Abb. 3: Verlauf der bis ins Jahr 1610 rekonstruierten Irradianz. Die Rekonstruktion basiert auf Sonnenfleckenaufzeichnungen und der Beobachtung von Sternen, die der Sonne ähnlich sind. Danach hat die Irradianz seit dem Maunder-Minimum um 0,24% zugenommen. Verändert nach [2].

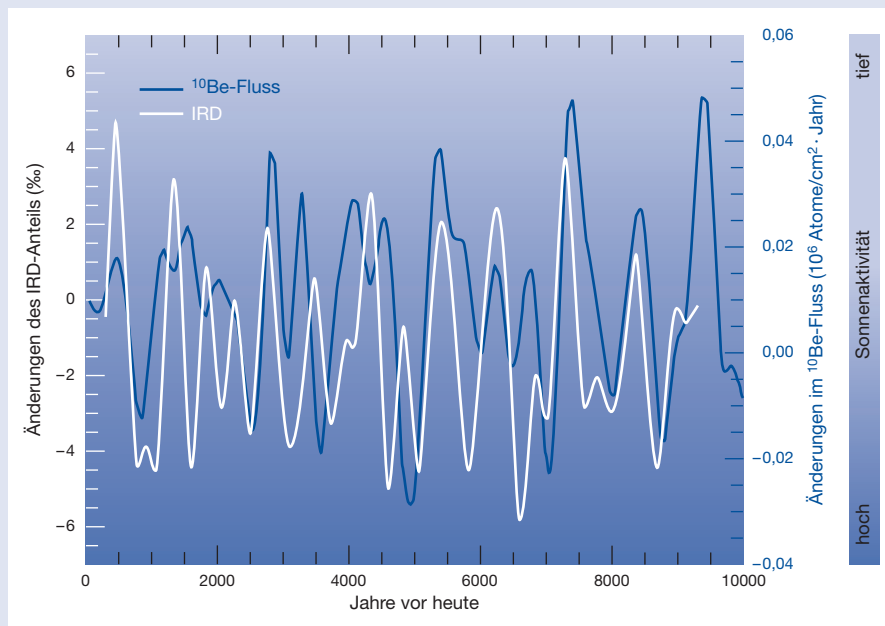


Abb. 4: Änderungen des  $^{10}\text{Be}$ -Flusses im GRIP-Eisbohrkern (dunkelblaue Kurve) und Änderungen des IRD-Anteils im Sediment (weisse Kurve). IRD = «ice-rafted debris». Vereinfacht nach [3].

das  $^{10}\text{Be}$  verdünnt. Daher steht als Mass für die Sonnenaktivität nicht einfach die  $^{10}\text{Be}$ -Konzentration, sondern man errechnet den  $^{10}\text{Be}$ -Fluss und gibt damit die Anzahl  $^{10}\text{Be}$ -Atome an, die pro Quadratcentimeter und Sekunde mit dem Niederschlag im Eis abgelagert wurden.

Unsere Untersuchungen ergaben, dass der  $^{10}\text{Be}$ -Fluss und damit die Sonnenaktivität über das gesamte Holozän recht unregelmässig war (Abb. 4, dunkelblaue Kurve). Dabei zeigt ein niedriger  $^{10}\text{Be}$ -Fluss eine aktive Sonne und ein hoher  $^{10}\text{Be}$ -Fluss eine weniger aktive Sonne an. Derzeit arbeiten wir daran, diese relativen Aussagen zur Sonnenaktivität als Irradianzwerte auszudrücken. Analog zur oben beschriebenen Rekonstruktion der Irradianz aus den Sonnenflecken versuchen wir die Irradianz aus den  $^{10}\text{Be}$ -Daten abzuleiten.

### Weitere klimatische Hinweise durch gewanderte Eisberge

Weitere Indizien, die für einen schwankenden Einfluss der Sonne im Holozän sprechen, kommen aus anderen Paläoarchiven [3]. Verschiedene Sedimentkerne aus Tiefseebohrungen im östlichen Nordatlantik etwa auf der Höhe Irlands und im Westatlantik auf der Höhe Neufundlands weisen mehrere markante Lagen gröberer Materials auf. Während normalerweise so weit von der Küste entfernt nur noch feinputikuläre Tone und Schlamm in den Sedimenten der Tiefsee abgelagert werden, weisen jene Lagen Korngrößen der Sandfraktion und grösser auf. Woher kommt dieses Material? Einer sehr wahrscheinlichen Erklärung nach

ist es mit den Eisbergen dort hin verfrachtet worden. Beim Kalben der Eisberge (Abbrechen der Eisberge vom Gletscher ins Wasser) wird vom Gletscher erodierter und an deren Unterseite angefrorener Gesteinschutt mit auf das Meer hinausgetragen. Schmilzt der Eisberg, so sinkt der Schutt auf den Meeresboden. Seiner Transportart nach wird dieses grobpartikuläre Material im Sediment auch als «ice-rafted debris» (= IRD, «mit dem Eis geflösster Schutt») bezeichnet.

### Rotes Grönlandgestein im Sediment der Tiefsee

Genauere Untersuchungen der Zusammensetzung des IRD in den Sedimentkernen lassen Rückschlüsse auf die Herkunft der Partikel zu. Vulkanisches Glas deutet auf die Vulkaninsel Island als Ursprungsort hin. Als weitere so genannte petrologische Tracer finden sich Mineralien, die aus Grönland und Neufundland stammen müssen. Beispielsweise verrät eine rötlich gefärbte Komponente, dass es sich um Mineralien handelt, die von den «red beds», einer typischen Gesteinsformation Ost-Grönlands, weg-erodiert worden sind.

Die Fundorte dieser polaren Gesteinsfragmente zeugen davon, dass Eisberge im Verlauf des Holozäns immer wieder recht weit nach Süden vordringen konnten. Möglich war dies nur bei sehr niedrigen Luft- und Meerwassertemperaturen, die das Abschmelzen der Eisberge verzögerten. Somit sind diese groben Gesteinslagen eindeutige Indikatoren für kältere Klimaperioden. Durch mühsames Zählen unter dem Mikroskop hat die Forschungsgruppe von G. Bond den

IRD-Anteil in mehreren Sedimentkernen bestimmt (Abb. 4, weisse Kurve) [3] und diese Ergebnisse mit den  $^{10}\text{Be}$ -Daten der EAWAG (Abb. 4, dunkelblaue Kurve) verglichen. Beide Kurven zeigen ein in etwa übereinstimmendes Muster. Ein hoher IRD-Anteil im Sediment deutet auf eine Kaltzeit hin, währenddessen Eisberge weit nach Süden vordringen konnten. Im Verlauf von Warmzeiten schmelzen die Eisberge bereits viel weiter nördlich, was sich durch einen niedrigen IRD-Anteil in den untersuchten Sedimentproben ausdrückt.

Aus unseren Ergebnissen lassen sich die folgenden beiden Zusammenhänge ableiten:

- Ein «hoher IRD-Anteil  $\approx$  Kaltzeit» ist mit einem «hohen  $^{10}\text{Be}$ -Fluss  $\approx$  inaktive Sonne» korreliert.
- Ein «niedriger IRD-Anteil  $\approx$  Warmzeit» ist mit einem «niedrigen  $^{10}\text{Be}$ -Fluss  $\approx$  aktive Sonne» verknüpft.

Dies deutet daraufhin, dass das Driftverhalten der Eisberge im Holozän wahrscheinlich von der Sonne gesteuert wurde.

All diese Beobachtungen belegen die bedeutende Rolle, welche die Sonne in unserem Klimasystem spielt. Doch es sind noch viele Fragen offen: Wie reagiert unser Klimasystem auf Änderungen in der Strahlungsmenge? Welches sind die verantwortlichen Prozesse? Wie werden geringe Änderungen der Sonnenaktivität intern durch das Klimasystem der Erde verstärkt, z.B. in der Atmosphäre? Die aktuelle Forschung sucht Antworten auf diese Fragen und hält den Blick offen für weitere Indizien.



Maura Vonmoos, Erdwissenschaftlerin, rekonstruiert derzeit im Rahmen ihrer Doktorarbeit in der Abteilung «Oberflächen-gewässer» die Sonnenaktivität im Holozän.

- [1] Fröhlich C. (2000): Observations of irradiance variations. *Space Science Reviews* 94, 15–24.
- [2] Lean J., Beer J., Bradley R. (1995): Reconstruction of solar irradiance since 1610: implications for climate change. *Geophysical Research Letters* 22, 3195–3198.
- [3] Bond G., Kromer B., Beer J., Muscheler R., Evans M.N., Showers W., Hoffmann S., Lotti-Bond R., Hajdas I., Bonani G. (2001): Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene. *Science* 294, 2130–2136.
- [4] Hoyt D.V., Schatten K.H. (1998): Group sunspot numbers: a new solar activity reconstruction. *Solar Physics* 179, 189–219.

# Wieso kam es am Ende der letzten Eiszeit zu einem erneuten Kälteeinbruch?

**Grossräumige Klimawechsel im nordatlantischen Raum werden oft mit veränderten Ozeanströmungen in Zusammenhang gebracht. Das gilt auch für die letzte, als Jüngere Dryas bezeichnete Kaltphase der Würm-Eiszeit. Damals kam es zu einem erneuten Kälteeinbruch und die nordatlantische Region fiel innerhalb weniger Jahrzehnte von einem gemässigten Klima zurück in eiszeitliche Bedingungen. Klimaindikatoren lieferten jedoch bisher widersprüchliche Informationen über die Ursachen dieser Kaltphase. Die EAWAG spürte daher nach zusätzlichen Indizien in einem Eisbohrkern aus Grönland.**

Die Würm-Eiszeit war die bis jetzt letzte Eiszeit im Verlauf der Erdgeschichte. Sie dauerte ca. 100 000 Jahre und endete vor rund 10 000 Jahren. Typisch für diese Eiszeit waren schnelle Klimaänderungen im nordatlantischen Raum. Als Jüngere Dryas bezeichnet man die letzte Kaltphase der Würm-Eiszeit. Sie setzte sehr abrupt vor ca. 12 700 Jahren ein und dauerte etwa 1200 Jahre. In dieser Zeit sank die mittlere Jahrestemperatur in Grönland in der Grössenordnung von 10 °C (Abb. 1A) [1]. Einer gängigen Hypothese nach wurde dieser Klimawechsel durch veränderte Ozeanströmungen verursacht. Wird nämlich der Transport von warmem Wasser aus dem Süden nach Norden unterbrochen, kann dies einen plötzlichen Temperaturabfall im Norden zur Folge haben. Diese Hypothese wird durch

vielfältige Beobachtungen gestützt, doch lieferte die Rekonstruktion des atmosphärischen  $^{14}\text{C}$  Gehalts widersprüchliche Daten. Die EAWAG wollte es genauer wissen und ging diesem Widerspruch nach.

## Widersprüchliche Daten

Das radioaktive Kohlenstoffisotop  $^{14}\text{C}$  (siehe Kasten) ist ein natürlicher Spurenstoff, der für die Klimaforschung von herausragender Bedeutung ist. Es wird durch kosmische Strahlung kontinuierlich in der Erdatmosphäre produziert, und nimmt, nach Oxydation zu  $^{14}\text{CO}_2$ , am globalen Kohlenstoffkreislauf teil.

Ozeane tauschen permanent Luft und  $\text{CO}_2$  und damit auch radioaktives  $^{14}\text{C}$  mit der Atmosphäre aus. Generell gilt: je besser die Ozeane global durchmischt sind, umso

mehr  $^{14}\text{C}$  wird in die tiefen Wasserschichten verfrachtet und umso mehr  $^{14}\text{C}$ -armes Wasser wird aus der Tiefsee an die Oberfläche transportiert. Diese Prozesse haben zur Folge, dass bei stärkerer Ozeandurchmischung der  $^{14}\text{C}$ -Gehalt der Atmosphäre sinkt. Geht man nun davon aus, dass die Ozeandurchmischung im Nordatlantik in der Jüngeren Dryas tatsächlich reduziert war, würde man für diese Zeit neben dem oben beschriebenen Temperaturabfall auch einen  $^{14}\text{C}$ -Anstieg in der Atmosphäre erwarten. Aufgrund von  $^{14}\text{C}$ -Messungen an Sedimenten war es möglich, den  $^{14}\text{C}$ -Gehalt der Atmosphäre während der Jüngeren Dryas zu rekonstruieren [2]. Wie erwartet steigt der  $^{14}\text{C}$ -Gehalt zu Beginn der Jüngeren Dryas an, was die Hypothese einer reduzierten Ozeandurchmischung tatsächlich bestätigt. Auffällig ist jedoch, dass der  $^{14}\text{C}$ -Gehalt der Atmosphäre, lange bevor es im nordatlantischen Raum signifikant wärmer wurde, wieder abfiel (Abb. 1B). Dies widerspricht den geschilderten Zusammenhängen zwischen Wärmetransport, Tiefenwasserbildung und  $^{14}\text{C}$ -Gehalt der Atmosphäre. Wir fragten uns daher, welche anderen Faktoren eine Rolle gespielt haben könnten.

## Nuklidproduktion beeinflusst den $^{14}\text{C}$ -Gehalt

Der  $^{14}\text{C}$ -Gehalt in der Atmosphäre wird nicht allein durch die Ozeanzirkulation bestimmt, sondern hängt ausserdem von der Produktionsrate ab. So wird in einer Periode mit schwächerer Sonnenaktivität mehr  $^{14}\text{C}$  in der Atmosphäre produziert, was einen An-

## Die $^{14}\text{C}$ -Datierungsmethode

Neben den beiden stabilen Kohlenstoffisotopen  $^{12}\text{C}$  und  $^{13}\text{C}$  existiert das radioaktive Kohlenstoffisotop  $^{14}\text{C}$ . Es hat eine Halbwertszeit von 5730 Jahren, d.h. nach 5730 Jahren ist die Hälfte des ursprünglich vorhandenen  $^{14}\text{C}$  zerfallen. Diese Tatsache wird bei der  $^{14}\text{C}$ -Datierungsmethode ausgenützt. Alle Lebewesen tauschen ständig  $^{14}\text{C}$  mit ihrer Umgebung aus. Dieser Austausch stoppt, wenn der Organismus stirbt. Im Verlauf der Zeit zerfällt das radioaktive  $^{14}\text{C}$  in den Organismen und die  $^{14}\text{C}$ -Konzentration nimmt kontinuierlich ab. Man kann daher durch Bestimmung der  $^{14}\text{C}$ -Konzentration in der Probe das Alter oder genauer gesagt den Zeitpunkt abschätzen, zu dem der Austausch mit der Umgebung unterbrochen wurde.

Dies ist jedoch nur dann einigermaßen exakt möglich, wenn die Geschichte der atmosphärischen  $^{14}\text{C}$ -Konzentration bekannt ist. Der Grund lässt sich einfach nachvollziehen: War in der Vergangenheit der  $^{14}\text{C}$ -Gehalt der Luft höher, dann dauert es entsprechend länger bis man durch Zerfall eine bestimmte  $^{14}\text{C}$ -Konzentration erhält. Ohne Kenntnis der ursprünglichen  $^{14}\text{C}$ -Konzentration in der Luft würde man die Proben jünger einstufen als es der Wahrheit entspricht bzw. würde im umgekehrten Fall das Alter überschätzen.

Deshalb arbeitet die Wissenschaft an einer  $^{14}\text{C}$ -Eichkurve, die inzwischen für die letzten 11 500 Jahre auf  $\pm 1$  Jahr genau datiert vorliegt [6]. Dabei untersucht man vor allem fossile Baumfunde aber auch Sedimente und misst die  $^{14}\text{C}$ -Konzentration in den einzelnen Baumringen bzw. Sedimentlagen.

stieg des atmosphärischen  $^{14}\text{C}$ -Gehalts zur Folge hat. Ein solcher Anstieg der  $^{14}\text{C}$ -Konzentration ergab sich beispielsweise während des so genannten Maunder-Minimums zwischen 1645 und 1715 [3]. Damals war das

Klima in Europa deutlich kälter als heute. Aus astronomischen Beobachtungen mit dem gerade erfundenen Teleskop weiss man zudem, dass die Sonne in dieser Zeit fast keine Flecken auf ihrer Oberfläche hatte

(Abb. 2; siehe auch Artikel von M. Vonmoos, S. 8). Das Fehlen von Sonnenflecken ist ein deutliches Zeichen dafür, dass die Sonne damals weit weniger aktiv war als heute. Im Fall des Maunder-Minimums konnte also aufgrund der Sonnenfleckenbeobachtungen ein klarer Zusammenhang zwischen dem  $^{14}\text{C}$ -Anstieg und der Sonnenaktivität hergestellt werden. Liegen die  $^{14}\text{C}$ -Änderungen in der Atmosphäre jedoch noch weiter in der Vergangenheit, ist man unbedingt auf zusätzliche Informationen angewiesen, will man auf mögliche Ursachen schliessen.

### $^{10}\text{Be}$ als Mass für die atmosphärische Radionuklidproduktion

Eine zusätzliche und äusserst interessante Informationsquelle ergibt sich durch die Bestimmung des radioaktiven Isotops  $^{10}\text{Be}$ -Beryllium ( $^{10}\text{Be}$ ). Es wird wie  $^{14}\text{C}$  durch die Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit den Atomen in der Atmosphäre gebildet (siehe Leitartikel, S. 3), unterliegt jedoch nach der Produktion völlig anderen Prozessen:  $^{10}\text{Be}$  wird nach Auswaschung aus der Atmosphäre relativ direkt auf der Erde abgelagert und tritt nicht wie  $^{14}\text{C}$  in einen

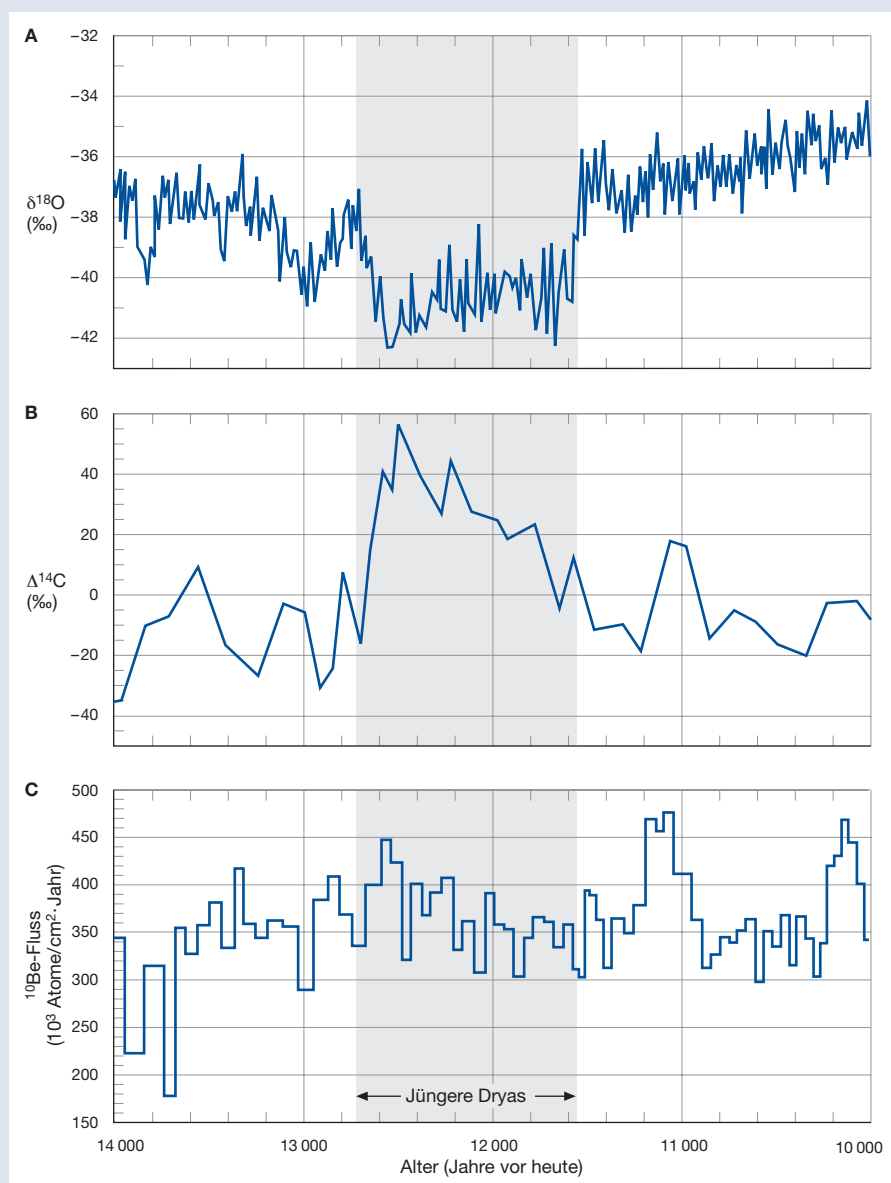


Abb. 1: Temperatur, atmosphärischer  $^{14}\text{C}$ -Gehalt und  $^{10}\text{Be}$ -Fluss im Verlauf der Jüngeren Dryas.  
 A)  $\delta^{18}\text{O}$  als Mass für die Temperatur in Grönland.  
 B) Rekonstruktion des atmosphärischen  $^{14}\text{C}$ -Gehalts ausgedrückt als  $\Delta^{14}\text{C}$  basierend auf Sedimentuntersuchungen im Cariaco Becken vor der Nordküste Venezuelas.  $\Delta^{14}\text{C}$  gibt die Abweichung der atmosphärischen  $^{14}\text{C}$ -Konzentration bezüglich eines Standards in Promille an.  
 C)  $^{10}\text{Be}$ -Fluss als Mass für die Nuklidproduktion.

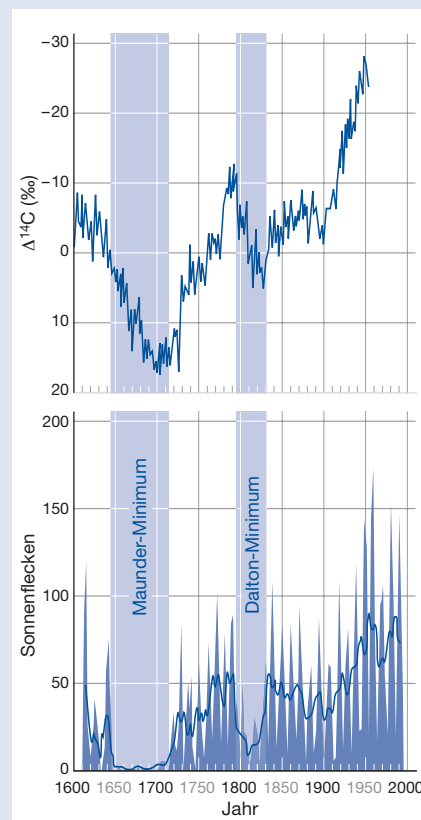


Abb. 2: Vergleich von Anzahl der Sonnenflecken-gruppen mit den Änderungen in der atmosphärischen  $^{14}\text{C}$ -Konzentration. In Phasen verringerter Sonnenaktivität wie zum Beispiel dem Maunder- und Dalton-Minimum nimmt der  $^{14}\text{C}$ -Gehalt der Atmosphäre zu ( $\Delta^{14}\text{C}$  ist invers aufgetragen).

Stoffkreislauf ein. Die Geschichte der  $^{10}\text{Be}$ -Produktionsrate lässt sich heute anhand so genannter Paläoarchive rekonstruieren. Als besonders erfolgreich haben sich die Messungen von  $^{10}\text{Be}$  in Eisbohrkernen aus Zentralgrönland erwiesen, denn darin hat sich das aus der Atmosphäre ausgewaschene  $^{10}\text{Be}$  Jahr für Jahr und Eisschicht für Eisschicht abgelagert.

So sollten wir gleich bleibende  $^{10}\text{Be}$ -Ablagerungen in den Eisschichten der Jüngeren Dryas finden, wenn die Änderungen des  $^{14}\text{C}$ -Gehalts lediglich auf eine variable Ozeandurchmischung zurückzuführen sind. Falls jedoch in der Jüngeren Dryas zusätzlich Änderungen der Nuklidproduktionsrate im Spiel waren, erwarteten wir analog zum  $^{14}\text{C}$ -Verlauf eine variierende  $^{10}\text{Be}$ -Konzentration in den entsprechenden Eisschichten.

### Variable Produktion von $^{10}\text{Be}$ -Isotopen

Tatsächlich konnten wir durch Analyse der  $^{10}\text{Be}$ -Daten [4] nachweisen, dass die Nuklidproduktionsrate und damit wahrscheinlich auch die Sonnenaktivität in der Jüngeren Dryas recht variabel war (Abb. 1C). Rechnet man nun die  $^{10}\text{Be}$ -Daten in  $^{14}\text{C}$ -Werte um,

zeigt sich, dass ein grosser Teil des atmosphärischen  $^{14}\text{C}$ -Verlaufs durch diese variable Produktion erklärt werden kann (Abb. 3A). Doch erst, wenn man zudem eine 30%-Reduktion der Ozeanzirkulation mit einbezieht, kann der beobachtete  $^{14}\text{C}$ -Verlauf während der Jüngeren Dryas fast vollständig erklärt werden (Abb. 3B) [5]. Unsere Analysen bestätigen also, dass die Jüngere Dryas in der Tat mit einer reduzierten Tiefenwasserbildung verbunden war. Der Auslöser dieser abrupten Klimaänderung liegt allerdings weiter im Dunkeln. Auffällig ist jedoch, dass die Radionuklidproduktion am Anfang der Kaltphase erhöht war. Dieses Indiz

spricht dafür, dass eine verringerte Sonnenaktivität den Kälteeinbruch ausgelöst haben könnte.

Am Beispiel der Jüngeren Dryas konnten wir somit zum ersten Mal durch den Vergleich von  $^{10}\text{Be}$  und  $^{14}\text{C}$  zwischen Änderungen der Produktionsraten und Änderungen im Kohlenstoffkreislauf unterscheiden. Dieses Verfahren ist grundsätzlich für den gesamten durch die  $^{14}\text{C}$  Methode abgedeckten Zeitbereich (d.h. die letzten 50 000 Jahre) anwendbar und wird bei zukünftigen Untersuchungen, die sich mit globalen Änderungen im Kohlenstoffkreislauf befassen, eine wichtige Rolle spielen.

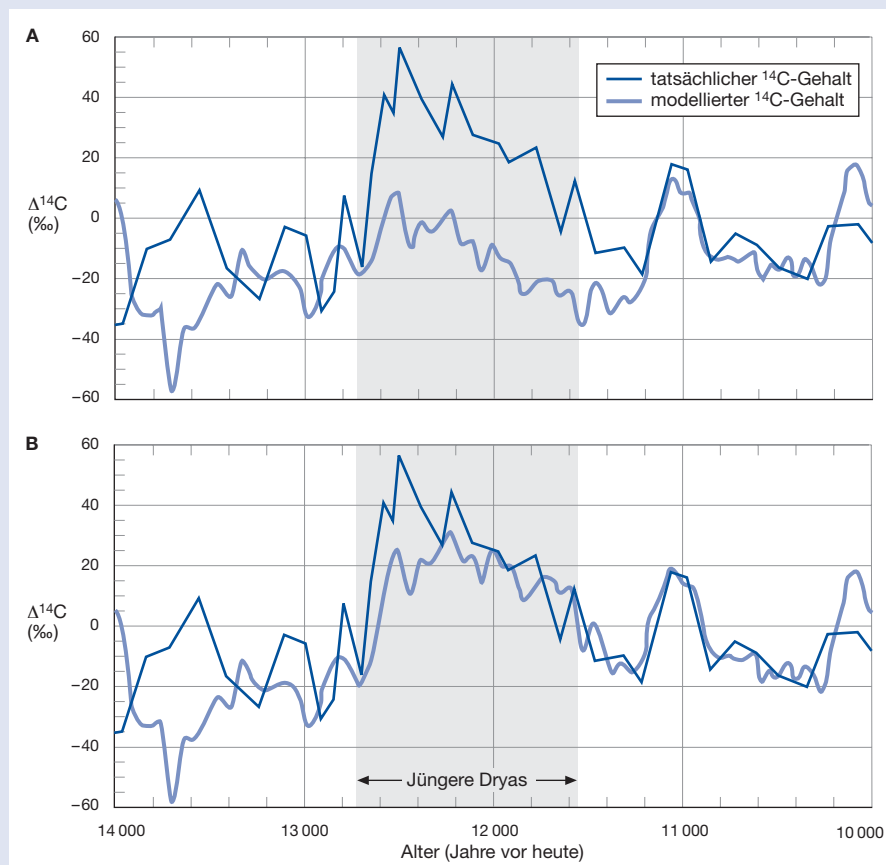


Abb. 3: Modellierung des atmosphärischen  $^{14}\text{C}$ -Gehalts (hellblaue Kurven):  
**A)** unter Einbezug der Einflussgrösse Nuklidproduktion,  
**B)** unter Einbezug der Einflussgrössen Nuklidproduktion und Ozeanzirkulation.  
 Zum Vergleich ist nochmals der tatsächlich rekonstruierte  $^{14}\text{C}$ -Gehalt (dunkelblaue Kurve aus Abb. 1B) dargestellt.



Raimund Muscheler, bearbeitete dieses Projekt im Rahmen seiner Doktorarbeit in der Abteilung «Oberflächengewässer». Seit 2003 ist er als Postdoktorand an der Universität Lund in Schweden tätig.

- [1] 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, 311–313.
- [2] Hughen K., Overpeck J.T., Lehmann S., Kashgarian M., Southon J., Peterson L.C., Alley R., Sigman D.M. (1998): Deglacial changes in ocean circulation from an extended radiocarbon calibration. *Nature* 397, 65–68.
- [3] Eddy J.A. (1976): The Maunder Minimum. *Science* 192, 1189–1201.
- [4] Finkel R.C., Nishiizumi K. (1997): Beryllium-10 concentrations in the Greenland ice sheet project 2 ice core from 3–40 ka. *Journal of Geophysical Research* 102, 26699–26706.
- [5] Muscheler R., Beer J., Wagner G., Finkel R.C. (2000): Changes in deep-water formation during the Younger Dryas cold period inferred from a comparison of  $^{10}\text{Be}$  and  $^{14}\text{C}$  records. *Nature* 408, 567–570.
- [6] Stuiver M., Reimer P.J., Bard E., Beck J.W., Burr G.S., Hughen K.A., Kromer B., McCormac G., Van der Plicht J., Spurk M. (1998): INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000–0 cal BP. *Radiocarbon* 40, 1041–1083.

# Der Kompass im Eis

Jedermann weiss, dass sich eine bewegliche Magnetnadel nach Norden ausrichtet und daher als Orientierungshilfe in unbekanntem Gebieten oder bei schlechten Sichtverhältnissen sehr nützlich ist. Seit mehr als 2000 Jahren ist das Prinzip des Magnetkompasses bereits bekannt und hat der Menschheit unschätzbare Dienste bei der Navigation geleistet. Auch Zugvögel und andere Tiere scheinen über einen eingebauten Magnetkompass zu verfügen, der es ihnen erlaubt, ihr Ziel sehr genau anzusteuern. Hätte es den Magnetkompass jedoch schon vor Jahrtausenden gegeben, hätte er nicht immer zum Nordpol gezeigt. Im Laufe der Erdgeschichte kam es nämlich immer wieder zu Umpolungen des Erdmagnetfelds.

Obwohl das Erdmagnetfeld (Abb. 1) bereits seit 300 Jahren genauer untersucht wird, bezeichnete Einstein es als eines der grössten ungelösten Probleme der Wissenschaft. Zwischenzeitlich konnten viele Fragen zur Entstehung und Ausrichtung (Abb. 2) des Magnetfelds beantwortet werden (siehe Kasten) [1–3]. Wieso es aber im Laufe der Erdgeschichte immer wieder zu Umpolungen des Erdmagnetfelds kam (Abb. 3), bleibt weiterhin ein Rätsel. Zur Beantwortung dieser Frage müssen zunächst einmal Stärke und Polung des Erdmagnetfelds bis weit in die Vergangenheit hinein rekonstruiert werden. Die EAWAG konnte zeigen, dass die

Messung von Radioisotopen in Eisbohrkernen eine neue Methode zur Bestimmung des Erdmagnetfelds darstellt.

## Aufzeichnung des Erdmagnetfelds in Paläoarchiven

Traditionellerweise nutzen Paläomagnetiker Sedimente und Vulkangestein zur Rekonstruktion des Erdmagnetfelds. In den Sedimenten gilt das Interesse den magnetischen Partikeln, die sich in der Vergangenheit dort Schicht um Schicht abgelagert haben. Solange diese Partikel im Sediment noch beweglich waren, richteten sie sich wie eine Nadel im Kompass am Magnetfeld aus. Dabei stehen sie umso strammer in Reih und Glied, je stärker das damals herrschende Magnetfeld war. Wird später ein Sedimentkern gestochen, kann sowohl die Richtung als auch die Intensität des vergangenen Erdmagnetfelds bestimmt werden. Ähnlich ist es bei der Bildung von Vulkangestein. Bei einem Vulkanausbruch werden extrem heisse Gesteinsmassen aus dem Erdinneren an die Oberfläche befördert. Solange die Lava noch flüssig ist, ist sie nicht magnetisierbar. Erst beim Abkühlen richten sich die ferromagnetischen Bestandteile der Lava nach dem Erdmagnetfeld aus.

Diese Methoden der Magnetfeldrekonstruktion bewähren sich vor allem dann, wenn das vergangene Erdmagnetfeld stark war, die Sedimente homogen und reich an Magnetpartikeln sind und das darin gespeicherte Magnetfeld später nicht durch andere Prozesse gestört wurde.

## Ursache, Ausrichtung und Stärke des Erdmagnetfelds

Die Erde ist von einem Magnetfeld umgeben (Abb. 1). Die Ursache für das Magnetfeld liegt in den Konvektionsströmen von flüssigem Eisen im Erdinneren: Ähnlich wie bei Wasser steigt wärmeres Eisen nach aussen auf und kälteres Eisen sinkt ins Erdinnere ab.

Die Ausrichtung der Magnetfeldachse stimmt nicht mit der Ausrichtung der Erdachse überein, d.h. die magnetischen Pole fallen nicht mit den geografischen Polen zusammen (Abb. 1). Zudem befinden sich die magnetischen Pole auf einer kontinuierlichen Wanderung. So hat sich der magnetische Nordpol während der letzten 2000 Jahre in der Arktis über Tausende von Kilometern verschoben (Abb. 2). Vor rund 300 Jahren erreichte er Grönland, heute liegt er in Kanada und es ist unklar wohin die Wanderung in Zukunft geht.

Neben der Ausrichtung des Magnetfelds ändert sich auch seine Stärke mit der Zeit. Besonders interessant wird es, wenn die Feldstärke gegen Null geht. Denn beim erneuten Ansteigen der Feldstärke kann es zu einer Umpolung kommen, so dass der magnetische Nordpol plötzlich auf der Südhalbkugel ist, wo er sich in der Regel für einige 100 000 Jahre aufhält, bevor er als Folge einer erneuten Umpolung wieder auf die Nordhalbkugel zurückkehrt. Der Zeitpunkt einer Umpolung scheint keiner Gesetzmässigkeit zu folgen und lässt sich daher nicht voraussagen. Die letzte Umpolung, die so genannte Brunhes-Matuyama-Umpolung, liegt bereits 780 000 Jahre zurück (Abb. 3).

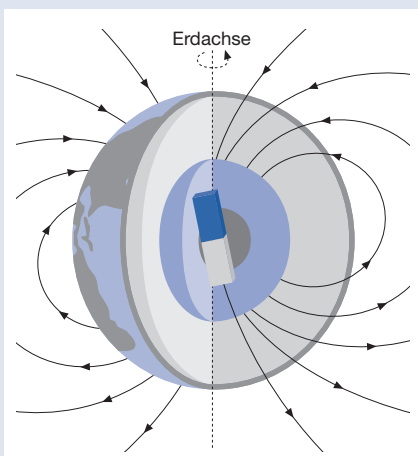


Abb. 1: Das Erdmagnetfeld kann vereinfacht als Dipolfeld dargestellt werden, das von einem imaginären Stabmagneten im Erdinneren erzeugt wird. Allerdings weicht die Achse des Stabmagneten leicht von der Drehachse der Erde ab.

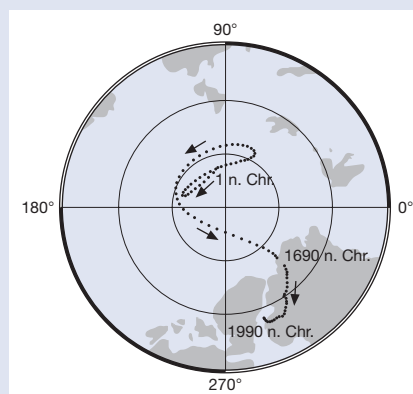


Abb. 2: Wanderung des magnetischen Nordpols durch die Arktis während der letzten 2000 Jahre [1]. Die Wanderung geht weiter.

## Die Radioisotopen-Methode

Grundlage der neuen Radioisotopen-Methode ist die Analyse von polaren Eisbohrkernen. Obwohl dieses Eis fast aus Reinstwasser besteht und so gut wie keine magnetischen Partikel enthält, liefert es trotzdem wertvolle Hinweise über die Vergangenheit des Erdmagnetfeldes. Diese Informationen liest man aus der Menge an Radioisotopen wie beispielsweise Beryllium-10 ( $^{10}\text{Be}$ ) und Chlor-36 ( $^{36}\text{Cl}$ ) heraus, die in einem Gramm Eis gefunden werden. Ist das Erdmagnetfeld stark, entstehen weniger Radionuklide, weil die kosmische Strahlung abgeschirmt wird. Dagegen wird die mittlere globale Nuklidproduktionsrate bei «ausgeschaltetem» Magnetfeld mehr als verdoppelt. Nimmt man zudem an, dass die langsamen Änderungen des im Eis gefundenen  $^{10}\text{Be}$  und  $^{36}\text{Cl}$  nur durch das Magnetfeld verursacht wer-

den und sich schnellere solare Änderungen ausmitteln, so verfügt man über eine neue, völlig andere Methode, um die Stärke des Erdmagnetfeldes in der Vergangenheit zu rekonstruieren. Im Unterschied zu den traditionellen Methoden ist diese Methode umso empfindlicher, je schwächer das Feld ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass sich lokale Änderungen im Magnetfeld kaum auf diese Methode auswirken.

## Verlässliche Ergebnisse mit der Radioisotopen-Methode

Um abzuschätzen, ob die Radioisotopen-Methode tatsächlich verlässliche Ergebnisse liefert, haben wir die beiden Methoden einander gegenübergestellt. Abbildung 4 zeigt die Magnetfeldstärken, die einerseits durch Bestimmung der  $^{10}\text{Be}$ - und  $^{36}\text{Cl}$ -Konzentrationen im GRIP-Eisbohrkern aus Grönland [2] und andererseits anhand traditioneller Messungen an einem Sedimentkern aus dem Mittelmeer [3] rekonstruiert wurden. Beide Methoden lieferten bis auf wenige Ausnahmen übereinstimmende Ergebnisse. So bestätigen die Radionuklid-

messungen beispielsweise, dass sich das Erdmagnetfeld vor rund 40 000 Jahren auf ca. 10% seines heutigen Wertes abschwächte. Kurz bevor es zu einer Umpolung gekommen wäre, kippte es jedoch wieder in den alten Zustand zurück. Damit hat die Radioisotopen-Methode ihre Feuerprobe bestanden. Zukünftig kann sie über den gesamten Zeitbereich eingesetzt werden, der von Eisbohr- und Sedimentkernen abgedeckt wird, und so sollte es möglich sein, das Magnetfeld für die letzten rund 1 Million Jahre zu rekonstruieren.

Was aber bringt die Zukunft? Wann ist mit einer erneuten Umpolung zu rechnen? Seit ca. 2000 Jahren nimmt die Magnetfeldstärke wieder kontinuierlich ab, so dass es bei gleich bleibendem Tempo in etwa 2000 Jahren wieder zu einer magnetischen Umpolung kommen könnte. Für uns Menschen wird dies nicht spürbar sein, wie aber Zugvögel auf eine Umpolung reagieren und ob sie ihre angestammten Ziele weiterhin problemlos auffinden, ist unklar.

Jürg Beer, Portrait siehe S. 5

- [1] Hongre L., Hulot G., Khokhlov A. (1998): An analysis of the geomagnetic field over the past 2000 years. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 106, 311–335.
- [2] Wagner G., Masarik J., Beer J., Baumgartner S., Imboden D., Kubik P.W., Synal H.-A., Suter M. (2000): Reconstruction of the geomagnetic field between 20 and 60 kyr BP from cosmogenic radionuclides in the GRIP ice core. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 172, 597–604.
- [3] Tric E., Valet J.P., Tucholka P., Paterne M., LaBeyrie L., Guichard F., Tauxe L., Fontugne M. (1992): Paleointensity of the geomagnetic field during the last 80,000 years. *Journal of Geophysical Research* 97, 9337–9351.

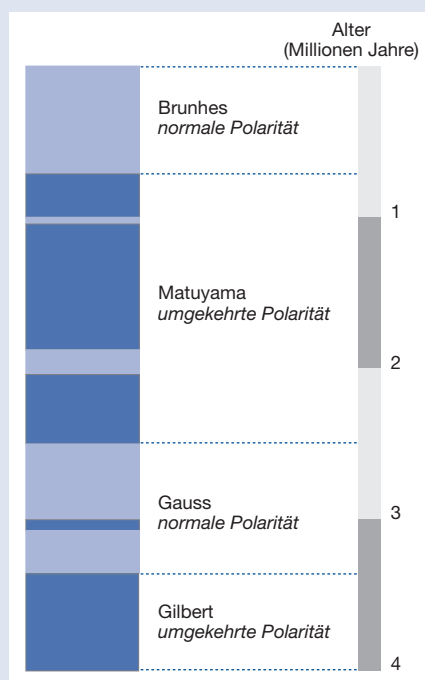


Abb. 3: Umpolungen des Erdmagnetfeldes während der letzten 4 Mio. Jahre. In den hellblauen Zeitabschnitten herrschte die gleiche Polarität wie heute, dunkelblaue Bereiche repräsentieren eine umgekehrte Polarität. Einige Epochen wurden nach Forschern benannt, die sich mit Fragen des Erdmagnetfeldes auseinandergesetzt haben.

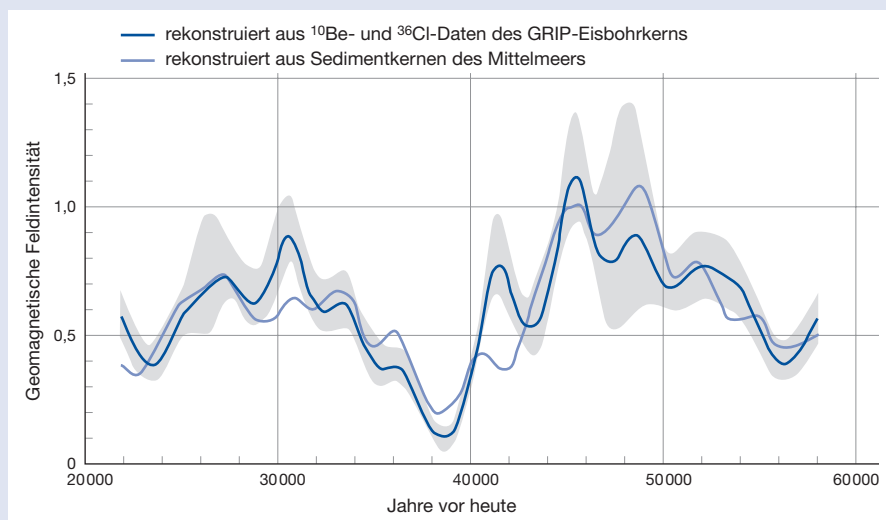


Abb. 4: Rekonstruktion der Magnetfeldstärke über den Zeitbereich 20 000–60 000 Jahre vor heute. Vergleich der neuen Radioisotopen-Methode (dunkelblaue Kurve: kombinierte  $^{10}\text{Be}$ - und  $^{36}\text{Cl}$ -Daten aus dem GRIP-Eisbohrkern [2]) mit der traditionellen Methode (hellblaue Kurve: Ausrichtung von magnetischen Partikeln in einem Sedimentkern aus dem Mittelmeer [3]). Das graue Band stellt den Fehlerbereich der Radioisotopen-Methode dar. Das Fehlerband der traditionellen Methode ist nicht dargestellt.

# Kosmische Strahlung und Wolken

**Eisbohrkerne liefern eine Fülle von Informationen über vergangene Umweltveränderungen. Sie sind aber auch geeignet, ganz spezifische Fragen zu klären oder Hypothesen zu testen. Eine solche Hypothese behauptet, dass Klimaänderungen primär durch Änderungen der Intensität der kosmischen Strahlung verursacht werden. Falls richtig, spielt der Treibhauseffekt nur eine untergeordnete Rolle. Eine politisch sehr brisante Hypothese, die einer genaueren Analyse bedarf.**

1997 traten dänische Wissenschaftler vor die Presse und verkündeten nicht ohne Stolz, sie hätten die Erklärung für die globale Klimaerwärmung der letzten 150 Jahre gefunden [1]. Die entscheidende Rolle spielen weder der Treibhauseffekt noch die Solar-konstante (siehe Leitartikel, S. 3), sondern die globale Wolkenbildung (siehe Kasten). Diese werde durch die kosmische Strahlung beeinflusst und habe im 20. Jahrhundert deutlich abgenommen. Die Arbeit fand in der Öffentlichkeit grossen Anklang. Berichte in Zeitungen, Zeitschriften und im Fernsehen folgten Schlag auf Schlag und bald erschien auch ein Buch «Die launische Sonne» [2]. Da die dänische Hypothese die globale Klimaerwärmung als einen natürlichen Vorgang darstellt und den Menschen von jeglicher Verantwortung dafür entbindet, wurde sie insbesondere in solchen Kreisen

von Wirtschaft und Politik begeistert aufgenommen, die jegliche Massnahmen zur Reduktion von Treibhausgasen ablehnen. Hier war die Wissenschaft gefordert und auch die EAWAG beteiligte sich an der Diskussion [3]. Dabei zeigte sich einmal mehr, dass Klimaänderungen sehr komplexe Vorgänge sind, die sich selten durch einen einzigen Prozess erklären lassen. Zu den wichtigsten potenziellen Ursachen für Klimaänderungen gehören nämlich Treibhausgase, die solare Irradianz, Aerosole, Vulkanausbrüche und interne Schwankungen des Klimasystems. Im Folgenden legen wir das Schwergewicht auf die ersten beiden.

## Treibhausgase und Sonnenstrahlung

Seit ca. 1850 steigt die Temperatur auf der Nordhalbkugel relativ kontinuierlich an

(Abb. 1) [4–6]. Als mögliche Faktoren für diese Klimaänderung werden u.a. die Zunahme von Treibhausgasen und die Variation der Sonnenaktivität diskutiert:

- Betrachtet man beispielsweise die Entwicklung von CO<sub>2</sub> als wichtigem Treibhausgas, zeigt sich über die letzten 150 Jahre tatsächlich eine exponentielle Zunahme, wobei die CO<sub>2</sub>-Konzentration ab Mitte des 20. Jahrhunderts besonders steil ansteigt (Abb. 1). Als Ursache für diesen exponentiellen Verlauf ist der steigende Verbrauch fossiler Brennstoffe allgemein anerkannt. Demgegenüber schwankte die Temperatur erheblich. Besonders auffällig sind zwei Temperaturerhöhungen in den Jahren von 1910 bis 1940 und von 1970 bis heute. Zwischen 1940 und 1970 kam es sogar zu einer leichten Abkühlung. Diese Schwankungen stehen im Widerspruch zur exponentiell ansteigenden CO<sub>2</sub>-Konzentration.

- Im Fall der Sonnenstrahlung zeigen die seit 1980 durchgeführten Satellitenmessungen zwar, dass die Strahlungsintensität nicht konstant ist, sondern im 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus schwankt (siehe dazu Abb. 1, S. 8). Aber bei genauer Betrachtung stellt man fest, dass die Änderung der Solarkonstanten von 1367 W/m<sup>2</sup> über einen Sonnenfleckenzyklus weniger als 2 W/m<sup>2</sup>

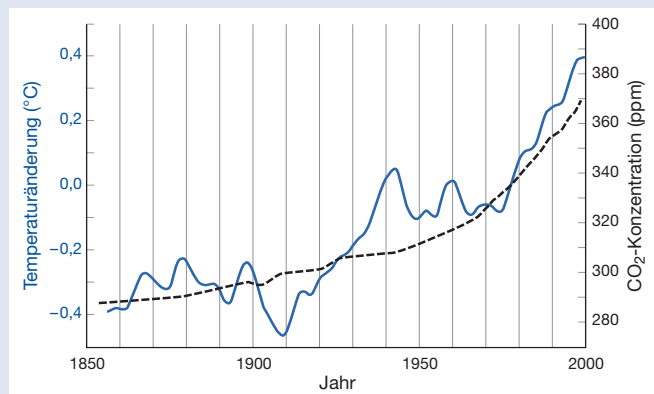


Abb. 1: Vergleich der globalen Temperaturänderungen seit 1850 (relativ zur Periode 1961–1990) mit den atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalten. Temperaturkurve: Mittelwert aus unzähligen Messdaten verschiedenster Wetterstationen [4]. CO<sub>2</sub>-Kurve: Daten bis 1953 aus Analysen der Luftblasen im Eisbohrkern von Siple [5], ab 1958 direkte CO<sub>2</sub>-Messungen auf Mauna Loa [6]. ppm = parts per million = Teile auf eine Million.

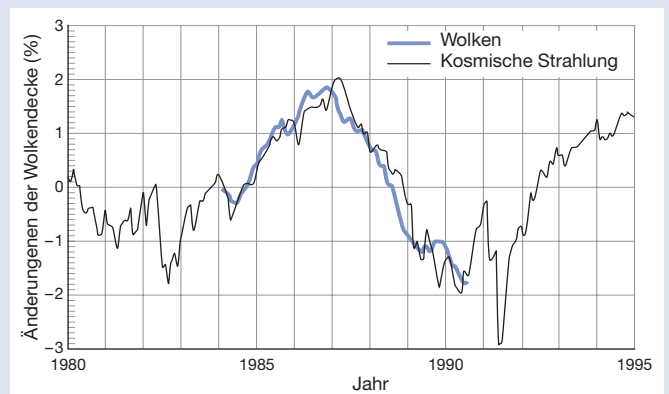


Abb. 2: Die Änderung der Wolkenbedeckung folgt dem Verlauf der kosmischen Strahlung zwischen 1980 und 1995 sehr gut und beträgt mehr als 2% [1]. Im gleichen Masstab aufgetragen sind die gleitenden 12-Monats-Mittelwerte der Wolkenbedeckung (ausgedrückt als Änderungen in Prozent) und die normalisierten, monatlichen Mittelwerte aus Messungen der kosmischen Strahlung in Colorado (USA).



beträgt, was ca. 0,15% entspricht und viel zu gering ist, um die beobachteten Temperaturänderungen zu erklären.

Damit kann keiner der beiden Faktoren die Klimaerwärmung alleine erklären. Soweit die heute allgemein anerkannte Sachlage, mit der auch die Dänen übereinstimmen. Wie aber argumentieren die Dänen weiter?

## Kosmische Strahlung und Wolken

Die dänischen Wissenschaftler fragten sich, ob die kosmische Strahlung einen Einfluss auf unser Klima haben könnte. Je mehr kosmische Strahlung aus dem All in die Erdatmosphäre eindringt, desto stärker sollte die globale Bewölkung sein, so ihre Überlegungen (siehe Kasten). Um diese Hypothese zu überprüfen, schauten sie sich Sa-

### Die Wolkenhypothese

Die Hypothese der dänischen Wissenschaftler Svensmark und Friis-Christensen [1] scheint einfach und einleuchtend: Die kosmische Strahlung – das sind hochenergetische Teilchen aus den Tiefen des Alls – dringt in die Atmosphäre ein und ionisiert dabei die Luft (Abb. 3). An diesen Ionen kondensiert die Luftfeuchtigkeit in Form kleiner Wassertröpfchen, was zur Wolkenbildung führt. Je mehr Wolken vorhanden sind, desto weniger Sonnenstrahlung erreicht die Erdoberfläche und damit wird es kälter. Andersherum wird es wärmer, wenn wenig Wolken am Himmel sind und die Sonnenstrahlen ungehindert auf die Erdoberfläche fallen können.

Wieviel kosmische Strahlung in die Erdatmosphäre eindringen kann, hängt vom Zusammenspiel zweier Faktoren ab, von der Sonnenaktivität und vom Erdmagnetfeld. Die Sonne schleudert permanent glühendes Gas in den Weltraum, das sich als so genannter Sonnenwind ausbreitet und dabei das Magnetfeld der Sonne mitträgt. Dieses solare Magnetfeld bildet einen äußeren Schutzschild um die Erde, der das Eindringen der kosmischen Strahlung in die Erdatmosphäre behindert (siehe Abb. 4 auf S. 5). Zusätzlich stellt das Erdmagnetfeld einen inneren Schutzschild dar, der diese Abschirmung verstärkt. Je aktiver also die Sonne und je stärker das Magnetfeld, desto weniger kosmische Strahlung dringt in die Erdatmosphäre ein.

tellitenbilder der Wolkenbedeckung aus den Jahren 1980 bis 1995 an und verglichen sie mit der Intensität der kosmischen Strahlung. Sie fanden, dass die Wolkenbedeckung in dieser Zeit um etwa 2% schwankte und genau dem Verlauf der kosmischen Strahlung folgte (Abb. 2). Ihre Hypothese scheint damit grundsätzlich in der Lage, die beobachteten Klimaschwankungen in der Vergangenheit zu erklären. Trotzdem steht die Arbeit der Dänen auf wackeligen Beinen, da sich ihre Datenanalyse auf ein sehr kleines Zeitfenster von 15 Jahren beschränkt. Um die Hypothese zu erhärten, bräuchte man weitere Daten zur kosmischen Strahlung und zum Klima der letzten Jahrhunderte und Jahrtausende. Die EAWAG fand zusätzliche Informationen im Eisbohrkern aus Grönland.

## Schwächere kosmische Strahlung in den letzten 300 Jahren

Betrachtet man die letzten 300 Jahre, sieht man, dass die kosmische Strahlung generell abgenommen hat. Dies weiss man einerseits aus direkten Messungen der kosmischen Strahlung durch Neutronenmonitore, die seit den 1950er Jahren in Betrieb sind; andererseits dienen Radionuklide wie Beryllium-10 ( $^{10}\text{Be}$ ) und Chlor-36 ( $^{36}\text{Cl}$ ), die im Grönlandeis abgelagert sind, als indirekte Parameter zur Rekonstruktion der vergangenen kosmischen Strahlung. Der Rückgang der kosmischen Strahlung ist wahrscheinlich auf eine zunehmende Sonnenaktivität zurückzuführen (siehe Abb. 2 und 3, S. 9). Nach der dänischen Hypothese würde



Abb. 3: Die kosmische Strahlung dringt mit hoher Energie vom Weltall kommend in die Atmosphäre ein und trifft auf die Atome der Luft. Dabei kommt es zur Bildung von Sekundärteilchen, die ihrerseits wieder mit Luftatomen zusammenstossen und diese Atome in Bruchstücke spalten, was zur Bildung von kosmogenen Radionukliden führt. Gleichzeitig ionisieren die Primär- und Sekundärteilchen der kosmischen Strahlung die Luft, sodass – gemäss der dänischen Hypothese – mehr Wolken gebildet werden. Die Abbildung ist eine Montage. Sie zeigt an, in welchem Höhenbereich der Atmosphäre sich die einzelnen Vorgänge abspielen.

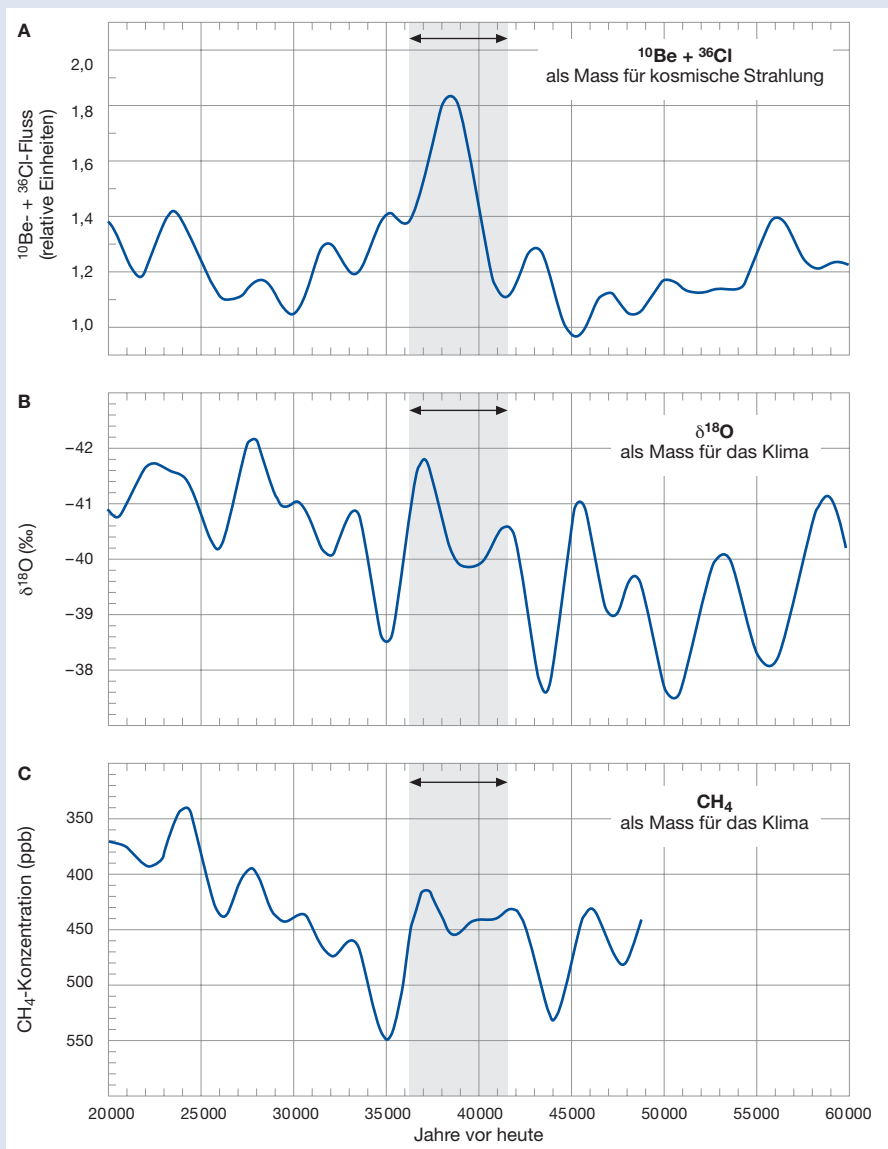


Abb. 4: Vergleich der kombinierten  $^{10}\text{Be}$ - und  $^{36}\text{Cl}$ -Daten (A) mit den beiden Klimaparametern  $\delta^{18}\text{O}$  (B) und  $\text{CH}_4$  (C) im GRIP-Eisbohrkern. Als Folge einer Abschwächung des Erdmagnetfeldes um 40 000 Jahre vor heute (grauer Bereich) steigt die Intensität der kosmischen Strahlung an und es wird mehr  $^{10}\text{Be}$  und  $^{36}\text{Cl}$  gebildet. Im Widerspruch zur dänischen Hypothese zeigen beide Klimaparameter jedoch keinen Hinweis auf eine entsprechende Klimaabkühlung. Die errechneten Korrelationskoeffizienten gehen gegen null. ppb = parts per billion = Teile auf eine Milliarde.

man für diese Periode mit schwächer werdender kosmischer Strahlung eine abnehmende Bewölkung und damit eine Klimaerwärmung erwarten. Bis hier hin sieht es also gut aus für die Wolkenhypothese.

### Starke kosmische Strahlung vor 40 000 Jahren

Geht man noch weiter in die Vergangenheit zurück, ändert sich die Situation jedoch. Man findet nämlich vor ca. 40 000 Jahren eine etwa 3000 Jahre umfassende Zeitspanne, in der die kosmische Strahlung relativ stark war. Damals verlor die Erde plötzlich ihren Schutzschild und die kosmische Strahlung drang mit deutlich erhöhter Intensität in die Erdatmosphäre ein. Die Ursache lag im Erdmagnetfeld, dessen Intensität zu jener Zeit fast auf null abgesunken war und

nur noch ca. 10% des heutigen Wertes betrug. Trifft die dänische Wolkenhypothese zu, müsste die globale Bewölkung in dieser Zeitspanne zugenommen haben und es sollte zu einer deutlichen Klimaabkühlung gekommen sein [3].

Wiederum liefert der Grönlandeisbohrkern sämtliche Informationen, um diese Hypothese zu überprüfen. Abb. 4A zeigt die kombinierten  $^{10}\text{Be}$ - und  $^{36}\text{Cl}$ -Daten, wobei ein Peak vor ca. 40 000 Jahren ins Auge springt. Dieser Radionuklid-Peak entspricht genau unseren Erwartungen, denn durch eine starke kosmische Strahlung wurden vermehrt Radionuklide produziert. Gleichzeitig wurden mit  $\delta^{18}\text{O}$  und Methan zwei Klimaparameter im Eisbohrkern gemessen. Aufgrund der Wolkenhypothese sollte es damals deutlich kälter geworden sein, so dass

wir für diese Periode eine ebenso deutliche Abnahme von  $\delta^{18}\text{O}$  und Methan erwarteten. Dies ist jedoch nicht der Fall (Abb. 4B und C). Die beiden Klimaparameter  $\delta^{18}\text{O}$  und Methan zeigen zwar unter sich eine gute Übereinstimmung, passen aber nicht zum Verlauf der  $^{10}\text{Be}/^{36}\text{Cl}$ -Kurve. Unsere Resultate sprechen also klar gegen die Wolkenhypothese. Da alle Parameter im gleichen Eisbohrkern gemessen wurden, ist dieses wichtige Resultat zudem unabhängig davon, wie gut der Eisbohrkern datiert ist.

### Zu ambitiöse Interpretationen

In der Zwischenzeit sind weitere Unstimmigkeiten aufgetaucht, insbesondere bei der Analyse der neuesten Wolkendaten, die nicht mehr dem Verlauf der kosmischen Strahlung folgen. Momentan sieht es eher schlecht aus für die Wolkenhypothese, obwohl das letzte Wort noch nicht gesprochen ist. Es zeigt sich einmal mehr, dass das Klima zu komplex ist, um seine Änderungen mit einem einzigen einfachen Mechanismus zu erklären. Dagegen mehren sich die Hinweise, dass die Sonne vor 1970 sehr wohl eine zentrale Rolle gespielt hat, allerdings nicht über den Umweg der kosmischen Strahlung, sondern direkt durch Änderung ihrer Strahlungsintensität (s. Artikel vom M. Vonmoos, S. 8). Die starke Erwärmung der letzten 30 Jahre kann jedoch nicht durch die Sonne erklärt werden. Es deutet alles darauf hin, dass sie das Resultat des durch den Menschen verursachten Anstiegs der Treibhausgase ist. In wenigen Jahren werden wir es mit Sicherheit wissen, allerdings ohne die Möglichkeit, die Folgen zu verhindern.

Jürg Beer, Portrait siehe S. 5

- [1] Svensmark H., Friis-Christensen E. (1997): Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics* 59, 1225–1232.
- [2] Calder N. (1997): Die launische Sonne: Dr. Böttiger Verlags-GMBH, Wiesbaden.
- [3] Wagner G., Livingstone D.M., Masarik J., Muscheler R., Beer J. (2001): Some results relevant to the discussion of a possible link between cosmic rays and the Earth's climate. *Journal Geophysical Research* 106, 3381–3388.
- [4] Jones P.D., Parker D.E., Osborn T.J., Briffa K.R. (2001): Global and hemispheric temperature anomalies – land and marine instrumental records. In: *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge, USA.
- [5] Neftel A., Moor E., Oeschger H., Stauffer B. (1985): Evidence from polar cores for the increase in atmospheric  $\text{CO}_2$  in the past two centuries. *Nature* 315, 45–47.
- [6] Keeling C.D., Whorf T.P. (2003): Atmospheric  $\text{CO}_2$  concentrations (ppmv) derived from in situ air samples collected at Mauna Loa Observatory, Hawaii. Made available online by C.D. Keeling.

# Eisbedeckung von Seen und Flüssen

## Klimatrends aus historischen Aufzeichnungen

Seen frieren früher zu und tauen umso später wieder auf, je kälter und länger der Winter ist. Dies ist uns intuitiv klar, auch wenn wir uns nicht für die komplexen meteorologischen Zusammenhänge interessieren, die dahinter stehen. Die EAWAG wollte es genauer wissen und analysierte historische Aufzeichnungen zum Gefrier- und Auftauzeitpunkt, wie sie z.B. für den St. Moritzer See und den Baikalsee in Sibirien vorliegen. Basierend auf diesen Datenreihen ist es möglich, Aussagen über vergangene und zukünftige Klimatrends zu machen.

Wann Seen oder Flüsse im Winter zufrieren und im Frühjahr wieder auftauen, hängt ursächlich von verschiedenen meteorologischen Faktoren ab. Der mit Abstand wichtigste Faktor ist die Lufttemperatur. Auf empirischer Basis können daher die Bildung und das Schmelzen der Eisdecke als zeitlich abhängige Reaktionen auf die jahreszeitlichen Schwankungen der Lufttemperatur angesehen werden. Umgekehrt ist es somit auch möglich, anhand von historischen Kalenderaufzeichnungen der Gefrier- und Schmelzzeitpunkte Rückschlüsse auf die Lufttemperatur zu ziehen, die damals in Gewässernähe geherrscht hat. Da Lufttemperaturen in der Regel grossräumig, über mehrere hundert Kilometer hinweg, miteinander korreliert sind, bedeutet dies, dass histori-

sche Schwankungen beim Zeitpunkt des Auftauens oder Gefrierens nicht nur Veränderungen des lokalen Wetters, sondern auch, was weitaus nützlicher ist, Veränderungen des regionalen oder sogar überregionalen Klimas widerspiegeln.

### Kürzere und dünnere Eisbedeckung – eine Reaktion auf die Klimaänderung?

Historische Aufzeichnungen der Gefrierdaten (definiert als der erste Tag mit vollständiger Eisbedeckung) und der Auftauenden (definiert als der erste vollständig eisfreie Tag) für Seen und Flüsse in Kanada, den USA, Finnland, der Schweiz, Russland und Japan liefern einhellig den Beweis dafür, dass die Gewässer der nördlichen Hemi-

sphäre etwa seit der Mitte des 19. Jahrhunderts später gefrieren und früher wieder auftauen (Abb. 1) [1]. Diese langfristigen historischen Trends des Gefrierens und Auftauens betragen im Mittel sechs Tage auf 100 Jahre, was einem Anstieg der Lufttemperatur von 1,2 °C auf 100 Jahre entspricht. Damit stützen die historischen Eisdaten nicht nur die Hypothese einer vergangenen

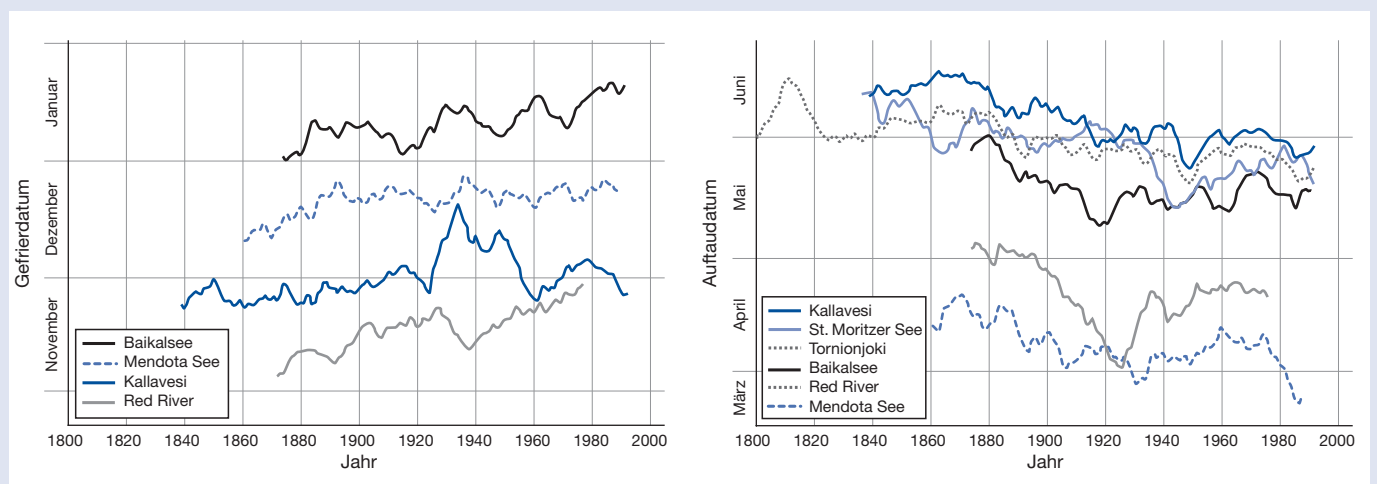
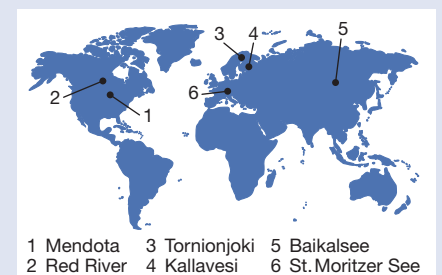


Abb. 1: Zeitreihen der Gefrierdaten (links) und der Auftaudaten (rechts) für eine kleine, aber repräsentative Auswahl von Seen und Flüssen, verteilt über die nördliche Hemisphäre. Daten, dargestellt als 10-jährige gleitende Mittelwerte, aus [1].



Abb. 2: Pferderennen auf dem gefrorenen St. Moritzer See.

und noch anhaltenden globalen Erwärmung, sondern lassen auch Vorhersagen darüber zu, welchen Einfluss die globale Erwärmung zukünftig auf den Gefrier- und Auftauzeitpunkt von Seen und Flüssen haben wird. Hält der Erwärmungstrend wie prognostiziert weiter an, so werden die Vereisungsperioden immer kürzer und die Eisdecken immer dünner und es ist mit verschiedensten positiven und negativen Auswirkungen auf sozio-ökonomischer und ökologischer Ebene zu rechnen. In hohen Breiten wird z.B. der Transport von Personen und Gütern über grosse Seen wie dem Baikalsee in Sibirien und breite Flüsse wie dem Yukon River in Alaska im Winter schwieriger und kostenaufwändiger werden. Dagegen wird beispielsweise am Oberen See (Nordamerika) der Transport mittels Schiffen und Lastkähnen durch eine Verlängerung der eisfreien Zeit begünstigt. Vom ökologischen Standpunkt aus bewirkt die Verkürzung der Vereisungszeit eine bessere Sauerstoffversorgung solcher Seen, die normalerweise fast den gesamten Winter eisbedeckt sind [2]. Dadurch verringert sich zwar einerseits die Gefahr winterlicher Fischsterben, andererseits resultiert das frühere Auftauen jedoch in einer zeitigeren Frühjahrsdurchmischung der Seen und damit in einer zeitigeren Phytoplanktonblüte. Dies ist ungünstig, weil das Phytoplankton dann mit geringeren Lichtintensitäten auskommen muss. Es ist deshalb zu befürchten, dass sich die veränderten Umweltbedingungen zu einem solch wichtigen Zeitpunkt im Jahr auch auf die Zusammensetzung der Phytoplankton-Gesellschaft auswirken, was wiederum wei-

tere ökologische Veränderungen nach sich ziehen würde.

### Eisdaten vom St. Moritzer See

Die längste in der Schweiz verfügbare Datenreihe liegt für den St. Moritzer See vor, der auf 1778 m ü. M. im Oberengadin liegt (Abb. 2). Dieser wertvolle und für Mitteleuropa einzigartige Datensatz beginnt 1832 und reicht ohne Unterbrechung bis in die Gegenwart. Zusätzlich liegen seit Mitte des 19. Jahrhunderts von verschiedenen meteorologischen Stationen aus der Schweiz und Europa verlässliche instrumentelle Messungen der Lufttemperatur vor. Anhand dieser Datensätze untersuchten wir die Beziehung zwischen den Auftaudaten des St. Moritzer Sees und den jeweiligen Lufttemperaturen genauer.

### Überregionales Klima beeinflusst die Eisbedeckung

Im Mittel ist der St. Moritzer See ab dem 12. Mai eisfrei. Unsere Analyse (Abb. 3), zeigte, dass der Auftauzeitpunkt stark mit der lokalen Lufttemperatur korreliert ist, was durch eine maximale gemeinsame Varianz ( $r^2$ ) von 64% ausgedrückt wird [3]; d.h., 64% der Variabilität im Datensatz Auftauzeitpunkt sind durch die Variabilität der Lufttemperatur statistisch erklärbar. Demzufolge kann man vom Auftaudatum näherungsweise auf die mittlere lokale Lufttemperatur über eine Zeitspanne von 4–8 Wochen im Frühjahr schliessen (Abb. 3). Auch die Lufttemperaturen an weiter entfernt liegenden Orten korrelierten gut mit den Auftaudaten des St. Moritzer Sees [3, 4]. Legt man beispiels-

weise die Lufttemperaturen zugrunde, die an der ca. 230 km entfernten meteorologischen Station in Neuenburg gemessen wurden, ergibt sich mit 61% ein nur unwesentlich geringerer Maximalwert für die gemeinsame Varianz (Abb. 3). Dies lässt darauf schliessen, dass das Auftauen des St. Moritzer Sees und auch anderer alpiner Seen in erster Linie eine Reaktion auf das regionale Klima ist und weniger von lokalen meteorologischen Eigenheiten beeinflusst wird.

Für diese These spricht auch, dass selbst im überregionalen Massstab noch signifikante Korrelationen erreicht werden, z.B. wenn das Auftaudatum des St. Moritzer Sees mit Lufttemperaturen aus Grossbritannien und den Niederlanden in Beziehung gesetzt wird. Hingegen ergeben sich keine signifikanten Korrelationen, wenn die Berechnung auf der mittleren Lufttemperatur der gesamten nördlichen Hemisphäre beruht. Die Auftaudaten von Seen scheinen also eher ein Ergebnis des Klimas im überregionalen denn im globalen Rahmen zu sein. Ein verwandter Artikel (S. 23) beschreibt die Beziehung zwischen dem Auftauzeitpunkt von

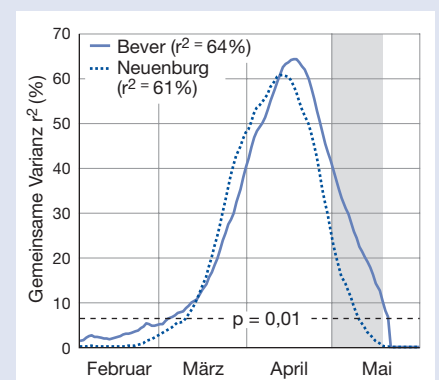


Abb. 3: Verhältnis der gemeinsamen Varianz ( $r^2$ ) des Auftauzeitpunktes des St. Moritzer Sees (Oberengadin, Schweiz) und der über 51 Tage gemittelten Lufttemperatur, gemessen in Bever, 7 km vom See entfernt, und in Neuenburg, 230 km westlich des Sees. Jede Kurve ergibt sich aus 120 errechneten  $r^2$ -Werten, die in der Mitte jeder der 120 51-Tage-Perioden aufgezeichnet wurden. Die schattierte Fläche stellt den üblichen Bereich des Auftaudatums dar (Mittelwert  $\pm 1$  Standardabweichung). Die gestrichelte Linie gibt das  $p = 0,01$  Signifikanzniveau an. Angepasst aus [3].



Abb. 4: Im Winter werden Personen und Güter über das Eis des Baikalsees transportiert.

Gewässern der nördlichen Hemisphäre und der Nordatlantischen Oszillation (NAO).

### Eisdaten vom Baikalsee

Der tiefste (ca. 1650 m) und grösste (ca. 23 000 km<sup>3</sup>) Süsswassersee der Welt ist der Baikalsee in Ostsibirien (Abb. 4). Er ist über 600 km lang, hat eine durchschnittliche Breite von etwa 50 km und enthält nicht weniger als 20% des gesamten flüssigen Süsswassers an der Oberfläche unseres

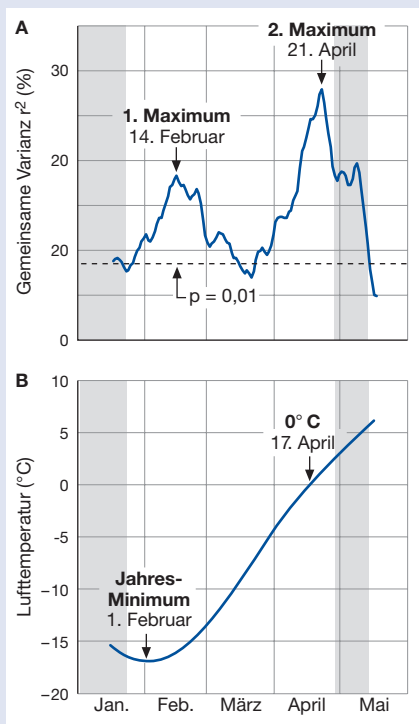


Abb. 5: (A) Verhältnis der gemeinsamen Varianz ( $r^2$ ) der beobachteten Auftaudaten in Listvyanka am südlichen Baikalsee und der über 31 Tage gemittelten Lufttemperatur in Babushkin. (B) Jahreszeitlicher Verlauf der über 31 Tage gemittelten Lufttemperatur an der meteorologischen Station Babushkin am südlichen Baikalsee (basierend auf Daten von 1931–1994). Der  $r^2$ -Wert zeigt zwei Maxima, nämlich am 14. Februar und am 21. April (A). Diese beiden Tage folgen eng auf die Daten des jährlichen Minimums der Lufttemperatur am 1. Februar bzw. dem Kreuzungspunkt der Temperaturkurve mit der 0°-Linie am 17. April (B). Die schattierten Flächen stellen die üblichen Bereiche der Gefrier- und Auftaudaten am südlichen Baikalsee dar (Mittelwert  $\pm$  1 Standardabweichung). Die gestrichelte Linie gibt das  $p = 0,01$  Signifikanzniveau an. Angepasst aus [5].

Planeten. Schätzungen zufolge ist der See mehr als 25 Millionen Jahre alt, hat die höchste Biodiversität aller heute existierenden Seen und stellt ein einzigartiges Ökosystem mit ca. 1500 Pflanzen- und mehr als 3500 Tierarten und -unterarten dar. Der Baikalsee ist pro Jahr vier bis fünf Monate lang zugefroren. Allerdings gibt es wegen der Klimaunterschiede entlang des Sees einen Nord-Süd-Gradienten, sowohl hinsichtlich des Gefrier- als auch des Auftauzeitpunkts. Im späten Oktober beginnt der Baikalsee zu gefrieren. Der Grossteil des nördlichen Beckens ist gewöhnlich bereits vor Anfang Dezember mit Eis bedeckt, das südliche Becken hingegen friert frühestens einen Monat später zu. Die Eisschmelze setzt im südlichen Teil des Sees gewöhnlich zwischen Ende März und Anfang April ein, wohingegen das Eis im nördlichen Becken erst zwei bis drei Wochen später zu schmelzen beginnt. Das südliche Becken ist meist ab Mitte Mai wieder eisfrei. Aufgrund dieser Nord-Süd-Unterschiede können sich Eisbeobachtungen am Baikalsee nur auf einen bestimmten Teil des Sees beziehen. Zum Glück wurde das Auftaudatum durchgehend seit 1869 am selben Beobachtungsort, der limnologischen Station von Listvyanka am südlichen Baikalsee, festgehalten.

### Zusätzliche Einflussgrösse: das Jahresminimum der Lufttemperatur

Wie beim St. Moritzer See waren auch am Baikalsee die Auftaudaten stark mit der lokalen Lufttemperatur korreliert (rechter Peak in Abb. 5A). Jedoch scheint die Lage

am Baikalsee komplizierter zu sein, denn es ergab sich ein weiterer signifikanter Zusammenhang (linker Peak in Abb. 5A) [5]. Am Baikalsee nämlich wird der Auftauzeitpunkt nicht allein von der während des Schmelzvorgangs im Frühjahr vorherrschenden Lufttemperatur beeinflusst, sondern auch von der minimalen Lufttemperatur während der kältesten Periode im sibirischen Winter (Abb. 5B). Sie bestimmt zum einen die maximale Eisdicke, denn je tiefer die minimale Lufttemperatur, desto dicker ist die Eisschicht, beeinflusst zum anderen aber auch die Mächtigkeit der isolierenden Schneeschicht, d.h. je niedriger die minimale Lufttemperatur, desto weniger schneit es. Die Lufttemperaturen im März kurz vor Schmelzbeginn liegen normalerweise unter Null, jedoch oberhalb des jährlichen Temperaturminimums, weswegen sie weder den Eiszuwachs noch das Schmelzen beeinflussen (Abb. 5B). Sie sind daher weitaus weniger bedeutend für den Auftauzeitpunkt als die Februar- und Apriltemperaturen. Ähnlich wie am St. Moritzer See ist der Auftauzeitpunkt des Baikalsees nicht nur mit den lokalen Lufttemperaturen eng korreliert, sondern auch mit Lufttemperaturen an weiter entfernten Orten in Nordasien. Dies gilt insbesondere in den Monaten Februar und April (Abb. 6).

### Einfluss der Klimaerwärmung auf die Eisbedeckung

In einem weiteren Projekt haben wir die Auftaudaten der letzten 4 Jahrzehnte von 196 schwedischen Seen ausgewertet, die entlang eines Nord-Süd-Gradienten über 13

stützen (die derzeit ohnehin noch nicht zur Verfügung stehen). Für die Ökologie und die Wasserqualität von Seen und Flüssen höherer Breiten oder in Hochlagen ist es sehr bedeutend, ob und wie lange diese Gewässer eisbedeckt sind. Vorhersagen über die zu erwartende Eisbedeckung solcher Gewässer sind daher eine wichtige Voraussetzung für Untersuchungen über mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die künftigen Wasserressourcen im globalen Massstab.

Die hier beschriebenen wissenschaftlichen Untersuchungen wurden im Rahmen der EU-Projekte MOLAR, EMERGE, REFLECT, CLIME und Euro-limpacs durchgeführt.



David M. Livingstone ist Physiker und Datenanalytiker in der Abteilung «Wasserressourcen und Trinkwasser» und beschäftigt sich mit den vergangenen, aktuellen und zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserressourcen in Europa.

Breitengrade verstreut liegen [6, 7]. Es zeigte sich, dass die Beziehung zwischen den Auftaudaten und der Lufttemperatur eine nicht-lineare ist. Konkret lässt sich ableiten, dass Seen in wärmeren (meist südlicheren) Regionen stärker auf eine Klimaerwärmung reagieren als Seen in kälteren (meist nördlicheren) Regionen. Mit anderen Worten: je weiter die Klimaerwärmung fortschreitet, desto grösser wird ihr Einfluss auf die Auftauzeitpunkte und damit auch auf die ökologischen Prozesse der einzelnen Seen.

### Datenreihen als Archive für künftige Klimaprognosen

Unsere Ergebnisse zeigen, dass die historischen Beobachtungen der Gefrier- und

Auftaudaten von Seen und Flüssen Rückschlüsse auf das vergangene grossräumige Klima zulassen. Dabei ist es möglich, sowohl langfristige Klimatrends über Jahrhunderte hinweg zu rekonstruieren als auch kurzfristige Klimaschwankungen im Rahmen mehrerer Jahre oder Jahrzehnte zu erkennen. Zudem liefern die Datenreihen wertvolle Hinweise, will man die Auswirkungen künftiger Klimaveränderungen auf See- und Flusseis vorhersagen. Weil Timing und Dauer der Eisbedeckung stärker durch das überregionale Klima als durch klein-klimatische Abweichungen vom grossräumigen Muster bestimmt werden, scheint es dabei nicht notwendig zu sein, sich auf Klimamodelle mit hoher räumlicher Auflösung zu

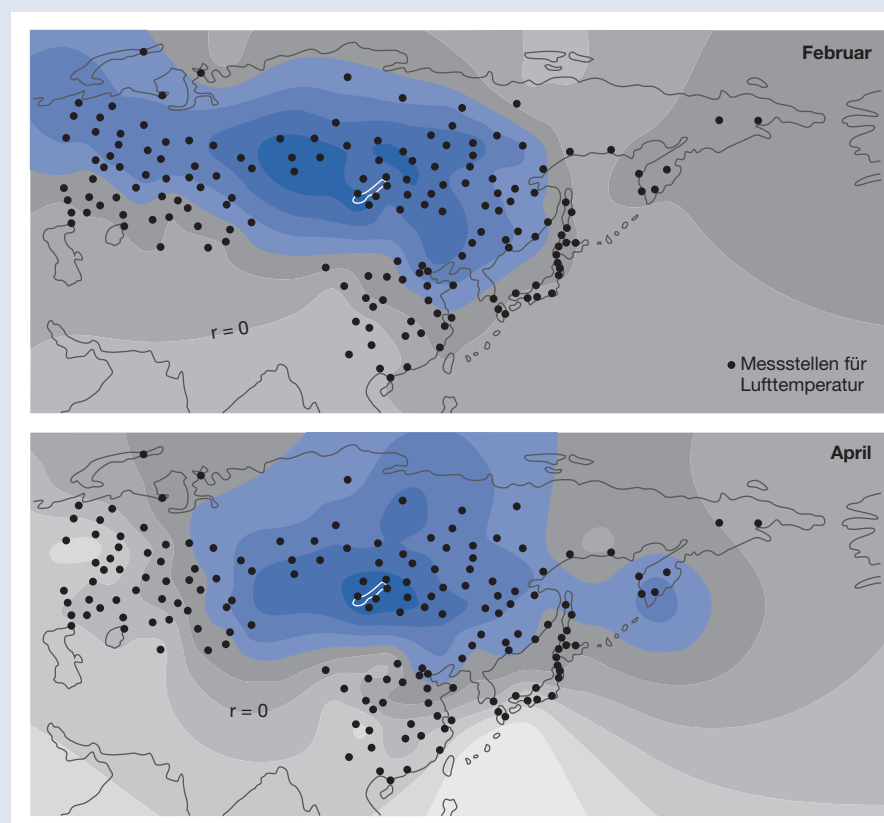


Abb. 6: Konturplots der Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) zwischen dem Auftaudatum am südlichen Baikalsee und dem monatlichen Mittel der Lufttemperatur an 170 über Russland, Kasachstan, China und Japan verteilten Messstellen (1936–1989) im Februar und April. Die Korrelation ist am besten innerhalb des blau schattierten Bereichs ( $r < -0,2$  ist signifikant auf einem Signifikanzniveau von etwa  $p < 0,1$ ). Das Baikalsee ist weiss umrandet. Angepasst aus [5].

- [1] Magnuson J.J., Robertson D.M., Benson B.J., Wynne R.H., Livingstone D.M., Arai T., Assel R.A., Barry R.G., Card V., Kuusisto E., Granin N.G., Prowse T.D., Stewart K.M., Vuglinski V.S. (2000): Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere. *Science* 289, 1743–1746.
- [2] Livingstone D.M. (1993): Lake oxygenation: application of a one-box model with ice cover. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie* 78, 465–480.
- [3] Livingstone D.M. (1997): Break-up dates of Alpine lakes as proxy data for local and regional mean surface air temperatures. *Climatic Change* 37, 407–439.
- [4] Livingstone D.M. (1998): Das Auftauen des St. Moritzer Sees: Ein Indikator für überregionale Lufttemperatur und globalen Vulkanismus. *EAWAG Jahresbericht 1997*, Dübendorf, 41–42.
- [5] Livingstone D.M. (1999): Ice break-up on southern Lake Baikal and its relationship to local and regional air temperatures in Siberia and to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography* 44, 1486–1497.
- [6] Weyhenmeyer G.A., Meili M., Livingstone D.M. (2004): Nonlinear temperature response of lake ice breakup. *Geophysical Research Letters* 31 (7), L07203, doi:10.1029/2004GL019530.
- [7] Weyhenmeyer G.A., Meili M., Livingstone D.M. (im Druck): Systematic differences in the trend towards earlier ice-out on Swedish lakes along a latitudinal temperature gradient. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Limnologie* 29.

# Klimaphänomen: Nordatlantische Oszillation

## Beeinflusst sie den Auftauzeitpunkt von Seen auf der Nordhalbkugel?

Die Nordatlantische Oszillation, ein grossräumiges Klimaphänomen, bestimmt das Klima in weiten Teilen der nördlichen Hemisphäre. Da sie vor allem im Winterhalbjahr auf das Klima wirkt, ging die EAWAG der Frage nach, ob die Nordatlantische Oszillation den Auftauzeitpunkt von Seen auf der Nordhalbkugel beeinflusst. Dabei zeigte sich, dass sich der Wirkungsbereich der Nordatlantischen Oszillation in den letzten 130 Jahren verschoben hat. Heute ist ihr Einfluss bis nach Sibirien spürbar, hat dafür aber in Nordamerika abgenommen.

Islandtief, ein Tiefdruckgebiet mit Zentrum über Island, und Azorenhoch, ein Hochdruckgebiet, das sich von den Azoren bis zur Iberischen Halbinsel erstreckt, sind die zwei wichtigsten klimabestimmenden Gegenspieler über dem Nordatlantik (Abb. 1). Der zwischen diesen beiden Druckzentren

entstehende grossräumige Nord-Süd-Gradient des oberflächennahen Luftdruckes ist natürlich nicht konstant, sondern verändert sich je nach Stärke des Tiefs und des Hochs. Diese zeitlichen Schwankungen über dem Nordatlantik werden als Nordatlantische Oszillation (NAO) bezeichnet. Sie

ist insbesondere in den Gebieten wirksam, die direkt an den Nordatlantik grenzen, beeinflusst aber auch das Klima in weiten Teilen der restlichen Nordhalbkugel, dort vornehmlich in höheren Breiten [1]. So ist beispielsweise die mittlere Lufttemperatur der nördlichen Hemisphäre mit der NAO verknüpft und fast ein Drittel der Temperaturvariabilität kann durch die NAO erklärt werden. Der Einfluss der NAO auf das Klima der Nordhalbkugel ist vor allem im Winterhalbjahr stark ausgeprägt.

### Meteorologische Bedeutung der NAO

Die NAO wird gewöhnlich mit Hilfe des NAO-Index beschrieben (Abb. 2). Dieser Index gibt den Luftdruckunterschied auf Meereshöhe an, der zwischen zwei meteorologischen Stationen in der Nähe der Zentren des Islandtiefs und des Azorenhochs besteht [1]. Sind die Druckgegensätze hoch, das heisst bei sehr tiefem Druck über Island und sehr hohem Druck über den Azoren, ist der NAO-Index positiv. Ein negativer NAO-Index ergibt sich bei flacheren Druckunterschieden, wenn Islandtief und Azorenhoch weniger stark ausgeprägt sind.

Hohe NAO-Indizes im Winter weisen also auf einen steilen meridionalen Druckgradienten (entlang der Längengrade) über dem Nordatlantik hin. Dieser löst starke westliche Winde aus, die warme, feuchte Meeresluft ostwärts über Europa transportieren (Abb. 1). Die Folge sind milde, nasse Winter in Europa und weiten Teilen Zentralasiens. Niedrige NAO-Indizes dagegen spiegeln einen relativ schwach ausgeprägten

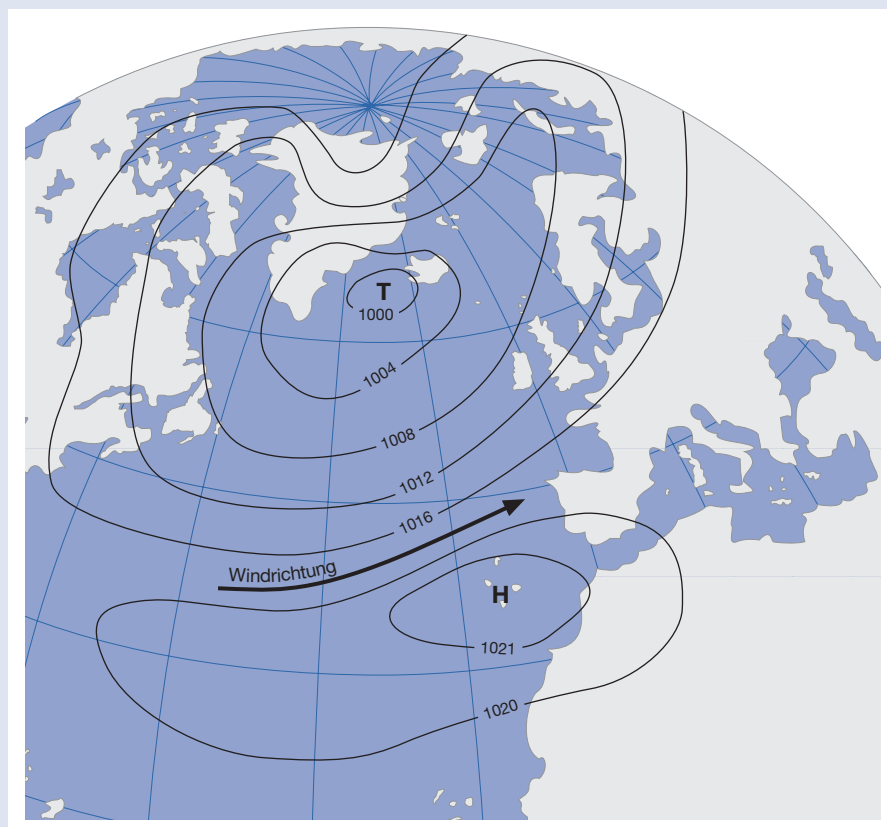


Abb. 1: Die Verteilung des mittleren Luftdruckes im Januar auf Meereshöhe über dem Nordatlantik für die Periode 1941–1970. Eingezeichnet sind das Islandtief, das Azorenhoch und die vorherrschenden Richtungen der Winde, die vom Nordatlantik kommend über Europa wehen. Angepasst aus [2].



Beate Müller, EAWAG

Der sibirische Baikalsee ist während 4–5 Monaten im Jahr zugefroren.

meridionalen Druckgradienten wider, der entsprechend schwache Westwinde über dem Nordatlantik hervorruft und kältere, trockenere Winter in Europa bewirkt. Im Osten Kanadas ist die Situation entgegengesetzt, dort gehen hohe NAO-Indizes mit starken nördlichen Winden und kalten Wintern und niedrige NAO-Indizes mit schwächeren Nordwinden und milderem Wintern einher. Selten auftretende Umkehrungen der normalen Druckverteilung über dem Nordatlantik (Hochdruck über Island und Tiefdruck über den Azoren) haben eine süd-wärtige Verlagerung polarer Luftmassen nach Europa zur Folge, die dort extrem kalte Winter hervorrufen [2]. Dies war das letzte Mal im Januar 1963 der Fall. Damals fror sogar der Zürichsee zu.

### Analyse historischer Datenreihen

Der Auftauzeitpunkt von Eis auf Seen hängt stark von den vorherrschenden Lufttemperaturen im Winter und im Frühling ab (siehe auch Artikel auf S. 19). Da die NAO in dieser Zeit ihren stärksten Einfluss auf das Klima hat, ist anzunehmen, dass sie sich auch auf den Auftauzeitpunkt der Seen auswirkt, die in ihrem Einflussbereich liegen. Diese Hypothese wurde für verschiedene Seen der nördlichen Hemisphäre untersucht, für die lange Beobachtungsreihen zum Auftauzeit-

punkt vorliegen [3–6]. Hier wollen wir vier repräsentative Seen betrachten: den finnischen Kallavesi, den St. Moritzer See in den Schweizer Alpen, den Baikalsee in Sibirien und den Mendota See in Wisconsin, USA. Ob es zwischen der NAO und dem Auftauzeitpunkt dieser vier Seen tatsächlich einen Zusammenhang gibt, ermittelten wir, indem wir die Datenreihen der Auftauzeitpunkte mit saisonalen NAO-Indizes korrelierten. Allge-

mein erwarteten wir negative Korrelationen, da hohe NAO-Indizes mit milden Wintern einhergehen und vermutlich auch mit frühem Auftauen, und umgekehrt. Um zusätzlich herauszufinden, inwieweit der Einfluss der NAO im Laufe der Zeit schwankte, wurden Korrelationen für eine Serie von überlappenden historischen Datenfenstern berechnet, die jeweils 50 Jahre umfassen – beginnend mit dem Zeitraum 1865–1914 und endend mit dem Zeitraum 1947–1996.

Die berechneten Korrelationskoeffizienten sind in Abb. 3 als zweidimensionale Konturplots dargestellt. Dabei sind die Korrelationskoeffizienten sowohl als Funktion der Jahreszeit, für die der NAO-Index errechnet wurde, als auch als Funktion des historischen Datenfensters dargestellt. Signifikante negative Korrelationen sind in den Plots als dunkelblaue Bereiche dargestellt. Sie zeigen an, wann die NAO wahrscheinlich einen Einfluss auf den Auftauzeitpunkt gehabt hat.

### Hat sich das Einflussgebiet der NAO verschoben?

Da der Einfluss der NAO auf die Lufttemperatur in Finnland extrem stark ist [1], erwarteten wir, eine deutliche Korrelation zwischen dem Auftauzeitpunkt des Kallavesi und der NAO zu finden. Dies trifft auch tatsächlich zu: im gesamten Verlauf der Aufzeichnungen gibt es eine signifikante negative Korrelation zwischen dem Auftauzeitpunkt und den NAO-Indizes des vorangegangenen Winters und Frühlings (Abb. 3). Die maximale für den Kallavesi erreichte Korrelation entspricht einer gemeinsamen Varianz von 43%: d.h., dass sich 43% der Variabilität in den Auftauzeitpunkten durch

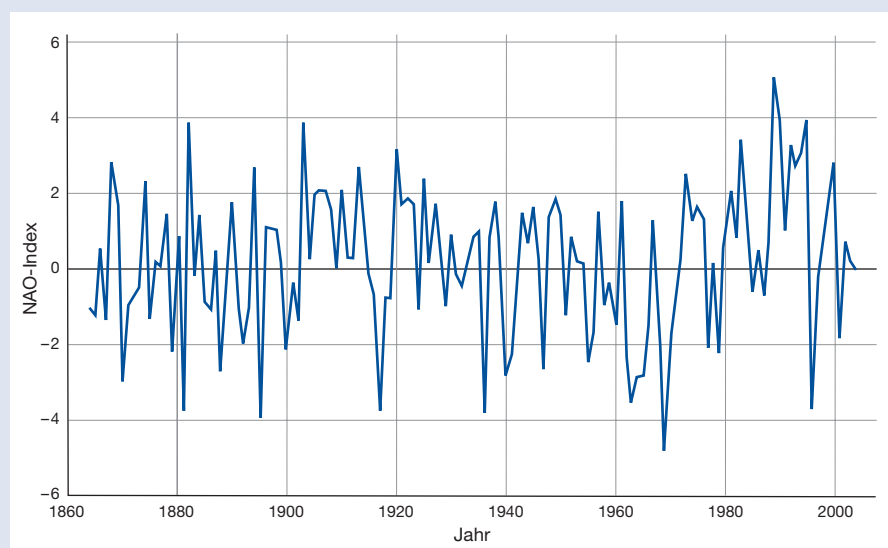


Abb. 2: Die Schwankungen der Nordatlantischen Oszillation (NAO) im Winter (Januar bis März) seit 1864 ausgedrückt durch die NAO-Indizes. Angepasst aus [1].



die Variabilität der NAO-Indizes statistisch erklären lassen. Dies ist ein erstaunlich hoher Wert, wenn man bedenkt, dass ein so einfacher Index herangezogen wird, um eine Aussage über jene komplexen klimatischen Vorgänge zu machen, die auf den Kallavesi einwirken.

Der St. Moritzer See liegt in einer Region, wo die Lufttemperatur weit weniger durch die NAO beeinflusst wird als in Finnland. Folglich gibt es nur Andeutungen einer schwachen Beziehung zwischen dem Auftauen und der winterlichen NAO im letzten Abschnitt der Datenreihe (Abb. 3). Immerhin liegt die gemeinsame Varianz noch bei 11%.

Am Baikalsee hat der Einfluss der Winter-NAO auf den Auftauzeitpunkt in den letzten Jahren erheblich zugenommen [5]. Vor dem Datenfenster von 1918–1967 hatte die NAO keine erkennbare Wirkung auf das Auftauen (Abb. 3); danach aber können bis zu 16% der Varianz des Auftauzeitpunktes durch die Winter-NAO-Indizes erklärt werden.

Die erstaunlichsten Ergebnisse lieferte jedoch der Mendota See (Abb. 3). In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden die Lufttemperaturen im zentralen Nordamerika relativ wenig von der NAO beeinflusst. Die

errechnete geringe Korrelation zwischen dem Auftauzeitpunkt des Mendota Sees und der winterlichen NAO im letzten Teil der Datenserie steht damit in Einklang. Wenn man allerdings weiter in die Vergangenheit zurückgeht, nimmt der Wert des (negativen) Korrelationskoeffizienten soweit zu, dass sich gemeinsame Varianzen in beinahe derselben Größenordnung ergeben wie die im Fall des Kallavesi heute. Zusammen mit der offensichtlichen Verschiebung in die entgegengesetzte Richtung im Fall des Baikalsees und möglicherweise auch des St. Moritzer Sees legt dies den Schluss nahe, dass sich der Einflussbereich der NAO während der vergangenen 130 Jahre räumlich ver-

schieben haben könnte. Offenbar hatte die NAO früher einen grösseren Einfluss auf das Klima in Nordamerika, jedoch einen geringeren auf das Klima in Sibirien.

Um die hier vorgestellten Ergebnisse zu untermauern, untersuchen wir derzeit eine Reihe weiterer Seen in verschiedenen Regionen der nördlichen Hemisphäre. Vorläufige Resultate deuten an, dass auch diese Seen unter dem Einfluss der NAO stehen. Darüber hinaus scheint die mit der NAO eng zusammenhängende Arktische Oszillation eine Rolle für die Auftauzeitpunkte dieser Seen zu spielen.

Die hier beschriebene Forschungsarbeit wurde im Rahmen der EU-Projekte REFLECT, CLIME und Euro-limpac durchgeführt.

David M. Livingstone, Portrait siehe S. 22.

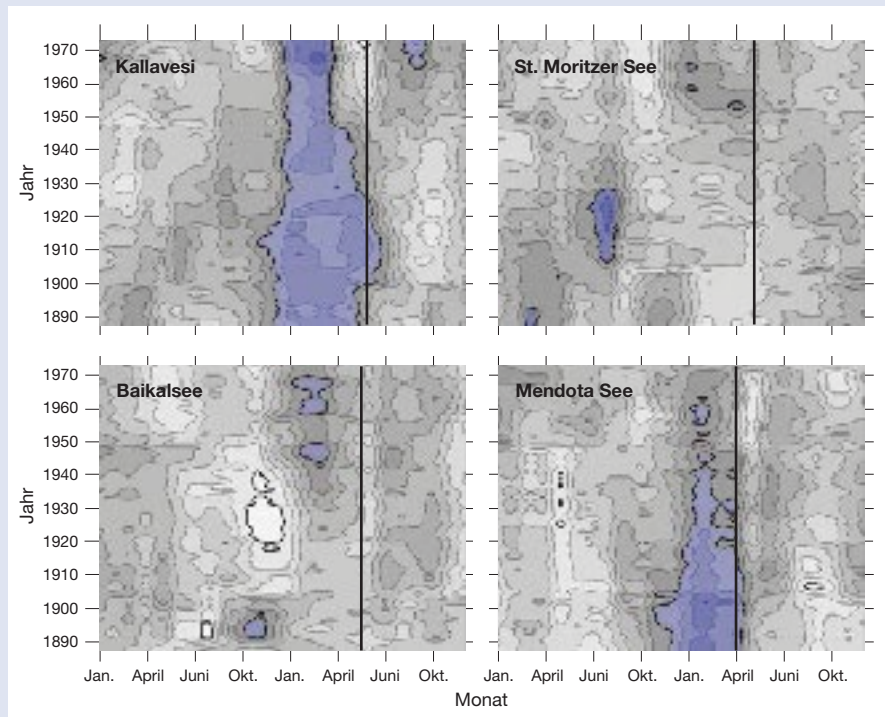


Abb. 3: Konturplot der Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) zwischen dem Auftaudatum und saisonalen Indizes der Nordatlantischen Oszillation (NAO) für 4 Seen in unterschiedlichen Teilen der nördlichen Hemisphäre (Kallavesi, Finnland; St. Moritzer See, Schweiz; Baikalsee, Sibirien; Lake Mendota, Wisconsin, USA). Die saisonalen NAO-Indizes (horizontale Achse) beziehen sich jeweils auf 3 Monate (z.B. Januar bis März). Alle Korrelationen wurden über 50-jährige Zeitfenster (vertikale Achse) berechnet (z.B. 1871 bis 1920). Zur Vereinfachung der Darstellung wird nur der mittlere Monat der jeweiligen Saison bzw. das mittlere Jahr des jeweiligen Zeitfensters angegeben. Signifikante negative Korrelationskoeffizienten sind als blauer Bereich dargestellt. Das Konturintervall ist 0,1. Die dickeren Linien, die den dunkelblauen Bereich bzw. den hellgrauen Bereich umranden, stellen  $r = -0,3$  bzw.  $r = +0,3$  dar. Werte von  $r = \pm 0,28$  sind auf dem  $p = 0,05$  Niveau signifikant, Werte von  $r = \pm 0,36$  auf dem  $p = 0,01$  Niveau. Die vertikale Linie gibt das mittlere Auftaudatum des jeweiligen Sees an. Angepasst aus [3].

- [1] Hurrell J.W. (1995): Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, 676–679.
- [2] Moses T., Kiladis G.N., Diaz H.F., Barry R.G. (1987): Characteristics and frequency of reversals in mean sea level pressure in the North Atlantic sector and their relationship to long-term temperature trends. *Journal of Climatology* 7, 13–30.
- [3] Livingstone D.M. (2000): Large-scale climatic forcing detected in historical observations of lake ice break-up. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung der Limnologie* 27, 2775–2783.
- [4] Livingstone D.M. (2000): Der grossskalige Einfluss der nordatlantischen Oszillation auf das Auftauen von Seen in der nördlichen Hemisphäre. *EAWAG Jahresbericht 1999*, Dübendorf, S. 39–40.
- [5] Livingstone D.M. (1999): Ice break-up on southern Lake Baikal and its relationship to local and regional air temperatures in Siberia and to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography* 44, 1486–1497.
- [6] Stralle D., Livingstone D.M., Weyhenmeyer G.A., George D.G. (2003): The response of freshwater ecosystems to climate variability associated with the North Atlantic Oscillation. In: *The North Atlantic Oscillation: Climate significance and environmental impact* (eds. J.W. Hurrell, Y. Kushnir, G. Ottersen and M. Visbeck). American Geophysical Union, Geophysical Monographs Series Volume 134, 263–279.

# Brennendes Eis – Methanemissionen in die Atmosphäre

## Gefahr vom Meeresboden?

**Seefahrer vergangener Jahrhunderte berichteten immer wieder von brennenden Eisbergen. Lange als Aberglaube abgetan, konnte ihre Existenz endlich gegen Ende des letzten Jahrhunderts bestätigt werden. Es handelt sich um Methanhydrat, eine Verbindung aus Eis und Methan, die in den Meeressedimenten lagert. Gelegentlich gelangen grössere Brocken Methanhydrat an die Meeresoberfläche. Werden sie während eines Gewitters durch einen Blitz entflammt, meint man tatsächlich, brennendes Eis vor sich zu haben. Etwa 10 000 Milliarden Tonnen Methan sind in Form solcher Gashydrate in den Sedimenten der Weltmeere gebunden. Im EU-Projekt CRIMEA untersucht die EAWAG die Methanvorkommen im Schwarzen Meer.**

Methanhydrat sieht aus wie gewöhnliches Eis, an der Luft zersetzt es sich und zurück bleibt eine Wasserlache. Die Verbindung aus gefrorenem Wasser und Methan gehört zu den so genannten Gashydraten (siehe Kasten und Abb. 1) und kommt vorwiegend in marinen Sedimenten und polaren Permafrostböden vor. Besonders grosse Methanhydratfelder liegen an den Kontinentalhängen der Ozeane, wo das Wasser zwischen 500 bis 2000 m tief ist [1]. Durch untermeerische Erdbeben könnte das dort gebundene Methanhydrat an die Meeresoberfläche gelangen, wobei riesige Mengen Methan direkt in die Atmosphäre entweichen wür-

den. Da Methan neben Kohlendioxid eines der wichtigsten Treibhausgase ist (siehe Kasten), wären die Folgen für das Klima gravierend. Vieles spricht dafür, dass sich eine solche Katastrophe bereits einmal vor 55 Millionen Jahren abgespielt hat. Damals kam es tatsächlich zu einer dramatischen Klimaerwärmung [2].

### Methanquellen im Schwarze Meer

Doch selbst bei geringfügig veränderten Umweltbedingungen – wenn z.B. die Temperatur des Tiefenwassers leicht ansteigt oder sich die Druckverhältnisse durch Mee-

resspiegelschwankungen verschieben – kann sich Methan aus Methanhydrat freisetzen. Ein Prozess, der nicht zu unterschätzen ist, wenn man bedenkt, dass die Methankonzentration der Atmosphäre in den letzten 150 Jahren auf das Doppelte gestiegen ist und nun bei 1,7 ppm (ppm = parts per million; 1,7 Teile Methan pro eine Million Teile Luft) liegt. Neben den methanhydrathaltigen Quellen tragen auch andere untermeerische Methanquellen zur Erhöhung der atmosphärischen Methankonzentration bei. Dort beruht die Methanfreisetzung auf mikrobiellen und geochemischen Prozessen in den Sedimenten.

Bis heute sind mehrere Tausend aktive Methanquellen im nordwestlichen Teil des Schwarzen Meers anhand aufsteigender Blasenschleier durch hydro-akustische Methoden identifiziert worden. Allein auf unseren CRIMEA-Forschungsfahrten wurden ca. 2800 neue Quellen entdeckt. Messungen des Methanflusses über der Wasserfläche des Georgischen Schelfs im Schwarzen Meer ergaben, dass ca. 1,7 bis 7,0 l Methan pro m<sup>2</sup> und Tag freigesetzt werden. Rechnet man diese Zahlen auf das gesamte Schwarze Meer um, kann man davon ausgehen, dass jährlich ungefähr 70 000 Tonnen Me-

### Gashydrate

#### Definition, Vorkommen, Entstehung

Gashydrate sind nicht-stöchiometrische, kristalline Substanzen aus Gas und Wasser. Dabei bilden die Wassermoleküle Käfigstrukturen aus, in die die Gasmoleküle eingeschlossen werden (Abb. 1). Gashydrate werden deshalb auch als Einschlussverbindungen oder Klathrate (lat.: clatratus = Käfig) bezeichnet. Insgesamt sind fünf verschiedene Käfigstrukturen bekannt. 90% der natürlich vorkommenden Gashydrate enthalten Methan. Daneben gibt es Kohlendioxid- und Schwefelwasserstoffhydrate. Methanhydrat bildet sich bei niedrigen Temperaturen und hohem Druck. Das für die Hydratbildung notwendige Gas Methan entsteht beim anaeroben Abbau organischen Materials durch Bakterien. Nur wenn dieser Vorgang kontinuierlich abläuft, können sich mit der Zeit grössere Mengen Methanhydrat bilden.

#### Energiequelle der Zukunft?

Gashydrate speichern sehr viel mehr Energie als alle Gas-, Kohle-, und Erdölvorkommen zusammengenommen. Dadurch stellen sie eine potenzielle Energiequelle für die Zukunft dar. Allerdings sind die technischen Fragen zur Exploration des Methans aus Gashydraten bis heute nicht gelöst und werden die Technologen noch einige Jahre beschäftigen. Falls es zu einer industriellen Förderung des Methans kommt, muss man sich bewusst sein, dass die Verbrennung von Methan zu einer Emission von Kohlendioxid führt und damit zu einem weiteren Anstieg des Treibhausgases Nummer 1 (neben Wasserdampf) beiträgt.

### Treibhausgase

Treibhausgase absorbieren die infrarote Strahlung, die von der Erde in die Atmosphäre zurückgestrahlt wird, und tragen so zur Erwärmung der Erdatmosphäre und des Klimas bei. Dieser Vorgang wird auch als Treibhauseffekt bezeichnet. Wichtige Treibhausgase neben Methan sind: Wasserdampf, Kohlendioxid, Stickstoffoxide und Ozon. Die Wirkung der einzelnen Treibhausgase ist sehr unterschiedlich und hängt von ihrem spezifischen Erwärmungspotenzial ab. Obwohl Methan in der Atmosphäre nur in sehr geringer Konzentration vorkommt, ist seine Rolle nicht zu unterschätzen. Ist es doch ca. zwanzig Mal effektiver als Kohlendioxid. Allerdings: gäbe es keine Treibhausgase, wäre die Erde unbewohnbar, da die mittlere Temperatur auf der Erdoberfläche –18 °C statt der heutigen 15 °C betragen würde.

than in die Atmosphäre gelangen. Bisher ist allerdings noch unklar, was mit dem Methan auf seinem Weg durch die Wassersäule geschieht.

### Das CRIMEA-Projekt

Dies ist eine der Fragen, denen Forscher von zehn europäischen Forschungsinstituten und Universitäten – darunter auch die EAWAG – im Rahmen des Projekts CRIMEA (Contribution of high intensity gas seeps in the Black Sea to methane emission to the atmosphere) nachgehen. Spezifisch zielt CRIMEA darauf ab:

- die Methanquellen im Schwarzen Meer zu kartieren,
- die austretenden Fluide und Gase zu quantifizieren,
- die aktiven Methan abbauenden Bakterien auf dem Meeresboden und in der Wassersäule zu beschreiben,
- den Methanumsatz zu beziffern und
- die physikalischen, biologischen und chemischen Prozesse zu charakterisieren, die während des Aufstiegs des Methans zur Meeresoberfläche eine Rolle spielen.

### Die erste Schwarz-Meer-Expedition

Im Juni 2003 brachen wir zu einer ersten Schwarz-Meer-Expedition mit dem ukrainischen Schiff «Prof. Vodyanitsky» auf. Unser Ziel waren im besonderen zwei verschiede-

ne Methanquellen, eine davon liegt in 90 m und die andere in 1980 m Wassertiefe. Die Existenz dieser Quellen konnte durch das so genannte Gasblasen-Imaging-Verfahren nachgewiesen werden. Zum Vergleich wurden zusätzlich jeweils zwei Referenzstellen ohne Methanquellen untersucht: an der flachen Referenzstelle ist das Schwarze Meer 80 m und an der tiefen Stelle 1660 m tief.

### Der Weg des Methans durch die Wassersäule

In einem ersten Schritt interessierten uns zunächst zwei Fragen [3]: Wie hoch sind die Methankonzentrationen direkt über den Austrittsstellen? Und wie verhält sich das Methan bei seinem Aufstieg durch die unterschiedlich langen Wassersäulen? Dafür wurden mit einem speziellen Probenahmegerät, einer Rosette, Wasserproben über den beiden Methanquellen und an den Referenzstellen entnommen. An der Rosette hängen 12 10-l-Wasserflaschen, die vom Schiff aus in verschiedenen Tiefen geschlossen werden können.

Erste Ergebnisse zeigen, dass die Methankonzentrationen direkt über den beiden Austrittsstellen am höchsten sind (Abb. 2A + B). Die Konzentrationen verändern sich auch

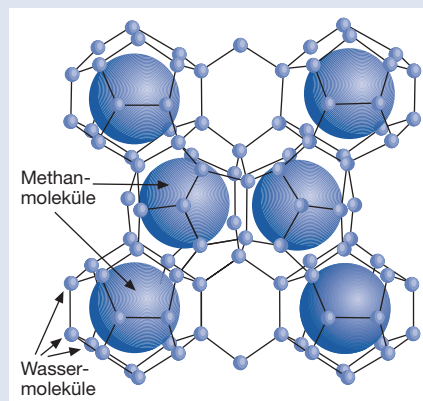


Abb. 1: Aufbau von Methanhydrat.



Zum Heraufholen der Wasserproben dient ein Gerät mit 12 Wasserflaschen, die vom Schiff aus in verschiedenen Tiefen geschlossen werden können.

auf den ersten 40 m über der flacheren und auf mehr als 1500 m über der tieferen Quelle kaum. Bei der tieferen Methanquelle kommt es erst auf den oberen 500 m zu einer deutlichen Reduktion der Methankonzentration.

Dagegen erwarteten wir an den jeweiligen Referenzstellen klar niedrigere Methankonzentrationen. Im flachen Bereich trifft dies auch tatsächlich zu: Dort waren die Methankonzentrationen an der Referenzstelle im Schnitt 10-mal niedriger als in der Wassersäule über der Methanquelle (Abb. 2A). Allerdings unterscheiden sich die Methanwerte über der tiefen Methanquelle und der dazugehörigen Referenzstelle nicht. Dies war überraschend und wir fragten uns, ob unsere Messmethode, bei der das Methan durch einen Gaschromatographen mit Flammenionisations-Detektor nachgewiesen wird, einen so geringen Konzentrationsunterschied überhaupt auflösen kann.

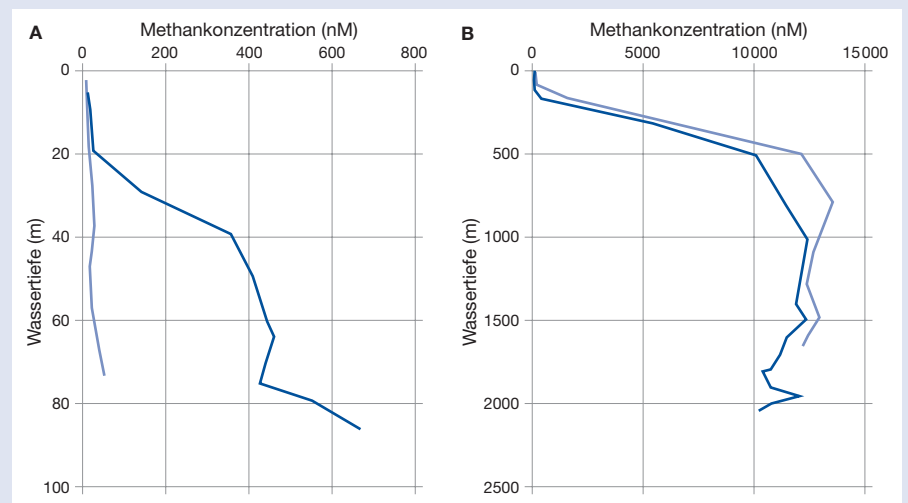


Abb. 2: Methankonzentrationen in den Wassersäulen über zwei Methanquellen (dunkelblaue Kurven) und den jeweiligen Referenzstellen ohne Methanaustritte (hellblaue Kurven). (A) im flachen Bereich, (B) im tiefen Bereich.

gang wird durch eine spezielle Bakteriengemeinschaft durchgeführt: Sulfatreduzierer reduzieren Sulfat zu Sulfid und Archaea oxidieren Methan zu Kohlendioxid.

Molekularbiologische Methoden machen es möglich, einzelne Bakteriengruppen zu identifizieren und ihren Anteil an der Gesamtbakterienzahl in den Wasserproben zu bestimmen. Insgesamt konnten wir im Schnitt 25% mehr Archaea-Zellen über den Methanquellen als über den Referenzstellen nachweisen. Diese Ergebnisse weisen daraufhin, dass Methan oxidierende Bakterien sowohl über der tiefen als auch über der flachen Methanquelle präsent sind und Methan zu Kohlendioxid umsetzen. Ob das Methan der von uns analysierten Quellen an die Meeresoberfläche und von dort in die Atmosphäre gelangt, muss noch genauer untersucht werden. Neueste Modellrechnungen sprechen dafür, dass kein oder nur wenig Methan der Methanquellen unterhalb hundert Meter Wassertiefe in die Atmosphäre entweicht [5]. Derzeit arbeiten wir die Proben auf, die wir von unserer diesjährigen Schwarz-Meer-Expedition mitgebracht haben. Das Projekt CRIMEA läuft bis Anfang 2006, bis dahin möchten wir ein umfassendes Bild erarbeiten.

Das Projekt CRIMEA wird von der Europäischen Union und vom Bundesamt für Bildung und Wissenschaft der Schweiz gefördert.



**Carsten Schubert, Geologe,** Leiter der Gruppe «Biogeochemie» in der Abteilung «Oberflächengewässer». Forschungsschwerpunkte: anaerobe Methan- und Ammoniumoxidation in marinen und limnischen Systemen, Abbau von organischem Kohlenstoff in Sedimenten.

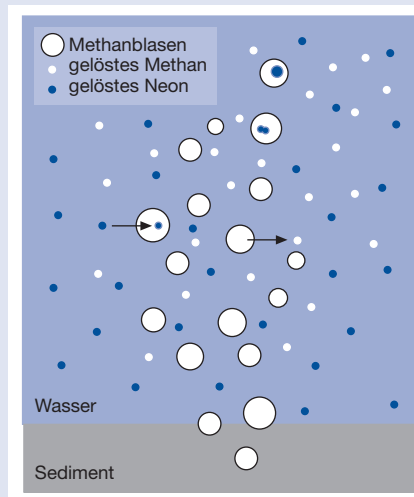
**Koautoren: Edith Kaiser, Lucia Klausner, Christian Holzner, Dan McGinnis, Rolf Kipfer, Johny Wüest, Bernhard Wehrli.**

- [1] Kvenvolden K.A. (1988): Methane hydrates and global climate. *Global Biogeochemical Cycles* 2, 221–229.
- [2] Norris R.D. & Röhl U. (1999): Carbon cycling and chronology of climate warming during the Palaeocene/Eocene transition. *Nature* 401, 775–778.
- [3] Schubert C.J., Kaiser E., Kuypers M.M.M., Wehrli B. (2004): Methane formation and oxidation in the Black Sea. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 6, 02867.
- [4] Kaiser E., Schubert C.J., Wehrli B. (2003): Anaerobic oxidation of methane in the water column of the Black Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67, A193–A193 Suppl.
- [5] McGinnis D.F., Wüest A., Schubert C.J., Klausner L., Lorke A., Kipfer R. (2005): Upward flux of methane in the Black Sea: Does it reach the atmosphere? In: *Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management* (eds. Lee & Lam). Taylor and Francis Group, London p. 423–429.

Methanquelle aufsteigenden Methanblasen und dem Tiefenwasser sprechen. Ein Teil des im Wasser gelösten Neons würde aufgrund des Konzentrationsunterschieds in die Gasblasen diffundieren und im Gegenzug würde sich eine entsprechende Menge Methan im Wasser lösen (Abb. 3). Tatsächlich fanden wir in der Wassersäule über der tiefen Methanquelle eine niedrigere Neonkonzentration als an der Referenzstelle, was über die Zeit integriert einer 20% höheren Methankonzentration über der Methanquelle entspricht.

### Findet ein mikrobieller Methanabbau statt?

In einem zweiten Schritt wollten wir wissen, ob das Methan auf seinem Weg durch die Wassersäule durch Bakterien abgebaut wird [4]. Die stetige Abnahme der Methankonzentration vom Meeresgrund zur Wasseroberfläche (Abb. 2A + B), deutet auf einen solchen Abbau hin. Methan oxidierende Bakterien gehören zu den Euryarchaeota, einer der beiden Untergruppen der Archaea-Bakterien. In den oberen Wasserschichten wird das Methan mit Hilfe von Sauerstoff durch Bakterien aus der Gruppe der aeroben Methanoxidierer zu Kohlendioxid umgesetzt. Im Tiefenwasser dagegen wird das Methan aufgrund der anaeroben Verhältnisse mit Hilfe vom Sulfat oxidiert. Dieser Vor-

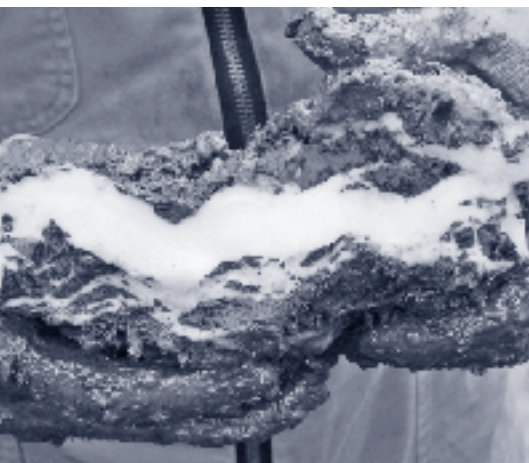


**Abb. 3: Gasaustausch zwischen dem aus der Methanquelle aufsteigenden Methanblasen und dem Tiefenwasser. Ein Teil des im Wasser gelösten Neons diffundiert aufgrund des Konzentrationsunterschieds in die Gasblasen hinein und im Gegenzug löst sich eine entsprechende Menge Methan im Wasser.**

Aus diesem Grund wandten wir eine zweite Messmethode an, bei der die Verteilung des Edelgases Neon (siehe Kasten) bestimmt wird. Normalerweise sollte die Neonkonzentration im gesamten Tiefenwasser des Schwarzen Meers nahezu gleich sein. Eine niedrigere Neonkonzentration im Wasser über dem Methanaustritt würde daher für einen Gasaustausch zwischen den aus der

### Die Neon-Methode

**Neongas kommt in der Luft vor. Zudem gelangt Neon, überall dort, wo Wasser mit Luft in Verbindung steht, durch den Gasaustausch an der Wasser-Luft-Grenze in das Wasser. Die Neonkonzentration im Wasser ist abhängig von der Gleichgewichtskonzentration, die wiederum durch die während des Gasaustausches herrschenden Umweltbedingungen wie z.B. Wassertemperatur und -salinität bestimmt wird. Da das Schwarze Meer stabil geschichtet ist und Neon zudem chemisch inert ist, hat das Tiefenwasser eine spezifische Neonkonzentration. Jegliche Abweichung von dieser Konzentration deutet darauf hin, dass physikalische Prozesse eine Rolle spielen.**



**Methanhydrat in einer Sedimentprobe.**

# Publikationen

Separata bitte mit dem in der Mitte eingeklebbten Talon bestellen.

- [3342] **Müller R., Meng H.J., Enz C.A., Bia M.M., Schäffer E.** (2002): Forecasting Year-class Strength and Yield of Lake Hallwil Whitefish in an Eutrophic Lake. *Arch. Hydrobiol., Spec. Issues Advances in Limnology* 57, 615–625.
- [3343] **Enz C.A., Müller R., Bia M.M., Heeb J.** (2002): A Population Dynamics Model for Evaluating Mortality Factors in Whitefish (*Coregonus suidteri*) Larvae in Lake Hallwil. *Arch. Hydrobiol., Spec. Issues Advances in Limnology* 57, 343–358.
- [3344] **Behra R., Landwehrjohann R., Vogel K., Wagner B., Sigg L.** (2002): Copper and Zinc Content of Periphyton from Two Rivers as a Function of Dissolved Metal Concentration. *Aquat. Sci.* 64 (3), 300–306.
- [3345] **Hare M., Deadman P., Lim K.** (2002): Towards a Taxonomy of Agent-based Simulation Models in Environmental Management. *Proc. «Socioeconomic Systems»*, Vol. 3, F. Ghassemi et al. (Eds.), Internat. Congress on Modelling and Simulation 10–13 December 2001, Canberra, Australia», pp. 1115–1122.
- [3346] **Hare M., Heeb J., Pahl-Wostl C.** (2002): An Applied Methodology for Participatory Model Building of Agent-based Models for Urban Water Management. 3<sup>rd</sup> Workshop on Agent-Based Simulation, C. Urban (Ed.), April 7–9, 2002, Passau, Germany, pp. 61–66.
- [3347] **Reichert P., Borsuk M.E.** (2002): Uncertainty in Model Predictions: Does it Preclude Effective Decision Support? *Proc. Conf. International Environmental Modelling and Software Society*, A.E. Rizzoli et al. (Eds.), June 24–27, 2002, Lugano, Switzerland, Vol. 2, 43–48.
- [3348] **Borsuk M.E., Burkhardt-Holm P., Reichert P.** (2002): A Bayesian Network for Investigating the Decline in Fish Catch in Switzerland. *Proc. Conf. Internat. Environmental Modelling and Software Society*, A.E. Rizzoli et al. (Eds.), Lugano, Switzerland, Vol. 2, 108–113.
- [3349] **Tillmann D.E., Larsen T.A., Pahl-Wostl C., Gujer W.** (2002): Risikoverminderung durch Steuerung des Wasserverbrauchs. *GWA Gas, Wasser, Abwasser* 82 (10), 743–750.
- [3350] **Pahl-Wostl C.** (2002): Participative and Stakeholder-based Policy Design, Evaluation and Modeling Processes. *Integrated Assessment* 3 (1), 3–14.
- [3351] **Wedekind C., Müller R., Spicher H.** (2001): Potential Genetic Benefits of Mate Selection in Whitefish. *J. Evolut. Biol.* 14, 980–986.
- [3352] **Yang H., Abbaspour K.C., Zhang Y.L.** (2002): Desertification Control and Sandstorm Mitigation in the Area Encircling Beijing – with a Discussion on the Application of Bayesian Network and Hydrological Modeling. In: «Sustainable Utilization of Global Soil and Water Resources», *Proc. 12<sup>th</sup> International Soil Conservation Organization Conference*, Beijing, China, Vol. IV, 1–6.
- [3353] **Peters I., Brassel K.-H., Spörri C.** (2002): A Microsimulation Model for Assessing Urine Flows in Urban Wastewater Management. In: «Integrated Assessment and Decision Support», A.E. Rizzoli et al. (Eds.), *Proc. 1<sup>st</sup> Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society SEA*, Como, pp. 508–513.
- [3354] **Hare M., Letcher R.A., Jakeman A.J.** (2002): Participatory Natural Resource Management: A Comparison of Four Case Studies. In: «Integrated Assessment and Decision Support», A.E. Rizzoli et al. (Eds.), *Proc. 1<sup>st</sup> Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society*, Vol. 3 SEA, Como, pp. 73–78.
- [3355] **Borsuk M.E., Powers S.P., Peterson C.H.** (2002): A Survival Model of the Effects of Bottom-water Hypoxia on the Population Density of an Estuarine Clam (*Macoma balthica*). *Canad. J. Fish. Aquat. Sci.* 59, 1266–1275.
- [3356] **Borsuk M.E., Stow C.A., Reckhow K.H.** (2002): Predicting the Frequency of Water Quality Standard Violations: A Probabilistic Approach for TMDL Development. *Environ. Sci. Technol.* 36 (10), 2109–2115.
- [3357] **Belevi H.** (2002): Material Flow Analysis as a Strategic Planning Tool for Regional Waste Water and Solid Waste Management. *Proc. Workshop «Globale Zukunft: Kreislaufwirtschaftskonzepte im kommunalen Abwasser- und Fäkalienmanagement*. München, Deutschland, 15 p.
- [3358] **Berg M., Hug S., van der Meer J.R., Zobrist J.** (2002): Neue Herausforderung: Arsen im Trinkwasser. *Aqua Press Internat.* 4, 15–17.
- [3359] **Hooper D.U., Solan M., Symstad A., Díaz S., Gessner M.O., Buchmann N., Dégrange V., Grime P., Hulot F., Mermillod-Blondin F., Roy J., Spehn E., van Peer L.** (2002): Species Diversity, Functional Diversity and Ecosystem Functioning. In: «Biodiversity and Ecosystem Functioning – Synthesis and Perspectives», M. Loreau et al. (Eds.), Oxford University Press, Oxford, UK, p. 195–208.
- [3360] **Maurer M., Muncke J., Larsen T.A.** (2002): Technologies for Nitrogen Recovery and Reuse. In: «Water Recycling and Resource Recovery in Industry». P. Lens et al. (Eds.), IWA Publishing, London, p. 491–510.
- [3361] **Tockner K.** (2002): Ausgedehnte Wildflusslandschaft Hochwasserschutz bedroht. *Garten+Landschaft* 12, 42.
- [3362] **Snyder E.B., Robinson C.T., Minshall G.W., Rushforth S.R.** (2002): Regional Patterns in Periphyton Accrual and Diatom Assemblage Structure in a Heterogeneous Nutrient Landscape. *Canad. J. Fish. & Aquat. Sci.* 59, 564–577.
- [3363] **Krivova N.A., Solanki S.K., Beer J.** (2002): Was One Sunspot Cycle in the 18<sup>th</sup> Century Really Lost? *Astronomy & Astrophysics* 396, 235–242.
- [3364] **Müller R., Bia M.M.** (2001): Poissons à jeun: les petits corégones du lac des Quatre-Cantons. Effets de la ré-oligotrophisation sur la population de petits corégones et conséquences pour l'exploitation piscicole. *Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEPF/BUWAL)*, Informations concernant la pêche no 68, Berne, p. 37–49.
- [3365] **Mondi C., Leifer K., Mavrocordatos D., Perret D.** (2002): Analytical Electron Microscopy as a Tool for Accessing Colloid Formation Process in Natural Waters. *J. Microscopy* 207 (3), 180–190.
- [3366] **Boller M.** (2002): Membranes – Water Treatment Technology of the Future. *Proc. Internat. Water Treatment Technology Conference*, Kunming, China.
- [3367] **Steiner M., Boller M.** (2002): Meteorwasser von Kupfer-Dachflächen muss künftig gefiltert werden. *Kommunalmagazin* 19 (10), 23–25.
- [3368] **Rothenberger D., Moosmann L., Boller M.** (2002): Reformen in der Schweizer Siedlungswasserwirtschaft – EAWAG-Workshop – ein zusammenfassender Rückblick, GWA Gas, Wasser, Abwasser 82 (9), 691–694.
- [3369] **Furumai H., Balmer H., Boller M.** (2002): Dynamic Behavior of Suspended Pollutants and Particle Size Distribution in Highway Runoff. *Water Sci. Technol.* 46 (11–12)
- [3370] **Shieh S.-H., Ward J.V., Kondratieff B.C.** (2002): Energy Flow Through Macroinvertebrates in a Polluted Plains Stream. *J. North Amer. Benthol. Soc.* 21 (4), 660–675.
- [3371] **Mavrocordatos D., Kaegi R., Schmatloch V.** (2002): Fractal Analysis of Wood Combustion Aggregates by Contact Mode Atomic Force Microscopy. *Atmospheric Environment* 36, 5653–5660.
- [3372] **Boller M., Steiner M.** (2002): Wasser vom Dach – Menge und Qualität. In: «Dächer – leistungsfähig und ausdrucksstark mit Holz». 34. SAH-Fortbildungskurs, Schweiz. Arbeitsgemein-

- schaft für Holzforschung, Tagungsband, Lignum, Zürich, S. 125–135. ISBN 3-906703-14-2.
- [3373] **Lienert J., Larsen T.A.** (2002): Urinseparierung – eine Alternative für die schweizerische Siedlungswasserwirtschaft? GWA Gas, Wasser, Abwasser 82 (11), 819–826.
- [3374] **Medilanski E., Kaufmann K., Wick L.Y., Wanner O., Harms H.** (2002): Influence of the Surface Topography of Stainless Steel on Bacterial Adhesion. Biofouling 18 (3), 193–203.
- [3375] **Larsen T.A., Gujer W.** (2002): Waste Design, Source Control und On-Site-Technologien: Der Weg zu einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft. Korrespondenz Abwasser 49 (10), 1372–1379.
- [3376] **Burgherr P., Ward J.V., Robinson C.T.** (2002): Seasonal Variation in Zoobenthos Across Habitat Gradients in an Alpine Glacial Floodplain (Val Roseg, Swiss Alps). J. North Amer. Benthol. Soc. 27 (4), 561–575.
- [3377] **Holocher J., Peeters F., Aeschbach-Hertig W., Hofer M., Brenwald M., Kinzelbach W., Kipfer R.** (2002): Experimental Investigations on the Formation of Excess Air in Quasi-saturated Porous Media. Geochim. Cosmochim. Acta 66 (23), 4103–4117.
- [3378] **Friedl G., Wüest A.** (2002): Disrupting Biogeochemical Cycles – Consequences of Damming. Aquat. Sci. 64 (1), 55–65.
- [3379] **Lorke A., Wüest A.** (2002): Probability Density of Displacement and Overturning Length Scales under Diverse Stratification. J. Geophys. Res. 107 (C12), 7-1–7-11.
- [3380] **Goudsmit G.-H., Burchard H., Peeters F., Wüest A.** (2002): Application of  $k-\epsilon$  Turbulence Models to Enclose Basins: The Role of Internal seiches. J. Geophys. Res. 107 (C12), 23-1–23-13.
- [3381] **Suter M.J.-F., Aerni H.-R., Kobler B., Fallner P., Rutishauser B.V., Wettstein F.E., Burkhardt-Holm P., Fischer R., Giger W., Hungerbühler A., Peter A., Schönenberger R., Eggen R.I.L.** (2002): The Combination of Biological and Chemical Analysis for the Determination of Estrogenicity in Swiss Wastewater Treatment Plant Effluents. Center of Excellence in Analytical Chemistry, ETH Zurich, Annual Report 2001, 14–18.
- [3382] **Lämmlli C.** (2002): Comparison of Two Functional Gene Clusters for Degradation of Chlorocatechols Present on Plasmid pJP4 in *Ralstonia eutropha* JMP134. Diss. ETHZ No. 14 543, Zurich.
- [3383] **Gessner M.O. Schmitt A.L.** (1996): Use of Solid-Phase Extraction to Determine Ergosterol Concentrations in Plant Tissue Colonized by Fungi. Appl. Environ. Microbiol. 62 (2), 415–419.
- [3384] **Ammann A.** (2002): Analytik anionischer Schwermetallkomplexe mit IC ICP-MS in der aquatischen Umweltforschung. In: «Ionanalyse mit modernen Trenntechniken». K. Fischer, D. Jensen (Hrsg.). Proc. 3. Fachtagung, Trier, 26.–27. Februar. Dianox GmbH, Idstein, S. 28–37. ISBN 3-00-010300-7.
- [3385] **Larsen T.A., Lienert J.** (2002): Societal Implications of Re-engineering the Toilet. Extended abstract. Proc. IWA Leading Edge Conference Series: Sustainability in the Water Sector. Venice, Italy, p. 29.
- [3386] **Montangero A., Koné D., Strauss M.** (2002): Planning Towards Improved Excreta Management. Proc. 5<sup>th</sup> IWA Conference on Small Water and Wastewater Treatment Systems, Istanbul, Turkey.
- [3387] **Hare M., Pahl-Wostl C.** (2002): Stakeholder Categorisation in Participatory Integrated Assessment Processes. Integrated Assessment 3 (1), 50–62.
- [3388] **Pecher K., Haderlein S., Schwarzenbach R.P.** (2002): Reduction of Polyhalogenated Methanes by Surface-bound Fe(II) in Aqueous Suspensions of Iron Oxides. Environ. Sci. Technol. 36 (8), 1734–1741.
- [3389] **Ammann A.A., Hoehn E. Koch S.** (2003): Ground Water Pollution by Roof Runoff Infiltration Evidenced with Multi-Tracer Experiments. Water Res. 37 (5), 1143–1153.
- [3390] **Müller J., Vologina E.G., Sturm M.** (2001): Recent Clay Mineral Distribution as a Possible Indicator for Sediment Sources in the North Basin of Lake Baikal. Russ. Geol. Geophys. 42 (1).
- [3391] **Sulzberger B.** (2002): Why a «New» Journal in Aquatic Sciences? Aquatic Sci. 64 (1), i-ii.
- [3392] **Fux C., Böhler M., Huber P., Siegrist H.-R.** (2001): Stickstoffelimination durch anaerobe Ammoniumoxidation (Anammox). In: «Der Stickstoff im Wasser/Abwasser». Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Bd. 166, Oldenbourg Verlag, München, S. 35–50.
- [3393] **Escher B.I., Eggen R.I.L., Schreiber U., Schreiber Z., Vye E., Wisner B., Schwarzenbach R.P.** (2002): Baseline Toxicity (Narcosis) of Organic Chemicals Determined by in Vitro Membrane Potential Measurements in Energy-transducing Membranes, Environ. Sci. Technol. 36, 1971–1979.
- [3394] **Wüest A., Lorke A.** (2003): Small-Scale Hydrodynamics in Lakes. Ann. Rev. Fluid Mech. 35, 373–412.
- [3395] **Canonica S., Tratnyek P.G.** (2003): Quantitative Structure-activity Relationships for Oxidation Reactions of Organic Chemicals in Water. Environ. Toxicol. Chem. 22 (8), 1743–1754.
- [3396] **Schleheck D., Lechner M., Schönenberger R., Suter M.J.-F., Cook A.M.** (2003): Desulfonation and Degradation of the Disulfodi-phenylethercarboxylates from Linear Alkyldi-phenyletherdisulfonate Surfactants. Appl. Environ. Microbiol. 69 (2), 938–944.
- [3397] **Livingstone D.M.** (2003): Impact of Secular Climate Change on the Thermal Structure of a Large Temperate Central European Lake. Climatic Change 57, 205–225.
- [3398] **Hofstetter T.H., Schwarzenbach R.P., Haderlein S.B.** (2003): Reactivity of Fe(II) Species Associated with Clay Minerals. Environ. Sci. Technol. 37 (3), 519–528.
- [3399] **Wedekind C.** (2002): Induced Hatching to Avoid Infectious Egg Disease in Whitefish. Current Biology, 12 (1), 69–71.
- [3400] **Brunner P.H., Morf L., Rechberger H.** (2002): Thermal Waste Treatment – A Necessary Element for Sustainable Waste Management. In: «Solid Waste: Assessment, Monitoring and Remediation», I. Twardowska et al. (Eds.), Elsevier.
- [3401] **Zika U., Peter A.** (2002): The Introduction of Woody Debris into a Channelized Stream: Effect on Trout Populations and Habitat. River Res. Appl. 18 (4), 355–366.
- [3402] **Perlinger J.A., Kalluri V.M., Venkatapathy R., Angst W.** (2002): Addition of Hydrogen Sulfide to Juglone. Environ. Sci. Technol. 36 (12), 2663–2669.
- [3403] **Hausmann S., Lotter A.F., van Leeuwen J.F.N., Ohlendorf C., Lemcke G., Grönlund E., Sturm M.** (2002): Interactions of Climate and Land Use Documented in the Varved Sediments of Seeburgsee in the Swiss Alps. The Holocene 12 (3), 297–289.
- [3404] **Steiner M., Boller M.** (2002): Meteorwasser von Kupfer-Dachflächen muss künftig gefiltert werden. Kommunal Magazin 19 (10), 1–6.
- [3405] **Springael D., Peys K., Rynagaert A., Van Roy S., Hooyberghs L., Ravatn R., Heyndrickx M., van der Meer J.-R., Vandecasteele C., Mergeay M., Diels L.** (2002): Community Shifts in a Seeded 3-Chlorobenzoate Degrading Membrane Biofilm Reactor: Indications for Involvement of *in situ* Horizontal Transfer of the *clc*-Element from Inoculum to Contaminat Bacteria. Environ. Microbiol. 4 (2), 70–80.
- [3406] **Minorov D., Terzhevik A., Kirillin G., Jonas T.** (2002): Radiatively Driven Convection in Ice-Covered Lakes: Observations, Scaling, and Mixed Layer Model. J. Geophys. Res.-Oceans 107 (C4), 7/1–7/16.
- [3407] **Hauger M.B., Rauch W., Linde J.J., Mikkelsen P.S.** (2002): Cost Benefit Risk – a Concept for Management of Integrated urban Wastewater Systems? Water Sci. Technol. 45 (3), 185–193.
- [3408] **Dittrich M., Koschel R.** (2002): Interactions Between Calcite Precipitation (Natural and Artificial) and Phosphorus Cycle in the Hardwater Lake. Hydrobiologia 469 (1–3), 49–57.
- [3409] **Aeschbach-Haertig W., Stute M., Clark J.F., Reuter R.F., Schlosser P.** (2002): A Paleotemperature Record Derived From Dissolved Noble Gases in Groundwater of the Aquia Aquifer (Maryland, USA). Geochim. Cosmochim. Acta 66 (5), 797–817.
- [3410] **Straile D., Livingstone D.M., Weyhenmeyer G.A., George D.G.** (2002): The Response of Freshwater Ecosystems to Climate Variability Associated with the Nord Atlantic Oscillation. In: «The North Atlantic Oscillation – Climatic Significance and Environmental Impact», J.W. Hurrell et al. (Eds.), Geophysical Monograph 134, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 263–279.
- [3411] **Kottonau J.** (2002): Simulating the Formation and Change of the Strength of Political Attitudes. Diss. ETHZ No. 14 664, Zurich.
- [3412] **Egli K.R.** (2003): On the Use of Anammox in Treating Ammonium-Rich Wastewater. Diss. ETHZ No. 14 886, Zurich.
- [3413] **Keller B., Bürgi H.R., Sturm M., Spaak P.** (2002): Ehippia and *Daphnia* Abundances Under Changing Trophic Conditions. Verh. Internat. Verein. Limnol. 28, 851–855.
- [3414] **Sonnleitner M.A., Abbaspour K.C., Schulin R.** (2003): Hydraulic and Transport Prop-

- erties of the Plant-Soil System Estimated by Inverse Modelling. *Eur. J. Soil Sci.* 54, 127–138.
- [3415] **Tockner K.** (2003): Totholz – entsorgungspflichtig oder wertvoll? *Petri Heil* 54 (3), 43.
- [3416] **Wüest A., Moosmann L., Friedl G.** (2003): Alpine Wasserkraftwerke und Ihre «Fernwirkung» auf talwärts liegende Gewässer. *Bull. SEV* 94 (2), 11–14.
- [3417] **Gächter R., Müller B.** (2003): Why the Phosphorus Retention of Lakes Does Not Necessarily Depend on the Oxygen Supply to Their Sediment Surface. *Limnol. Oceanogr.* 48 (2), 929–933.
- [3418] **Matzinger A., Wüest A.** (2001): The Effect of Cascading on Nutrient Pathways and Productivity in Dams – Toward a Sensitivity Analysis. *Proc. 2001 Internat. Sympos. on Environmental Hydrodynamics*, 6 p.
- [3419] **Huber M.M., Canonica S., Park G.Y., von Gunten U.** (2003): Oxidation of Pharmaceuticals During Ozonation and Advanced Oxidation Processes. *Environ. Sci. Technol.* 37 (5), 1016–1024.
- [3420] **Egli T., Köster W.** (2002): From Counting of *E. coli* to Pathogen Detection by Molecular Methods. *Gaia* 11 (4), 259–262.
- [3421] **Bürgi H.R.** (1999): Veränderungen der Phytoplanktondiversität durch Nährstoffabnahme und seeinterne Sanierungsmassnahmen im Baldeggersee und Sempachersee. *Protokoll 33. Tagung Cercle'eau, Verein. kant. Gewässerschutzlimnologen und -chemiker*, 25. März 1999, Wasserver-sorgung Zurich.
- [3422] **Tixier C., Singer H.P., Oellers S., Müller S.R.** (2003): Occurrence and Fate of Carbamazepine, Clofibrac Acid, Diclofenac, Ibuprofen, Ketoprofen, and Naproxen in Surface Waters. *Environ. Sci. Technol.* 37 (6), 1061–1068.
- [3423] **Hofer M., Peeters F., Aeschbach-Hertig W., Brennwald M., Holocher J., Livingstone D.M., Romanovski V., Kipfer R.** (2002): Rapid Deep-Water Renewal in Lake Issyk-Kul (Kyrgyzstan) Indicated by Transient Tracers. *Limnol. Oceanogr.* 47 (4), 1210–1216.
- [3424] **Zehnder A.J.B., Yang H., Schertenleib R.** (2003): Water Issues: The Need for Action at Different Levels. *Aquat. Sci.* 65, 1–20.
- [3425] **Zwank L., Berg M., Schmidt T.C., Haderlein S.B., Schwarzenbach R.P.** (2003): Compound-Specific Stable Isotope Analysis of Organic Groundwater Contaminants: Environmental Applications and Analytical Challenges. *Chimia* 57 (1–2), 44.
- [3426] **Nozhevnikova A.N., Zepp K., Vazquez F., Zehnder A.J.B., Holliger C.** (2003): Evidence for the Existence of Psychrophilic Methanogenic Communities in Anoxic Sediments of Deep Lakes. *Appl. Environ. Microbiol.* 69 (3), 1832–1835.
- [3427] **Uehlinger U., Malard F., Ward J.V.** (2003): Thermal Patterns in the Surface Waters of a Glacial River Corridor (Val Roseg, Switzerland). *Freshwater Biol.* 48 (2), 284–300.
- [3428] **Mash H.E., Chin Y.P., Sigg L., Hari R., Xue H.B.** (2003): Complexation of Copper by Zwitterionic Aminosulfonic (Good) Buffers. *Anal. Chem.* 75 (3), 671–677.
- [3429] **von Gunten U.** (2003): Ozonation of Drinking Water: Part I. Oxidation Kinetics and Product Formation. *Water Res.* 37 (7), 1443–1467.
- [3430] **von Gunten U.** (2003): Ozonation of Drinking Water: Part II. Disinfection and By-Product Formation in Presence of Bromide, Iodide or Chlorine. *Water Res.* 37 (7), 1469–1487.
- [3431] **Gujer W., von Gunten U.** (2003): A Stochastic Model of an Ozonation Reactor. *Water Res.* 37 (7), 1667–1677.
- [3432] **Beer J.** (1995): Modulation of the Cosmic Radiation and its Manifestation in Cosmogenic Isotopes. In: «Highlights of Astronomy», I. Appenzeller (Ed.), Vol. 10, IAU, 313–316.
- [3433] **Shen C., Liu T., Yi W., Sun Y., Jiang M., Beer J., Bonani G.** (1998): <sup>14</sup>C Dating of Terrestrial Moss in Tern Lake Deposits, Antarctica. *Radio-carbon* 40 (2), 849–854.
- [3434] **Peeters F., Beyerle U., Aeschbach-Hertig W., Holocher J., Brennwald M.S., Kipfer R.** (2003): Improving Noble Gas Based Paleoclimate Reconstruction and Groundwater Dating Using <sup>20</sup>Ne/<sup>22</sup>Ne Ratios. *Geochim. Cosmochim. Acta* 67 (4), 587–600.
- [3435] **Ivy-Ochs S., Schlüchter C., Prentice M., Kubid P.W., Beer J.** (1997): <sup>10</sup>Be and <sup>26</sup>Al Exposure Ages for the Sirius Group at Mount Fleming, Mount Feather and Table Mountain and the Plateau Surface at Table Mountain. In: «The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes», C.A. Ricci (Ed.), Terra Antarctica Publication, pp. 1153–1158.
- [3436] **Anklin M., Barnola M., Beer J., et al.** (1993): Climate Instability During the Last Interglacial Period Recorded in the GRIP Ice Core. *Nature* 364, 203–207.
- [3437] **Beer J., Raisbeck G.M., Yiou F.** (1991): Time Variations of <sup>10</sup>Be and Solar Activity. In: «The Sun in Time», C.P. Sonett et al. (Eds.), The University of Arizona Press, Tucson, pp. 343–359.
- [3438] **Müller T.A., Werlen C., Spain J., van der Meer J.R.** (2003): Evolution of a Chlorobenzene Degradative Pathway Among Bacteria in a Contaminated Groundwater Mediated by a Genomic Island in *Ralstonia*. *Environ. Microbiol.* 5 (3), 163–173.
- [3439] **Synal H.-A., Beer J., Bonani G., Lukaszczuk C., Suter M.** (1994): <sup>36</sup>Cl Measurements at the Zurich AMS Facility. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* B92, 79–84.
- [3440] **Synal H.-A., Beer J., Bonani G., Suter M., Wölfli W.** (1990): Atmospheric Transport of Bomb-Produced <sup>36</sup>Cl. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* B52, 483–488.
- [3441] **Scheffel C., Blinov A., Massonet S., Sachsenhauser H., Stan-Sion C., Beer J., Synal H.-A., Kubid P.W., Kaba M., Nolte E.** (1999): <sup>36</sup>Cl in Modern Atmospheric Precipitation. *Geophys. Res. Lett.* 26 (10), 1401–1404.
- [3442] **Henken-Mellies W.U., Beer J., Heller F., Hsü K.J., Shen C., Bonani G., Hofmann H.J., Suter M., Wölfli W.** (1990): <sup>10</sup>Be and <sup>9</sup>Be in South Atlantic DSDP Site 519: Relation to Geomagnetic Reversals and to Sediment Composition. *Earth & Planetary Sci. Lett.* 98, 257–276.
- [3443] **Blinov A., Massonet S., Sachsenhauser H., Stan-Sion C., Lazarev V., Beer J., Synal H.-A., Kaba M., Masarik J., Nolte E.** (2000): An Ex-
- cess of <sup>36</sup>Cl in Modern Atmospheric Precipitation. *Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res.* B172, 537–544.
- [3444] **Beyerle U., Ruedi J., Leuenberger M., Aeschbach-Hertig W., Peeters F., Kipfer R., Do-dol A.** (2003): Evidence for Periods of Wetter and Cooler Climate in the Sahel Between 6 and 40 kyr BP Derived from Groundwater. *Geophys. Res. Lett.* 30 (4), 22/1–22/4.
- [3445] **Ivy-Ochs S., Schluchter C., Kubik P.W., Synal H.A., Beer J., Kerschner H.** (1996): The Exposure Age of an Egesen Moraine at Julier Pass, Switzerland Measured with the Cosmogenic Radionuclides <sup>10</sup>Be, <sup>26</sup>Al and <sup>36</sup>Cl. *Eclog. Geol. Helv.* 89 (3), 1049–1063.
- [3446] **Eugster O., Beer J., Burger M., Finkel R.C., Hofmann H.J., Krähenbühl U., Michel T., Synal H.A., Wölfli W.** (1991): History of the Paired Lunar Meteorites MAC88104 and MAC88105 Derived from Noble Gas Isotopes, Radionuclides, and Some Chemical Abundances. *Geochim. Cosmochim. Acta* 55, 3139–3148.
- [3447] **Dowgiallo J., Nowicki Z., Beer J., Bonani G., Suter M., Synal H.A., Wölfli W.** (1990): <sup>36</sup>Cl in Ground Water of the Mazowsze Basin (Poland). *J. Hydrol.* 118, 373–385.
- [3448] **Baltensperger U., Schwikowski M., Gäg-geler H.W., Jost D.T., Beer J., Siegenthaler U., Wagenbach D., Hofmann H.J., Synal H.A.** (1993): Transfer of Atmospheric Constituents into an Alpine Snow Field. *Atmos. Environ.* 27A (12), 1881–1890.
- [3449] **Monaghan M.T., Hieber M., Robinson C.T., Spaak P., Ward J.V.** (2002): Spatial Patterns of Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera Diversity in Fragmented Alpine Streams. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 28, 1429–1435.
- [3450] **Harder A.** (2002): Assessment of the Risk Potential of Reactive Chemicals with Multiple Modes of Toxic Action. *Diss. ETHZ Nr. 14 966* Zurich.
- [3451] **Claret C., Ward J.V., Tockner K.** (2002): Temperature Heterogeneity of Interstitial Water in Island-Associated Water Bodies of a Dynamic Flood Plain. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 28, 345–351.
- [3452] **Arscott D.B., Glatthaar R., Tockner K., Ward J.V.** (2002): Larval Black Fly (Diptera: Simuliidae) Distribution and Diversity Along a Floodplain River in the Alps (Tagliamento River, Italy). *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 28, 524–531.
- [3453] **Hügel K.** (2003): Ökobilanzen in der Siedlungswasserwirtschaft. *Schr. Institut für Hydro-mechanik und Wasserwirtschaft der ETHZ (IHW)*, Bd. 12, Zurich, VIII + 104 S. ISBN 3-906445-12-7
- [3454] **Aeschbach-Hertig W., Hofer M., Schmid M., Kipfer R., Imboden D.M.** (2002): The Physical Structure and Dynamics of a Deep, Meromictic Crater Lake (Lac Pavin, France). *Hydrobiologia* 487 (1), 111–136.
- [3455] **Holocher J., Peeters F., Aeschbach-Hertig W., Kinzelbach W., Kipfer R.** (2003): Kinetic Model of Gas Bubble Dissolution in Groundwater and its Implications for the Dissolved Gas Composition. *Environ. Sci. Technol.* 37 (7), 1337–1343.
- [3456] **Marchetti F., Fravezzi L., Buesing N.** (2000): Nutrient Loading from the Sarca River into

- Lake Garda, Italy. Verh. Internat. Verein. Limnol. 27, 3129–3131.
- [3457] **Rubli S., Belevi H., Baccini P.** (2003): Optimizing Municipal Solid Waste Combustion Through Organic and Elemental Carbon as Indicators. *Environ. Sci. Technol.* 37 (5), 1025–1030.
- [3458] **Reichert P., Wanner O.** (1997): Movement of Solids in Biofilms: Significance of Liquid Phase Transport. *Water Sci. Technol.* 36 (1), 321–328.
- [3459] **Schellenberg E.T., Hartmann U., Zah R., Meyer E.I.** (2001): Response of the Epibenthic and Hyorheic Invertebrates to Stream Drying in a Prealpine River. Verh. Internat. Verein. Limnol. 27, 3733–3737.
- [3460] **Zah R., Burgherr P., Bernasconi S.M., Uehlinger U.** (2000): Contribution of Organic Resources to a Glacial Stream (Val Roseg, Swiss Alps) – a Stable Isotope Study. Verh. Internat. Verein. Limnol. 27, 1635–1639.
- [3461] **Escher B.I., Hunziker R.W., Schwarzenbach R.P.** (2001): Interaction of Phenolic Uncouplers in Binary Mixtures: Concentration-Additive and Synergistic Effects. *Environ. Sci. Technol.* 35 (19), 3905–3914.
- [3462] **Flaim G., Corradini F., Buesing N.** (2001): Anthropogenically Induced Phytoplankton Blooms in Lake Serrai. Verh. Internat. Verein. Limnol. 27, 3370–3373.
- [3463] **Medilanski E., Wick L.Y., Wanner O., Harms H.** (2003): Mutual Influences of *Pseudomonas aeruginosa* and *Desulfovibrio desulfuricans* on Their Adhesion to Stainless Steel. *Biofouling* 19 (2), 125–132.
- [3464] **Spadini L., Sturm M., Wehrli B., Bott M.** (2003): Analysis and Dating of Pb, Cd, Cu, Zn Sediment Profiles from the Vitznau Basin of Lake Lucerne (Switzerland). *Rev. Géogr. Alpine* 91 (1), 41–48.
- [3465] **Udert K.M., Larsen T.A., Biebow M., Gujer W.** (2003): Urea Hydrolysis and Precipitation Dynamics in a Urine-Collection System. *Water Res.* 37, 2571–2582.
- [3466] **Udert K.M., Larsen T.A., Gujer W.** (2003): Estimating the Precipitation Potential in Urine-Collecting Systems. *Water Res.* 37 (11), 2667–2677.
- [3467] **Shoemaker J., Reeves G.T., Gupta S., Pilyugin S.S., Egli T., Narang A.** (2003): The Dynamics of Single-Substrate Continuous Cultures: the Role of Transport Enzymes. *J. Theor. Biol.* 222 (3), 307–322.
- [3468] **Köster W., Landini P.** (2003): Qualitätskontrolle: Molekulare Methoden sind im Kommen. *Kommunalmagazin* 20 (4), 32–34.
- [3469] **Alex J., Rieger L., Winkler S., Siegrist H.** (2003): Progress in Sensor Technology – Progress in Process Control? Part II: Results From a Simulation Benchmark Study. *Water Sci. Technol.* 47 (2), 113–120.
- [3470] **Buesing N.** (2002): Microbial Productivity and Organic Matter Flow in a Littoral Reed Stand. Diss. ETHZ No. 14 667, Zurich.
- [3471] **Boller M., Mavrocordatos D.** (2003): Membrane Applications in Western Europe: Raw Water Constituents Interfering with Membranes. In: «Water Resources and Water Supply in the 21<sup>st</sup> Century», Y. Watanabe, N. Funamizu (Eds.), Hokkaido University Press, Sapporo, 2003, pp. 109–126. ISBN 4-8329-0312-8
- [3472] **Kulbe T., Niederreiter jr. R.** (2003): Freeze Coring of Soft Surface Sediments at a Water Depth of Several Hundred Meters. *J. Paleolimnol.* 29 (2), 257–263.
- [3473] **Mavrocordatos D., Steiner M., Boller M.** (2003): Analytical Electron Microscopy and Focused Ion Beam: Complementary Tool for the Imaging of Copper Sorption onto Iron Oxide Aggregates. *J. Microscopy* 210 (1), 45–52.
- [3474] **Fabian D.** (2002): Sedimentation and Remobilisation of Metals in Baldeggersee: from Early Diagenesis to Paleo-Indicators. Diss. ETHZ No. 14 917, Zurich.
- [3475] **von Gunten U.** (2003): Trinkwasser in der Schweiz – Ein alltägliches Gut. Bull. ETHZ Nr. 289, 40–44, Zürich.
- [3476] **Giger W., Alder A.C., Golet E.M., Kohler H.P.E., McArdell C.S., Molnar E., Schaffner C.** (2003): Chemische Spurensuche – Neue Verunreinigungen in Abwasser und Gewässern. Bull. ETHZ Nr. 289, 46–49, Zürich.
- [3477] **Kipfer R., Frank M.** (2003): Umweltarchiv Wasser – Wasser im Spiegel des Klimas. Bull. ETHZ Nr. 289, 50–53, Zürich.
- [3478] **Tockner K.** (2003): The Tagliamento River: An Ecosystem of European Importance. *FBA news* No. 22, 6.
- [3479] **Amirbahman A., Schönenberger R., Furrer G., Zobrist J.** (2003): Experimental Study and Steady-state Simulation of Biogeochemical Processes in Laboratory Columns with Aquifer Material. *J. Contam. Hydrol.* 64, 169–190.
- [3480] **Eggen R.I.L.** (2003): Biologische Tracer in der Ökotoxikologie. *Der Gartenbau* 22, 12–13.
- [3481] **Winder M., Boersma M., Spaak P.** (2003): On the Cost of Vertical Migration: Are Feeding Conditions Really Worse at Greater Depths? *Freshwater Biol.* 48, 383–393.
- [3482] **Lass S., Spaak P.** (2003): Temperature Effects on Chemical Signalling in a Predator-Prey System. *Freshwater Biol.* 48, 669–677.
- [3483] **Winder M., Bürgi H.R., Spaak P.** (2003): Mechanisms Regulating Zooplankton Populations in a High-Mountain Lake. *Freshwater Biol.* 48, 795–809.
- [3484] **Zehnder A.J.B.** (2003): Editorial: Wasserfragen – was kann die Schweiz beitragen? / Quelle pourrait être la contribution de la Suisse à la résolution du problème de l'eau? *GWA Gas, Wasser, Abwasser* 83 (6), 379–380.
- [3485] **Fabian D., Zhou Z., Wehrli B., Friedl G.** (2003): Diagenetic Cycling of Arsenic in the Sediments of Eutrophic Baldeggersee, Switzerland. *Appl. Geochem.* 18, 1497–1506.
- [3486] **Elsner M.** (2002): Reductive Dehalogenation of Chlorinated Hydrocarbons by Surface-Bound Fe(II) – Kinetic and Mechanistic Aspects. Diss. ETH No. 14 955, Zurich.
- [3487] **Albrecht A.** (2003): Validating Riverine Transport and Speciation Models Using Nuclear Reactor-derived Radiocobalt. *J. Environ. Radioactivity* 66, 295–307.
- [3488] **Duong H.A., Berg M., Hoang M.H., Pham H.V., Gallard H., Giger W., von Gunten U.** (2003): Trihalomethane Formation by Chlorination of Ammonium- and Bromide-containing Groundwater in Water Supplies of Hanoi, Vietnam. *Water Res.* 37, 3242–3252.
- [3489] **Hieber M., Robinson C., Uehlinger U.** (2003): Seasonal and Diel Patterns of Invertebrate Drift in Different Alpine Stream Types. *Freshwater Biol.* 48, 1078–1092.
- [3490] **Baccini P.** (1999): Bauen und Nachhaltigkeit. In: «Zukunft der Nachhaltigkeit», Ökosoziales Forum Österreich, Wien, S. 114–121.
- [3491] **Mackay A.W., Battarbee R.W., Flower R.J., Granin N.G., Jewson D.H., Ryves D.B., Sturm M.** (2003): Assessing the Potential for Developing Internal Diatom-based Transfer Functions for Lake Baikal. *Limnol. Oceanogr.* 48 (3), 1183–1192.
- [3492] **Bürgi H.R., Bührer H., Keller B.** (2003): Long-Term Changes in Functional Properties and Biodiversity of Plankton in Lake Greifensee (Switzerland) in Response to Phosphorus Reduction. *Aquatic Ecosystem Health & Manag.* 6 (2), 147–158.
- [3493] **Egli K., Langer C., Siegrist H., Zehnder A.J.B., Wagner M., van der Meer J.R.** (2003): Community Analysis of Ammonia and Nitrite Oxidizers During Start-up of Nitrification Reactors. *Appl. Environ. Microbiol.* 69 (6), 3213–3222.
- [3494] **Sentchilo V., Ravatn R., Werlen C., Zehnder A.J.B., van der Meer J.R.** (2003): Unusual Integrase Gene Expression on the *clc* Genomic Island in *Pseudomonas* sp. Strain B13. *J. Bacteriol.* 185 (15), 4530–4538 (2003)
- [3495] **Vologina E.G., Sturm M., Vorob'eva S.S., Granina L.Z., Toshchakov S.Yu.** (2003): Character of Sedimentation in Lake Baikal in the Holocene. *Russ. Geol. & Geophys.* 44 (5), 407–421.
- [3496] **Jonas T., Terzhevik A.Y., Mironov D., Wüest A.** (2003): Radiatively Driven Convection in an Ice-covered Lake Investigated by Using Temperature Microstructure Technique. *J. Geophys. Res.* 108 (C6), 14/1–14/18.
- [3497] **Ryves D.B., Jewson D.H., Sturm M., Battarbee R.W., Flower R.J., Mackay A.W., Granin N.G.** (2003): Quantitative and Qualitative Relationships Between Planktonic Diatom Communities and Diatom Assemblages in Sedimenting Material and Surface Sediments in Lake Baikal, Siberia. *Limnol. Oceanogr.* 48 (4), 1643–1661.
- [3498] **Udert K.M., Fux C., Münster M., Larsen T.A., Siegrist H., Gujer W.** (2003): Nitrification and Autotrophic Denitrification of Source-Separated Urine. *Water Sci. Technol.* 48 (1), 119–130.
- [3499] **Köster W., Egli T., Ashbolt N., Botzenhart K., Burlion N., Endo T., Grimont P., Guillot E., Mabilat C., Newport L., Niemi M., Payment P., Prescott A., Renaud P., Rust A.** (2003): Analytical Methods for Microbiological Water Quality Testing. In: «Assessing Microbial Safety of Drinking Water – Improving Approaches and Methods», Chapter 8, pp. 237–295, OECD-Publ., Paris Cedex. ISBN 92-64-09946-8
- [3500] **Baur I., Johnson C.A.** (2003): Sorption of Selenite and Selenate to Cement Minerals. *Environ. Sci. Technol.* 37 (15), 3442–3447.



- [3501] **Maurer M.** (2003): Nährstoffrecycling in der Siedlungsentwässerung. PUSCH – praktischer umweltschutz schweiz: Thema Umwelt H. 2, 6–7.
- [3502] **Joss A., Monti A., Fux C., Manser R., Rozzi A., Siegrist H.** (2001): Anaerobic Ammonia Oxidation (Anammox) with a Submerged Membrane System. Proc. IWA-Conf. «Membrane technology for waste water reclamation and reuse», Tel-Aviv, 9.–13.9.2001, pp. 90–97.
- [3503] **Eugster W., Kling G., Jonas T., McFadden J.P., Wüest A., MacIntyre S., Chapin III F.S.** (2003): CO<sub>2</sub> Exchange Between Air and Water in an Arctic Alaskan and Midlatitude Swiss Lake: Importance of Convective Mixing. *J. Geophys. Res.* 108 (D12), 7/1–7/14.
- [3504] **van der Meer J.R., Sentschilo V.** (2003): Genomic Islands and the Evolution of Catabolic Pathways in Bacteria. *Current Opinion in Biotechnol.* 14, 248–254.
- [3505] **Maurer M., Schwegler P., Larsen T.A.** (2003): Nutrients in Urine: Energetic Aspects of Removal and Recovery. *Water Sci. Technol.* 48 (1), 37–46.
- [3506] **Wilsenach J.A., Maurer M., Larsen T.A., van Loosdrecht M.C.M.** (2003): From Waste Treatment to Integrated Resource Management. *Water Sci. Technol.* 48 (1), 1–9.
- [3507] **Pahl-Wostl C., Schönborn A., Willi N., Muncke J., Larsen T.A.** (2003): Investigating Consumer Attitudes Towards the New Technology of Urine Separation. *Water Sci. Technol.* 48 (1), 57–65.
- [3508] **Lienert J., Haller M., Berner A. Stauffer M., Larsen T.A.** (2003): How Farmers in Switzerland Perceive Fertilizers from Recycled Anthropogenic Nutrients (Urine). *Water Sci. Technol.* 48 (1), 47–56.
- [3509] **Lienert J., Fischer M.** (2003): Habitat Fragmentation Affects the Common Wetland Specialist *Primula farinosa* in North-East Switzerland. *J. Ecology* 91, 587–599.
- [3510] **Udert K.M., Larsen T.A., Gujer W.** (2003): Biologically Induced Precipitation in Urine-collecting Systems. *Water Sci. & Technol.: Water Supply* 3 (3), 71–78.
- [3511] **Gujer W., Larsen T.A.** (1988): Technologische Anforderungen an eine nachhaltige Siedlungswasserwirtschaft. In: «Wasserwirtschaft in urbanen Räumen», B. Weigert et al. (Hrsg.), Schr. Wasserforschung, Band 3, Franke, Berlin, 1988, S. 65–82.
- [3512] **Faller P., Kobler B., Peter A., Sumpter J.P., Burkhardt-Holm P.** (2003): Stress Status of Gudgeon (*Gobio gobio*) from Rivers in Switzerland With and Without Input of Sewage Treatment Plant Effluent. *Environ. Toxicol. Chem.* 22 (9), 2063–2072.
- [3513] **Larsen T.A., Gujer W.** (2001): Elimination von Mikroverunreinigungen. *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 81 (3), 159–166.
- [3514] **Sentschilo V.** (2003): Molecular Aspects of Catabolic Gene Evolution in *Pseudomonas*. Diss. ETHZ No. 15 178, Zurich.
- [3515] **Lass S., Spaak P.** (2003): Chemically Induced Anti-Predator Defences in Plankton: a Review. *Hydrobiologia* 491, 221–239.
- [3516] **Friedrich J., Dinkel C., Grieder E., Radan S., Secieru D., Steingruber S., Wehrli B.** (2003): Nutrient Uptake and Benthic Regeneration in Danube Delta Lakes. *Biogeochemistry* 64, 373–398.
- [3517] **Sentschilo V., Zehnder A.J.B., van der Meer, J.R.** (2003): Characterization of Two Alternative Promoters for Integrase Expression in the *c/c* Genomic Island of *Pseudomonas* sp. Strain B13. *Molecular Microbiol.* 49 (1), 93–104.
- [3518] **Wehrli B.** (2003): Wird der Strom der Forschungsgelder in neue Kanäle gelenkt? (Rezension zu Deutsche Forschungsgemeinschaft (Ed.): Wasserforschung im Spannungsfeld zwischen Gegenwartsbewältigung und Zukunftssicherung – Denkschrift. Weinheim 2003). *Gaia* 12 (3), 215–216.
- [3519] **Escher B.** (2003): Neue Ansätze in Ökotoxikologie und Chemikalienbewertung. *Gaia* 12 (3), 176–180.
- [3520] **Thomann M.P.** (2003): Datenkontrolle von Abwasserreinigungsanlagen mit Massenbilanzen, Experimenten und statistischen Methoden. Diss. ETHZ Nr. 14 824. Schr. Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETHZ (IHW), Bd. 15, Zürich, 243 S. ISBN 3-906445-15-1.
- [3521] **Withers P.J.A., Ulén B., Stamm C., Bechmann M.** (2003): Incidental Phosphorus Losses – Are They Significant and Can They Be Predicted? *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166, 459–468.
- [3522] **Zinn M., Weilenmann H.-U., Hany R., Schmid M., Egli T.** (2003): Tailored Synthesis of Poly([R]-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHB/HV) in *Ralstonia eutropha* DSM 428. *Acta Biotechnol.* 23, 309–316.
- [3523] **Tockner K.** (2003): Pro Tagliamento – Pro Friuli. Der «König der Alpenflüsse» vor seinem Ende? *natur+mensch* 45 (4), 26–27.
- [3524] **Xue H., Nhat P.H., Gächter R., Hooda P.S.** (2003): The Transport of Cu and Zn from Agricultural Soils to Surface Water in a Small Catchment. *Adv. Environ. Res.* 8, 69–76.
- [3525] **Harms H., Volkland H.-P., Repphun G., Hiltbold A., Wanner O., Zehnder A.J.B.** (2003): Action of Chelators on Solid Iron in Phosphate-containing Aqueous Solutions. *Corrosion Sci.* 45 (8), 1717–1732.
- [3526] **Maurer M., Gujer W.** (2003): Ist unsere Abwasserentsorgung nachhaltig? VSA-Sympos. Winterthur.
- [3527] **Peduzzi S.** (2003): Interactions Among Sulfate-reducing and Purple Sulfur Bacteria in the Chemocline of Meromictic Lake Cadagno, Switzerland. Diss. ETHZ No. 15 015, Zurich.
- [3528] **Ohlendorf C.** (1998): High Alpine Lake Sediments as Chronicles for Regional Glacier and Climate History in the Upper Engadine, Southeastern Switzerland. Diss. ETHZ No. 12 705, Zurich.
- [3529] **Udert K.M.** (2003): The Fate of Nitrogen and Phosphorus in Source-Separated Urine. Diss. ETHZ No. 14 847, Schr. Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETHZ (IHW), Bd. 16, Zurich, ISBN 3-906445-16-X
- [3530] **Mian P., Heilmann J., Bürgi H.-R., Sticher O.** (2003): Biological Screening of Terrestrial and Freshwater Cyanobacteria for Antimicrobial Activity, Brine Shrimp Lethality, and Cytotoxicity. *Pharmaceut. Biol.* 41 (4), 243–247.
- [3531] **Yang H., Zhang X., Zehnder A.J.B.** (2003): Water Scarcity, Pricing Mechanism and Institutional Reform in Northern China Irrigated Agriculture. *Agricult. Water Manag.* 61, 143–161.
- [3532] **Gilg R., Inderwildi A., Binggeli S.** (2003): Selbstbewertungsinstrument für die Abwasserentsorgung. *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 82 (7), 483–487.
- [3533] **Zehnder A.J.B., Reller A.** (2002): Editorial: Water Issues. *Gaia* 11 (4).
- [3534] **Yang H., Zehnder A.J.B.** (2002): Water Endowments and Virtual Water Trade. *Gaia* 11 (4), 263–266.
- [3535] **Yang H., Reichert P., Abbaspour K.C., Zehnder A.J.B.** (2003): A Water Resources Threshold and Its Implications for Food Security. *Environ. Sci. Technol.* 37 (14), 3048–3054.
- [3536] **Schmid M., Lorke A., Wüest A., Halbwachs M., Tanyileke G.** (2003): Development and Sensitivity Analysis of a Model for Assessing Stratification and Safety of Lake Nyos during Artificial Degassing. *Ocean Dynamics* 53, 288–301.
- [3537] **Müller B., Reinhardt M., Gächter R.** (2003): High Temporal Resolution Monitoring of Inorganic Nitrogen Load in Drainage Waters. *J. Environ. Monit.* 5, 808–812.
- [3538] **Müller B., Wang Y., Dittrich M., Wehrli B.** (2003): Influence of Organic Carbon Decomposition on Calcite Dissolution in Surficial Sediments of a Freshwater Lake. *Water Res.* 37, 4524–4532.
- [3539] **Kulli B., Stamm C., Papritz A., Flüeler H.** (2003): Discrimination of Flow Regions on the Basis of Stained Infiltration Patterns in Soil Profiles. *Vadose Zone J.* 2, 338–348.
- [3540] **Wiesmann J., Binggeli S.** (2002): Unternehmensführung in den Abwasserbetrieben. *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 82 (7), 451–455.
- [3541] **Binggeli S.** (2002): Prozessoptimierung in der Abwasserentsorgung. *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 82 (7), 477–482.
- [3542] **Kaiser E.** (2002): Sources, Transformations, and Fates of Riverine Organic Matter. Diss. ETHZ No. 14 880, Zurich.
- [3543] **Jakob C., Robinson C.T., Uehlinger U.** (2003): Longitudinal Effects of Experimental Floods on Stream Benthos Downstream from a Large Dam. *Aquat. Sci.* 65 (3), 223–231.
- [3544] **Robinson C.T., Uehlinger U.** (2003): Using Artificial Floods for Restoring River Integrity. *Aquat. Sci.* 65 (3), 181–182.
- [3545] **Robinson C.T., Uehlinger U., Monaghan M.T.** (2003): Effects of a Multi-year Experimental Flood Regime on Macro-invertebrates Downstream of a Reservoir. *Aquat. Sci.* 65 (3), 210–222
- [3546] **Eggen R.I.L., Segner H.** (2003): The Potential of Mechanism-based Bioanalytical Tools in Ecotoxicological Exposure and Effect Assessment. *Anal. Bioanal. Chem.* 377, 386–396.
- [3547] **Zwank L., Berg M., Schmidt T.C., Haderlein S.B.** (2003): Compound-specific Carbon Isotope Analysis of Volatile Organic Compounds in the Low-microgram per Liter Range. *Anal. Chem.* 75 (20), 5575–5583.

- [3548] **Lotter A.F., Sturm M.** (1994): High-resolution Paleoenvironmental Studies: an Editorial Note. *J. Paleolimnol.* 11, 311–312.
- [3549] **Flower R.J., Ryves D., Battarbee R.W., Mueller J., Sturm M.** (1999): Lake Baikal: Some Topical Aspects of Current Research. *J. Paleolimnol.* 22, 223–224.
- [3550] **Wick L., Lemcke G., Sturm M.** (2003): Evidence of Lateglacial and Holocene Climatic Change and Human Impact in Eastern Anatolia: High-resolution Pollen, Charcoal, Isotopic and Geochemical Records from the Laminated Sediments of Lake Van, Turkey. *The Holocene* 13 (5), 665–675.
- [3551] **Maurer M., Fux C., Siegrist H.** (2003): Nitrifikation, Denitrifikation und Energieeffizienz des Wirbelbettverfahrens in der kommunalen Abwasserreinigung. *KA – Abwasser, Abfall* 50 (9), 1142–1151.
- [3552] **Joss A.** (2001): Mikroverunreinigungen. *Umwelt Focus*, April, S. 27–31.
- [3553] **Joss A., Siegrist H.** (2001): Mikroverunreinigungen: Brauchen wir neue Kläranlagen? *Kommunalmagazin* 18 (12), 11–14.
- [3554] **Joss A., Siegrist H.** (2002): Membranen – Material, Module, Betrieb. *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 82 (1), 7–11.
- [3555] **Fuchs W., Braun R., Joss A.** (2001): Status and Development of MBR-Technology. *H<sub>2</sub>O* 34, 58–59.
- [3556] **Fux C.** (2001): Biological Nitrogen Elimination of Ammonium-rich Sludge Digester Liquids. *Schrr. Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETHZ (IHW)*, Bd. 18, 112 p.
- [3557] **Fenner K., Scheringer M., Hungerbühler K.** (2003): Comment on General Fugacity-based Model for Multiple Chemical Species. *Environ. Toxicol. Chem.* 22 (10), 2219–2220.
- [3558] **Fenner K., Scheringer M., Hungerbühler K.** (2003): Joint Persistence of Transformation Products in Chemicals Assessment: Case Studies and Uncertainty Analysis. *Risk Analysis* 23 (1), 35–53.
- [3559] **Joss A., Siegrist H.** (2001): Mikroverunreinigungen: Brauchen wir neue Kläranlagen? *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 81 (3), 151–157.
- [3560] **Uehlinger U., Kawecka B., Robinson C.T.** (2003): Effects of Experimental Floods of Periphyton and Stream Metabolism Below a High Dam in the Swiss Alps (River Spöl). *Aquat. Sci.* 65 (3), 199–209.
- [3561] **Brennwald M.S., Hofer M., Peeters F., Aeschbach-Hertig W., Strassmann K., Kipfer R., Imboden D.M.** (2003): Analysis of Dissolved Noble Gases in the Porewater of Lacustrine Sediments. *Limnol. Oceanogr.: Methods* 1, 51–62.
- [3562] **Hug T.** (2001): Gensonden – Chancen und Grenzen im Einsatz gegen Bläh- und Schwamm-schlamm. 219. VSA-Mitgliederversammlung, 20.9.2001, Luzern, S. 42–48.
- [3563] **Hug T., Siegrist H.** (2001): Gensonden zur Identifizierung fadenförmiger Bakterien. *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 81 (11), 741–746.
- [3564] **Hug T., Ziranke M., Siegrist H.** (2003): Dynamics of Population and Foaming on a Full-scale WWTP. *Proc. Post-Conference Colloquium on Foam and Scum in Biological Wastewater Treatment*, Prague Inst. of Chemical Technology, 5<sup>th</sup> September 2003, Prague, pp. 26–32.
- [3565] **Binggeli S.** (2003): Leistungsprozesse der Abwasserentsorgung – Methoden und Instrumente der Bewertung und Optimierung. *Diss. ETHZ Nr. 14 993. Schrr. Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETH Zurich (IHW)*, Bd.17, 206 S. ISBN 3-906445-17-8
- [3566] **Jonas T., Stips A., Eugster W., Wüest A.** (2003): Observations of a Quasi Shear-free Lacustrine Convective Boundary Layer: Stratification and its Implications on Turbulence. *J. Geophys. Res.* 108 (C10), 26/1–26/15.
- [3567] **Muscheler R., Beer J., Kromer B.** (2003): Long-term Climate Variations and Solar Effects. *Proc. ISCS 2003 Symposium «Solar Variability as an Input to the Earth's Environment»*, Tatranská Lomnica, Slovakia, 23–28 June 2003. *ESA SP-535*, pp. 305–316.
- [3568] **Prigent-Combaret C., Brombacher E., Vidal O., Ambert A., Lejeune P., Landini P., Dorel C.** (2001): Complex Regulatory Network Controls Initial Adhesion and Biofilm Formation in *Escherichia coli* via Regulation of the *csgD* Gene. *J. Bacteriol.* 183 (24), 7213–7223.
- [3569] **Egli K., Bosshard F., Werlen C., Lais P., Siegrist H., Zehnder A.J.B., van der Meer J.R.** (2003): Microbial Composition and Structure of a Rotating Biological Contactor Biofilm Treating Ammonium-rich Wastewater without Organic Carbon. *Microbial Ecology* 45, 419–432.
- [3570] **Baur I., Johnson C.A.** (2003): The Solubility of Selenate-AFt (3 CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 3 CaSeO<sub>4</sub> · 37,5 H<sub>2</sub>O) and Selenate-AFm (3 CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · CaSeO<sub>4</sub> · x H<sub>2</sub>O). *Cement & Concrete Res.* 33, 1741–1748.
- [3571] **Hausmann S., Lotter A.F., van Leeuwen J.F.N., Ohlendorf C., Sturm M.** (2001): The Influence of Land-use and Climate Change on Alpine Lakes: a High-resolution Case Study Focusing on the Past 1000 Years. *Terra Nostra* 2001/3, 6<sup>th</sup> Workshop of the European Lake Drilling Programme, May 11–16, 2001, Potsdam, Germany, pp. 96–99.
- [3572] **Sturm M., Francus P., Friedl G., Hajdas I., Hausmann S., Hirt A.M., Heiri O., Koinig K.A., Lanci L., Lemcke G., Lotter A.F., Ohlendorf C., Wick L.** (2001): A Decade of High-resolution Research of Holocene and Late Glacial Lacustrine Archives. *Terra Nostra* 2001/3, 6<sup>th</sup> Workshop of the European Lake Drilling Programme, May 11–16, 2001, Potsdam, Germany, pp. 204–205.
- [3573] **Ohlendorf C., Sturm M., Hausmann S.** (2003): Natural Environmental Changes and Human Impact Reflected in Sediments of a High Alpine Lake in Switzerland. *J. Paleolimnol.* 30, 297–306.
- [3574] **Koinig K.A., Shotyk W., Lotter A.F., Ohlendorf C., Sturm M.** (2003): 9000 Years of Geochemical Evolution of Lithogenic Major and Trace Elements in the Sediment of an Alpine Lake – the Role of Climate, Vegetation, and Land-use History. *J. Paleolimnol.* 30, 307–320.
- [3575] **Chèvre N., Gagné F., Blaise C.** (2003): Development of a Biomarker-based Index for Assessing the Ecotoxic Potential of Aquatic Sites. *Biomarkers* 8 (3–4), 287–298.
- [3576] **Kaiser E., Schubert C.** (2003): Book Review: «Aquatic Ecosystems: Interactivity of dissolved organic matter» (S.E.G. Findlay, R.L. Sinsabaugh, ISBN 0-12-356371-9). *J. Experimental Marine Biol. Ecol.* 293, 125–126.
- [3577] **Oechlin R., Lengweiler P., Seiler K., Götz C., Gomides Freitas L., Singer H., Müller S.** (2003): Rückstände von Pestiziden in Oberflächen- und Grundwasser. *Mitt. Naturforsch. Ges. Schaffhausen* 47, 57–67.
- [3578] **Johnson C.A., Glasser F.P.** (2003): Hydro-talcite-like Minerals (M<sub>2</sub>Al(OH)<sub>6</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>0.5</sub> · xH<sub>2</sub>O, where M = Mg, Zn, Co, Ni) in the Environment: Synthesis, Characterization and Thermodynamic Stability. *Clays & Clay Minerals* 51 (1), 1–8.
- [3579] **Ruckstuhl S., Suter M.J.-F., Giger W.** (2003): Sorption and Mass Fluxes of Sulfonated Naphthalene Formaldehyde Condensates in Aquifers. *J. Contaminant Hydrol.* 67, 1–12.
- [3580] **Andersen H., Siegrist H., Halling-Sørensen B., Ternes T.A.** (2003): Fate of Estrogens in a Municipal Sewage Treatment Plant. *Environ. Sci. Technol.* 37 (18), 4021–4026.
- [3581] **Winder M., Buergi H.R.** (2003): Seasonal Vertical Distribution of Phytoplankton and Copepod Species in a High-mountain Lake. *Arch. Hydrobiol.* 158 (2), 197–313.
- [3582] **Boller M.** (2003): Oberflächenabflüsse von Dächern und Strassen – Experimentelle Untersuchungen in Burgdorf. 59 VSA Verbandsbericht Nr. 553., S. 37–56.
- [3583] **Steiner M.** (2003): Adsorbersysteme als Barrieren gegen Schadstoffe in Oberflächenabflüssen. *VSA Verbandsbericht Nr. 553*, S. 59–66.
- [3584] **Mackay A.W., Battarbee R.W., Flower R.J., Jewson D., Lees J.A., Ryves D.B., Sturm M.** (1999): The Deposition and Accumulation of Endemic Planktonic Diatoms in the Sediments of Lake Baikal and an Evaluation of their Potential Role in Climate Reconstruction during the Holocene. *Terra Nostra*, 1<sup>st</sup> Baikal-Sed Internat. Workshop on Sedimentology of Lake Baikal – Recent and Subrecent Sedimentation, November 18–22, 1999, Berlin, Germany, pp. 34–48.
- [3585] **Wüest A., Granin N., Kocsis O., Ravens T.M., Schurter M., Sturm M.** (1999): Deep Water Renewal in Lake Baikal – Matching Turbulent Kinetic Energy and Internal Cycling. *Terra Nostra*, 1<sup>st</sup> Baikal-Sed International Workshop on Sedimentology of Lake Baikal – Recent and subrecent sedimentation, November 18–22, 1999, Berlin, Germany, pp. 60–74.
- [3586] **Sturm M.** (1999): Sedimentation Processes in Lake Baikal: Sensitive Instruments to Link Biological, Geochemical and Physical Concepts. *Terra Nostra*, 1<sup>st</sup> Baikal-Sed International Workshop on Sedimentology of Lake Baikal – Recent and subrecent sedimentation, November 18–22, 1999, Berlin, Germany, pp. 108–109.
- [3587] **Vologina E.G., Sturm M., Vorobyova S.S., Granina L.Z.** (1999): New Results of High Resolution Studies of Surface Sediments of Lake Baikal. *Terra Nostra*, 1<sup>st</sup> Baikal-Sed International Workshop on Sedimentology of Lake Baikal – Recent and subrecent sedimentation, November 18–22, 1999, Berlin, Germany, pp. 115–130.
- [3588] **Müller J., Sturm M., Vologina E.G.** (1999): Clay Mineral Distribution in Surface Sediments of

- Lake Baikal – Results from a West-East Transect in the Northern Basin. Terra Nostra, 1<sup>st</sup> Baikal-Sed International Workshop on Sedimentology of Lake Baikal – Recent and subrecent sedimentation, November 18–22, 1999, Berlin, Germany, pp. 244–245.
- [3589] **Chèvre N., Gagné F., Gagnon P., Blaise C.** (2003): Application of Rough Sets Analysis to Identify Polluted Aquatic Sites Based on a Battery of Biomarkers: a Comparison with Classical Methods. *Chemosphere* 51, 13–23.
- [3590] **McCracken K.G., Beer J., McDonald F.B.** (2003): Atypical Cosmic Ray Propagation during the qA>0 Sunspot Minimum of 1954. 28<sup>th</sup> Internat. Cosmic Ray Conference, Universal Academy Press, pp. 4041–4034.
- [3591] **McCracken K.G., Beer J., McDonald F.B.** (2003): Properties of the Long Term Heliospheric Modulation – Tests to Be Met by Modulation Theory. 28<sup>th</sup> Internat. Cosmic Ray Conference, Universal Academy Press, pp. 4123–4126.
- [3592] **Masuda K., Furuzawa H., Miyahara H., Muraki Y., Hajdas I., Bonani G., Beer J.** (2003): Radiocarbon Content in Japanese Cedar during the Maunder Minimum. 28<sup>th</sup> Internat. Cosmic Ray Conference, Universal Academy Press, pp. 4143–4146.
- [3593] **Beer J., Vonmoos M.V., Muscheler R., McCracken K.G., Mende W.** (2003): Heliospheric Modulation over the Past 10,000 Years as Derived from Cosmogenic Nuclides. 28<sup>th</sup> Internat. Cosmic Ray Conference, Universal Academy Press, pp. 4147–4150.
- [3594] **Truffer B.** (2003): User-led Innovation Processes: The Development of Professional Car Sharing by Environmentally Concerned Citizens. *Innovation* 16 (2), 139–154.
- [3595] **Golet E.M., Xifra I., Siegrist H., Alder A., Giger W.** (2003): Environmental Exposure Assessment of Fluoroquinolone Antibacterial Agents from Sewage to Soil. *Environ. Sci. Technol.* 37 (15), 3243–3249.
- [3596] **Stocker J., Balluch D., Gsell M., Harms H., Feliciano J., Daunert S., Malik K.A., van der Meer J.R.** (2002): Development of a Set of Simple Bacterial Biosensors for Quantitative and Rapid Measurements of Arsenite and Arsenate in Potable Water. *Environ. Sci. Technol.* 37 (20), 4743–4750.
- [3597] **Lacour S., Kolb A., Landini P.** (2003): Nucleotides from –16 to –12 Determine Specific Promoter by Bacterial  $\sigma^s$ -RNA Polymerase. *J. Biol. Chem.* 278 (39), 37160–37168.
- [3598] **Brombacher E., Dorel C., Zehnder A.J.B., Landini P.** (2003): The Curli Biosynthesis Regulator CsgD Co-ordinates the Expression of Both Positive and Negative Determinants for Biofilm Formation in *Escherichia coli*. *Microbiology* 149, 2847–2857.
- [3599] **Elovitz M., von Gunten U., Kaiser H.-P.** (2000): Hydroxyl Radical/Ozone during Ozonation Processes. II. The Effect of Temperature, pH, Alkalinity, and DOM Properties. *Ozone Sci. Engng.* 22, 123–150.
- [3600] **Meier W., Bonjour C., Wüest A., Reichert P.** (2003): Modeling the Effect of Water Diversion on the Temperature of Mountain Streams. *J. Environ. Engng.* 129 (8), 755–764.
- [3601] **Lorke A., Müller B., Maerki M., Wüest A.** (2003): Breathing Sediments: The Control of Diffusive Transport Across the Sediment-Water Interface by Periodic Boundary-Layer Turbulence. *Limnol. Oceanogr.* 48 (6), 2077–2085.
- [3602] **Boehler M., Pinnow D., Krauss W., Brauchli H., Siegrist H.** (2003): An Innovative Application for an Established Technology to Improve Sludge Dewatering. Proc. Annual Conf. New Zealand Water and Waste Assoc. NZWWA, Auckland, September, 8 pp.
- [3603] **Boehler M., Siegrist H.** (2003): Partial Ozonation of Activated Sludge to Reduce Excess Sludge, Improve Denitrification and Control Scumming and Bulking. Proc. IWA Specialised Conf. «Biosolids 2003 Wastewater Sludge as a Resource», Trondheim, Norway, 23–25 Juni, pp. 47–54.
- [3604] **Egli T., Zinn M.** (2003): The Concept of Multiple-nutrient-limited Growth of Microorganisms and Its Application in Biotechnological Processes. *Biotechnol. Advances* 22, 35–43.
- [3605] **Fux C.** (2003): Faulwasserbehandlung – Separate anaerobe Ammoniumoxidation (Anammox). *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 83 (11), 1–11.
- [3606] **Harder A., Escher B.I., Landini P., Tobler N.B., Schwarzenbach R.P.** (2003): Evaluation of Bioanalytical Assays for Toxicity Assessment and Mode of Toxic Action Classification of Reactive Chemicals. *Environ. Sci. Technol.* 37 (21), 4962–4970.
- [3607] **Harder A., Escher B.I., Schwarzenbach R.P.** (2003): Applicability and Limitation of QSARs for the Toxicity of Electrophilic Chemicals. *Environ. Sci. Technol.* 37 (21), 4955–4961.
- [3608] **Stein R., Schubert C., Macdonald R.W., Fahli K., Harvey H.R., Weiel D.** (2004): The Central Arctic Ocean: Distribution, Sources, Variability and Burial of Organic Carbon. In: «The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean», Chapter 7.9, R. Stein et al., (Eds.), Springer-Verlag, pp. 295–314.
- [3609] **Truffer B., Bratrich C., Markard J., Peter A., Wüest A., Wehrli B.** (2003): Green Hydro-power: The Contribution of Aquatic Science Research to the Promotion of Sustainable Electricity. *Aquat. Sci.* 65, 99–110.
- [3610] **von Gunten U.** (2003): Unterirdische Grundwasseraufbereitung – Langzeitverhalten und Mechanismen der *In-situ*-Enteisung und Entmanganung am Beispiel von La Neuveville. *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 83 (11), 821–828.
- [3611] **Gabereil M., Chin Y.-P., Hug S.J., Sulzberger B.** (2003): Role of Dissolved Organic Matter Composition on the Photoreduction of Cr(VI) to Cr(III) in the Presence of Iron. *Environ. Sci. Technol.* 37 (19), 4403–4409.
- [3612] **Kaiser E., Simpson A.J., Dria K.J., Sulzberger B., Hatcher P.G.** (2003): Solid-state and Multidimensional Solution-state NMR of Solid Phase Extracted and Ultrafiltered Riverine Dissolved Organic Matter. *Environ. Sci. Technol.* 37 (13), 2929–2935.
- [3613] **Sulzberger B.** (2003): Limnologists and Oceanographers – Two Scientific Families that Should Talk Together More Freely. *Aquat. Sci.* 65, i–ii.
- [3614] **Giger W., Berg M., Pham H.V., Duong H.A., Tran H.C., Cao T.H., Schertenleib R.** (2003): Environmental Analytical Research in Northern Vietnam – A Swiss-Vietnamese Cooperation Focusing on Arsenic and Organic Contaminants in Aquatic Environments and Drinking Water. *Chimia* 57, 529–536.
- [3615] **Scheringer M., Salzmann M., Stroebe M., Wegmann F., Fenner K., Hungerbühler K.** (2004): Long-range Transport and Global Fractionation of POPs: Insights from Multimedia Modeling Studies. *Environ. Pollution* 128, 177–188.
- [3616] **Rieger L., Siegrist H., Winkler S., Pressl A.** (2003): Praktische Erfahrungen mit Ionen-sensitiven Messsonden. Proc. Fachtagung Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen (VDI/VDE, ATV-DVKW, GMA), 25./26. November 2003, Wuppertal, Deutschland, 8 Seiten.
- [3617] **Langergraber G., Rieger L., Winkler S., Alex J., Wiese J., Owerdieck C., Ahnert M., Simon J., Maurer M.** (2003): A Guideline for Simulation Studies of Wastewater Treatment Plants. Proc. 9<sup>th</sup> IWA Specialised Conference – Design, Operation and Economics of Large Wastewater Treatment Plants, Praha, Czech Republic, Sept. 2003, 8 pp.
- [3618] **Rieger L., Alex J., Winkler S., Siegrist H.** (2003): Entwurf und Optimierung von MSR-Systemen mittels dynamischer Simulation – Sensormodelle. Proc. Fachtagung Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen (VDI/VDE, ATV-DVKW, GMA), 25./26. November 2003, Wuppertal, Deutschland, 6 Seiten.
- [3619] **Winkler S., Rieger L., Thomann M., Siegrist H., Bornemann C., Fleischmann N.** (2002): In-line Monitoring of COD and COD-fractionation: Improving Dynamic Simulation Data Quality. Proc. 3<sup>rd</sup> IWA world water congress, Melbourne, 9 pp.
- [3620] **Rieger L., Alex J., Winkler S., Boehler M., Thomann M., Siegrist H.** (2003): Progress in Sensor Technology – Progress in Process Control? Part I: Sensor Property Investigation and Classification. *Water Sci. Technol.* 47 (2), 103–112.
- [3621] **Schertenleib R., Morel A., Kalbermatten J., Saywell D.** (2003): Guidelines for the Implementation of the Bellagio Principles and the Household-centred Environmental Sanitation Approach (HCES). Conference Proceeding, IWA 2. International Symposium on Ecological Sanitation, Lübeck (Deutschland), p. 93–100.
- [3622] **Winkler S., Saracevic E., Rieger L., Siegrist H., Nadler J.** (2001): Kostengünstige und wartungsarme *In-situ*-Ammonium- und -Nitratmessung. VDI-Berichte Nr. 1619, 279–284.
- [3623] **Bornemann C., Winkler S., Rieger L., Thomann M., Siegrist H.** (2001): UV-Vis-Spektroskopie zur *In-situ*-Messung von CSB, Trübung und Nitrat – Erste Erfahrungen auf dem Abwassersektor. VDI-Berichte Nr. 1619, 301–306
- [3624] **Rieger L., Siegrist H.** (2002): MSR-Technik macht's möglich: Energie sparen bei der Stickstoffelimination. *Kommunalmagazin* 19 (11), 17–19.
- [3625] **Strauss M., Barreiro W.C., Steiner M., Mensah A., Jeuland M., Bolomey S., Montangero A., Koné D.** (2003): Urban Excreta Management – Situation, Challenges, and Promising Solutions. IWA Asia-Pacific Regional Conference Bangkok, Thailand, October 19–23, 2003.

## Fischereiberatungsstelle FIBER

Seit dem 1. Juli 2004 steht den Fischern eine gesamtschweizerische Fischereiberatungsstelle (FIBER) zur Verfügung. Damit wird die während des Projektes «Fischnetz» vielfach geschätzte Informationsplattform für Anliegen in den Bereichen Fische und Gewässer weitergeführt. FIBER ist das Resultat einer Zusammenarbeit zwischen EAWAG, dem Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und dem Schweizerischem Fischerei-Verband (SFV). Susanne Haertel-Borer und Guy Périat leiten die an der EAWAG in Kastanienbaum lokalisierte Beratungsstelle.

Das erste Fachseminar «**Fische und Gewässer – Aktuelle Entwicklungen 2004/2005**» findet am 26. Januar 2005 im Konferenzzentrum in Olten statt. Es wird gemeinsam von FIBER und Fischnetz<sup>+</sup>, dem Nachfolgeprojekt von Fischnetz, organisiert.

Weitere Informationen unter 041 349 21 71 und [fiber@eawag.ch](mailto:fiber@eawag.ch)

## Grundsteinlegung für Neubau

Am 20. Oktober fand die Grundsteinlegung für den Neubau der EAWAG, das «Forum Chriesbach» statt. Für die Nachwelt wurden unter anderem die Pläne des Architekten Bob Gysin, eine Tageszeitung, ein EAWAG-Jahresbericht, ein Mikrosensor zum Aufspüren von Arsen im Wasser sowie eine Wasserprobe aus dem Greifensee vom 16. August 1999 (Tag des grossen Felchensterbens) in das Fundament eingemauert.

Das «Forum Chriesbach» mit seinen Büros, Schulungs- und Seminarräumen, der EAWAG/EMPA-Bibliothek und einer Cafeteria wird zum neuen Begegnungszentrum der EAWAG. Das sehr gut isolierte Haus kommt ohne herkömmliche Heizung aus und hat einen minimalen Wasserbedarf. Bisher gehen die Bauarbeiten planmässig voran. Bereits im Dezember 2005 will die EAWAG ihr Vorbildobjekt beziehen.

## Rhone-Thur-Symposium

Vor gut 130 Gästen hat am 13. November an der ETH Zürich die Tagung «**Hochwasserschutz und Flussrevitalisierung: Synergien für Mensch und Umwelt**» stattgefunden. Der Anlass wurde im Rahmen des Rhone-Thur-Projekts federführend von der EAWAG organisiert. Mitbeteiligt waren die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, die Versuchsanstalt für Wasser, Hydrologie und Glaziologie VAW und das Laboratoire de Constructions Hydrauliques in Lausanne. Über zwei Jahrhunderte wurden Flüsse begradigt, kanalisiert und eingedolt, um Menschen und ihr Kulturland vor Hochwasser zu schützen. Trotzdem sind die Schäden durch Überschwemmungen in den letzten Jahrzehnten laufend grösser geworden und es gingen artenreiche Lebensräume verloren. Heute sucht man daher nach nachhaltigen Lösungen, die sowohl ökonomische als auch ökologische Aspekte berücksichtigen.



EAWAG



EAWAG

## Umweltpreis für die EAWAG

Die EAWAG-Forscherguppe für «Wasser und Siedlungshygiene in Entwicklungsländern» (Sandec) erhält den Energy Globe Sonderpreis 2004. Die Auszeichnung wird für das Projekt SODIS verliehen, eine ebenso einfache wie geniale Methode zur solaren Wasserdesinfektion mit marktüblichen PET-Flaschen. Der Energy Globe zählt weltweit zu den bedeutenden Umweltpreisen und ist für SODIS dank breiter Medienpräsenz ein wichtiger Multiplikator für die Verbreitung des Verfahrens. Dieses Jahr erhält der Preis zudem einen besonderen Stellenwert, weil die Siegerprojekte am 27. April 2005 an der EXPO 05 – der Weltausstellung in Aichi/Japan – gewürdigt werden.

## EAWAG-Infotag

Der nächste EAWAG-Infotag ist dem Thema «**Landwirtschaft und Gewässerqualität**» gewidmet und findet am 8. März 2005 im Auditorium Maximum der ETH Zürich statt. Es werden Projekte vorgestellt, die das Ausmass der Gewässerbelastung aus der Landwirtschaft quantifizieren und die entscheidenden Einflussfaktoren aufzeigen. Ausserdem werden vor dem Hintergrund nationaler und internationaler Entwicklungen in der Agrarpolitik Strategien und Massnahmen, welche die stoffliche Belastung der Gewässer durch die Landwirtschaft reduzieren können, kritisch beleuchtet.

Weitere Informationen unter: [www.eawag.ch/events/infotag](http://www.eawag.ch/events/infotag)



EAWAG