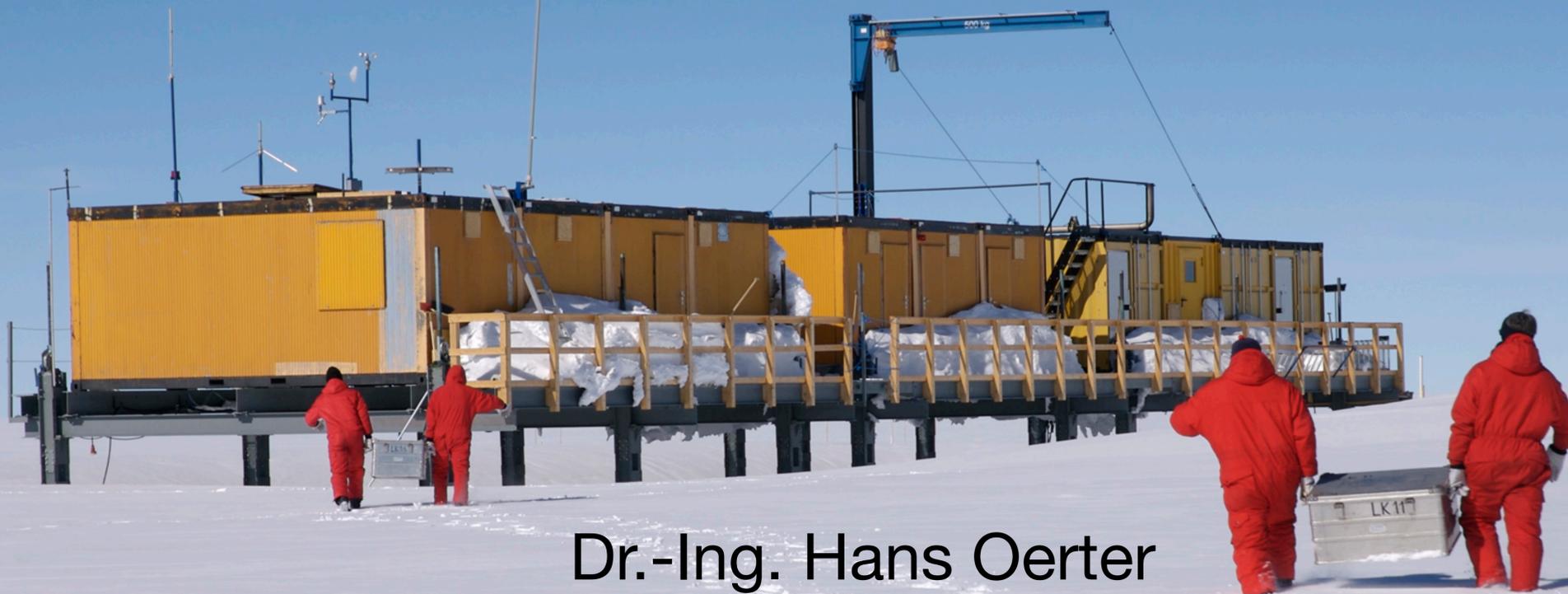


# Eisbohrkerne als Klimaarchiv



Dr.-Ing. Hans Oerter

[Hans.Oerter@awi.de](mailto:Hans.Oerter@awi.de)



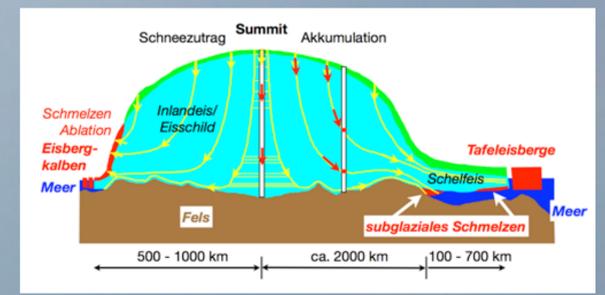
Kolloquium DMG ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



Titel des Vortrags: **Eisbohrkerne als Klimaarchiv.**

Hintergrund: Kohnen-Station in Dronning-Maud-Land, Antarktis, bei der Ankunft der ersten Gruppe mit einer Basler BT67 im Januar 2008 (Foto: H. Oerter).

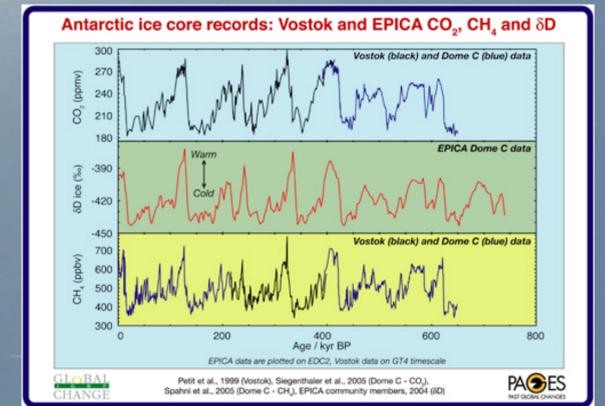
➡ Wo wird gebohrt ?



➡ Wie wird gebohrt ?



➡ Was ist im Eis archiviert ?



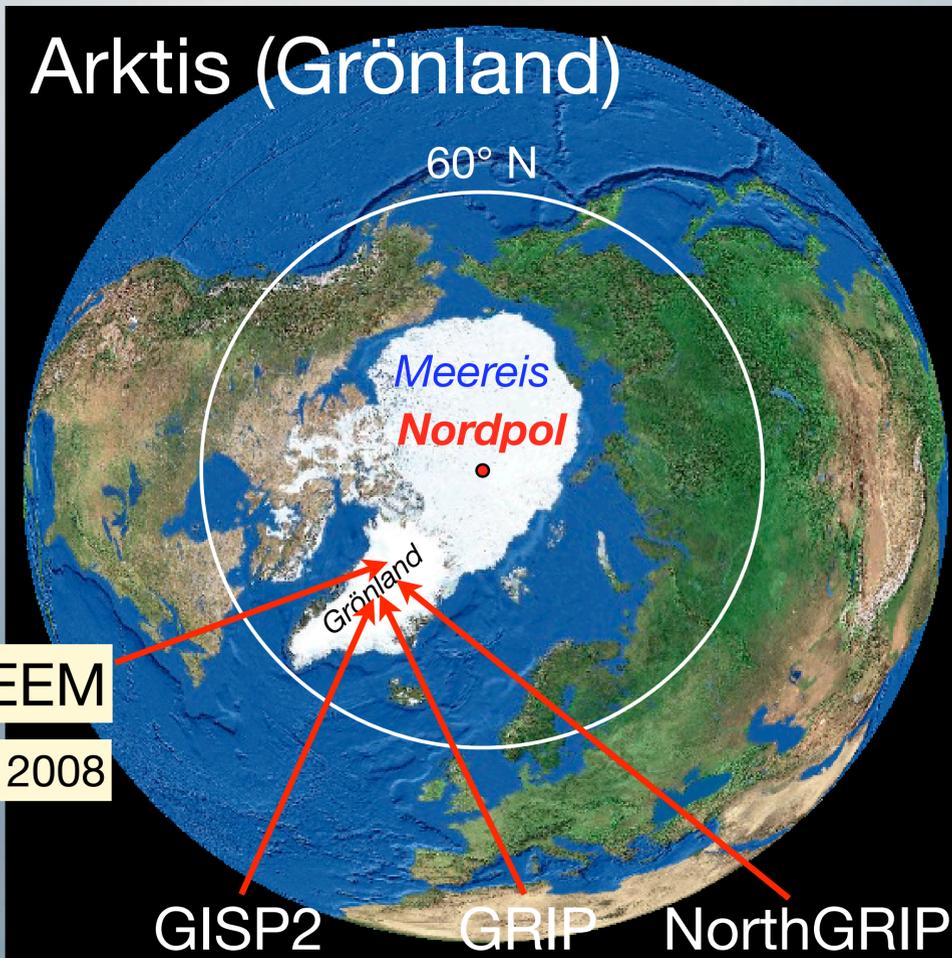
Kolloquium DMG ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



**Folie2:**  
Drei Hauptfragen stehen bei dem Vortrag im Vordergrund, die gleichzeitig das Gerüst des Vortrages bilden sollen:  
Wo wird gebohrt,  
wie wird gebohrt und  
was ist als Klimainformation im Eis archiviert.

# Wo wird gebohrt ?

## Arktis (Grönland)



NEEM

seit 2008

GISP2

1989-1993  
3053 m,  
>110 ka

GRIP

1990-1992  
3029 m,  
>105 ka

NorthGRIP

1996-2003  
3090 m,  
123 ka

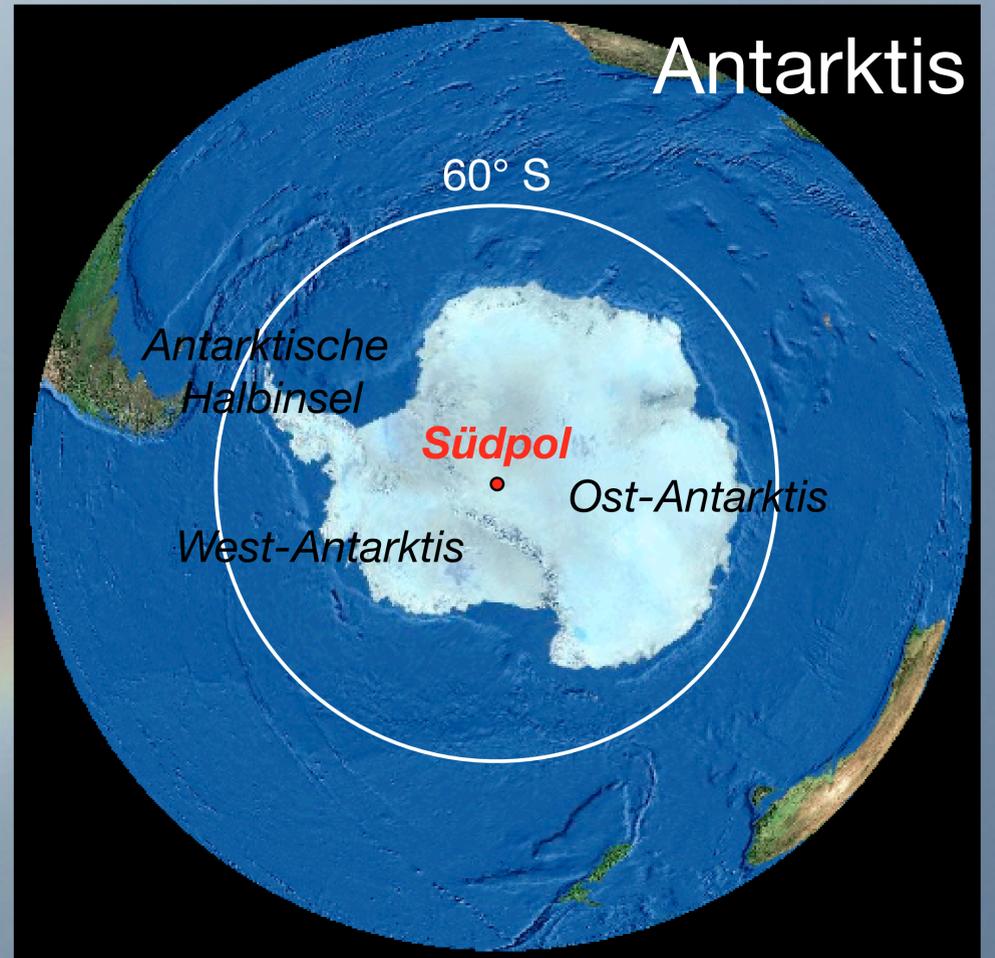


Kolloquium DMG ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



3

## Antarktis



Folie3:

Erste Frage: Wo wird gebohrt?

Die großen Eisschilde der Erde, der grönländische Eisschild und der Antarktische Eisschild sind einzigartige Klimaarchive mit Informationen über Temperaturschwankungen, Gaszusammensetzung der Atmosphäre und Aerosole, die in Grönland bis mindestens 123.000 Jahre, in der Antarktis bis mindestens 810.000 Jahre vor Heute zurückreichen (Bentley & Koci, 2007). Auch die kleineren Eiskappen der Arktis oder die Gletscher der Hochgebirgsregionen der Erde speichern klimatische Informationen, jedoch nicht über so lange Zeiträume. Wir finden dort kein Eis, das vor der letzten Warmzeit (ca. 130-110.000 Jahre v. Heute) abgelagert wurde, das meiste Eis ist jünger als 11.500 Jahre.

In Grönland wurden in den beiden letzten Jahrzehnten die tiefen Eiskernbohrungen der internationalen Tiefbohrprojekte GRIP, GISP2 und NorthGRIP abgeteuft. Da auch NorthGRIP nicht das gesamte Eem-Interglazial erfasst hatte, wurde das internationale Tiefbohrprojekt NEEM geplant, das im Sommer 2008 begonnen wurde. Die Bohrung steht zur Zeit bei ca. 1200 Meter Tiefe.

Bentley, C. & B. R. Koci: Drilling to the beds of the Greenland and Antarctic ice sheets: a review. *Annals of Glaciology* 47, 1-9 (2007).

**GRIP** (Greenland Icecore Project) 1988-1992; 3027m tiefer Eisbohrkern in Zentralgrönland (72° 34' N, 37° 37' W, 3232 m ü. Meer).

Im November 1987 schlossen sich auf Empfehlung des European Councils die acht europäischen Länder Belgien, Bundesrepublik Deutschland, Dänemark, Frankreich, Großbritannien, Island, Italien u. die Schweiz unter dem Schirm der European Science Foundation (ESF) in GRIP zusammen, um erstmals eine europäische Eiskerntiefbohrung auf dem höchsten Punkt des grönländischen Inlandeises (Summit) abzuteufen und gemeinsam auszuwerten (Dansgaard, 2005). Dänemark und die Schweiz sowie die Europäische Union trugen die größten Anteile an den Gesamtkosten. Dänemark übernahm die Organisation der gesamten Logistik (GRIP Operation Centre (GOC) unter der Leitung des inzwischen verstorbenen Niels Gundestrup. Die Versorgung der Bohrstelle erfolgte in Zusammenarbeit mit der US Air Force 109th Tactical Air Group mit Flugzeugen des Typs Hercules C-130 mit Skiausrüstung vom Flughafen Sønder Strømfjord/ Kangerlussuaq. Die GRIP-Eiskernbohrung begann am 1. Juli 1990 mit dem dänischen ISTUK-Bohrer (is dän.: Eis, tuk grönl.: Bohrer), der bereits erfolgreich während GISP bei der DYE-3-Eiskernbohrung 1981 (Endtiefe 2037 m) eingesetzt worden war. Bei GRIP wurden in der ersten Bohrsaison 1990 in sechs Wochen 710 m gebohrt. In der Saison 1991 erreichte die Bohrung eine Tiefe von 2320 m, entsprechend einem Eisalter von ca. 40.000 Jahren. Am 12. Juli 1992 wurde der Untergrund in einer Tiefe von 3027 m erreicht.

Bis in eine Tiefe von ca. 2750 m ist das Eis ungestört und wird dort mit einem Alter von 105.000 Jahren datiert (Grootes et al., 1993). Darunter ist das Eis durch Faltung gestört und es kann keine ungestörte klimatische Zeitreihe daraus abgeleitet werden (Grootes et al. 1993). Die ursprünglich von Dansgaard et al. (1993) und GRIP Members (1993) publizierte Datierung konnte nicht aufrecht erhalten werden. Besondere Aufmerksamkeiten erregten die schnellen Schwankungen im letzten Glazial, die sog. Dansgaard-Oeschger events, die zwar schon früher erkannt, aber erst mit GRIP und dann auch mit GISP2 definitiv bestätigt werden konnten (Johnsen et al., 1992; Dansgaard et al., 1993; Grootes et al.; 1993).

Dansgaard, W.: *Frozen Annals. Greenland Ice Sheet Research*. Niels Bohr Institute, Copenhagen (2005). (<http://www.iceandclimate.nbi.ku.dk/publications/>)

Johnsen, S. J. et al. Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core. *Nature* 359, 311-313 (1992).

Dansgaard, W. et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature* 364, 218-220 (1993).

Greenland Ice-Core Project (GRIP) Members. Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core. *Nature* 364, 203-208 (1993).

Grootes, P. M., Stuiver, M., White, J. W. C., Johnsen, S. J. & Jouzel, J. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature* 366, 552-554 (1993).

**GISP2** (Greenland Ice Sheet Program Two), (1988-1993), US amerikanisches Eisbohrprojekt in Zentralgrönland (72,58°N, 38,48°W, 3208 m ü. Meer); 3053 m tiefer Eisbohrkern

Von GISP2 wurde 1988 mit einer tiefen Eiskernbohrung in Zentralgrönland begonnen. Sie erreichte am 1. Juli 1993 den Untergrund in einer Tiefe von 3053.4 m und war damit die damals tiefste Eiskernbohrung weltweit. Der Bohransatzpunkt lag 28 km westlich von der europäischen Eiskernbohrung GRIP (Grootes et al. 1993). Es wurde zusätzlich noch ein 1,55 m langer Kern aus dem unterliegenden Gestein erbohrt.

Grootes, P. M., Stuiver, M., White, J. W. C., Johnsen, S. J. & Jouzel, J. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature* 366, 552-554 (1993).

**NorthGRIP** (North Greenland Ice Core Project) multinationales Eisbohrprojekt in Nordgrönland (75° 6' N, 42° 19' W, 2917 m ü. Meer), 1996-2004; 3085m tiefer Eisbohrkern.

NorthGRIP wurde als multinationales Forschungsprogramm von den teilnehmenden Institutionen in Dänemark, Belgien, Deutschland, Frankreich, Island, Japan, Schweden, Schweiz und USA finanziert. Hauptgeldgeber war der Dänische Forschungsrat. Das Ziel war eine längere paläoklimatische Zeitreihe als bei den Eiskernbohrungen GRIP und GISP2 zu erhalten, wenn möglich das komplette letzte Interglazial (Eem-Warmzeit) zu durchbohren (NorthGRIP Members 2004). Die Eismächtigkeit an der Bohrstelle beträgt 3085m, der heutige jährliche Schneezutrag 175 kg/m<sup>2</sup> und die Jahresmitteltemperatur -31,5 °C.

Die Bohrstelle wurde 1996 mit Unterstützung durch US Air Force Hercules C-130 Flugzeugen von der US Luftwaffenbasis in Thule und dem Flughafen Kangerlussuaq, 930 km südwestlich von NGRIP, eingerichtet und versorgt. In der Saison 1997 erreichte die Bohrung mit einem neu entwickelten Bohrer eine Tiefe von 1370 m. Der Bohrer blieb im Bohrloch stecken. In der Saison 1999 wurde ein Nachbau des Bohrers von 1997 eingesetzt und eine Bohrtiefe von 1750 m erreicht, in der Saison 2000 eine Tiefe von 2930 m, 2001 eine Tiefe von 3001.5m. In der Saison 2003 wurde die Bohrung am 17. Juli in einer Tiefe von 3085 m beendet, als subglaziales Wasser in das Bohrloch eindrang. Es gefror dann allmählich im Bohrloch. 2004 wurde durch das gefrorene Wasser hindurch noch einmal bis zum Grund gebohrt, ohne dass jedoch wieder subglaziales Wasser ins Bohrloch eindrang. In dem geförderten gefrorenen subglazialen Wasser wurde ein Holzsplitter gefunden, dessen Herkunft noch nicht restlos geklärt ist. Die Eem-Warmzeit konnte an dieser Bohrlökation zwar auch nicht komplett erfasst werden, ist in diesem Kern für Grönland jedoch bis zu einem Eisalter von 123.000 Jahren vor Heute (1950) ungestört und am höchsten aufgelöst abgebildet.

# Tiefe Eisbohrkerne in der Antarktis



European Project for Ice  
Core Drilling in Antarctica  
(EPICA)

1996-2008

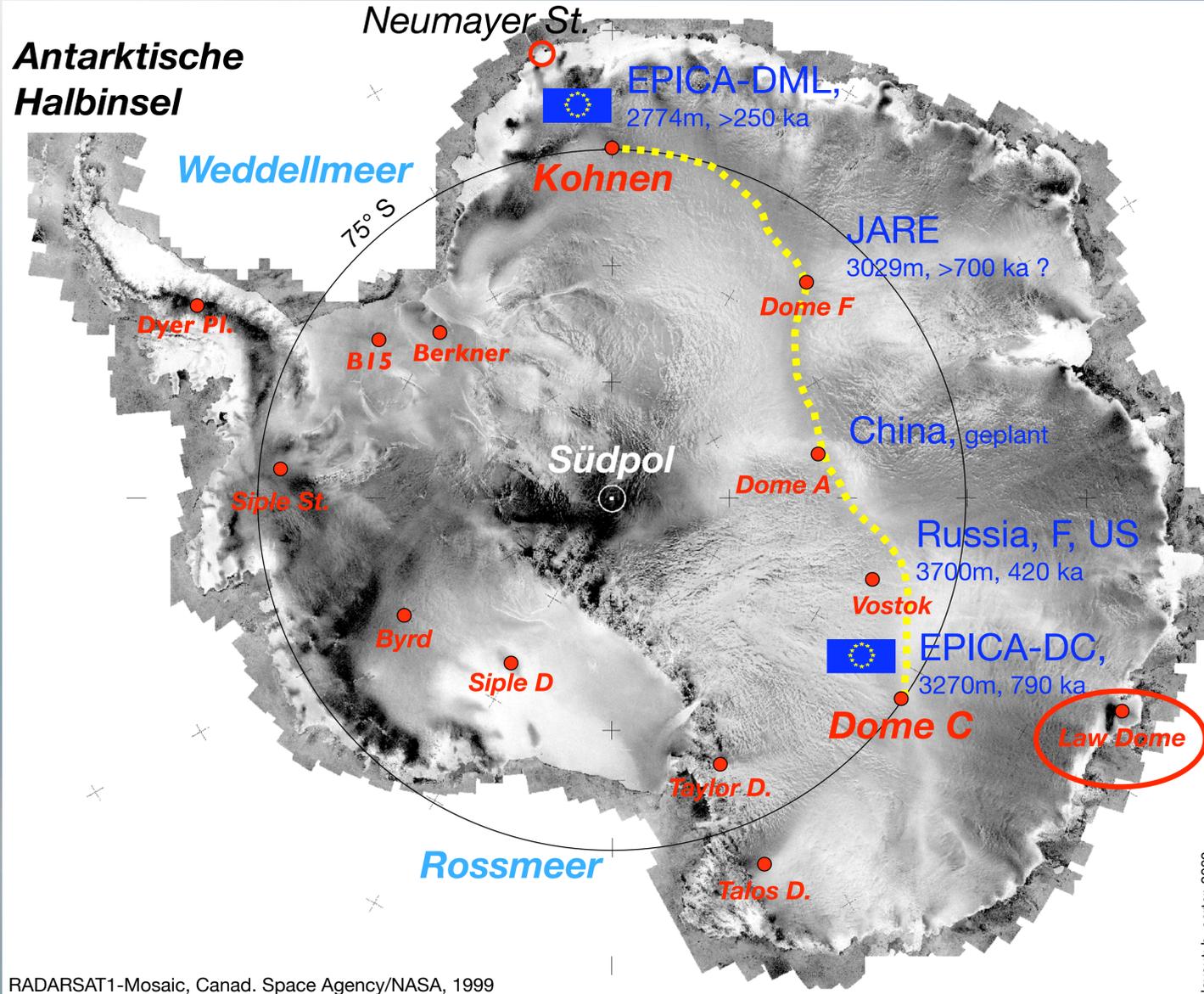
Oerter et al., *Polarforschung* 78 (1-2), 1-23 (2009)

[www.polarforschung.de](http://www.polarforschung.de)



Haupteissscheide  
der Ostantarktis

**Law Dome:** hohe Akkumulations-  
rate (640 mm we); Eiskern an dem  
rezente (1006-1978 AD) CO<sub>2</sub> -  
Konzentrationen bestimmt wurden.



RADARSAT1-Mosaic, Canad. Space Agency/NASA, 1999

layout: h. oerter, 2009



Kolloquium DMG ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



## Tiefe Eiskernbohrungen in der Antarktis.

Die tiefen Eiskernbohrungen bei der Kohnen-Station (EPICA (EU), EDML), auf Dome Fuji (Japan), bei der Station Vostok (Russland) und auf Dome C (EPICA (EU), EDC) liegen auf der Haupt-Eissscheide (ice divide) der Ostantarktis (gestrichelte gelbe Linie). Die neue, geplante chinesische Bohrung auf Dome A, wird ebenfalls auf dieser Eissscheide liegen.

**EPICA** (European Project for Ice Coring in Antarctica); transnationales, europäisches Forschungsprojekt unter dem Schirm der European Science Foundation (ESF) mit Förderung durch die EU und aus nationalen Beiträgen, 1995-2006. 2 Eisbohrkerne (3260 und 2774m) aus der Antarktis.

Nach Abschluss des europäischen Projektes GRIP 1993 in Grönland riefen die an GRIP beteiligten Länder unter Schirmherrschaft der ESF das Projekt EPICA ins Leben, um die gute wissenschaftliche Zusammenarbeit zu erweitern und die in Europa vorhandene polare Logistik optimal zu nutzen. Das Ziel war es, zwei tiefe Eisbohrkerne in der Antarktis zu bohren, um daraus die klimatischen Veränderungen (Lufttemperatur, Gasgehalt der Atmosphäre, Aerosole) in der Vergangenheit mit hoher zeitlicher Auflösung und über einen möglichst langen Zeitraum (Jahrhunderte bis Jahrhunderttausende) zu rekonstruieren. Der bis dato älteste Eiskern war der Vostok-Eiskern. An EPICA beteiligten sich Belgien, Dänemark, Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien, Niederlande, Norwegen, Schweden und die Schweiz.

Als Bohransatzpunkte wurden der Dome C (75° 06' S, 123° 24' O, 3233 m Meereshöhe, Jahresmitteltemperatur -54.5 °C, jährlicher Schneezutrag 25,5 kg/m<sup>2</sup>; Eiskern EDC) und eine Stelle (Kohnen-Station) in Dronning-Maud-Land (75° 00' S, 0° 04' O, 2892 m Meereshöhe, Jahresmitteltemperatur -44.6 °C, jährlicher Schneezutrag 64 kg/m<sup>2</sup>; Eiskern EDML) ausgewählt. Der 3260 m tiefe EDC-Kern ergab mit ca. 800.000 Jahren (in einer Tiefe von ca. 3200m) die bisher längste klimatische Zeitreihe aus einem Eiskern. Die untersten 60 m des EDC-Kerns zeigen Störungen und können nicht klimatisch interpretiert werden. Die Bohrung wurde ca. 15 m über einem vermuteten subglazialen See gestoppt. Das Alter des 2774 m tiefen EDML-Kerns wird auf ca. 250-300.000 Jahre geschätzt, mit 150.000 Jahren sicher datiert ist er bis zu einer Tiefe von 2416 m. Er zeigt bis ca. 80.000 Jahre vor heute (Tiefe 1970 m) aufgrund der höheren Schneezutragrate eine deutlich höhere zeitliche Auflösung als EDC (entsprechende Tiefe 1160 m). Am Ende der Bohrung drang subglaziales Wasser in das Bohrloch von EDML ein.

Das Bohrcamp auf Dome C wurde in der Antarktissaison 1995/96 aufgebaut. Die Logistik wurde von Frankreich und Italien bereitgestellt. Gebohrt wurde in den Folgejahren immer nur in den antarktischen Sommermonaten November-Januar. In der Saison 1996/97 begannen die Bohrarbeiten. Im Dezember 1998 hat sich der Bohrer in einer Tiefe von 780 m festgefahren und konnte nicht mehr befreit werden. Im Dezember 1999 wurde eine zweite Bohrung angesetzt (Augustin et al., 2007), die bis Januar 2001 eine Tiefe von 1459 m, bis Januar 2002 eine Tiefe von 2870 m und bis Januar 2003 eine Tiefe von 3190 m erreichte. In der Saison 2004/05 wurde die Bohrung auf die Endtiefe von 3260 m gebracht. (EPICA Community Members, 2004; Jouzel et al., 2007)

In Dronning-Maud-Land mussten in den antarktischen Sommern 1995/96 – 1998/99 noch aufwändige geophysikalische Voruntersuchungen durchgeführt werden, um einen geeigneten Bohransatzpunkt festlegen zu können. Diese umfassten Eisdickenmessungen mit Flug- und Bodenradar, flache Eisbohrkerne (10-150 m Tiefe) zur Bestimmung des Schneezutrag in dem Gebiet (die Ablagerungen des Vulkans Tambora nach dem Ausbruch von 1815 dienten dabei vorzugsweise als Zeitmarken) sowie Messungen zur Fließgeschwindigkeit des Eises, begleitet von Berechnungen mit numerischen Eisschildmodellen zur Bestimmung der Fließdynamik des Inlandeises. 1999/2000 begann das AWI mit dem Aufbau der Kohnen-Station, 2000/01 wurde die Bohrstelle eingerichtet. 2001/02 begannen die Arbeiten an der Tiefbohrung, mit demselben Eiskernbohrer, der bei NGRIP eingesetzt wurde. Bis Februar 2002 war eine Tiefe von 450 m erreicht, bis Februar 2003 eine Tiefe von 1551 m und bis Februar 2004 eine Tiefe von 2565 m. In der Saison 2005/06 wurde die Bohrung auf die Endtiefe von 2774 m gebracht (EPICA Community Members 2006).

Die wissenschaftliche Auswertung von EPICA ergab ein einzigartiges Archiv für 800.000 Jahre Klimageschichte, die Schwankungen der Treibhausgase CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O in der Vergangenheit, die zeigen, dass nie zuvor solch hohe Konzentrationen wie heute in der Atmosphäre auftraten. Es wurde nachgewiesen, dass die Konzentrationen von CO<sub>2</sub> und das antarktische Klima in der Vergangenheit immer streng miteinander gekoppelt waren und dass die Dansgaard-Oeschger-Ereignisse, die prägend für das Klima der letzten Eiszeit in der Nordhemisphäre waren, ihre Gegenstücke in der Antarktis hatten.

Augustin et al.: EPICA Dome C 2 drilling operations: performances, difficulties, results. *Annals of Glaciology* 47, 68-71 (2007)

EPICA Community Members: Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* 429, 623-628 (2004)

EPICA Community Members: One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature* 444, 195-198 (2006)

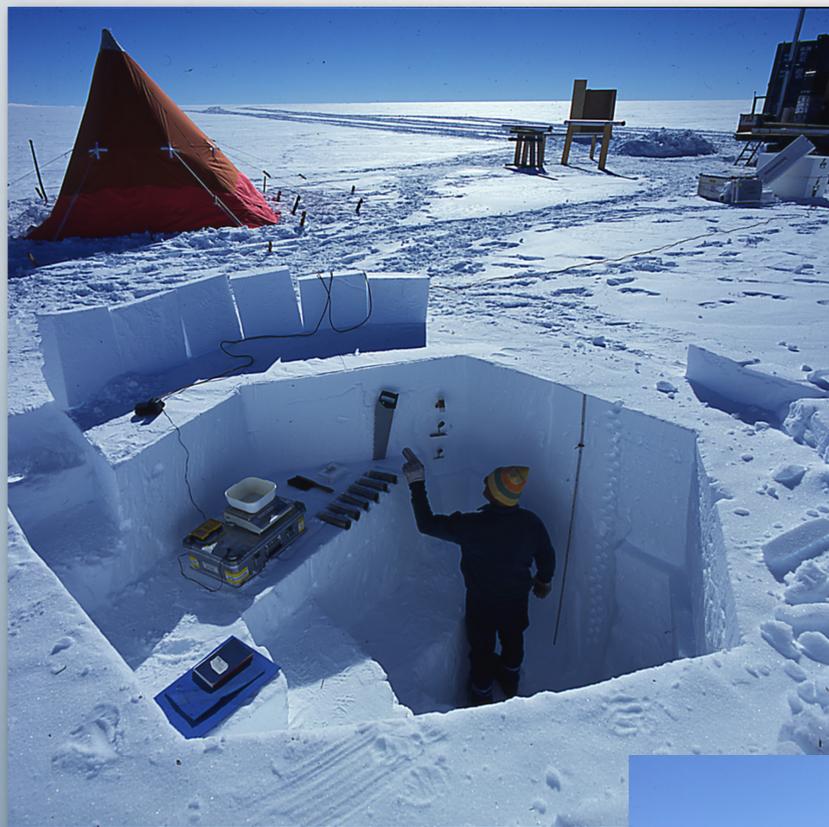
Jouzel et al.: Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. *Science* 317, 793-796 (2007)

**Dome Fuji** Zweithöchste Erhebung (3810 m Meereshöhe) des antarktischen Eisschildes bei 77° 19' S, 39° 42' O; Eismächtigkeit 3030 m, Jahresmitteltemperatur -54,4 °C, Minimum -79,9 °C, jährlicher Schneezutrag 25 kg/m<sup>2</sup>.

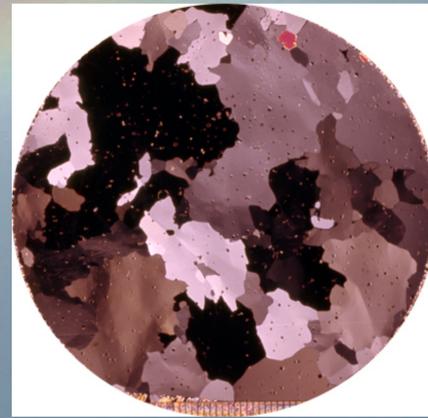
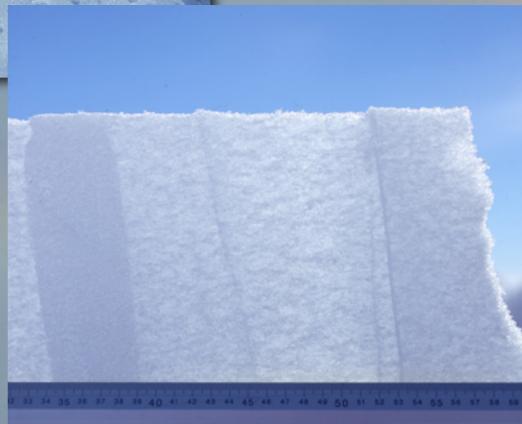
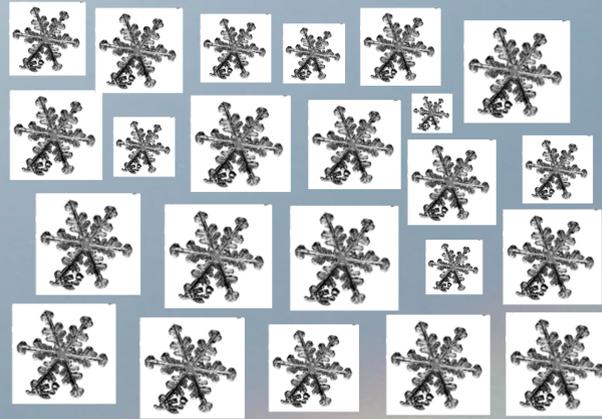
1995 errichtete das Nationale Institut für Polarforschung (NIPR) in Tokyo, Japan, (<http://www.nipr.ac.jp/english/>) auf Dome Fuji eine Forschungsstation, an der ein tiefer Eisbohrkern abgeteufelt und Atmosphärenforschung ganzjährig betrieben werden sollte. Die Station besteht aus acht Gebäuden mit einer Gesamtfläche von 407 m<sup>2</sup>. Im Dezember 1996 erreichte die erste Eiskerntiefbohrung eine Tiefe von 2503 m. Der Bohrer blieb jedoch dann etwa bei 2300 m stecken und konnte auch in den beiden Folgejahren nicht wieder frei bekommen werden. NIPR entwickelte daraufhin einen neuen Bohrer. Während der Überwinterung 2001 wurde 43 m nördlich des ersten Bohransatzpunktes ein neues, 122 m tiefes Bohrloch gebohrt und verrohrt. In den beiden folgenden Jahren wurden weitere Vorbereitungen für eine zweite Tiefbohrung getroffen. In der antarktischen Sommersaison 2003/04 wurde mit dem neuen Bohrer, der bis zu 3,84 m lange Kernstücke fördert, auf 362 m Tiefe gebohrt. 2004/05 wurde eine Tiefe von 1850,35 m erreicht. Die Saison 2005/06 begann bereits am 17. November. Am 12. Januar wurde die Tiefe von 3000 m erreicht. Anschließend, als die Bohrung dem Untergrund immer näher kam und die Eistemperatur nahe dem Druckschmelzpunkt lag, verlangsamte sich der Bohrfortschritt erheblich. Am 23. Januar musste die Bohrung bei 3028,52 m unterbrochen werden. 2006/07 konnte die Bohrung nur auf 3035,2 m vertieft werden. Aufgrund von Einschlüssen im Eis wird angenommen, dass der Untergrund nahezu erreicht wurde. Das Alter des Eises wird mit mindestens 720.000 Jahre angegeben.

**Wostok-Eiskern** gebohrt an der russ. Station Wostok (78°28' S, 106°48' E; 3488m a.s.l.), Antarktis (Vasiliev et al., 2007).

1970-1972 wurden von sowjetischen Wissenschaftlern erfolgreich Eisbohrkerne mit thermo-elektrischen Bohrgeräten im Umfeld der Wostok-Station bis zu Tiefen von 500 m und 952 m gebohrt, bei denen das Schmelzwasser noch aus

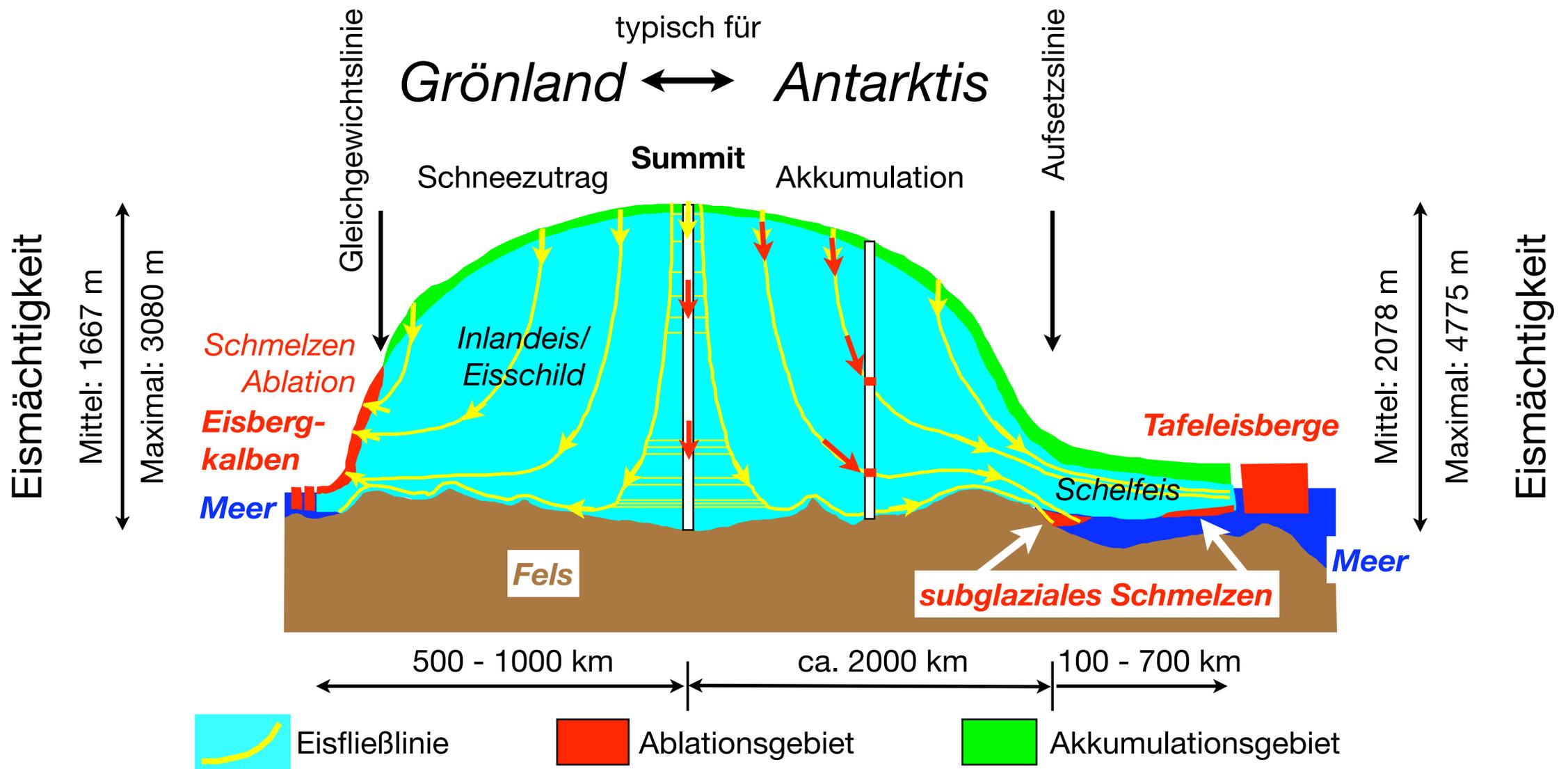


# Ein Eisschild baut sich aus über einander liegenden Jahresschichten auf.



**Folie5:**  
 Ein Eisschild baut sich aus über einander liegenden, jährlich abgelagerten Schneeschichten auf. Die Niederschlagsverhältnisse in der Antarktis entsprechen einem ariden Klima. So beträgt zum Beispiel am Südpol die Jahresschneeakkumulation etwa  $80 \text{ kg m}^{-2}\text{a}^{-1}$ , an der Kohnen-Station  $64 \text{ kg m}^{-2}\text{a}^{-1}$ . An der an der Küste liegenden Neumayer-Station ist wesentlich höher und erreicht etwa  $340 \text{ kg m}^{-2}\text{a}^{-1}$ . Die Jahresschichten lassen sich in den oberen Metern der Firndecke noch gut erkennen. Mit zunehmender Tiefe werden die Jahresschichten in der Antarktis soweit ausgedünnt, dass sie nicht mehr nachweisbar sind. Der Dünnschnitt aus größerer Tiefe (rechts unten; Durchmesser ca. 76 mm) lässt erkennen, dass die einzelnen Eiskristalle mit zunehmender Tiefe wachsen und kleine Luftblasen eingeschlossen werden. Unterschiedliche Färbung zeigt unterschiedliche Orientierung der c-Achsen an.

# Schematischer Querschnitt durch einen Eisschild

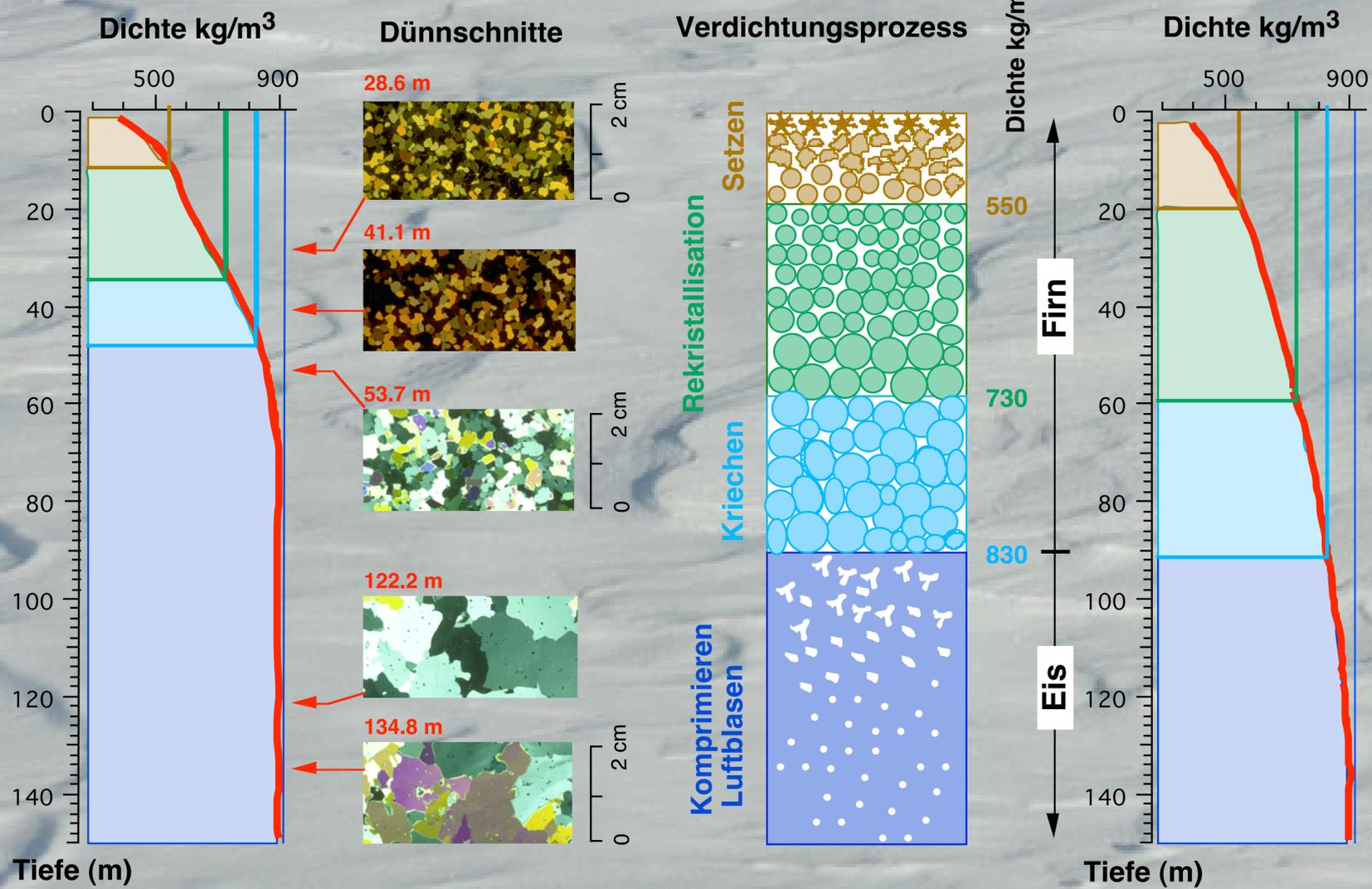


**Folie 6:**

**Aufbau eines Eisschildes oder Gletschers**

Man unterscheidet bei einem Gletscher und bei den Eisschilden das Akkumulationsgebiet (grüne Schicht) und das Ablationsgebiet (rote Schicht). In der Antarktis, mit Ausnahme der Antarktischen Halbinsel, ist es kalt genug, sodass kaum oder kein Schmelzen an der Oberfläche auftritt (geringe Schmelzbeträge gefrieren in den darunter liegenden kälteren Schichten wieder). Deshalb erstreckt sich das Akkumulationsgebiet bis an die Küste, einschl. der Schelfeisgebiete. Das Akkumulationsgebiet ist durch eine positive Massenbilanz an der Oberfläche gekennzeichnet, d.h. im Jahresmittel bleibt Schneeniederschlag erhalten. Der Grönländische Eisschild weist eine deutliche Trennung zwischen Ablations- und Akkumulationsgebiet auf. Die Trennlinie wird als Gleichgewichtslinie bezeichnet. Im Ablationsgebiet wird im Jahresmittel der jährliche Schneeniederschlag und zusätzlich alte Eismasse abgeschmolzen. Auch das Kalben von Eisbergen zählt zu den ablativen Prozessen, da dadurch die Eismasse verringert wird. Zusätzlich kommt es an der Unterseite der schwimmenden Eismassen (Gletscherzungen bzw. Schelfeise) zum Abschmelzen von Eis. Dieser Prozess wird in der Antarktis unter einigen Schelfeisen durch das Anlagern von in der Wassersäule gebildeten Eiskristallen (marines Eis) teilweise kompensiert.

Der ideale Punkt für eine Eiskerntiefbohrung liegt auf dem höchsten Punkt (engl.: summit) eines Eisschildes, von dem aus das Eis radial abfließt oder auf einer sog. Eisscheide (engl.: ice divide), mit vorwiegend seitlichem Abfluss. Nur auf einem Summit kann man Eis erbohren, das in der Vergangenheit an derselben Stelle als Schnee gefallen ist. An allen anderen Stellen eines Eisschildes, wurde der Schnee einst an höherer Stelle abgelagert und ist erst allmählich zum Bohransatzpunkt geflossen. Bei der Interpretation der Eiskerndaten müssen also Veränderungen längs dieses Fließweges berücksichtigt werden.



grafik: h.oeterAWI/2000



**Folie7:**

**Dichteprofile und Verdichtungsprozesse**

Gletscher und Eisschilde bilden sich aus dem jährlich fallenden Schnee, der auch im Sommer nicht wieder schmilzt. Ihr Aufbau ist dementsprechend durch eine Abfolge von jährlichen Schneeschichten gekennzeichnet, die sich durch die Schneemetamorphose in Firn und allmählich in Eis umwandeln. Dabei wird auch atmosphärische Luft ins Eis eingeschlossen, die anfänglich noch im Austausch mit der Atmosphäre steht, sich in tieferen Firnschichten im Gletscher noch durch Diffusion vermischen kann und erst nach Übergang von Firn zu Eis in abgeschlossenen Luftblasen im Eis auf Dauer konserviert wird. Dieser Übergang findet bei einer Dichte des Firns von etwa 815 kg/m<sup>3</sup> statt. Die Tiefe, in der dieser Übergang stattfindet, hängt von der jährlichen Schneezutragsrate (Akkumulationsrate) und der Temperatur an der Oberfläche ab. Im zentralen Bereich der großen Eisschilde liegt der Firn-Eis-Übergang bei 80 bis 110 m. So haben die eingeschlossene Luft und das umgebende Eis unterschiedliche Alter. Der Altersunterschied beträgt in Grönland ca. 200 Jahre, in der Antarktis kann er wegen des sehr viel geringeren Schneeniederschlags sogar 3000-5000 Jahre betragen. Das Eis verdichtet sich dann durch den auflastenden Druck und Kristallwachstum weiter. Die Dichte reinen Eises beträgt 917 kg/m<sup>3</sup>.

# Wie wird gebohrt ?



Kolloquium DMG ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



**Folie8:**  
Die zweite Fragestellung lautet: Wie wird gebohrt?  
Dies soll am Beispiel der EPICA-Bohrung an der Kohnen-Station veranschaulicht werden.  
Hintergrundbild: Schatten der Kohnen-Station im späten australen Sommer (Foto: Hans Oerter, 2008)

# Kohnen-Station

75°S, 0 °E, 2882 m

Funk, PC, e-mail

Messe

Küche

Sanitärcontainer

2 Schlafräume  
à 4 Pers.

Schneeschmelze

Generator

Lager

Werkstatt

Zum Bohren



Kolloquium DMO ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



Folie9:

**Kohnen-Station** (75°00' S, 00°04' O, 2882 m ü. Meer), dt. Forschungsstation in Dronning-Maud-Land (Neuschwabenland), Antarktis; erbaut 2000-2001. Meteorologische Daten: Schneezutrag 64 kg/m<sup>2</sup>, Jahresmitteltemperatur -44.6°C. Mitternachtssonne von 31. Oktober bis 12. Februar.

Die Kohnen-Station wurde benannt nach dem dt. Geophysiker Dr. Heinz Kohnen (\*1938, †1997). H. Kohnen war 1982-1997 der erste Leiter der Abteilung Logistik des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft (AWI), Bremerhaven. Die Kohnen-Station wurde als Sommerstation für die 2. Eiskerntiefbohrung des European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA) vom AWI errichtet. Die Bohrarbeiten begannen im Januar 2001 und wurden im Januar 2006 abgeschlossen. Die Kohnen-Station wird auch nach Abschluss der Bohrarbeiten als Sommerstation vom AWI ([www.awi.de](http://www.awi.de)) weiterbetrieben. Für das Bohrprojekt EPICA, einschließlich der Errichtung der Kohnen-Station, wurde nach den Richtlinien des Umweltschutzprotokolls (1991) zum Antarktisvertrag eine Umweltverträglichkeitsstudie erstellt. Das Projekt wurde am 6.10.2000 vom Umweltbundesamt genehmigt.

Die Station besteht aus elf 20-Fuss-Containern, die auf einer 32 m langen, 8 m breiten stählernen Plattform stehen. Die Plattform liegt etwa 2 m über der Schneeoberfläche und ruht auf 16 im Firn gegründeten, verlängerbaren Stahlstützen. Die Stationsplattform wird alle zwei Jahre um ca. 60 cm gehoben, um den Schneezutrag auszugleichen. Die Container beherbergen Funktionsräume für Generator, Schneeschmelze, Werkstatt, Lager, Schlafen, Toilette u. Waschraum, Küche, Messe sowie Telekommunikation. Neben der Station werden weitere Schlafmodule, Nahrungsmittelcontainer u. Tankcontainer auf Schlitten platziert, sodass insgesamt 20-25 Personen beherbergt werden können. Die Stromversorgung leistet ein 100kW Dieselgenerator, dessen Abwärme zum Schmelzen von Schnee für die Wasserversorgung genutzt wird. Für die Bohrarbeiten wurde 2001 neben der Station ein 66 m langer, 4,6 m breiter und 6 m tiefer Graben ausgefräst und mit einem Holzdach abgedeckt. In ihm steht die Bohranlage. Der Graben bietet außerdem Raum zur Bearbeitung und Zwischenlagerung der Eisbohrkerne.

Die Kohnen-Station wird hauptsächlich von der Neumayer-Station aus auf dem Landwege (Entfernung 750 km) mit Schlittenzügen, gezogen von Kettenfahrzeugen vom Typ PistenBully, versorgt. Personen werden auch mit Flugzeugen zur Station geflogen.

Die Universität Utrecht betreibt in Stationsnähe eine automatische Wetterstation.

(Foto: Hans Oerter, 2006)

Eine ausführliche Beschreibung der Station und des EPICA-Bohrprogrammes gibt Oerter et al. (2009): Kohnen Station – the Drilling Camp for the EPICA Deep Ice Core in Dronning Maud Land. *Polarforschung* 78(1-2), 1-23.

foto: hans oerter, 2006

© foto: hans oerter, 2006

# Kohnen-Station

75°00'09"S, 00°04'06"E,  
2892 m (WGS84)

Bohrzeitraum: 2001-2006

Mittlere Jahres-  
temperatur: -44.6 °C

Akkumulationsrate:  
64 kg m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>

Eis-Fließgeschwindigkeit:  
0,756 m/a

Eisdicke: 2782 ±10m

Länge Eiskern: 2774,1 m



foto: hans oerter, 2006



Kolloquium DMG ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



10

## Folie10:

Blick in den sog. Drill-Trench mit dem Bohrturm (senkrechte Position). Links ist die beheizbare Kammer zusehen, in der die Steuer- und Überwachungselektronik für die Bohranlage steht und sich das Personal in den langen Phasen des Fierens und Hievens des Bohrgerätes aufwärmen kann. Bei Tiefen über 2000 m erreichen die Hiev- und Fierzeiten jeweils ca. 45 Minuten. Rechts stehen Arbeitstische. Unter dem Fußboden liegt ein schmaler, 6 m tiefer und geneigter Graben, um das Bohrgerät (Gesamtlänge ca. 12 m) in die Horizontale schwenken zu können. Er wird während des Bohrvorgangs abgedeckt und nur zum Schwenken des Bohrers geöffnet. Die Temperatur im Drill-Trench lag bei ca. -30°C. (Foto: Hans Oerter, 2006)

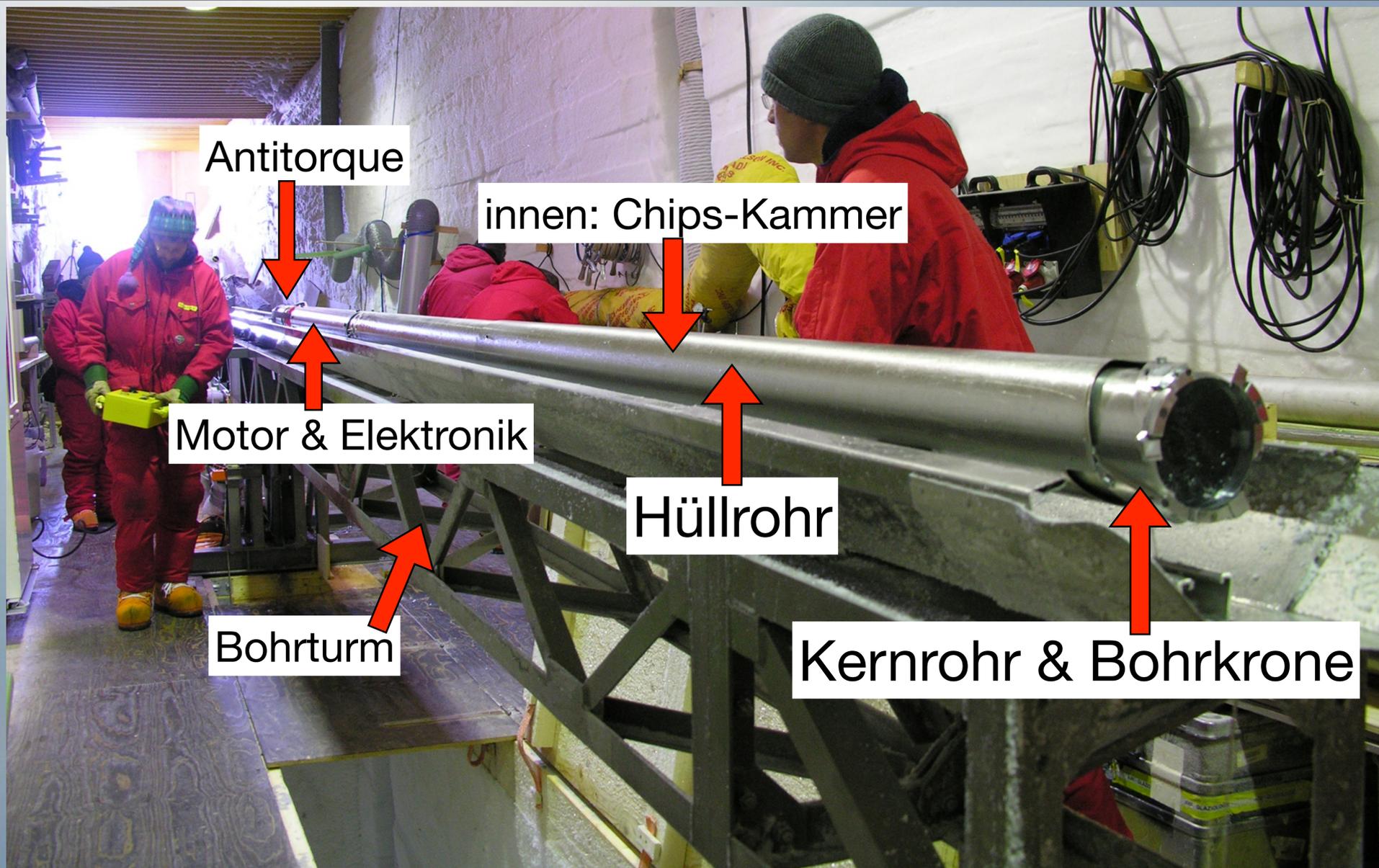


foto: hans oerter, 2006

**Folie11:**

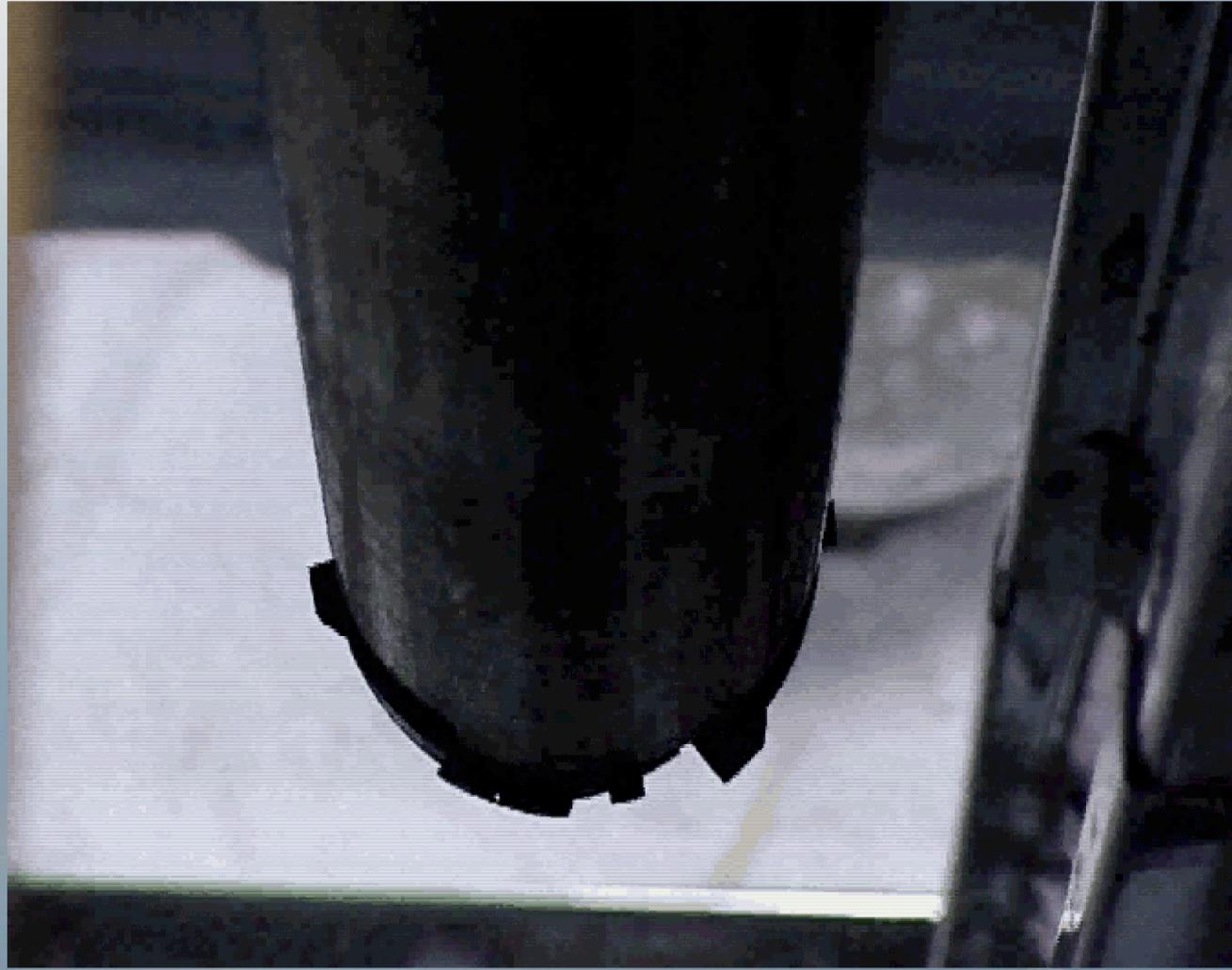
**Bohrtechnik**

Zum Bohren von Eiskernen wird heute hauptsächlich das elektromechanische Bohrverfahren eingesetzt, es kam jedoch auch, bei den früheren amerikanischen und bei russischen Bohrungen, ein thermisches Kernbohrverfahren zum Einsatz. Beim elektromechanischen Bohrverfahren fräsen die Bohrmesser der Bohrkronen einen Ring um den Bohrkern frei. Der frei gefräste zylindrische Bohrkern wird mechanisch abgerissen und im Bohrgerät nach oben gehievt. Auch die angefallenen Späne müssen im Bohrgerät gesammelt und aus dem Bohrloch entfernt werden. Der Bohrer wird an einem Kabel gefahren. Das sog. Antitorquesystem (meistens Plattfedern, die sich gegen die Wandung pressen) verhindert die Drehung des Bohrers um die eigene Achse. Antitorque, Bohrmotor, Steuerelektronik, Kammer für Bohrspäne und Kernrohr für den Bohrkern sowie die Bohrkronen bilden eine Einheit, die jeweils komplett ins Loch gefiert bzw. aus ihm heraus gehievt wird.

Bei Teufen über 200 Meter muss das Bohrloch mit einer Stützflüssigkeit gefüllt werden, um eine Verformung des Bohrlochs durch den hohen hydrostatischen Eisdruck zu verhindern. Die Bohrflüssigkeit muss bei Temperaturen bis zu ca. -60°C flüssig bleiben, ihre Viskosität so ausgelegt sein, dass kein zu großer Widerstand bei der Bewegung des Bohrers im Bohrloch hervorgerufen wird und sie darf den Eiskern nicht verunreinigen. Bisherige Bohrlochflüssigkeiten waren Alkohol (greift jedoch den Bohrkern geringfügig an), hochreines Petroleum (D40 oder D60) mit Zusätzen (sog. Densifier) von chlorierten Kohlenwasserstoffen (HCFC 141 bzw. Solkane®141), die jedoch ab 2010 weltweit nicht mehr vertrieben werden dürfen. Bei der EDML-Bohrung wurde EXXOL®D40 mit Solkane®141 eingesetzt.

(Foto: Hans Oerter, 2006)

# Bohren eines Eiskerns



Archiv AWI/Kipfstuhl

# Was ist im Eis archiviert ?



**Folie13:**

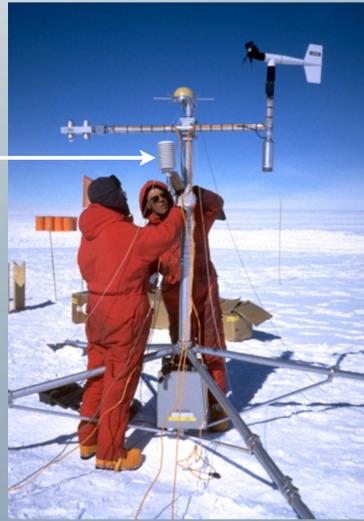
Dritte Fragestellung: Was ist im Eis an klimatischer Information gespeichert.

Hintergrundbild: Blick in eine Firnbohrloch und Teil des EDML-Eiskerns (links). Abgebildet ist ein Eisstück mit einer deutlich ausgeprägten Staub- oder Aschenlage (2,5 cm dick) in 808.23 m Tiefe, die etwa 14.790 Jahre vor Heute abgelagert und ins Eis eingeschlossen wurde.

(Fotos: Hans Oerter)

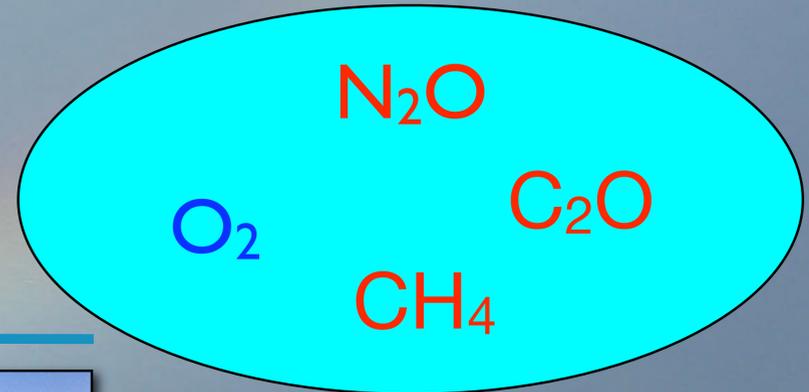
# Das Klima-Archiv Eis speichert Informationen zu:

## Lufttemperatur:



←  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$

## Gasgehalt in der Atmosphäre:



## Aerosole:



Kolloquium DMG ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



14

Folie14:

### Klimainformationen aus dem Eis

Im Eis sind Informationen zu Schwankungen der Lufttemperatur, zur Gaszusammensetzung in der Atmosphäre und zum Gehalt an Aerosolen in der Vergangenheit gespeichert.

Die Temperaturinformation ist nicht direkt gespeichert, sondern muss aus sog. Proxy-Daten berechnet werden. Als Temperaturproxy dienen die stabilen Isotope im Wassermolekül, das sog. Isotopenthermometer (z.B. Stauffer, 2001), das die Beziehung zwischen Kondensationstemperatur und Gehalt an den stabilen Isotopen  $^{18}\text{O}$  und Deuterium ( $^2\text{H}$ ) im Niederschlag beschreibt.

Wasser besteht aus Wasserstoff und Sauerstoff. Beide Elemente besitzen mehrere stabile Isotope, der Sauerstoff die Isotope  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  und  $^{18}\text{O}$ , der Wasserstoff die Isotope  $^1\text{H}$  und  $^2\text{H}$  (Deuterium). Die natürlichen Isotopenverhältnisse liegen für  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  bei  $1880\text{-}2010 \cdot 10^{-6}$ , für  $^2\text{H}/^1\text{H}$  bei  $90\text{-}170 \cdot 10^{-6}$ . Isotopenverhältnisse können in Massenspektrometern relativ einfach und sehr genau gemessen werden. Sie werden nicht in den absoluten Konzentrationen  $c$  angegeben, sondern als Abweichung ( $\delta$ -Notation) zu einem Standard-Ozeanwasser, dem sog. Standard Mean Ocean Water (SMOW), das von der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) in Wien verwaltet wird. Für das Isotop  $^{18}\text{O}$  gilt die Beziehung  $\delta^{18}\text{O} = ((C_{\text{Probe}}/C_{\text{Standard}} - 1) \cdot 1000 \text{ ‰})$ , für Deuterium gilt entsprechendes. Bei Phasenübergängen tritt eine Isotopenfraktionierung ein. Kondensiert Wasserdampf so wird Wasser mit den schweren Isotopen bevorzugt und im zurückbleibenden Wasserdampf werden die schweren Isotope abgereichert. Wenn sich zum Beispiel eine Luftmasse in den Subtropen mit Wasser sättigt und dann polwärts verschiebt, wird sie infolge der Abkühlung ständig Wasser durch Kondensation verlieren und so isotopisch immer leichter werden. Die physikalische Beziehung zwischen Kondensationstemperatur und  $\delta$ -Wert hängt von der Art der Abkühlung ab (isobar oder adiabatisch) und ist daher nicht eindeutig. W. Dansgaard (\*1922) hat jedoch für den grönländischen Eisschild anhand von Schneeproben zwischen  $\delta$ -Wert und der mittleren Jahrestemperatur  $T$  die empirische Beziehung  $\delta^{18}\text{O} [\text{‰}] = 0,67 T [^\circ\text{C}] - 13,7 \text{ ‰}$  gefunden. Für die Antarktis entspricht im Mittel eine Temperaturänderung von  $1^\circ\text{C}$  einer Änderung des  $\delta^{18}\text{O}$ -Wertes eine  $0,80 \text{ ‰}$  und des  $\delta\text{D}$ -Wertes von  $6,34 \text{ ‰}$ . Es ergeben sich jedoch regional unterschiedliche Beziehungen, die bis zu 20% vom antarktischen Mittelwert abweichen können.

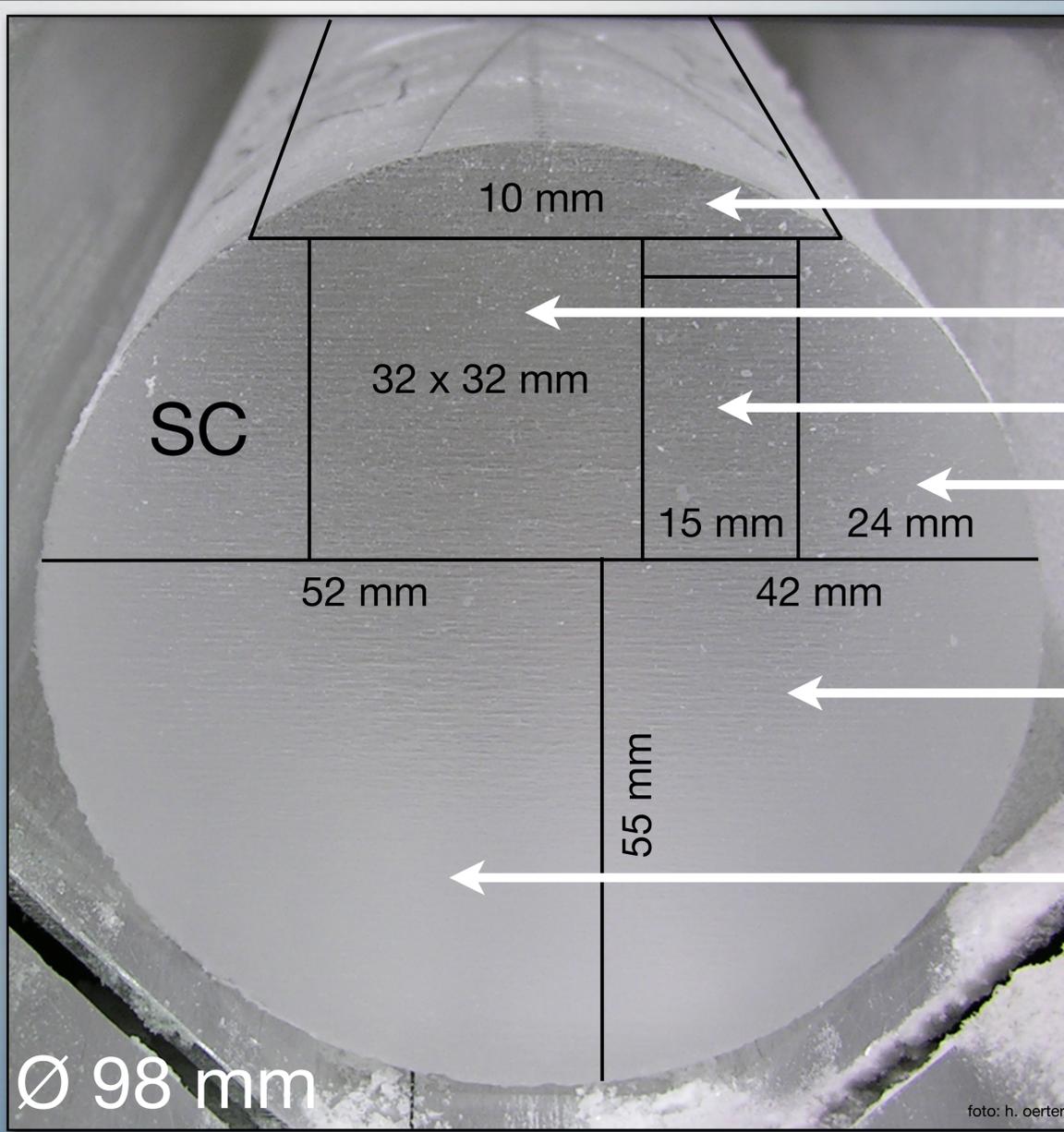
Wenn man annimmt, dass diese empirischen Beziehungen auch in der Vergangenheit gültig waren, kann man anhand von Isotopenmessungen an Eisbohrkernen die mittlere Jahrestemperatur berechnen. Dies ist für das Plateau des antarktischen Inlandeises ohne große Einschränkungen gültig. Für Grönland hat sich jedoch gezeigt, dass die tatsächlichen Temperaturschwankungen etwa doppelt so hoch gewesen sein müssen, als die aus dem Isotopenthermometer abgeleiteten Werte. Dies ergab sich aus Temperaturmessungen in Bohrlöchern von Eiskernbohrungen und aus dem Verhältnis der Stickstoffisotope  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  in der eingeschlossenen Luft, das u.a. von der Temperaturdifferenz zwischen Schneeoberfläche und der Tiefe des Lufteschlusses abhängt. Man geht davon aus, dass sich in Grönland das Verhältnis von Sommer- zu Winterniederschlägen in Warm- und Kaltzeiten ändert und damit dort die Gültigkeit des Isotopenthermometers eingeschränkt wird.

Stauffer, B.: Mechanismen globaler Klimaschwankungen. Das Isotopenthermometer im ewigen Eis. Physik in unserer Zeit, 32/3, 106-113 (2001)

Atmosphärische Luft wird beim Übergang von Firn zu Eis ins Eis eingeschlossen und bleibt dort erhalten. Anfänglich ist die Luft in Luftblasen eingeschlossen, die sich jedoch zunehmendem hydrostatischen Druck (bei ca. 1000-1200m Eisauflast) in Klathrate umwandeln, d.h. ins Kristallgitter des Eises eingebaut werden. Bei Druckentlastung können sie wieder frei gesetzt werden. Eis ist das einzige Klimaarchiv, das Gase gespeichert hat. Ein Problem bei der Interpretation der Gasgehalte bzw. der Umrechnung von Tiefenprofilen in Zeitreihen ist die Differenz zwischen dem Alter des umgebenden Eises und der eingeschlossenen Luft, das so genannte  $\lambda$ age.

Aerosole sind feste und flüssige Teilchen, die in der Atmosphäre transportiert werden. Sie stammen z.B. von Vulkaneruptionen, von weiten vegetationslosen Flächen oder werden an der Meeresoberfläche bzw. vom Meereis in die Luft aufgenommen und weitertransportiert. Hier spielen vor allem die biologische Aktivität nahe der Meeresoberfläche und die Meereisbildung eine wichtige Rolle. Entsprechend gelangen schwefelhaltige Verbindungen aus dem Wasser in die Atmosphäre oder Seesalzkomponenten, die dann später in den Eiskernen nachgewiesen werden können.

# Schnittplan



Dünnschnitte

Cont. Flow Analysis (CFA)

$\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$

$^{10}\text{Be}$



Gase, Staub

Archiv

SC: verfügbar für Steering Committee

## Folie15:

### Schnittplan für EPICA-Eiskerne

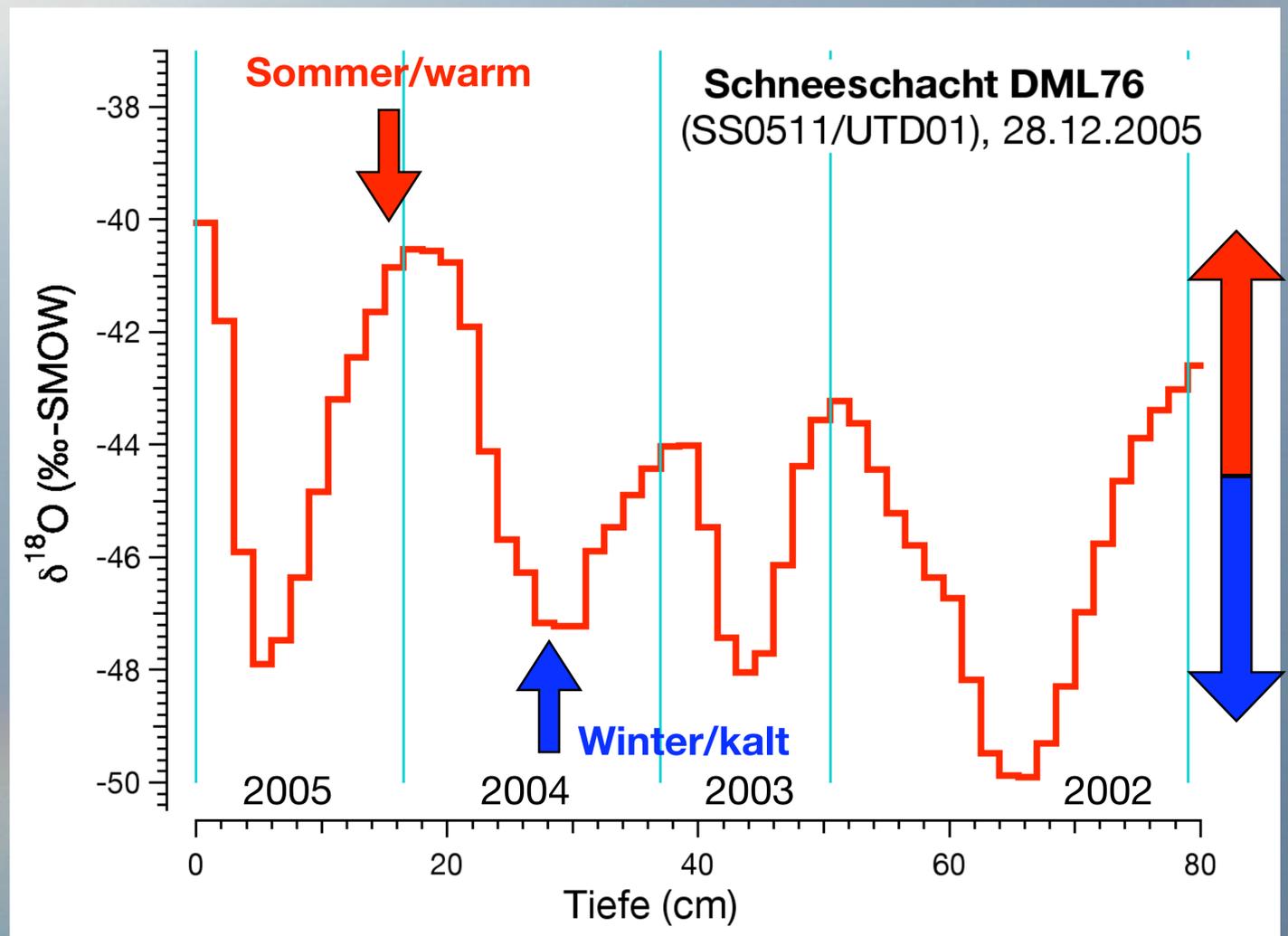
Die Eiskerne werden nach einem vorgegebenen Schnittmuster zersägt. Das Schnittmuster wurde vom EPICA Steering Committee festgelegt und garantiert die Aufteilung und Verteilung des Probenmaterials an die an EPICA beteiligten Labore. Kontinuierliche Proben stellen die Aliquote für Dünnschnitte, CFA,  $\delta^{18}\text{O}$  &  $\delta^2\text{H}$  sowie  $^{10}\text{Be}$  dar. Für Gase und Staub wurde in einem ersten Schritt nur jedes vierte Meterstück verwendet, mit der Option die Messungen später, sobald ein erster Datensatz vorliegt, zu verdichten. Etwa ein Viertel des Kerns wird als Archivstück aufbewahrt um gegebenenfalls in der Zukunft auftauchende Fragestellungen bearbeiten zu können. Das nicht verbrauchte Kernmaterial des EDML-Kerns lagert in einem kommerziellen Kühlhaus in Bremerhaven, das des EDC-Kerns in der Antarktis an der ehemaligen Bohrstelle auf Dome C (durchgehende Kühlung durch die Natur gewährleistet). Die Zersägung des Eiskerns, das sog. Ice core processing fand für EDC auf Dome C, parallel zu den Bohrarbeiten statt. Der EDML-Kern wurde in 1m-Stücken nach Bremerhaven transportiert und dann in den Kühl Laboren des AWI, in einer konzertierten Aktion, mit internationaler Beteiligung aufgeteilt.

# Das „Isotopenthermometer“ ( $\delta^{18}\text{O}$ vs. Temp.)

stabile Isotope zeigen saisonale Schwankungen, mit hohen Werten im Sommer und niedrigen Werten im Winter

W. Dansgaard: Stable isotopes in precipitation. Tellus 16, 436-468 (1963)

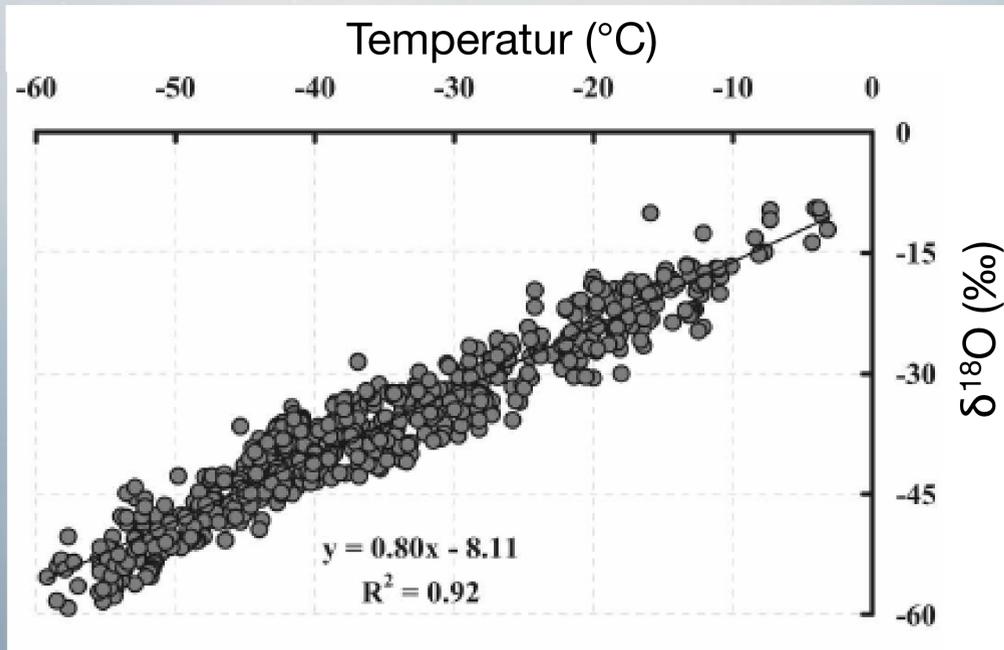
„Isotopenthermometer“ muss kalibriert werden



## Folie16:

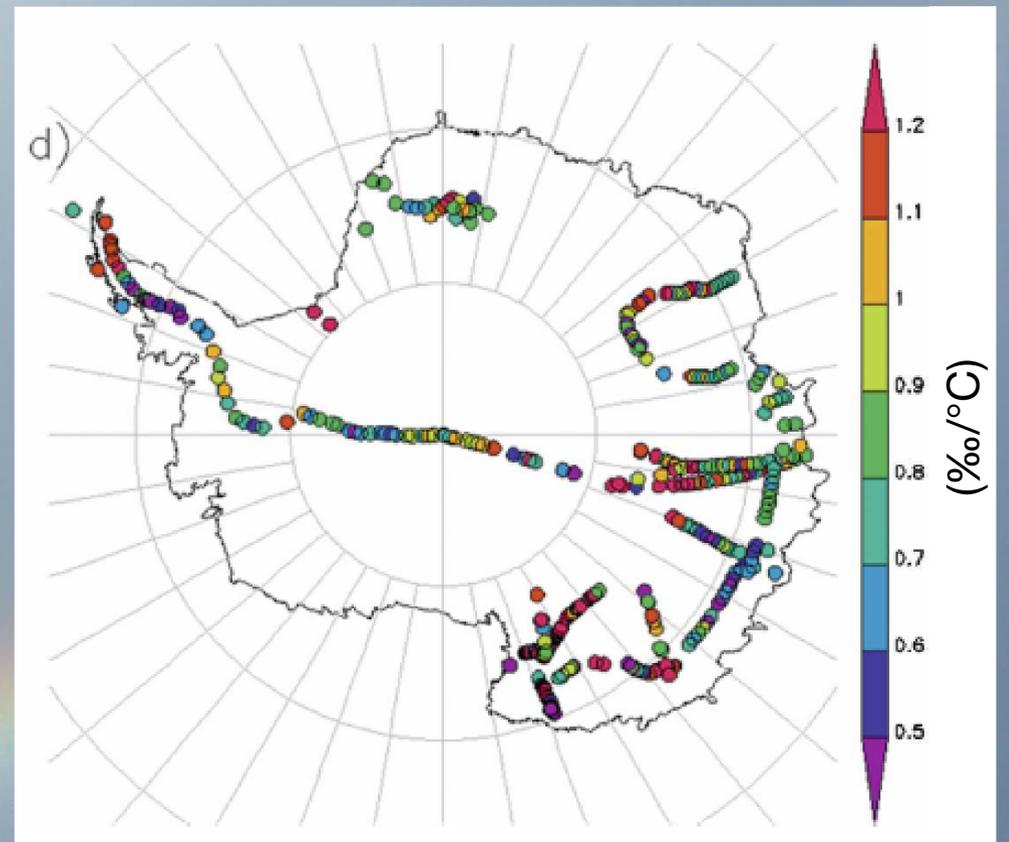
Dass der Isotopenwert in Abhängigkeit von der Temperatur (maßgebend ist hier die Kondensationstemperatur des Niederschlags) schwankt, lässt sich gut zeigen, wenn man die Isotopengehalte in einer Schneedecke bestimmt, wie hier bei diesem Beispiel geschehen. Der Schneeschnitt DML76 wurde auf dem Plateau des Inlandeises, nahe der Kohnen-Station beprobt. Man erkennt deutlich die starken saisonalen Schwankungen, mit „hohen“ Werten im Sommer und „niedrigen“ Werten im Winter. Der Zusammenhang zwischen Isotopengehalten und Temperatur wurde bereits in den 1960er Jahren sehr intensiv von dem Dänen Willi Dansgaard, Universität Kopenhagen, an Niederschlagsproben sowie Schnee- und Eisproben aus Grönland untersucht. Ein Nachteil des Isotopenthermometers ist es, dass der physikalische Zusammenhang nicht eindeutig ist, sondern vom Abkühlungsprozess (isobar oder trockenadiabatisch) abhängt. Das Isotopenthermometer muss also regional kalibriert werden.

# Kalibrierung Isotopenthermometer



Masson-Delmotte, V. et al. (2008): A Review of Antarctic Surface Snow Isotopic Composition: Observations, Atmospheric Circulation, and Isotopic Modeling. *Journal of Climate* **21**, 3359-3387.

$$\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = 0.80 \times T (\text{°C}) - 8.11$$



Lokaler Gradient für  
 $\delta^{18}\text{O}$  - Temperatur (‰/°C)

# Schneedeposition oberstrom der Bohrstelle

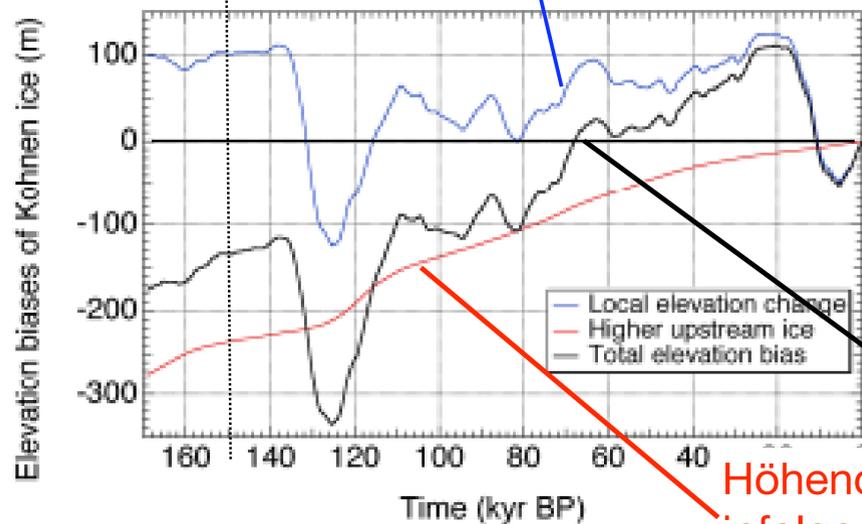
Horiz. Fließgeschwindigkeit des Eises an EDML-Bohrstelle: 0.756 m/a

Eisalter in 2416 m Tiefe ist 150 ka

Isotopen-Höhengradient: -0.63 - 0.96 ‰/100m

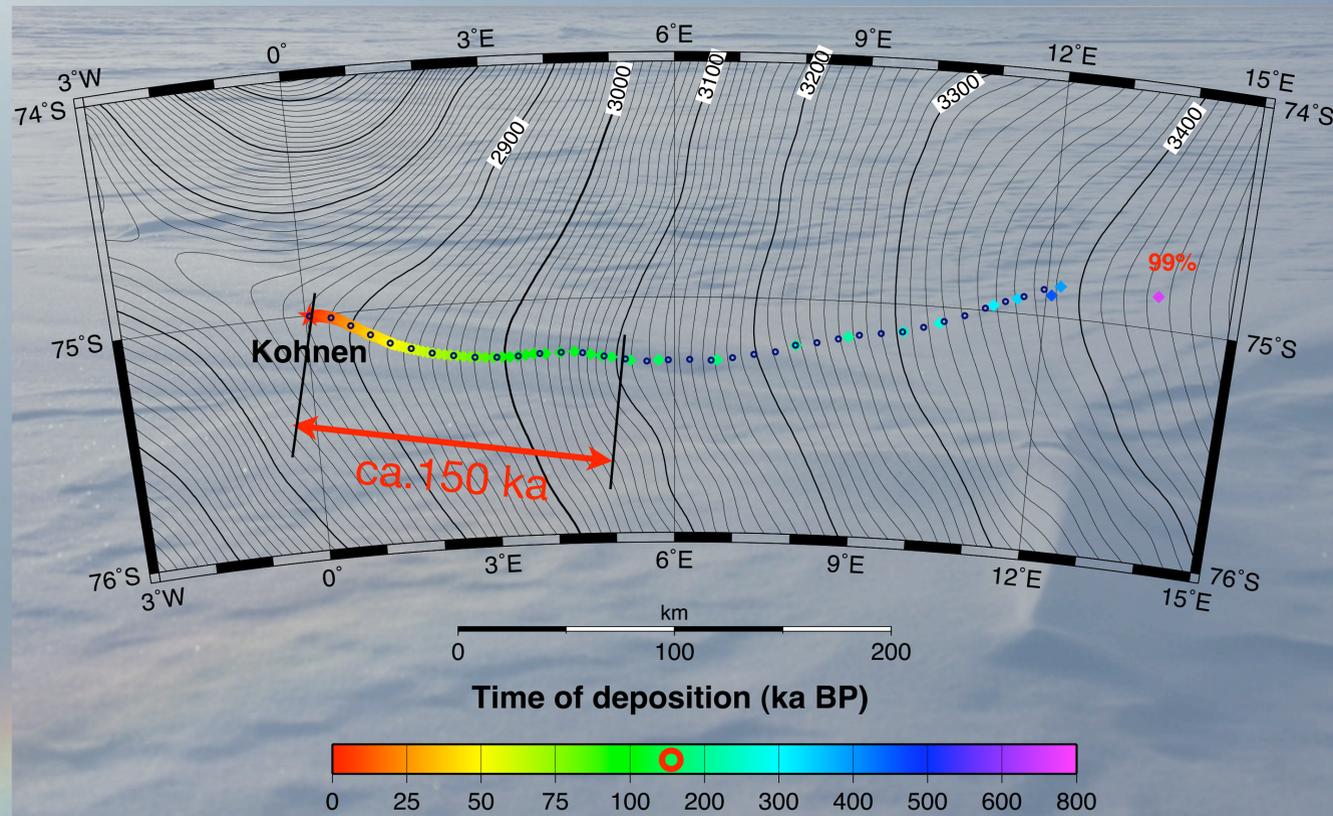
Isotopen-Temperaturgradient: 0.82 ‰/°C

## Höhenänderung infolge Eisvolumenänderung



resultierende Höhendifferenz

Höhendifferenz Bohrstelle-Depositionsort  
infolge Horizontalbewegung



P. Huybrechts et al.: Non-climatic biases for EDML ice core record; *Climate of the Past*, 3, 577–589 (2007)

Kolloquium DMG ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



Folie18:

### Korrekturen für Schneedeposition oberstrom der Bohrstelle EDML

Abb. oben rechts:

Eis-Fließlinie zum Bohransatzpunkt von EDML nach Huybrechts et al. (2007). Die Farbcodierung gibt die Zeit (ka BP) an, zu der der Schnee ursprünglich an der Oberfläche, an der gezeigten Stelle abgelagert wurde. Das Eis im EDML-Eiskern bis zur Tiefe von 2400 m, entsprechend einem Eisalter von 150 ka, wurde im Gebiet von EDML (Kohnen) bis ca. 150 km oberstrom abgelagert.

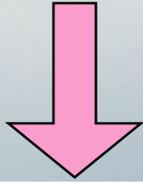
Abb. unten links: aus Huybrechts et al. (2007)

Originalunterschrift: Differences in surface elevation (m) of Kohnen ice with respect to its present-day elevation shown as a function of time. The total elevation bias (black line) has a component due to horizontal advection (red line, given as the elevation difference between Kohnen and the place of origin of the ice particle for present-day topography) and due to the local elevation change at the point of particle origin at the time of deposition (blue line, given as the elevation difference at the place of origin between today and the time of origin).

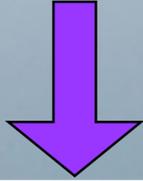
Bei der Interpretation der als Tiefenprofile am EDML-Kern gemessenen Größen bzw bei der Umrechnung in eine Zeitreihe müssen verschiedene Korrekturen angebracht werden, die berücksichtigen, dass der Schnee nicht an der heutigen Bohrstelle sondern weiter oberhalb abgelagert wurde. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass sich die Höhenlage der Schneeoberfläche im erfassten Zeitraum insgesamt verändert hat (Im Glazial wegen geringer Niederschläge niedrigere Oberfläche als in Interglazialen mit höheren Niederschlägen). Die resultierende Höhendifferenz wird dann mit dem Isotopenhöhengradienten, der empirisch für das Einzugsgebiet bestimmt wird, in einen Isotopenkorrekturwert umgerechnet.

P. Huybrechts et al.: Ice thinning, upstream advection, and non-climatic biases for the upper 89% of the EDML ice core from a nested model of the Antarctic ice sheet. *Climate of the Past*, 3, 577–589, (2007). [http://www.clim-past.net/special\\_issue7.html](http://www.clim-past.net/special_issue7.html)

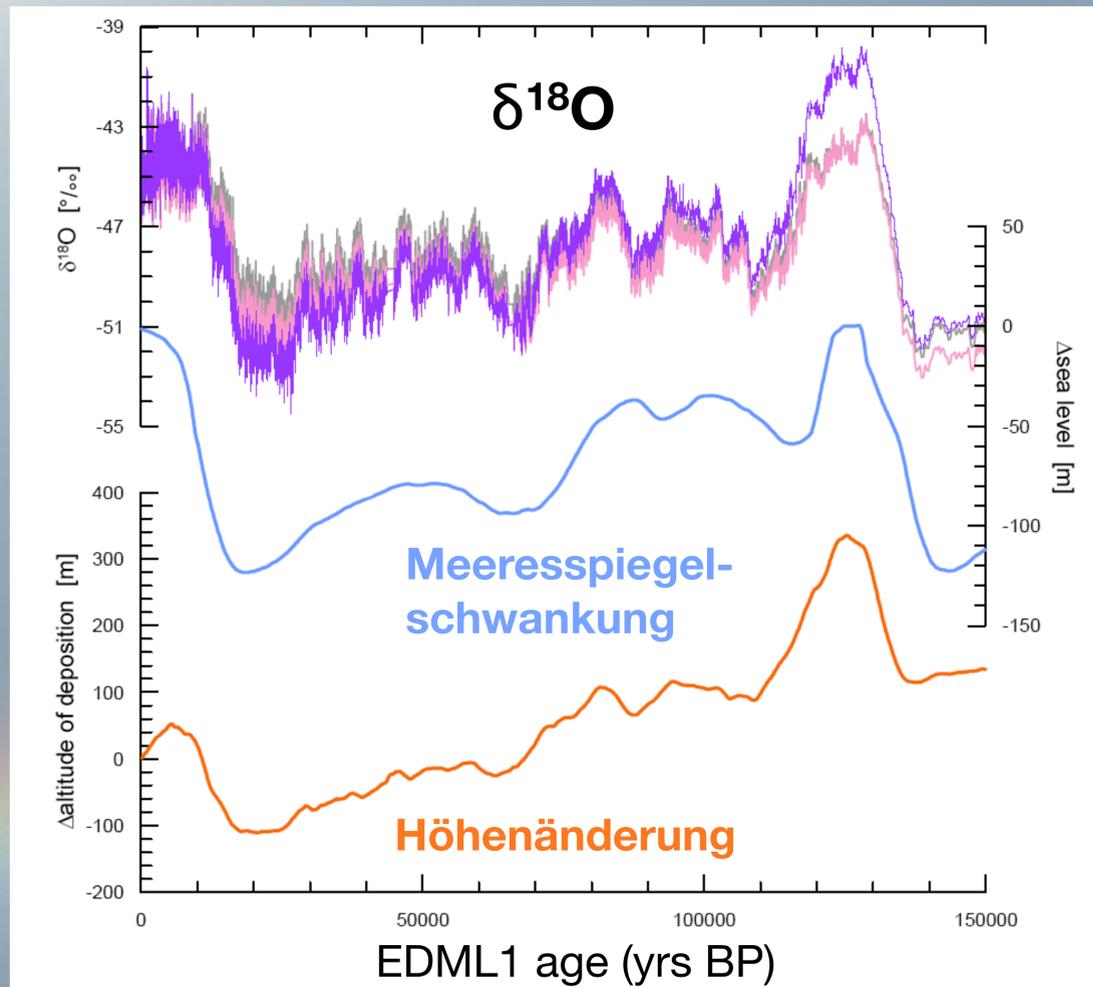
grau:  $\delta^{18}\text{O}$ -Messwerte Bohrkern



rosa:  $\delta^{18}\text{O}$  mit Korrektur für Meeresspiegelschwankungen



violett: resultierende  $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve mit Korrektur für Meeresspiegelschwankungen & Höhenänderungen



EPICA Community Members: One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. Nature 444, 195-198 (2006)



Kolloquium DMG ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



19

Folie19:

Isotopenprofile für den EDML-Eiskern

Quelle: EPICA community members 2006. Supplement

Originalabb.-Unterschrift:

Figure S3: Top: Corrected  $\delta^{18}\text{O}$  record at EDML: measured  $\delta^{18}\text{O}$  data representative for the upstream site of deposition (grey); sea level corrected  $\delta^{18}\text{O}$  data representative for the upstream site of deposition (pink); sea level and upstream corrected  $\delta^{18}\text{O}$  record representative for the EDML current drill site (purple). Middle: Sea level changes used for the correction as derived from benthic  $\delta^{18}\text{O}$  and ice sheet modeling. The strongest effect is encountered for peak glacial periods where the continental ice volume was largest; Bottom: Elevation of the initial place of snow deposition relative to the current drill site at 2892m a.s.l. determined by a high-resolution higher order flow model nested in a 3D large ice sheet model used for altitude/upstream correction. This curve comprises both upstream effects (long-term upward trend in the correction) as well as local altitude changes of the ice sheet at the site and time of snow deposition in the past (variations around the long-term trend).

Zusätzlich zu der in Folie 18 beschriebenen Höhenkorrektur muss auch berücksichtigt werden, dass sich der Ausgangsisotopengehalt an der Meeresoberfläche, im Wechsel von Warm- und Kaltzeiten (Eisvolumenänderung) ändert.

Die ursprünglich gemessenen Werte werden durch die graue Kurve dargestellt. Die rosa Kurve zeigt die für die Meeresspiegelschwankungen korrigierte Kurve. Die violette Kurve wurde zusätzlich mit den Höhenkorrekturen versehen und stellt die Zeitreihe dar, die die Schwankungen des Isotopengehalts und damit der Lufttemperatur in der Vergangenheit beschreibt. Nähere Details zu den Korrekturen sind im Supplement zu dem genannten Artikel beschrieben (nur online).

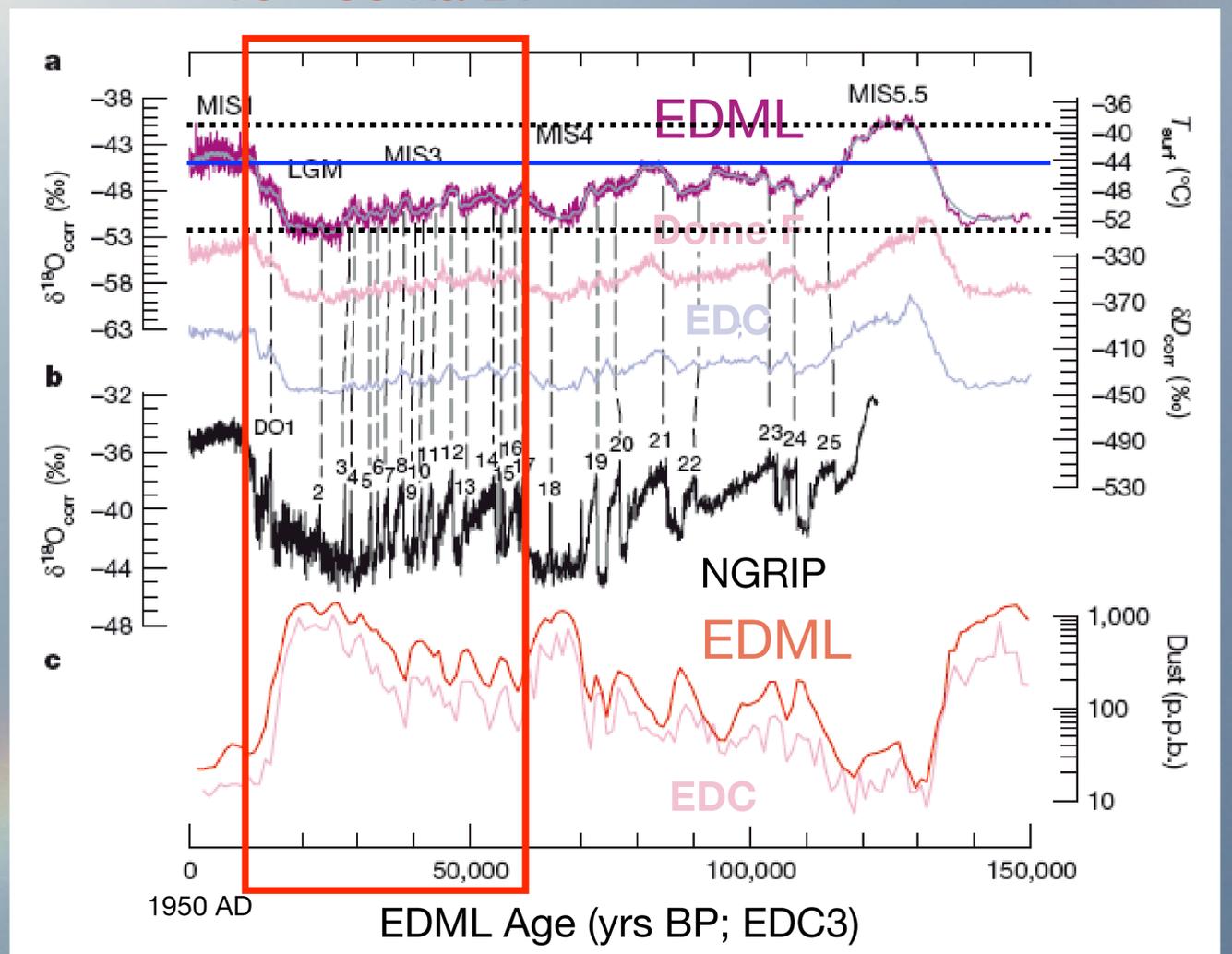
Die entsprechenden Daten sind unter [www.pangaea.de](http://www.pangaea.de) archiviert und öffentlich zugänglich.

EPICA Community Members: One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. Nature 444, 195-198 (2006)

Hohe Co-Varianz zwischen den Antarktischen Eiskernen EDML, Dome F und EDC

$\delta^{18}\text{O}$ -Spitzen in der Antarktis korrespondieren mit DO-Ereignissen in Grönland.  
 $\delta^{18}\text{O}$ -Spitzen in EDML deutlicher als in EDC und Dome F

Synchronisation EDML und EDC u.a. mit Staubgehalt.  
 Kaltphasen: hoher Staubgehalt  
 Warmphasen: niedriger Staubgehalt



Quelle: EPICA Community Members: *Nature*, **444**, 195-198, (2006). data: doi:10.1594/PANGAEA.552235

Folie 20:

Isotopenprofile für die Antarktischen Eiskerne EDML, Dome F und EDC im Vergleich zu dem grönländischen Kern NGRIP

Quelle: EPICA community members 2006.

Originalabb.-Unterschrift:

Figure 1: Antarctic stable isotope records show synchronous millennial variations during the last glacial, whereas rapid variations are encountered in Greenland.

a) EDML  $\delta^{18}\text{O}$  record (purple, 0.5-m resolution; grey, 15-m running mean) after sea level and upstream correction (see Supplementary Information) over the past 150 kyr. The record shows features similar to those of the EDC (blue) and the Dome F (pink) isotope records but with more fine structure during MIS3 and MIS4. We note that EDML and EDC are plotted on the new common EDC3 timescale (see Supplementary Information) while Dome F is plotted on its individual timescale. The temperature axis on the right side indicates approximate surface temperatures at EDML as derived from the spatial  $\delta^{18}\text{O}$ /temperature gradient (see Supplementary Information).

b)  $\delta^{18}\text{O}$  record of the NGRIP ice core (grey).

c) Mineral dust records of the EDML (red) and EDC (pink) ice cores at 1,000-yr resolution; these dust records were used for synchronization of the cores.

Die Eiskerne EDC und EDML wurden anhand des gemessenen Staubgehaltes synchronisiert und auf einer gemeinsamen Zeitskala (EDC3) dargestellt. Man erkennt, dass die Schwankungen des Isotopengehalts und damit der Lufttemperatur innerhalb der Ostantarktis sehr ähnlich verlaufen sind. Am Bohransatzpunkt des EDML-Kerns findet man die höchsten Akkumulationsraten. Dementsprechend zeigt dieser Kern auch besser aufgelöste Feinstrukturen, zumindest bis 80.000 Jahre vor Heute (Tiefe ca. 1970 m bzw. 71% Gesamttiefe). Darunter macht sich dann die in größerer Tiefe stärkere Ausdünnung gegenteilig bemerkbar.

Im Vergleich mit der NGRIP-Kurve (gestrichelte Linien) sieht man, dass offensichtlich die schnellen klimatischen Schankungen im letzten Glazial (Dansgaard-Oeschger Events) auch in der Antarktis ihre Gegenstücke haben. Dies wird in einer späteren Folie noch näher diskutiert.

EPICA Community Members: One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature* 444, 195-198 (2006)

# Synchronisation NGRIP & EDML mit CH<sub>4</sub>-Gehalt

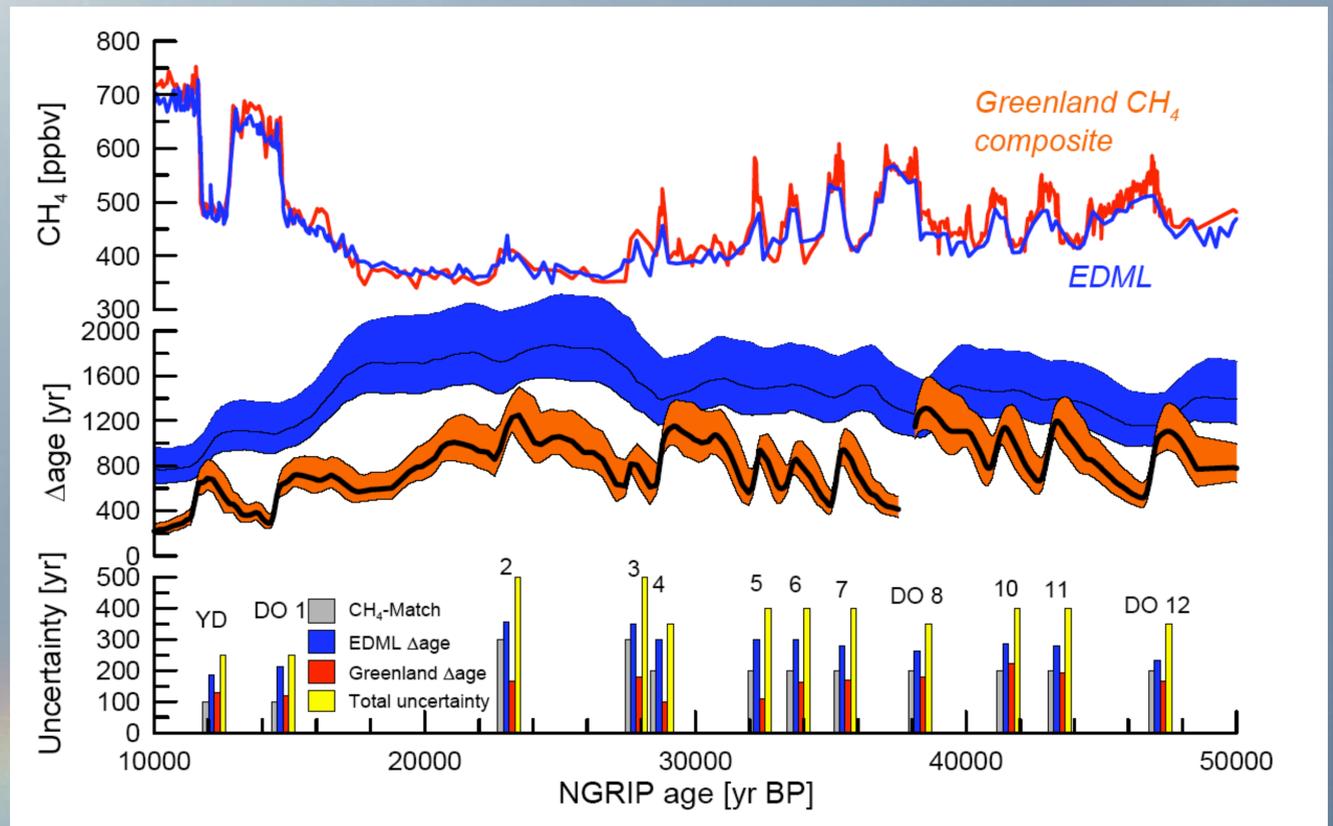
Methan Grönland  
(GRIP, NGRIP)

Methan EDML

$\Delta$ age:

Unterschied Eisalter - Gasalter;  
abhängig u.a. von Akkumulationsrate,  
Temperatur

Unsicherheiten der Datierung für  
einzelne DO-Ereignisse



Methanschwankungen sind global synchron; absolute  
Konzentrationen im Norden und Süden unterschiedlich



EPICA Community Members: One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. Nature 444, 195-198 (2006)

Kolloquium DMG ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



21

Folie21:

Synchronisation von EDML und NGRIP mit Methangehalt

Quelle: EPICA community members 2006.

Originalabb.-Unterschrift:

Figure S2:

Top: CH<sub>4</sub> records for Greenland and EDML.

Middle:  $\Delta$ age with uncertainty corresponding to a 25% change in accumulation. The effect is comparable to a 10% change in temperature. Blue for EDML and red for the Greenland composite, respectively. Before 38 kyr BP the synchronization is based on NGRIP data and the NGRIP  $\Delta$ age is shown. After 38kyr the synchronization is based on GRIP CH<sub>4</sub> data and the GRIP  $\Delta$ age is shown.

Bottom: Contributions to the synchronisation uncertainty for individual rapid climate changes. Grey bar represents the uncertainty of the CH<sub>4</sub> synchronization. Blue and Red bars show the uncertainty of  $\Delta$ age assuming a 25% change in accumulation for EDML and the Greenland composite, respectively. The three components are added in quadrature to a total uncertainty for the synchronization of the ice records (yellow bars).

Die global synchron verlaufenden Schwankungen des Methangehalts ermöglichen es, Eisbohrkerne der Antarktis mit Eisbohrkernen aus Grönland zu synchronisieren. Dies wurde mit den am EDML-Kern gemessenen Methangehalten und einer aus Messwerten von GRIP (heute bis 38 ka BP) und NGRIP (vor 38 ka BP) zusammengesetzten Datenreihe durchgeführt. Im oberen Teil der Abbildung ist das Ergebnis der Synchronisation dargestellt. Eine Schwierigkeit tritt bei der Umrechnung der Gasalter in Eisalter auf, die für GRIP/NGRIP und EDML eine unterschiedliche Altersdifferenz, das so genannte  $\Delta$ age aufweisen. Im mittleren Teil der Abbildung ist die für GRIP/NGRIP und EDML berechnete Altersdifferenz mit den Unsicherheiten die sich aus Temperatur und Akkumulationsschwankungen ergeben, dargestellt. Entsprechend ergeben sich die im unteren Teil als Säulendiagramme dargestellte Datierungsunsicherheit für die schnellen klimatischen Schwankungen (DO-Ereignisse), die beim GRIP/NGRIP Eiskern auftreten und ihre Gegenspieler auch bei EDML haben.

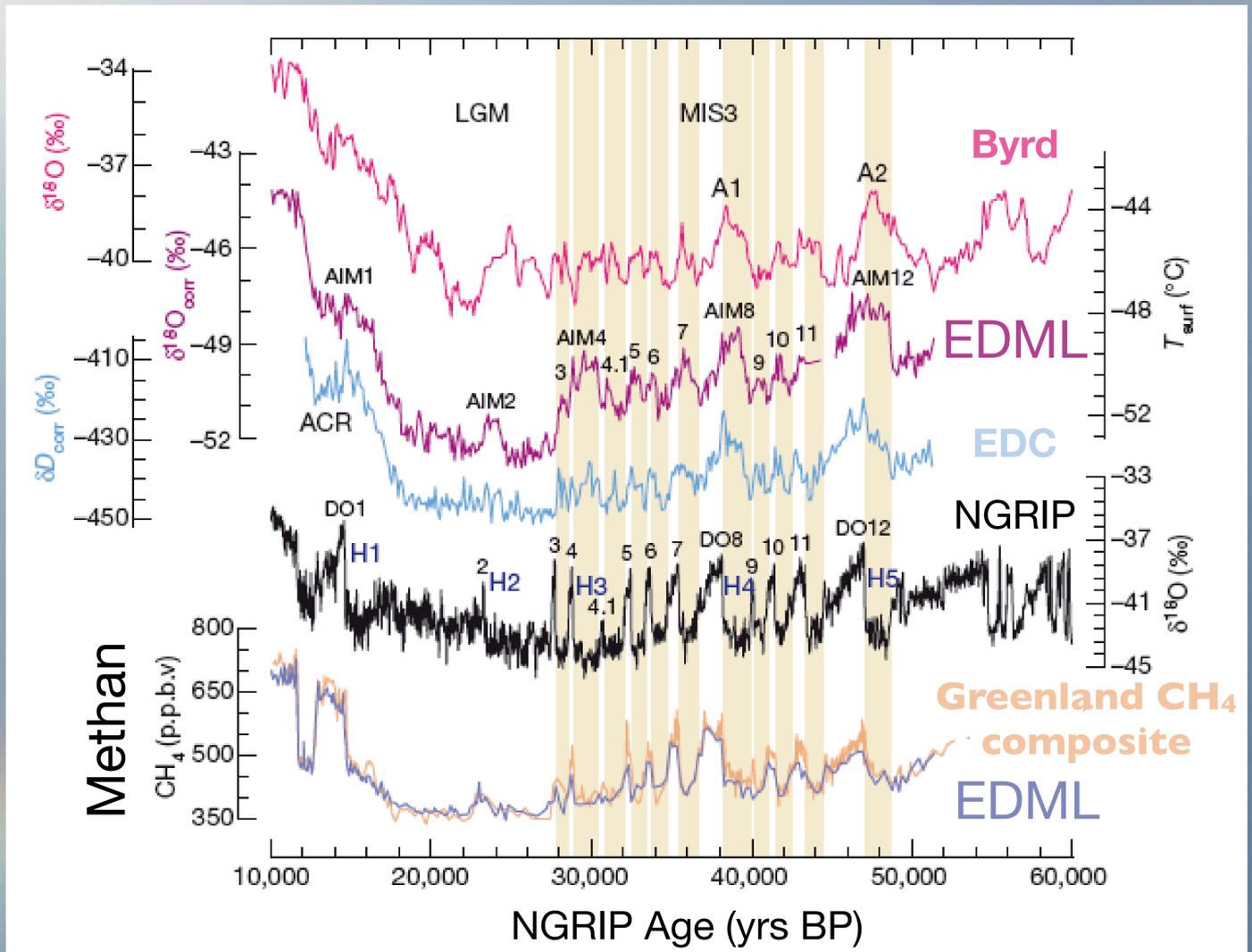
EPICA Community Members: One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. Nature 444, 195-198 (2006)

farbig gezeichnet sind  
Kaltphasen im Norden

A1 und A2 bereits im Byrd-Kern  
erkannt und DO 8 und DO 12  
zugeordnet.

Neue Nomenklatur: AIM  
Antarctic Isotope Maximum

Synchronisation EDML und  
NGRIP mit Methangehalt.  
Kaltphasen: niedriger Methangehalt  
Warmphasen: hoher Methangehalt



Quelle: EPICA Community Members: *Nature*, **444**, 195-198, (2006). data: [doi:10.1594/PANGAEA.552235](https://doi.org/10.1594/PANGAEA.552235)



Kolloquium DMG ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



22

Folie22:

Antarktische Eiskerne synchronisiert mit NGRIP

Quelle: EPICA community members 2006.

Originalabb.-Unterschrift:

Figure 2: Methane synchronization of the EDML and the NGRIP records reveals a one-to-one assignment of each Antarctic warming with a corresponding stadial in Greenland. Displayed are 100-yr averages during MIS3 in the EDML, EDC and Byrd ice core for the time interval 10–60 kyr BP in comparison with the NGRIP  $\delta^{18}\text{O}$  record from Northern Greenland. All records are  $\text{CH}_4$  synchronized and given on the new GICC05 age scale for the NGRIP ice core, which has been derived by counting annual layers down to 41 kyr and by a flow model for older ages. Yellow bars indicate the Greenland stadial periods that we relate to respective Antarctic temperature increases. The approximate timing of Heinrich layers in North Atlantic sediments is indicated as well. The y axis on the right side indicates approximate temperature changes at EDML based on the modern spatial gradient between  $\delta^{18}\text{O}$  and temperature.

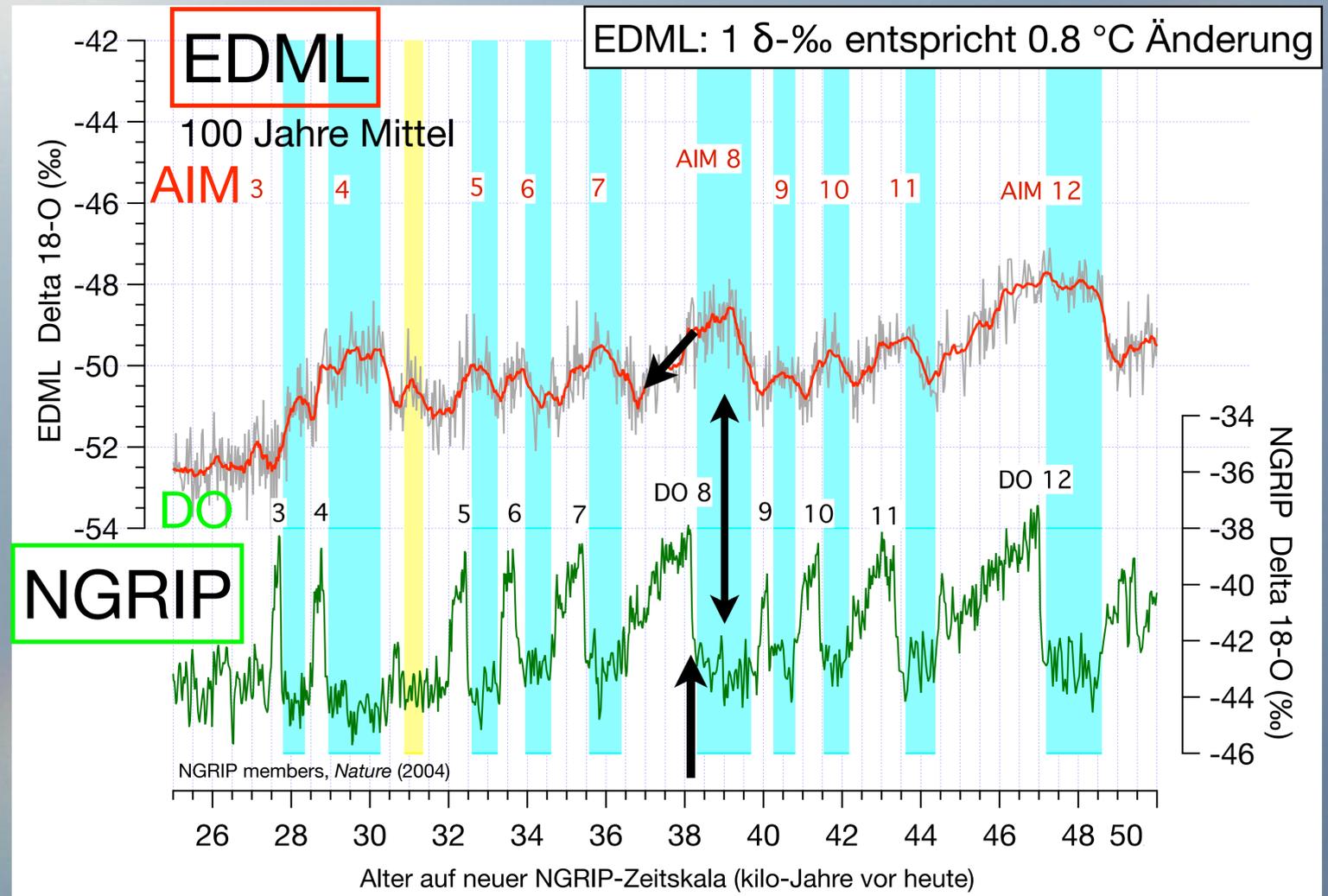
Die Abbildung zeigt die drei antarktischen Eiskerne Byrd, EDML und EDC im Vergleich mit dem grönländischen Eiskern NGRIP im Zeitbereich bis 60.000 Jahre vor Heute. Alle Kerne sind auf der Zeitskala von NGRIP gezeichnet, nachdem sie über den Methangehalt synchronisiert worden waren. Bei NGRIP wurden einzelne Jahresschichten zurück bis 41.000 Jahre vor Heute abgezählt. Darunter wurde das Eis mit Hilfe numerischer Modelle datiert. Die gelb gefärbten Balken markieren Stadiale im letzten Glazial, wie sie im Kern NGRIP erkennbar sind. Sie sind alle mit Zeiten eines Temperaturanstiegs im Süden korreliert, wie auf Folie 23 für die Zeit 25-50.000 Jahre vor Heute demonstriert wird.

EPICA Community Members: One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature* 444, 195-198 (2006)

# Vergleich Antarktis (EDML) - Grönland (NGRIP)

Jedes Antarktische Isotopen Maximum (AIM) im EDML-Kern entspricht einem DO Ereignis in Grönland (NGRIP)

In der Antarktis beginnt die Erwärmung in einer Kaltphase (Stadial) des Nordens, die Abkühlung in einer Warmphase (Interstadial)



Kolloquium DMG ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



Folie23:

## Vergleich Antarktis (EDML) - Grönland (NGRIP)

Die Erwärmung im Süden beginnt während eines Stadials (kalte Phase) im Norden und führt zu einem sog. Antarktischen Isotopenmaximum (AIM). Mit einsetzender Abkühlung im Süden kommt es zu einem sprunghaften Temperaturanstieg im Norden, den sog. schnellen klimatischen Schwankungen oder Dansgaard-Oeschger-Ereignissen (D/O). Allen DO-Ereignissen im Norden sind AIMs im Süden zugeordnet. Dieses Wechselspiel wird als „Bipolar Seesaw“ (bipolare Wippe) bezeichnet. Es hängt mit einem Wärmestau im Süden (wahrscheinlich Erwärmung des südlichen Ozeans) und einem plötzlichen Wärmetransport nach Norden und damit einer Abkühlung im Süden und einer sprunghaften Erwärmung im Norden zusammen. Der Wärmetransport erfolgt über die Atlantische meridionale Ozeanzirkulation (AMOC), die in nördlichen Stadialen reduziert ist (Erwärmung im Süden) und in Interstadialen voll wirksam wird (Abkühlung im Süden).

Im EDC-Kern, der 8 Glazialzyklen umfasst, treten AIMs auch in früheren Glazialen auf. Deshalb wird vermutet, dass auch im Norden D/O-Ereignisse in früheren Glazialen existierten (Jouzel et al. 2007).

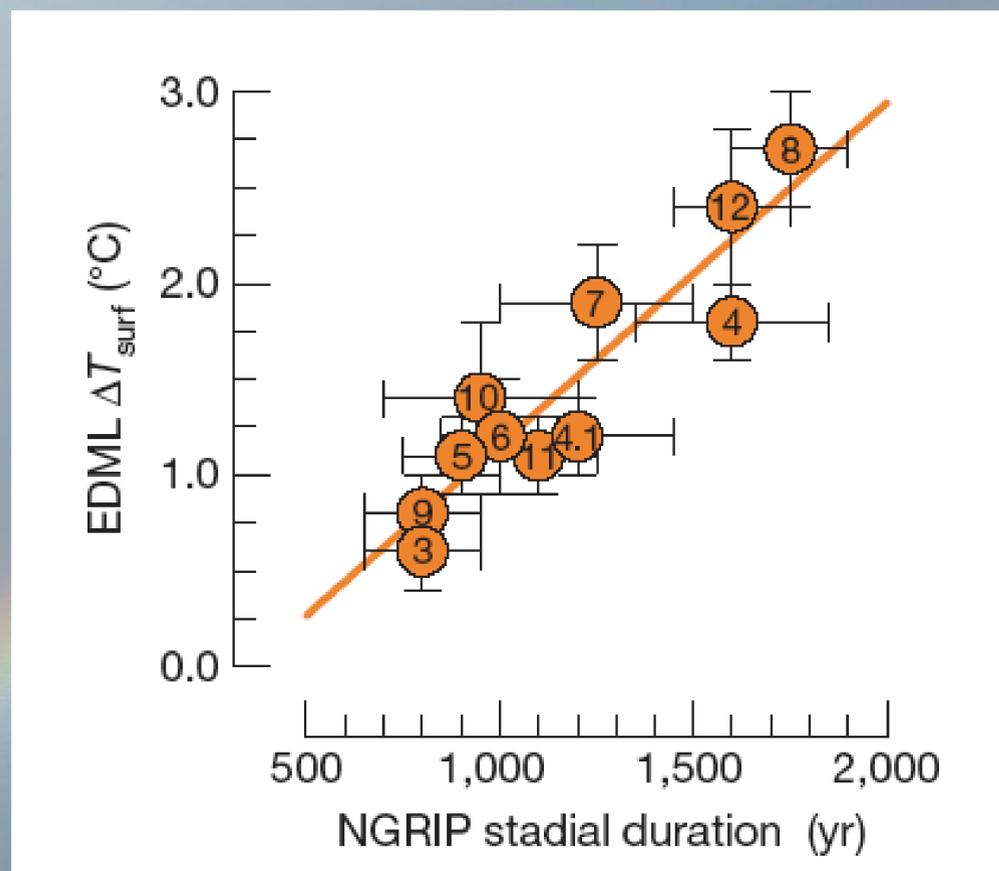
EPICA Community Members: One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. Nature 444, Jouzel et al.: Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. Science 317, 793-796 (2007)

## Dansgaard-Oeschger-Ereignisse

Dansgaard-Oeschger-Ereignisse (D/O-Ereignisse) sind klimatische Schwankungen in der Nordhemisphäre während des letzten Glazials (Weichsel-Eiszeit), mit schneller Erwärmung und langsamer Abkühlung. Sie sind benannt nach dem Dänen Prof. Dr. Willi Dansgaard (\*1922), Professor am Niels-Bohr-Institut der Universität Kopenhagen und dem Schweizer Prof. Dr. Hans Oeschger (1927-1998), Professor am Physikalischen Institut der Universität Bern. 24 D/O-Ereignisse wurden erstmals bei der Analyse des Eisbohrkerns GRIP (1990-1992) entdeckt und in den nachfolgenden Eisbohrkernen GISP2 und NGRIP bestätigt. In den Eisbohrkernen wurden schnelle Anstiege des Gehalts an dem stabilen Isotope <sup>18</sup>O nachgewiesen, die auf einen Temperaturanstieg von bis zu 15°C innerhalb von wenigen Jahrzehnten hinweisen. Amplitude und Dauer der D/O-Ereignisse sind unterschiedlich, der Anstieg aber jeweils etwa gleich schnell. Während des letzten Interglazials (Eem-Warmzeit) wurden D/O-Ereignisse nicht nachgewiesen.

# Vergleich Antarktis (EDML) - Grönland (NGRIP)

Grad der Erwärmung im Süden ist linear korreliert mit der Dauer der Stadiale im Norden



Quelle: EPICA Community Members: *Nature*, **444**, 195-198, (2006). data: doi:10.1594/PANGAEA.552235



Kolloquium DMG ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



24

Folie24:

Vergleich Antarktis (EDML) - Grönland (NGRIP)

Quelle: EPICA community members 2006.

Originalabb.-Unterschrift:

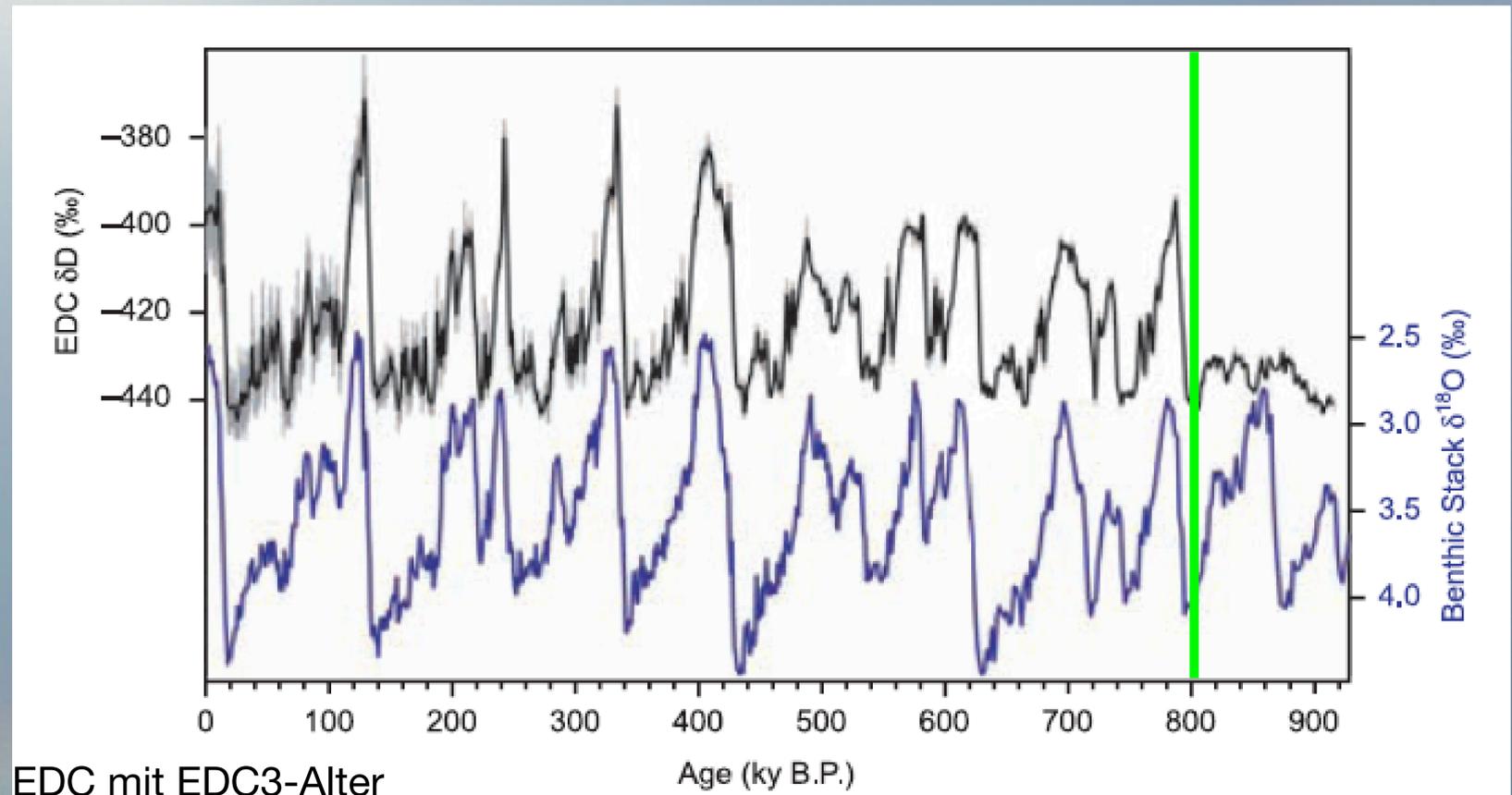
Figure 3: Amplitudes of Antarctic warmings show a linear relationship ( $r^2=0.85$ ) with the duration of the accompanying stadal in Greenland during MIS3. The amplitude was determined from the Antarctic  $\delta^{18}\text{O}$  maximum to the preceding minimum of each event; the stadal duration is defined by the interval between the midpoint of the stepwise temperature change at the start and end of a stadal on the extended GICC05 age scale. Error bars reflect the estimated uncertainty in the definition of the maxima and minima in  $\delta^{18}\text{O}$  at EDML and in the duration of the concurrent stadal period. Numbers indicate the corresponding AIMs and D-O events.

Die Amplitude der AIMs ist mit der Dauer der D/O-Ereignisse korreliert.

EPICA Community Members: One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature* 444, 195-198 (2006)

# Vergleich Dome C (Eis) mit Sedimenten (Foraminiferen)

Übereinstimmung  
bis 810 ka BP,  
  
d.h. klimatisch  
interpretierbar  
  
untersten 60 m  
offensichtlich  
gestört.



Benthic stack: Lisiecki & Raymo (2005)  
Deuterium EDC: Jouzel et al. (2007)

Folie25:

Vergleich Dome C (Eis) mit Sedimenten (Foraminiferen)

Quelle: Jouzel et al. (2007).

Originalabb.-Unterschrift:

Fig. 1. Comparison of the  $\delta D$  Dome C record on the EDC3 time scale (with all data points in light gray and a smoothed curve in black) with the benthic oxygen-18 record (blue) on its own time scale. The 3259.7-m  $\delta D$  record, which includes published results down to 788m, benefits from an improved accuracy ( $1\sigma$  of  $\pm 0.5\text{‰}$ ) and a much more detailed resolution of 55 cm all along the core, whereas the previously published record was based on 3.85-m samples. The agreement between the two time series back to  $\sim 800$  ky B.P. justifies the use of oceanic sediment nomenclature (MIS) for describing the ice core record.

Die am EDC-Kern mit einer Tiefenaufösung von 55cm gemessenen Deuteriumgehalte (Jouzel et al., 2007) werden mit einer gestapelten Kurve von benthischen  $\delta^{18}\text{O}$ -Werten (Lisiecki & Raymo, 2005) verglichen. Die beiden Kurven zeigen bis ca. 810.000 Jahre vor Heute (ca. 3200m EDC-Tiefe) eine gute Übereinstimmung, sodass man davon ausgehen kann, dass die EDC-Zeitreihe bis zu dieser Tiefe eine ungestörte klimatische Zeitreihe darstellt. Die letzten 60 m des EDC-Kerns sind offensichtlich durch die Fließbewegung des Eises gestört und daher nicht mehr klimatisch interpretierbar.

Lisiecki, L.E. & M.E. Raymo: A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records. PALEOCEANOGRAPHY, Vol. 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071, (2005)

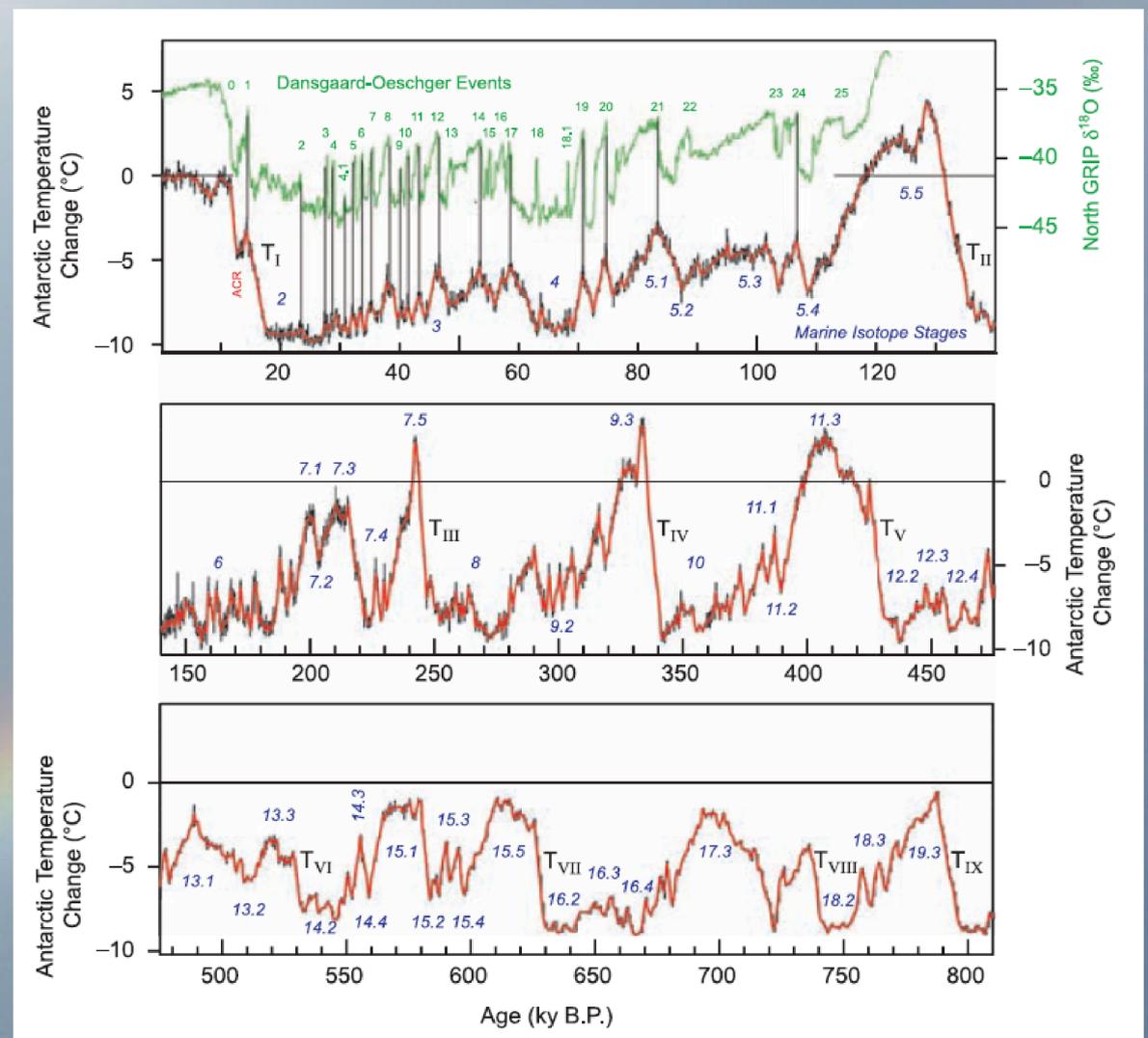
Jouzel et al.: Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. Science 317, 973-795 (2007)

# Der EDC-Eiskern

Alle DO-Ereignisse des Nordens finden sich auch im EDC-Kern wieder

Auch in früheren Glazialen treten vergleichbare Schwankungen auf.

Stärke der Interglaziale abhängig von Phasenlage von Präzession und Obliquität



Jouzel et al.: Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. Science 317, 973-795 (2007)



Kolloquium DMG ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



26

## Folie26:

Der EDC Eiskern

Quelle: Jouzel et al. (2007).

Originalabb.-Unterschrift:

Fig. 2. Dome C temperature anomaly as a function of time over the past 810 ky. Back to 140 ky B.P., we report 100-year mean values, whereas for earlier periods (middle and lower traces),  $\Delta T_s$  is calculated from 0.55-m raw data; a smooth curve using a 700-year binomial filter is superimposed on this detailed record.

In the upper trace (which is plotted on a more highly resolved time axis), we show the correspondence between the DO events as recorded in the North Greenland Ice Core Project isotopic record and AIM events recorded in the EDC temperature record during the last glacial period and the last deglaciation. We have indicated the successive MIS, and the transitions are labelled from T1 to TIX.

Die Abbildung zeigt die Temperaturanomalien, die aus den Schwankungen des Deuteriumgehaltes des EDC-Kerns berechnet wurden. Im oberen Teil der Abbildung ist die Zeitachse gegenüber den unteren Graphen gedehnt. Zwei wichtige Erkenntnisse lassen sich ableiten:

Erstens, auch im EDC-Kern sind während des letzten Glazials die AIMS in gleicher Zahl nachzuweisen wie im EDML-Kern. Sie lassen sich jeweils einem DO-Ereignis im Norden (NGRIP-Kern) zuordnen.

Zweitens, auch in früheren Glazialen treten Schwankungen auf, die den AIMS entsprechen. Daraus kann man den Schluss ziehen, dass auch im Norden in früheren Glazialen DO-Ereignisse aufgetreten sein müssen. Da das Eis auf Grönland jedoch nicht so alt ist wie das Eis der Antarktis können solche DO-Ereignisse nicht direkt nachgewiesen werden.

Jouzel et al.: Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. Science 317, 973-795 (2007)

# Antarctic ice core records: Vostok and EPICA CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and δD

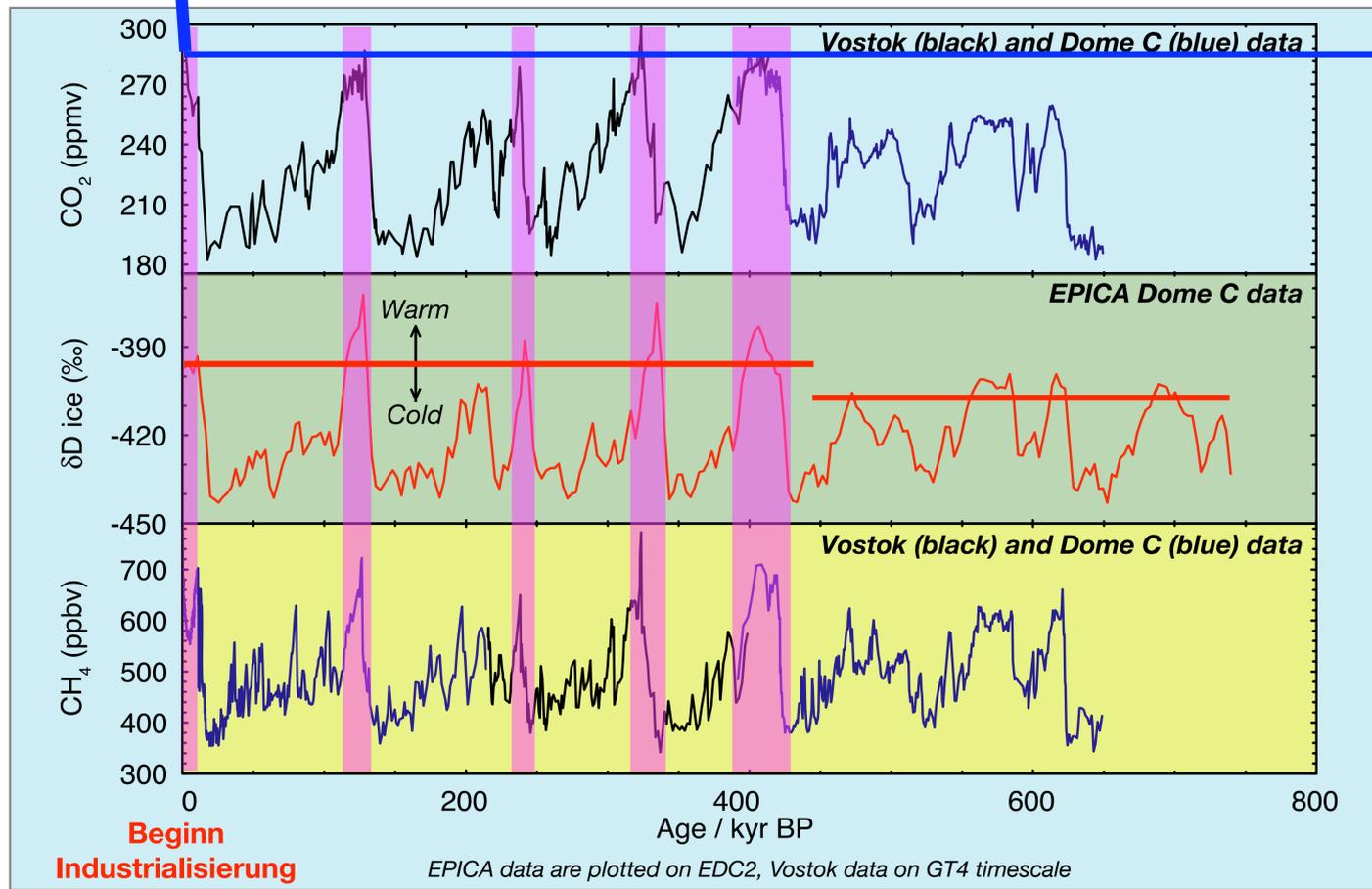
heute 385 ppm

vor 1850 AD

Kohlendioxid

Deuterium  
bzw.  
Temperatur

Methan

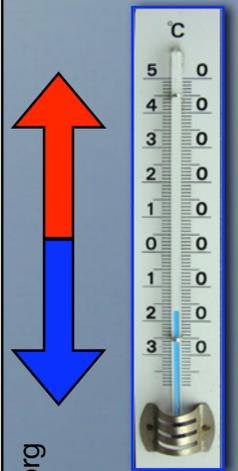


GLOBAL  
I G B P  
CHANGE

Petit et al., 1999 (Vostok), Siegenthaler et al., 2005 (Dome C - CO<sub>2</sub>),  
Spahni et al., 2005 (Dome C - CH<sub>4</sub>), EPICA community members, 2004 (δD)

PAGES  
PAST GLOBAL CHANGES

The record of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> over the last 650,000 years from Antarctic ice cores. The figure shows data both from the Vostok and the EPICA Dome C cores, and is shown in comparison to the deuterium (temperature proxy) record from Dome C.



Quelle: <http://www.pages-igbp.org>



Kolloquium DMG ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



Folie27:

Antarctic Ice Core Records: Vostok and EPICA.

Quelle der Abb.: [www.pages.unibe.ch](http://www.pages.unibe.ch)

Original-Abbildungsunterschrift: The record of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> over the last 650,000 years from Antarctic ice cores. The figure shows data both from the Vostok and the EPICA Dome C cores, and is shown in comparison to the deuterium (temperature proxy) record from Dome C.

Credits:

Petit, J.R. et al.: Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399: 429-436 (1999)

Siegenthaler et al. Stable Carbon Cycle-Climate Relationship During the Late Pleistocene. *Science* 310, 1313-1317 (2005):

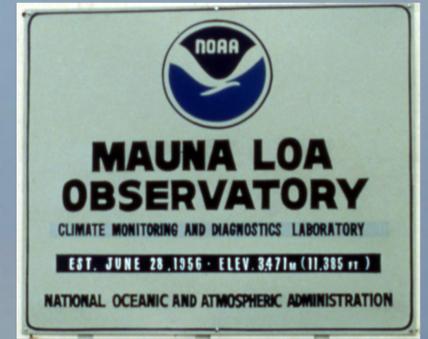
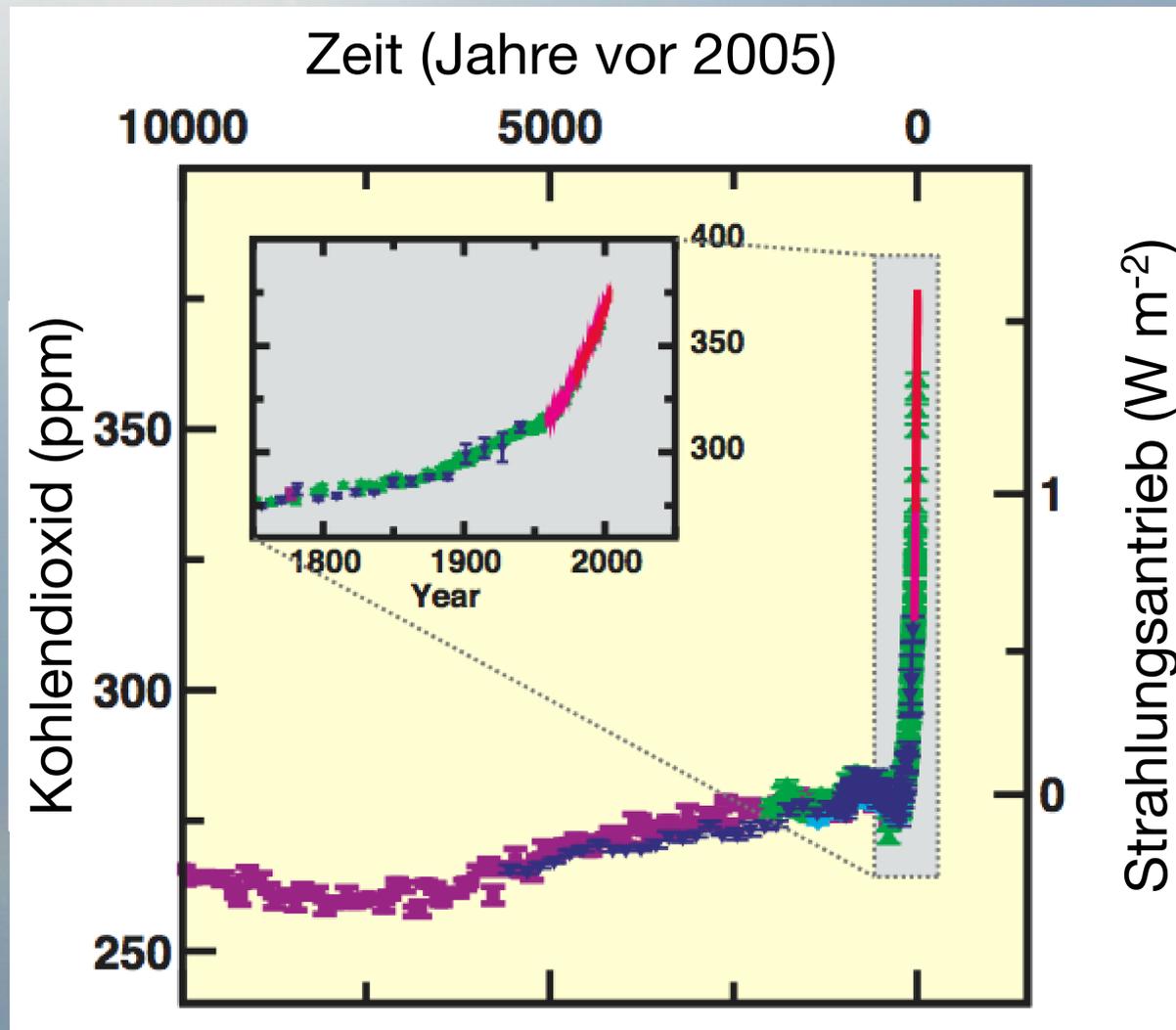
Spahni et al.: Atmospheric Methane and Nitrous Oxide of the Late Pleistocene from Antarctic Ice Cores. *Science* 310, 1317-1321 (2005):

EPICA community members: Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 429, 623-628 (2004).

Siehe auch: PAGES News Vol. 14 N° 1: Ice Core Science. [www.pages.unibe.ch](http://www.pages.unibe.ch)

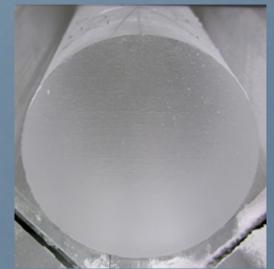
Die δD-Kurve (äquivalent zu δ<sup>18</sup>O) stellt den Temperatur-Proxy dar. In der Zeit von Heute bis ca. 400 ka ist die Zeitreihe durch 5 (einschl. des Holozäns) deutlich erkennbare, vergleichsweise kurze Warmzeiten (Interglaziale) gekennzeichnet, die im Abstand von ca. 100 ka auftreten. Dies entspricht der Zyklizität der Exzentrizität der Erdumlaufbahn (Milankovich-Zyklus). In der Zeit davor sind die Warmzeiten weniger warm, länger und die Kaltzeiten (Glaziale) entsprechend kürzer aber vergleichbar kalt wie die späteren Glaziale. Vergleicht man das holozäne Temperaturmittel mit den 4 vorhergehenden Interglazialen, erkennt man, dass die Temperaturen früher offensichtlich höher gewesen sind als heute. Die Zeitreihen von CO<sub>2</sub> (oben) und Methan (CH<sub>4</sub>, unten) sind gut korreliert und zeigen einen nahezu synchronen Verlauf. Es kann jedoch festgestellt werden, mit den Unsicherheiten der bisherigen Datierung, dass der Temperaturanstieg jeweils vor dem Anstieg von CO<sub>2</sub> oder CH<sub>4</sub> begann. Beim Vergleich der CO<sub>2</sub>-Gehalte der zurückliegenden 4 Interglaziale mit dem holozänen Wert vor der industriellen Revolution (ca. 1850) stellt man fest, dass sich die Maximalwerte nur unwesentlich unterscheiden. Vergleichbares gilt für Methan. Die heutigen hohen CO<sub>2</sub>-Konzentration von 385 ppmv wurden in den Eiskernen zu keiner Zeit nachgewiesen.

# Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre



Messung an  
Luftproben seit 1958

Messung an  
Eisproben



Quelle: IPCC, Climate Change 2007: The Physical Basis, Summary for Policy Makers ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch))



DGfP Arbeitskreis Polarlehrer, 4. Meeting Karlsruhe, 14. November 2009



## Folie28: Kohlendioxid-Gehalt in der Atmosphäre

Kohlendioxid in der Atmosphäre steht heute in der Mitte der öffentlichen Klimadiskussion. Deshalb noch ein Blick auf die Entwicklung des Kohlendioxidgehaltes seit dem Ende der letzten Eiszeit vor etwa 10.000 Jahren. Die Farbigkeit der Abbildung spiegelt die unterschiedlichen Quellen wieder, aus den wir den Kohlendioxidgehalt rekonstruieren können. Die rote Linie sind Messungen an Luftproben, die seit 1958 am Mauna Loa Observatorium auf Hawaii gesammelt und analysiert werden. Alle anders gefärbten Daten stammen aus Eiskernen. Der Kohlendioxidgehalt während der letzten 10.000 Jahre zeigt Schwankungen und ein leichter Anstieg setzte bereits um 5000 Jahre v.h. ein. Der wirklich steile Anstieg aber begann erst um 1900 AD und spiegelt Auf- und Ab der industriellen und wirtschaftlichen Entwicklung wieder.

Das Wissen um den Zusammenhang zwischen Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre und der Lufttemperatur ist nicht neu. Bereits 1896 hat der schwedische Physiker und Chemiker Svante August Arrhenius, der 1903 den Nobelpreis für Chemie erhielt, Berechnungen dazu angestellt und veröffentlicht (S. A. Arrhenius, 1896: On the influence of carbonic acid in the air on the temperature of the ground. *Philosophical Magazine* 5, London, 237-276) !

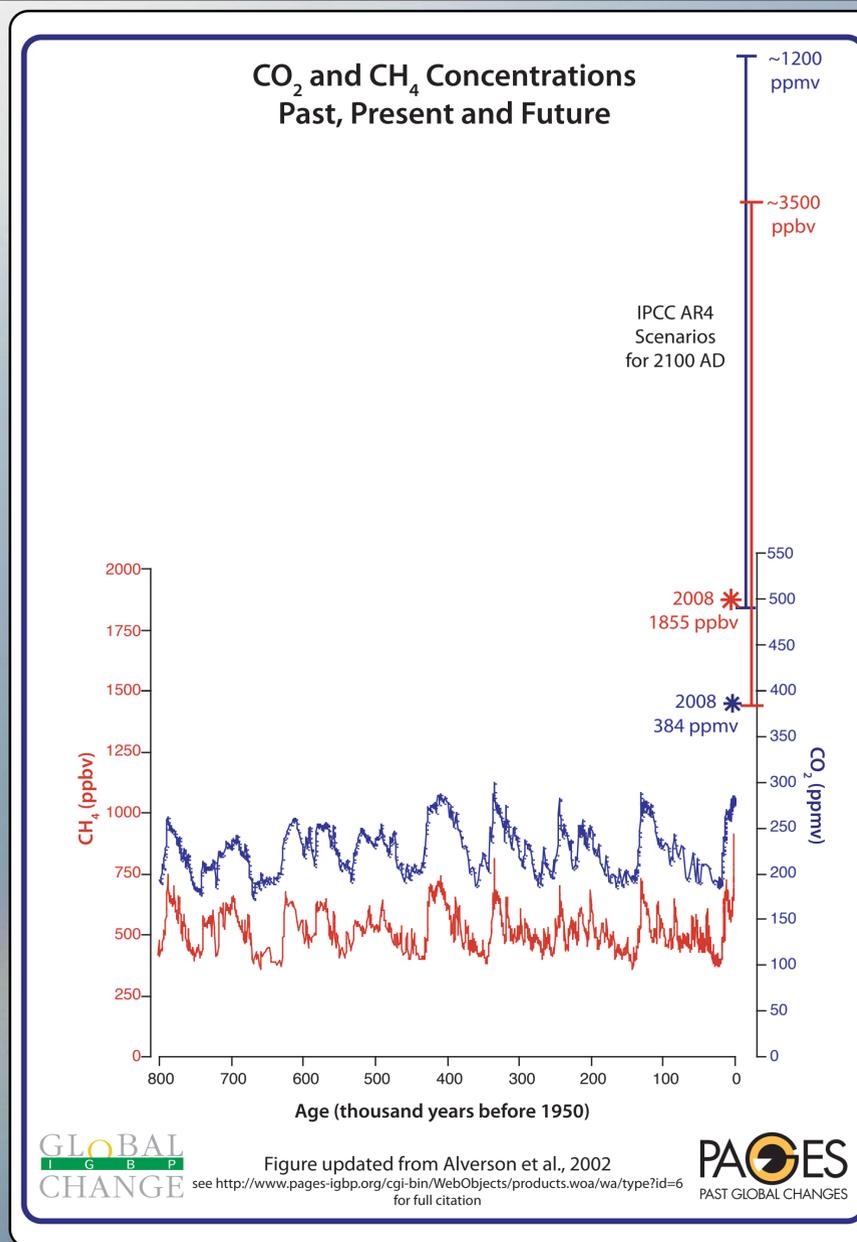
Quelle: IPCC, Climate Change 2007: The Physical Basis, Summary for Policy Makers ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch))

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>) changes over the last 800 000 years from Antarctic ice cores

compared to 2008 values,

and the range of concentrations projected by IPCC AR4 scenarios for the year 2100.

Quelle: <http://www.pages-igbp.org>



CO<sub>2</sub> data is a compilation of the following records:

- Monnin et al., 2001: Science, 291: 112-114.
- Petit et al., 1999: Nature, 399: 429-236.
- Pepin et al., 2001: J. Geophysical Res. 106: 31,885-31,892.
- Raynaud et al., 2005: Nature, 436: 39-40.
- Siegenthaler et al., 2005: Science, 310: 1313-1317.
- Luethi et al., 2008: Nature, 453: doi:10.1038/nature06949

CH<sub>4</sub> data:

- Louergue, L., et al., 2008: Nature, 453: 383-386.

Current atmospheric concentrations:

the Carbon Dioxide Information Analysis Center (<http://cdiac.ornl.gov>).

CO<sub>2</sub>: Pieter Tans NOAA/ESRL  
[www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends)

CH<sub>4</sub>: Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE)



**Folie29:**  
**Kohlendioxid-Gehalt in der Atmosphäre**

Was ist der Status heute und wie wird sich der Kohlendioxidgehalt weiter entwickeln? Dazu eine letzte Abbildung. Den Status heute können wir messen. 2008 lag der Kohlendioxidgehalt bei 384 ppmv. Er betrug also das 1,4-fache des für ein Interglazial typischen Wertes von ca. 275 ppmv. Die weitere Entwicklung wird stark von der wirtschaftlichen Entwicklung und dem Verbrauch fossiler Brennstoffe abhängen. Die Szenarien, die der IPCC-Report von 2007 enthält, halten uns Werte zwischen 500 und 1200 ppmv vor Augen, die bis zum Jahr 2100 erreicht werden könnten. Mit dieser Perspektive möchte ich zum Schluss kommen.

Quelle: <http://www.pages-igbp.org>

- Archiv in Grönland 123.000 Jahre, in der Antarktis 800.000 Jahre
- Archiv über Temperatur-und Gasgehaltschwankungen
- „schnelle Schwankungen“ typisches Klimamerkmal der Glaziale
- Verbindung Nord - Süd (bipolar seesaw)
- Treibhausgaskonzentrationen heute deutlich höher als in Eiskernen nachweisbar

<http://www.awi.de/People/show.php?hoerter> „Invited talks“

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**



Kolloquium DMG ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



foto: hans oerter, 2008

30

Folie30:

**Zusammenfassung**

Der Vortrag sollte zeigen, dass die polaren Eisschilde ein Klimaarchiv darstellen, was dort an Klimainformation gespeichert ist und wie sich dieses Klimaarchiv erschließen lässt. Der Grönländische Eisschild birgt Klimainformation über mindestens 123.000 Jahre, der Antarktische Eisschild über 800.000 Jahre. Es wird versucht in beiden Regionen jeweils noch älteres Eis zu finden. In Grönland ist das Ziel das letzte Interglazial (Eem) ungestört zu erbohren, in der Antarktis möchte man gern Eis mit einem Alter von 1-1.2 Millionen Jahren finden.

Das Eis archiviert Informationen über Schwankungen der Lufttemperatur. Es ist das einzige Archiv für Gas, sodass auch die wechselnde Zusammensetzung der Atmosphäre gemessen werden kann.

Die in Grönland nachgewiesenen schnellen Schwankungen scheinen charakteristisch für alle Glazialzeiten zu sein.

Diese relativ kurzzeitigen Schwankungen im Norden sind offensichtlich über eine klimatische bipolare Wippe (bipolar seesaw) mit vergleichbaren Schwankungen im Süden gekoppelt. Der Antrieb wird durch Strömungsvorgänge im Atlantik gesteuert.

Die in den Eiskernen nachgewiesenen Konzentrationen der Treibhausgasen CO<sub>2</sub> und Methan waren nie so hoch, wie sie heute in der Atmosphäre gemessen werden.

Vielen dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Der Autor bittet den geeigneten Leser eventuelle Tippfehler zu entschuldigen!



Kolloquium DMG ZV Hamburg, Seewetteramt Hamburg, 17. November 2009



31

Über drei Themenkomplexe will ich reden, um Sie mit Eisbohrkernen und deren Analyse etwas vertrauter zu machen:

Wie ist der antarktische Eisschild aufgebaut?

Wie bohrt und zerteilt man einen Eisbohrkern?

Welche Klimainformation enthält ein Eisbohrkern?



DGfP Arbeitskreis Polarlehrer, 4. Meeting Karlsruhe, 14. November 2009



Soviel zu den Bohr-Aktivitäten in der Antarktis. Es folgt nun ein Szenenwechsel: das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven, das zu einem Teil in dem braunen, verlinkerten Gebäude am so genannten Alten Hafen untergebracht ist.

# Das Eislabor am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven

Horizontalsäge

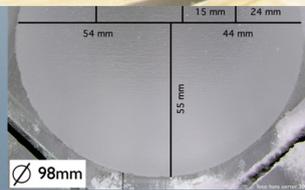


foto: hans oerter, 2009



foto: hans oerter, 2002

Auspacken des Kerns



DGfP Arbeitskreis Polarlehrer, 4. Meeting Karlsruhe, 14. November 2009



Im großen Eislabor des AWI wurden die Eiskerne nach einem genau vorgegebenen Schnittmuster zersägt, so dass jedes beteiligte Labor seinen Anteil bekam. Zu diesen „Schneidewochen“ im Kalten kamen Wissenschaftler von allen zehn beteiligten Ländern zusammen. Der erste Schritt ist das Auspacken der Eiskerne. Dann werden die Eiskerne durch eine so genannte Horizontalsäge gefahren und der Länge nach geteilt.

# Das Eislabor am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven

Horizontalsäge

Line-Scan



foto: hans oerter, 2002

Auspac

Vorbereitung für Line-Scan



DGfP Arbeitskreis Polarlehrer, 4. Meeting Karlsruhe, 14. November 2009



Ein Teil wird anschließend für Line-Scan-Messungen, ein fotografisches Verfahren zur Dokumentation der Kerne, vorbereitet und dann mit einer Line-Scan-Kamera, eine Art Videokamera mit schlitzförmiger Blendenöffnung, abgescannt.

# Das Eislabor am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven

Horizontalsägen

Längs- und Querschnitte



foto: hans oerter, 2002

Auspacken des Ke

Vorbereitung für Line-Scan



DGfP Arbeitskreis Polarlehrer, 4. Meeting Karlsruhe, 14. November 2009



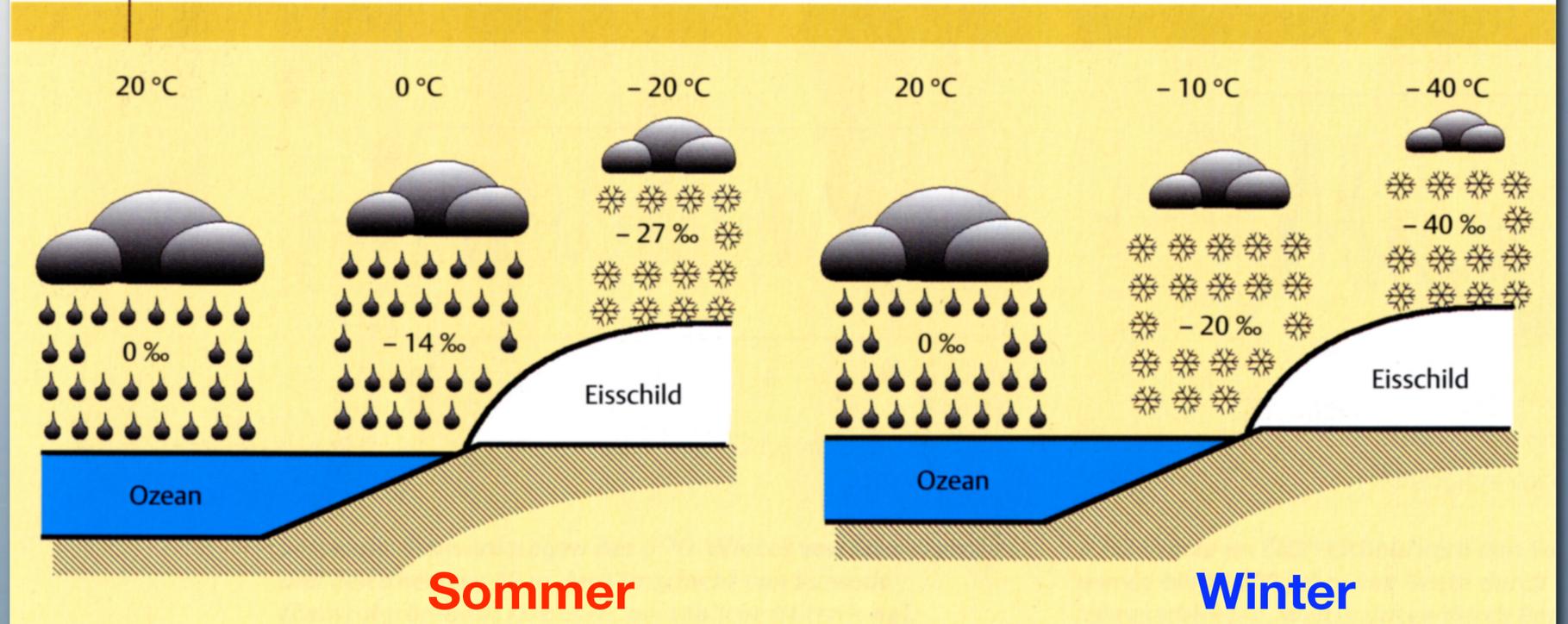
Ein anderer Teil wird an den im Raum verteilten Bandsägen in kleinere Probenstücke zersägt.

Ø 98mm

foto: hans oerter, 2003

# Das „Isotopenthermometer“ ( $\delta^{18}\text{O}$ vs. Temp.)

ABB. 1 | ISOTOPENFRAKTIONIERUNG aus: B. Stauffer, 2001: Das „Isotopenthermometer“ im ewigen Eis. *Physik in unserer Zeit*, 32.Jg. (3), 106-113



SMOW:  
Standard  
Mean Ocean  
Water

$$\delta^{18}\text{O} = \left( \frac{C_{\text{Probe}}}{C_{\text{Standard}}} - 1 \right) * 1000 \text{ ‰ SMOW}$$

Isotopenverhältnisse (Konzentrationen in ppm)

Sauerstoff:	$^{16}\text{O}$	$^{17}\text{O}$	$^{18}\text{O}$
	997 600 ppm	400 ppm	2 000 ppm
Wasserstoff:	$^1\text{H}$	$^2\text{H}$ (Deuterium)	
	999 850 ppm	150 ppm	



DGfP Arbeitskreis Polarlehrer, 4. Meeting Karlsruhe, 14. November 2009



36

Ich will Ihnen kurz das so genannte **Isotopenthermometer** erläutern.

Eine gut verständliche Beschreibung des Isotopenthermometers hat Bernhard Stauffer in der Zeitschrift *Physik in unserer Zeit*, 32. Jg., H. 3 (2001) verfasst. Diese Abbildung habe ich jener Publikation entnommen.

Niederschlag über dem Ozean hat bei etwa 20°C einen Isotopenwert von 0 ‰. Köhlen die Luftmassen auf dem Weg vom Ozean zu und über die Kontinente ab, kommt es zu einer Fraktionierung der stabilen Isotope im Wassermolekül. Die schwereren Isotope regnen zuerst aus, so dass die Luftmassen bei Abkühlung stetig isotopisch leichter werden.

Das Isotopenverhältnis wird als Promille-Abweichung von einem Standardwasser, das von der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO/IAEA) in Wien verwaltet wird, angegeben. Das Standardwasser ist das so genannte Standard Mean Ocean Water, abgekürzt SMOW. Die absoluten Verhältnisse von schweren und leichten Isotopen im Wasserdampf der Atmosphäre sind in der Tabelle angegeben.