

Eisbohrkerne als Klimaarchiv

Hans Oerter

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

Hans.Oerter@awi.de

<http://www.awi.de/People/show?hoerter>

Wo wird gebohrt ?

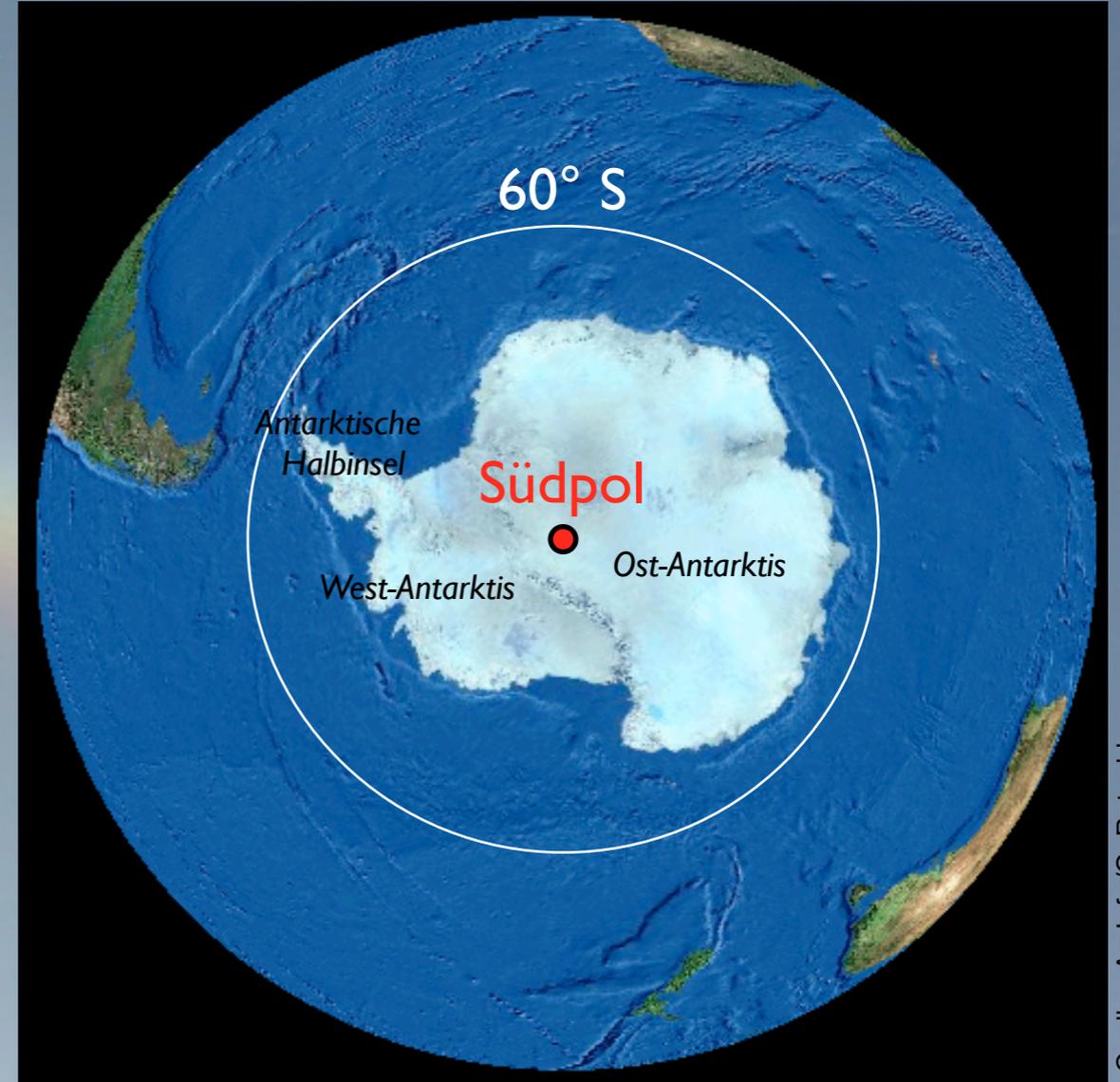
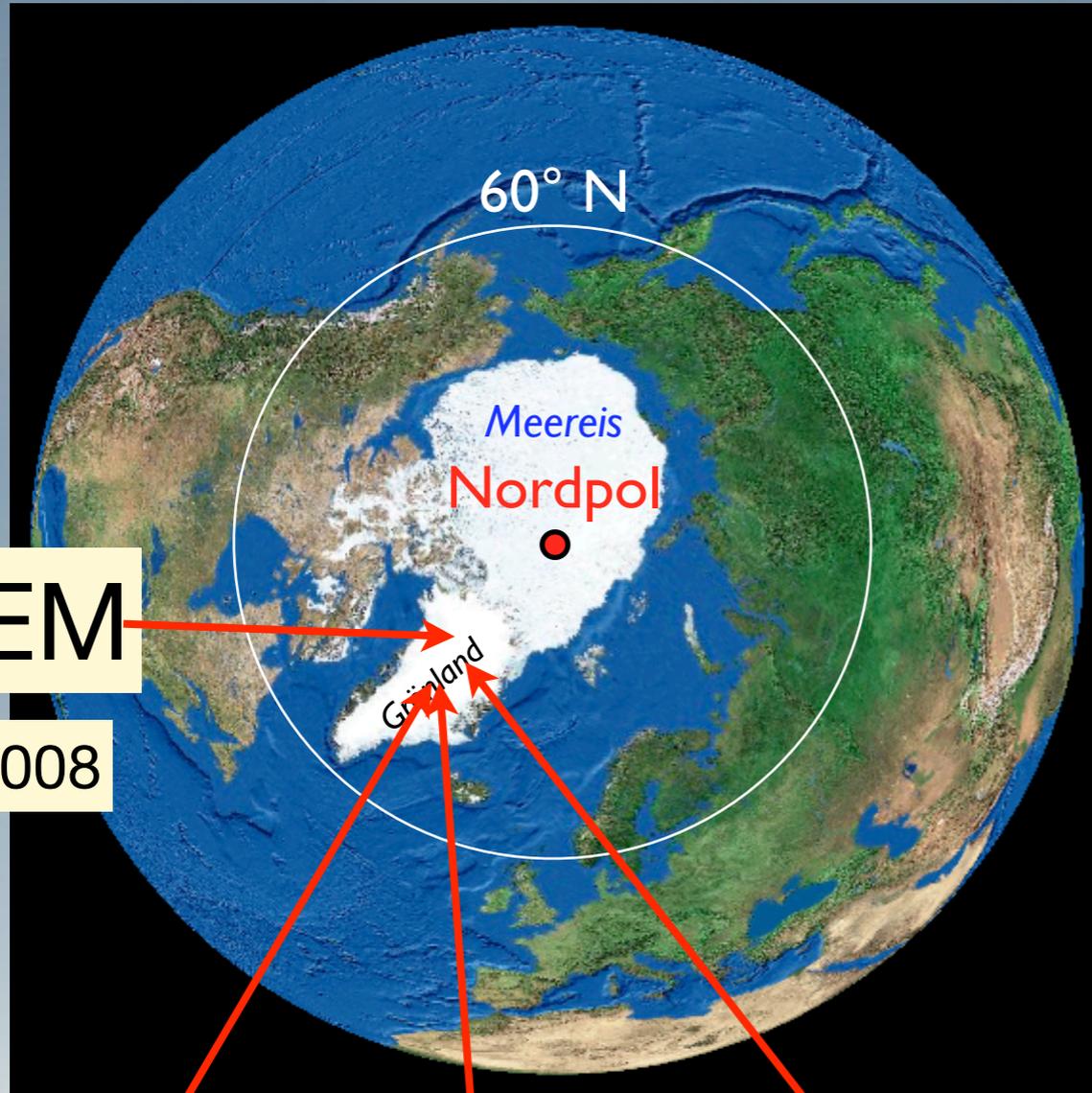
Wie wird gebohrt ?

Was ist im Eis archiviert ?

Wo wird gebohrt ?

Arktis (Grönland)

Antarktis



NEEM

seit 2008

GISP2

1989-1993
3053 m,
>110 ka

GRIP

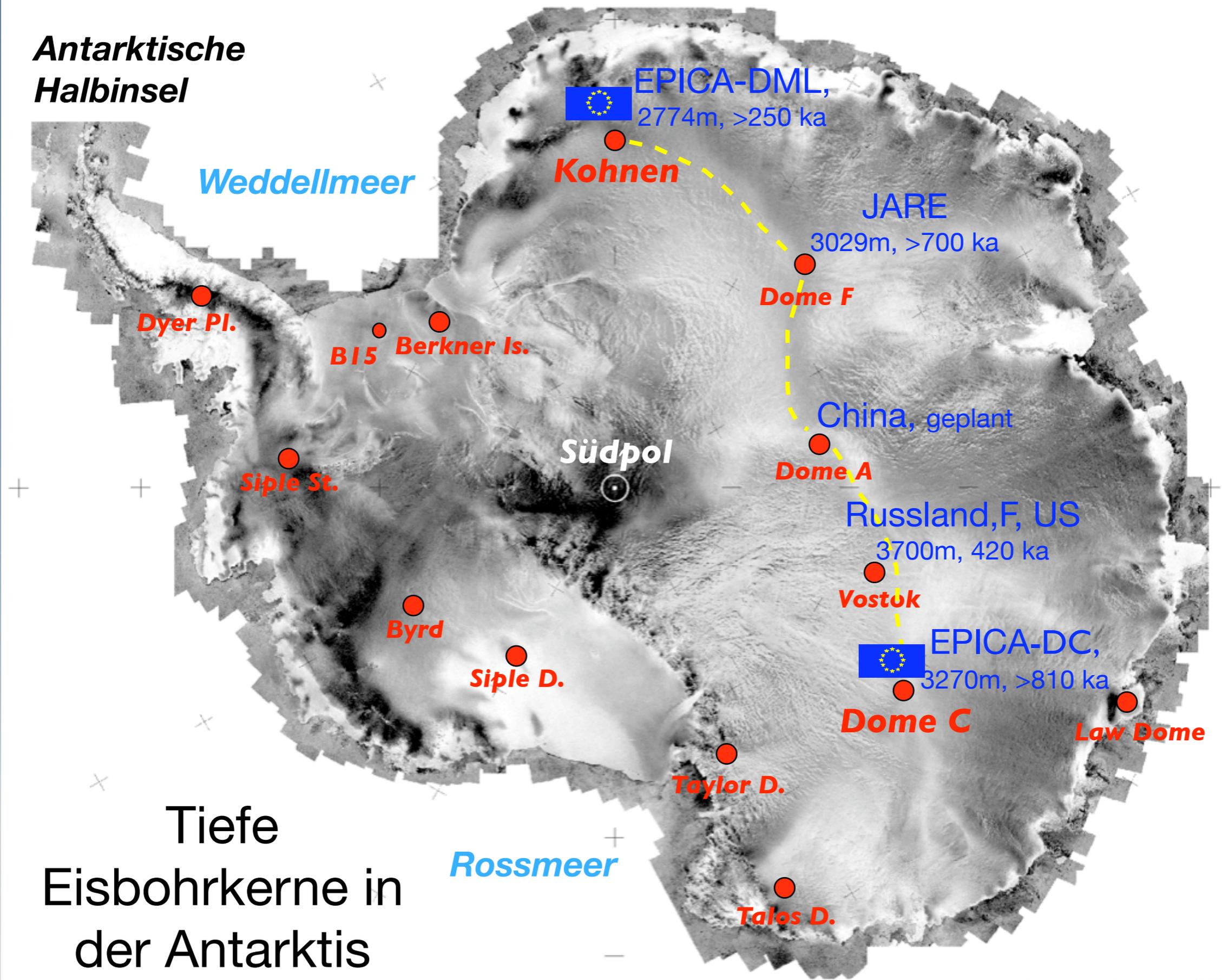
1990-1992
3029 m,
>105 ka

NorthGRIP

1996-2003
3090 m,
123 ka

Quelle: ArcInfo/G. Rotschky

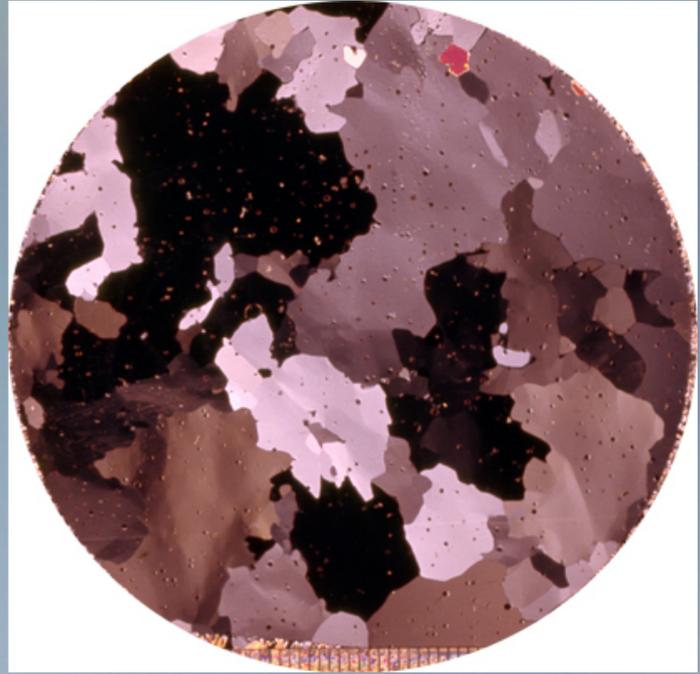
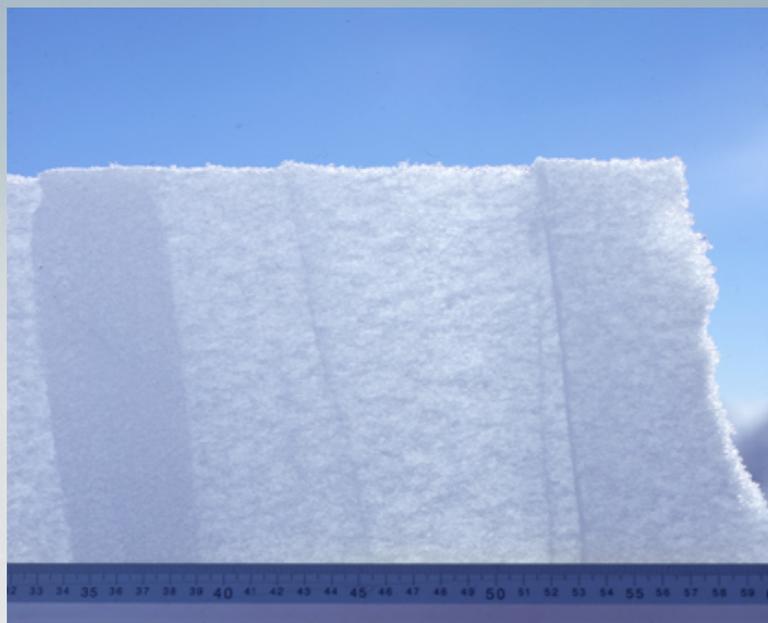
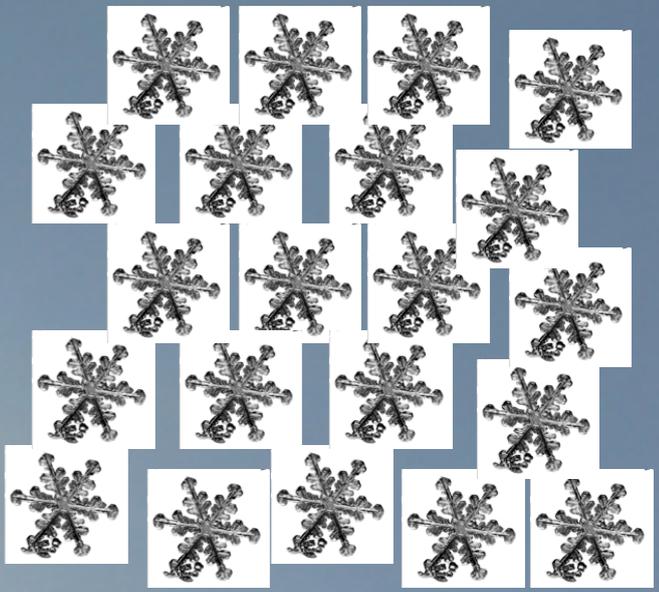
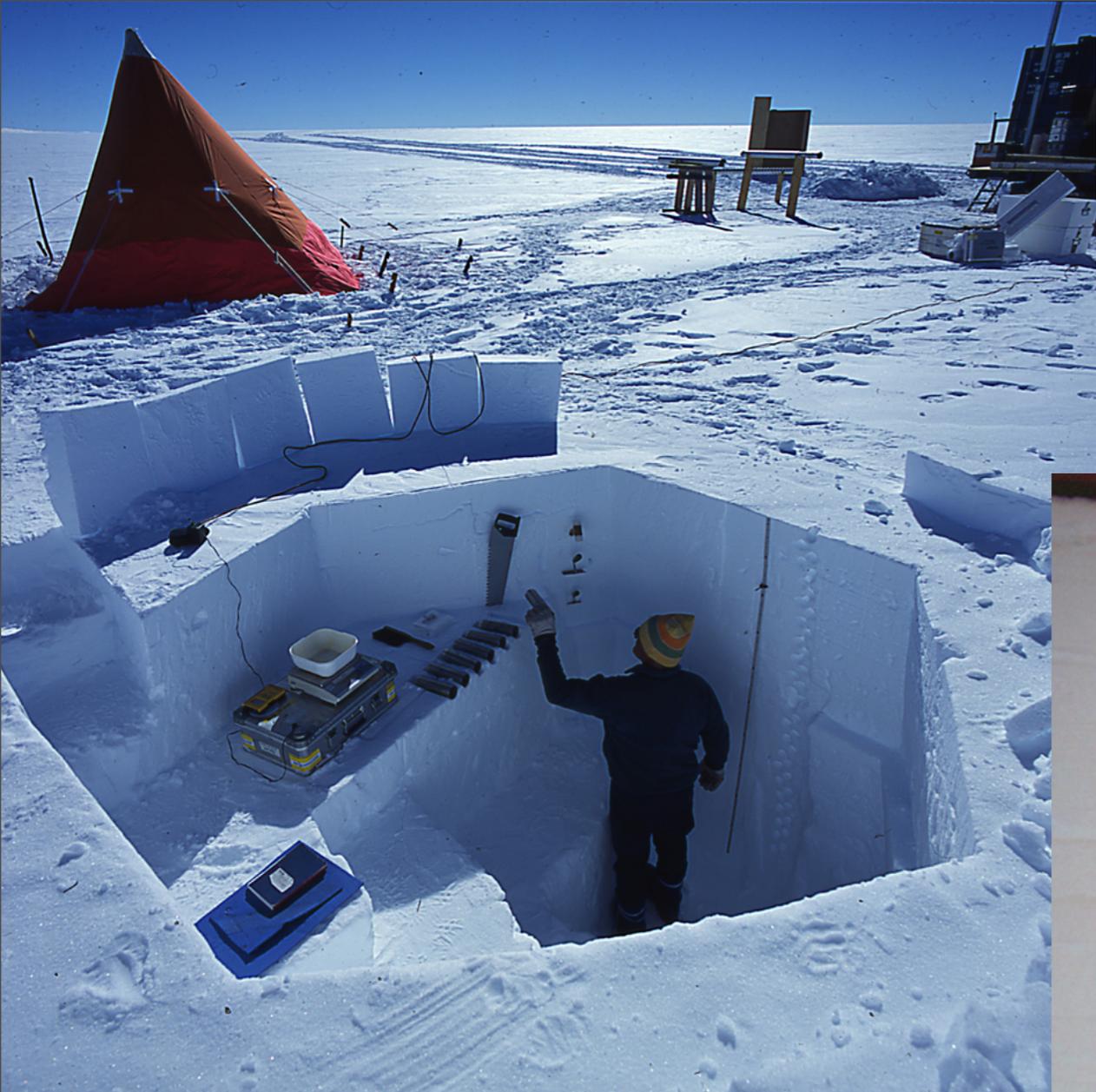
Antarktische Halbinsel



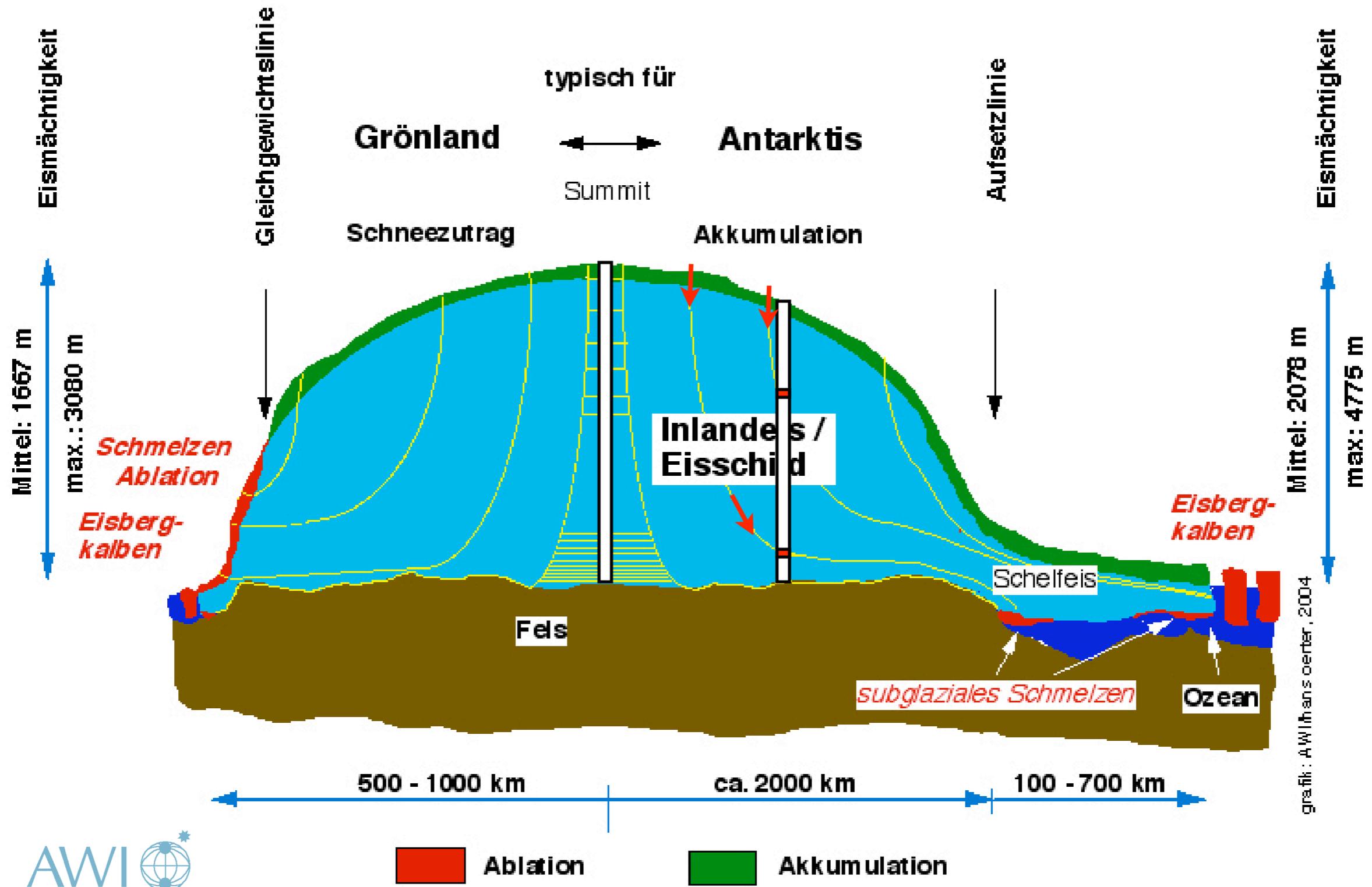
Tiefe Eisbohrkerne in der Antarktis

layout: w. rack, h. oerter, AWI

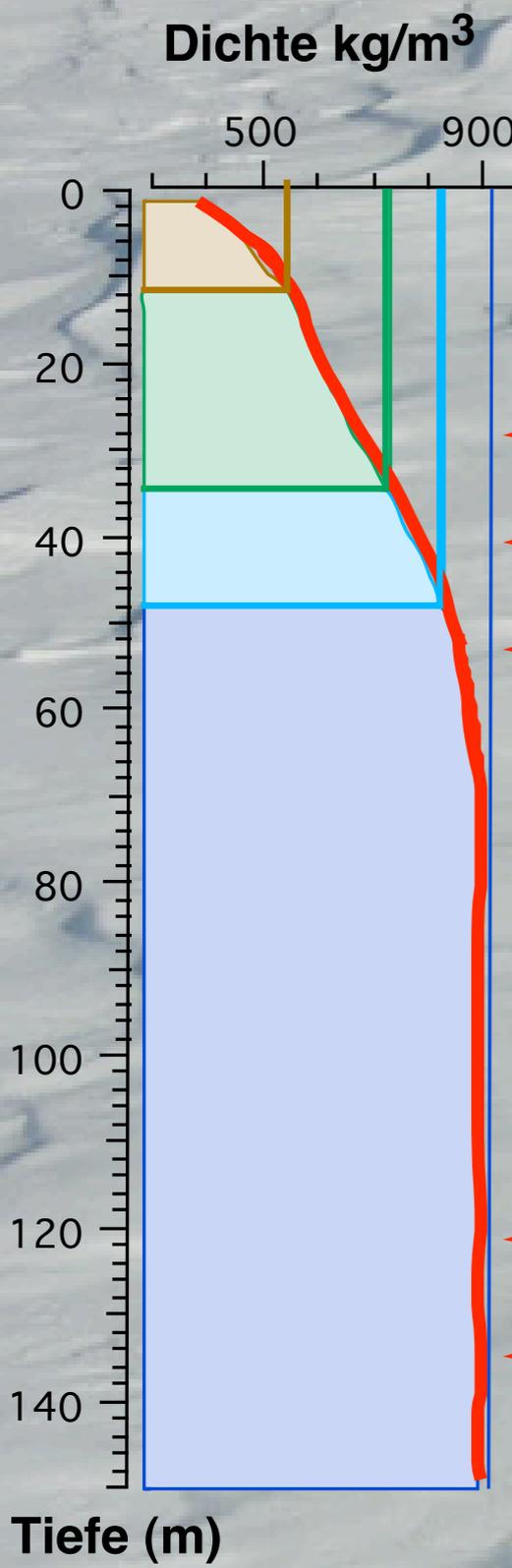
Ein Eisschild baut sich aus über einander liegenden Jahresschichten auf.



Schematischer Querschnitt durch einen Eisschild

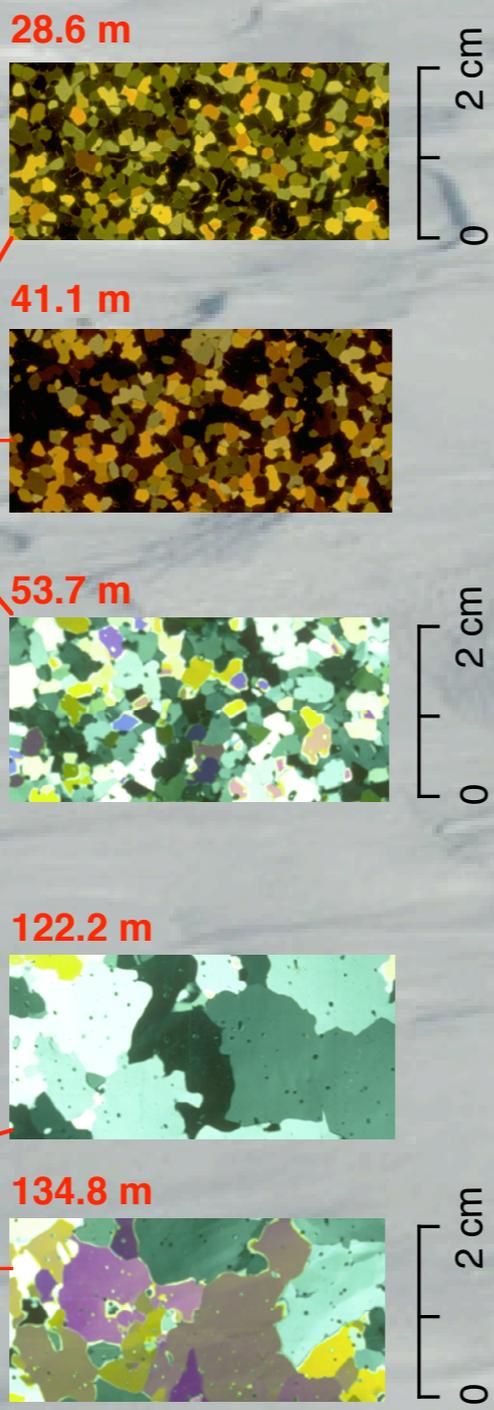


grafik: A. Wilhanscoerter, 2004

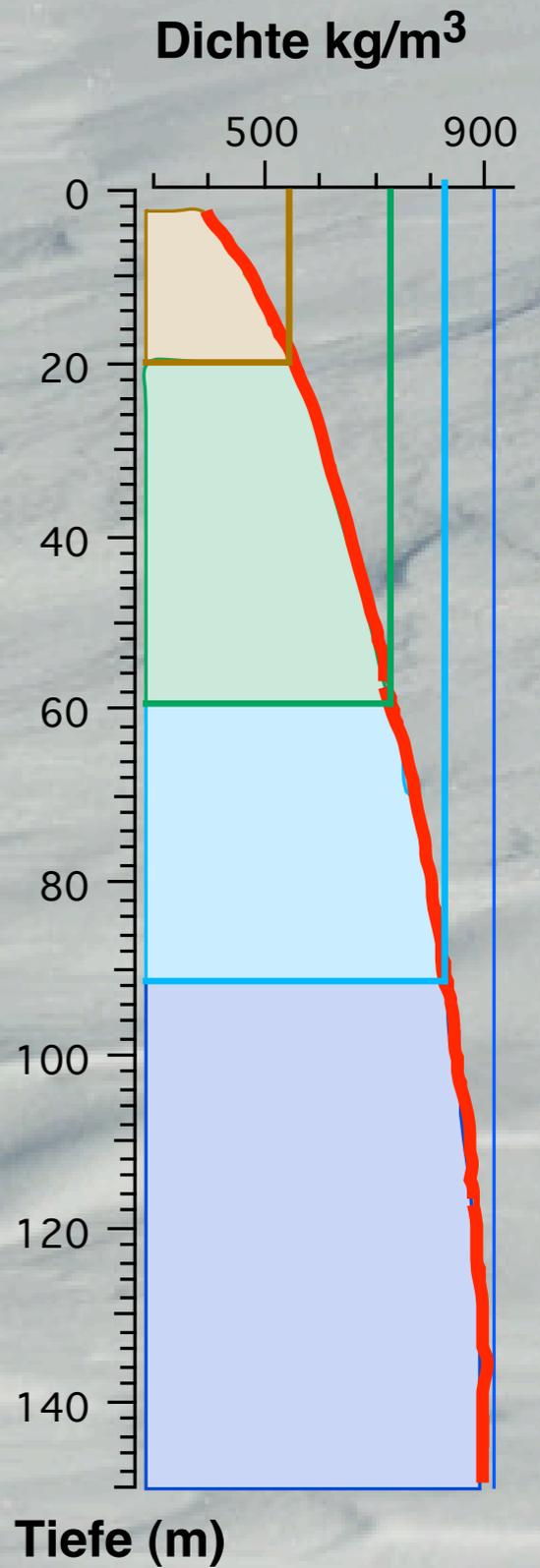
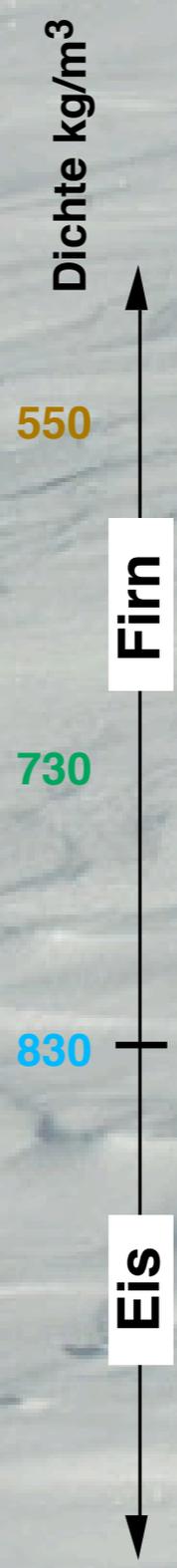
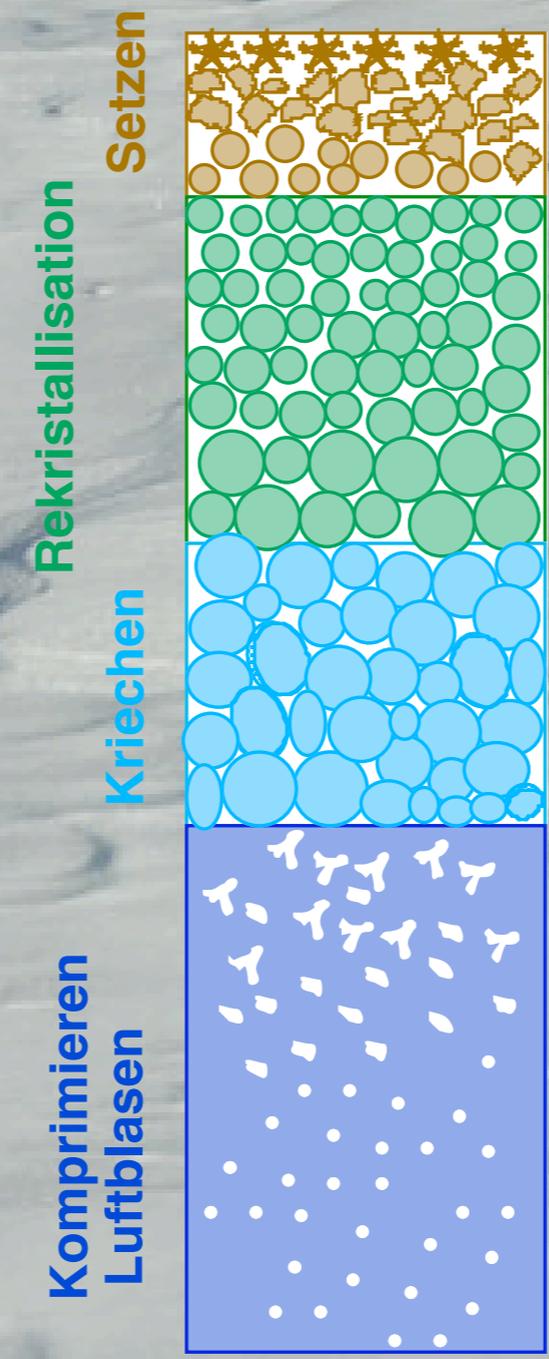


Schelfeis, B15
 T = -24.7 °C, A = 166 kg/(m²a)

Dünnschnitte

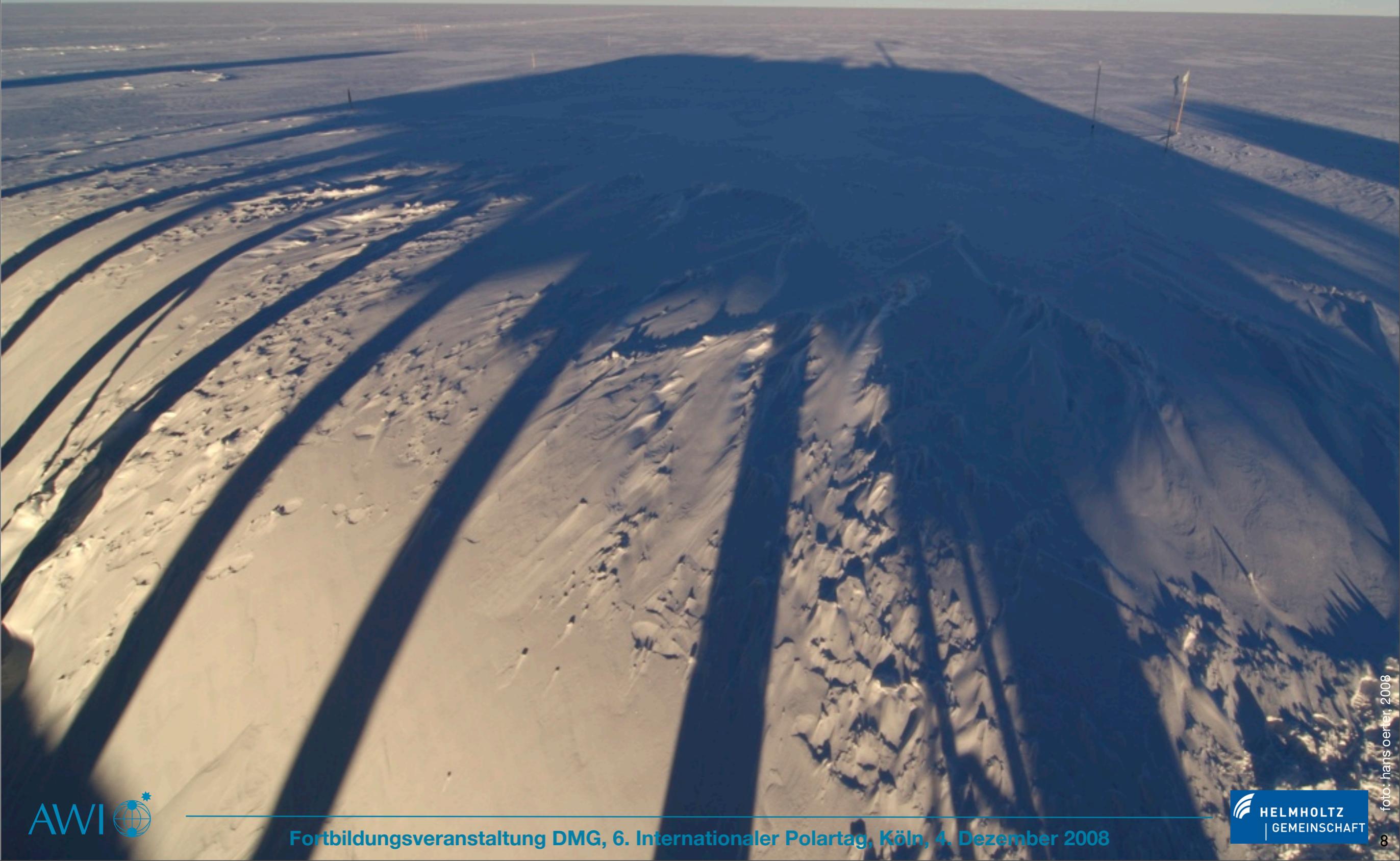


Verdichtungsprozess



Inlandeis, B32
 T = -44.5 °C, A = 62 kg/(m²a)

Wie wird gebohrt ?



Funk, PC, e-mail
Messe
Küche
Sanitärcontainer
2 Schlafräume
á 4 Pers.
Schneesmelze
Generator
Werkstatt

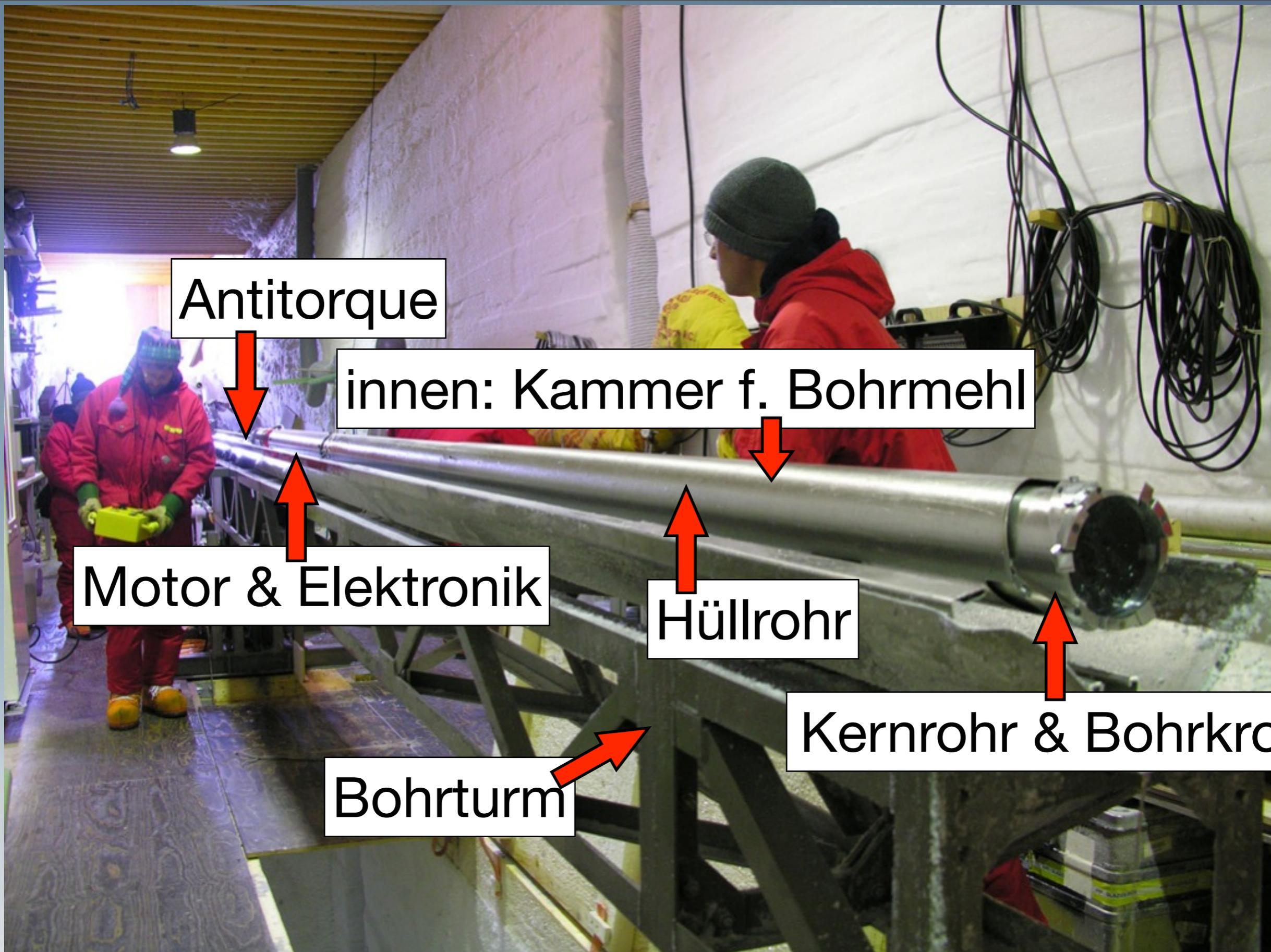
zum Bohren

Kohnen-Station
75°S, 0 °E, 2882 m



foto: hans oerter, 2006

Im Drill Trench: der Bohrturm



Antitorque

innen: Kammer f. Bohrmehl

Motor & Elektronik

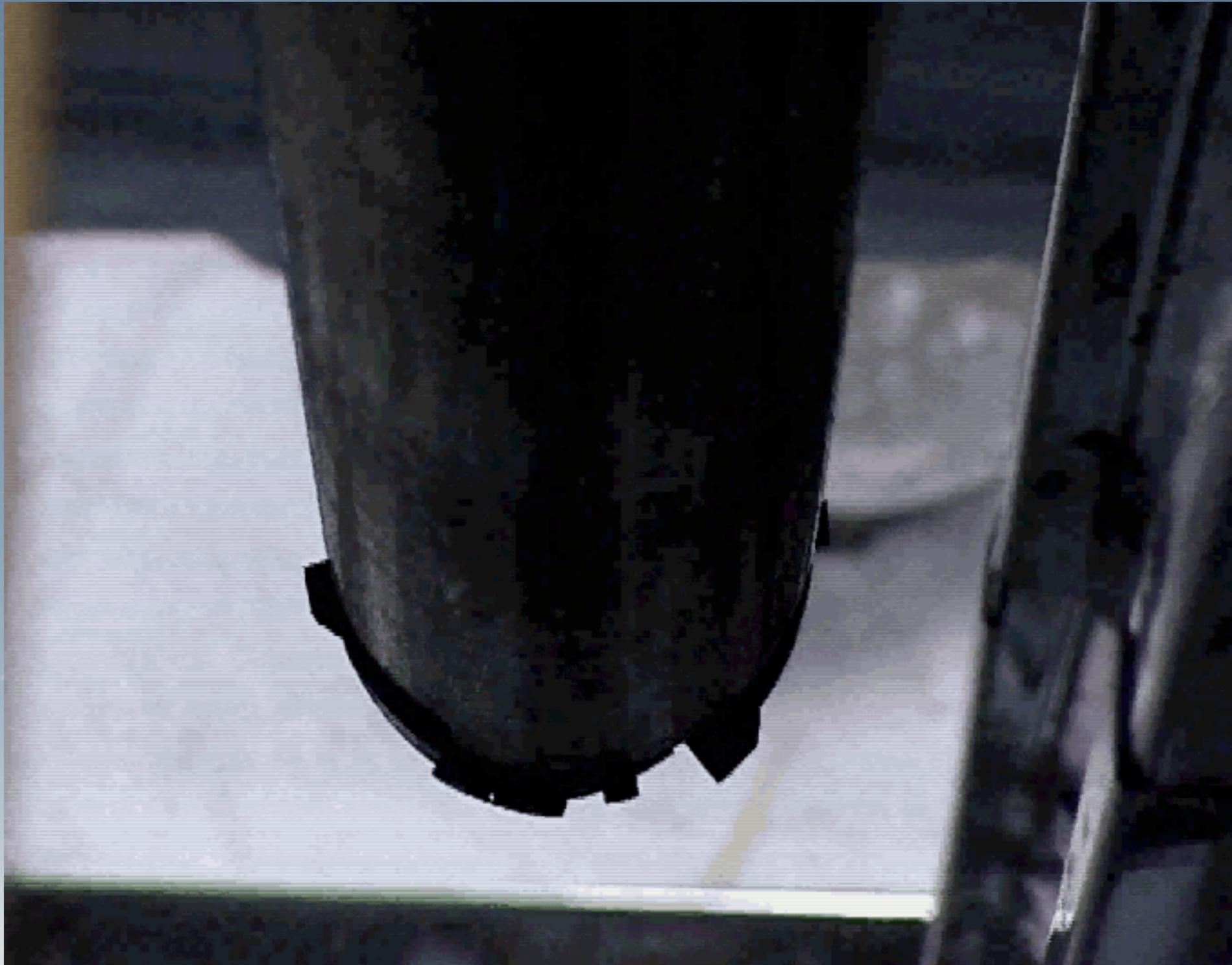
Hüllrohr

Kernrohr & Bohrkrone

Bohrturm

foto: hans oerter, 2005

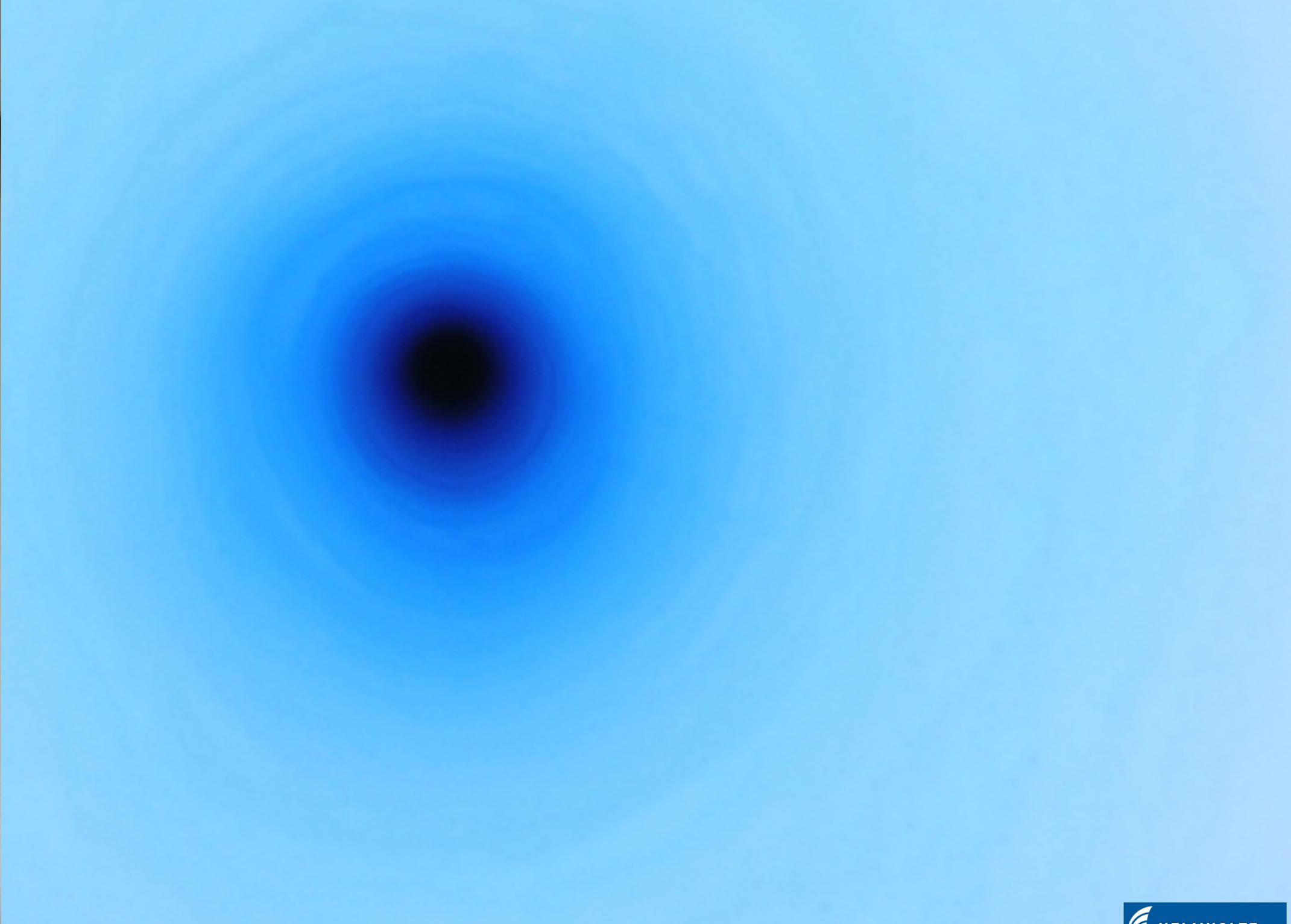
Der Bohrer



Archiv AWI/Kipfstuhl

Bohren eines Eiskerns

Was ist im Eis archiviert ?



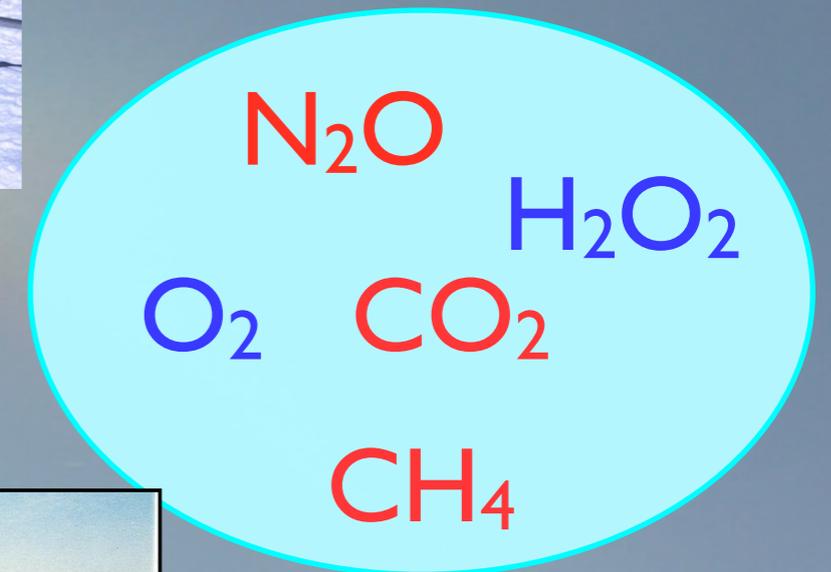
Das Eis als Klima-Archiv speichert Informationen zu:

Lufttemperatur

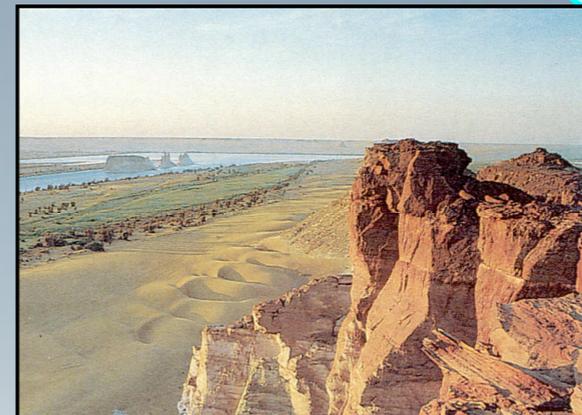


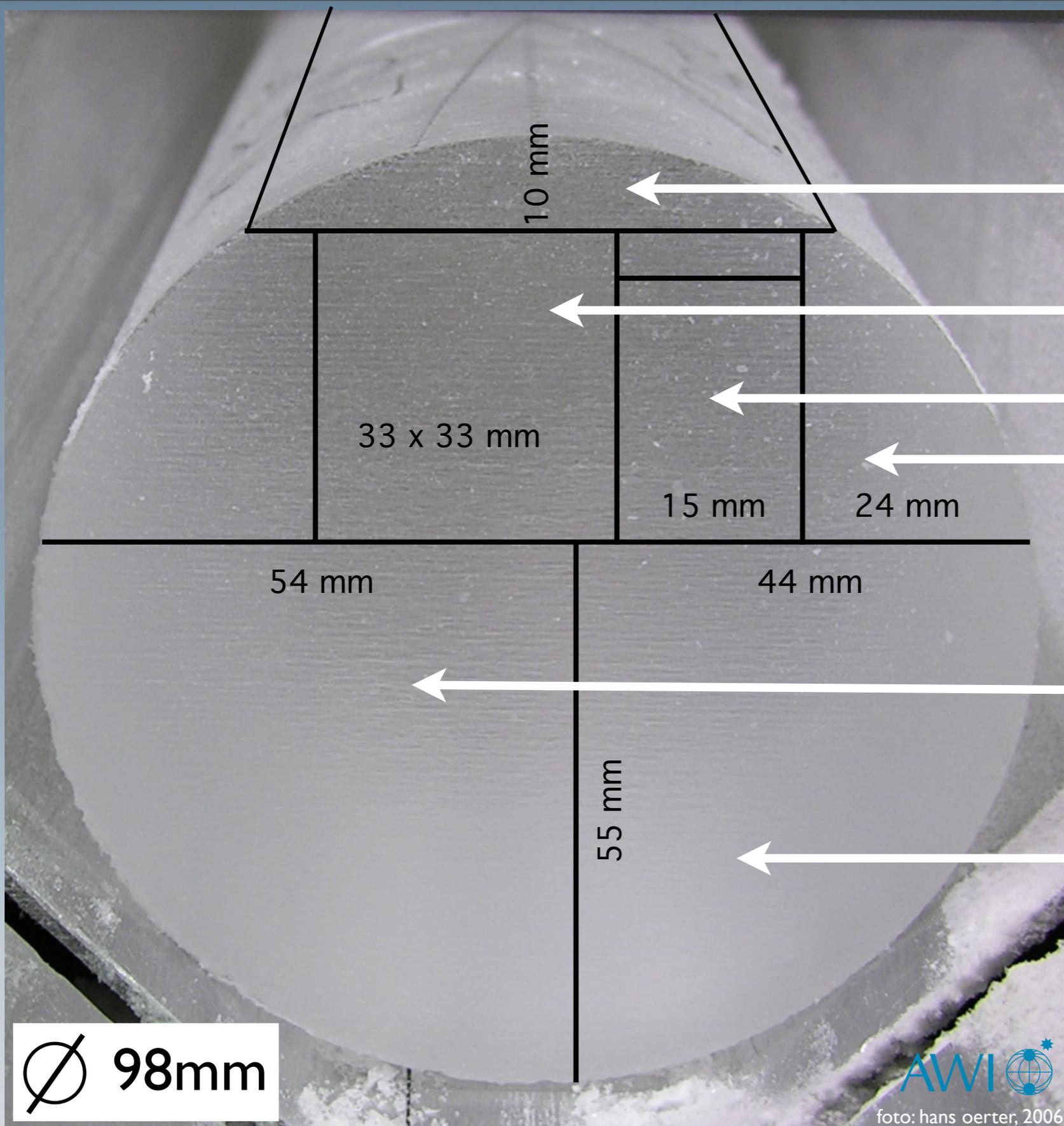
$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ im Eis

Gasgehalt in der Atmosphäre



Aerosole





Dünnschnitte

CFA

$\delta^{18}\text{O}$, δD

^{10}Be

Archiv

**Gase,
Staub**



\varnothing 98mm

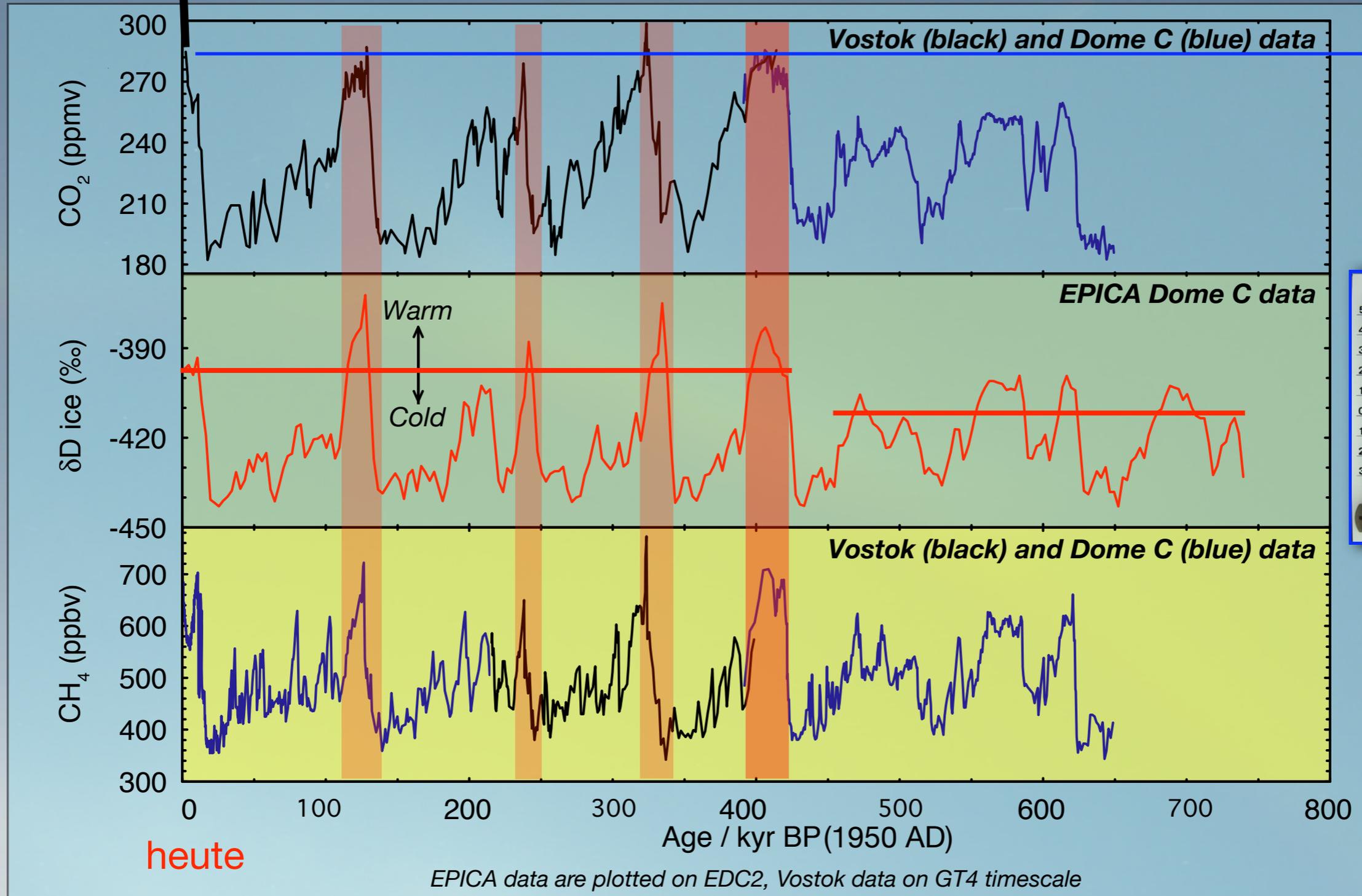
AWI 
foto: hans oerter, 2006

Schnittplan für die Eiskerne (EPICA)

Antarctic ice core records: Vostok and EPICA CO₂, CH₄ and δD

heute 385

vor 1850 AD



Petit et al., 1999 (Vostok), Siegenthaler et al., 2005 (Dome C - CO₂), Spahni et al., 2005 (Dome C - CH₄), EPICA community members, 2004 (δD)



<http://www.pages.unibe.ch/>



Fortbildungsveranstaltung DMG, 6. Internationaler Polartag, Köln, 4. Dezember 2008



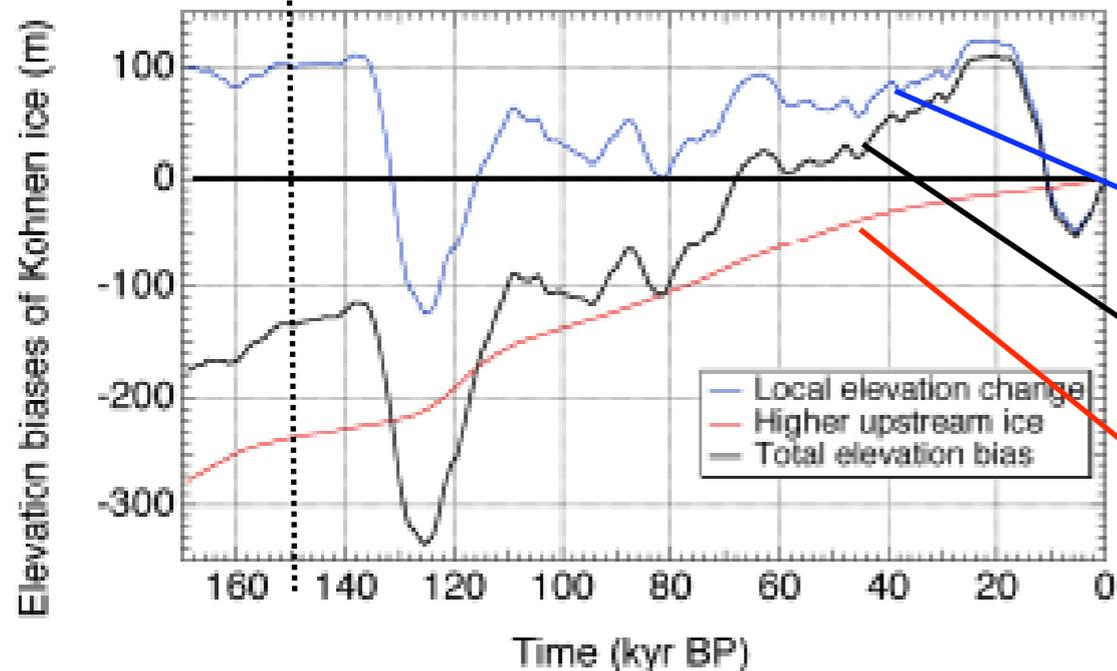
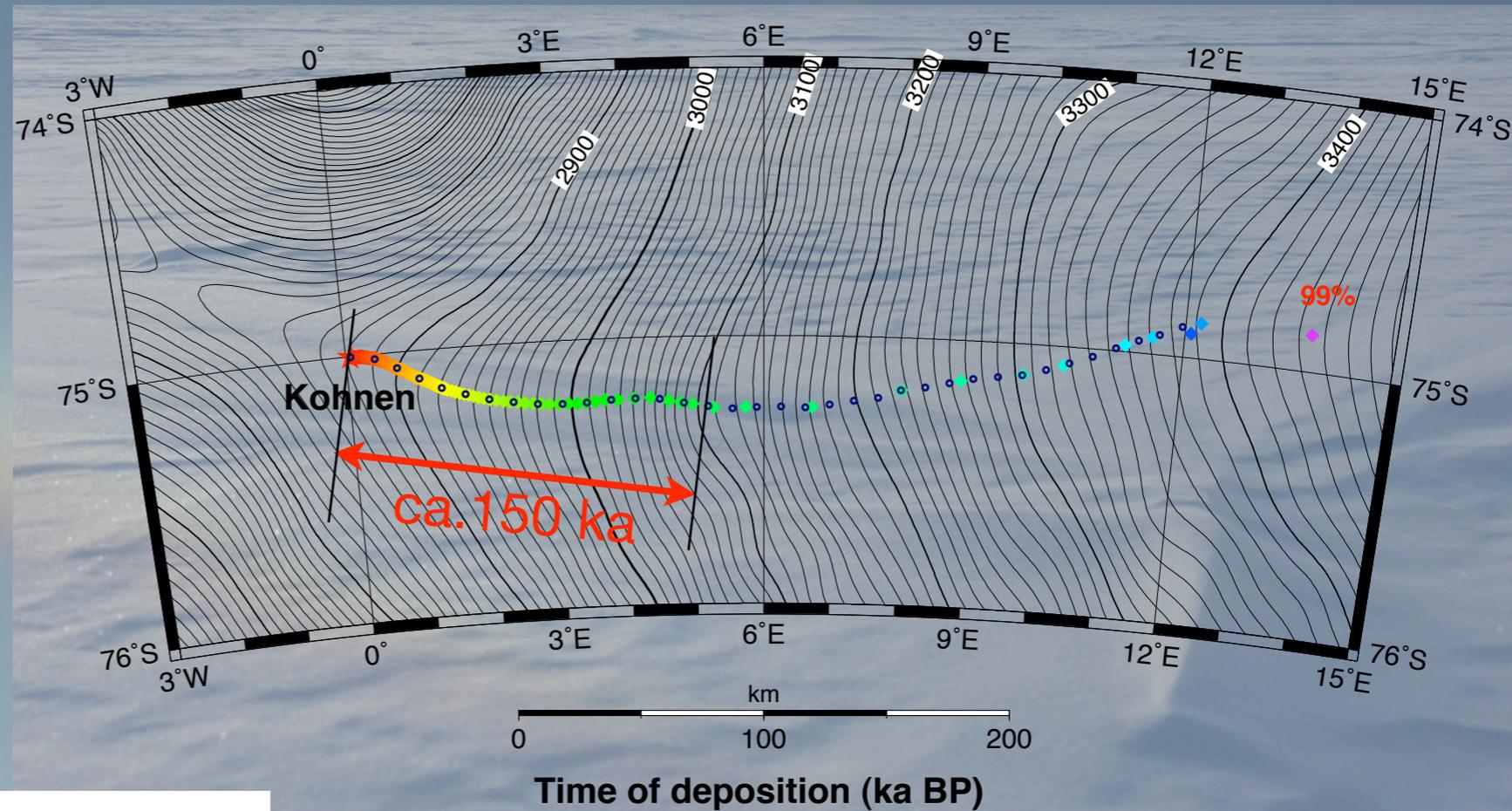
Schneedeposition oberstrom der Bohrstelle

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

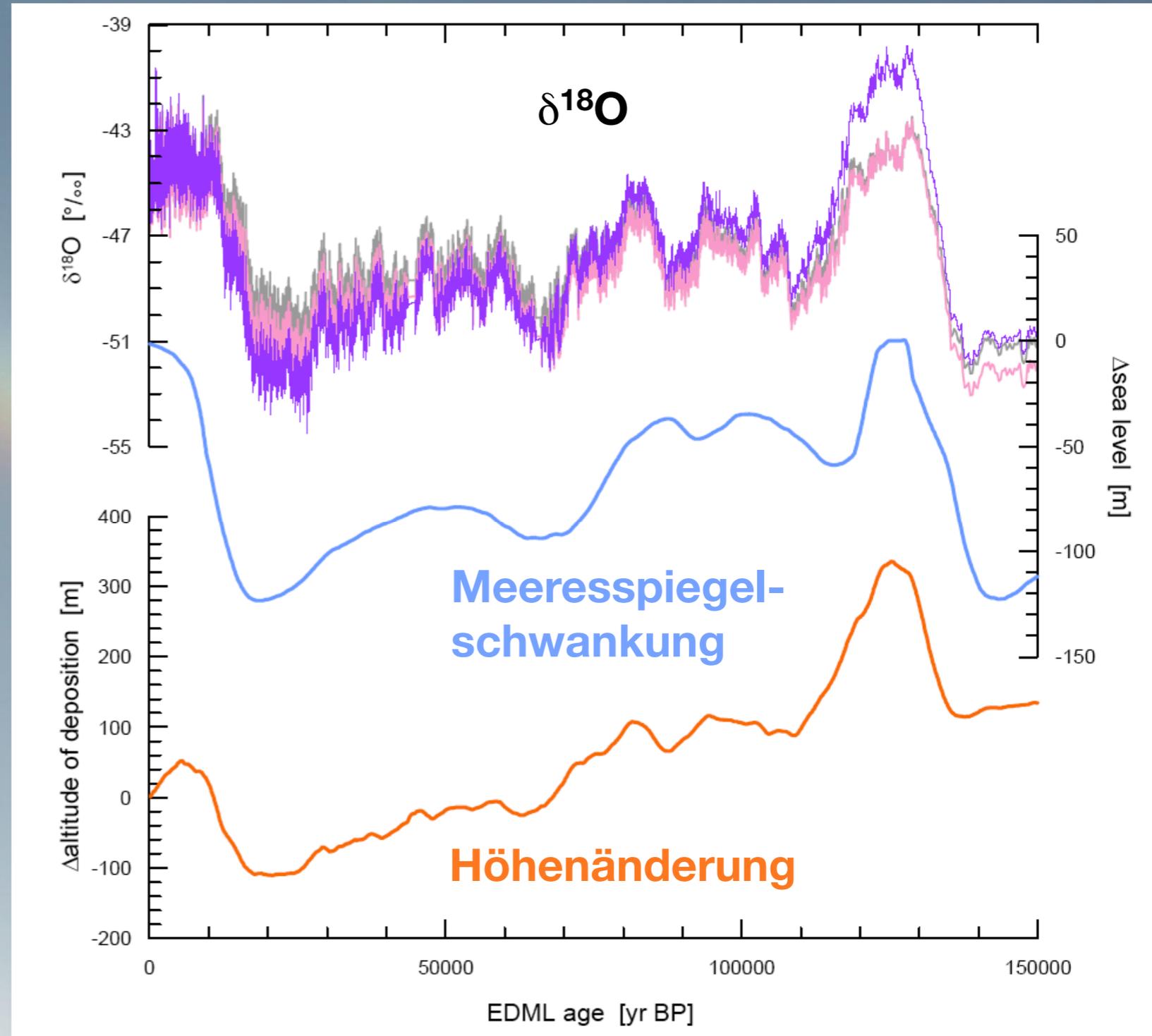
P. Huybrechts et al.: Non-climatic biases for EDML ice core record; *Climate of the Past*, 3, 577–589 (2007)

EDML-Eisbohrkern

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

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

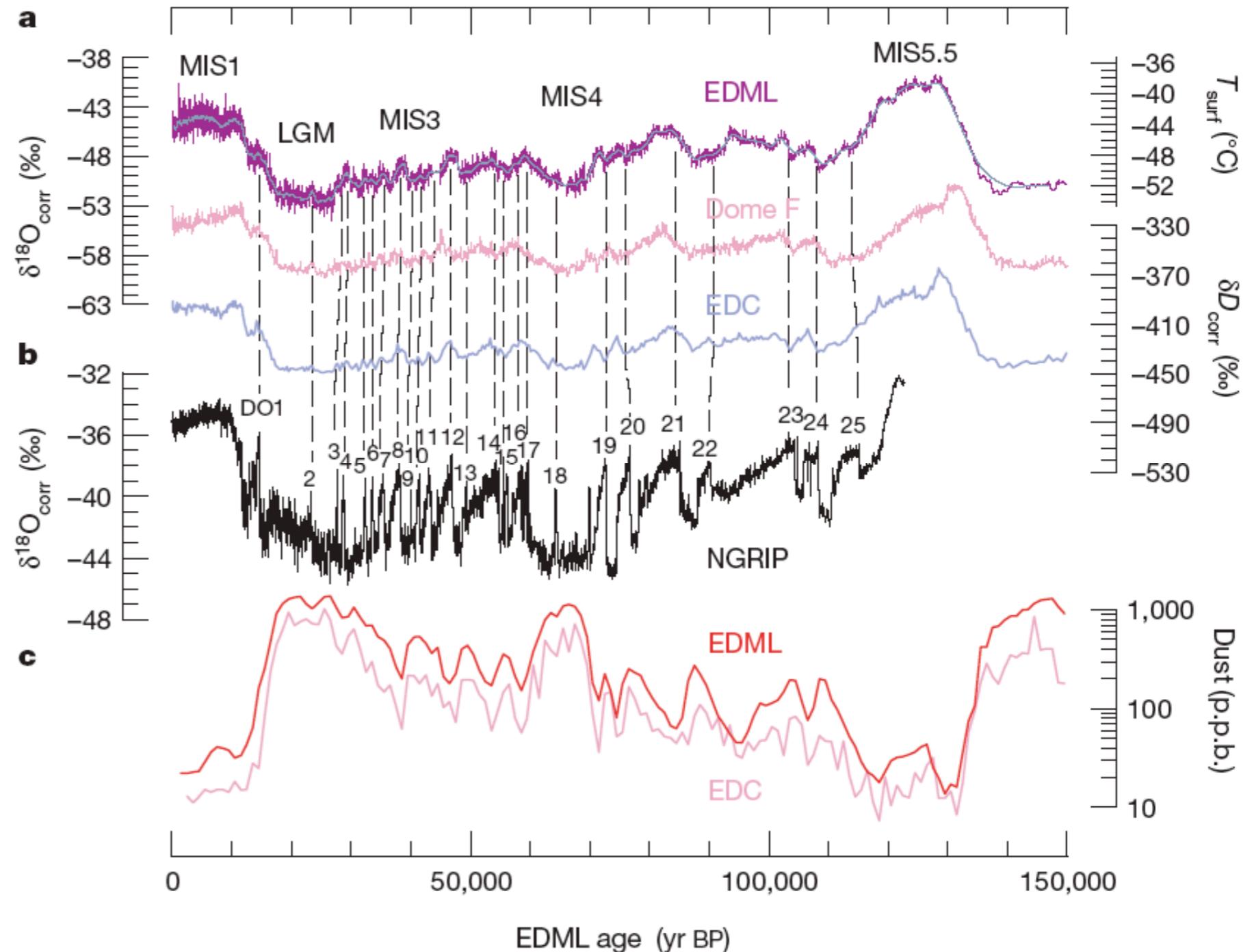
violett: resultierende $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve mit Korrektur für Meeresspiegelschwankungen & Höhenänderungen



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

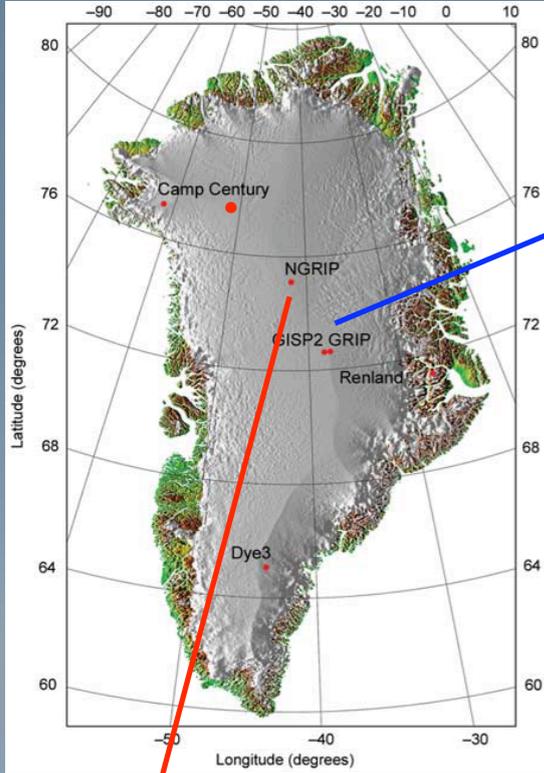
EDML - Dome F - EDC

Ähnliche
Strukturen der
Antarktischen
 $\delta^{18}\text{O}$ Kurven
Bei EDML mehr
Feinstruktur
während MIS 3
& 4
Staub EDML &
EDC (1 ka Mittel)
benützt zur
Synchronisation



EDML & EDC on common EDC3 time scale;
Dome F own time scale

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

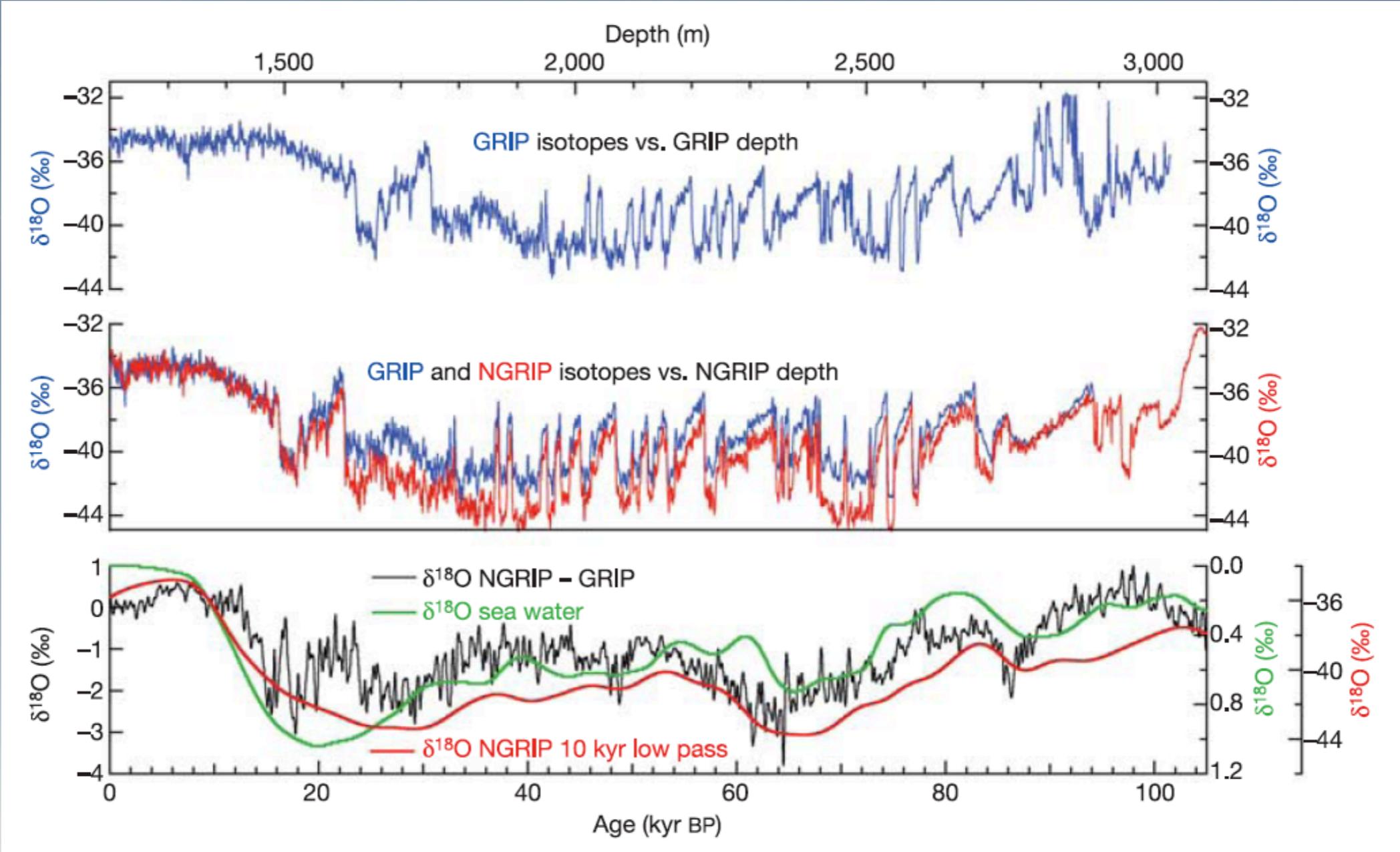


GRIP:
1990-1992
3029 m, >105 ka

NGRIP:
1996-2003
3090 m, 123 ka

GRIP & NGRIP
bis 105 ka BP
synchron

105-123 ka BP
datiert mit
Vostok-Eiskern



North Greenland Ice Core Project members: High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. Nature 431, 147-151 (2004)



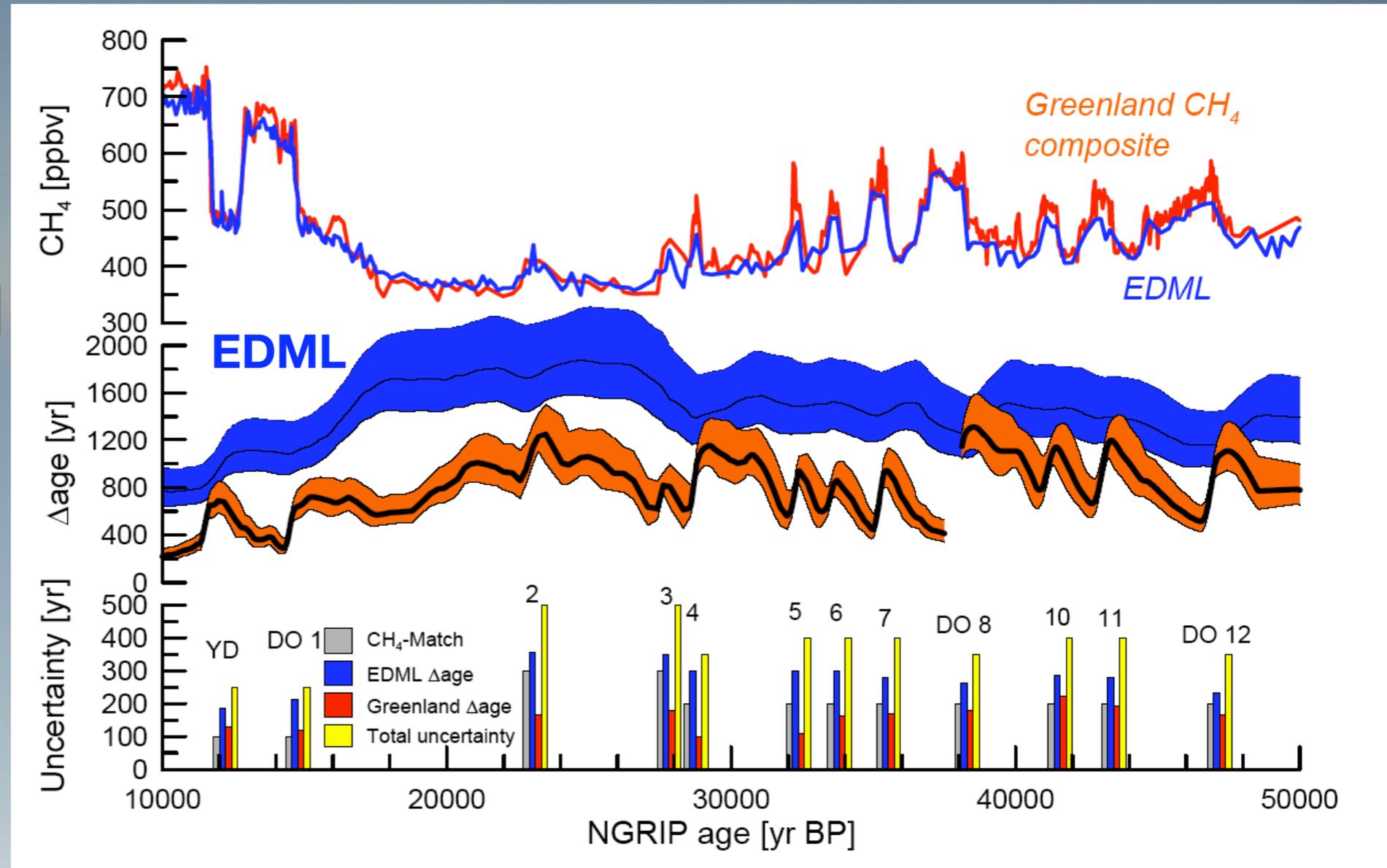
Synchronisation NGRIP & EDML mit CH₄-Gehalt

Methan Grönland
(GRIP, NGRIP)

Methan EDML

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

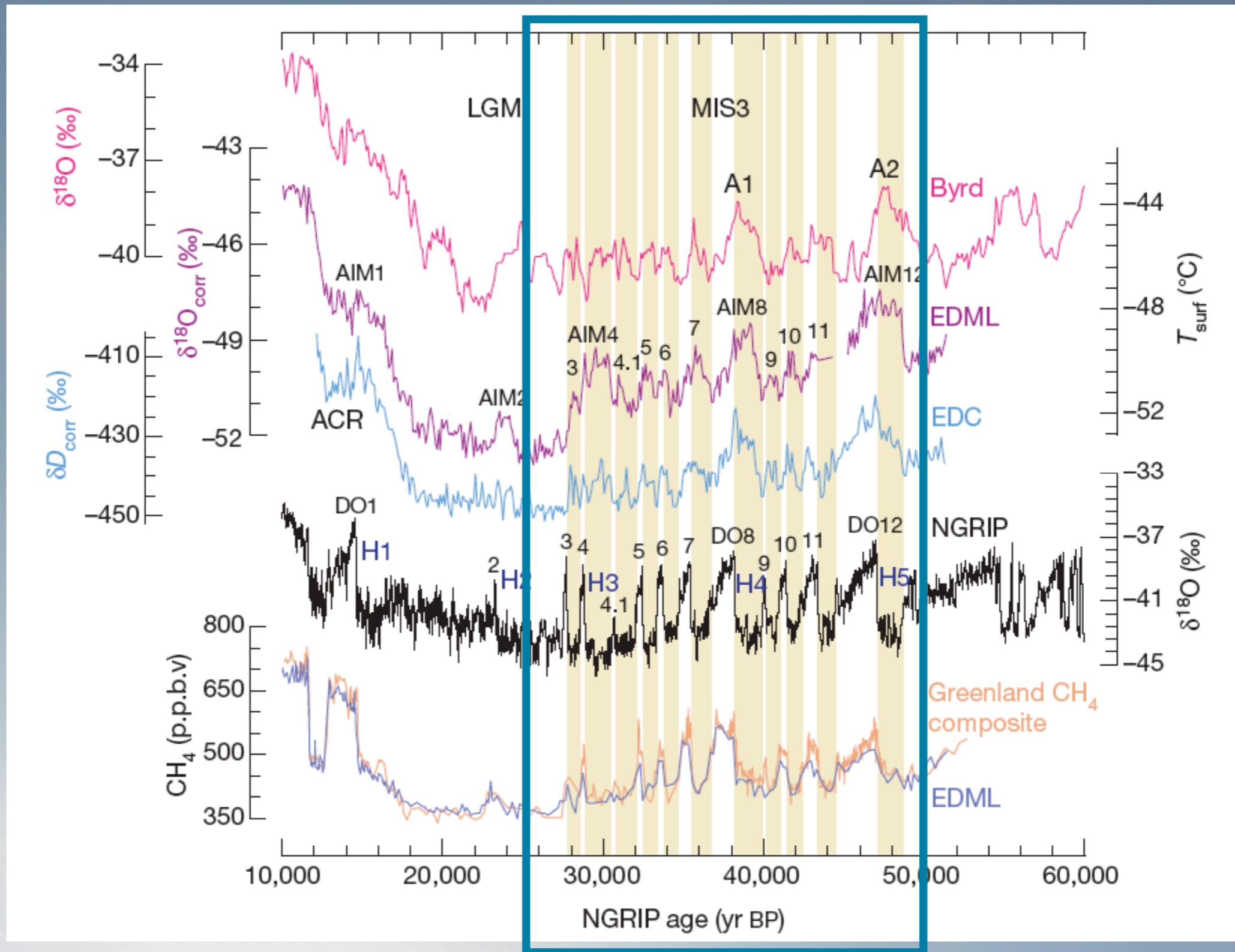
Unsicherheiten
der Datierung für
einzelne DO-Er-
eignisse



Methanschwankungen sind global synchron

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

Antarktische Eiskerne synchronisiert mit NGRIP

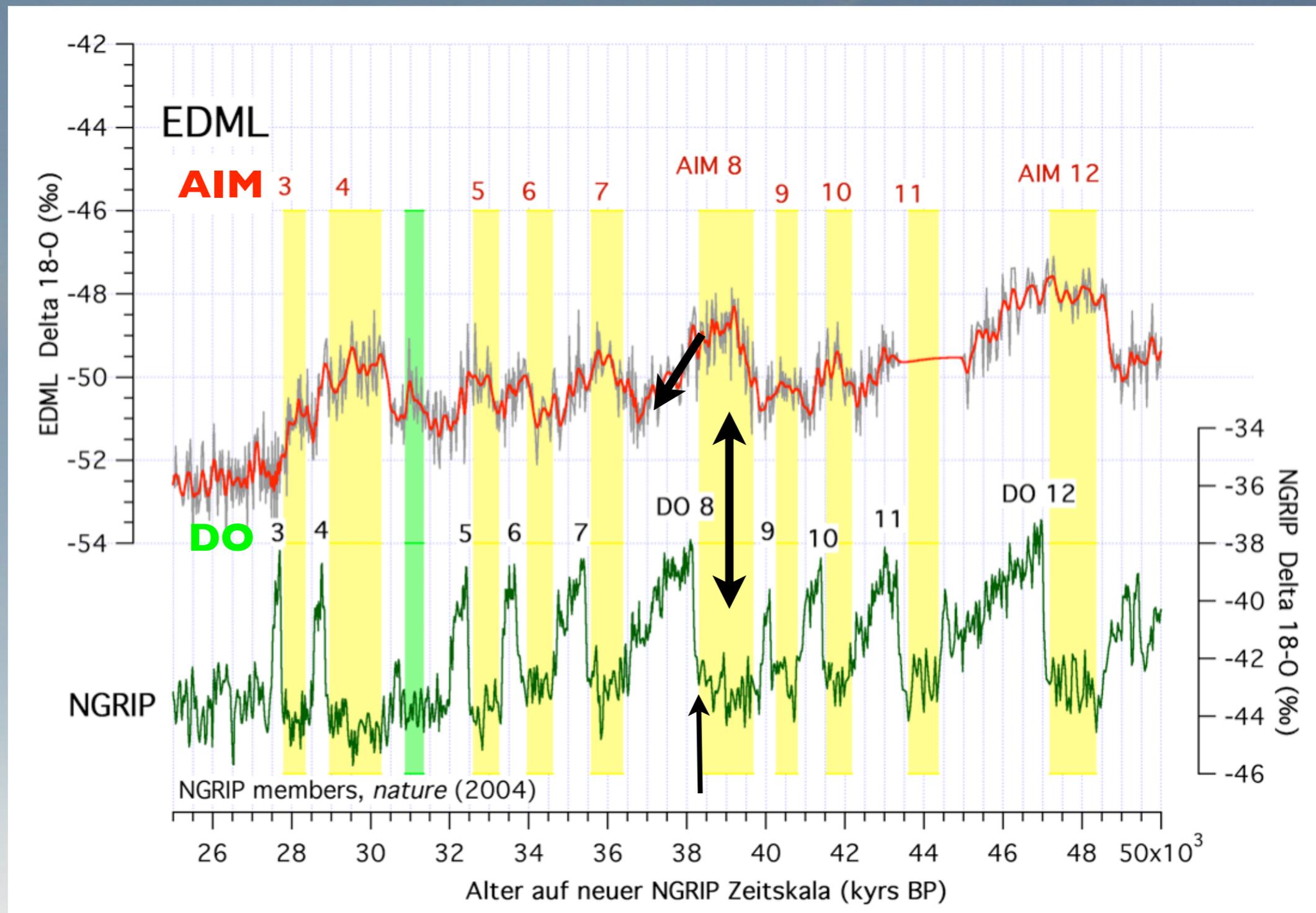


EPICA Community Members: One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica.
Nature 444, 195-198 (2006)

Vergleich Antarktis (EDML) - Grönland (NGRIP)

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

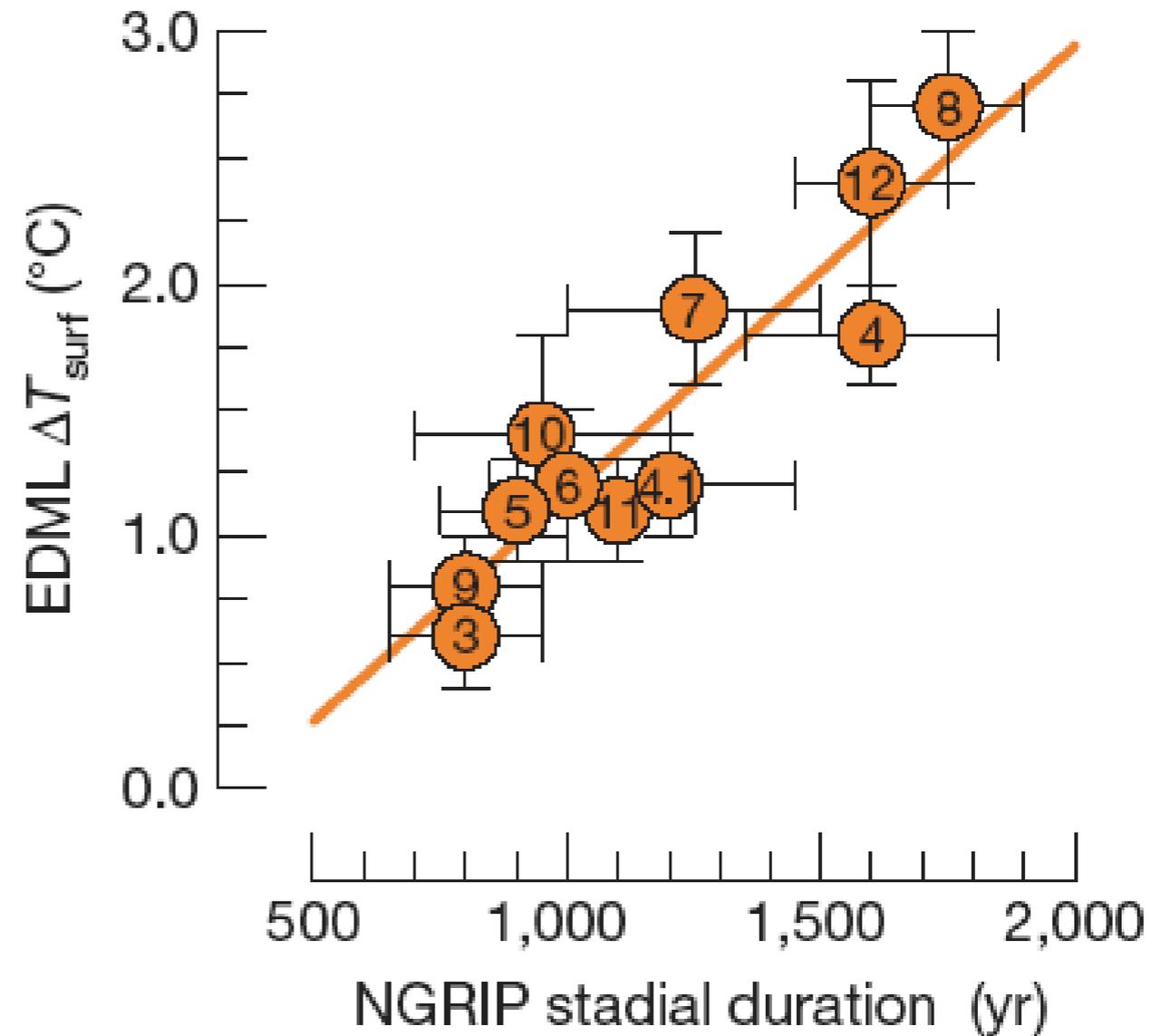
In der Antarktis beginnt die Erwärmung in einer Kaltphase (Stadial) des Nordens, die Abkühlung in einer Warmphase (Interstadial)



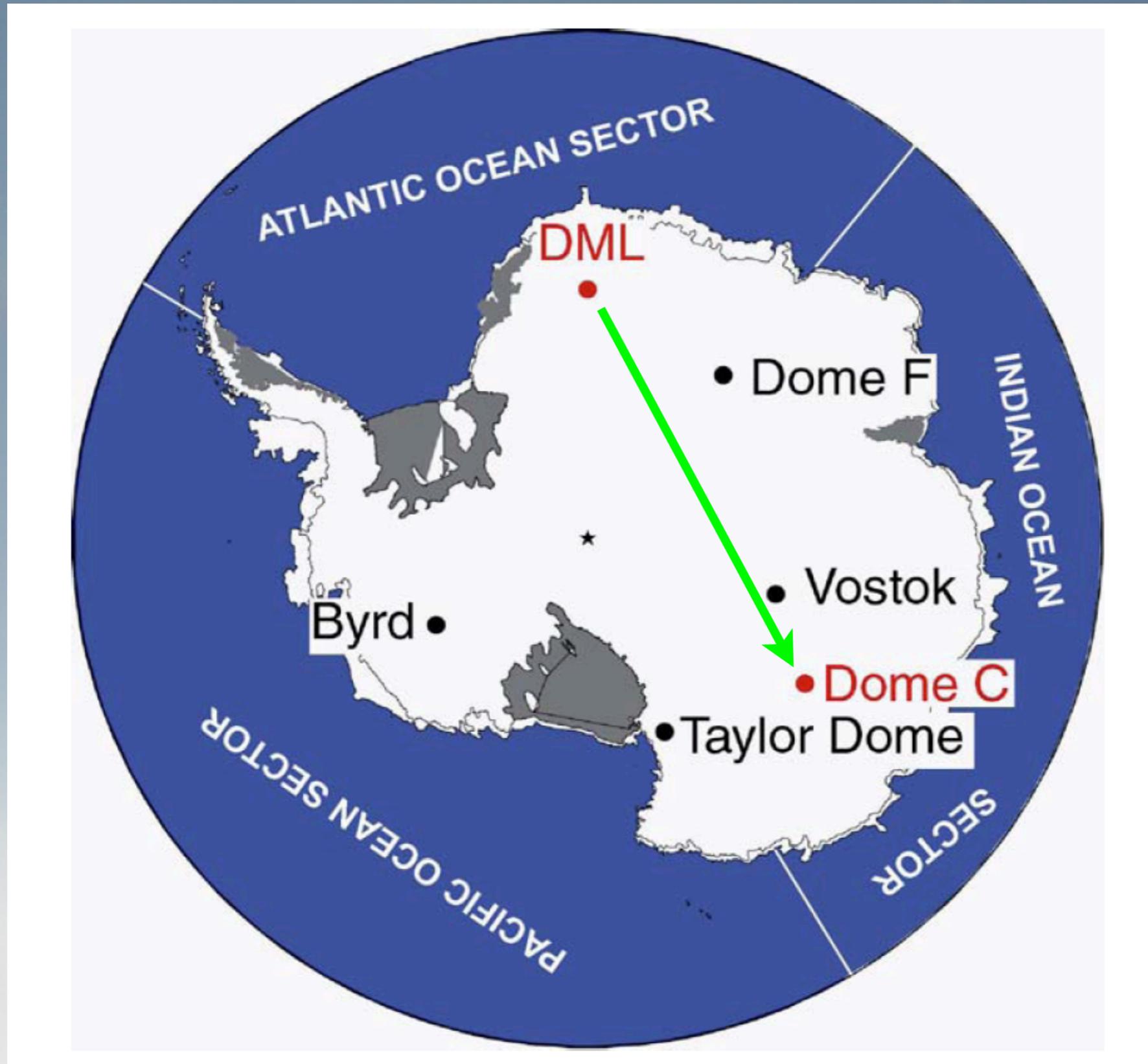
Quelle: EPICA community members: *Nature*, Vol. 444, November 9, 2006

Vergleich Antarktis (EDML) - Grönland (NGRIP)

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

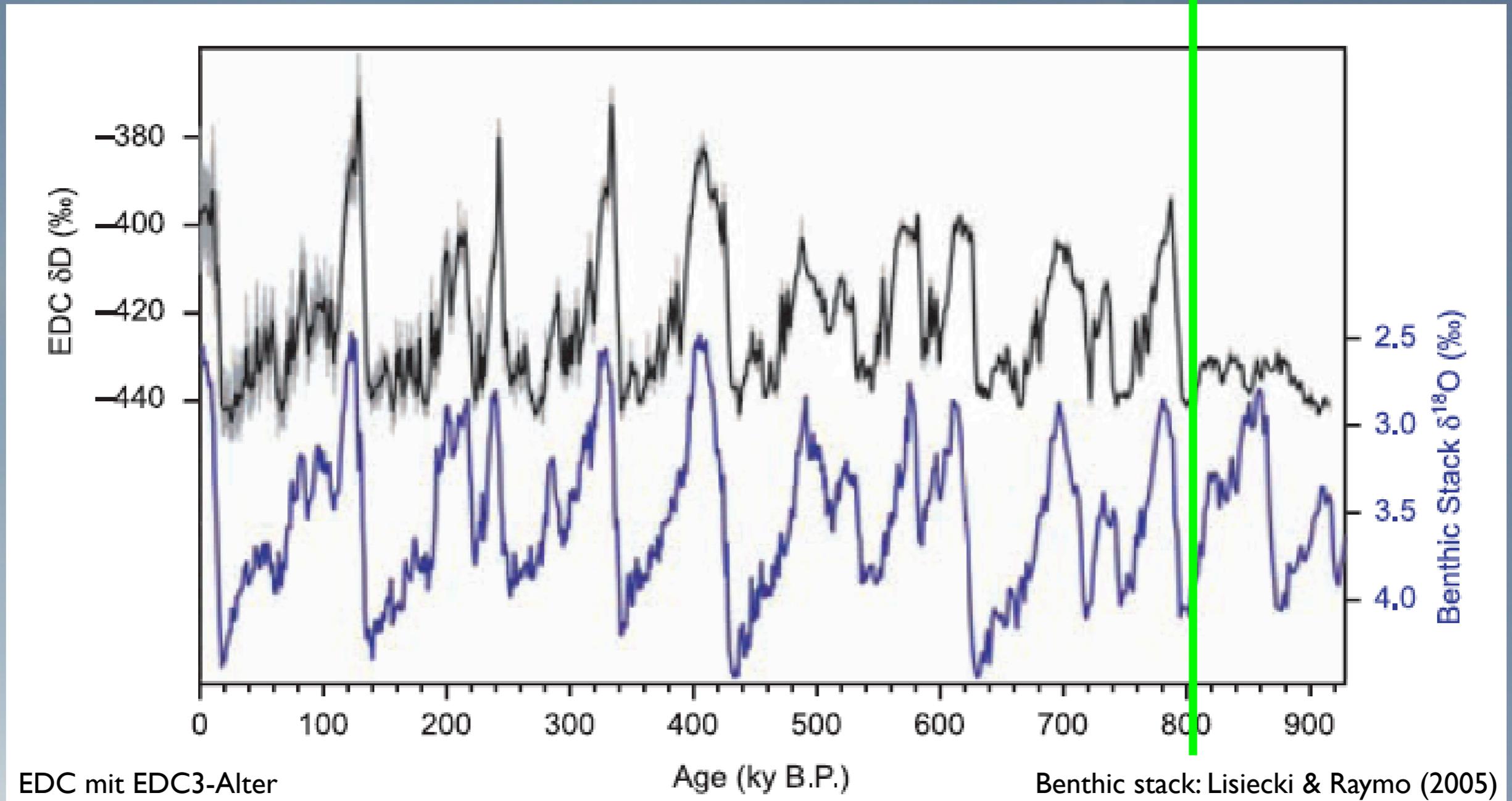


Von EDML nach Dome C



EPICA Community Members: Nature 444, 195-198 (2006)

Vergleich Dome C (Eis) mit Sedimenten (Foraminiferen)

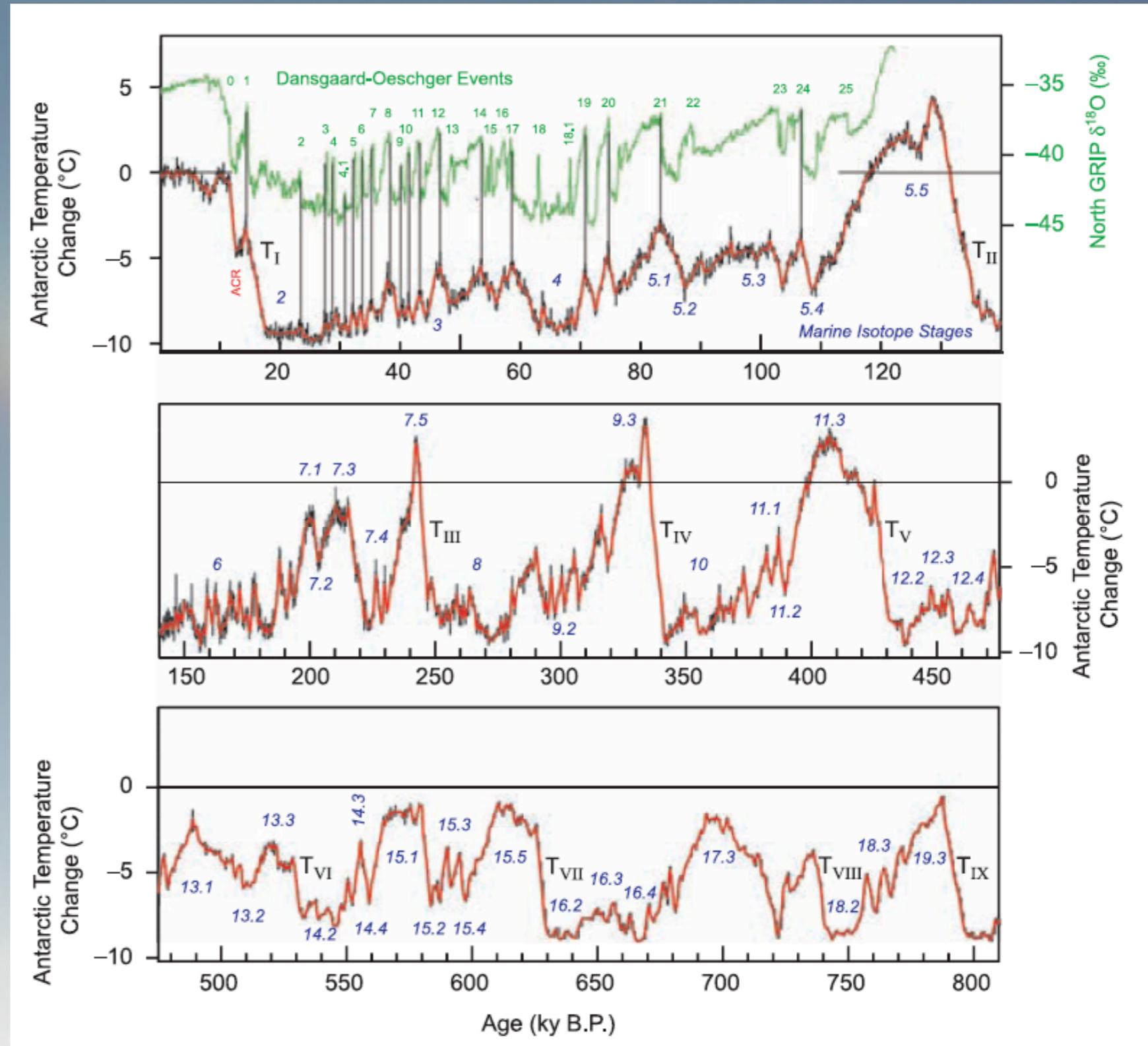


Übereinstimmung bis 810 ka BP,
d.h. klimatisch interpretierbar

Der EDC Eiskern

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

Auch in früheren Glazialen treten vergleichbare Schwankungen auf.

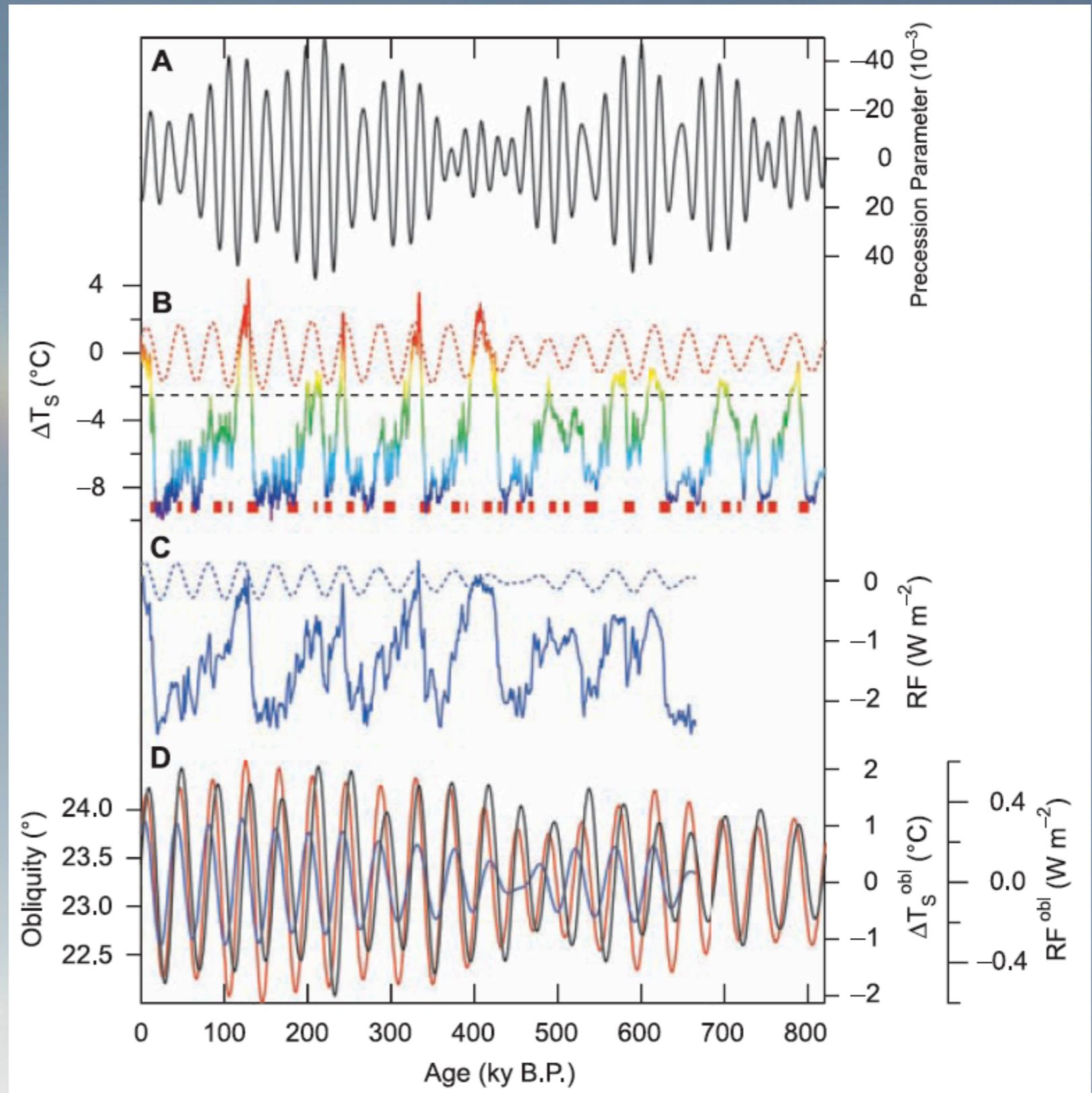


Was bestimmt Stärke der Interglaziale ?

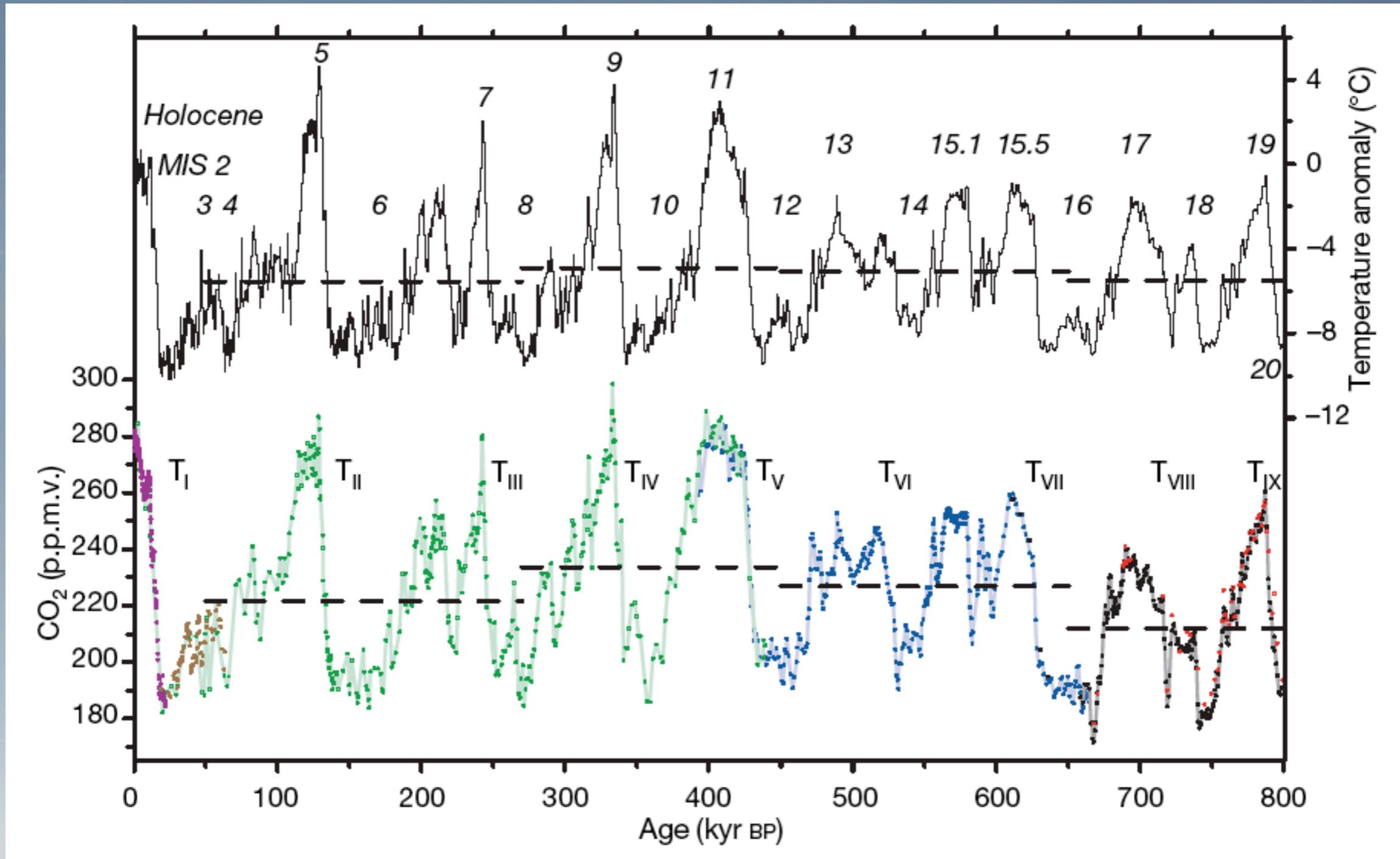
Die Stärke der Interglaziale ist stark variabel.

Wenn Änderung der Erdschiefe (obliquity) und der Präzession (precession) in Phase: starke Interglaziale (MIS 1, 5, 9, 11, 19).

Wenn Änderung der Erdschiefe (obliquity) und der Präzession (precession) in Anti-Phase: schwache Interglaziale (MIS 13, 15, 17, 7.3).



EPICA Dome C (EDC) Temperaturanomalien

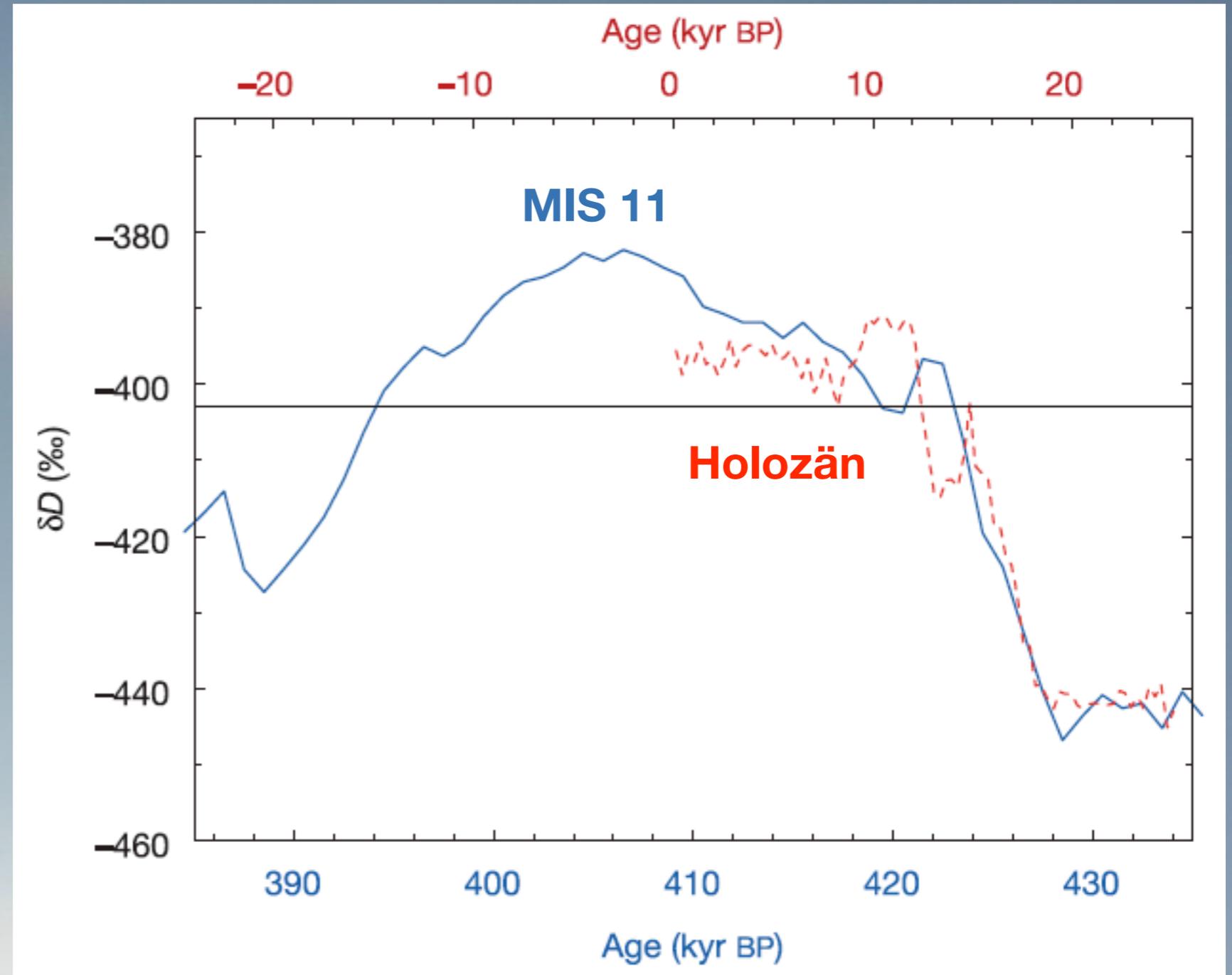


CO₂-Gehalte aus Antarktischen Bohrkernen: Taylor Dome (braun), Vostok (grün) und Dome C (Labore Bern, Grenoble)

Lüthi, D. et al.: High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. Nature 43, 379-382 (2008)

Aus der Vergangenheit in die Zukunft blicken

EDC: Vergleich
Termination V &
MIS 11 mit
Termination I &
Holozän



EPIGA Community Members: Nature 429, 624-627 (2004)

Zusammenfassung

- 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
- Treibhausgaskonzentrationen heute deutlich höher als in Eiskernen nachweisbar

*Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit*

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

Dr.,Ing. Hans **Oerter**, AWI Bremerhaven

Kommentare zu den Folien des Vortrags bei der Fortbildungsveranstaltung der DGM, ZV Rheinland, zu Köln am 4.12.2008. 6. Intern. Polartag

Copyright der Bilder/Abbildungen und Texte beim Autor bzw. bei den angegebenen Quellen. Nur für den persönlichen Gebrauch oder für Unterrichtszwecke freigegeben.

Folie1:

Titel des Vortrags: Eisbohrkerne als Klimaarchiv.

Hintergrund: Arbeiten während des Abteufens einer ca. 100m tiefen Eiskernbohrung nahe der Kohlenstation im Dezember 2005 (Foto: H. Oerter). Die Eiskerne werden standardmäßig auf das Packmaß von 1m geschnitten.

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.

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 Tiefprojekt NEEM geplant.

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). 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/m² 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 gefördertem gefrorenem subglazialen Wasser wurde ein Holzsplitter gefunden, dessen Herkunft noch nicht restlos geklärt ist. Die Eem-Warmzeit konnte an dieser Bohrlokation 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.

North Greenland Ice Core Project members: High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. Nature 431, 147-151 (2004)

NEEM (North Greenland Eemian Drilling); internationales Eiskernbohrprojekt in Nordwestgrönland 2007-2011 bei 77.5°N, 50.9°W und 2650 m ü. Meer
NEEM ist ein Projekt des Internationalen Polarjahres (IPY) 2007/2009 unter dänischer Federführung. Dänemark wird 50% der Kosten aus seinem IPY-Förderprogramm zur Verfügung stellen, weitere 30 % haben die USA zugesagt. Außerdem beteiligen sich Belgien, China, Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Island, Japan, Kanada, die Niederlande, Schweden, die Schweiz, Südkorea und die USA.

In den bisher abgeteufte Eiskernbohrungen auf Grönland ist die Klimageschichte des letzten Interglazials (Eem-Warmzeit, 115.000 bis 130.000 Jahre v. Heute) nicht zufrieden stellend dokumentiert. Eem-Eis ist zwar in den beiden Bohrungen auf dem Summit von Grönland (GRIP und GISP2) vorhanden, aber stark in der seiner Abfolge gestört, bei NGRIP ist es unvollständig, da dort basales Schmelzen auftritt. In den ersten Eiskernen von Camp Century und Dye3 ist es zu stark ausgedünnt, um als Klimaarchiv verwendet werden zu können. Deshalb wurde nach einem weiteren Bohransatzpunkt gesucht, wo diese Eisschichten ungestört und komplett erhalten sein könnten und so auch der Beginn der Eem-Warmzeit archiviert ist. Als aussichtsreichster Punkt erscheint ein Gebiet in Nordwestgrönland bei 77.5°N, 50.9°W auf 2650 m Meereshöhe, mit 2542m Eismächtigkeit und einem jährlichen Schneezutrag von 250 kg/m². Für das Projekt sind die Jahre 2007-2011 vorgesehen. NEEM begann im Juni 2007 mit einer wissenschaftlichen Traverse entlang der Eisscheide von der geschlossenen Bohrstelle NGRIP (75,1° N, 42,3° W, 2918 m Meereshöhe) nach NEEM. Entlang der 360 km langen Fahrtroute wurde mit Eisradarmessungen der Verlauf der internen Eisschichten dokumentiert, des Weiteren wurden oberflächennah Schneeproben genommen. Gleichzeitig wurden so die bei NorthGRIP geparkten Fahrzeuge und andere schwere Ausrüstungsgegenstände zur neuen Bohrstelle überführt. 2008 wurde die Bohrstelle eingerichtet, die ersten 100m abgeteuft und eine Verrohrung ins Bohrloch eingebracht. In den Jahren 2009-2011 soll die Eiskerntiefbohrung mit einem gegenüber NorthGRIP modifizierten Bohrgerät, das an die höhere Viskosität einer neuen Bohrlochflüssigkeit angepasst wird, bis zum Untergrund abgeteuft werden (www.icecores.dk).

Folie4:

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-Eisscheide (ice divide) der Ostantarktis (gestrichelte gelbe Linie). Die neue, geplante chinesische Bohrung auf Dome A, wird ebenfalls auf dieser Eisscheide 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 Wostok-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/m²; 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/m²; 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 Schneezutratsrate eine deutliche 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 Schneezutrats 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 CO₂, CH₄ und N₂O in der Vergangenheit, die zeigen, dass nie zuvor solch hohe Konzentrationen wie heute in der Atmosphäre auftraten. Es wurde nachgewiesen, dass die Konzentrationen von CO₂ 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 /m²

1995 errichtete das Nationale Institut für Polarforschung (NIPR) in Tokyo, Japan, (<http://www.nipr.ac.jp/english/>) auf Dome Fuji ein Forschungsstation, an der ein tiefer Eisbohrkern abgeteuft und Atmosphärenforschung ganzjährig betrieben werden sollte. Die Station besteht aus acht Gebäuden mit einer Gesamtfläche von 407 m². 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 und 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. Die Bohrung musste bei 3028,52 m am 23. Januar 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 thermoelektrischen Bohrgeräten im Umfeld der Wostok-Station bis zu Tiefen von 500 m und 952 m gebohrt, bei denen das Schmelzwasser noch aus den Bohrlöchern entfernt wurde. Seit 1980 wurde in mit Flüssigkeit gefüllten Bohrlöchern gebohrt und 1981 eine Tiefe von 1415m, 1985 von 2002 m erreicht. Das Bohren des Wostok-Eiskern 5G begann 1990 mit einem thermoelektrischen Bohrer. Es wurde ganzjährig gebohrt. In einer Tiefe von 2502 m hat sich der Bohrer festgefahren. Nachdem das Bohrkabel aus dem Bohrloch entfernt war, wurde ab 2220 m ein neuer Kern (5G-1) in einem 6-8° geneigten Bohrloch gefördert, bis die Bohrung 1993 in einer Tiefe von 2775 m unterbrochen wurde. 1994 wurde die Wostok-Station wegen finanzieller und logistischer Probleme vorübergehend geschlossen und die Bohrung eingestellt. 1995 wurde die Bohrung mit einem elektro-mechanischen Bohrer bis zu einer Tiefe von 3109 m verlängert. Ab 1996 wurde nur noch in den antarktischen Sommermonaten gebohrt. 1997/98 erreichte die Bohrung eine Tiefe von 3623 m und wurde aufgrund internationaler Forderungen eingestellt, um eine Verunreinigung des subglazialen Wostok-Sees zu verhindern. Seit 1993 kooperierte Russland mit Frankreich und den USA bei den Bohrarbeiten an der Wostok-Station und der Analyse des Eisbohrkerns. 2003 wurde die Bohrung bis 3623m, d.h. 130 m über der Seeoberfläche, verlängert. Russland hat gemäß den SCAR-Richtlinien eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchgeführt und plant die Bohrung in der Saison 2008/09 bis in den See hinein fortzusetzen.

Der Kern G5/G5-1 dokumentiert bis zu einer Tiefe von 3310 m die Klimageschichte zurück bis 414.000 Jahre v. Heute und umfasst 4 glaziale Zyklen. Zwischen 3310 und 3539 m scheint die Schichtenabfolge durch die Eisbewegung gestört zu sein. Darunter wurde gefrorenes Seewasser erbohrt, das keine klimatische Information enthält. Der Wostok-Eiskern war bis

2004 der längste und älteste Eiskern. Der neuere EPICA-Eiskern von Dome C erreichte bei einer Tiefe von 3200 m ein Eisalter von mindestens 800.000 Jahren und umfasst 8 glaziale Zyklen.

Vasiliev et al.: Deep drilling at Vostok station, Antarctica: history and recent events. *Annals of Glaciology* 47. 10-23 (2007)

Folie5:

Ein Eisschild baut sich aus über einander liegenden Jahresschichten auf. Die Niederschlagsverhältnisse in der Antarktis entsprechen einem ariden Klima. Z.B. am Südpol beträgt der 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 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.

Folie6:

Aufbau eines Eisschildes oder Gletschers

Man unterscheidet bei einem Gletscher und bei den Eisschilden das Akkumulationsgebiet (grüne Schicht) und das Ablationsgebiet (rot). In der Antarktis, mit Ausnahme der Antarktischen Halbinsel, ist es kalt genug, so dass 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 der 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.

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^3 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^3 .

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)

Folie9:

Kohnen-Station ($75^{\circ}00' \text{ S}$, $00^{\circ}04' \text{ O}$, 2882 m ü. Meer), dt. Forschungsstation in Dronning-Maud-Land (Neuschwabenland), Antarktis; erbaut 2000-2001. Meteorologische Daten: Schneezutrag 64 kg/m^2 , 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) 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, 4,6m breiter und 6m 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 Landweg (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)

Folie10:

Blick in den sog. Drill-trench mit dem Bohrturm (senkrechte Position). Links ist die heizbare

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 jeweils ca. 45 min Hiev- und Fierzeit. Rechts sind Arbeitstische. Unter dem Fussboden liegt ein schmaler, 6 m tiefer 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)

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 Eisdrucks zu verhindern. Die Bohrflüssigkeit muss bei Temperaturen bis zu ca. -60°C flüssig bleiben, ihre Viskosität muss 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)

Folie12:

Kurze Videoszene, die das Bohren zeigt. Im pdf-Format nicht darstellbar.

Folie13:

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

Hintergrundbild: Blick in eine Firnbohrung 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)

Folie14:

Klimainformationen aus dem Eis

Im Eis sind Informationen zu Schwankungen der Lufttemperatur, zur Gas-Zusammensetzung 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}O und Deuterium (^2H) im

Niederschlag beschreibt.

Wasser besteht aus Wasserstoff und Sauerstoff. Beide Elemente besitzen mehrere stabile Isotope, der Sauerstoff die Isotope ^{16}O , ^{17}O und ^{18}O , der Wasserstoff die Isotope ^1H und ^2H (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 (δ -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}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 δ -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 δ -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°C einer Änderung des $\delta^{18}\text{O}$ -Wertes eine $0,80 \text{‰}$ und des δD -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 Lufteinschlusses 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. $1000\text{-}1200\text{m}$ 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.

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 Meeresoberfläche und die Meeresbildung eine wichtige Rolle. Entsprechend gelangen schwefelhaltige Verbindungen aus dem Wasser in die Atmosphäre oder Seesalzkomponenten, die dann später in den Eiskernen nachgewiesen werden können.

Folie15:

Schnittplan für EPICA-Eiskerne

Die Eiskerne werden nach einem vorgegebenen Schnittmuster zersägt. Das Schnittmuster wurde vom EPICA Steering Committee festgelegt und garantiert die Auf- und Verteilung des Probenmaterials an die an EPICA beteiligten Labore. Kontinuierliche Proben stellen die Aliquote für Dünnschnitte, CFA, $\delta^{18}\text{O}$ & δD sowie ^{10}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 ggffls. 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 Kühllaboren des AWI, in einer konzertierten Aktion, mit internationaler Beteiligung aufgeteilt.

Folie16:

Antarctic Ice Core Records: Vostok and EPICA.

Quelle der Abb.: www.pages.unibe.ch

Original-Abbildungsunterschrift: The record of CO_2 and CH_4 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

Die δD -Kurve (äquivalent zu $\delta^{18}\text{O}$) 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 (Miliankovich-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_2 (oben) und Methan (CH_4 , 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_2 oder CH_4 begann. Beim Vergleich der CO_2 -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_2 -Konzentration von 385 ppmv wurden in den Eiskernen zu keiner Zeit nachgewiesen.

Folie17:

Korrekturen für Schneedeckung 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

Folie18:

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

Die ursprüngliche 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 archiviert und öffentlich zugänglich.

EPICA Community Members: One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature*

Folie19:

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 Folien noch näherer diskutiert.

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

Folie20:

Isotopenprofile der Grönländischen Kerne GRIP und NGRIP

Quelle: NorthGRIP members 2004.

Originalabb.-Unterschrift:

The NGRIP stable oxygen isotopic record compared to the GRIP record.

a) (oben) The GRIP oxygen isotopic profile (blue) with respect to depth at GRIP. Isotopic values ($\delta^{18}\text{O}$) are expressed in ‰ with respect to Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW).

The measurements have been performed on 55 cm samples with an accuracy of $<0.1\text{‰}$.

b) (Mitte) The NGRIP oxygen isotopic profile (red) with respect to depth at NGRIP. For comparison, the GRIP record (blue) has been plotted on the NGRIP depth scale using the rapid transitions as tie points.

c) (unten) The difference between the NGRIP and GRIP oxygen isotopic profiles plotted above on the GRIP2001/ss09sea timescale in 50 yr resolution (black). The record is compared to a record representing sea level changes (green) and a 10-kyr smoothed oxygen isotope profile from NGRIP (red).

North Greenland Ice Core Project members: High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. Nature 431, 147-151 (2004)

Zu GRIP und NorthGRIP siehe auch Folie 3

Folie21:

Synchronisation von EDML und NGRIP mit Methangehalt

Quelle: EPICA community members 2006.

Originalabb.-Unterschrift:

Figure S2:

Top: CH₄ records for Greenland and EDML.

Middle: Δ 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 Δ age is shown. After 38kyr the synchronization is based on GRIP CH₄ data and the GRIP Δ age is shown.

Bottom: Contributions to the synchronisation uncertainty for individual rapid climate changes. Grey bar represents the uncertainty of the CH₄ synchronization. Blue and Red bars show the uncertainty of Δ 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 gemacht. Im oberen Teil der abb. ist das ergebnis der Synchronisation dargestellt. Eine Schwierigkeit tritt bei der Umrechnung der Gasalter in Eisalter auf, die für GRIP/NGRIP und EDML unterschiedliche Altersdifferenz, das sog. Δ age. Im mittleren Teil der Abb. 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 klimatische Schwankungen (DO-Ereignisse), die bei 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)

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 CH₄ 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 Abb. 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 Jahresschichten bis 41.000 Jahre vor Heute abgezählt, darunter wurde das Eis mithilfe numerischer Modelle datiert. Die gelblichen 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)

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) (s. Folie 27).

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 ^{18}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.

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 stadial 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)

Folie25:

Von EDML nach Dome C

Quelle: EPICA community members 2006. Supplement

Originalabb.-Unterschrift:

Figure S1: Map of the Antarctic continent indicating the EPICA drill sites in Dronning Maud Land (DML) and at Dome C together with previously drilled deep ice cores.

Die weiteren Folien sollen noch einige Ergebnisse des EDC-Kerns zeigen, der insgesamt acht Glazialzyklen umfasst.

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

Folie26:

Vergleich Dome C (Eis) mit Sedimenten (Foraminiferen)

Quelle: Jouzel et al. (2007).

Originalabb.-Unterschrift:

Fig. 1. Comparison of the δD 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 δD record, which includes published results down to 788m, benefits from an improved accuracy (1σ of $\pm 0.5\%$) 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 ~ 800 ky B.P. justifies the use of oceanic sediment nomenclature (MIS) for describing the ice core record.

Die am EDC-Kern mit einer Tiefenauflösung von 55cm gemessenen Deuteriumgehalte (Jouzel et al., 2007) werden mit einer gestapelten Kurve von benthischen $\text{d}18\text{O}$ -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 $\delta\text{-O}$ 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)

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), ΔT_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 nachzuweisen. 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)

Folie28:

Der EDC Eiskern

Quelle: Jouzel et al. (2007).

Originalabb.-Unterschrift:

Fig. 3. (A) Precession parameter displayed on an inversed vertical axis (black line).

(B) EDC temperature [solid line, rainbow colors from blue (cold temperatures) to red (warm temperatures)] and its obliquity component extracted using a Gaussian filter within the frequency range $0.043 \pm 0.015 \text{ ky}^{-1}$ [dashed red line, also displayed in (D) as a solid red line on a different scaling]. Red rectangles indicate periods during which obliquity is increasing and precession parameter is decreasing.

(C) Combined top-of-atmosphere radiative forcing due to CO_2 and CH_4 (solid blue) and its obliquity component [dashed blue, also displayed in (D) as a solid blue line on a different scaling].

(D) Obliquity (solid black line), obliquity component of EDC temperature (red line), and obliquity component of the top-of-atmosphere radiative forcing due to CO_2 and CH_4 (blue). Insolation calculations were calculated using the "Analyseries software".

Eine Frage die mit Hilfe von Zeitreihenanalyse am EDC-Kern beantwortet werden sollte, war, was die starken Interglaziale der zurückliegenden 400.000 Jahre verursacht hat. Jouzel et al. weisen nach, dass wenn die Änderungen der Erdschiefe (obliquity) und der Präzession (precession) in Phase verlaufen sich starke Interglaziale ausbilden (MIS 1, 5, 9, 11, 19). Wenn Änderungen der Erdschiefe (obliquity) und der Präzession (precession) in gegenläufig sind entstehen schwache Interglaziale (MIS 13, 15, 17, 7.3).

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

Folie29:

Der EDC Eiskern

Quelle: Lüthi et al. (2008).

Originalabb.-Unterschrift:

Figure 2: Compilation of CO_2 records and EPICA Dome C temperature anomaly over the past 800 kyr. The Dome C temperature anomaly record with respect to the mean temperature of the

last millennium (based on original deuterium data interpolated to a 500-yr resolution), plotted on the EDC3 timescale, is given as a black step curve. Data for CO₂ are from Dome C (solid circles in purple, blue, black: this work, measured at Bern; red open circles: this work, measured at Grenoble), Taylor Dome (brown) and Vostok (green). All CO₂ values are on the EDC3-gas age scale. Horizontal lines are the mean values of temperature and CO₂ for the time periods 799–650, 650–450, 450–270 and 270–50 kyr BP. Glacial terminations are indicated using Roman numerals in subscript (for example T_i); Marine Isotope Stages (MIS) are given in italic Arabic numerals.

Messungen von CO₂ am EDC-Kern liegen jetzt bis zu einem Alter 800.000 Jahren vor. Daurch wurde die in Folie16 gezeigte Kurve (Werte bis 650.000 Jahre) erheblich erweitert. Es ist ein Datensatz, der sich aus verschiedenen Messreihen an verschiedenen Kernen (Taylor Dome, Vostok, EDC) und von verschiedenen Labors zusammensetzt. Die Messungen an EDC wurden in Bern und Grenoble durchgeführt

Lüthi, D. et al.: High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. Nature 43, 379-382 (2008)

Folie30:

Aus der Vergangenheit in die Zukunft blicken

Quelle: EPICA Community members (2004)

Originalabb.-Unterschrift:

Figure 5: Comparison of Termination V plus MIS 11 with Termination I plus Holocene. δD data for MIS 11 (1-kyr averages) are shown as a solid blue line using the lower x axis; data for the Holocene are shown as a dashed red line using the upper x axis. Various alignments could be made, but we have adjusted the x axes so that the start of each termination is aligned. A horizontal line is drawn at 2403‰.

Während MIS11, dem Interglazial vor etwa 400.000 Jahren war die Konstellation der Erdumlaufparameter der heutigen am besten vergleichbar. Deshalb könnte MIS11 als Analogon für die holozäne Warmzeit gelten. MIS11 war das längste der vier letzten Interglaziale und dauerte etwa 28.000 Jahre. Vergleicht man den Übergang vom Glazial zum Interglazial für beide Zeiträume (Termination V und Termination I), so ergeben sich signifikante Ähnlichkeiten. Man könnte deshalb schlussfolgern, dass das Holozän noch gut weitere 15.000 Jahre dauern könnte, bis wieder ein Abstieg zu glazialen Temperaturen hin erfolgt. Weiters wäre ein weiterer Temperaturanstieg zu erwarten. Diese Überlegungen berücksichtigen nicht steigende Temperaturen infolge steigender Gehalte an Treibhausgasen. Es wurde ja bereits früher gezeigt, dass die CO₂-Gehalte von MIS11 weit unter den heutigen Werten lagen (vgl. Folie 16).

EPICA Community Members: Nature 429, 624-627 (2004)

Folie31:

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. In den Eiskernen konnten keine so hohen Konzentrationen an den Treibhausgasen CO₂ und Methan nachgewiesen werden, wie sie heute in der Atmosphäre gemessen werden.

Folie31:

Die Folien mit Kommentaren sind in der Publikationsdatenbank (ePIC) des Alfred-Wegener-Instituts gespeichert und können von dort abgerufen werden: <http://www.awi.de/People/show?hoerter>, dann weiter zu „Invited Talks“.

Hintergrundfoto: Blick durch aufgestapelte Eiskerntröge aus Aluminium auf die Kohlen-Station, Dronning-Maud-Land, Antarktis (Foto: Hans Oerter, 2005)

Der Autor bietet den geneigten Leser eventuelle Tippfehler zu entschuldigen!