

Klimaschwankungen: Daten aus Eisbohrkernen der Antarktis und ihre Interpretation

Dr.-Ing. Hans Oerter

Hans.Oerter@awi.de



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



Zuerst herzlichen Dank für die Einladung, hier in Ihrem Kreis etwas über Eisbohrkerne aus der Antarktis erzählen zu können. Ich hoffe, dass ich Ihnen während des Vortrags die Botschaft der Eisbohrkerne, die hier auf dem Bild noch in Kisten wohl verpackt auf den Abtransport warten, etwas näher bringen kann.

Tiefe Eisbohrkerne in der Antarktis



European Project for Ice Core Drilling in Antarctica (EPICA)
1996-2008

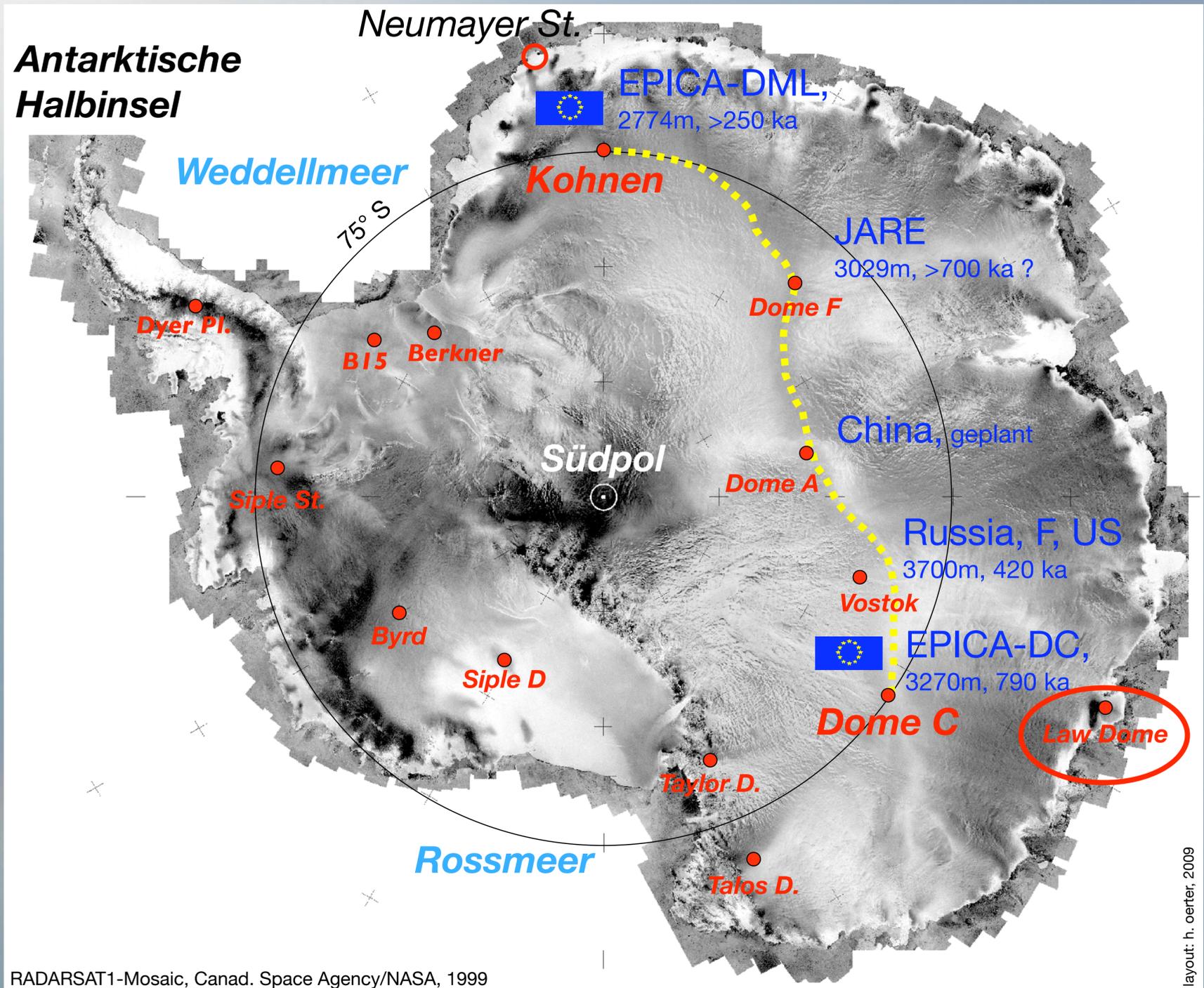
Oerter et al., *Polarforschung* 78 (1-2), 1-23 (2009)

www.polarforschung.de



Haupteisscheide der Ostantarktis

Law Dome: hohe Akkumulationsrate (640 mm we); Eiskern an dem rezente (1006-1978 AD) CO₂ - Konzentrationen bestimmt wurden.



layout: h. oerter, 2009



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



Schauen wir zuerst auf ein Bildmosaik der Antarktis, zusammengesetzt aus vielen Einzelszenen des kanadischen Satelliten RADARSAT. An den unterschiedlichen Grautönen erkennt man in der Mitte der Ostantarktis eine Struktur, die sich gleichsam als Dachfirst quer durch die Ostantarktis zieht. Es ist die Haupteisscheide (ice divide), die hier durch die gelbe, punktiert gezeichnete Linie hervorgehoben wird. So wie bei einer Wasserscheide, das Wasser rechts und links in gegensätzlicher Richtung abfließt, so fließt auch das Eis zu beiden Seiten der Eisscheide in unterschiedlicher Richtung ab.

Die bisher abgeteufte tiefen Eiskernbohrungen bei der Station Vostok (Russland), auf Dome C (EPICA (EU), EDC), bei der Kohnen-Station (EPICA (EU), EDML) und auf Dome Fuji (Japan) liegen annähernd auf dieser Eisscheide. Auch die nächste, von China geplante Bohrung auf Dome A, wird auf dieser Eisscheide liegen.

EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) war in den Jahren 1995-2006 ein europäisches Forschungsprojekt unter dem Schirm der European Science Foundation (ESF) mit Förderung durch die EU und durch nationale Beiträge. An EPICA beteiligten sich Belgien, Dänemark, Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien, die Niederlande, Norwegen, Schweden und die Schweiz.

Das Ziel von EPICA 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.

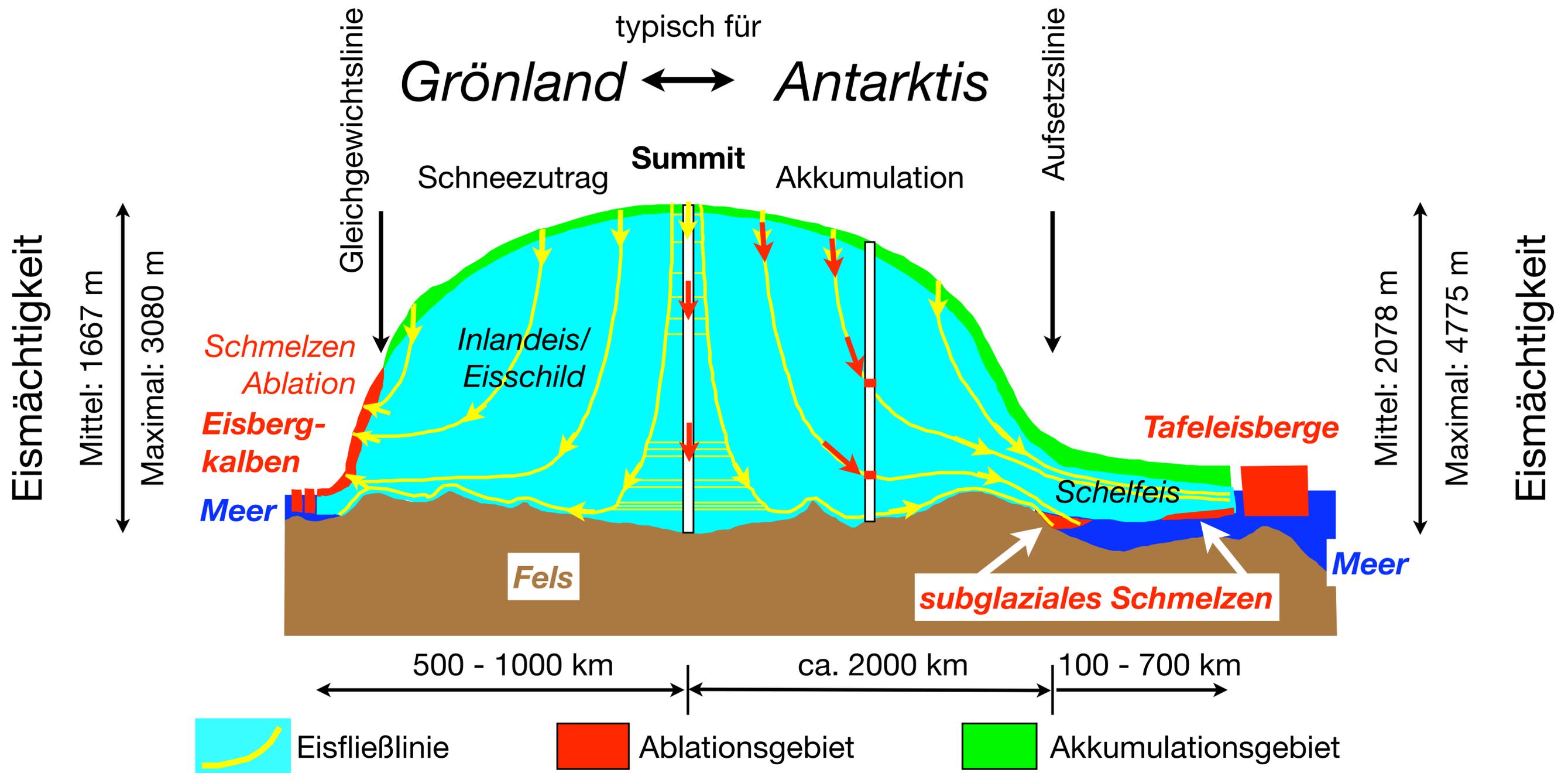
Als Bohransatzpunkte wurden der Dome C und eine Stelle (Kohnen-Station) in Dronning-Maud-Land ausgewählt. Der 3260 m tiefe EDC-Kern ergab mit ca. 800.000 Jahren (in einer Tiefe von ca. 3200m) die bisher längste klimatische Zeitreihe aus einem Eiskern.

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.

In einem Aufsatz für die Zeitschrift *Polarforschung*, Band 78, Heft 1-2 von 2008, habe ich zusammen mit einigen Kollegen das gesamte Bohrprojekt bei der Kohnen-Station beschrieben. Auch die bis 2008 vorliegende Literatur über die erreichten Forschungsergebnisse ist in dem Aufsatz aufgelistet.

Hinweisen möchte ich auch auf die Lage von Law Dome, eine Stelle mit hoher jährlicher Akkumulationsrate (640 kg m⁻² a⁻¹). Da dort kein oberflächliches Schmelzen auftritt, war es eine ideale Position, um an einem tiefen Eiskern (ca. 1200 m; Australien) rezente CO₂-Konzentrationen für die Zeit von 1007 bis 1978 AD zu bestimmen. Diese Zeitreihe überlappt mit der 1958 begonnenen Zeitreihe an der Station Mauna Loa.

Schematischer Querschnitt durch einen Eisschild

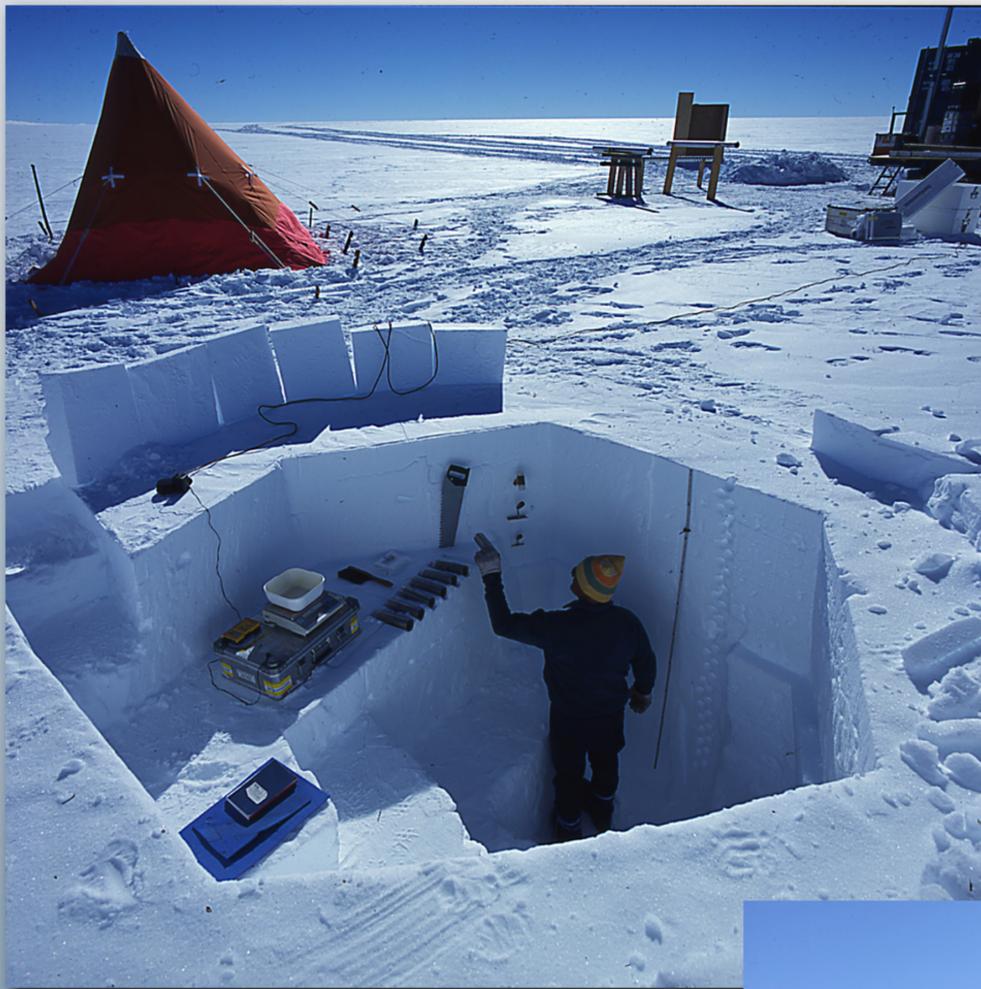


Warum ein Eisschild ein gutes Klimaarchiv sein kann, soll dieser schematische **Querschnitt durch einen Eisschild** verdeutlichen:

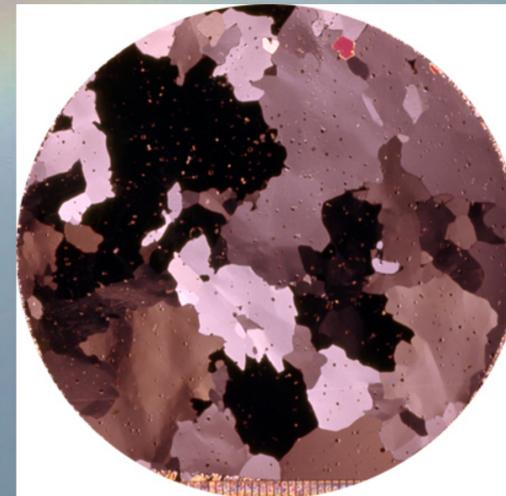
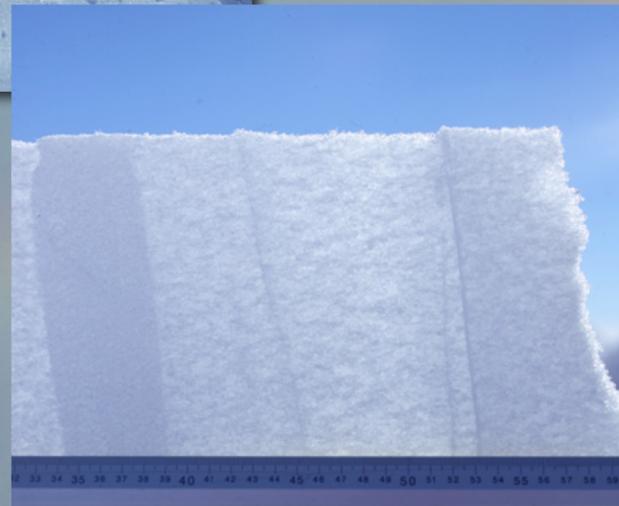
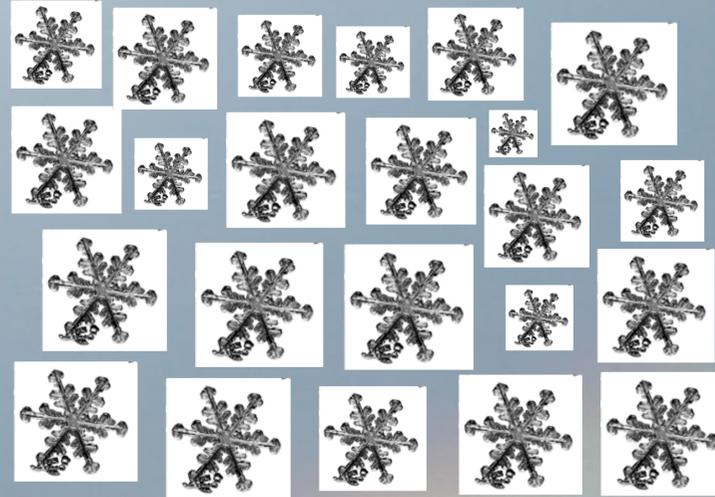
Man unterscheidet bei einem Gletscher und bei den Eisschilden das Akkumulationsgebiet (grüne Schicht) und das Ablationsgebiet (rot). In der Antarktis, mit Ausnahme der Antarktischen Halbinsel, ist es kalt genug, sodass kaum oder kein Schmelzen an der Oberfläche auftritt (geringe Schmelzbeträge gefrieren 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 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. Schelfeis) 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 der gebohrt wird. 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.



Ein Eisschild baut sich aus über einander liegenden Jahresschichten auf.



Ein Eisschild baut sich aus über einander liegenden Jahresschichten auf. Die Niederschlagsverhältnisse in der Antarktis entsprechen einem ariden Klima. So beträgt z. B. 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 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 im Allgemeinen 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.



Wie bohrt und zerteilt man einen Eisbohrkern ?

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



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



Die deutsche Forschungsstation **Kohnen-Station** in Dronning-Maud-Land (Neuschwabenland), Antarktis liegt bei 75°00' Süd und 00°04' Ost, auf einer Höhe von 2882 Metern über dem Meer. Sie wurde in den Jahren 2000-2001 erbaut. Die Kohnen-Station wurde benannt nach dem dt. Geophysiker Dr. Heinz Kohnen (*1938, †1997). Heinz 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 zweite 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.

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

7

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⁻²a⁻¹

Eis-Fließgeschwindigkeit:
0,756 m/a

Eisdicke: 2782 ±10m

Länge Eiskern: 2774,1 m

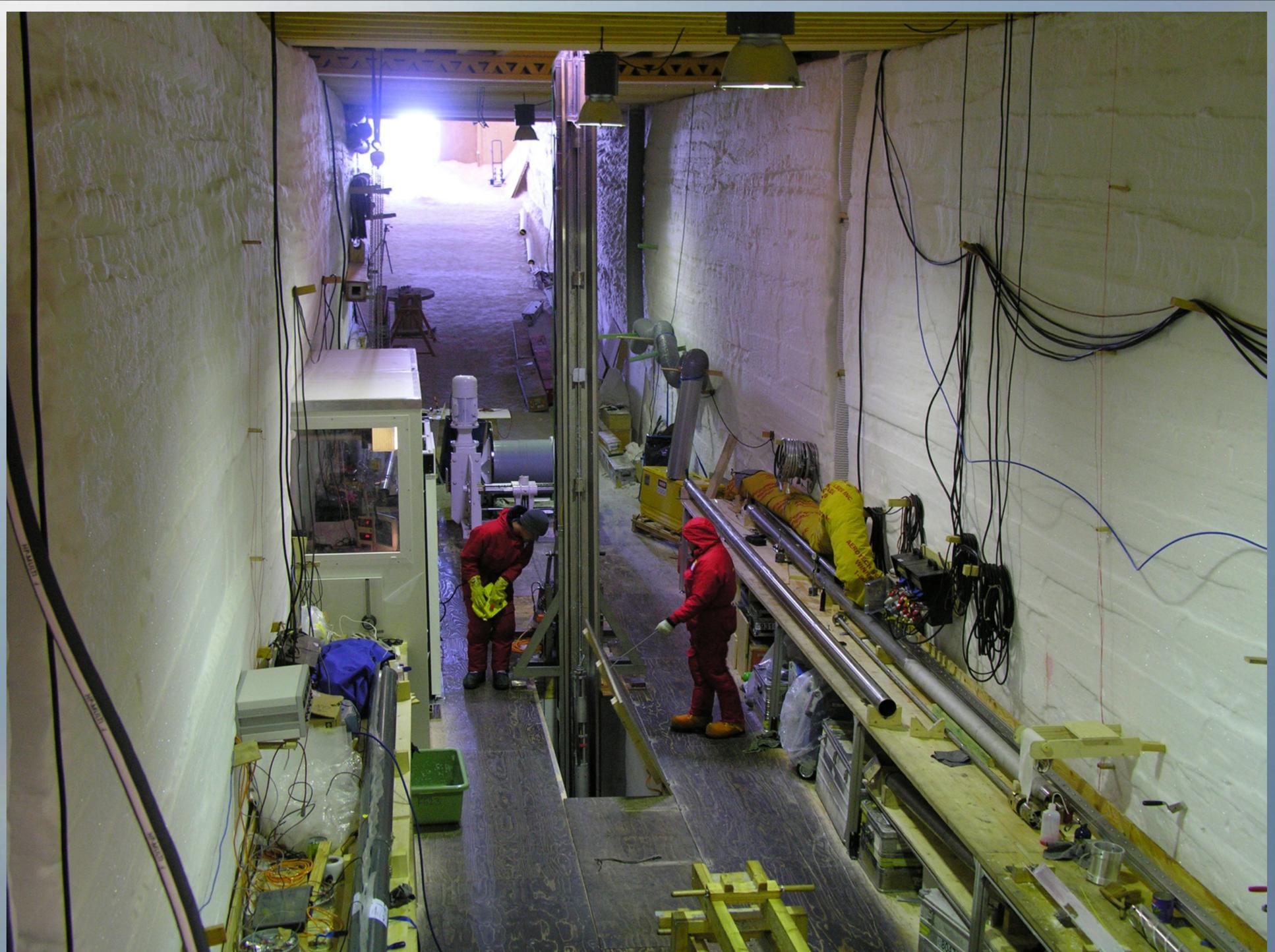


foto: hans oerter, 2006

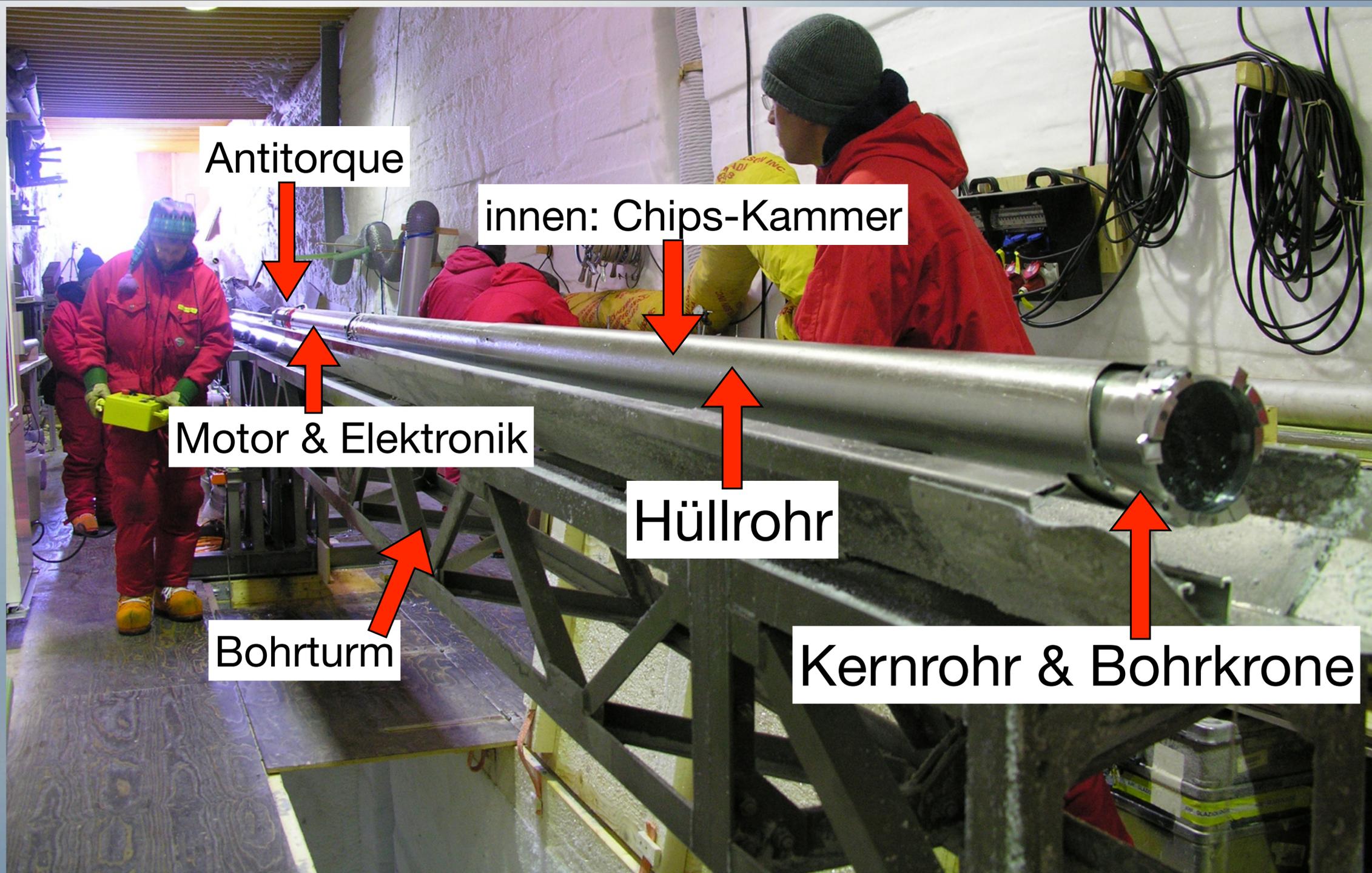


foto: hans oerter, 2006

Zum **Bohren von Eiskernen** wird heute hauptsächlich das elektromechanische Bohrverfahren eingesetzt. Beim elektromechanischen Bohrverfahren fräsen die Bohrmesser der Bohrkrone 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. Antitorque-System (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 Bohrkrone 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 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. Bei der EDML-Bohrung wurde EXXOL®D40 mit Solkane®141 eingesetzt (darf ab 2010 weltweit nicht mehr vertrieben werden).



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

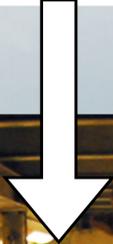
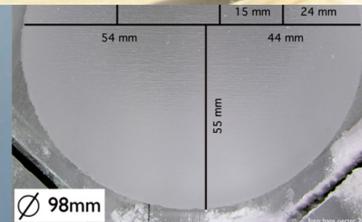
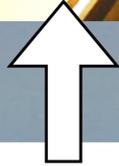


foto: hans oerter, 2009



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

foto: hans oerter, 2003

∅ 98mm

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

foto: hans oerter, 2003

Ø 98mm

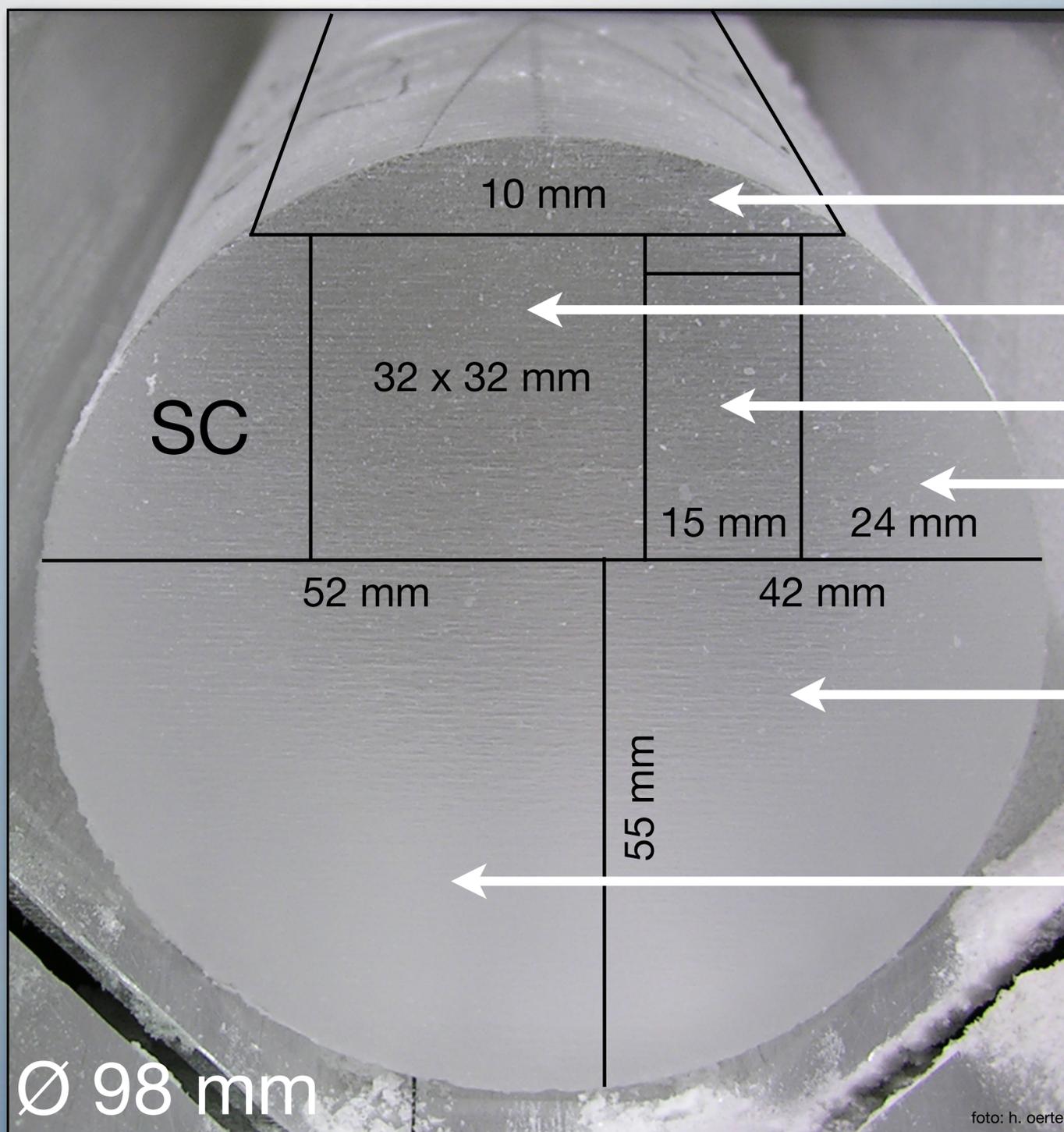


DGfP Arbeitskreis Polarlehrer, 4. Meeting Karlsruhe, 14. November 2009



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

Schnittplan



Dünnschnitte

Cont. Flow Analysis (CFA)

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

^{10}Be



Gase, Staub

Archiv

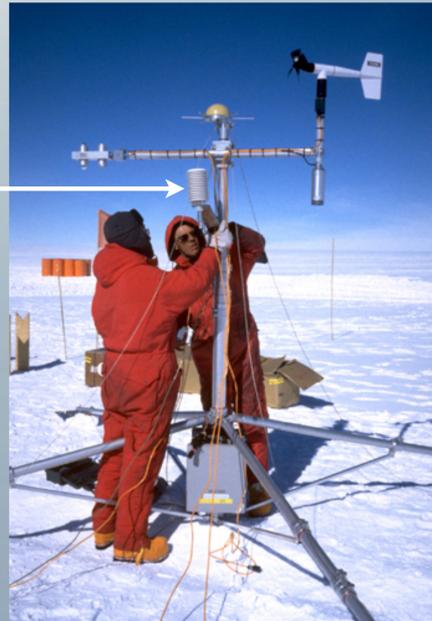
SC: verfügbar für Steering Committee

Der **EDML-Eiskern** wurde nach einem genau **festgelegten Schnittplan** zersägt. Der Kerndurchmesser beträgt 98 mm. An einem einen Zentimeter dicken Streifen, aus dem anschließend noch Dünnschnitte präpariert wurden, wurden physikalische Eigenschaften des Eises (physical properties) bestimmt. Die Standardbreiten für die ^{18}O , ^2H (Temperatur-Proxy) und ^{10}Be Proben waren 15 und 24 mm. Über das SC-Stück, konnte das EPICA-Steering-Committee gesondert verfügen. Für kontinuierliche Durchflussmessungen (Continuous Flow Analysis oder CFA) wurde ein Quadratstab mit 32 Millimeter Kantenlänge geschnitten. An Proben, die nicht kontinuierlich über die ganze Kernlänge, sondern in festgelegten Abständen geschnitten wurden (Discontinuous samples) wurden Gasgehalte und die isotopische Zusammensetzung dieser Gase sowie Staub gemessen. Etwa ein Viertel des Kerns wird als Archivstück für spätere Messungen aufgehoben.

➔ Welche Klimainformation enthält ein Eisbohrkern ?

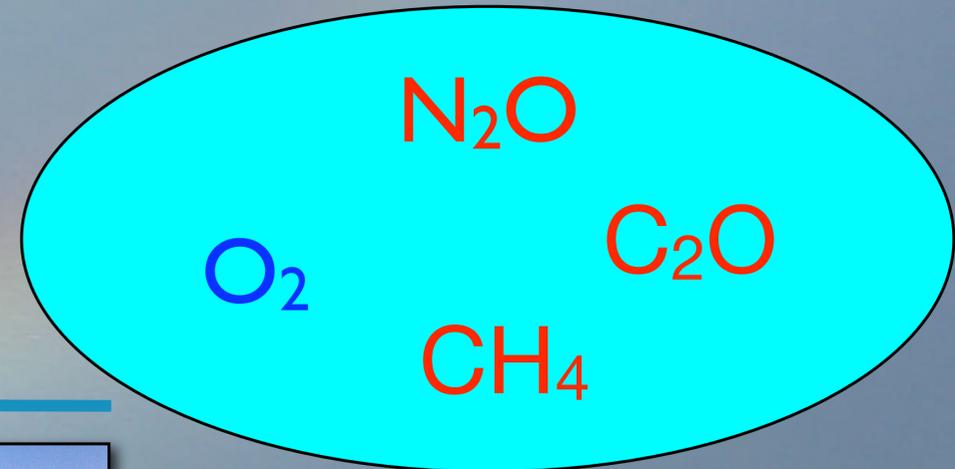
Das Klima-Archiv Eis speichert Informationen zu:

Lufttemperatur:



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

Gasgehalt in der Atmosphäre:



Aerosole:



Mt. Pinatubo 1991

foto: NOAA



foto: h. oerter, 1973



©AWI



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



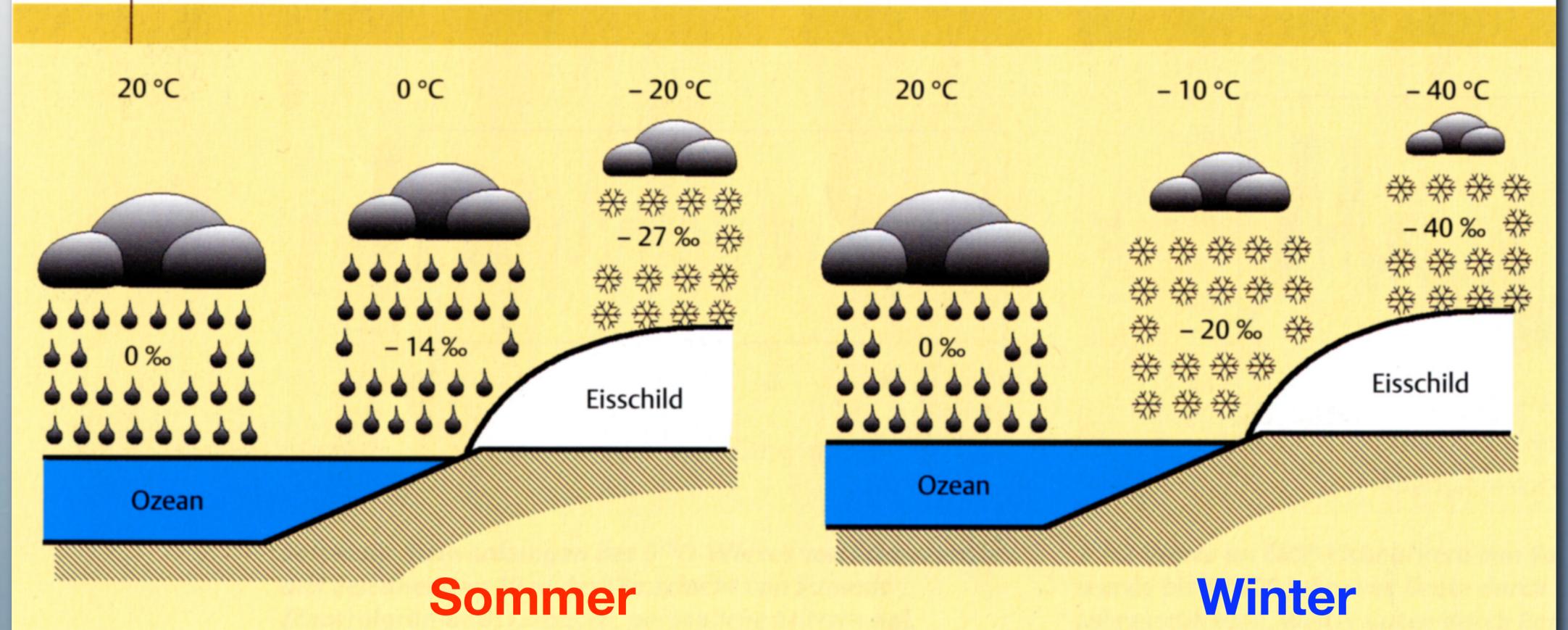
Das Eis speichert Informationen zur Schwankungen der Lufttemperatur in der Vergangenheit. Die Temperaturinformation ist jedoch nicht direkt gespeichert. Sie muss aus so genannten Proxy-Daten berechnet werden. Als Temperatur-Proxy dient das Verhältnis der stabilen Isotope im Wassermolekül, das sog. Isotopenthermometer. Das Isotopenthermometer beschreibt die Beziehung zwischen Kondensationstemperatur und Gehalt an den stabilen Isotopen ^{18}O und Deuterium (^2H) im Niederschlag. Dazu später noch Genaueres.

Eis ist das einzige Klimaarchiv, in dem die Zusammensetzung der Paleo-Atmosphäre gespeichert ist. 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 mit zunehmendem hydrostatischem Druck (bei ca. 1000-1200m Eisauflast) in Klathrate umwandeln, d.h. die Gase werden ins Kristallgitter des Eises eingebaut. 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.

Die dritte Klimainformation tragen die Aerosole. Aerosole sind feste und flüssige Teilchen, die in der Atmosphäre transportiert werden. Sie stammen z.B. von Vulkaneruptionen, von weiten vegetationslosen Flächen (Wüsten) 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 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.

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



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



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.

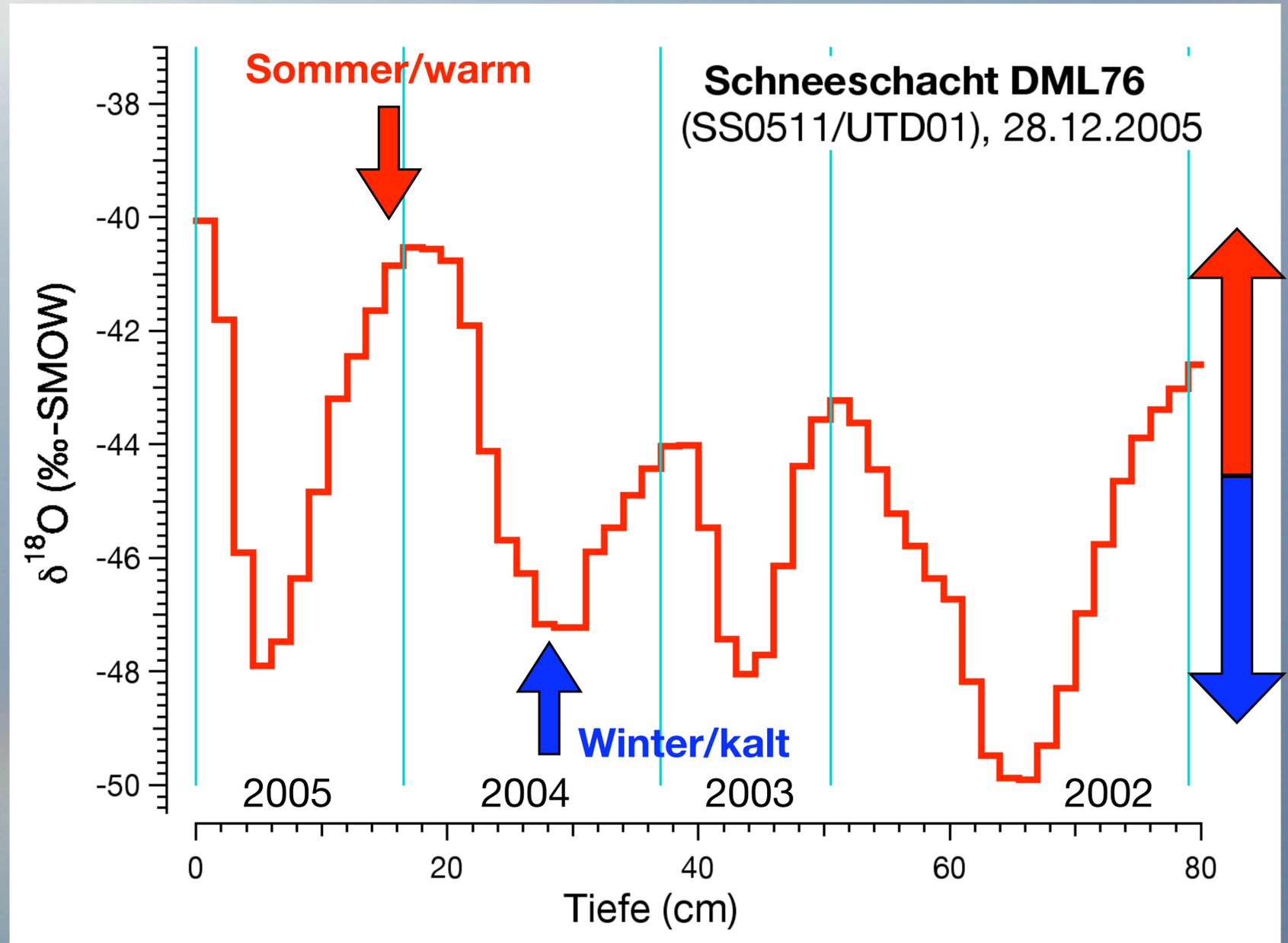
Das Isotopenverhältnis wird als Promille-Abweichung von einem Standardwasser, das von der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO/IAEA) in Wien verwaltet wird, angegeben. Das Standardwasser ist das so genannte Standard Mean Ocean Water, abgekürzt SMOW. Die absoluten Verhältnisse von schweren und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

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

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

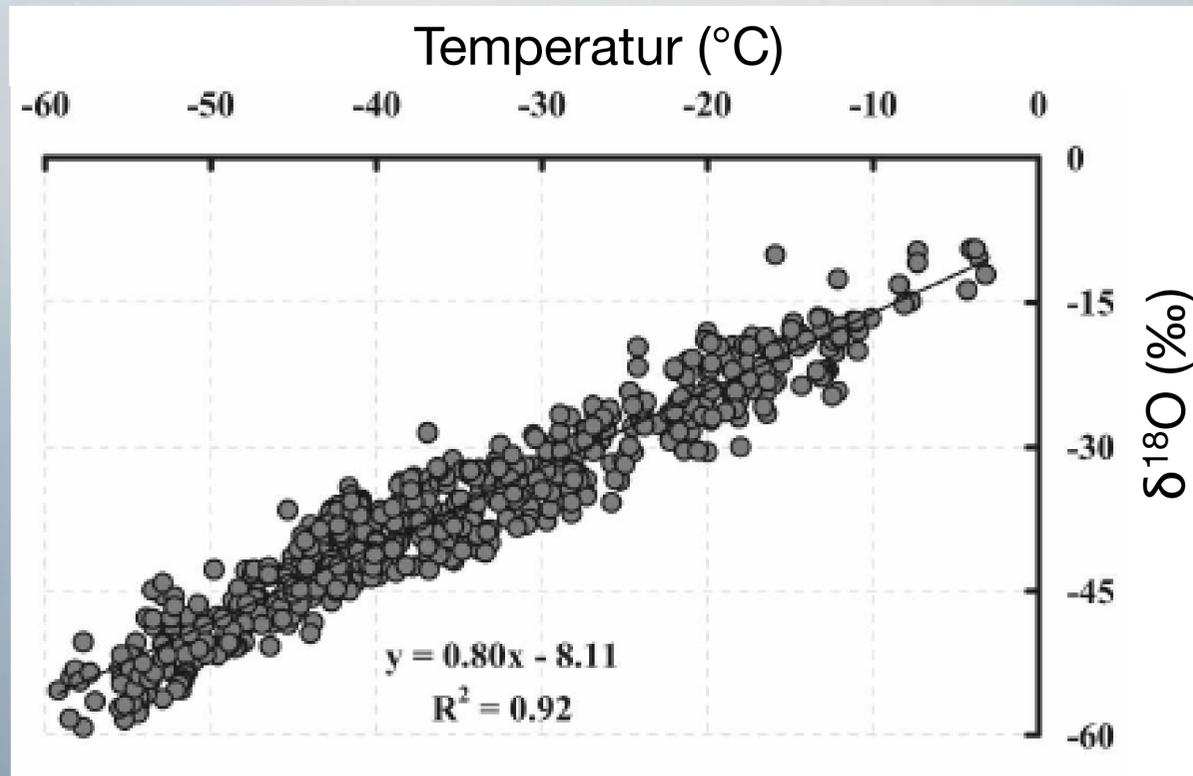
W. Dansgaard: Stable isotopes in precipitation. Tellus 16, 436-468 (1963)

„Isotopenthermometer“ muss kalibriert werden



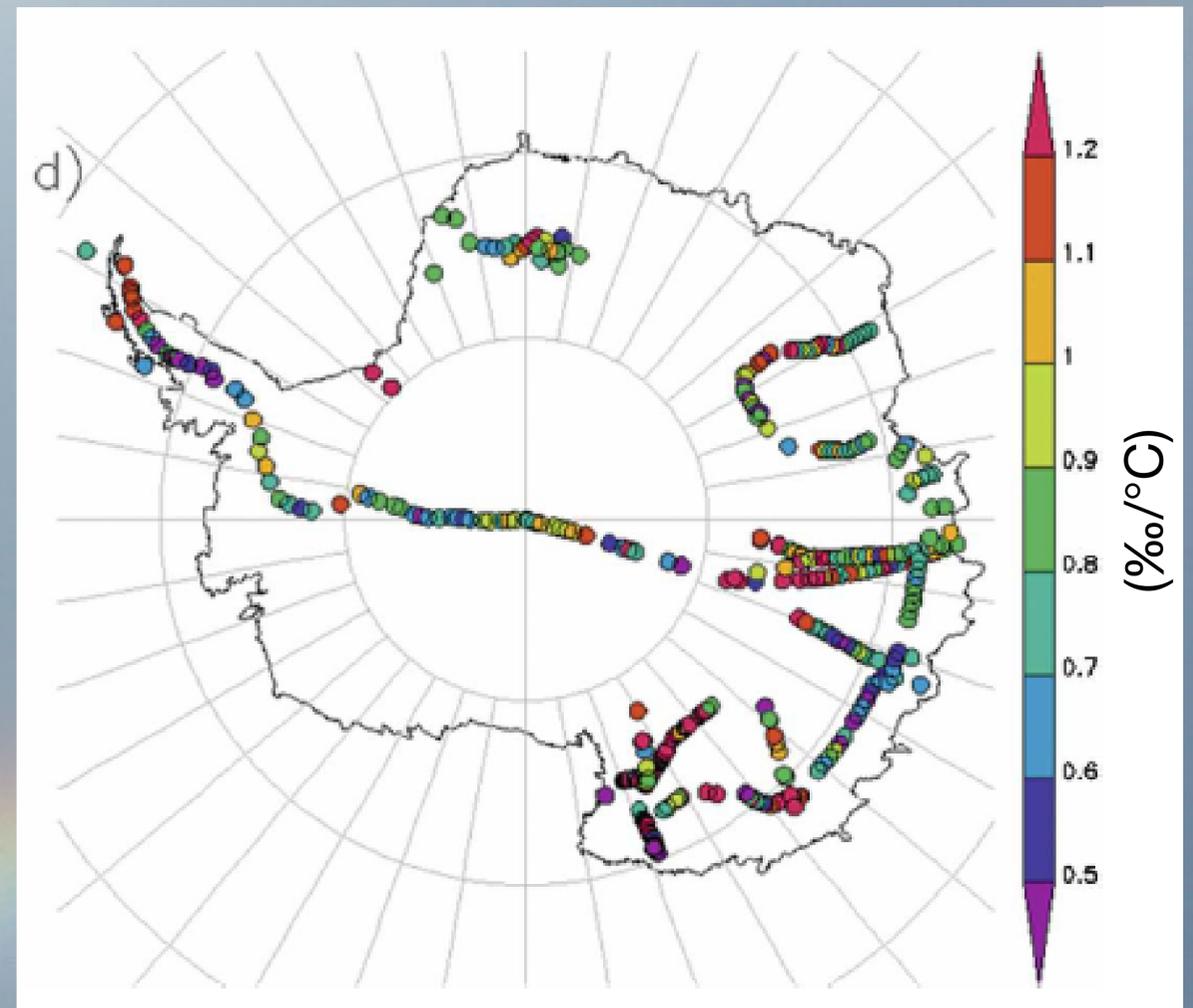
Dass der Isotopenwert in Abhängigkeit von der Temperatur (maßgebend ist hier die Kondensationstemperatur des Niederschlags) schwankt, lässt sich gut zeigen, wenn man die Isotopengehalte in einer Schneedecke bestimmt, wie hier bei diesem Beispiel geschehen. Der Schneeschacht wurde auf dem Plateau des Inlandeises, nahe der Kohlen-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.

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



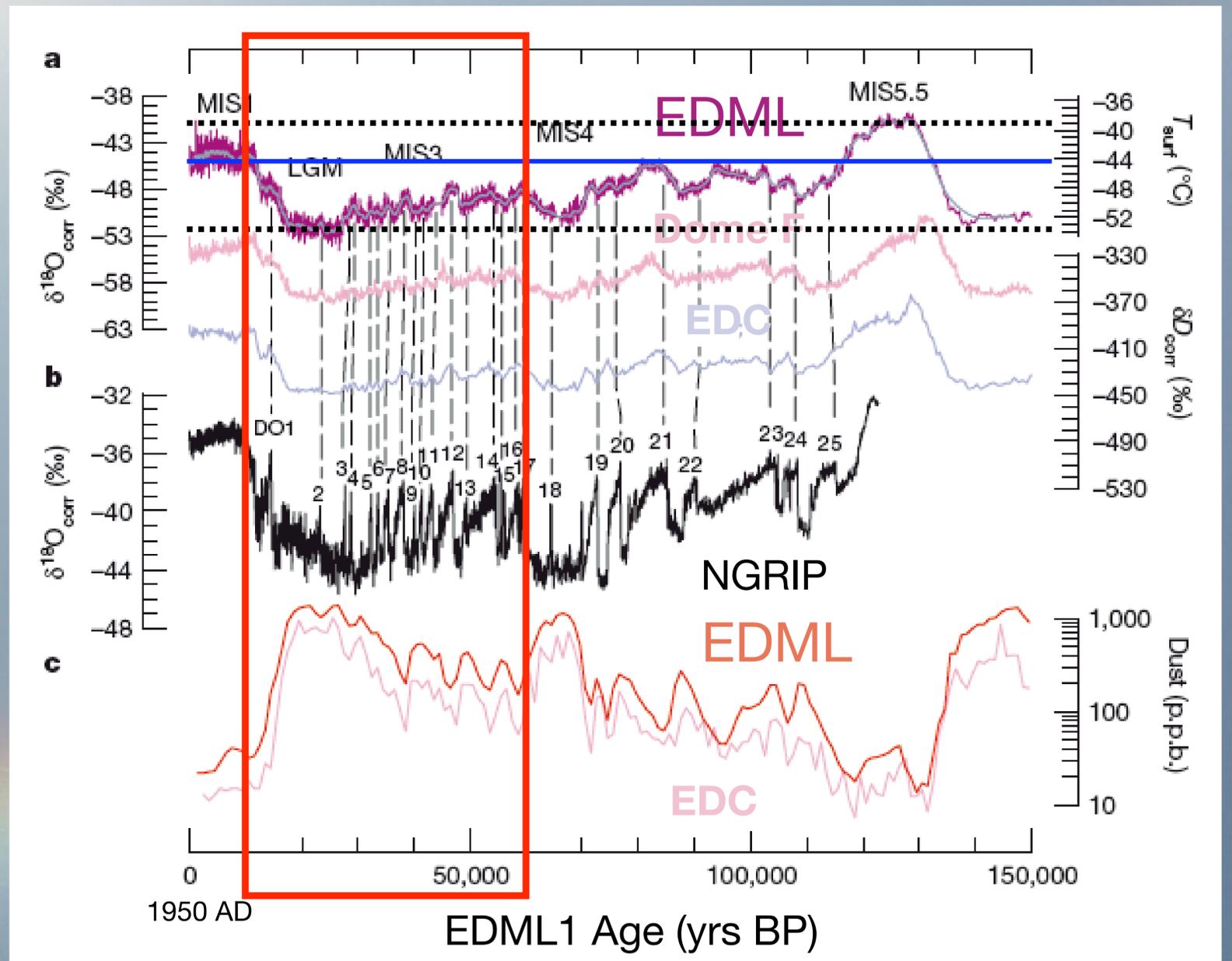
Lokaler Gradient für
 $\delta^{18}\text{O}$ - Temperatur (‰/°C)

10 - 60 ka BP

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](https://doi.org/10.1594/PANGAEA.552235)



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



Kommen wir nun zum tiefen Eisbohrkern aus Dronning-Maud-Land, dem EDML-Eiskern. Eine erste Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Tiefbohrung wurde 2006 von den EPICA-Partnern in dem Wissenschaftsmagazin *Nature* veröffentlicht.

Diese Abbildung wurde der Publikation in *Nature* entnommen. Im unteren Teil der Abbildung sind die an den Kernen EDC und EDML gemessenen Staubgehalte über einer gemeinsamen Zeitachse aufgetragen. Die Zeitachse umfasst die vergangenen 150.000 Jahre. Das heißt, sie schließt die heutige Warmzeit, das Holozän ein, die letzte Eiszeit (bezeichnet als Weichsel-, Wisconsin oder Würmeiszeit) sowie die davor liegende Warmzeit, im Norden als Eem bezeichnet, allgemeiner ausgedrückt das marine Isotopenstadium 5.5 oder 5e.

Der Staubgehalt war ein Parameter, mit dem die beiden Kerne synchronisiert wurden. Man erkennt, dass sich der Staubgehalt in der Südhemisphäre, gleiches gilt übrigens auch für den Norden, während der vergangenen 150.000 Jahren, im Wechsel von Kalt- und Warmzeiten, um 1-2 Größenordnungen geändert hat. Kaltzeiten sind jeweils von hohen Staubgehalten geprägt, während Warmzeiten einen niedrigen Staubgehalt aufweisen.

Vergleicht man die drei Isotopenkurven der Kerne EDML, Dome F und EDC mit einander, so wird deutlich dass sich die Isotopengehalte und damit gekoppelt die Temperaturverhältnisse an den drei Orten in der Antarktis synchron geändert haben. Der EDML-Kern weist von allen drei Kernen die größte Schwankungsbreite auf.

Die Isotopenspitzen in den Antarktischen Eiskernen, die im EDML-Kern am deutlichsten erkennbar sind, korrespondieren mit den 25 Dansgaard/Oeschger (DO)-Ereignissen des grönländischen Eiskerns NGRIP.

Unter Anwendung des Isotopenthermometers lassen sich die Isotopenwerte in Temperaturwerte umrechnen, die auf der rechten oberen Ordinate aufgetragen sind. Man erkennt, dass die Zeit des Letzten Glazialen Maximums (LGM) um 9-10 °C kälter war als das Holozän. Während des Isotopenstadiums 5.5 lagen die Temperaturen offensichtlich bis zu 5°C über den heutigen bzw. vorindustriellen Temperaturen.

Die folgende Abbildung wird das Zeitfenster einengen auf die Zeit von 10.000 bis 60.000 Jahre vor Heute.

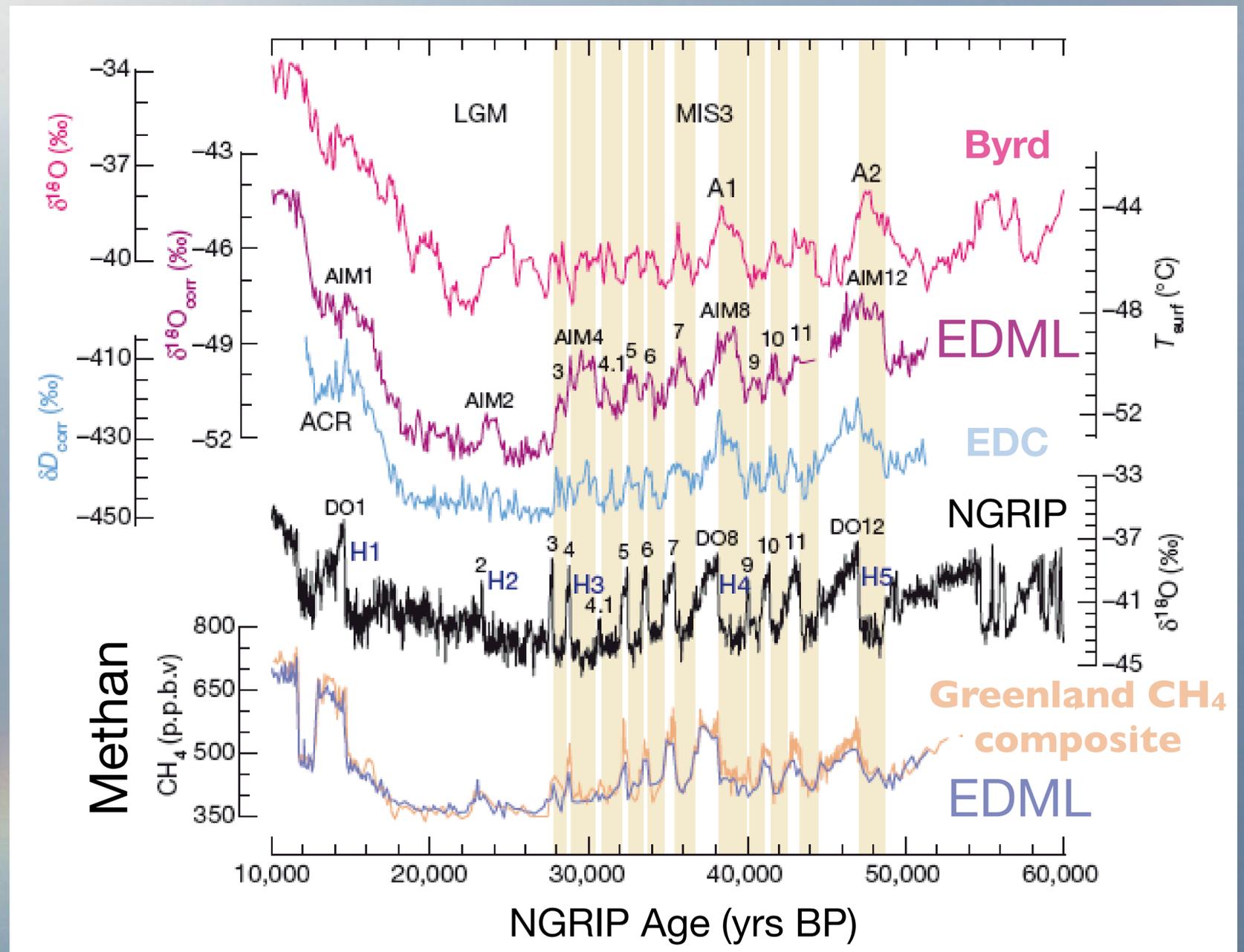
farbig gezeichnet sind
Kaltphasen im Norden

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

Neue Nomenklatur: AIM
Antartic 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)

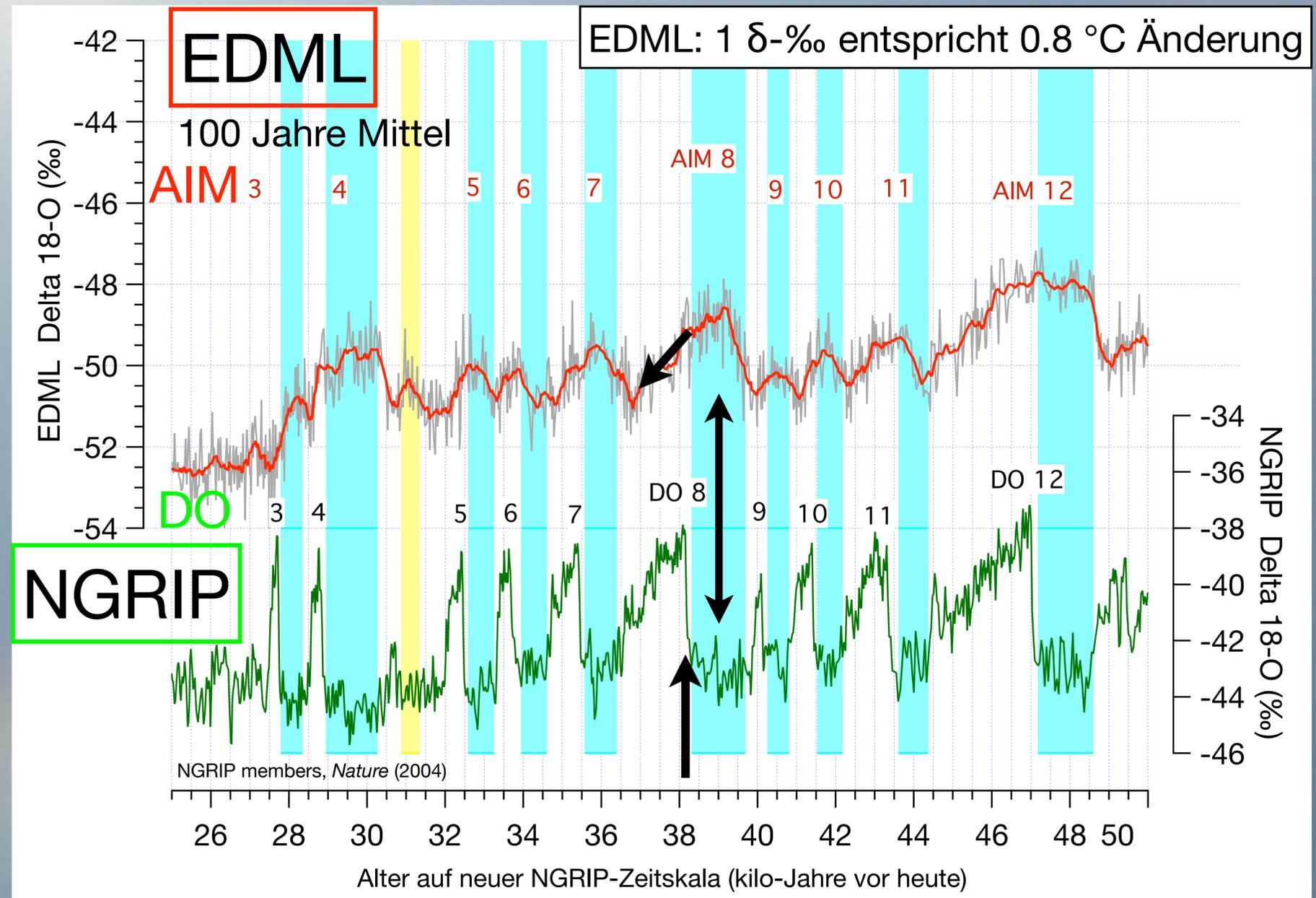
Als nächster Schritt bei der Auswertung des EDML-Eiskerns wurden der EDML-Kern und der gut datierte grönländische NGRIP-Kern synchronisiert. Man bediente sich dazu des Methangehaltes, der weltweit synchron schwankt, wengleich die absoluten Konzentrationen in der Nord- und Südhemisphäre unterschiedlich sind.

Dadurch wurde die zeitliche Zuordnung der Antarktischen Isotopenmaxima (AIM) im Süden zu den Dansgaard/Oeschger-Ereignissen im Genauigkeitsbereich von wenigen hundert Jahren ermöglicht. die bereits früher im Byrd-Kern gefundene Zuordnung von A1 und A2 zu DO 8 und DO12 wurde bestätigt. Gleichzeitig wurde eine neue Nomenklatur eingeführt: Antarctic Isotope Maxima (AIM) oder Antarktische Isotopenmaxima. Die nächste Folie, die das Zeitfenster nochmals etwas einengt, und zwar auf 25.000 bis 50.000 Jahre vor Heute soll den zeitlichen Zusammenhang zwischen DO und AIM noch stärker verdeutlichen.

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*, 444, 195-198, (2006). data: doi:10.1594/PANGAEA.552235



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



Wir halten also fest, dass mit der EDML-Bohrung erstmals eindeutig gezeigt werden konnte, dass jedes der schnellen Dansgaard/Oeschger-Ereignisse (DO events), die in Grönland nachgewiesen wurden, seine Entsprechung in der Antarktis hat, und zwar in den so genannten Antarktischen Isotopenmaxima (AIM). Durch die Synchronisation des EDML-Kerns mit dem NGRIP-Kern anhand des Methangehaltes, konnte gezeigt werden, dass während einer Kaltphase im Norden eine langsame Erwärmung im Süden einsetzt. Wird das Wärmemaximum im Süden überschritten und wird es dort wieder kühler, so steigt die Temperatur im Norden sprunghaft an. Es kommt zu einem Dansgaard/Oeschger-Ereignis.

Ein mögliche Mechanismus, der dieses Verhalten erklären könnte, ist die „bipolar seesaw“, die bipolare Wippe. Abhängig von der Stärke, das heißt einer Abschwächung, der Atlantic Meridional Overturning (MOC) kommt es offensichtlich im Süden zu einem Wärmestau, der die Erwärmung einleitet. Beim schnell einsetzenden Wiedererstarren der MOC werden verstärkt wärmere Wassermassen in Richtung Norden transportiert. Dies führt zu dem sprunghaften Temperaturanstieg im Norden (DO-Ereignis) und langsamem Abkühlen im Süden.

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

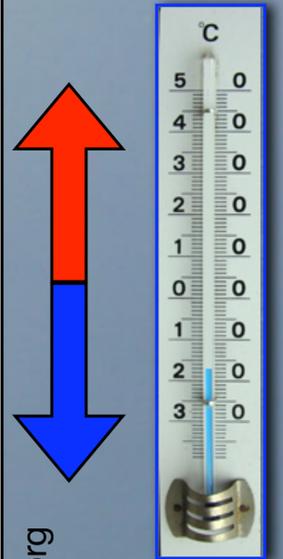
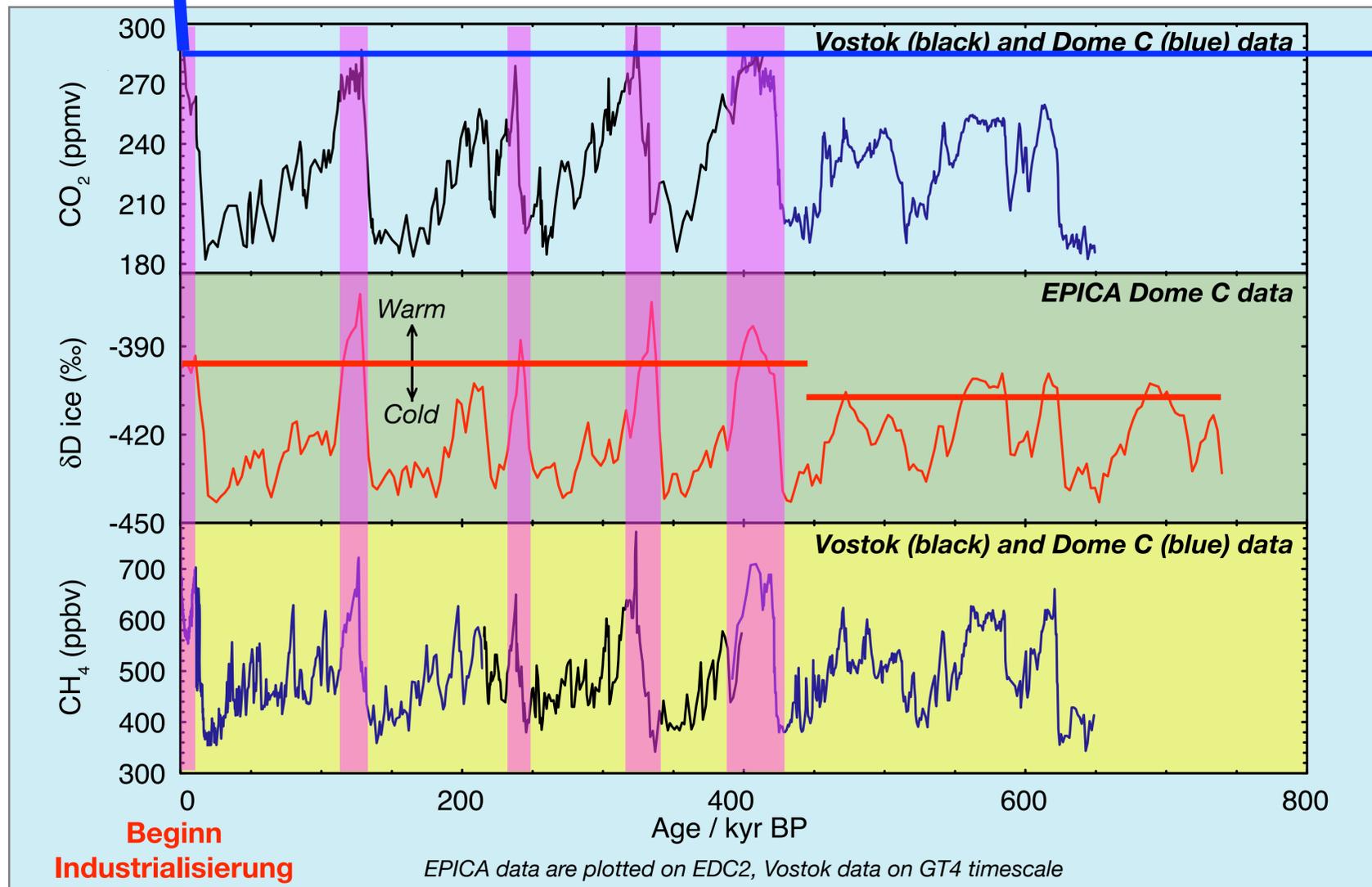
heute 385 ppm

vor 1850 AD

Kohlendioxid

Deuterium
bzw.
Temperatur

Methan



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

GLOBAL
I G B P
CHANGE

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

PAGES
PAST GLOBAL CHANGES

The record of CO₂ and CH₄ 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.



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



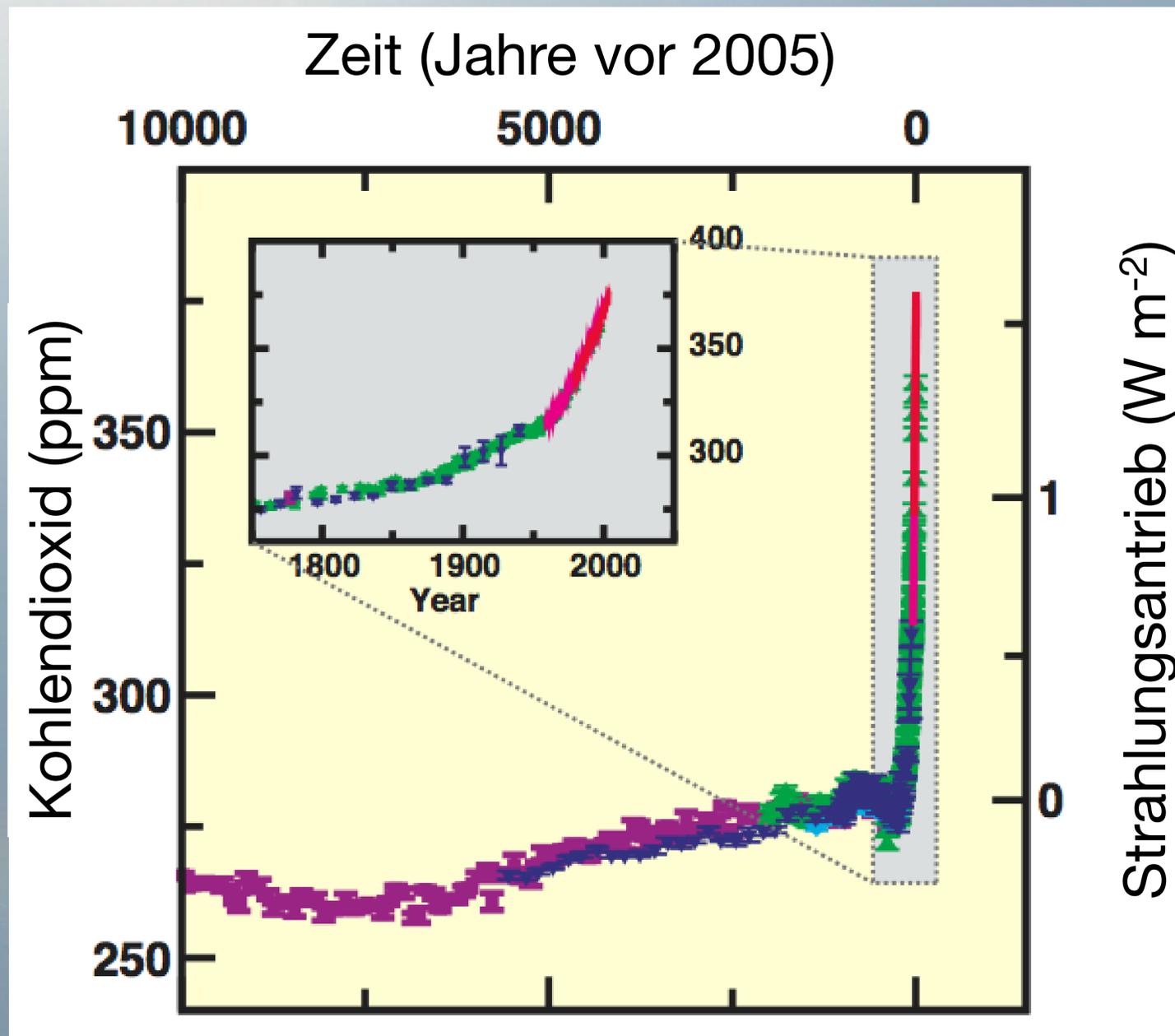
Antarctic Ice Core Records: Vostok and EPICA (www.pages.unibe.ch).

Wie bereits erwähnt, sind die polaren Eismassen ein einzigartiges Archiv für die Zusammensetzung der Paleo-Atmosphäre. Dehnen wir jetzt unseren Zeithorizont mit den Messwerten der Tiefbohrung von Dome C, ergänzt an einigen Stellen mit Daten der Vostok-Bohrung, auf 800.000 Jahre aus.

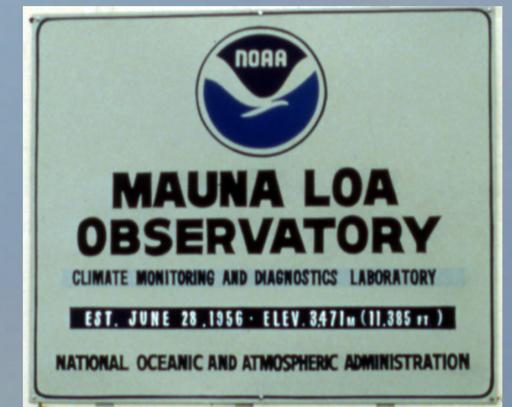
Die δD-Kurve (äquivalent zu δ¹⁸O) stellt den Temperatur-Proxy dar. In der Zeit von Heute bis vor ca. 400.000 Jahren ist die Zeitreihe durch fünf (einschl. des Holozäns) deutlich erkennbare, vergleichsweise kurze Warmzeiten (Interglaziale) gekennzeichnet, die im Abstand von ca. 100.000 Jahren auftreten. 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 vier vorhergehenden Interglazialen, erkennt man, dass die Temperaturen früher offensichtlich höher gewesen sind als heute. Die Zeitreihen von Kohlendioxid (CO₂, oben) und Methan (CH₄, 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 CO₂ oder CH₄ begann. Beim Vergleich der CO₂-Gehalte der zurückliegenden 4 Interglaziale mit dem holozänen Wert vor der industriellen Revolution (ca. 1850 AD) stellt man fest, dass sich die Maximalwerte nur unwesentlich unterscheiden. Vergleichbares gilt für Methan. Die heutigen hohen CO₂-Konzentrationen von 385 ppmv wurden in den Eiskernen zu keiner Zeit nachgewiesen.

Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre

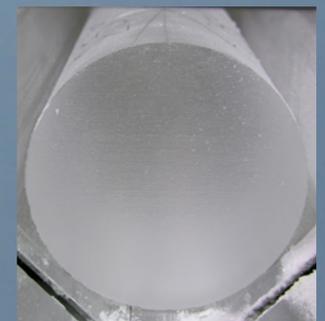


Quelle: IPCC, Climate Change 2007: The Physical Basis, Summary for Policy Makers (www.ipcc.ch)



Messung an
Luftproben seit 1958

Messung an
Eisproben



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



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.

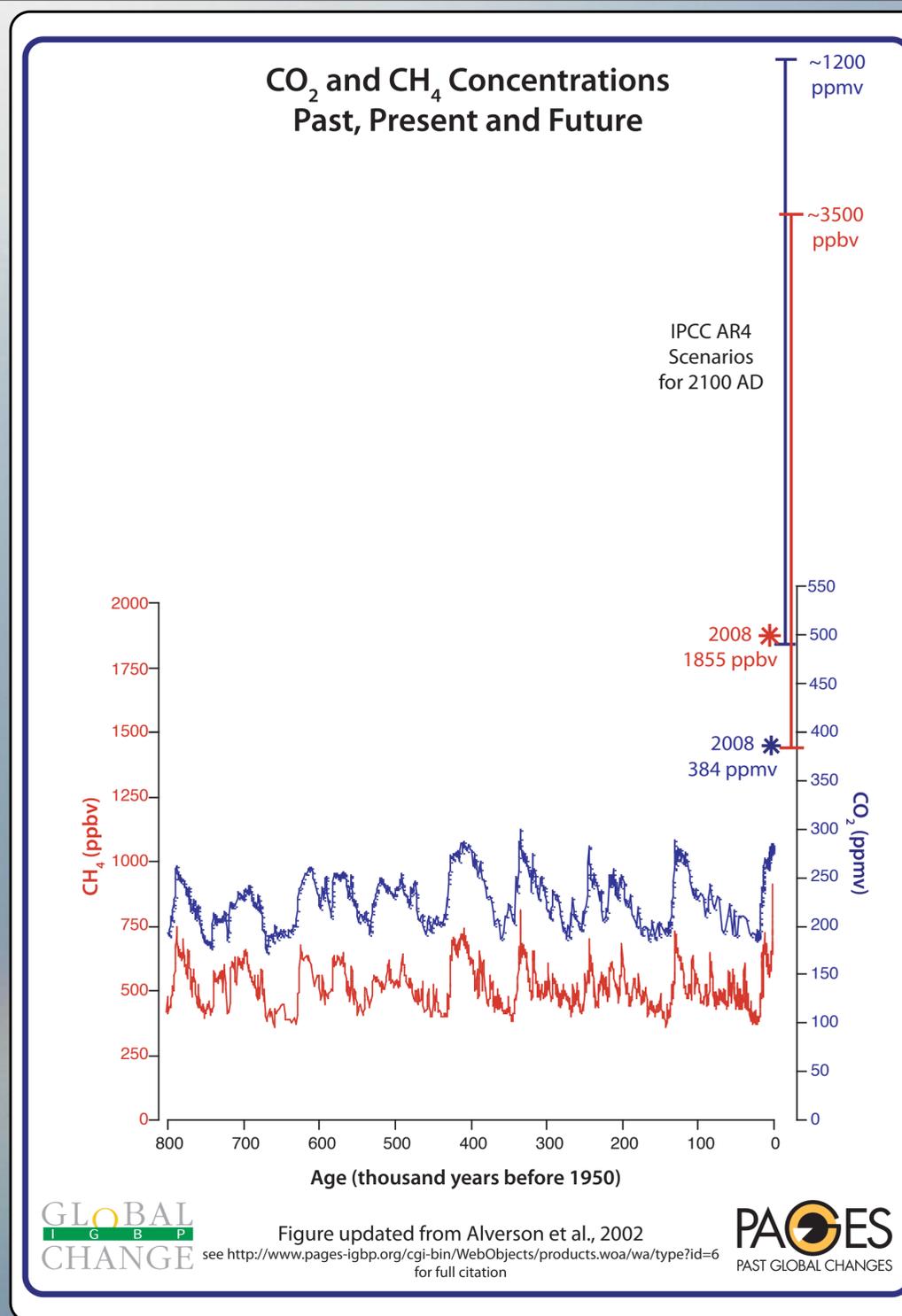
Das Wissen um den Zusammenhang zwischen Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre und der Lufttemperatur ist nicht neu. Bereits 1896 hat der schwedische Physiker und Chemiker Svante August Arrhenius, der 1903 den Nobelpreis für Chemie erhielt, Berechnungen dazu angestellt und veröffentlicht (S. A. Arrhenius,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

Carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) 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>



CO₂ 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

CH₄ data:

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

Current atmospheric concentrations:

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

CO₂: Pieter Tans NOAA/ESRL
www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends

CH₄: Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE)



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.

weiterführende Informationen:

Kohnen-Station und EPICA-Projekt:

Oerter et al., *Polarforschung* 78 (1-2), 1-23 (2009); www.polarforschung.de

home page von PAGES (Past Global Changes): www.pages-igbp.org

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

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



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



Alles, was ich Ihnen heute erzählt habe, wurde schon einmal so oder so ähnlich gedruckt. Wenn Sie sich näher mit dem EPICA-Projekt beschäftigen möchten, sollten sie den Aufsatz über die Kohnen-Station in der *Polarforschung* lesen. Dort finden Sie die entsprechende Primärliteratur zu den Untersuchungsergebnissen aufgelistet. Eine gute Adresse für die dargestellte Thematik ist auch die home page von PAGES (www.pages-igbp.org) und natürlich die AWI home page. Von dort können Sie sich, von meinen Seiten, auch Folien & Text dieses Vortrags als pdf herunterladen.

Ich danke Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit.