

# 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 rätselhafte 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.

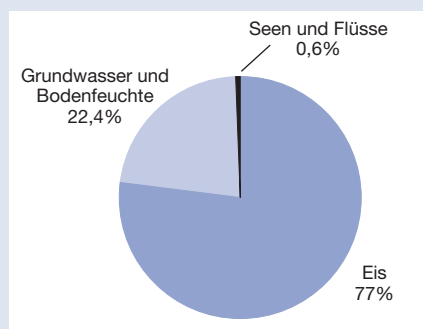


Abb. 1: Verteilung der globalen Süsswasservorkommen. Nicht dargestellt ist der Anteil des Süsswassers, der als Wasserdampf in der Atmosphäre vorkommt. Er beträgt lediglich 0,04%.

So ist der antarktische Eispanser 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 Bohrentechnik 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 Eispanser 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

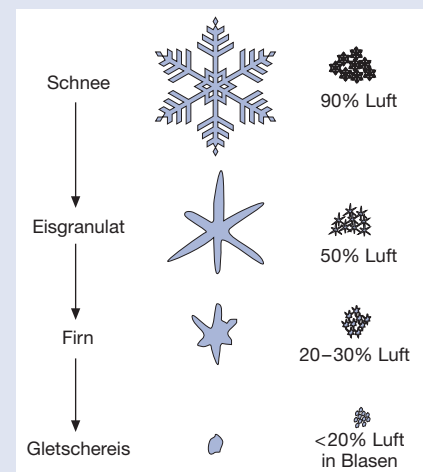


Abb. 2: Entstehung von Gletschereis aus Schnee.

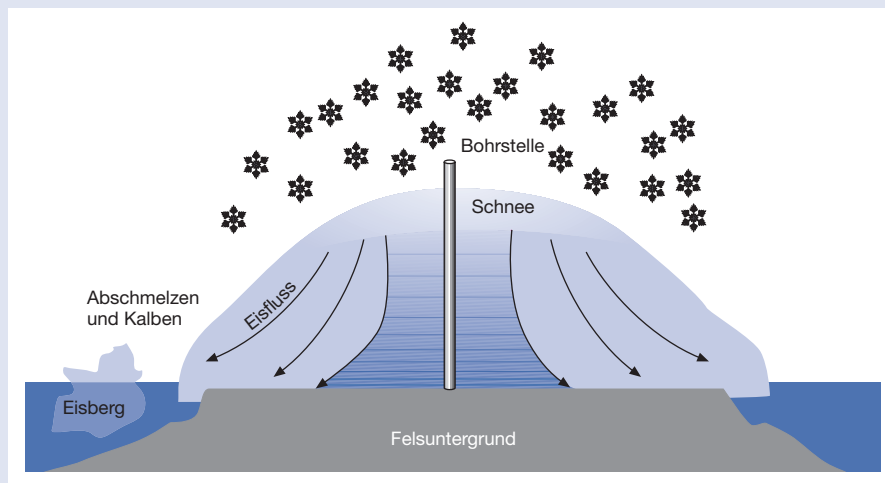


Abb. 3: Der Aufbau des polaren Eisschildes (Querschnitt). Im höher gelegenen Teil bildet sich kontinuierlich aus Schnee neues Eis, das langsam gegen die Küste fließt, wo es schmilzt oder als Eisberge auf das Meer hinaus schwimmt (dieser Vorgang wird «Kalben» genannt). Das Fließen des Eises führt dazu,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

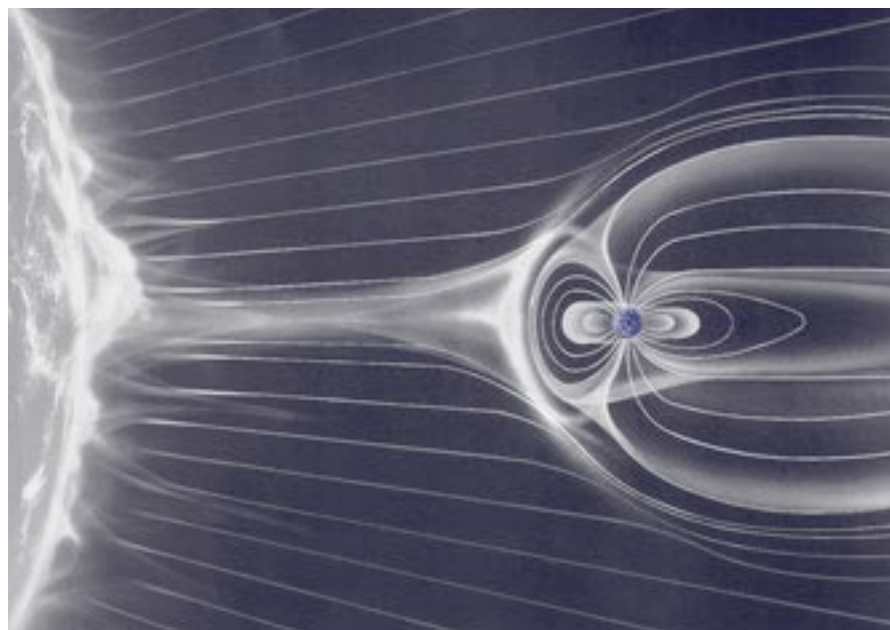
Kosmogene Radionuklide entstehen durch Prozesse, welche die Alchemisten im Mittelalter vergeblich nachzuahmen versuchten, nämlich durch die Umwandlung von Elementen, z.B. von Stickstoff in Beryllium oder von Argon in Chlor. Was den Alchemisten nicht gelang, schafft die Natur spielend. Die kosmische Strahlung, 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.

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,



European Space Agency ESA

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.

nassee 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.