

Mechanismen globaler Klimaschwankungen : Lehren aus der Analyse von Eisbohrkernen

Autor(en): **Stauffer, Bernhard**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles =
Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg**

Band (Jahr): **87 (1998)**

PDF erstellt am: **03.03.2015**

Persistenter Link: <http://dx.doi.org/10.5169/seals-309003>

Nutzungsbedingungen

Mit dem Zugriff auf den vorliegenden Inhalt gelten die Nutzungsbedingungen als akzeptiert. Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die angebotenen Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungshinweisen und unter deren Einhaltung weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Mechanismen globaler Klimaschwankungen – Lehren aus der Analyse von Eisbohrkernen

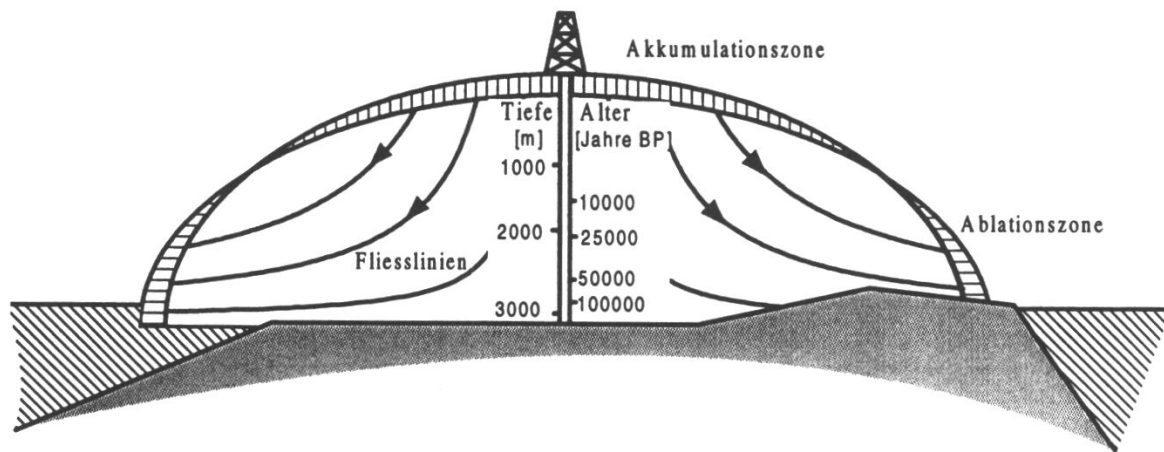
BERNHARD STAUFFER
Universität Bern Physikalisches Institut
Sidlerstrasse 5 3012 Bern

Zusammenfassung:

Der Mensch beginnt das Klima in globalem Masse zu verändern. Für die Abschätzung der Auswirkungen und Entwicklungen dieser Veränderungen ist es wichtig, die Ursachen und die Mechanismen natürlicher globaler Klimaänderungen in früheren Epochen zu verstehen. Für solche Untersuchungen eignen sich die grossen polaren Eisschilde besonders gut, da sie eine lückenlose Sammlung von Niederschlagsproben der letzten paar hunderttausend Jahre enthalten. Die Untersuchungen von Eisbohrkernen geben Auskunft über Temperaturen, Niederschlagsraten, Vulkantätigkeiten, Konzentrationen von Treibhausgasen und sogar über die biologische Aktivität auf benachbarten Kontinenten. Ergebnisse solcher Untersuchungen zeigen, dass das Klima zu gewissen Zeiten sprunghaft und sehr drastisch geändert hat und dass diese Änderungen wohl durch ein komplexes Zusammenspiel von Änderungen der Tiefenzirkulation des Ozeans, der Konzentration von Treibhausgasen und der mittleren Niederschlagsraten ausgelöst wurden.

Einleitung:

Im Zentrum der grossen polaren Eisschilde fällt Niederschlag ausschliesslich als Schnee. Dieser bleibt liegen und wird von nachfolgenden Schneefällen überdeckt. Unter dem Druck der darüberliegenden Schichten verdichtet sich der Schnee zu Eis. Das Eis sinkt mit der Zeit in immer grössere Tiefen und fliesst langsam zur Küste hin (Figur 1), wo es nach mehreren tausend Jahren als Eisberg ins Meer abbricht oder am Rande des Eisschildes wieder die Oberfläche erreicht und schmilzt. Der Eisschild befindet sich in Volumen und Form im Gleichgewicht, falls die jährlich deponierte Schneemasse gerade der Eismasse entspricht, die an der Küste durch Schmelzen und Eisabbrüche verloren geht. Durch eine Bohrung im Zentrum des Eisschildes gelangt man zu immer älteren Eis-, beziehungsweise Niederschlagsproben.



Figur 1: Schematischer Querschnitt durch einen Eisschild. Vom zentralen Gebiet mit Eiszuwachs (Akkumulationszone) fließt Eis gegen die Küste hin, wo es in der Ablationszone schmilzt oder am Rand als Eisberg ins Meer abbricht. Eisschichten werden gegen das Felsbett hin immer mehr ausgedünnt.

Im Juli 1992 hat das europäische «Greenland Ice Core Project» (GRIP) auf Summit in Zentralgrönland mit einer Kernbohrung durch den Eisschild das Felsbett in 3028 m Tiefe erreicht. Diese Kernbohrung war nicht die erste in Grönland, aber wir verdanken ihr die bis anhin wichtigsten und detailliertesten Ergebnisse. Die gewonnenen Eisbohrkerne werden mit physikalischen und chemischen Methoden untersucht. Die gewonnenen Ergebnisse enthalten Klimainformationen in verschlüsselter Form.

- Aus den Isotopenverhältnissen im Eis ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ und $^2\text{H}/^1\text{H}$) kann auf die lokale Temperatur geschlossen werden, wie weiter unten noch diskutiert wird.
- Vulkanausbrüche schleudern riesige Mengen von Gas und Staub in die Atmosphäre, welche über grosse Distanzen transportiert werden. Grosse Ausbrüche manifestieren sich in Eisbohrkernen vor allem durch eine deutlich erhöhte Sulfatkonzentration [Hammer, 1977]. In diesen Schichten kann man dann gezielt nach Partikeln suchen und in günstigen Fällen den Vulkanausbruch eindeutig identifizieren.
- Die Konzentrationen chemischer Substanzen im Eis geben Auskunft über die lokale Konzentration in der Atmosphäre zur Zeit des entsprechenden Schneefalles. Eine Motivation solcher Messungen ist die Bestimmung von vorindustriellen Werten und die Rekonstruktion des Anstieges seit Beginn der Industrialisierung. Die Messungen zeigten aber, dass es auch schon vor dem Eingriff des Menschen Variationen der Konzentration verschiedener Substanzen gab, welche oft mit klimatischen Veränderungen einhergingen. Alle Aerosole sind im Eis aus der letzten Eiszeit angereichert, einerseits verursacht durch geringere Niederschlagsraten andererseits durch eine ver-

stärkte atmosphärische Zirkulation. Durch die Messung reaktiver Substanzen erhofft man Auskunft über die Oxidationskapazität der Atmosphäre in früheren Epochen zu erhalten und Ammonium und Karboxylsäuren in Eisbohrkernen Grönlands geben Auskunft über die Bioaktivität auf dem benachbarten Nordamerikanischen Kontinent [*Fuhrer and Legrand, 1997*].

- Isotopenverhältnisse und die Konzentration chemischer Substanzen weisen oft saisonale Schwankungen auf. Bei genügend Messungen können diese im Eis identifiziert werden und man kann Jahresschichten abzählen. Dies ist nicht nur für die Datierung der Eisbohrkerne wichtig, sondern erlaubt auch jährliche Niederschlagsraten früherer Epochen zu bestimmen.
- In den zentralen Gebieten der polaren Eisschilde steigt die Temperatur auch im Sommer nie über 0°C. Der gefallene Schnee schmilzt nicht, sondern wird durch trockenes Sintern in Eis umgeformt. Beim Übergang von Firn zu Eis wird atmosphärische Luft in kleine Blasen eingeschlossen. Durch die Analyse dieser Luft in den Blasen kann die Zusammensetzung der Atmosphäre zur Zeit der Eisbildung bestimmt werden.
- Radionuklide wie ^{10}Be und ^{36}Cl werden durch die kosmische Strahlung in der Atmosphäre produziert und werden durch Trockendeposition oder zusammen mit dem Niederschlag auf der Schneeoberfläche deponiert. Variationen der Konzentration dieser Isotope im Eis kann durch veränderte Niederschlagsraten oder Transportphänomene, aber auch durch veränderte Produktionsraten verursacht sein. Es ist das Ziel, Variationen der Produktionsraten zu bestimmen und damit Variationen der Sonnenaktivität zu rekonstruieren, welche es auch gestattet, Variationen der Luminosität der Sonne abzuschätzen.

Datierung von Eisbohrkernen

Klimainformationen aus Eisbohrkernen sind nur dann sinnvoll, wenn sie zeitlich zugeordnet werden können. Altersbestimmungen von Eisproben aus einer bestimmten Tiefe erfolgen über das Abzählen von Jahresschichten, Berechnungen, die auf dem Fliessverhalten des Eises beruhen, oder durch Radioisotope [*Hammer et al., 1978*].

Durch sehr detaillierte Messungen der Konzentration von Staub sowie von Kalzium war es im GRIP Eisbohrkern möglich, Jahresschichten bis rund 13 000 Jahre vor heute zu identifizieren und abzuzählen [*Johnsen et al., 1992*]. Für grössere Tiefen beruht die Datierung auf Berechnungen. Eine sehr einfache Berechnung beruht auf der Annahme einer konstanten Niederschlagsrate und einer konstanten Ausdünnungsrate («vertical strain rate»). Sie erlaubt eine grobe Abschätzung des Alters:

$$\frac{dv_y}{dy} = \text{Ausdünnungsrate} = \text{Konstant}$$

v_y ist die vertikale Geschwindigkeitskomponente, welche in einem Eisschild, der sich im Gleichgewicht befindet, in jeder Tiefe einer lokalen Jahresschicht pro Jahr entspricht. Mit den gegebenen Randbedingungen lautet die Lösung der Differentialgleichung:

Dicke einer Jahresschicht y über Felsbett:
$$v_y = - \frac{a \cdot y}{h}$$

Alter des Eises y über dem Felsbett:
$$t = - \frac{h}{a} \cdot \ln \left(\frac{y}{h} \right)$$

wobei: a jährliche Niederschlagsrate [$m_{\text{Eis}}/\text{Jahr}$]
 h Mächtigkeit des Eisschildes

Verfeinerte Berechnungen berücksichtigen Variationen der Niederschlagsrate in verschiedenen klimatischen Epochen und auch, dass die Ausdünnungsrate im unteren Teil des Eisschildes nicht konstant ist, sondern bis zum Felsbett auf Null abnimmt [Johnsen and Dansgaard, 1992], zumindest, wenn das Eis am Felsbett angefroren ist. Datierungen über den radioaktiven Zerfall von Radioisotopen haben bis heute noch keine praktische Bedeutung. Sie werden aber für die Datierung von sehr altem Eis ($t > 200\,000$ Jahre) wichtig werden.

Isotopenverhältnisse und Temperaturverlauf:

Wie andere Elemente auch, haben jene des Eises (H_2O), Wasserstoff und Sauerstoff, mehrere stabile Isotope. Die Mischungsverhältnisse (R) dieser Isotope sind auf der ganzen Erde, in welcher chemischen Substanz sich Wasserstoff oder Sauerstoff auch befinden, relativ konstant:

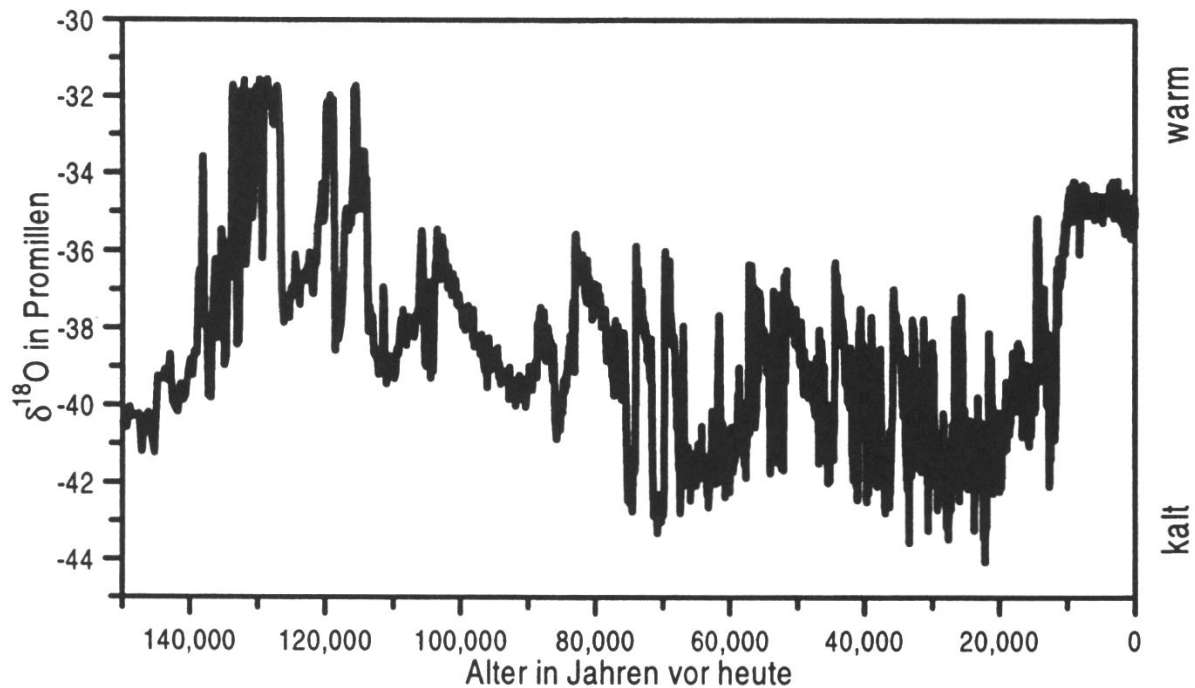
Wasserstoff:	^1H : 99,985 %	^2H : 0,015 %	
Sauerstoff:	^{16}O : 99,76 %	^{17}O : 0,04 %	^{18}O : 0,2 %

Chemisch verhalten sich die verschiedenen Isotope gleich, es kommt aber zu Fraktionierungen durch massenabhängige Prozesse wie Verdampfen, Kondensation oder Diffusion. Auch kleine Abweichungen gegenüber einem Standard können mit einem Massenspektrometer genau gemessen werden. Da die Abweichungen von einem frei gewählten Standard sehr klein sind, definiert man für diese Abweichung eine eigene Einheit, den sogenannten Deltawert:

$$\delta = 1000 \cdot \frac{R_{\text{Probe}} - R_{\text{Standard}}}{R_{\text{Standard}}} [\text{‰}]$$

Ozeanwasser wird für Wasserstoff und Sauerstoff als Standard gewählt. Der Dampfdruck von Wasser, welches ein schweres Isotop enthält, ist etwas geringer, als jener mit den gewöhnlichen und häufigsten Isotopen. Aus diesem Grunde sind die schweren Isotope im Wasserdampf und in den Wolken abgereichert ($\delta^{18}\text{O}$ im Wasserdampf ist -10‰ wenn der Dampf durch Verdunstung bei 20°C erfolgt). Wasser das aus der Wolke kondensiert, ist gegenüber dem Dampf an schweren Isotopen wiederum angereichert, so dass der in der Wolke verbleibende Dampf mehr und mehr an schweren Isotopen abgereichert wird. Im allgemeinen gilt: je kälter es ist, desto mehr ist die Wolke an Wasserdampf und der Dampf an schweren Isotopen abgereichert. Einfache Modellrechnungen zeigen, dass ein Temperaturunterschied von 1°C etwa einem $\delta^{18}\text{O}$ -Unterschied von $0,3 - 1\text{‰}$ entspricht. Dansgaard fand empirisch heraus, dass heute in Grönland einem lokalen Temperaturunterschied von 1°C ein Unterschied des $\delta^{18}\text{O}$ -Wertes von $0,67\text{‰}$ entspricht [Dansgaard et al., 1973].

Am GRIP Eisbohrkern wurden mehrere tausend Isotopenanalysen durchgeführt. Das Resultat ist in Figur 2 dargestellt [Dansgaard et al., 1993]. Die oberen 1500 m des Bohrkernes repräsentieren die letzten 10 000 Jahre, unsere momentane Warmzeit. Deutlich sichtbar ist der Übergang von der letzten Eiszeit zur Warmzeit mit einem $\delta^{18}\text{O}$ -Unterschied von rund 8‰ .



Figur 2: $\delta^{18}\text{O}$ -Profil des GRIP Eisbohrkernes [Dansgaard et al. 1993]

Bei einer detaillierteren Betrachtung von Fig. 2 fällt vor allem folgendes auf:

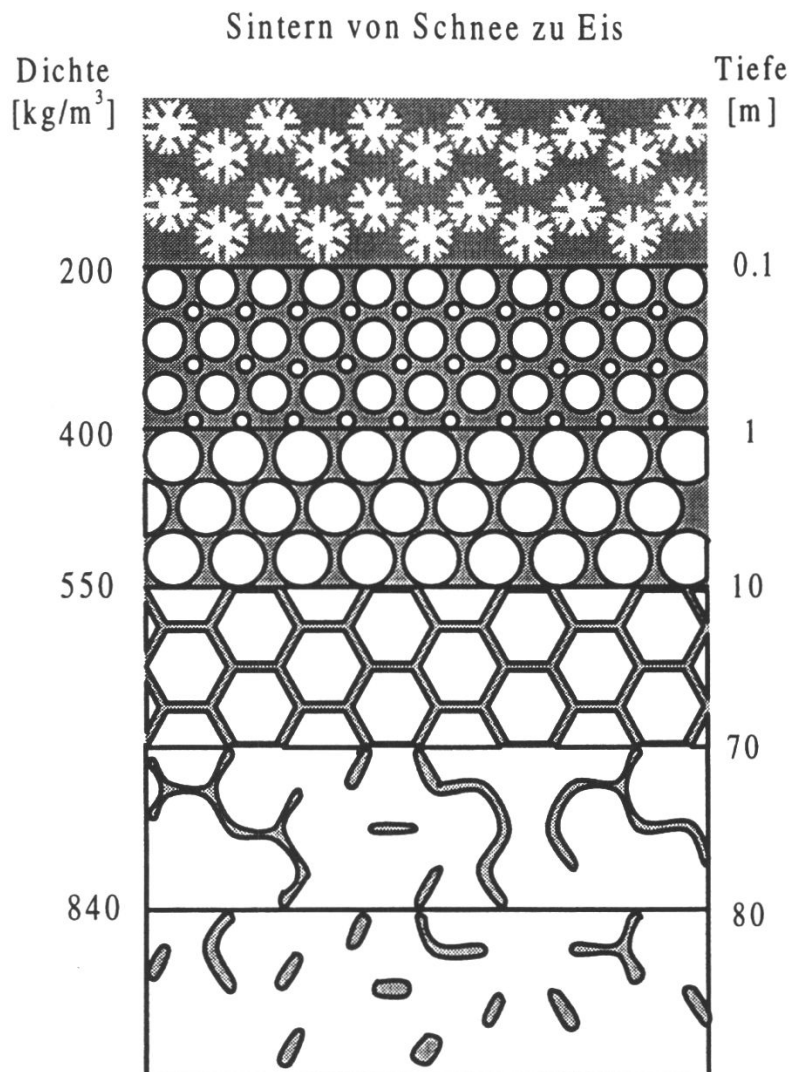
- Das Klima war nie so stabil, wie seit der letzten Eiszeit, d.h. während den letzten rund 10 000 Jahren.
- Der Übergang von der letzten Eiszeit zur Nacheiszeit erfolgte nicht langsam und stetig, sondern rasch und in wilden Sprüngen.
- Die letzte Eiszeit war von mehreren milden Klimaepochen unterbrochen. Die Klimawechsel erfolgten sehr rasch.
- Die letzte Warmzeit vor rund 115 000 Jahren zeigt teilweise höhere $\delta^{18}\text{O}$ Werte als unsere jetzige Warmzeit. Die Variationen der Werte während der Warmzeit könnten auch von Störungen in der Stratigraphie herrühren, da dieser Teil des Kernes schon nahe beim Felsbett liegt.

Bei einer detaillierteren Betrachtung der Ergebnisse, als es in Fig. 2 möglich ist, erstaunt vor allem, wie schnell die Klimaschwankungen waren. Beim letzten grossen Temperaturanstieg vor rund 11 700 Jahren erfolgte ein Anstieg, der 3 ‰ entspricht, in nur zwei Jahrzehnten. Nach der Beziehung von Dansgaard entspricht dieser Anstieg des $\delta^{18}\text{O}$ Wertes einem Temperaturanstieg von 5°C. Allerdings kann der heutige, empirisch gewonnene, lokale Unterschied nicht einfach auf frühere Klimaepochen übertragen werden. Es gibt aber eine weitere Möglichkeit, den Temperaturunterschied Eiszeit – Nacheiszeit zu bestimmen, nämlich durch direkte Temperaturmessungen im Bohrloch. Das Eis hat seine ursprüngliche Temperatur teilweise behalten, wobei natürlich Wärmeausgleichsprozesse berücksichtigt werden müssen. Diese Messungen zeigen, dass die Dansgaard-Beziehung die Temperaturunterschiede rund um einen Faktor zwei unterschätzt [Cuffey *et al.*, 1995], [Johnsen *et al.*, 1995]. Der gesamte Isotopenunterschied zwischen Eiszeit und Nacheiszeit von rund 8 ‰ entsprechen dann rund 24°C Temperaturunterschied, dem sprunghaften Wechsel von 3 ‰ am Ende der letzten Eiszeit ein Temperatursprung von rund 10°C. Wichtiger und interessanter als die Frage nach dem genauen Wert der Temperaturunterschiede in Zentralgrönland, ist aber wohl die Frage, ob sich diese Temperatursprünge auf diese Region beschränkten, oder ob sie repräsentativ für ein viel grösseres Gebiet, vielleicht für die ganze nördliche Hemisphäre oder die ganze Erde sind. Auskunft darüber geben uns Variationen der atmosphärischen Methankonzentration, wie sie an Luft aus den Blasen von Eisproben gemessen werden kann.

Zusammensetzung der Atmosphäre

Im Zentrum der grossen polaren Eisschilde steigt die Temperatur auch im Sommer nicht über den Gefrierpunkt (0°C). Die Metamorphose der Schneeflocken zu körnigem Schnee und Firn und schliesslich zu Eis erfolgt trocken. Verschiedene Stadien dieser Metamorphose sind in Fig. 3 schematisch dargestellt. Das mit atmosphärischer Luft gefüllte Porenvolumen wird bei dieser

Metamorphose ständig kleiner. In den oberen Schichten sind die Lufteinschlüsse alle untereinander und mit der freien Atmosphäre an der Oberfläche verbunden. Erst beim Übergang von Firn zu Eis werden Luftpakete isoliert und als Blasen ins Eis eingeschlossen.



Figur 3:

Schematische Darstellung der Eisbildung durch Sintern von trockenem Schnee zu Firn und Eis. Die Werte für die Dichte der einzelnen Stadien gelten allgemein. Die angegebenen Tiefen gelten für GRIP. Die Tiefen hängen von der Temperatur und der Akkumulationsrate ab.

Diese Luft hat die gleiche Zusammensetzung wie die Atmosphäre zur Zeit der Eisbildung falls:

- die Adsorption von einzelnen Luftkomponenten an Firnkörnern vernachlässigt werden kann,
- Fraktionierungsprozesse während dem Einschlussprozess der Luft vernachlässigt werden, oder aber quantitativ korrigiert werden können
- eine Produktion oder ein Abbau von Luftkomponenten durch chemische Reaktionen im Eis vernachlässigt werden kann.

Diese Annahmen müssen für jede einzelne Luftkomponente überprüft werden. Intensive Untersuchungen bezüglich der beiden wichtigsten Treibhausgase: CO_2 und Methan haben ergeben, dass die Bedingungen für Methan

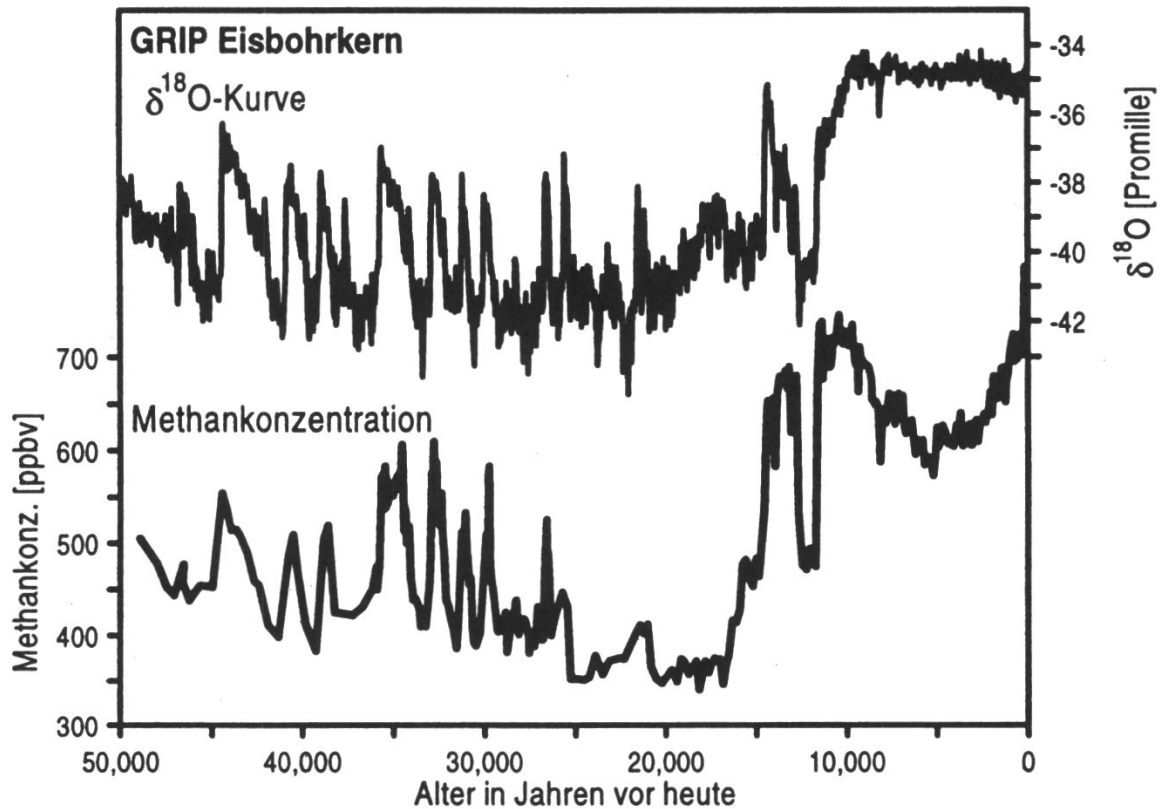
erfüllt sind, dass aber beim CO₂ Vorsicht geboten ist, da unter gewissen Voraussetzungen kleine Mengen CO₂ durch chemische Reaktionen zwischen Verunreinigungen in Eis, auch bei Temperaturen unter -30°C, gebildet werden können.

Analysen an Eisbohrkernen aus verschiedenen Regionen Grönlands und der Antarktis haben ergeben, dass die atmosphärische CO₂-Konzentration von 280 ppmv zu Beginn der Industrialisierung (ca. 1750) auf 315 ppmv im Jahr 1958 [Neftel *et al.*, 1985], als direkte und systematische Messungen in der Atmosphäre begannen, angestiegen ist. Die atmosphärische Methankonzentration stieg zwischen 1750 und 1995 von rund 700 auf 1700 ppbv [Stauffer *et al.*, 1985]. Während diese Ergebnisse eigentlich erwartete, vom Menschen verursachte Anstiege bestätigten, zeigten die Analysen an polaren Eisbohrkernen völlig überraschend, dass die Konzentration der beiden Treibhausgase auch während dem Übergang von der letzten Eiszeit zur Nacheiszeit sehr deutlich angestiegen sind (CO₂ von 200 ppmv auf 280 ppmv, Methan von 350 ppbv auf 700 ppbv) [Raynaud *et al.*, 1993]. In diesem Fall hat der Anstieg natürliche Ursachen, die wir aber noch nicht im Detail verstehen.

Noch überraschender zeigten hoch aufgelöste Methanmessungen am Eisbohrkern von GRIP, dass die atmosphärische Methankonzentration auch parallel zu den schnellen Klimaschwankungen während der letzten Eiszeit variierten [Chappellaz *et al.*, 1993]. Während milden Phasen, sogenannten Dansgaard/Oeschger Ereignissen, ist die Methankonzentration wesentlich höher (Figur 4). Dies ist nun aber ein ganz wichtiger Hinweis dafür, dass diese Dansgaard/Oeschger Ereignisse ein globales Klimaphänomen sind. Die höheren atmosphärischen Methankonzentrationen müssen durch eine größere Intensität der Methanquellen, welche zu diesen Zeiten vor allem in den Feuchtegebieten der niederen und der mittleren Breiten lagen, verursacht sein. Wenn aber Temperaturschwankungen in Grönland parallel zur Ausdehnung von Feuchtegebieten in den Tropen und mittleren Breiten verlaufen, dann handelt es sich um Schwankungen von globaler Bedeutung.

Die Mischungszeit von Methan in der Atmosphäre beträgt rund zwei Jahre, die Aufenthaltsdauer rund acht Jahre. Deshalb gibt es lokal nur geringe Konzentrationsunterschiede und die im GRIP Eisbohrkern beobachteten Variationen findet man entsprechend auch in den Bohrkernen der Antarktis. Aus den kleinen Konzentrationsunterschieden zwischen den Resultaten aus Grönland und jenen aus der Antarktis kann der interhemisphärische Unterschied bestimmt werden. Mit diesen Daten gelingt es die geographische Breite der hauptsächlichsten Methanquellen abzuschätzen [Chappellaz *et al.*, 1997]. Messungen an Eisbohrkernen an beiden Polen der Erde gestatten es also, Aussagen über die Ausdehnung und die Aktivität von Feuchtegebieten in tropischen Regionen zu machen.

Die sehr raschen und markanten Methanvariationen eignen sich auch sehr gut, um die Altersskalen verschiedener Eisbohrkerne zu synchronisieren.



Figur 4: Die atmosphärischen Methankonzentrationen (untere Kurve) verliefen während der letzten Eiszeit ziemlich parallel zu den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten, welche die Temperatur charakterisieren. Im Holozän (letzte 10 000 Jahre) weisen die Methandaten um 6000 v.h. ein deutliches Minimum auf, welches in der Isotopenkurve fehlt.

Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass das Alter der eingeschlossenen Luft, welche ja erst in einer Firntiefe von rund 80 m in Blasen isoliert wird, jünger ist, als das sie umgebende Eis. Ergebnisse von solchen Synchronisationen werden weiter unten noch kurz diskutiert werden.

Mögliche Mechanismen schneller, globaler Klimaschwankungen

Nachdem erwiesen ist, dass es sich bei den schnellen Klimaschwankungen während der letzten Eiszeit um ein globales Klimaphänomen handelt, stellt sich die Frage nach den möglichen Ursachen und den Mechanismen dieser Schwankungen. Schon kurz nachdem man Evidenz für diese in den Eisbohrkernen von Grönland gefunden hat, vermutete man, dass der Ozean eine wichtige Rolle spielen musste. Heute ist man überzeugt, dass die thermohaline Zirkulation des Ozeans und vor allem die Tiefenwasserbildung im Nordatlantik, eine ganz entscheidende Rolle spielt. Stark vereinfacht kann man sich diese Zirkulation nach Broecker als eine Art Förderband vorstellen [Bro-

ecker, 1994]. Kaltes und salzhaltiges, und damit sehr dichtes Wasser, sinkt im Nordatlantik in die Tiefe, strömt in der Tiefe in den Südatlantik und in den Indischen Ozean und steigt dann im Pazifik weit verteilt wieder an die Oberfläche. Diese sehr langsame Tiefenströmung muss durch gegenläufige Oberflächenströmungen kompensiert werden. Modellrechnungen zeigen, dass es Wechselwirkungen zwischen diesen Tiefenströmungen und dem Klima gibt, und dass die thermohaline Zirkulation in sehr kurzer Zeit drastisch ändern kann. Über die genauen Mechanismen solcher Variationen weiss man noch wenig. Ein schrittweiser hypothetischer Ablauf, der auf einem Modell von Paillard und Labeyrie basiert, soll aber mögliche Prozesse veranschaulichen [Paillard, 1994].

Die Eisschilde der nördlichen Hemisphäre seien zu Beginn unserer Betrachtung in einer Aufbauphase. Während dieser Aufbauphase gelangt sehr wenig Frischwasser von den Kontinenten in den Nordatlantik. Je grösser die Eisschilde werden, desto mehr Frischwasser kann aber als Schmelzwasser oder als Eisberg in den Atlantik gelangen. Erreicht der Rand eines Eisschildes die Küste, bildet es Schelfeise und kann sporadisch teilweise kollabieren und grosse Eismassen ins Meer stossen. Frischwasser verringert den Salzgehalt des Oberflächenwassers, das dadurch spezifisch leichter wird, und somit die Tiefenwasserbildung behindert. Von einem solchen Eisabbruch erwartet man folgendes:

- Zusätzliches Frischwasser verringert die Tiefenwasserbildung im Nordatlantik noch stärker
- Der Meeresspiegel steigt an
- Als Folge des Eisabbruches verkleinern sich die Eisschilde und sie speisen den Nordatlantik während der erneuten Aufbauphase mit wenig Frischwasser. Dadurch vergrössert sich der Salzgehalt an der Oberfläche wieder und zu einem gewissen Zeitpunkt setzt die Tiefenwasserbildung spontan wieder ein und führt im Nordatlantischen Raum zu einer schnellen und markanten Erwärmung.

Ob ein solches Modell einigermaßen der Wirklichkeit entspricht, muss natürlich hauptsächlich auch an Tiefsee-Sedimentbohrkernen untersucht werden. Es gibt zahlreiche Resultate von solchen Untersuchungen, welche zum Teil dieses Modell im Prinzip unterstützen, zum Teil aber auch zumindest in wichtigen Einzelheiten in Frage stellen. Heinrich fand beispielsweise in Sedimentbohrkernen aus dem Nordatlantik Schichten mit Sandkörnern, die von Eisbergen stammen mussten, sogenannte «Ice Rafted Debris». Bond und Lotti zeigten [Bond and Lotti, 1995], dass solche Schichten, Heinrich Ereignisse genannt, mit schnellen Klimaschwankungen wie sie im GRIP Eisbohrkern aufgezeichnet sind, (Dansgaard/Oeschger Ereignisse) korrelieren. Ein Heinrich Ereignis umfasst mehrere Dansgaard/Oeschger Ereignisse und beginnt oft mit einem sehr ausgeprägten, lange andauernden.

Das sehr vereinfachte Modell eines Förderbandes im Ozean sagt auch einen Energietransport und damit eine Kopplung zwischen den beiden Hemisphären voraus. Kaltes Wasser fließt in der Tiefe des Atlantiks in den Süden, wärmeres Wasser fließt an der Oberfläche in den Norden zurück. Falls die Tiefenwasserbildung einsetzt oder verstärkt wird, erwarten wir eigentlich, dass der südlichen Hemisphäre Wärme entzogen wird.

In Eisbohrkernen der Antarktis findet man in den entsprechenden Abschnitten auch Variationen der Isotopenverhältnisse aber wesentlich schwächere als in Grönland. Das ist nach unserem hypothetischen Modell nicht überraschend. Mit den Methanmessungen an Eisbohrkernen von Summit in Grönland und von Vostok und Byrd Station in der Antarktis, ist es möglich die Altersskalen auf ungefähr 200 Jahre genau zu synchronisieren, da die schnellen Schwankungen der atmosphärischen Methankonzentration ja weltweit gleichzeitig verlaufen müssen. Die synchronisierten Aufzeichnungen der Isotopenwerte der drei Eisbohrkerne zeigen, dass die grössten Variationen des Grönlandkernes Variationen in den Antarktiskernen entsprechen, dass sie aber zeitlich verschoben sind. Die Erwärmung erfolgt in der südlichen Hemisphäre langsamer und erreicht das Maximum gerade, wenn die Erwärmung im Atlantischen Raum beginnt [Blunier *et al.*, 1998]. Das heisst, dass sich der Süden mit der abrupten Erwärmung im Norden beginnt abzukühlen. Dies unterstützt die Vorstellung, dass bei intakter thermohaliner Zirkulation der südlichen Hemisphäre Wärme entzogen wird.

Welche Rolle spielt die atmosphärische Konzentration der Treibhausgase, CO₂ und Methan, bei diesen schnellen Klimaschwankungen? – Die Variationen von Methan und seine Ursachen wurden bereits besprochen. CO₂ zeigte in grönländischen Eisbohrkernen Variationen mit bis 50 ppmv höheren Werten während den milden Phasen. Wir wissen heute, dass diese Variationen ein Artefakt sind. Durch die Synchronisation mit Methan war es möglich, die sehr detaillierten Aufzeichnungen der CO₂ Konzentration im Byrd Eisbohrkern mit den Klimavariationen, wie sie im GRIP Eisbohrkern aufgezeichnet sind zu vergleichen. Der Vergleich zeigt, dass Schwankungen der atmosphärischen CO₂ Konzentration parallel zu Heinrich Ereignissen mit einer Amplitude von rund 20 ppmv wahrscheinlich sind [Stauffer *et al.*, 1998]. Die Resultate bedürfen allerdings einer Bestätigung, oder Entkräftung, an weiteren Eisbohrkernen. Die Verstärkung der schnellen Klimaschwankungen durch eine Rückkopplung mit den beiden Treibhausgasen kann im Gegensatz zum Übergang von der letzten Eiszeit zur Nacheiszeit, wo die atmosphärische CO₂-Konzentration eine grosse Rolle spielt, ausgeschlossen werden.

Offene Fragen:

Eine besondere Rolle für das Verständnis der Mechanismen der schnellen Klimaschwankungen und desjenigen des Kohlenstoffkreislaufes spielt der

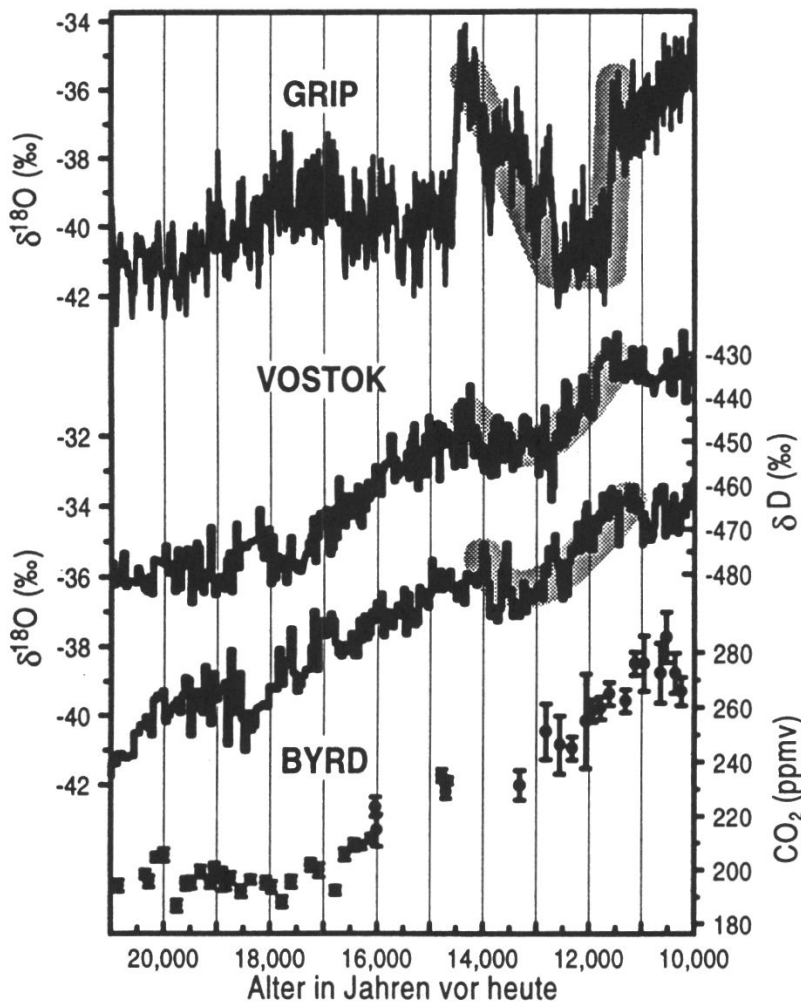
Ablauf der Ereignisse während dem Übergang von der letzten Eiszeit zur Nacheiszeit. Nach den Isotopenaufzeichnungen von Vostok und Byrd Station beginnen die Temperaturen ab ungefähr 18 000 Jahren v.h. an zu steigen. Um 14 500 Jahren v.h., zum Zeitpunkt in dem im Norden eine abrupte Erwärmung einsetzt, zeigen sie einen schwachen Kulminationspunkt, um dann zum ebenfalls schwach ausgebildeten «Antarctic Cold Reversal» abzusinken. Ursprünglich glaubte man, dass dieses zeitgleich mit der «Jüngeren Dryas» stattfand, während die synchronisierten Aufzeichnungen nun klar zeigen, dass es rund tausend Jahre früher erfolgte und im Süden die Erwärmung schon wieder einsetzte, als im Norden die Kaltphase gerade ihren tiefsten Wert erreichte [Blunier *et al.*, 1997]. Diese zeitliche Abfolge unterstützt eigentlich prinzipiell das Paillard Modell. Verwirrender sind die Zeiten selbst. Nach der abrupten Erwärmung im Norden um 14 500 v.h. beginnt in Vostok eine Abkühlung, die um etwa 13 500 v.h. ihren tiefsten Wert erreicht. Weshalb dauert es dann noch fast 1000 Jahre, bis die Kaltphase im Norden («Jüngere Dryas») ihren tiefsten Wert erreicht? Kein Modell kann bis anhin diese lange Frist erklären. Dies ist nur eine von vielen offenen Fragen. Einige weitere sind:

- Weshalb beginnt die atmosphärische CO₂ Konzentration um 18 000 v.h. an zu steigen und warum scheint sie auf die «Jüngere Dryas» überhaupt nicht zu reagieren?
- Weshalb beginnt die Erwärmung im Süden schon 18000 Jahre v.h., nachdem wir doch bisher dachten die Erwärmung der Antarktis erfolge als Reaktion auf das Abschmelzen der Eisschilde im Norden?

Im Verständnis der Mechanismen globaler Klimaschwankungen wurden grosse Fortschritte erzielt, wir sind aber noch weit davon entfernt, die Mechanismen bis ins Detail zu verstehen.

Ausblick:

Im «European Project for Ice Coring in Antarctica» (EPICA) haben sich zehn europäische Nationen zusammengeschlossen, um an zwei wichtigen Standorten in der Antarktis Kernbohrungen bis zum Felsbett vorzunehmen. Die Tiefbohrung in Dome Concordia hat bereits begonnen und in diesem Frühjahr 360 m erreicht. Der vollständige Bohrkern wird Auskunft über Klimaänderungen der letzten 500 000 Jahre liefern. Man erwartet wesentlich detailliertere Aufzeichnungen im Vergleich zu jenen des Vostok Bohrkernes infolge einer besseren Kernqualität und neuen analytischen Methoden. In Dronning Maud Land soll die zweite Tiefbohrung stattfinden. Sie wird zeitlich nicht so weit zurückreichen, wie jene von Dome Concordia. Es wird aber die erste Tiefbohrung in der Antarktis im «Atlantischen» Sektor sein. Man



Figur 5:

Vergleich von $\delta^{18}\text{O}$ -Messwerten von Zentralgrönland (GRIP), von der Ostantarktis (Vostok) und von der Westantarktis (Byrd). Die drei Messreihen wurden mit Hilfe von Methanmessreihen zeitlich synchronisiert. Aufgezeichnet ist unten zusätzlich der Anstieg der atmosphärischen CO_2 -Konzentration gemäss Messungen am Byrd Eisbohrkern.

erhofft sich Klimasignale, die noch besser mit solchen der grönländischen Bohrkerne verglichen werden können. Die beiden Bohrkerne aus der Antarktis werden sicher die oben aufgeworfenen Fragen beantworten, aber wahrscheinlich auch einige neue stellen.

Referenzen:

- BLUNIER, T., J. CHAPPELLAZ, J. SCHWANDER, A. DÄLLENBACH, B. STAUFFER, T. STOCKER, D. RAYNAUD, J. JOUZEL, H.B. CLAUSEN, C.U. HAMMER, and S.J. JOHNSEN, Asynchrony of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial, *Nature*, 394, 739–743, 1998.
- BLUNIER, T., J. SCHWANDER, B. STAUFFER, T. STOCKER, A. DÄLLENBACH, J. INDERMÜHLE, J. TSCHUMI, D. CHAPPELLAZ, D. RAYNAUD, and J.-M. BARNOLA, Timing of the Antarctic Cold Reversal and the atmospheric CO_2 increase with respect to the Younger Dryas event., *Geophysical Research Letters*, 24 (21), 2683–2686, 1997.
- BOND, G.C., and R. LOTTI, Iceberg Discharges into the North Atlantic on Millennial Time Scales During the Last Glaciation, *Science*, 267, 1005–1010, 1995.
- BROECKER, W.S., An unstable superconveyor, *Nature*, 367, 414–415, 1994.

- CHAPPELLAZ, J., T. BLUNIER, S. KINTS, A. DÄLLENBACH, J.-M. BARNOLA, J. SCHWANDER, D. RAYNAUD, and B. STAUFFER, Changes in the atmospheric CH₄ gradient between Greenland and Antarctica during the Holocene, *Journal of Geophysical Research*, 102 (D13), 15987–15999, 1997.
- CHAPPELLAZ, J., T. BLUNIER, D. RAYNAUD, J.M. BARNOLA, J. SCHWANDER, and B. STAUFFER, Synchronous changes in atmospheric CH₄ and Greenland climate between 40 and 8 kyr BP, *Nature*, 366, 443–445, 1993.
- CUFFEY, K.M., G.D. CLOW, R.B. ALLEY, M. STUIVER, E.D. WADDINGTON, and R.W. SALTUS, Large arctic temperature change at the Wisconsin-Holocene glacial transition, *Science*, 270, 455–458, 1995.
- DANSGAARD, W., S.J. JOHNSEN, H.B. CLAUSEN, D. DAHL-JENSEN, N.S. GUNDESTRUP, C.U. HAMMER, C.S. HVIDBERG, J.P. STEFFENSEN, A.E. SVEINBJÖRNSDOTTIR, J. JOUZEL, and G. BOND, Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record, *Nature*, 364, 218–220, 1993.
- DANSGAARD, W., S.J. JOHNSEN, H.B. CLAUSEN, and N. GUNDESTRUP, Stable isotope glaciology, *Meddelelser om Grønland*, 197 (2), 1–53, 1973.
- FUHRER, K., and M. LEGRAND, Continental biogenic species in the Greenland Ice Core Project ice core: Tracing back the biomass history of the North American continent, *Journal of Geophysical Research*, 102 (C12), 26735–26746, 1997.
- HAMMER, C.U., Past volcanism revealed by Greenland ice sheet impurities, *Nature*, 270, 482–486, 1977.
- HAMMER, C.U., H.B. CLAUSEN, W. DANSGAARD, N. GUNDESTRUP, S.J. JOHNSEN, and N. REEH, Dating of Greenland ice cores by flow models, isotopes, volcanic debris, and continental dust, *Journal of Glaciology*, 20, 3–26, 1978.
- JOHNSEN, S., D. DAHL-JENSEN, W. DANSGAARD, and N. GUNDESTRUP, Greenland palaeotemperatures derived from GRIP bore hole temperature and ice core isotope profiles, *Tellus*, 47B, 624–629, 1995.
- JOHNSEN, S.J., H.B. CLAUSEN, W. DANSGAARD, K. FUHRER, N. GUNDESTRUP, C.U. HAMMER, P. IVERSEN, J. JOUZEL, B. STAUFFER, and J.P. STEFFENSEN, Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core, *Nature*, 359, 311–313, 1992.
- JOHNSEN, S.J., and W. DANSGAARD, On flow model dating of stable isotope records from Greenland ice cores, in *The Last Deglaciation: Absolute and Radiocarbon Chronologies. NATO ASI series*, edited by E. Bard, and W.S. Broecker, pp. 13–24, Springer Verlag, 1992.
- NEFTEL, A., E. MOOR, H. OESCHGER, and B. STAUFFER, Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO₂ in the past two centuries, *Nature*, 315, 45–47, 1985.
- PAILLARD, D., Role of the thermohaline circulation in the abrupt warming after Heinrich events, *Nature*, 372, 162–164, 1994.
- RAYNAUD, D., J. JOUZEL, J.M. BARNOLA, J. CHAPPELLAZ, R.J. DELMAS, and C. LORIS, The ice record of greenhouse gases, *Science*, 259, 926–933, 1993.
- STAUFFER, B., T. BLUNIER, A. DÄLLENBACH, A. INDERMÜHLE, J. SCHWANDER, T. STOCKER, J. TSCHUMI, J. CHAPPELLAZ, D. RAYNAUD, C.U. HAMMER, and H.B. CLAUSEN, Atmospheric CO₂ concentration and millennial-scale climate change during the last glacial period, *Nature*, 392, 59–62, 1998.
- STAUFFER, B., G. FISCHER, A. NEFTEL, and H. OESCHGER, Increase of atmospheric methane recorded in Antarctic ice core, *Science*, 229, 1386–1388, 1985.