

6. EISSCHILDE

Eisschilde reagieren auf klimatische Veränderungen im Gegensatz z.B. zu Gletschern oder Meereis nur sehr langsam. Bohrkerne aus den tieferen Schichten der Eisschilde lassen daher auf das Klima in weit zurückliegenden geologischen Epochen schließen (Kap. 6.1). In Abschmelzprozessen an der Oberfläche und in den Randbereichen zeigen sich jedoch auch jüngere Klimaänderungen einschließlich der aktuellen globalen Erwärmung. Besonders stark sind die Eisverluste des grönländischen Eisschildes seit Beginn des 21. Jahrhunderts (Kap. 6.2). Die große Masse des antarktischen Eisschildes, vor allem die der Ostantarktis, reagiert dagegen deutlich langsamer auf Änderungen des Klimas. Erst seit ein oder zwei Jahrzehnten scheint die Massenbilanz des antarktischen Eisschildes negativ zu sein, obwohl auch hier die abfließenden Gletscher u.a. durch das warme Meerwasser zunehmend an Masse verlieren (Kap. 6.3), wovon besonders die Westantarktis betroffen ist (Kap. 6.4). Im Laufe der nächsten Jahrhunderte könnte der Beitrag der Eisschilde zum globalen Meeresspiegelanstieg einige Meter betragen (Kap. 6.5); darüber findet man weitere Artikel im Band **WARNSIGNAL KLIMA: Die Polarregionen** (Kap. 4.11).

6.1 Bedeutung des Eises als Archiv für Klima- und Umweltveränderungen der Vergangenheit

HANS OERTER, SEPP KIPFSTUHL & JOSÉ L. LOZÁN

Bedeutung des Eises als Archiv für Klima- und Umweltveränderungen der Vergangenheit: Für die Rekonstruktion der Klimageschichte spielen Eisbohrkerne aus den Polarregionen und den Hochgebirgsgletschern eine herausragende Rolle unter den Klimaarchiven auf unserer Erde. Nur im Eis ist alte atmosphärische Luft, mit Einschlüssen von z.B. Kohlendioxid und Methan, in bestimmbarer zeitlicher Abfolge gespeichert. Tiefe Eiskerne aus der Ostantarktis dokumentieren bislang etwa die letzten 800.000 Jahre. Die letzte Kaltzeit und die vorletzte Zwischeneiszeit, also etwa die letzten 100.000-130.000 Jahre, werden mit Eisbohrkernen aus der Westantarktis und von Grönland erfasst, die letzten 100-2.000 Jahre sind auch in Eisbohrkernen aus Hochgebirgsgletschern und den arktischen Eiskappen enthalten. Die Entwicklung der Messtechnik zur Bestimmung von Halten an stabilen Wasserisotopen und chemischen Substanzen im Eis in den letzten zwei Jahrzehnten hat die zeitliche Auflösung der gewonnenen Information deutlich erhöht.

Importance of ice as an archive for climate and environmental changes of the past: Ice cores from the polar regions and high alpine glaciers play an important role for the reconstruction of the climate history on earth. Old atmospheric gases like carbon dioxide or methane have been stored only in the climate archive ice where their concentrations and ages can be determined. Until now deep ice cores from East Antarctica provide information about the past 800,000 years. The last ice age and the previous interglacial, approximately the past 100,000 to 130,000 years, are included in ice cores from West Antarctica and Greenland. In addition, ice cores from high alpine areas and arctic ice caps provide information about the past 100 to 2,000 years. During the past two decades technical improvements to measure the content of stable isotopes in the water molecule and trace elements included in ice enabled us to get a much higher time resolution than it was possible in earlier investigations.

Direkte Messungen von Klima- und Umweltveränderungen gibt es nur seit 150-200 Jahren, also etwa seit Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhundert. Um weiter zurück in die Erdgeschichte blicken zu können, benutzen Wissenschaftler indirekte Methoden bzw. natürliche Archive wie zum Beispiel Jahresringe von Bäumen, Korallenriffe, Eis aus den Polar- und Hochgebirgsregionen, marine und limnische Ablagerungen oder Material aus Permafrostgebieten. Wenn es um die Rekonstruktion und das Verständnis des Klimas der letzten Million Jahre geht, spielen Eiskerne unter den Paläo-Klimaarchiven eine wichtige und teilweise sogar einzigartige Rolle (STAUFFER 1999). Sie nehmen insofern eine Sonderstellung ein, als das Eis als einziges Paläo-Klimaarchiv Luft kontinuierlich ein-

schließt, konserviert und daran die Zusammensetzung der Paläo-Atmosphäre rekonstruiert werden kann. Wenn Schnee über Firn zu Eis verdichtet, werden mit der Luft auch die sogenannten Treibhausgase, wie zum Beispiel Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄) ins Eis eingeschlossen. Die atmosphärischen Gase sind aufgrund ihrer geringen Vermischungszeiten über beide Hemisphären hinweg die einzigen Klimagrößen, die man als global bezeichnen kann. Eis enthält etwa 1 Promille Luft und ist daneben nur geringfügig mit Spurenstoffen aus der Atmosphäre, deren Konzentrationen in der Größenordnung von einigen µg/g oder gar nur ng/g liegen, »verunreinigt«. Die Messtechnik, Eis zur Erfassung von Daten über Klima- und Umweltveränderungen in der Vergangenheit zu nutzen, hat sich in

den letzten Jahrzehnten stark entwickelt und ist daher relativ jung. Neue Analysetechniken wie *Continuous Flow Analysis* (CFA), *Cavity Ring Down* (CRD) *Laser Spectroscopy* werden heute angewandt. Insgesamt ist die Analyse von Eiskernen eine der wichtigsten und genauesten Methoden geworden. Man kann damit nicht nur langfristige und zuverlässige Information über Klimaveränderungen, wie die Wechsel zwischen Eis- (Glazial) und Zwischeneiszeiten (Interglazial), rekonstruieren, sondern auch Umweltveränderungen, die auf biogeochemische Kreisläufe zurückgehen, sowie einzelne Naturereignisse wie etwa Vulkaneruptionen, Meteoriteneinschläge oder Wald- und Steppenbrände. Auch extreme Wetterbedingungen wie Dürren oder historische Entwicklungen, wie zum Beispiel regionale Besiedlungen und Ausbreitung der Landwirtschaft, hinterlassen Spuren im Aerosolgehalt der Luft.

In dem hier vorliegenden Beitrag wird als Ergänzung zu dem Kapitel: Polare Eiskerne – Archive globaler Klima- und Umweltveränderungen im Band »Warnsignal Klima: Die Polarregionen« (FISCHER 2014) kurz auf die Bedeutung des Eises als Archiv globaler Klimainformationen eingegangen.

Wie werden Informationen im Eis gespeichert?

Zunächst wird kurz die Bildung von Eis beschrieben, die mehrere Phasen durchläuft. Wenn Schnee auf eine bestehende Schneedecke fällt, erzeugt der neue Schnee eine Auflast, die zur Verdichtung und zum Luftverlust des unteren Schnees führt. Mögliches Schmelzen des Schnees im Sommer und Wiedergefrieren im Winter beschleunigen die Verfestigung des alten Schnees. Dieser körnig gewordene, mindestens ein Jahr alte Schnee wird Firm genannt. Während dieses Prozesses (Sinterung) erfährt der Schnee eine Volumenabnahme und damit eine Zunahme seiner Dichte (*Abb. 6.1-1*).

Nach dem Firmabschluss findet kein weiterer Austausch der jetzt in Blasen eingeschlossenen Luft mit der Atmosphäre statt und die gesamte Atmosphäreninformation bleibt im Eis gespeichert. Der Bildungsprozess des Gletschereises verläuft in den Polarregionen langsamer als in den gemäßigten Breiten, wo höhere Temperaturen und häufigere Niederschlagsereignisse mit mehrfachen Schmelz- und Wiedergefrierphasen auftreten.

Das Eis auf den Plateaus der Inlandeis in Grönland und der Antarktis erhält seinen Wasserdampf und die Spurenstoffe überwiegend aus der hohen Troposphäre aus großer Entfernung, teilweise sogar aus der und über die Stratosphäre. Als Beispiel seien nur der Mineralstaub genannt, der in Grönland von den großen chinesischen Wüsten und in der Antarktis aus Patagonien stammt, sowie das Sulfat, das sowohl in antarktischen

wie grönländischen Eiskernen dieselben äquatorialen Vulkanausbrüche markiert.

Aus der Isotopen-Zusammensetzung des Wassers, Verhältnis ^{18}O zu ^{16}O , kann man die Lufttemperatur zum Zeitpunkt der Niederschläge ableiten (STAUFFER 2001), bei entsprechend hohen Akkumulationsraten die einzelnen Jahresschichten rekonstruieren und so, bis zu einer gewissen Tiefe, das Alter des Eises und die Niederschlagsraten der entsprechenden Jahre bestimmen. Unterhalb des Firneisübergangs liegen die typischen Jahresschichtmächtigkeiten im Bereich der mittleren Akkumulationsrate, d.h. in Grönland bei etwa 200 mm, auf dem ostantarktischen Plateau auf den Domen C und F bei etwa 30 bis 70 mm. Die Jahresschichtdicken dünnen nach unten stark aus. Mit modernen Schmelz- und Analysetechniken (CFA) können Jahreszyklen noch bei einer Schichtdicke von etwa 10 mm aufgelöst werden (SVENSSON et al. 2015).

So bilden sich im Lauf der Zeit Gletscher, Eiskappen oder Eisschilde. Eis findet sich in den kalten hohen Breiten und in großen Höhen in den mittleren und selbst in den äquatorialen Breiten. Entsprechend werden Eiskerne in den unterschiedlichsten Regionen dieses Planeten angebohrt und daran Klima und Umweltbedingungen rekonstruiert. Das älteste Eis liegt in der Antarktis und in Grönland.

Entnahme von Eisbohrkernen

Im Eis der Polarregionen oder in den Gebirgsgletschern finden innerhalb des Eises dynamische Prozesse statt, die zu einer vertikalen und horizontalen Eisbewegung führen. Die Fließbewegung ist eine Folge des Eigengewichtes des Eises und der Oberflächengradienten. Um Eiskerne mit möglichst ungestörten Informationen zu erhalten, werden geschützte und geeignete Stellen ausgewählt. Bohrungen werden von daher in der Regel auf sogenannten lokalen Dome-Positionen (Kuppen ohne Horizontalbewegung) oder Ice divides (Eisscheiden) der Eisschilde abgeteuft, wo das Eis vorwiegend vertikale Fließbewegungen aufweist und die horizontale Fließbewegung sehr gering ist.

Die Bohrtechnik und die erforderliche Infrastruktur sind unterschiedlich je nach Dicke des Eises. Bohrungen im alpinen Hochgebirge (vgl. *Abb. 6.1-3*) stellen andere Anforderungen als die Durchbohrung eines drei Kilometer dicken Eisschildes. Flache Kerne bis 200 m Tiefe kann man in etwa 1-2 Wochen und trocken bohren. Mittlere Tiefen bis etwa 1.000 m Tiefe erfordern, wie die Tiefbohrungen, bereits den Einsatz einer Bohrlochflüssigkeit, die den hydrostatischen Druck des Eises kompensiert. Die Arbeiten zur Durchbohrung eines über 3.000 m dicken Eisschildes verteilen sich meist auf fünf Jahre (jeweils Sommersaison). Flache Kerne enthalten

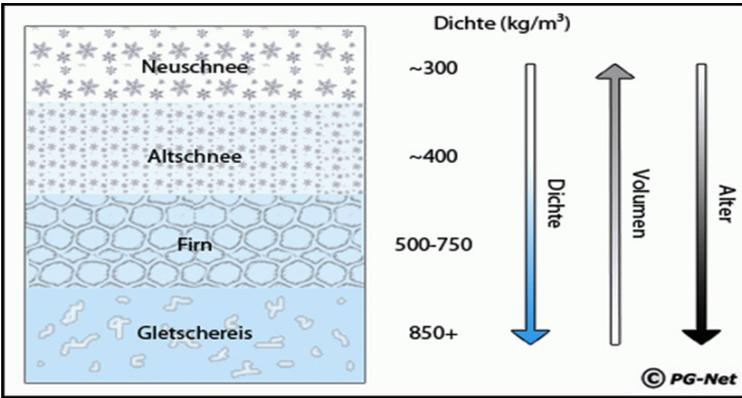


Abb. 6.1-1: Schematische Darstellung der Dichte-, Volumen- und Altersbeziehung eines Gletscherkörpers im Schnitt. Die Korngröße ist proportional zu Alter und Tiefe (Bildquelle: PG-Net - <http://www.geo.fu-berlin.de/v/pg-net>).

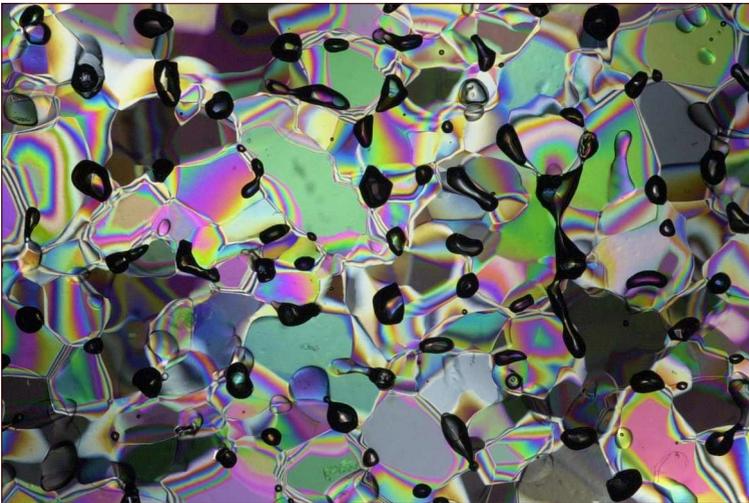


Abb. 6.1-2: Eisdünnschnitt zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren mit Luftblasen (dunkle ovale Einschlüsse) zwischen den Eiskörnern (Foto: Sepp Kipfstuhl).



Abb. 6.1-3: Der Vernagtferner (ein Gletscher in den Ötztaler Alpen in Tirol). Das Foto zeigt die Entnahme von Eisbohrkernen im oberen Firnbecken des Gletschers unterhalb des Taschachjochs im März 1983. Das Bohrprojekt wurde im Rahmen des SFB81 an der TU München in Zusammenarbeit mit der Universität Bern (Bohrausrüstung) durchgeführt (Foto: Hans Oerter).

grob die vergangenen 500 bis 5.000 Jahre, mitteltiefe Kerne erfassen Teile des Holozäns und reichen mitunter bis ins letzte Glazial zurück. Kerne durch die Eisschilde umfassen nur in der Ostantarktis mehrere Eiszeitzyklen. Einen Überblick über das international abgestimmte Bohrprogramm gibt IPICS (*International Partnership for Ice Core Sciences*, <http://www.pages.unibe.ch/ipics/white-papers>).

Eis aus den Polarregionen

Da das Eis der Eisschilde der Polarregionen mit einem Eisvolumen von ca. 29 Mio. km³ das größte und auch älteste Eisvorkommen der Erde ist, sind darin wertvolle Informationen gespeichert, die weit zurück in die Erdgeschichte reichen.

Das Klima der Erde befindet sich seit 2,58 Mio. Jahre im Quartär, das durch einen Wechsel zwischen Eis- und Warmzeiten (Interglaziale) gekennzeichnet ist. Über diese Schwankungen wurde viele Jahrzehnte diskutiert. Der Beweis und die Dokumentation dieser Klimaschwankungen wurden erst durch Entnahme von tiefen Eisbohrkernen aus den Eisschilden auf Grönland und in der Antarktis sowie durch Bohrungen in Tiefseeablagerungen möglich, da es in terrestrischen Bereichen keine so langen und kontinuierlichen Klimaarchive gibt. Viel früher als die Durchführung der Bohrungen konnte Milutin Milankovic mathematisch diese Klimaschwankungen und den Zusammenhang mit den Änderungen der Umlaufbahn der Erde um die Sonne ableiten (vgl. MILANKOVIC 1941).

Die vergangenen 25 Jahre Eiskernforschung waren geprägt von großen Internationalen Eisbohrprojekten sowohl in Grön-

land (GRIP, GISP2, NGRIP und NEEM) als auch in der Antarktis (Vostok, Dome Fuji, EPICA Dome C und EPICA Dronning-Maud-Land, WAIS Divide). Als das bedeutendste Eisbohrprojekt ist wohl das *European Project for Ice Coring in Antarctica* (EPICA) in den Jahren 1996-2006 mit zwei tiefen Bohrungen zu nennen. Für die Bohrung an der Kohnenstation im Dronning-Maud-Land lag die logistische Federführung beim Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven (OERTER et al. 2009).

Die längsten ungestörten Zeitreihen kommen vom Plateau der Ostantarktis (Dome C und Dome F). Bei heutigen Akkumulationsraten von weniger als 100 mm WE (mm Wasseräquivalent) pro Jahr, teilweise nur 20 bis 30 mm WE pro Jahr und in den trockeneren Eiszeiten sogar nur etwa der Hälfte davon, konnten bis zu acht Eiszeitzyklen nachgewiesen werden. Das bislang älteste mit 790.000 Jahren datierte Eis stammt von dem mehr als drei Kilometer langen EPICA-Eiskern von DOME C (Abb. 6.1-4) (EPICA Community Members, 2004).

Das Eis in der Westantarktis ist bei Akkumulationsraten um 200 mm WE pro Jahr deutlich jünger, maximal etwa 100.000 Jahre alt (Im Küstenbereich der Antarktis finden sich andererseits Positionen mit im Vergleich dazu extrem hohen Akkumulationsraten von bis über 1.500 mm WE im Jahr). Die klimatischen Bedingungen auf dem zentralen Inlandeis auf Grönland sind denen in der Westantarktis vergleichbar. Die Akkumulationsraten liegen bei Werten um 200 mmWE pro Jahr, die Jahresmitteltemperaturen bei Werten um -30 °C.

Aufgrund der höheren Akkumulationsraten umfassen die Eiskernzeitreihen auf Grönland nur etwa den letzten Eiszeitzyklus und sind von der Länge eher vergleichbar mit den Eisbohrkernen aus der Westantarktis. Mit Ausnahme des NGRIP-Kerns, der bis in das Eem-Interglazial hineinreicht, kann ihr genaues Alter jedoch nicht angegeben werden, da die untersten 300 m durch die Fließbewegung des Eises gestört

sind. Im Falle des zwischen 2008 und 2012 gebohrten NEEM-Eiskerns (Abb. 6.1-5) gelang es erstmals gestörte Sequenzen mittels Synchronisation der Methankonzentrationen in antarktischen Eiskernen zeitlich richtig zuzuordnen. Allerdings ist das Eem (~115-130 Mio. Jahre v.h.) nicht vollständig im NEEM-Kern abgebildet (NEEM Members 2013). Es gilt als Analog für eine zukünftige, wärmere Nordhemisphäre.

Die tiefen Kerne haben Klimageschichte geschrieben: Das letzte Glazial war höchst instabil. Die Dansgaard-Oeschger-Zyklen, die in Grönland mit regelrechten Temperatursprüngen von bis über 15 Grad Celsius einhergingen, waren in der Antarktis nicht von analogen Temperaturänderungen begleitet. Stattdessen zeigt die Synchronisation mittels Methan in den Luftblasen des Eises, dass die Temperatur in der Antarktis anscheinend den Temperaturänderungen in Grönland bzw. der Nordhemisphäre voraussetzt und das Temperaturverhalten in beiden Hemisphären auf einfache Weise durch eine Art bipolarer Schaukelbeziehung (bipolar seesaw) beschrieben werden kann (u.a. EPICA COMMUNITY MEMBERS 2006). Wenn der Temperaturanstieg in der Antarktis seinen Scheitelpunkt überschritten hatte, stieg die Temperatur in Grönland sprunghaft, teilweise um mehr als 10 Grad Celsius an.

Während frühere Studien davon ausgingen, dass die CO₂-Änderungen den Änderungen der Temperatur am Übergang der letzten Eiszeit zur jetzigen Warmzeit um 500 bis 1.000 Jahre verzögert folgten, schließen PARRENIN et al. (2013), dass sich CO₂ und Temperatur in der Antarktis praktisch zeitgleich geändert haben.

Es ist bemerkenswert, dass die in den antarktischen Eiskernen gemessenen Treibhausgaskonzentrationen in den letzten 800.000 Jahren zu keiner Zeit heutige CO₂- und CH₄-Konzentrationen erreicht haben. In grönländischen Eiskernen können die CO₂-Konzentrationen, vermutlich wegen der hohen Staubkonzentrationen, nicht verlässlich bestimmt werden.



Abb. 6.1-4: Letztes erbohrtes Kernstück aus dem EPICA-Eiskern von Dome C. Es sind die bislang weltweit ältesten erbohrten Eiskernstücke (Foto: Hans Oerter).

Die über Grönland und die Antarktis verteilten Eiskerne gestatten es jetzt, über die letzten 2.500 Jahre Vulkanereignisse praktisch auf das Jahr genau untereinander, aber auch mit den Baumringchronologien zu synchronisieren (SIGL et al. 2015). Hochaufgelöste Zeitreihen aus diesen Eiskernen tragen nicht nur dazu bei, vorhandene Datierungen zu verbessern und präzise Zeitmarken über die Hemisphären hinweg zu setzen, sondern auch präzise Vulkanhistorien zu erstellen und den Einfluss von Vulkanausbrüchen auf das Klima abzuschätzen. So hatten zwei im Abstand von nur 4 Jahren ausgebrochene Vulkane um 540 AD eine insgesamt fast 10 Jahre andauernde Abkühlungsphase zur Folge, in der die Sommertemperaturen in der Nordhemisphäre um 1,5 bis 3 °C gesunken sein dürften. Dies hatte derart katastrophale Folgen für die damaligen Bevölkerungen in Europa, China und Mittelamerika, dass sie zeitgleich dokumentiert wurden (SIGL et al. 2015).

Eisbohrkerne aus den Gebirgsgletschern

Die meisten Eisbohrprogramme wurden auf den polaren Eisschilden durchgeführt. Vergleichbare Untersuchungen aus den Tropen sind selten, weil nur wenige Orte bekannt sind, an denen langlebiges und ungestörtes Eis gefunden werden kann. Einer dieser Orte ist die Quelccaya Eiskappe (5.670 m hoch) in den peruanischen Anden. KESSLER (1994) konnte mit Hilfe von Eisbohrkernen aus dieser Eiskappe den Titicacasee-Pegel des 19. Jahrhunderts rekonstruieren. Er fand eine Korrelation zwischen der Eisakkumulation auf der

Quelccaya-Eiskappe und den Pegelschwankungen des Titicaca-Sees für den Zeitraum 1915-1984. Mit dieser Korrelation war es möglich, die Pegelschwankungen während des 19. Jahrhunderts zu rekonstruieren, obwohl direkte Messdaten erst ab 1915 zur Verfügung standen. THOMPSON et al. (2013) konnten durch die Analyse von Eisbohrkernen aus der Quelccaya Eiskappe eine Chronik über klimatische Veränderungen dieser Region erstellen, die bis rund 1.800 Jahre zurück reicht. Datierungsuntersuchungen mit ¹⁴C an Wasserpflanzen am Rande des Gletschers ergeben, dass die Eiskappe seit etwa 6.000 Jahre nicht so stark geschrumpft war wie heute. Auch im äquatorialen Ostafrika konnten THOMPSON et al. (2002) mit Hilfe von Eisbohrkernen aus dem Kilimanjaro genaue Informationen während des gesamten Holozäns über Klima- und Umweltveränderungen gewinnen. Insgesamt sind Eisbohrkerne aus den Gebirgsgletschern als Archiv für Klima- und Umweltveränderung der Region von großer Bedeutung, jedoch wegen des regelmäßigen Auftretens von Schmelzereignissen weit schwieriger zu interpretieren als Eiskerne aus polaren Eiskappen. 1979 begannen erste Versuche mit Eiskernbohrungen auf dem Vernagtferner, Öztaler Alpen, Österreich, die 1983 noch fortgesetzt wurden (s. Abb. 6.1-3 und -6). Eine Datierung der gemessenen 100jährigen Isotopenzeitreihen aus diesem temperierten Gletscher war nur mit Hilfe radioaktiver Isotope möglich gewesen. OERTER et al. (1982) geben eine Übersicht über dieses alpine Bohrprojekt.

Über mehrere Jahre wurden auf dem kalten Gletscher Colle



Abb.6.1-5: Eiskern, NEEM-Tiefbohrung in Grönland 2010. Ab einer Tiefe von ca. 1.000 Metern verschwinden infolge des hohen Druckes die Luftblasen und die eingeschlossene Luft wird in Form von Klathraden oder Gashydraten in die Eiskristalle eingebaut. So wird das Eis immer transparenter bis es glasklar ist (Foto: Sepp Kipfstuhl).



Abb. 6.1-6: Ein 66 cm langes Stück aus dem Eisbohrkern IV aus dem Vernagtferner (ein Gletscher in den Öztaler Alpen in Tirol), erbohrt im März 1983. Es stammt aus einer Tiefe von ca. 6 m. Charakteristisch für Kerne aus alpinen, temperierten Gletschern sind die alljährlich auftretenden Eisschichten im Firn, die beim Gefrieren von eingeseickertem Schmelzwasser entstehen (Foto: Hans Oerter).

Gnifetti, Monte Rosa, Italien/Schweiz, Eisbohrkerne abgeteuft. Dieser wenige hundert Meter dicke Gletscher birgt mehrere hundert Jahre altes Eis, das nicht durch Schmelzwasser beeinflusst wird. KONRAD et al. (2013) berichten von den Möglichkeiten die Alters-Tiefenbeziehung aus der Kombination von Eiskern Daten, Bodenradar und einfachen Fließmodellen ableiten zu können.

Eine Zwischenposition zwischen Gebirgsgletscher und polarem Eisschild nimmt die Akademii Nauk Eiskappe auf Severnaya Zemlya, Russland, ein. Dort wurde eines der wenigen arktischen Eisbohrprojekte außerhalb Grönlands durchgeführt, das bei einer Bohrtiefe von 724 m wahrscheinlich das älteste Eis der eurasischen Arktis gefördert hat. OPEL et al. (2013) berichten über die 1.100 Jahre Klimageschichte, die in den oberen 411 m des Bohrkerns mit Hilfe der stabilen Wasserisotope und der Hauptionen im Eis erschlossen wurde.

Permafrost als Umweltarchiv

Im Permafrost der Arktis und Subarktis bildeten sich über Jahrzehntausende bis zu 80 m mächtige eisreiche Ablagerungen, die Eiskomplexe genannt werden. Dort kommen bis zu 5 m breite Eiskeile vor. In diesen Eiskeilen oder Eiskeilnetzen bilden sich im arktischen Sommer durch Auftauen feuchte oder mit Wasser gefüllte Stellen, in denen sich Pflanzen, aquatische Kleinstlebewesen und Mikroben entwickelt können. Sie können durch Gefrieren im Winter fixiert und im Permafrost lange Zeit konserviert werden. Der Permafrost stellt deshalb ein ideales Archiv zur Rekonstruktion vergangener polarer Ökosysteme dar (für mehr Details s. SCHIRRMEISTER & HUBBERTEN 2014).

Literatur

- EPICA community members (2004): Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 429: 623-628.
- EPICA community members (2006): One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature*, 444: 195-198.
- FISCHER, H. (2014): Polare Eiskerne - Archiv globaler Klima- und Umweltveränderungen. In: Lozan, J. L., H. Grassl, D. Notz & D. Piepenburg. *Warnsignal Klima: Die Polarregionen*. 248-253.
- KESSLER, A. (1994): Zur Rekonstruktion von Titicacaseepeln des 19. Jahrhunderts mit Hilfe eines Eisbohrkernes vom Quelcayca-Gletscher. In: Manfred Domrös (Hrsg.): *Festschrift für Erdmann Gormsen zum 65. Geburtstag*. Mainz: Geograph. Inst. d. Johannes-Gutenberg-Univ. Mainz. 601-608.
- KONRAD, H., BOHLEBER, P., WAGENBACH, D., VINCENT, C. & O. EISEN (2013): Determining the age distribution of Colle Gnifetti, Monte Rosa, Swiss Alps, by combining ice cores, ground-penetrating radar and a simple flow model. *J. Glaciology* 59, 213: 179-181.
- MILANKOVIC, M. (1941): Kanon der Erdbestrahlung und seine

Anwendung auf das Eiszeitenproblem. *Königlich Serbische Akademie*. 633 S.

- NEEM community members (2013): Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core. *Nature* 493: 489-494 (24 January 2013). doi:10.1038/nature11789, 2013.
- OERTER, H., REINWARTH, O. & H. RUFLI (1982): Core drilling through a temperate Alpine glacier (Vernagtferner, Ötztal Alps) in 1979. *Z. Gletscherkunde und Glazialgeologie* 18 (1); 1-11.
- OERTER, H., DRÜCKER, C., KIPFSTUHL, S. & F. WILHELM (2009): Kohlen Station – the Drilling Camp for the EPICA Deep Ice Core in Dronning Maud Land. *Polarforschung* 78 (1-2): 1-23, 2008, erschienen 2009.
- OPEL, T., FRITZSCHE, D. & H. MEYER (2013): Eurasian Arctic climate over the past millennium as recorded in the Akademii Nauk ice core (Severnaya Zemlya). *Climate of the Past*, 9, 5: 2379-2389. doi:10.5194/cp-9-2379-2013.
- PARRENIN, F., MASSON-DELMOTTE, V., KÖHLER, P., RAYNAUD, D., PAILLARD, D., SCHWANDER, J., BARBANTE, C., LANDAIS, A., WEGENER, A. & J. JOUZEL (2013): Synchronous Change of Atmospheric CO₂ and Antarctic Temperature During the Last Deglacial Warming. *Science*, 339 (6123): 1060-1063. doi:10.1126/Science.1226368.
- SCHIRRMEISTER, L. & H.-W. HUBBERTEN (2014): Permafrost – Ein weit verbreitetes Klimaphänomen der Arktis und Subarktis. In: Lozan, J. L., H. Grassl, D. Notz & D. Piepenburg. *Warnsignal Klima: Die Polarregionen*. 53-61.
- SIGL, M., WINSTRUP, M., MCCONNELL, J. R., WELTEN, K. C., PLUNKETT, G., LUDLOW, F., BÜNTGEN, U., CAFFEE, M., CHELLMAN, N., DAHL-JENSEN, D., FISCHER, H., KIPFSTUHL, S., KOSTICK, C., MASELLI, O. J., MEKHALDI, F., MULVANEY, R., MUSCHELER, R., PASTERIS, D. R., PILCHER, J. R., SALZER, M., SCHÜPBACH, S., STEFFENSEN, J. P., VINTHER, B. M. & T. E. WOODRUFF (2015): Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. *Nature* 523: 543-549. doi:10.1038/nature14565.
- STAUFFER, B. (1999): Cornucopia of ice core results. *Nature* 399: 412-413.
- STAUFFER, B. (2001): Das „Isotopenthermometer“ im ewigen Eis. *Physik in unserer Zeit*, 32, 3: 106-112.
- SVENSSON, A., FUJITAS., BIGLER, M., BRAUN, M., DALLMAYR, R., GKINIS, V., GOTO-AZUMA, K., HIRABAYASHI, M., KAWAMURA, K., KIPFSTUHL, S., KJÆR, H.A., POPP, T., SIMONSEN, M., STEFFENSEN, J. P., VALLELONGA, P. & B. M. VINTHER (2015): On the occurrence of annual layers in Dome Fuji ice core early Holocene ice. *Clim. Past*, 11: 805-830. doi:10.5194/cp-11-1127-2015, 2015.
- THOMPSON, L. G., MOSLEY-THOMPSON, E., DAVIS, M. E., HENDERSON, K. A., BRECHER, H. H., ZAGORODNOV, V. MASHIOTTA, T. A., LIN, P. N., VLADIMIR, N. MIKHALENKO, V. N., HARDY, D. R. & J. BEER (2002): Kilimanjaro Ice Core Records: Evidence of Holocene Climate Change in Tropical Africa. *Science*, 298: 589-592.
- THOMPSON, L. G., MOSLEY-THOMPSON, E., DAVIS, M. E., ZAGORODNOV, V. S. HOWAT, I. M., MIKHALENKO, V. N. & P. N. LIN (2013): Annually Resolved Ice Core Records of Tropical Climate Variability over the Past ~1800 Years. *Science* 24, 340: 945-950 (Published online). doi: 10.1126/Science.1234210.

Kontakt:

Dr. Hans Oerter

Dr. Sepp Kipfstuhl

Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven

Hans.Oerter@awi.de

Sepp.Kipfstuhl@awi.de

Oerter, H., S. Kipfstuhl & J. L. Lozán (2015): Bedeutung des Eises als Archiv für Klima- und Umweltveränderungen der Vergangenheit. In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp. 218-223. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.33