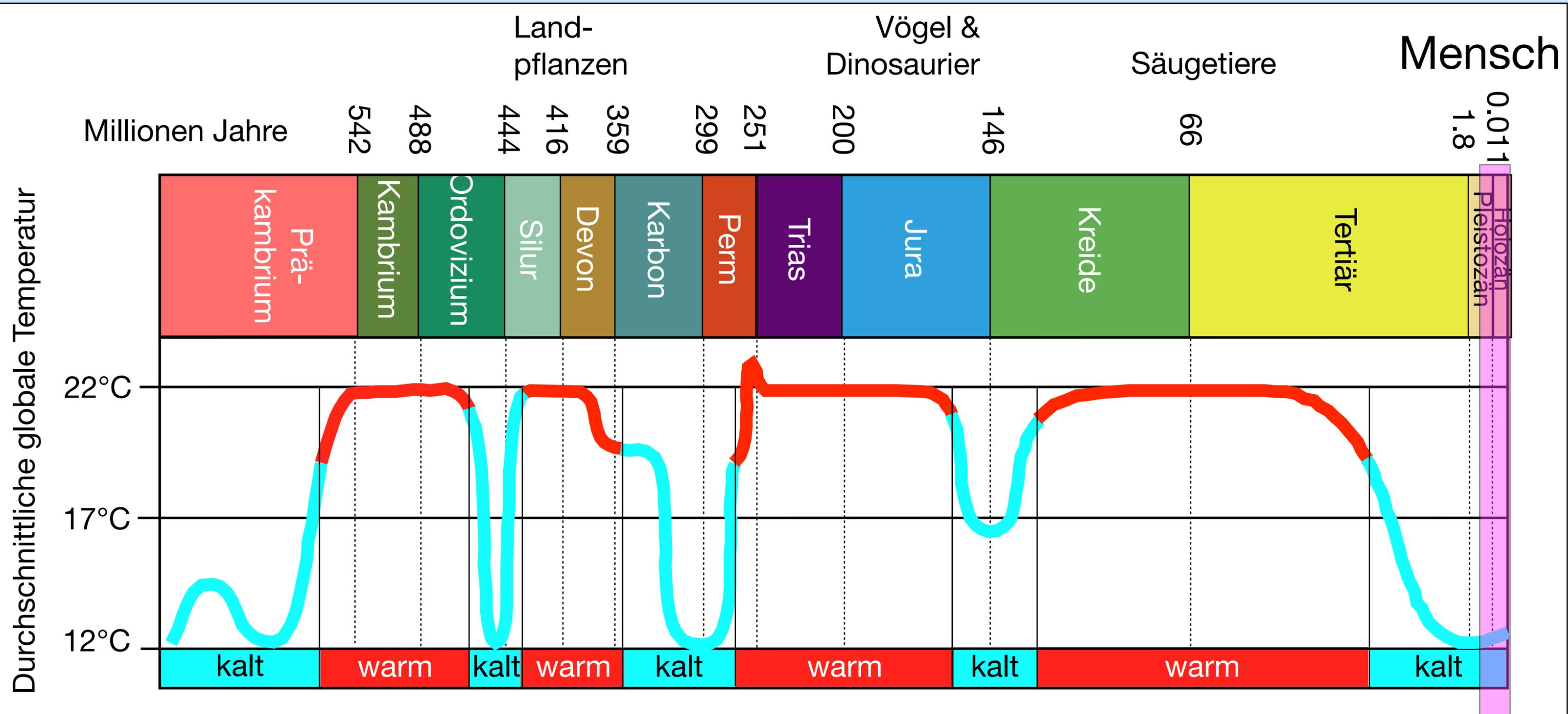


Klimageschichte tiefgekühlt - Was Eisbohrkerne über das Klima der Welt verraten

Hans.Oerter@awi.de

Temperaturänderung auf geologischer Zeitskala



verändert nach: www.geologieinfo.de/palaeoklima

Wo wurde bereits gebohrt ?

Arktis (Grönland)

60° N

Meereis
Nordpol

Grönland

NEEM

2008-2011
2538 m
>108 ka

GISP2

1989-1993
3053 m,
>110 ka

GRIP

1990-1992
3029 m,
>105 ka

NorthGRIP

1996-2003
3090 m,
123 ka

Antarktis

60° S

Antarktische
Halbinsel

Südpol

Westantarktis

Ostantarktis

source: ArcInfo/G. Rotschky

Tiefe Eisbohrkerne in der Antarktis



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

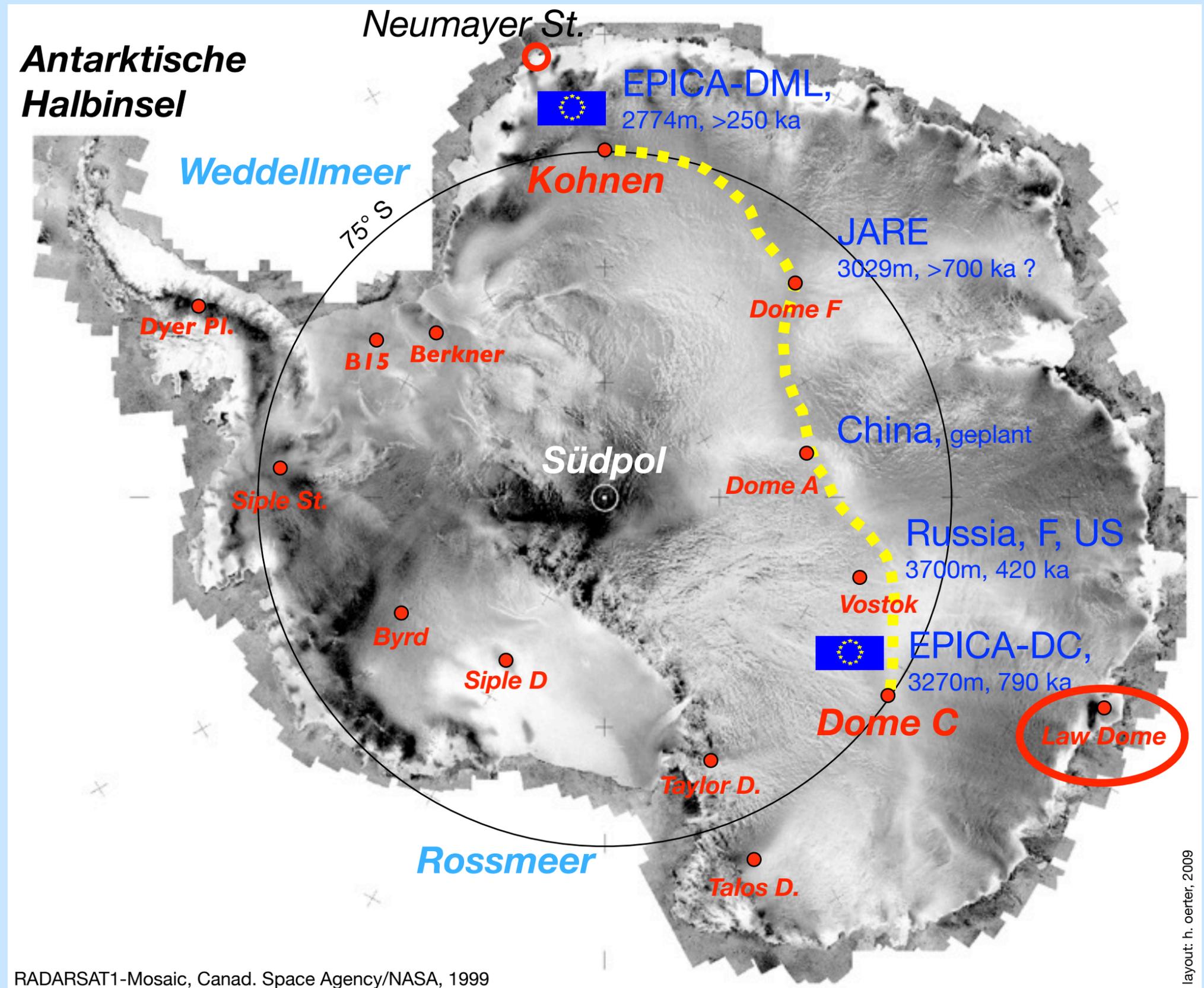
Oerter et al., *Polarforschung* 78 (1-2), 1-23 (2009)

www.polarforschung.de

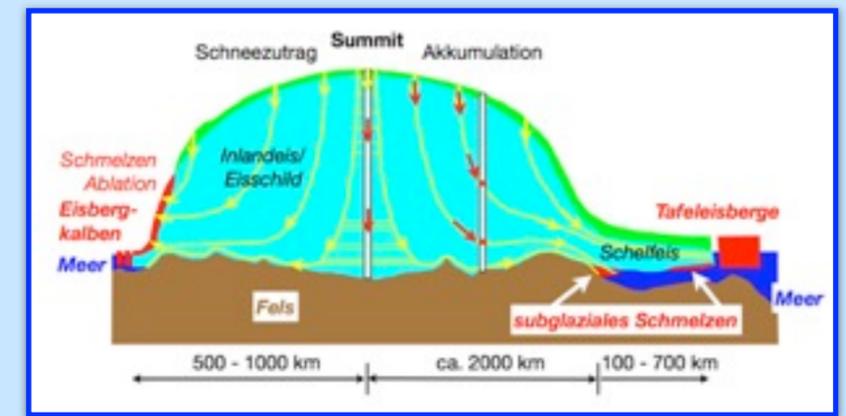


Haupteisscheide der Ostantarktis

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



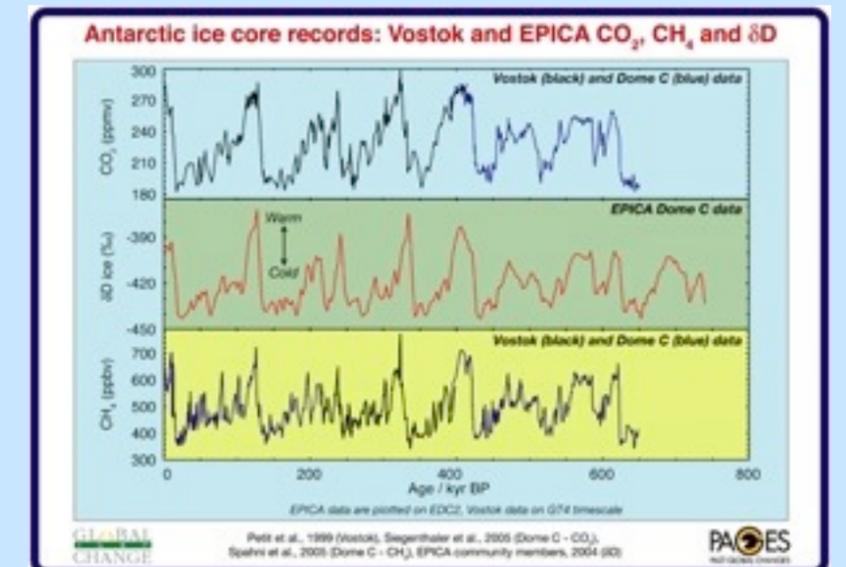
➔ Wie ist der Antarktische Eisschild aufgebaut ?



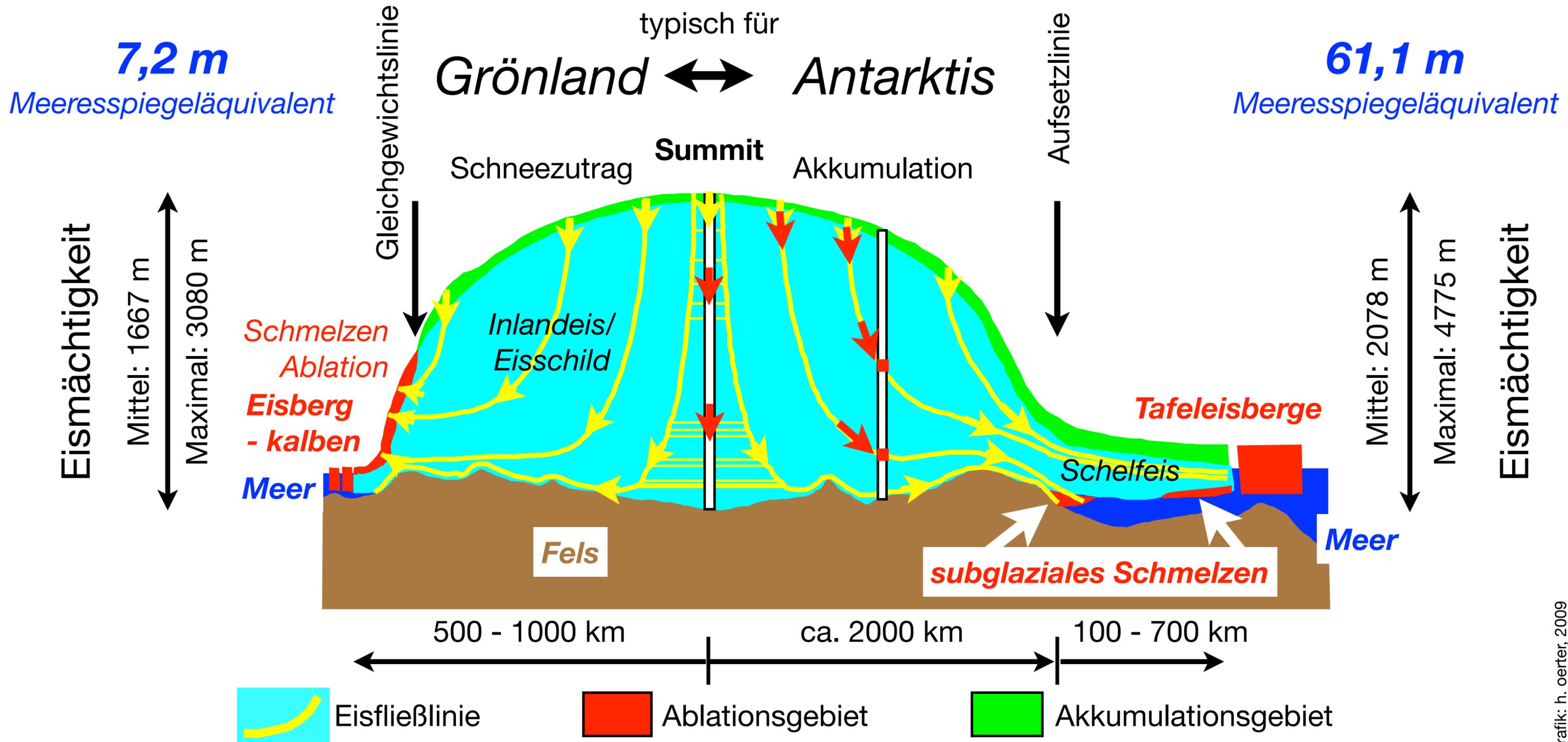
➔ Wie bohrt und zerteilt man einen Eisbohrkern ?



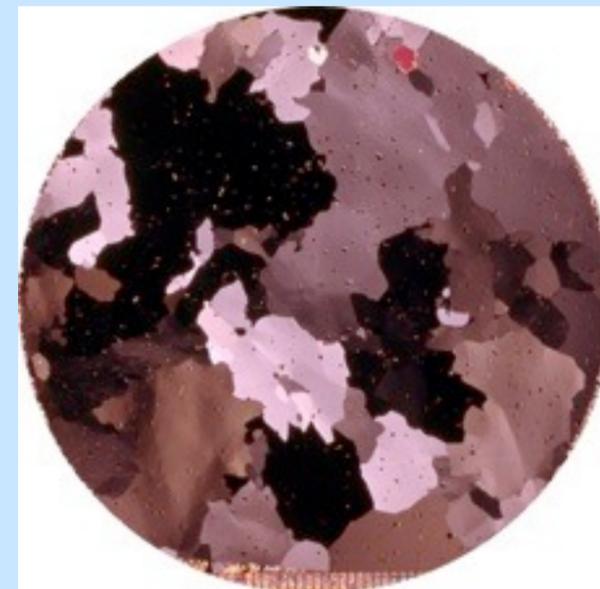
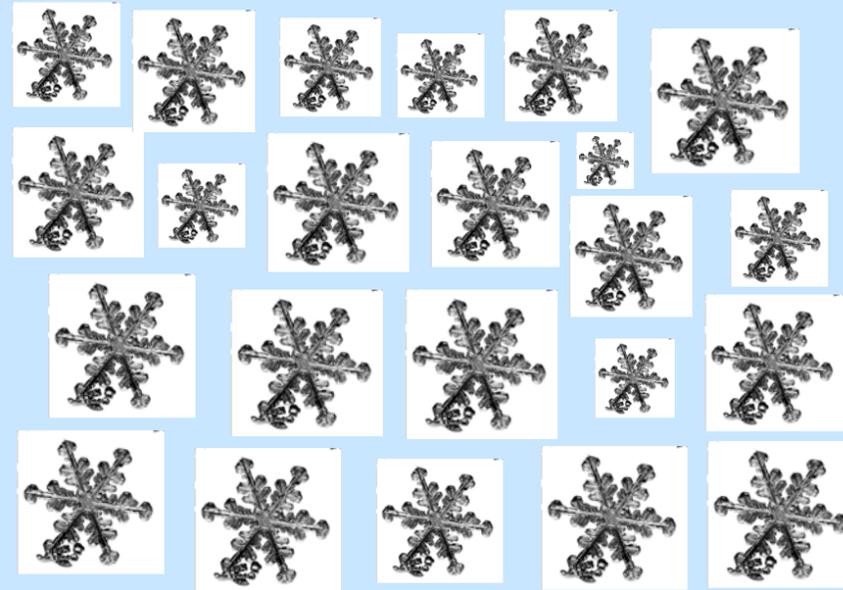
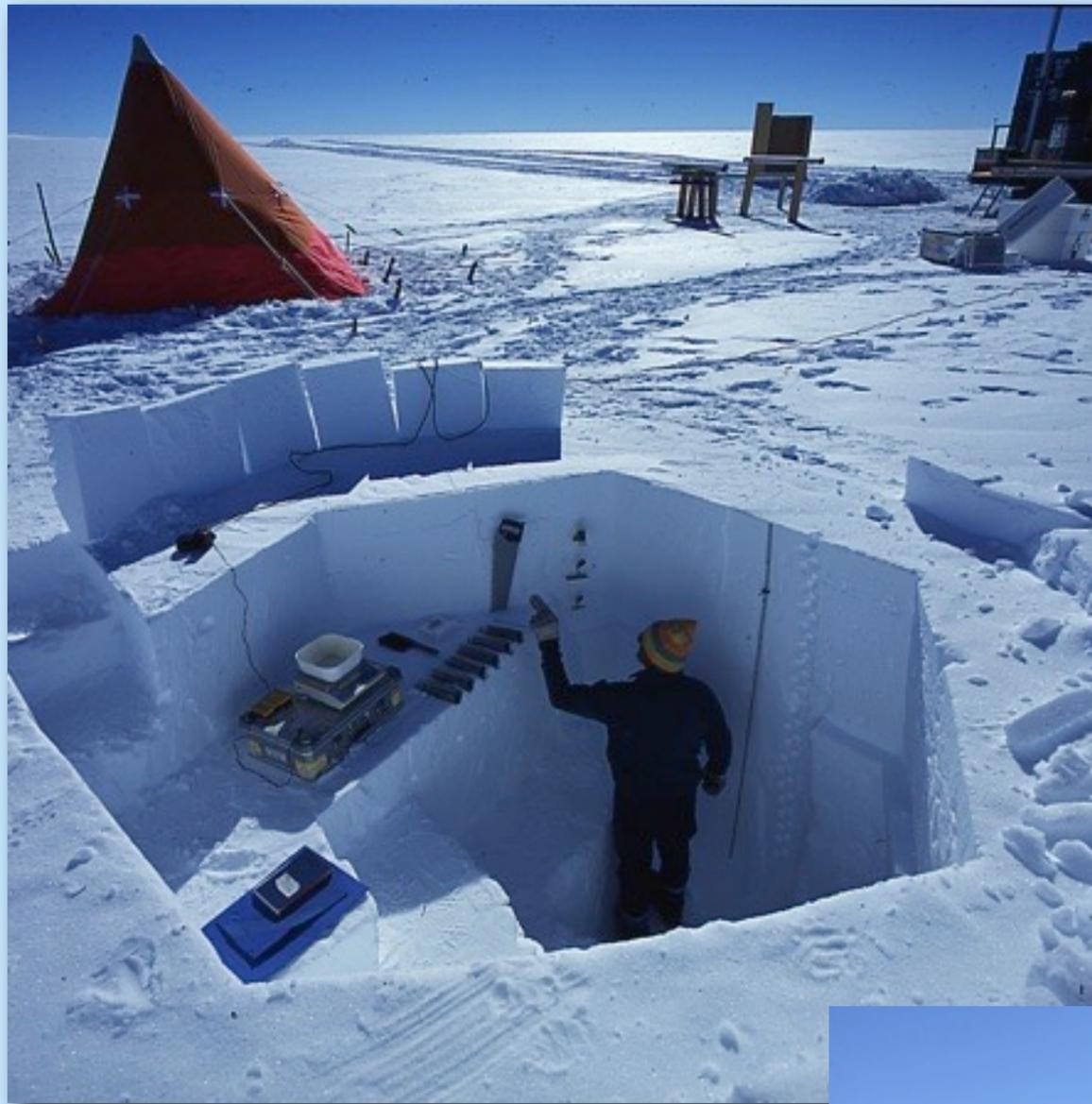
➔ Welche Klimainformation enthält ein Eisbohrkern ?

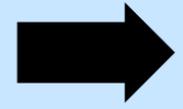


Schematischer Querschnitt durch einen Eisschild



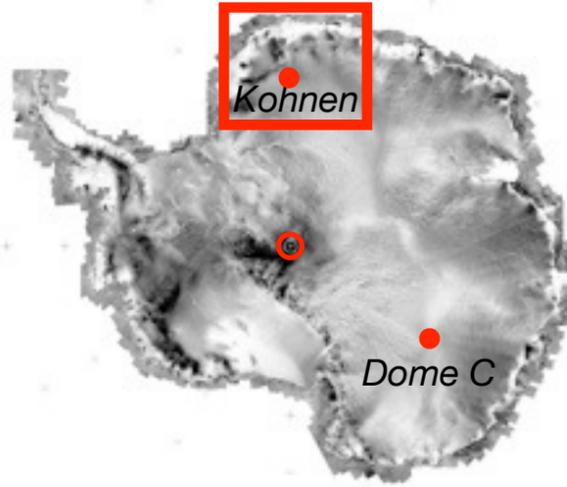
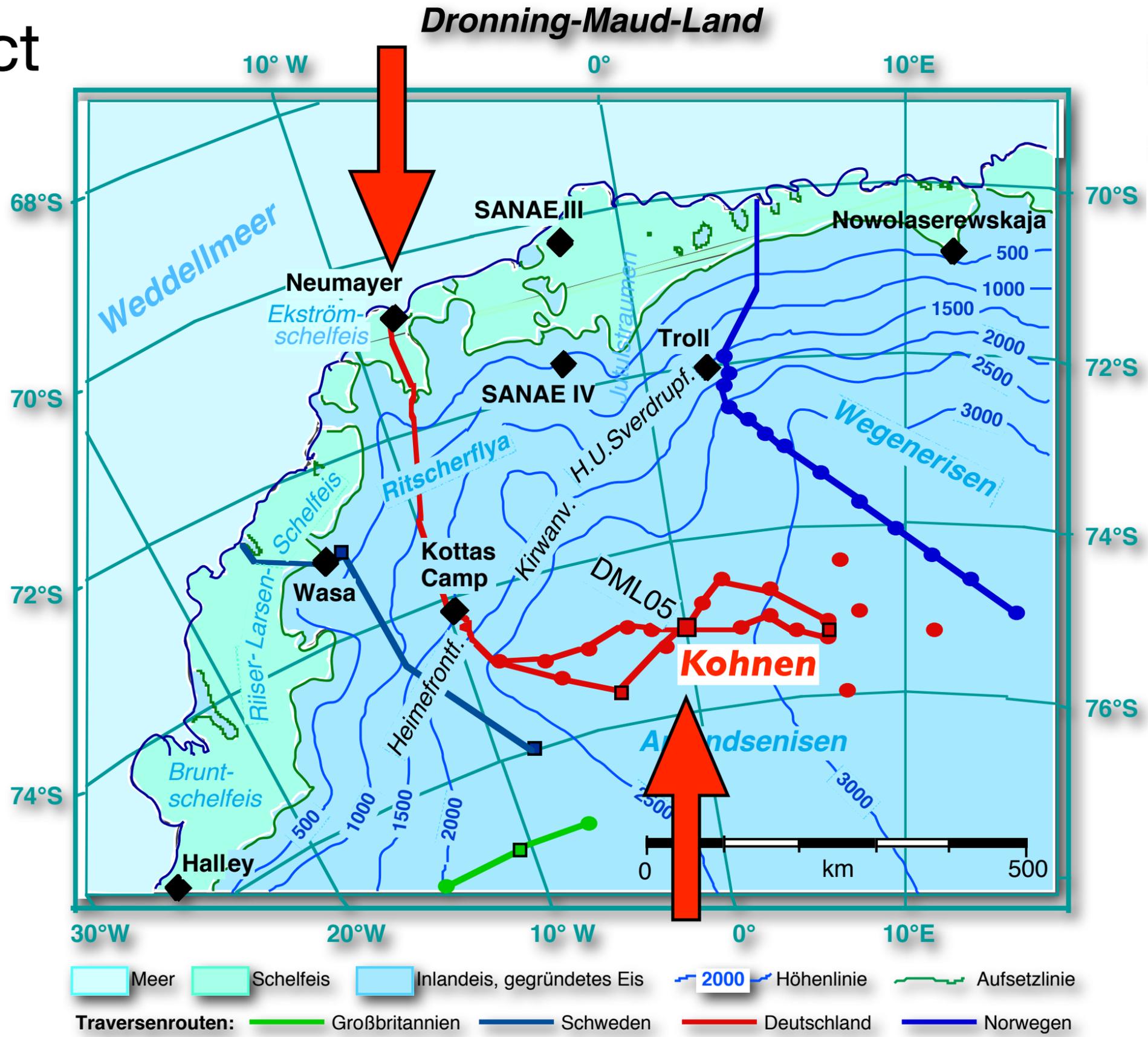
Ein Eisschild baut sich aus über einander liegenden Jahresschichten auf.



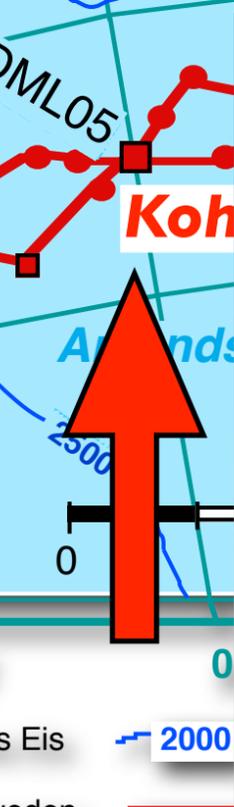
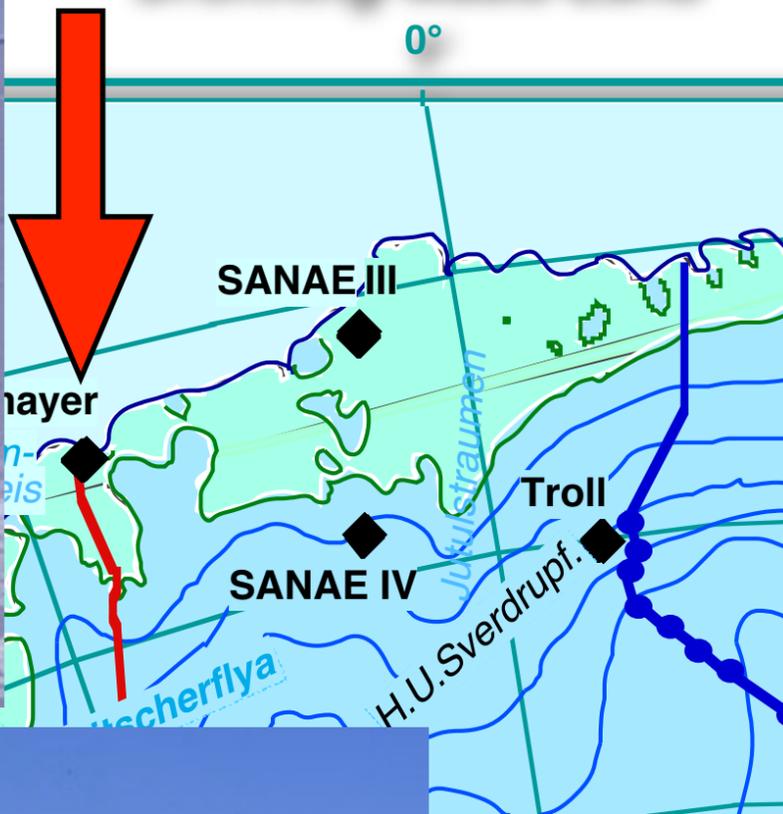


Wie bohrt und zerteilt
man einen Eisbohrkern ?

European Project for Ice Core Drilling in Antarctica (EPICA)



Dronning-Maud-Land



Traversenrouten: — Großbritannien — Schweden —

Kohnen-Station

75°S, 0 °E, 2882 m

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

Zum Bohren

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

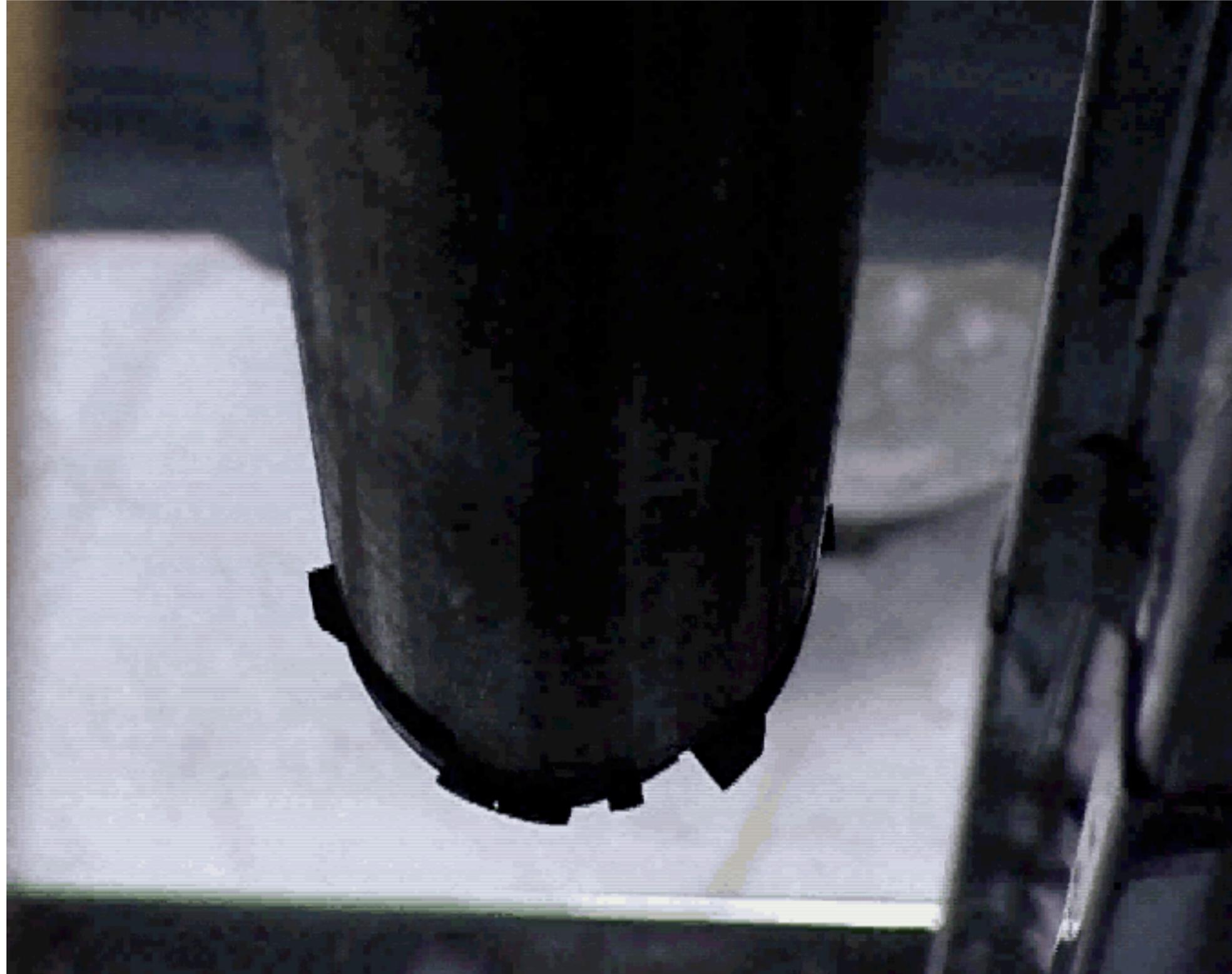
Eisdicke: 2782 ±10m

Länge Eiskern: 2774,1 m



photo: hans oerter, 2006

Bohren eines Eiskerns



Archiv AWI/Kipfstuhl

Antitorque



innen: Chips-Kammer



Motor & Elektronik



Hüllrohr



Bohrturm



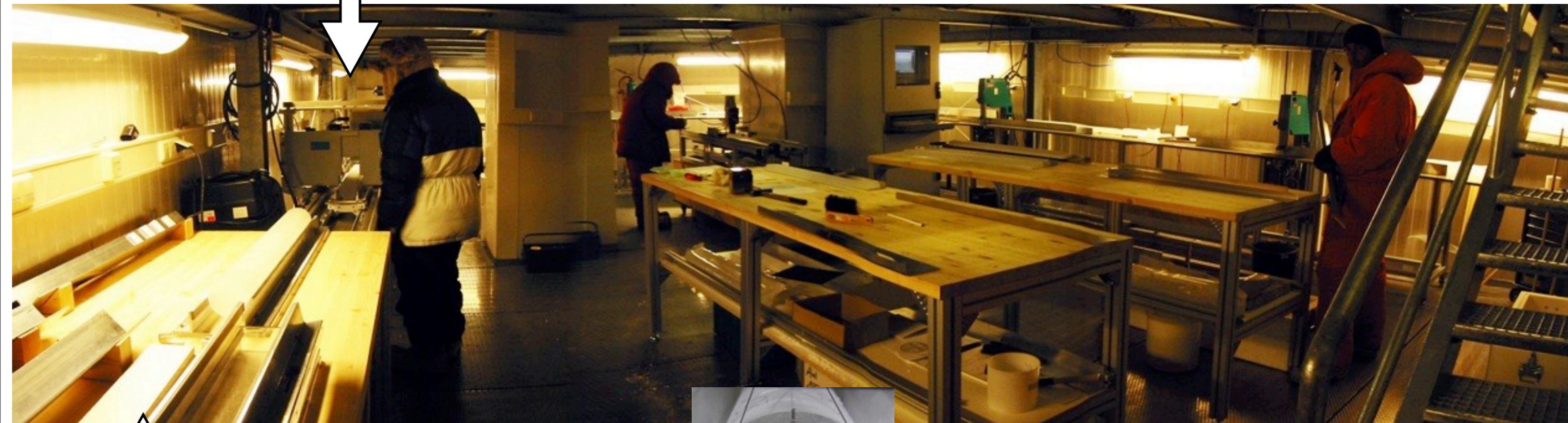
Kernrohr & Bohrkrone



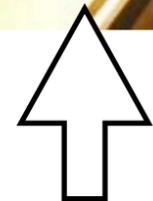


Das Eislabor am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven

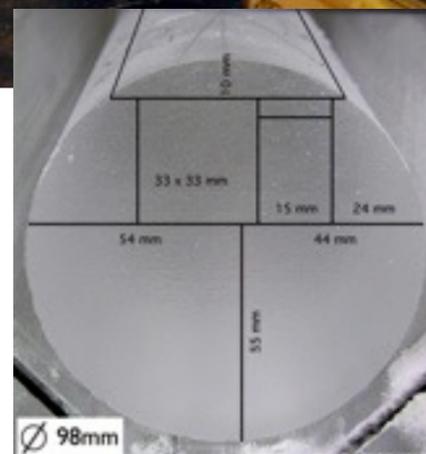
Horizontalsäge



photos: hans oerter, 2002



Auspacken des Kerns



Das Eislabor am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven

Horizontalsäge

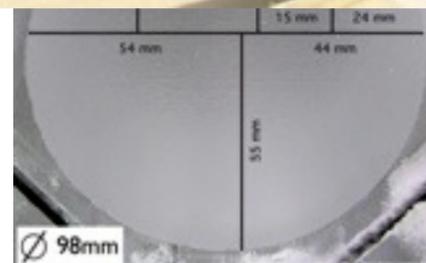


photos: hans oerter, 2002

foto: hans oerter, 2009



Auspacken des Kerns



Das Eislabor am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven

Horizontalsäge

Line-Scan



Auspacer



foto: hans oerter, 2003



photos: hans oerter, 2002

Vorbereitung für Line-Scan

Das Eislabor am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven

Horizontalsägen



foto: hans oerter, 2003

Längs- und Querschnitte

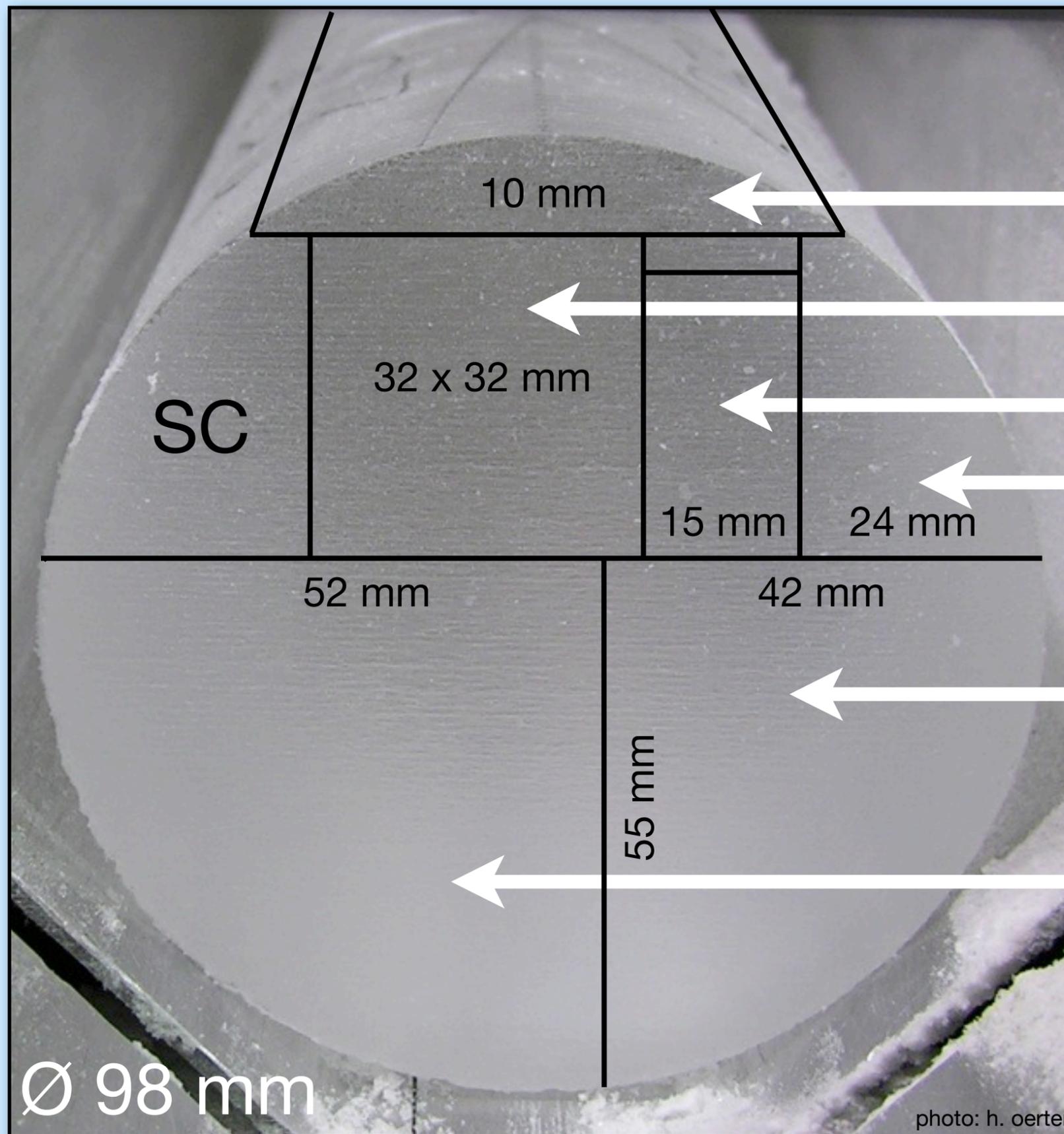


photos: hans oerter, 2002

Auspacken des Ke

Vorbereitung für Line-Scan

Schnittplan



Dünnschnitte

Cont. Flow Analysis (CFA)

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

^{10}Be



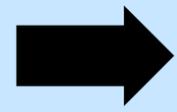
Gase, Staub

Archiv

SC: verfügbar für Steering Committee

Ø 98 mm

photo: h. oerter

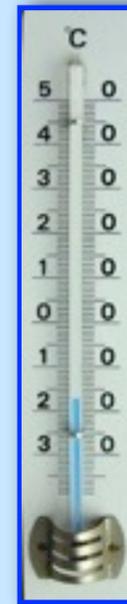


Welche Klimainformation
enthält ein Eisbohrkern ?

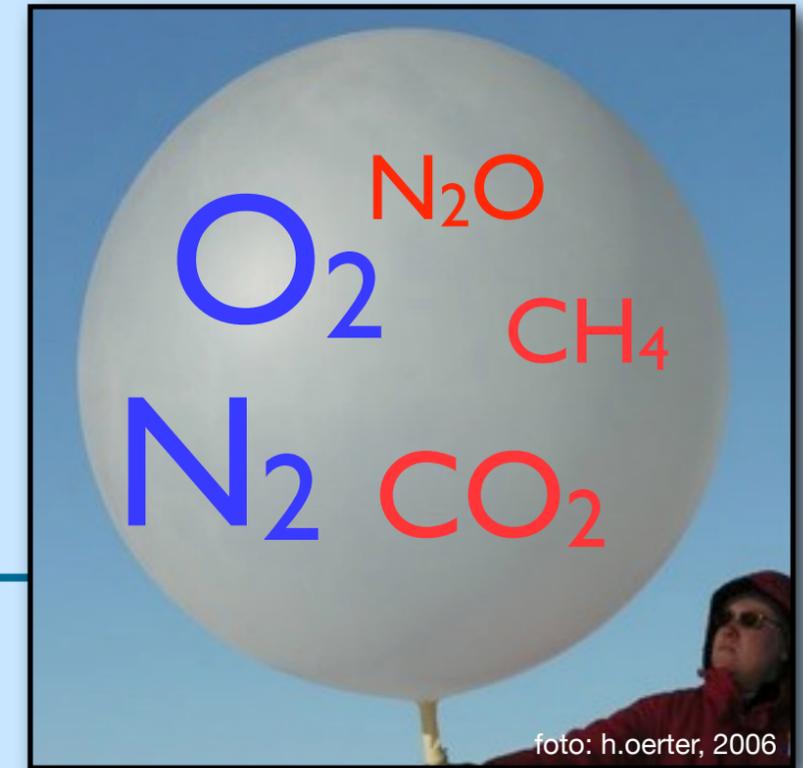
Das Klima-Archiv Eis speichert Informationen zu:

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

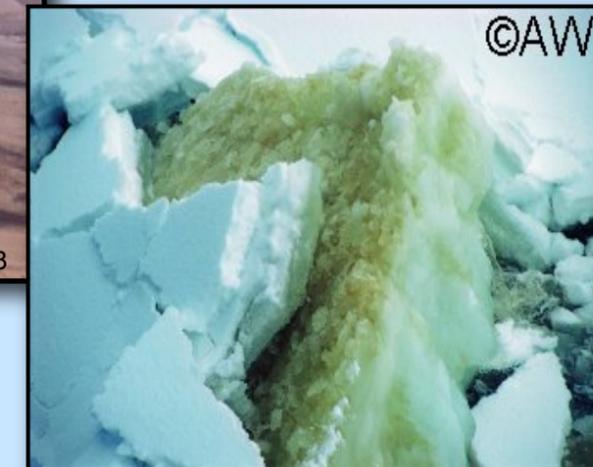
Lufttemperatur



Gasgehalt in der Atmosphäre

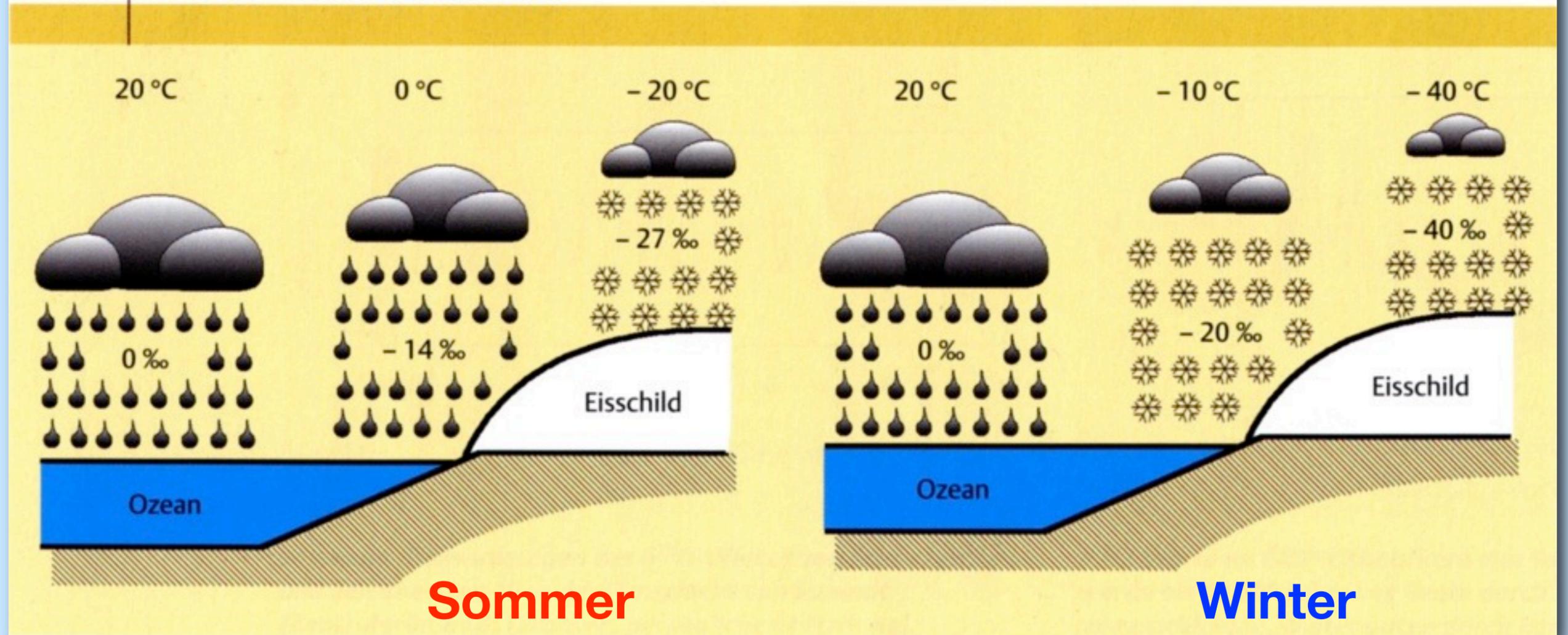


Aerosole



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)

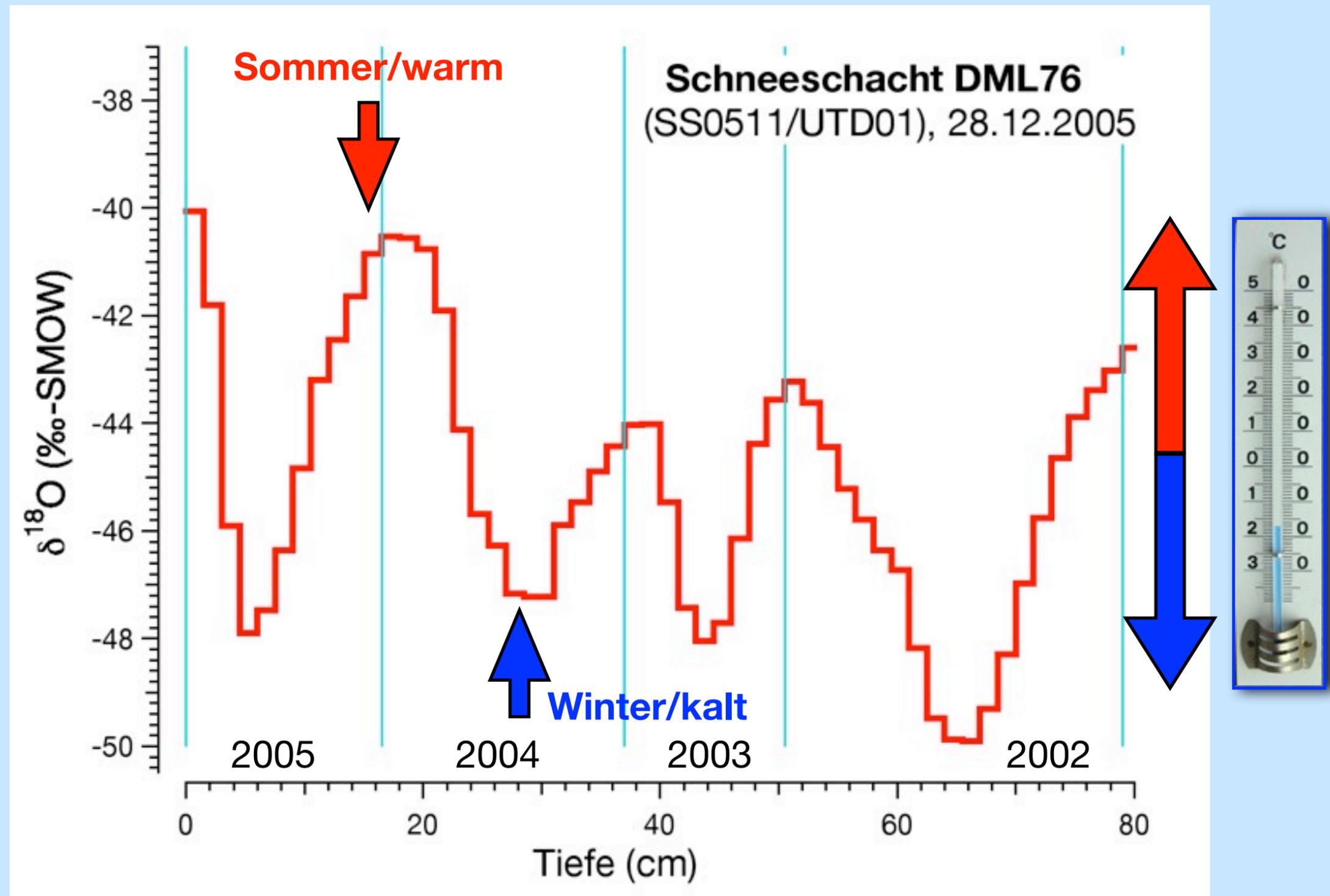
Sauerstoff:	^{16}O	^{17}O	^{18}O
	997 600 ppm	400 ppm	2 000 ppm
Wasserstoff:	^1H	^2H (Deuterium)	
	999 850 ppm	150 ppm	

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

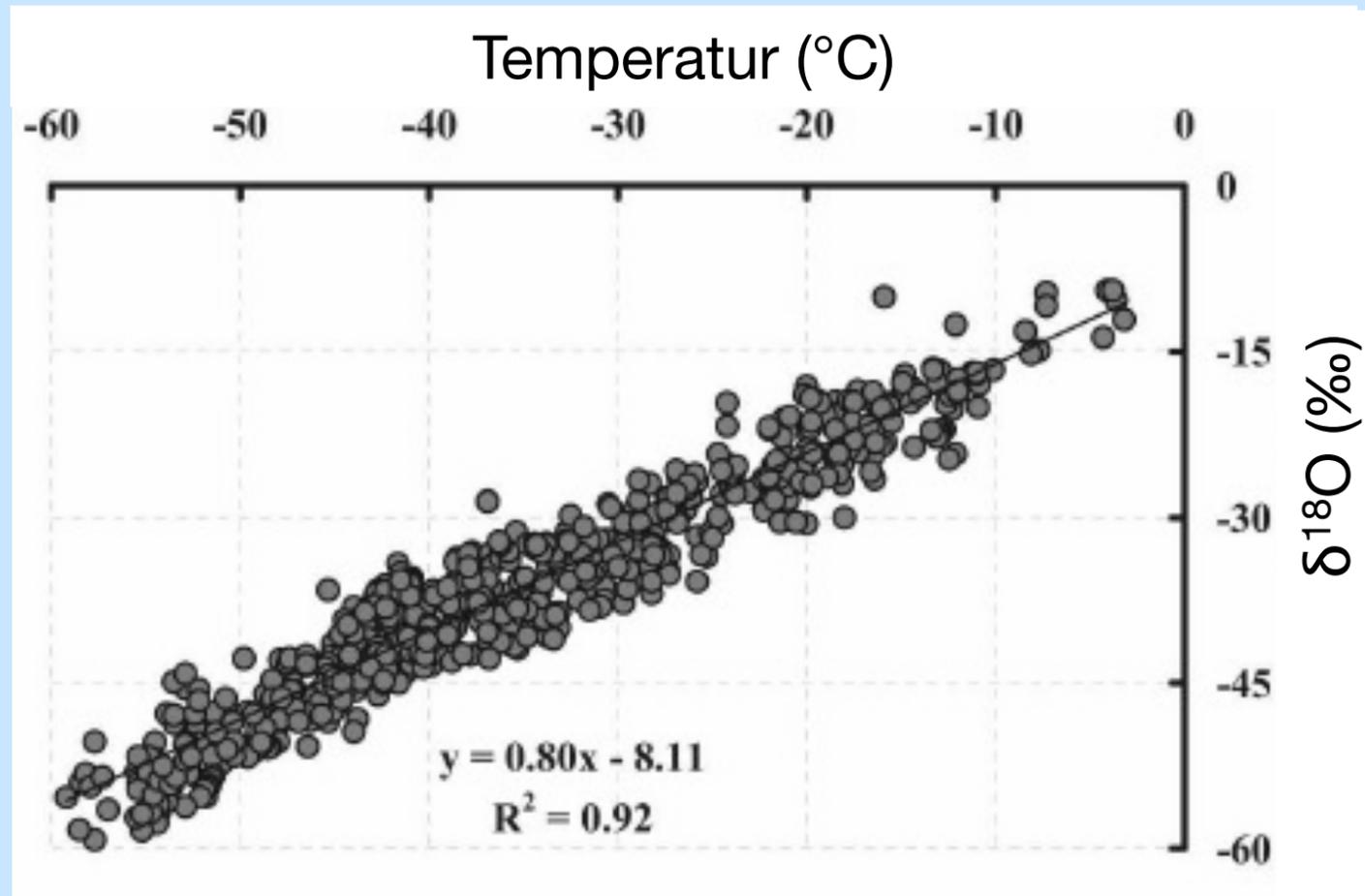
stabile Isotope zeigen saisonale Schwankungen, mit hohen Werten im Sommer und niedrigen Werten im Winter

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

„Isotopenthermometer“ muss kalibriert werden

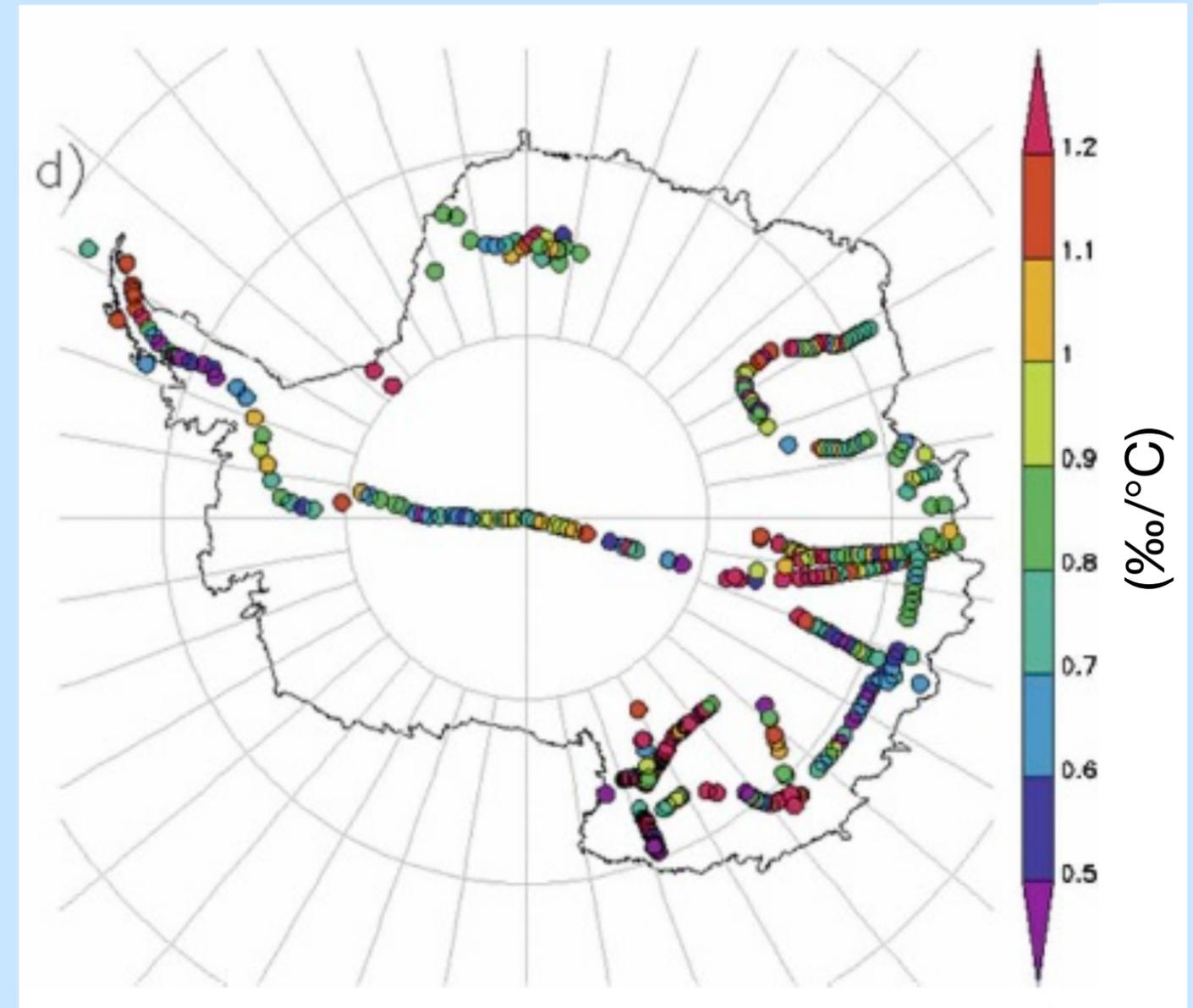


Kalibrierung Isotopenthermometer



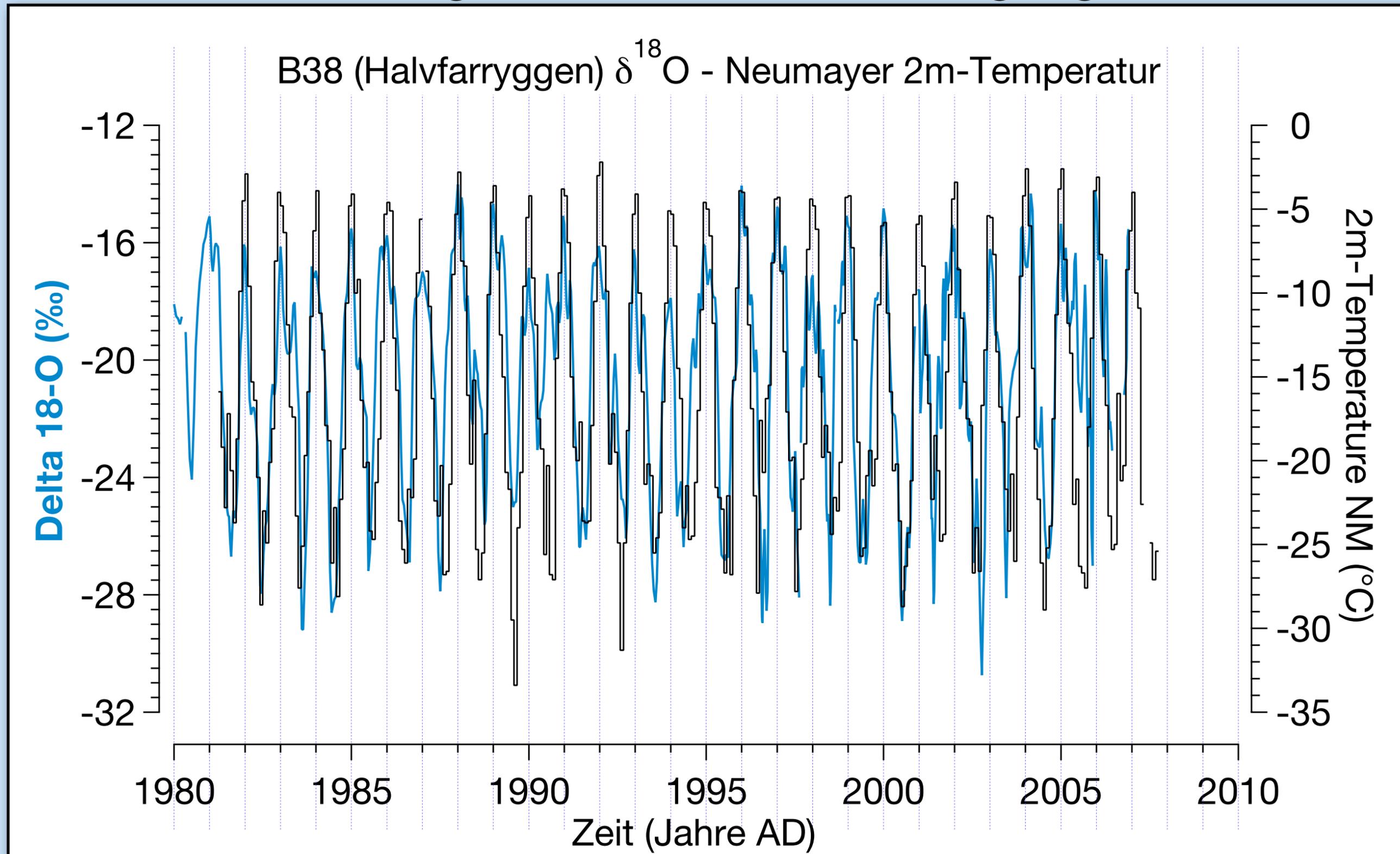
Masson-Delmotte, V. et al. (2008): A Review of Antarctic Surface Snow Isotopic Composition: Observations, Atmospheric Circulation, and Isotopic Modeling. *Journal of Climate* **21**, 3359-3387.

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



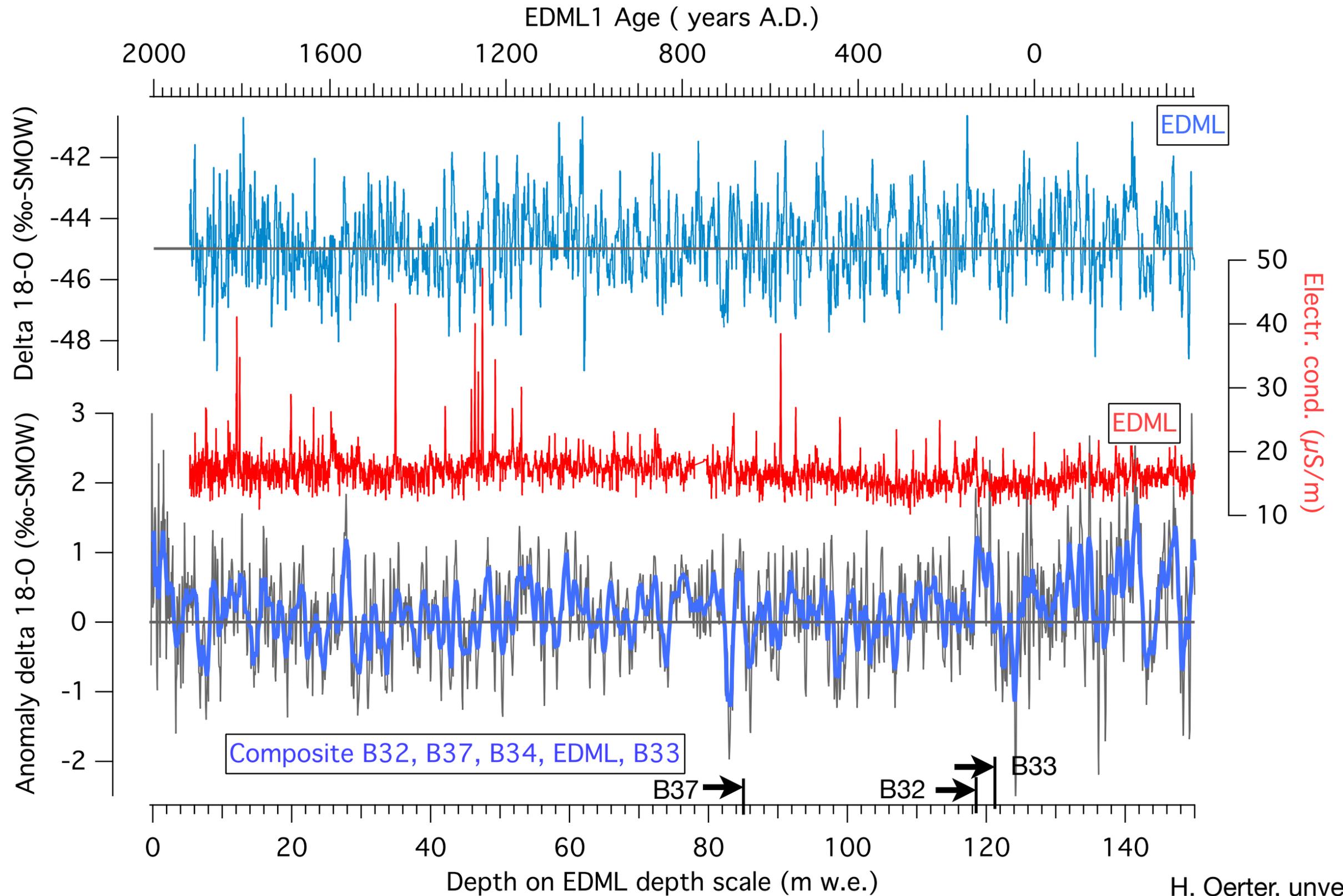
Lokaler Gradient für
 $\delta^{18}\text{O}$ - Temperatur (‰/°C)

Datierung von Eiskernen: Jahresgänge



Fernandoy, F. et al.: Stable-isotope ratios and accumulation rates in East Antarctica. *Journal of Glaciology*, Vol. 56, No. 198, 673-687 (2010)

Datierung von Eiskernen: bekannte Zeithorizonte, z.B. Vulkanausbrüche

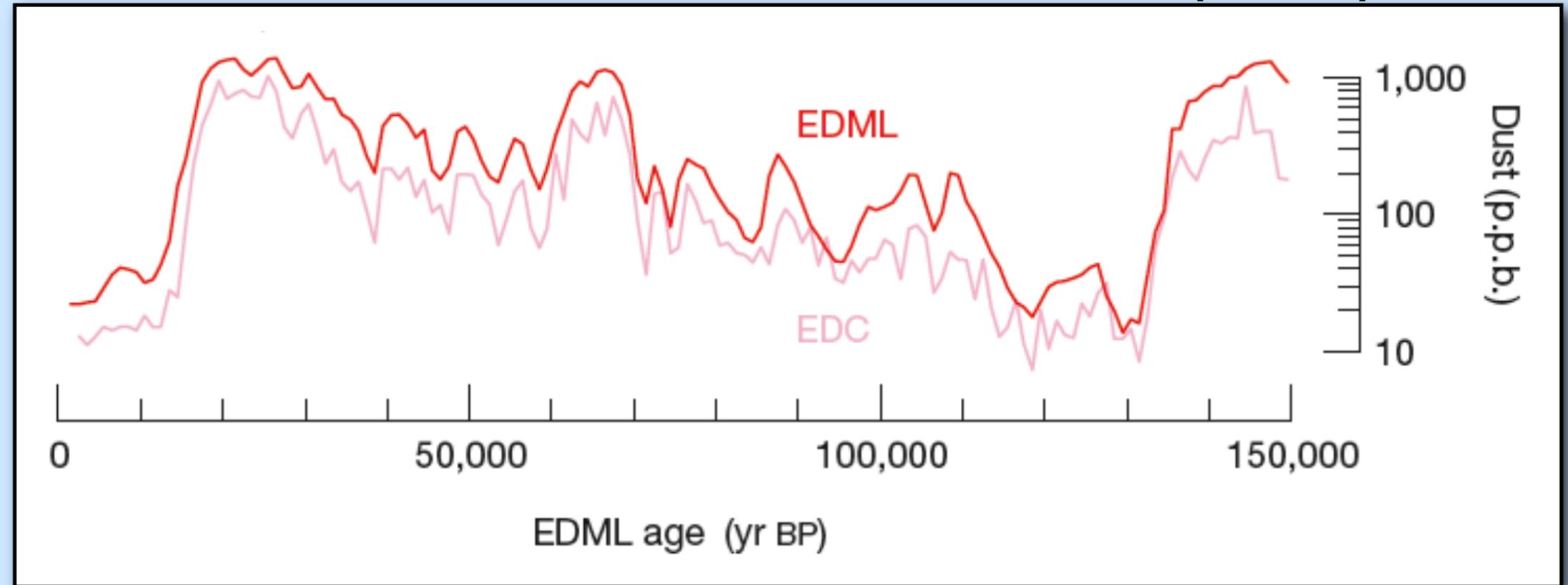


Nulllinie: Mittel
1259-1816 AD

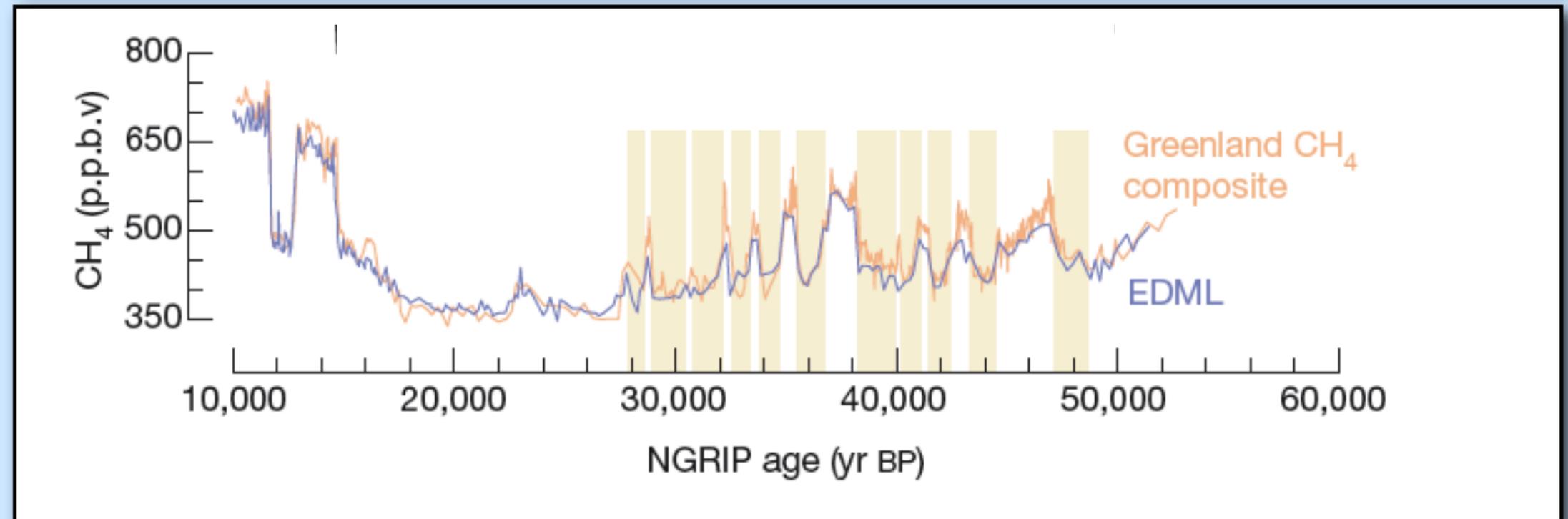
H. Oerter, unveröff.

Synchronisation mit Staub und Methan (N-S)

Staubgehalt:
EDML - EDC



Methangehalt:
Grönland - EDML



aus: EPICA community members: One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature* Vol. 444, 9 Nov 2006, 195-198

10 - 60 ka BP

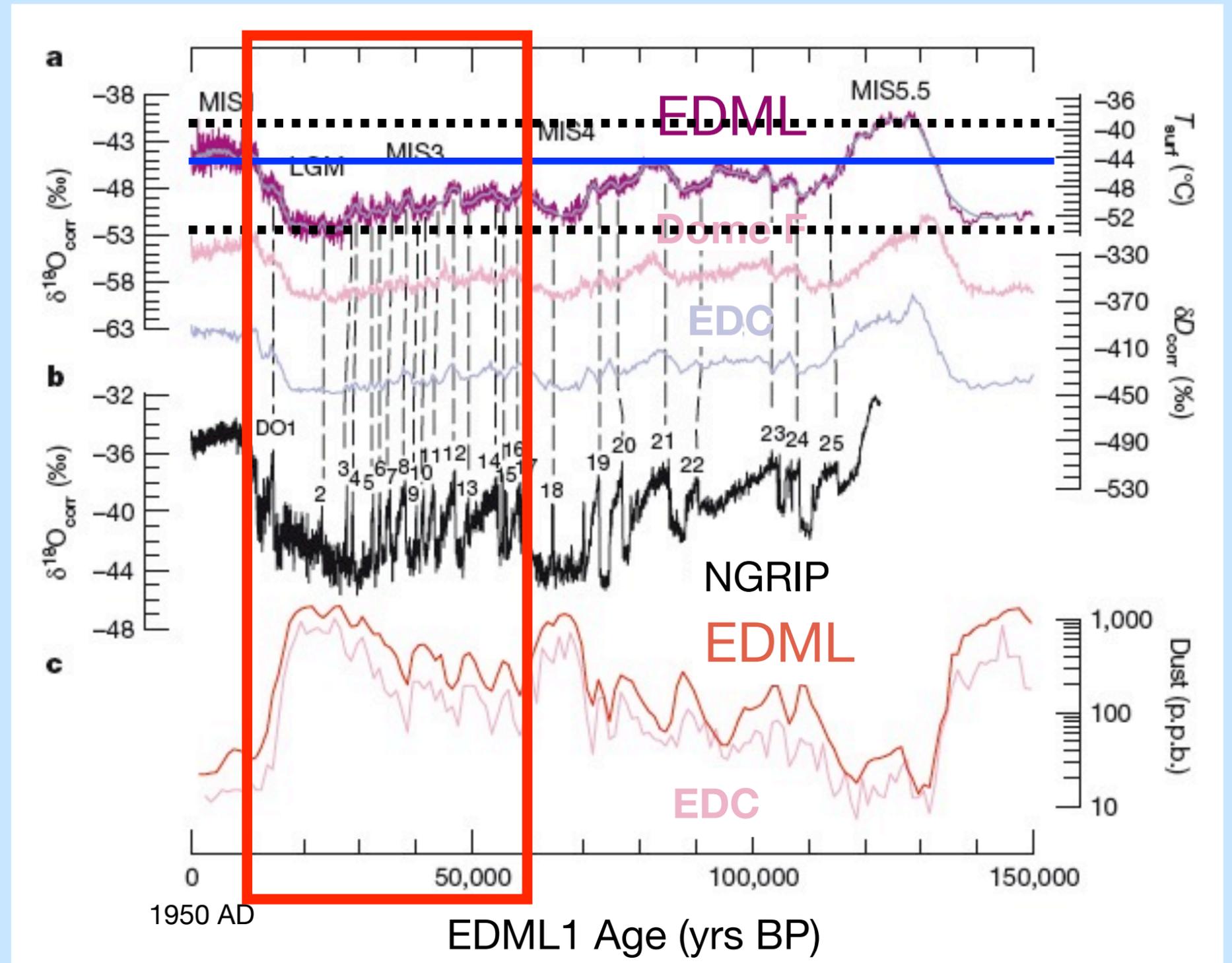
Hohe Co-Varianz zwischen den Antarktischen Eiskernen EDML, Dome F und EDC

$\delta^{18}\text{O}$ -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)

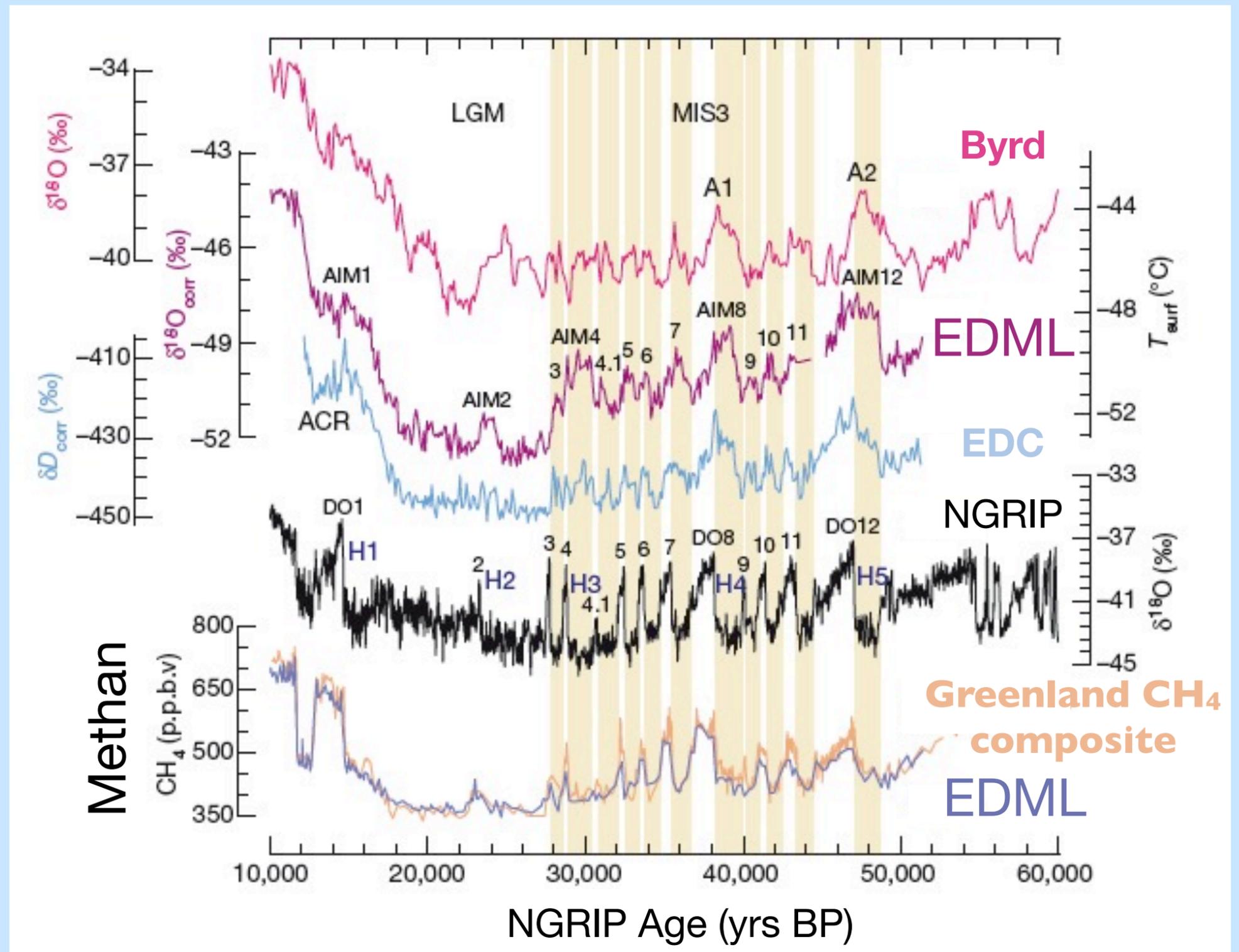
farbig gezeichnet sind
Kaltphasen im Norden

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

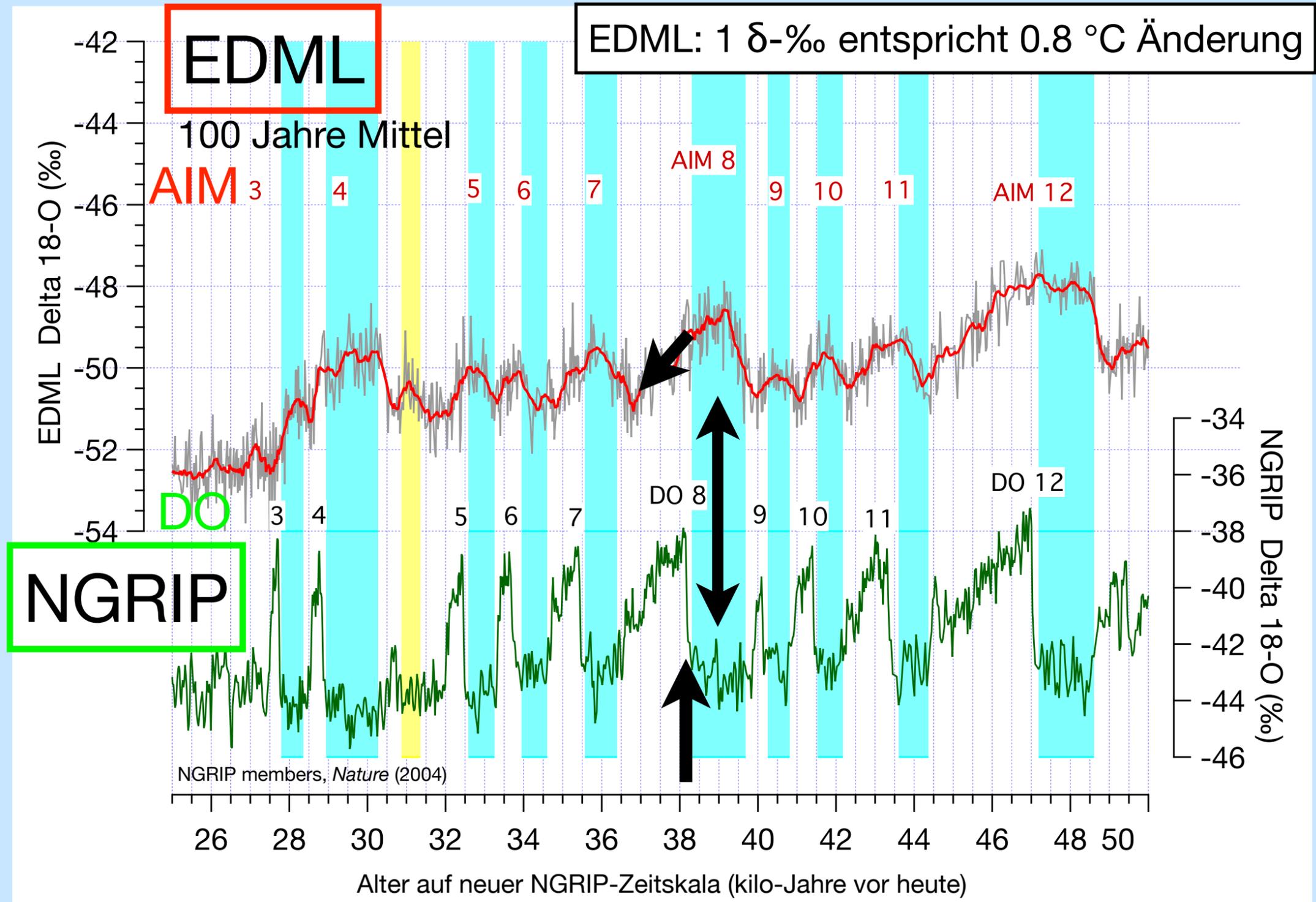


Quelle: EPICA Community Members: *Nature*, **444**, 195-198, (2006). data: [doi:10.1594/PANGAEA.552235](https://doi.org/10.1594/PANGAEA.552235)

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

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

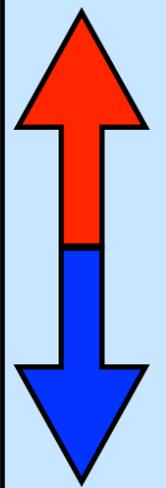
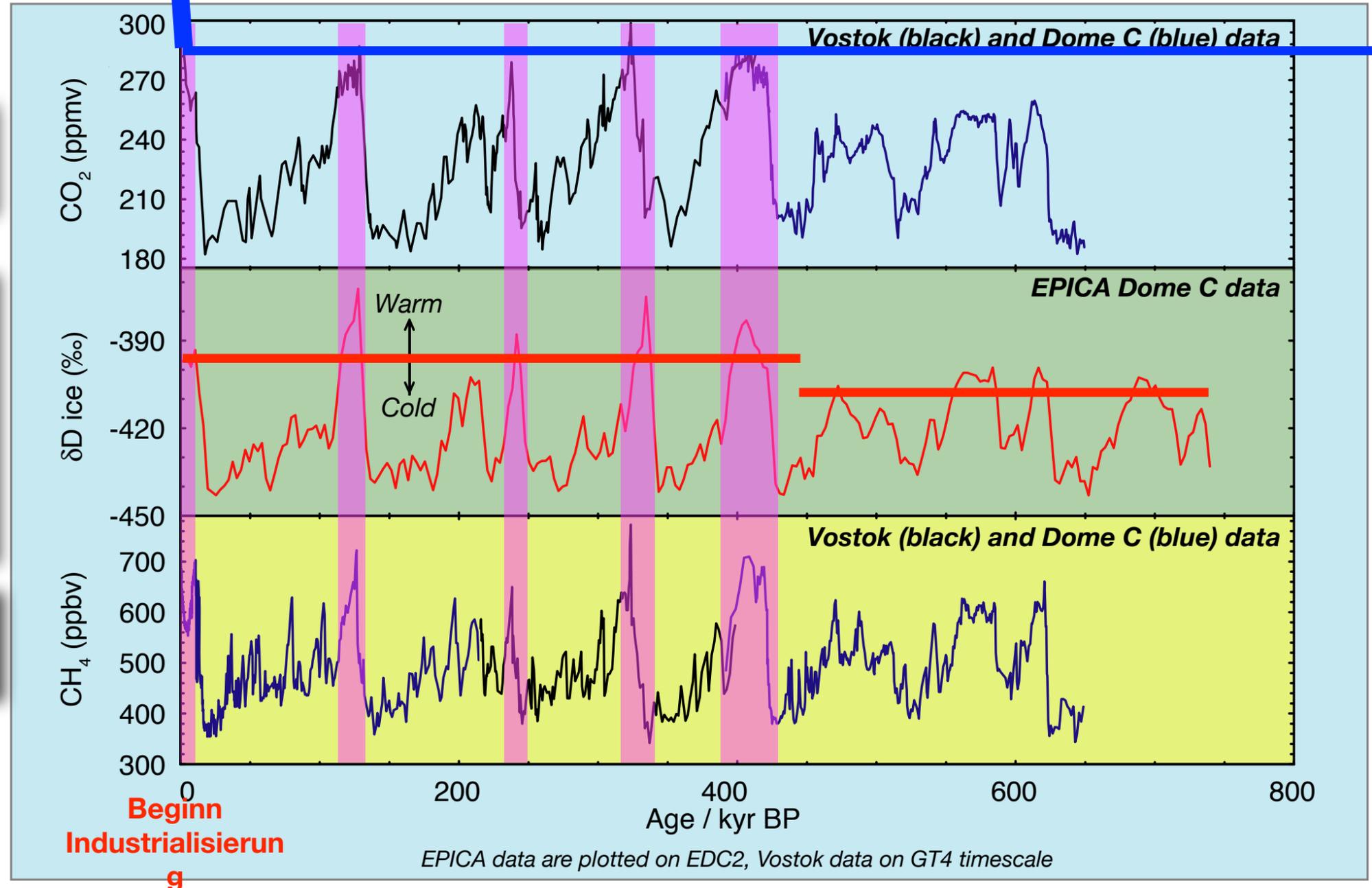
heute 385 ppm

vor 1850 AD

Kohlendioxid

Deuterium
bzw.
Temperatur

Methan



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



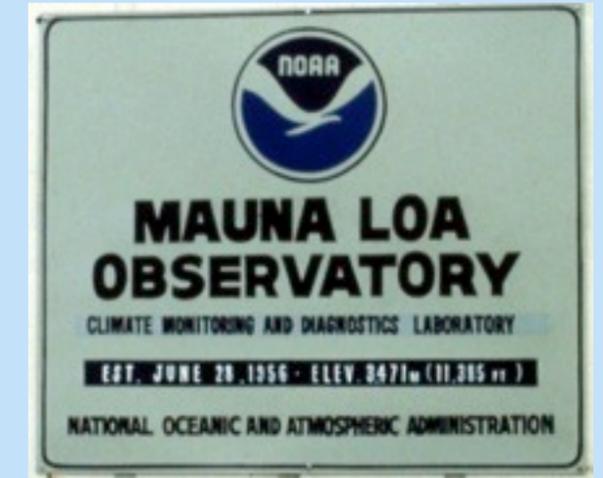
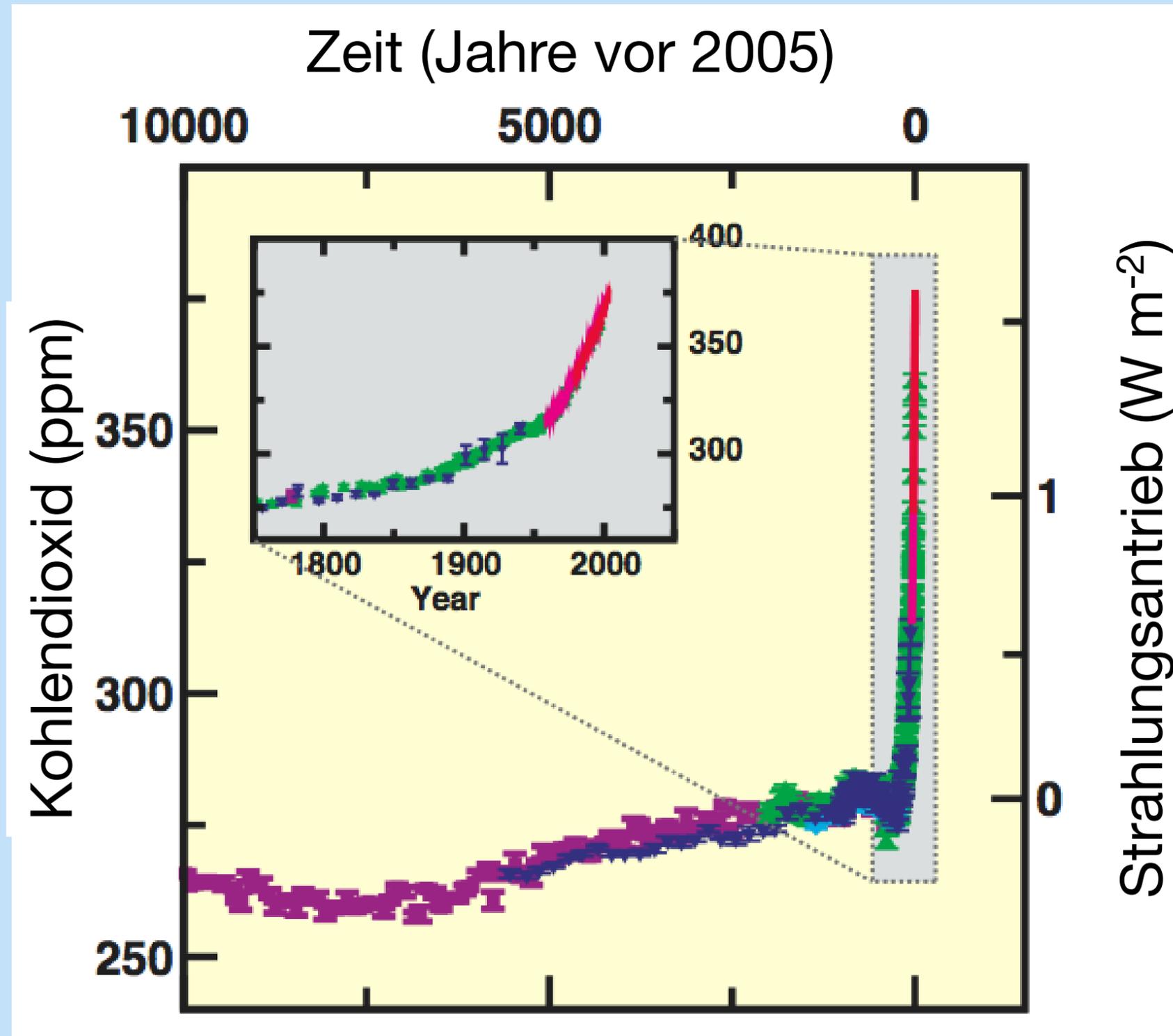
Petit et al., 1999 (Vostok), Siegenthaler et al., 2005 (Dome C - CO₂), Spahni et al., 2005 (Dome C - CH₄), EPICA community members, 2004 (δD)



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.

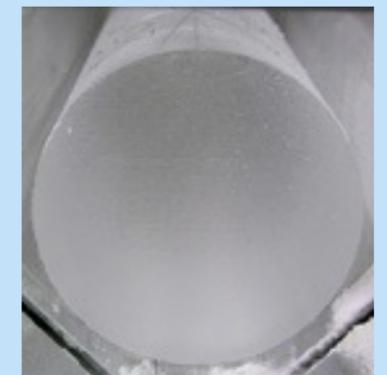


Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre



Messung an
Luftproben seit 1958

Messung an
Eisproben

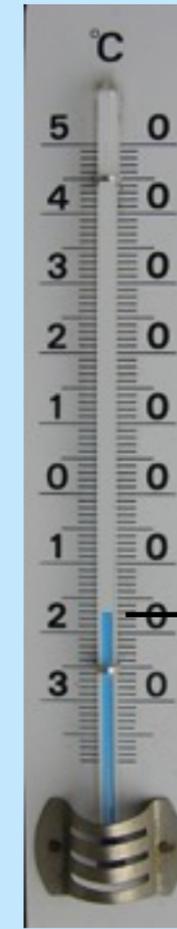
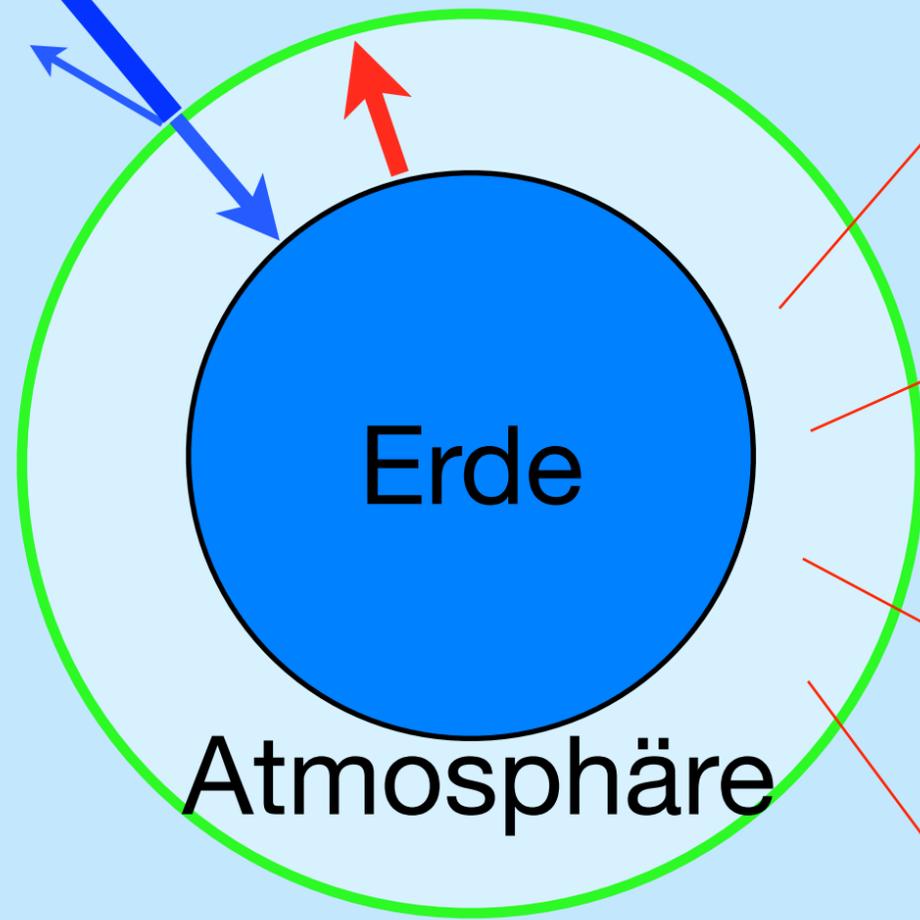


Quelle: IPCC, Climate Change 2007: The Physical Basis, Summary for Policy Makers (www.ipcc.ch)

Treibhauseffekt

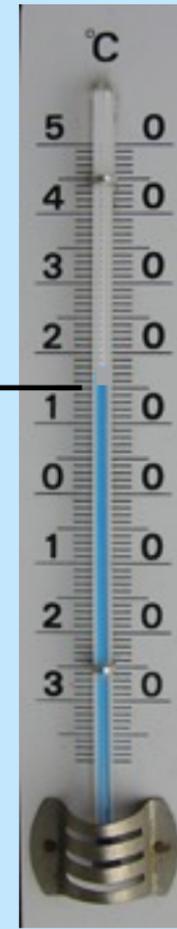
Sonne

kurzwellig
langwellig



+15°C

-18°C



ohne
mit
Treibhausgase

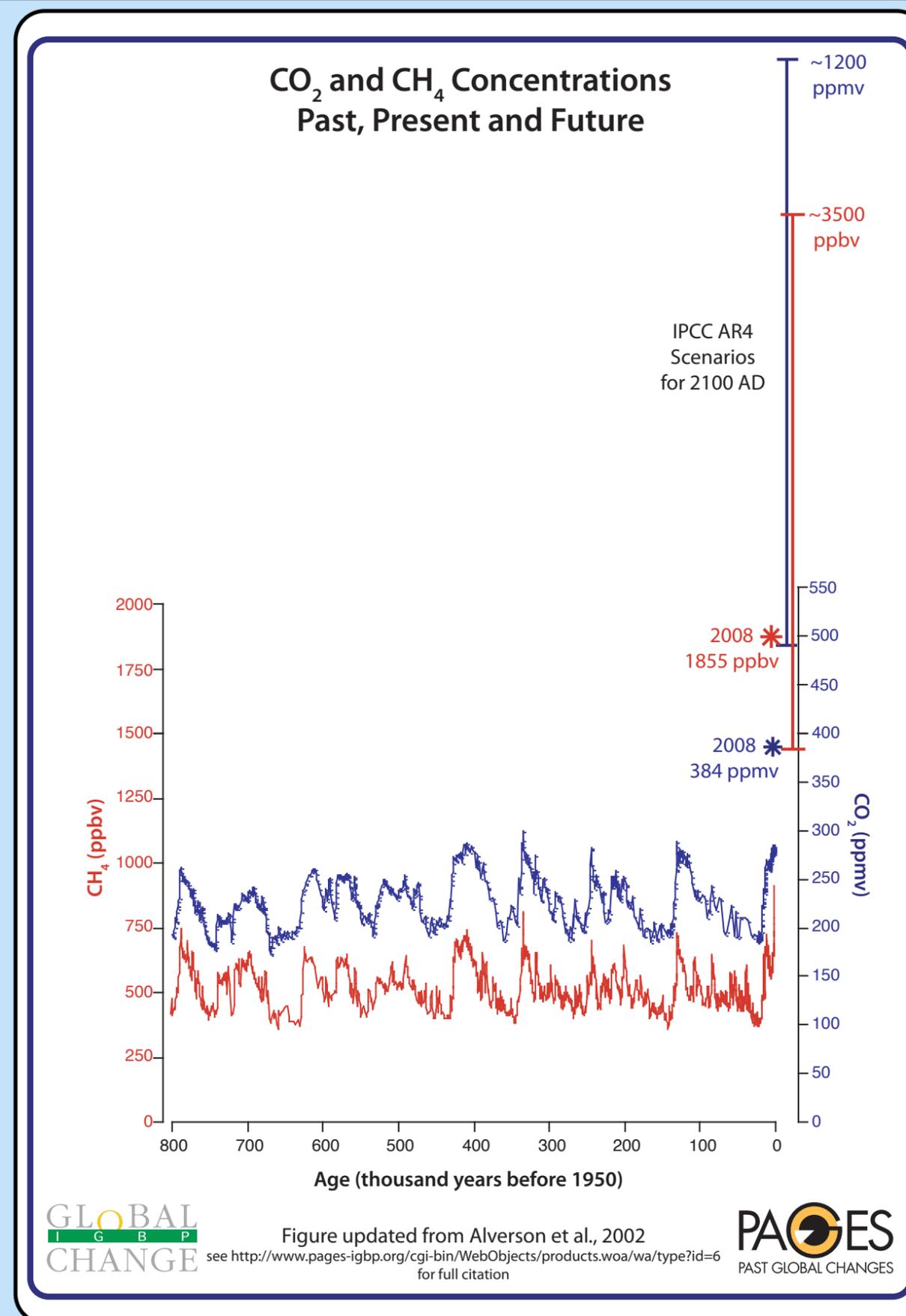
Schichtdicke Atmosphäre
nicht maßstäblich!

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.

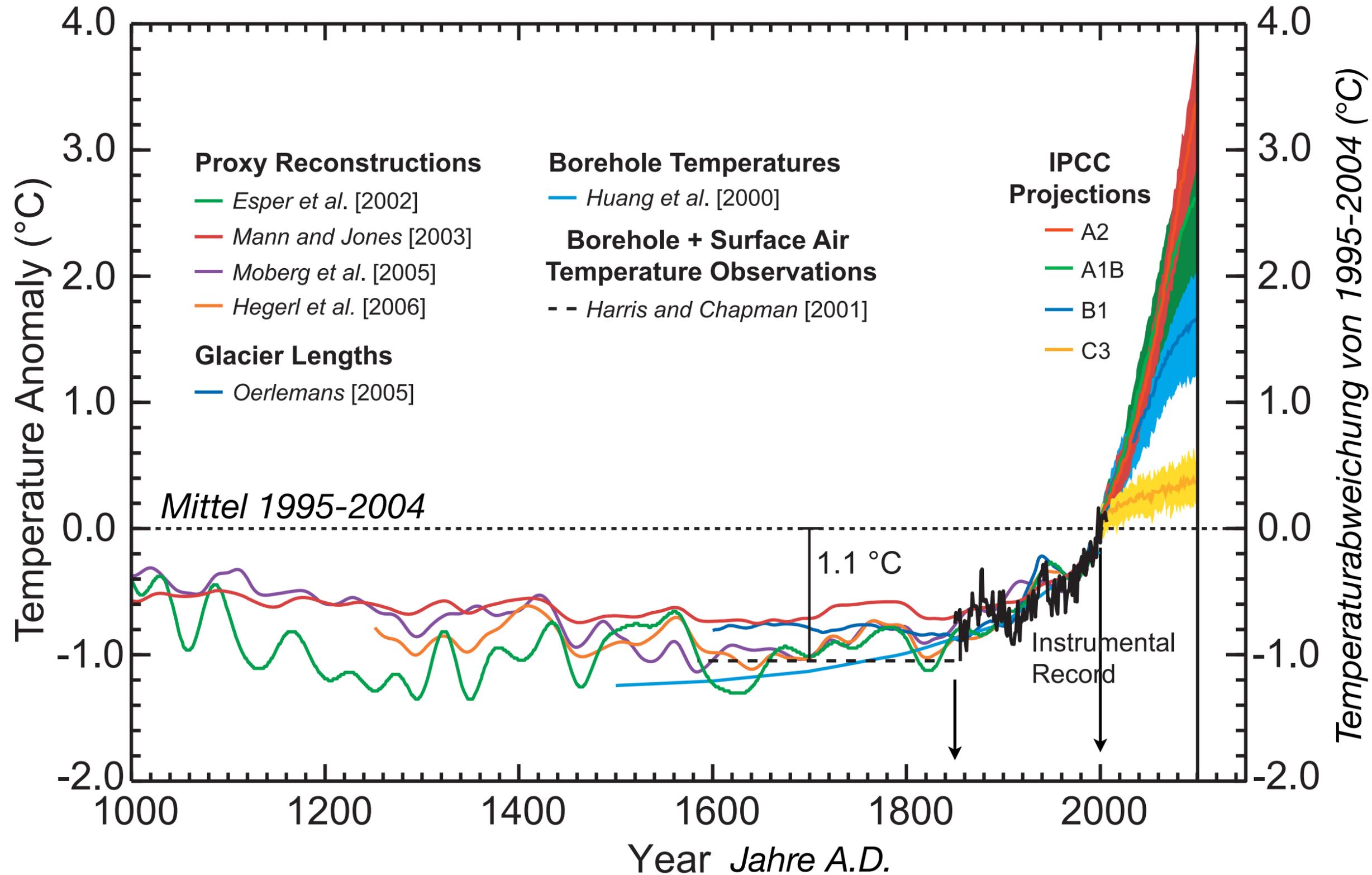
Current atmospheric concentrations:

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

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

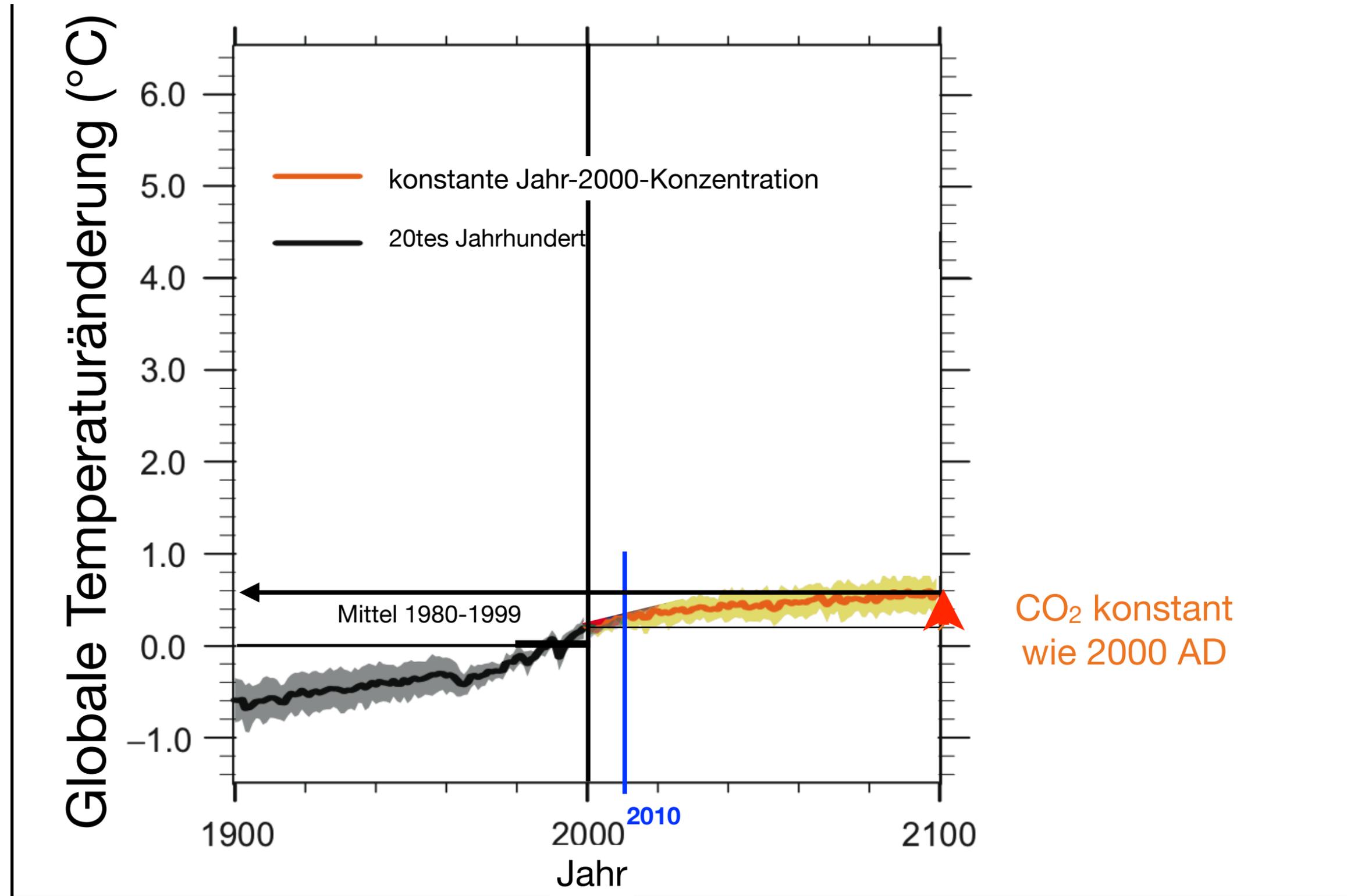
CH₄: Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE)

Klimaänderung: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft



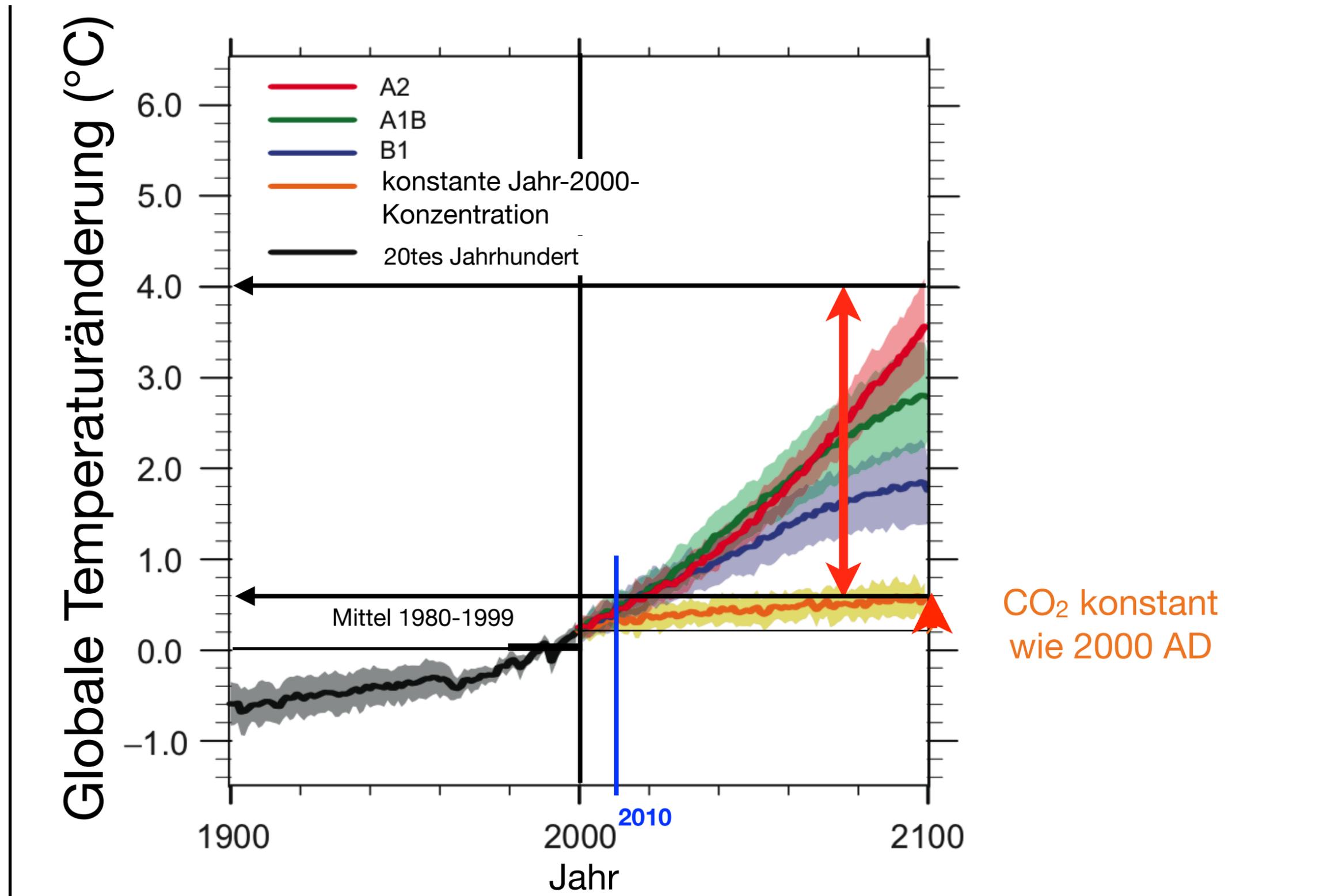
Informationen basierend auf IPCC- Report 2007: Möglicher Bereich für Temperaturerhöhung

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



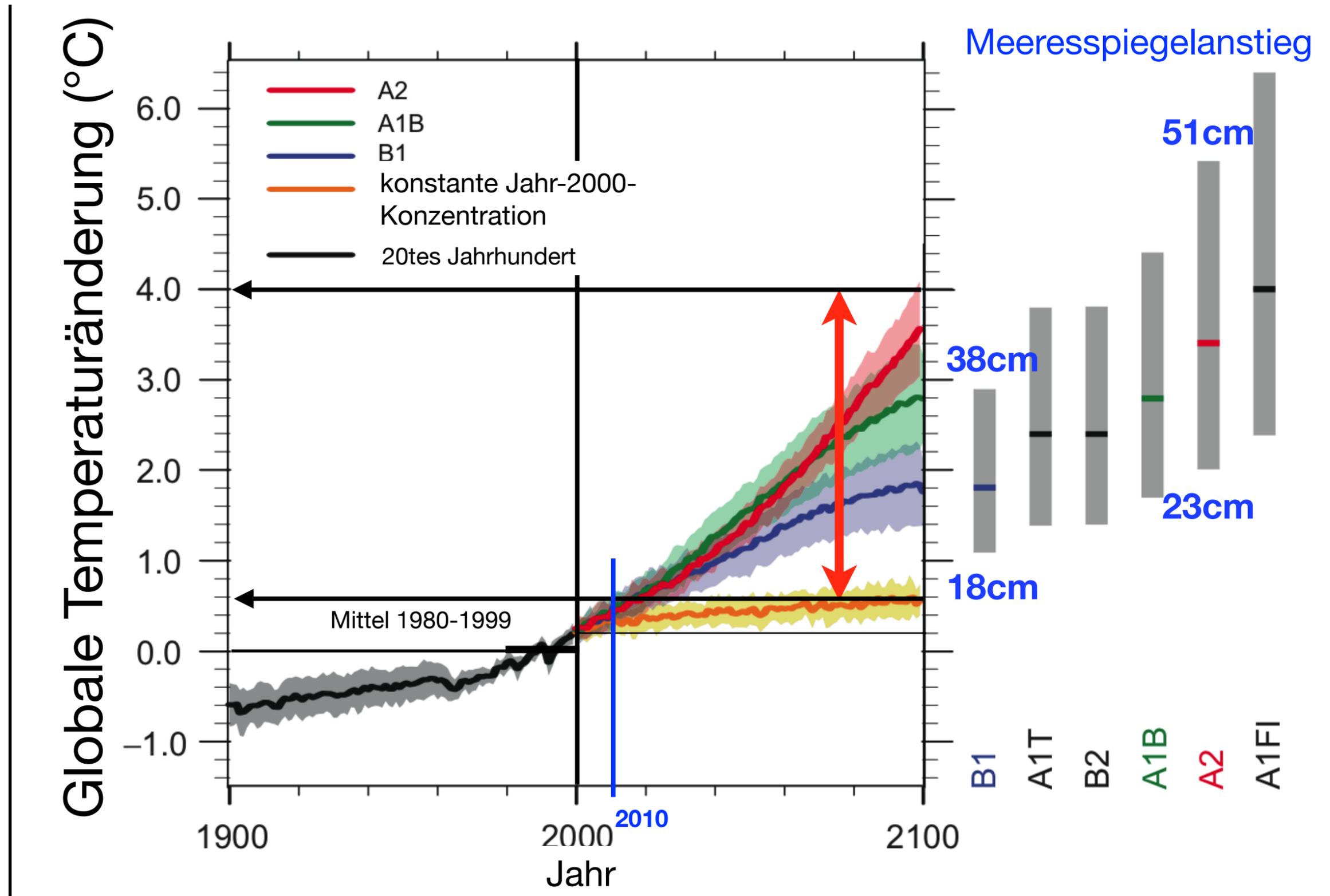
Informationen basierend auf IPCC- Report 2007: Möglicher Bereich für Temperaturerhöhung

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



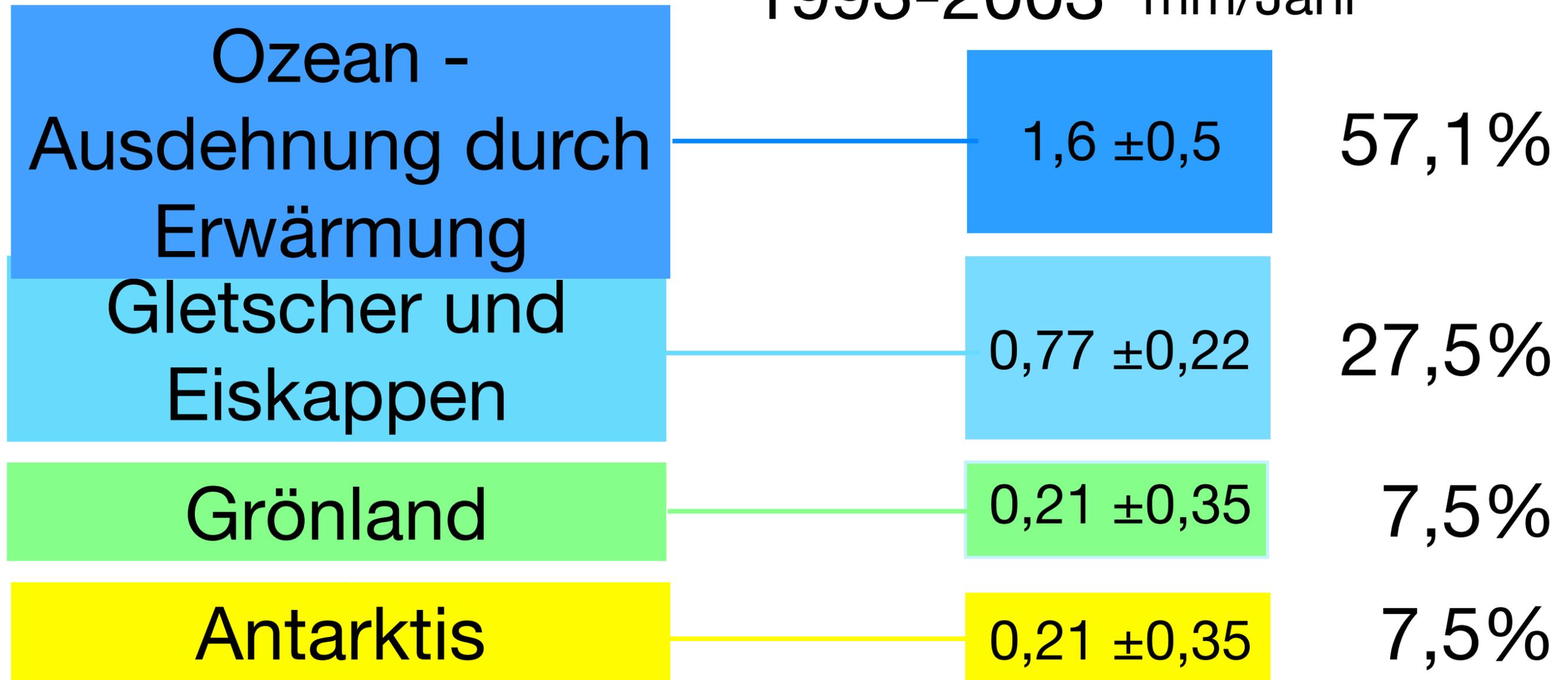
Informationen basierend auf IPCC- Report 2007: Möglicher Bereich für Temperaturerhöhung

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

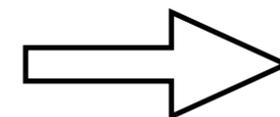


Information aus IPCC-Report 2007: Was verursacht Meeresspiegelanstieg ?

1993-2003 mm/Jahr



Summe: 2,8 mm pro Jahr



28 mm in 10 Jahren

Ansteigende Weltbevölkerung

2003 AD: 6,3 Mrd.

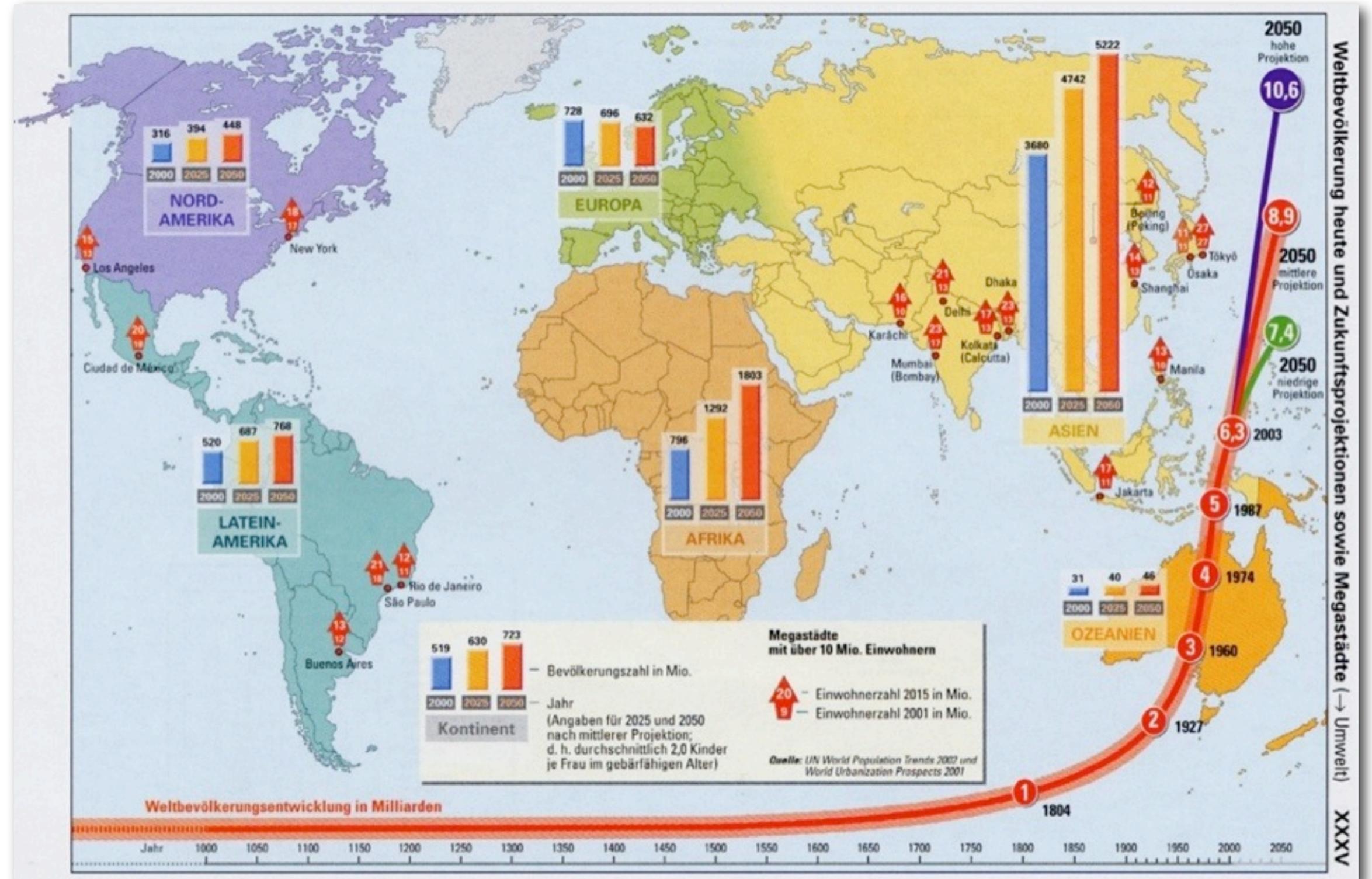
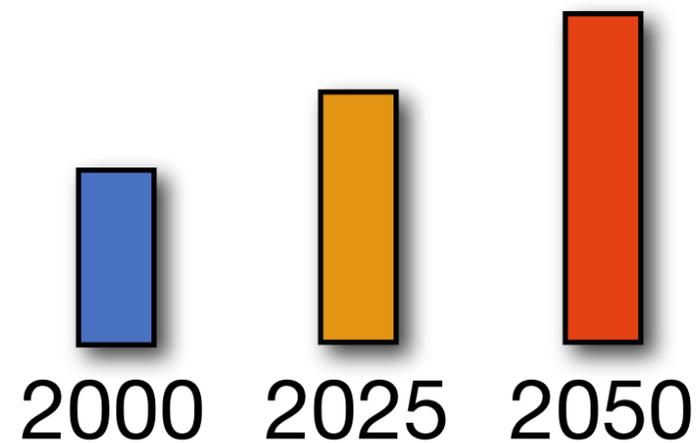
1987 AD: 5 Mrd.

1974 AD: 4 Mrd.

1960 AD: 3 Mrd.

1927 AD: 2 Mrd.

1804 AD: 1 Mrd.



Quelle: Der Fischer Weltatlas 2004, Frankfurt a.M. (2003)

Zusammenfassung

- Eis ist ein Archiv für Veränderung von Temperatur und Gasgehalten
- Eis-Archiv in Grönland 123.000 Jahre, in der Antarktis 800.000 Jahre
- Treibhausgehalte heute erheblich höher als die, die man im Eis in der Vergangenheit nachweisen kann.
- Globus verträgt Klimaveränderung, aber welche Auswirkungen haben diese auf die Menschen ?

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

Vortrag Pfalzmuseum Bad Dürkheim, 14. September 2011

Klimageschichte tiefgekühlt - Was Eisbohrkerne über das Klima der Welt verraten

Hans Oerter, AWI Bremerhaven

(Folie 1) 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 etwas näher bringen kann. Die meisten Ergebnisse, die ich präsentieren werde, stammen aus der Antarktis. Hier blicken wir auf das Bohrcamp für die EPICA-Eiskernbohrung bei der Kohnenstation. Die gelben Container bilden die eigentliche Station, die übrigen Hütten und Zelte bieten zusätzlich Platz für Wohnen und Arbeiten für 25 Personen während der Bohrkampagne.

***(Folie 2)* Klima auf geologischer Zeitskala**

In der Diskussion zu den klimatischen Veränderungen die wir heute erleben, kommt oft das Argument, das hatten wir doch alles schon mal, es war schon viel wärmer als heute. Wenn Sie über klimatische Veränderungen diskutieren, müssen Sie sich immer fragen, auf welcher Zeitskala Sie diese Veränderungen betrachten, sind es Dekaden, Jahrhunderte oder gar Jahrtausende. Betrachten wir als erstes klimatische Veränderungen auf einer geologischen Zeitskala, zurück bis über 500 Millionen Jahre vor heute. Aufgetragen sind aus geologischen Daten rekonstruierte Temperaturänderungen, die zeigen, dass das Klima auf unserem Globus mehrfach zwischen kalten und warmen Phasen gewechselt hat. In den kalten Phasen gab es Eis auf der Erde, in den warmen nicht. Entsprechend war auch der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre in der geologischen Vergangenheit starken Schwankungen unterworfen.

Wir befinden uns heute in einer erdgeschichtlich gesehen kalten Phase, in der Eis eine wichtige Rolle auf unserem Planeten spielt. In dieser „Eiszeit“ leben wir zur Zeit in einem Interglazial, also einer Zwischeneiszeit. Die Interglaziale unterbrechen die Glaziale, Eiszeiten, in regelmäßigen Abständen, wie ich später zeigen werde.

Der Zeitbereich, der mit diesem Vortrag abgedeckt werden soll, entspricht in etwa dem lila-farbenen Balken, die letzten 800.000 Jahre. Es ist auch die Zeit, in der sich der Mensch zu dem entwickelte, was er heute ist.

***(Folie 3)* Wo wurde bereits ins Eis gebohrt?**

In den 1990er Jahren wurden mehrere tiefe Eiskernbohrungen auf dem grönländischen Eisschild abgeteuft. Den Anfang machte 1989 die amerikanische GISP2-Bohrung, die 1993 bei einer Endtiefe von 3053 Metern den Untergrund unter dem Eis erreichte. Gleichzeitig und nur 30 Kilometer entfernt, wurde im Rahmen des europäischen Projektes GRIP 3029 Meter tief ins Eis gebohrt. Beide Eiskerne waren nur bis zu einem Eisalter von 110.000 bzw. 105.000 Jahren klimatisch interpretierbar, da die tiefer liegenden Eisschichten bis zum Untergrund gestört waren. Dadurch wurde zwar das Ende des letzten Interglazials, die sog. Eem-Warmzeit, erreicht, nicht aber der Beginn vor etwa 135.000 Jahren. Deshalb wurde eine weitere Bohrung abgeteuft, die Bohrung NordGRIP (NGRIP). Hier kam man immerhin auf 123.000 Jahre, durch subglaziales Schmelzen am Bohransatzpunkt war das Eis durchgehend ungestört. Aber das eigentliche Ziel, der Beginn des Eems war wieder nicht erreicht worden. Deshalb der nächste Versuch von 2008-2011 mit der Bohrung NEEM. Auch diese Bohrung ist in den untersten Schichten gestört und nach heutigem Stand der Auswertung nur bis 108.000 klimatisch interpretierbar.

Anders ist die Situation in der Antarktis.

(Folie 4) Tiefe Eisbohrkerne in der Antarktis

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 (engl. 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 abgeteuften tiefen Eiskernbohrungen bei der Station Wostok (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 Core drilling 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 Eiskerne 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.

Als Bohransatzpunkte wurden der Dome C und eine Stelle in Dronning-Maud-Land (Kohnen-Station) 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 ($640 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$). Da dort kein oberflächliches Schmelzen auftritt, war es eine ideale Position, um an einem tiefen Eiskern (ca. 1200 m; Australien) rezente CO_2 -Konzentrationen für die Zeit von 1007 bis 1978 AD zu bestimmen. Diese Zeitreihe überlappt mit der 1958 begonnenen Zeitreihe an der Station Mauna Loa.

(Folie 5) Im Folgenden will ich über **drei Themenkomplexe** reden, um Sie mit Eisbohrkernen und deren Analyse etwas vertrauter zu machen:

Wie ist der antarktische Eisschild aufgebaut?

Wie bohrt und zerteilt man einen Eisbohrkern?

Welche Klimainformation enthält ein Eisbohrkern?

(Folie 6) 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.

(Folie 7) **Aufbau eines Eisschildes aus Jahresschichten**

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 Kohlen-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.

(Folie 8) Kommen wir zum zweiten Thema: **Wie bohrt und zerteilt man einen Eisbohrkern?** Ich möchte Sie dazu kurz in die Antarktis und anschließend in das Eislabor des Alfred-Wegener-Instituts in Bremerhaven mitnehmen.

(Folie 9) **Die Anreise zur Kohlenstation**

Die **Anreise zur Neumayer-Station** erfolgt klassischerweise mit dem deutschen Forschungseisbrecher **FS Polarstern**, entweder von Kapstadt auslaufend oder von Punta Arenas oder Ushuaia in Südamerika. Das an der Schelfeiskante entladene Transportgut wird dann mit **Schlittenzügen über das Eis** zur Kohlen-Station befördert. Dabei ist eine Wegstrecke von 750 Kilometern zurückzulegen und ein Höhenunterschied von etwa 2900 Metern zu überwinden. Während der Bau- und Bohrzeiten von EPICA wurden häufig zwei dieser Traversen pro Sommersaison gefahren, um die Kohlenstation vor allem ausreichend mit Treibstoff versorgen zu können. Seit einigen Jahren ist der Zugang ins Dronning-Maud-Land auch über die russische Station **Nowolazerewskaja** möglich. Nowolazerewskaja erreicht man von Kapstadt mit einer russischen Transportmaschine vom Typ **Ilushjin 76**. Diese Maschine befördert Personen und Fracht. Die Flugzeit von Kapstadt beträgt etwa sechs Stunden. Die Wegstrecke Nowolazerewskaja - Kohlenstation wird mit kleineren Flugzeugen vom Typ Basler BT67 geflogen. Dafür wird entweder die AWI-eigene Polar5 bzw. Polar6 oder ein entsprechendes Flugzeug aus der DROMLAN-Flotte eingesetzt. Das rechte, untere Bild zeigt die Ankunft des ersten Teams der Saison 2007/08, am 8. Januar 2008. **Die letzten Schritte geht man zu Fuß.**

(Folie 10) **Kohlenstation** in Dronning-Maud-Land

Die deutsche Forschungsstation **Kohnenstation** im 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 Meter langer, 4,6 Meter breiter und 6 Meter 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.

(Folie 11) **Blick in den sog. Drill-Trench** mit dem Bohrturm (senkrechte Position). Links ist die heizbare Kammer zu sehen, in der die Steuer- und Überwachungselektronik für die Bohranlage steht und in der sich das Personal in den langen Phasen des Fierens und Hievens des Bohrgerätes aufwärmen kann. Bei Tiefen über 2000 m betragen die Hiev- und Fierzeiten jeweils ca. 45 Minuten! Rechts stehen Arbeitstische. Unter dem Fußboden liegt ein schmaler, 6 m tiefer geneigter Graben, um das Bohrgerät (Gesamtlänge ca. 12 m) von der Horizontalen in die Vertikale 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, Die Temperatur des Fußbodens lag am Saisonbeginn bei -42°C.

(Folie 12) Kurze Videosequenz zum Bohren (nicht im pdf-format abspielbar)

(Folie 13) **Zum Bohren von Eiskernen** wird heute hauptsächlich das elektromechanische Bohrverfahren eingesetzt. 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. 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 Bohrkronen bilden eine Einheit, die jeweils komplett ins Loch gefiert bzw. aus ihm heraus gehievt wird.

Bei Teufen über 200 Meter muss das Bohrloch mit einer Stützflüssigkeit gefüllt werden, um eine Verformung des Bohrlochs durch den hohen hydrostatischen Eisdruck zu verhindern. Die Bohrflüssigkeit muss bei Temperaturen bis zu ca. -60°C flüssig bleiben, ihre Viskosität 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).

(Folie 14) 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.

(Folie 15) **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.

(Folie 16) 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.

(Folie 17) Ein anderer Teil wird an den im Raum verteilten **Bandsägen** in kleinere Probenstücke zersägt.

(Folie 18) 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 in einem Kühlhaus in Bremerhaven aufgehoben.

(Folie 19) Kommen wir nun zum dritten Komplex. **Welche Klimainformation enthält ein Eisbohrkern?**

(Folie 20) Das Eis speichert Informationen zur Schwankung 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 der Meeresoberfläche und die Meereisbildung eine wichtige Rolle. Entsprechend gelangen schwefelhaltige Verbindungen aus dem Wasser in die Atmosphäre oder Seesalzkomponenten, die dann später in den Eiskernen nachgewiesen werden können.

(Folie 21) 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. Dieser Publikation habe ich die gezeigte Abbildung entnommen.

Niederschlag über dem Ozean hat bei etwa 20°C einen Isotopenwert von 0 ‰. Kühlen 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.

(Folie 22) **Das Isotopenthermometer**

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 Prof. Dr. Willi Dansgaard (*1922, †2011), 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.

(Folie 23) **Kalibrierung Isotopenthermometer**

In einer Studie im *Journal of Climate* **21** (2008) haben Valerie Masson-Delmotte und andere alle Isotopenwerte aus der Antarktis und soweit vorhanden auch Temperaturwerte zusammengestellt. Es handelt sich dabei entweder um tatsächlich gemessene Lufttemperaturen von Wetterstationen oder häufig auch um die so genannte 10-m-Temperatur, also die Firntemperatur in 10 Meter Tiefe. Die 10-m-Temperatur gibt die Jahresmitteltemperatur an der Oberfläche annähernd wieder. Aus dem vorliegenden Datensatz wurde die lineare Korrelation $\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = 0,80 \times T (\text{°C}) - 8,11$ für die Beziehung zwischen $\delta^{18}\text{O}$ und Temperatur berechnet. Die zugrunde liegende Datenbasis und gleichzeitig die regionale Verteilung für den Gradienten $\delta^{18}\text{O}$ – Temperatur zeigt der rechte Teil der Abbildung. Entsprechend der Farbskala schwankt der Gradient zwischen 0,5 und 1,2 ‰ pro °C.

(Folie 24) **Datierung mit saisonalem Isotopensignal**

Bei ausreichend hoher Schneeakkumulation (i. Allg. > 80mmWW/a) und entsprechend hoher Probindichte (8-10 Proben pro Jahr) kann das Isotopensignal zur Datierung von Eiskernen verwendet werden. Es ist vorteilhaft wenn eine solche Datierung parallel an Ionenprofilen durchgeführt werden kann. Die Abbildung zeigt als Beispiel das Isotopenprofil (blaue Kurve, linke Ordinate), aufgetragen gegen die Zeit, eines Firnkerns vom Halvfarryggen im Hinterland der

Neumayerstation. Gleichzeitig dargestellt ist die Ganglinie der Lufttemperatur an der Neumayerstation. (Fernandoy, F. et al.: *Stable-isotope ratios and accumulation rates in East Antarctica*. Journal of Glaciology, Vol. 56, No. 198, 673-687 (2010).

(Folie 25) **Datierung von Eiskernen**

Bei der Datierung anhand von saisonalen Signalen ist es sehr hilfreich bis unumgänglich, dass man von Zeit zu Zeit bekannte Zeitmarken, wie zum Beispiel Vulkanereignisse, kennt, um mit diesen die gezählten Jahresschichten ausgleichen zu können. Vulkanereignisse lassen sich über die Sulfationen oder aber auch die elektrische Leitfähigkeit des Eises (zerstörungsfreie Messung) nachweisen. Die mittlere, rote Kurve der Abbildung zeigt das Profil der elektrischen Leitfähigkeit, gemessen nach der DEP-Methode (di-electric profiling), des EDML-Eiskerns. Die markanten Spitzen können einzelnen Vulkanausbrüchen zugeordnet werden. So sind zum Beispiel gut erkennbar Krakatau (1883), Tambora (1815) oder das Vierergespann beginnend mit 1259.

Die Abbildung zeigt weiterhin eine aus mehreren Kernen im Umfeld der Kohnenstation zusammengesetzte Isotopenkurve (gleitendes Mittel über 11 Proben von je 60 mm WW Länge, etwa Jahresschichtdicke; Abweichung vom Mittelwert 1259-1815). Dabei erkennt man, dass die Isotopengehalte bzw. Temperaturen im Dronning-Maud-Land im 19. Jahrhundert auf ein Minimum um 1900 abgenommen hatten. Seither ist ein steigender Trend zu beobachten. Die Isotopenwerte bzw. Temperaturwerte um 2000 liegen etwa im Bereich der Werte in der Römerzeit. Ein mittelalterliches Klimaoptimum um 1100-1200 ist ebenfalls erkennbar. Viele Isotopenminima folgen nach größeren Vulkanereignissen.

(Folie 26) **Synchronisation mit Staub und Methan**

Die in der Antarktis gebohrten Eiskerne können über den gemessenen Staubgehalt synchronisiert werden. Dies wurde zum Beispiel bei der Erstellung des Altersmodells EDML1 für den EDML-Kern angewendet. Das Staubprofil des EDML-Kerns wurde dabei mit dem Staubprofil des EDC-Kerns zur Deckung gebracht und so das Altersmodell von EDC auf EDML übertragen.

Bei der Synchronisation zwischen grönländischen Eiskernen und antarktischen Eiskernen greift man auf den Methangehalt zurück. Man kann davon ausgehen, dass sich der Methangehalt global gleichförmig ändert, auch wenn es gewisse Konzentrationsunterschiede zwischen der Süd- und Nordhemisphäre gibt. Für Grönland existiert eine aus mehreren Kernen zusammengesetzte Methanzeitreihe. Diese wurde verwendet, um den EDML-Kern, an dem ebenfalls Methan gemessen worden war, mit dem grönländischen Eiskern NGRIP zu synchronisieren. Auf diese Weise kann man zeitliche Änderungen des Isotopengehalts in beiden Kernen auf derselben Zeitachse miteinander vergleichen. Dies ist wichtig, wenn man der Frage nachgeht wie klimatische Änderungen in Grönland und in der Antarktis zeitlich abgelaufen sind.

(Folie 27) **Der EDML-Eiskern (EPICA)**

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

Die gezeigte 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 (regional unterschiedlich bezeichnet als Weichsel-, Wisconsin oder Würmeiszeit) sowie die davor liegende Warmzeit, im Norden als Eem bezeichnet, allgemeiner ausgedrückt das marine Isotopenstadium (MIS) 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.

(Folie 28) EDML 10-60.000 Jahre BP

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, wenngleich 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 DO 12 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.

(Folie 29) EDML 10-60.000 Jahre BP: DO 8 – AIM 8

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 möglicher 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 langsamen Abkühlen im Süden.

(Folie 30) 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 $\delta^{18}O$) 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 (Milankovitch-Zyklus).

In der Zeit davor sind die Warmzeiten (Interglaziale) 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 (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 AD) stellt man fest, dass sich die Maximalwerte nur unwesentlich unterscheiden. Vergleichbares gilt für Methan. Die heutigen hohen CO_2 -Konzentrationen von 385 ppmv wurden in den Eiskernen zu keiner Zeit nachgewiesen.

(Folie 31) Erdumlaufbahn: Milankovitch-Zyklen

Der in der vorhergehenden Folie gezeigte zeitliche Verlauf der Schwankungen des Isotopengehalts bzw. der Temperatur lässt sich weitgehend erklären durch Überlagerung der sog. Milankovitch-Zyklen. Die Exzentrizität der Erdumlaufbahn um die Sonne hat eine Periodizität von 100.000 Jahren, die Erdschiefe eine solche von 41.000 Jahren und die Präzession eine Periodizität von 23.000 Jahren.

(Folie 32) Kohlendioxid in der Atmosphäre

Das 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 denen 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 vor Heute 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) !

(Folie 33) Der Treibhauseffekt

Noch kurz ein paar Worte zum sogenannten Treibhauseffekt, der an sich nicht grundsätzlich zu verteufeln ist. Die kurzwellige Strahlung von der Sonne kann die Atmosphäre der Erde durchdringen. Die langwellige Rückstrahlung der Erde jedoch nicht. Je nach Gehalt an den Treibhausgasen wird ein entsprechend großer Teil der Rückstrahlung zur Erwärmung der Atmosphäre verwendet. Die wesentlichen Treibhausgase sind Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan und Lachgas. Ohne den natürlichen Gehalt an Treibhausgasen läge die mittlere Temperatur auf unserem Globus bei -18 °Celsius, mit jedoch bei der Wohlfühltemperatur von $+15$ °Celsius.

(Folie 34) Entwicklung Kohlendioxid und Methangehalt bis 2100 AD

Was ist der Status heute und wie wird sich der Kohlendioxidgehalt weiter entwickeln? 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. Für den Methangehalt gilt vergleichbares: 2008: 1855 ppbv, 2100: 1500-3500 ppbv

(Folie 35) Klimaänderung: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft

Welche Konsequenzen ergeben sich daraus für die Entwicklung der Lufttemperaturen? Die Abbildung zeigt die rekonstruierte bzw. modellierte Temperaturentwicklung für den Zeitraum 1000-2000 AD. Für die Zeit von 1850-2000 können die berechneten Werte mit gemessenen Werten (schwarze Kurve) verglichen werden. Dargestellt sind Abweichungen vom Mittel 1995-2004. Nach dieser Abbildung lagen also die Temperaturwerte in den beiden vergangenen Jahrzehnten global bereits über den Werten des mittelalterlichen Klimaoptimums und auf jeden Fall deutlich über den Temperaturen der letzten 1000 Jahre. Die mögliche Entwicklung in den nächsten 90 Jahren zeigen die bunten Kurven, die mit den nächsten Abbildungen noch näher erläutern werden sollen.

(Folie 36) Szenarien des IPCC-Reports 2007

Ein erstes Szenario des Berichts des Weltklimarates (IPCC-Report) von 2007 nahm an, dass der Kohlendioxidgehalt vom Stand vom Jahr 2000 eingefroren würde. Selbst unter dieser Annahme würde die Temperatur global bis 2100 noch um 0,4 °Celsius steigen. Das heißt, der Prozess der durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe bereits angestoßen wurde, kann nicht rückgängig gemacht werden.

(Folie 37) Szenarien des IPCC-Reports 2007

Für die weiteren modellierten Szenarien wurden verschiedene Annahmen über die Entwicklung der Treibhausgase, besonders Kohlendioxid, getroffen und auch unterschiedliche Klimamodelle verwendet. Alle Szenarien weisen auf steigende Temperaturen hin, mit Erhöhung um bis zu 4 °C gegenüber dem Mittel von 1980-1999. Die tatsächlichen Werte im Jahr 2100 werden wahrscheinlich irgendwo dazwischen liegen. Man sollte aber bedenken, dass die in den letzten Jahren gemessenen Kohlendioxidgehalte bereits im oberen Bereich der Modellannahmen liegen. Bessere Einsicht wird uns sicher der nächste Bericht geben, der zur Zeit erarbeitet wird und 2013 erscheinen soll.

(Folie 38) Szenarien des IPCC-Reports 2007

Eine Erhöhung der globalen Lufttemperatur muss Konsequenzen auf die Höhe des Meeresspiegels haben. Bei aller Unsicherheit, die den Modellen noch anhaftet, gibt der Bericht von 2007 Werte zwischen 18 Zentimeter und 51 Zentimeter an. Das sind Werte, die man nicht vernachlässigen kann. Man muss sich ernsthaft Gedanken darüber machen, welche Konsequenzen das nach sich zieht und welche Auswirkung es auf die Menschen hat, die küstennah wohnen.

(Folie 39) Meeresspiegeländerung nach IPCC 2007

Sie werden sich sicher fragen woher die prognostizierte Meeresspiegeländerung kommt und ob diese bereits messbar ist. Hierzu nochmals einige Zahlen aus dem bereits zitierten Bericht des Weltklimarates, und zwar gemessene Werte für den zehnjährigen Zeitraum 1993-2003. Demnach trug die thermische Ausdehnung des Ozeans zu etwa 57 % zur Meeresspiegelerhöhung bei, das Schmelzwasser von Gebirgsgletschern und kleineren Eiskappen, zum Beispiel in der kanadischen Arktis, zu etwa 27 %, sowie das Schmelzwasser und der Eisabfluss aus dem grönländischen Inlandeis zu 7,5 %. Mit großer Unsicherheit ist der Wert von 7,5% für die Antarktis behaftet. Aber es herrscht Konsens, dass die Antarktis zur Zeit Eismasse verliert, nicht durch verstärktes Schmelzen an der

Eisoberfläche (das findet nur im Bereich der Antarktischen Halbinsel statt) sondern durch beschleunigten Eisabfluss ins Meer. Vor allem im Bereich des Bellinghausen und Amundsenmeeres sind einige Eisströme deutlich schneller geworden.

In der Summe ergab sich für den Zeitraum 1993-2003 eine jährliche Erhöhung des Meeresspiegels um 2,8 Millimeter, das sind 28 Millimeter in zehn Jahren, Tendenz steigend. Zur Zeit liegen die Werte bereits bei 3,5 Millimeter jährlich.

(Folie 40) Ansteigende Weltbevölkerung

Man kann die gegenwärtig beobachteten klimatischen Änderungen nicht diskutieren ohne einen Blick auf die Weltbevölkerung zu werfen.

Zum einen geht der exponentielle Anstieg der Weltbevölkerung seit 1800 einher mit dem Anstieg des Kohlendioxidgehalts in der Atmosphäre. Jeder Mensch atmet und er braucht Energie. Und der Energiebedarf wird weiter steigen, zuerst im asiatischen Raum und auch bald in Afrika.

Zum anderen liegen unsere größten Städte an der Küste und es sind viele Millionen von Menschen, deren Lebensraum von einer Erhöhung des Meeresspiegels direkt betroffen sein wird. Wir dürfen die Augen nicht verschließen vor den möglichen Auswirkungen auf den Menschen.

(Folie 41) Zusammenfassung

Meine Damen und Herren, ich will zum Schluss kommen und noch einmal einiges Wesentliche zusammenfassen.

Ich hoffe, ich konnte Ihnen zeigen, dass Eis ist ein Archiv für die Veränderung von Temperatur und Gasgehalt in der Atmosphäre ist,

dass das Eis-Archiv in Grönland 123.000 Jahre, in der Antarktis 800.000 Jahre zurück reicht und,

dass die Treibhausgehalte heute erheblich höher sind als die, die man im Eis für die Vergangenheit nachweisen kann.

Ich bin der Meinung, dass der Globus die anstehenden Klimaänderungen verkraften und ein neues Gleichgewicht finden wird. Das darf aber die Frage, welche Auswirkung die laufenden Veränderungen auf die heutigen und zukünftigen Menschen haben, nicht verdrängen.

(Folie 42) weiterführende Informationen

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 Kohlen-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 die Folien dieses Vortrags als pdf herunterladen.

Ich danke Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit.