

# Polares Eis - Archiv für das Klima der Vergangenheit und Indikator für die Zukunft

Hans Oerter

Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung  
in der Helmholtzgemeinschaft, Bremerhaven

Einleitung: Ein kurzer Blick in eisige Landschaften.

Wo und wie bohrt man Eiskerne ?

Was lernen wir aus den Eiskernen  
über das Klima der Vergangenheit ?

Was erwartet uns in der Zukunft ?

Hintereisferner,  
Ötztaler Alpen 2010

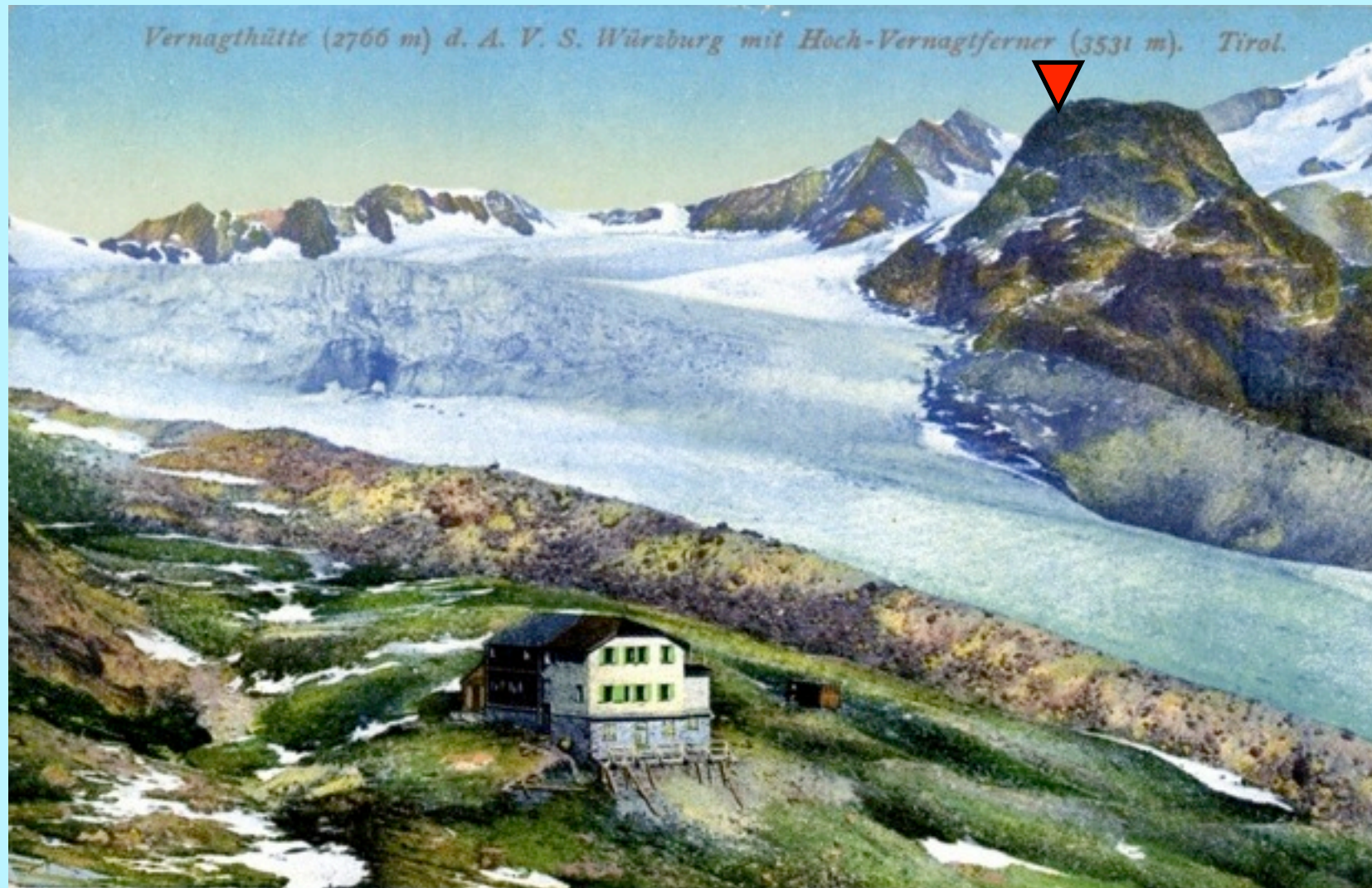


# Alpine Gletscher - Indikator für Klimaveränderung

foto: hans oerter, 2010

# Beispiel Vernagtferner/Ötztaler Alpen

Postkarte um 1910



Photochromiekarte No. 13503, München: Purger & Co. (um 1910)

Aufnahme September 2010



Photo: Hans Oerter, 11. September 2010



# Grönländisches Inlandeis - Indikator für Klimaveränderung

foto: hans oerter, 1998

# Schmelzen des Grönländischen Inlandeises

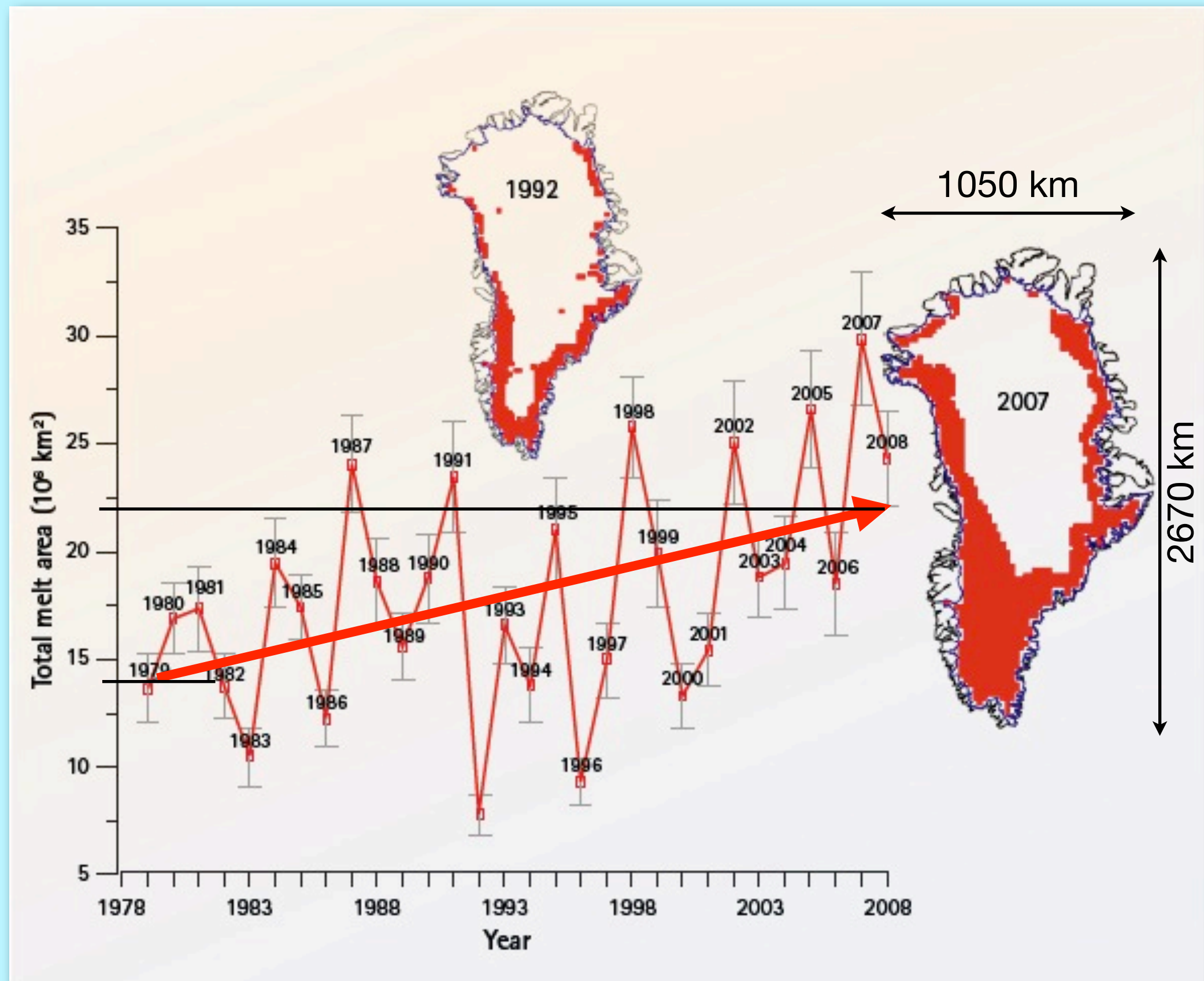
Die Abbildung zeigt die Fläche des Grönländischen Eisschildes auf der, in der Zeit von 1979-2008, Eisschmelze auftrat. Die Fläche wurde aus Satellitenbildern abgeleitet. Zwischen 33 and 55% des gesamten Eismassenverlustes des Grönländischen Eisschildes stammt von der Eismenge, die an der Oberfläche schmilzt und abfließt.

**Die Fläche mit Eisschmelze nahm zwischen 1979 und 2008 um etwa 30% zu.**

Die beiden Extremjahre waren 2007, mit der maximalen Flächenausdehnung und 1992, mit der minimalen Ausdehnung.

Aus Modellrechnungen und Satellitenbeobachtung ergab sich für 2007, dass die Fläche mit oberflächlichem Schmelzen etwa 50% der gesamten Oberfläche des Grönländischen Eisschildes entsprach.

Quelle: NSIDC/Steffen et al. 2008.



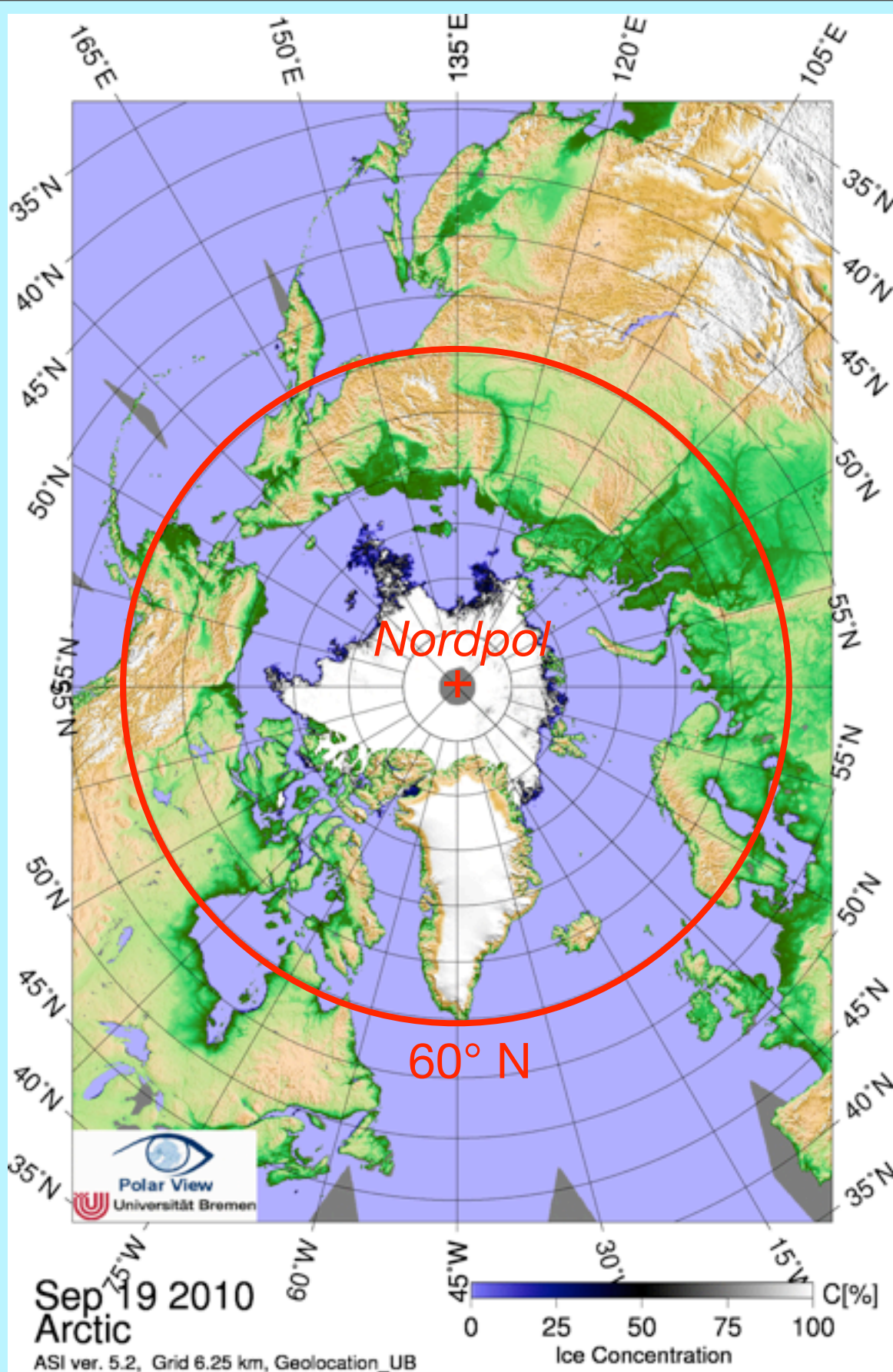
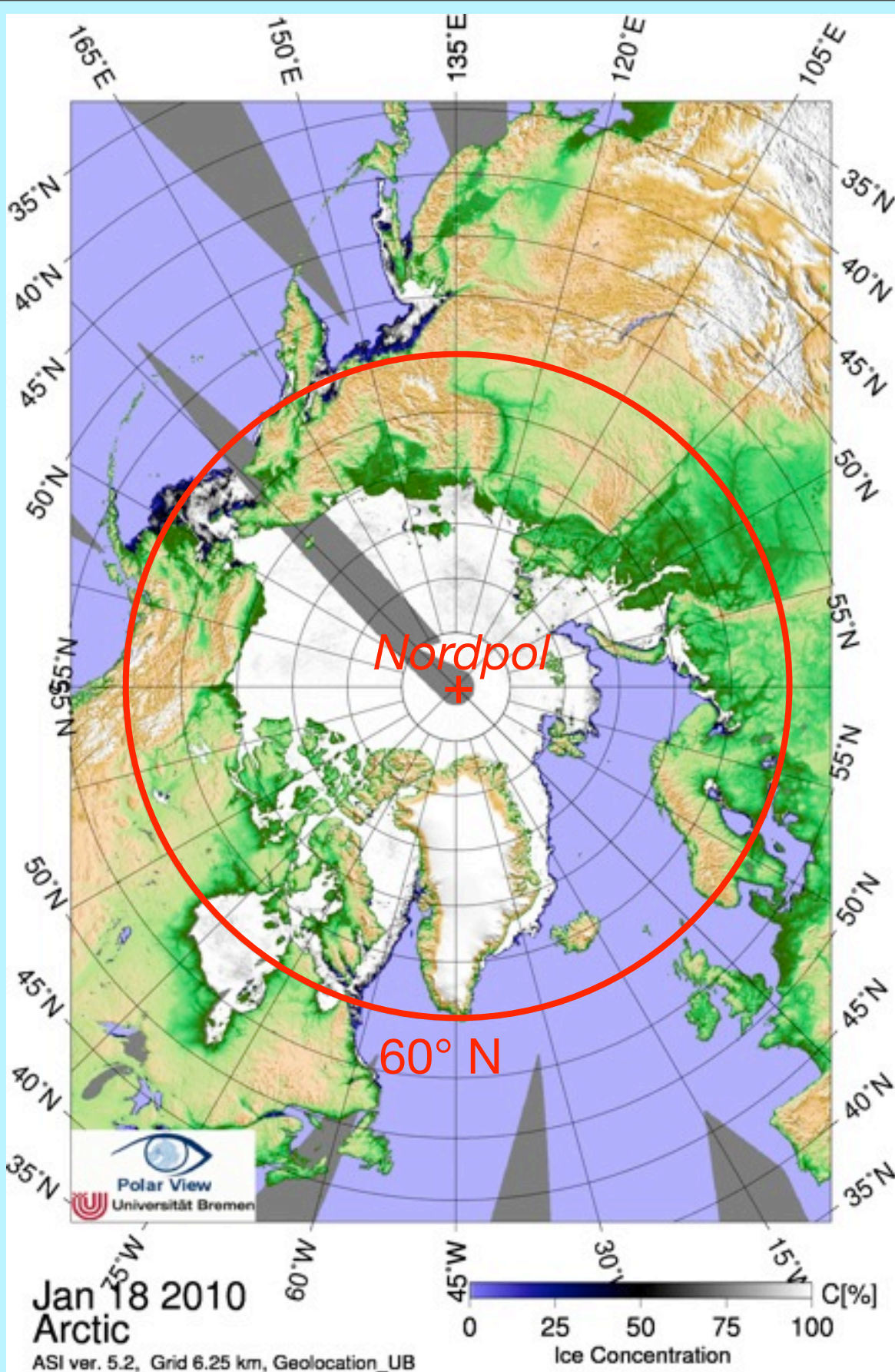
A polar bear is walking across a large, flat sea ice floe. The bear is captured in mid-stride, moving from left to right. A spray of water is being kicked up behind it, suggesting it has just stepped out of a pool of water or is splashing. The ice floe is surrounded by a dark, choppy sea. The overall scene is a classic representation of Arctic wildlife in its natural habitat.

# Arktisches Meereis - Indikator für Klimaveränderung



Arktis - Winter

Arktis - Sommer



Quelle: [www.iup.physik.uni-bremen.de](http://www.iup.physik.uni-bremen.de)



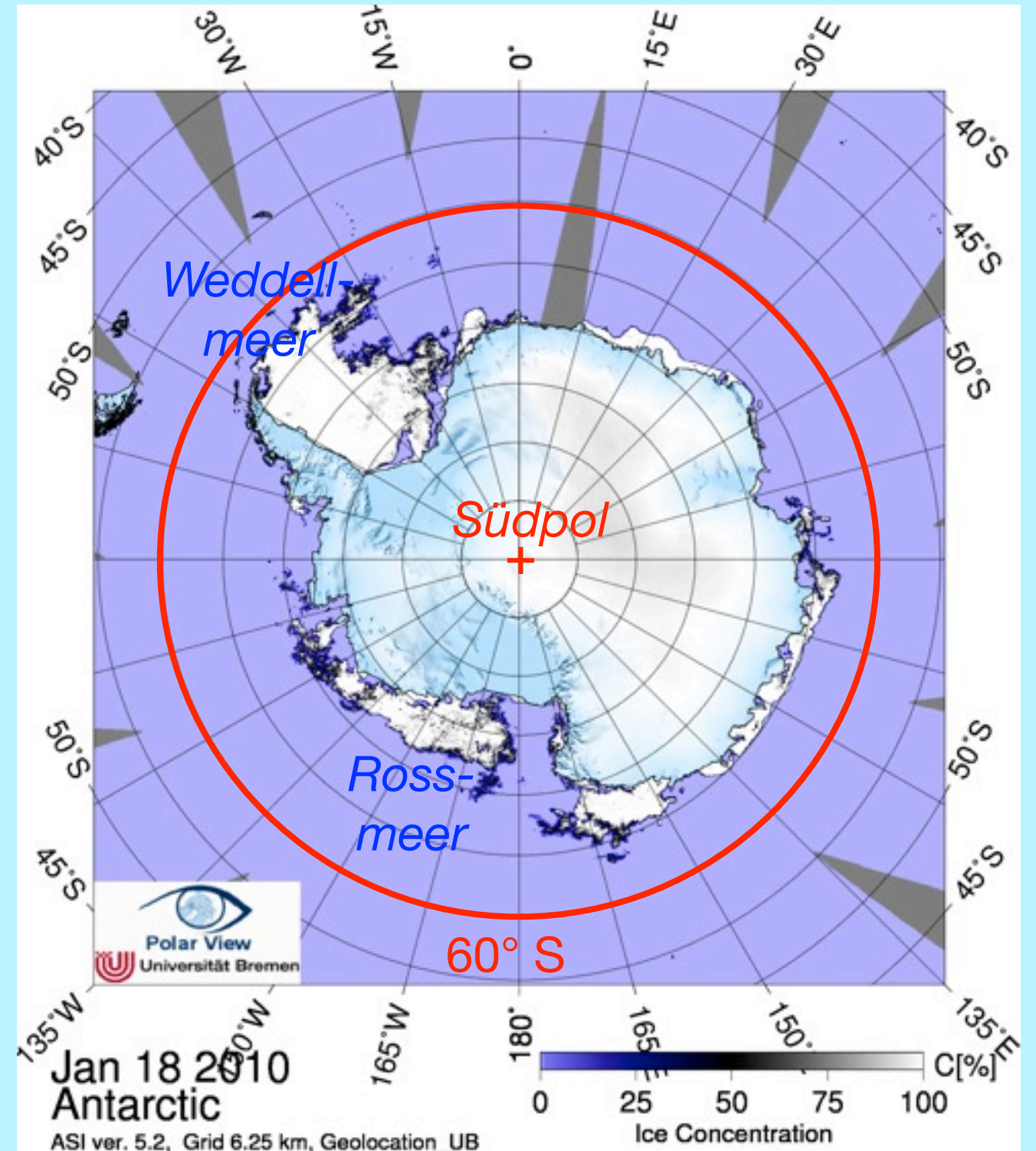
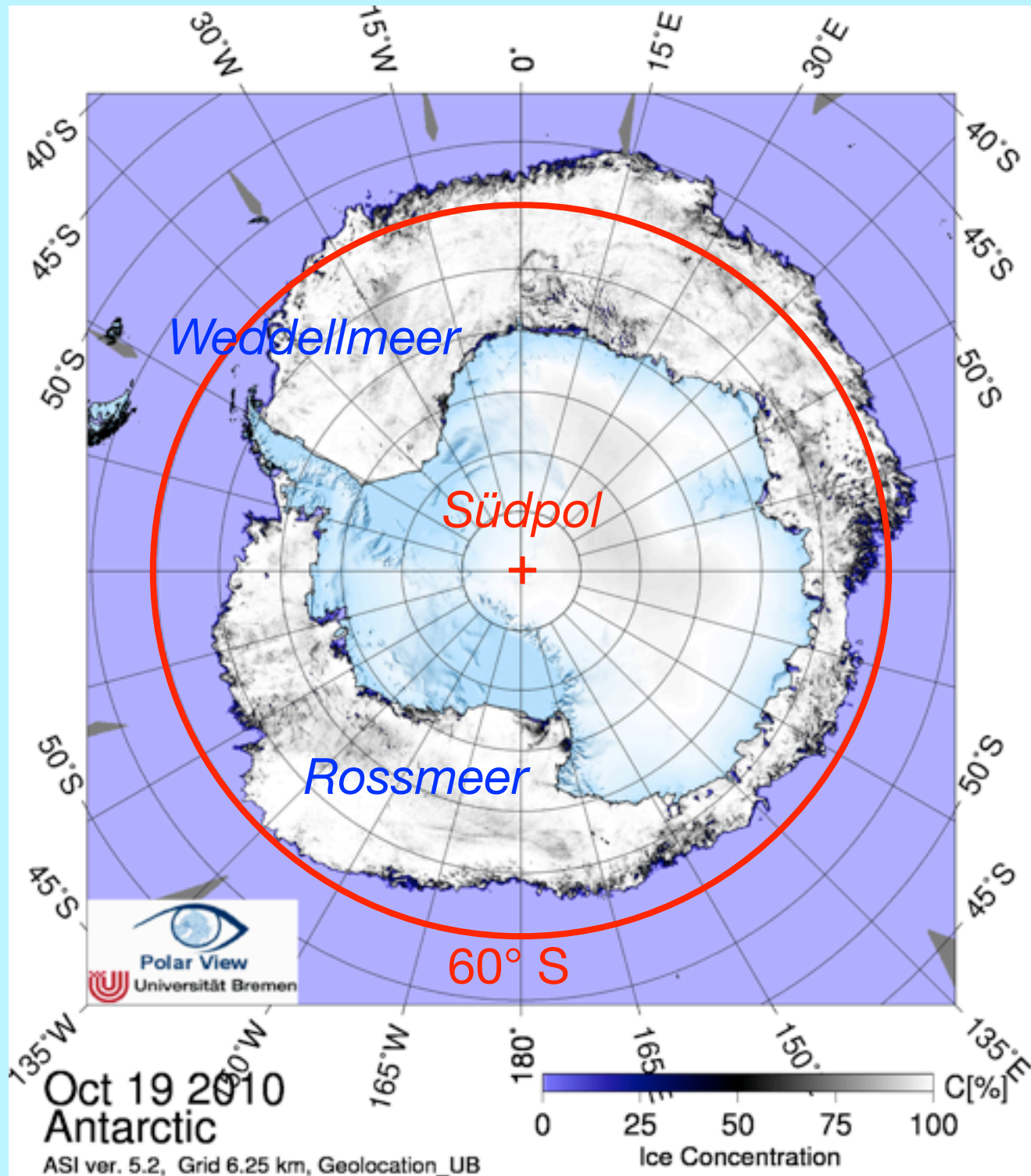
# Antarktisches Meereis

# Meereisausdehnung Antarktis



Antarktis - Winter

Antarktis - Sommer

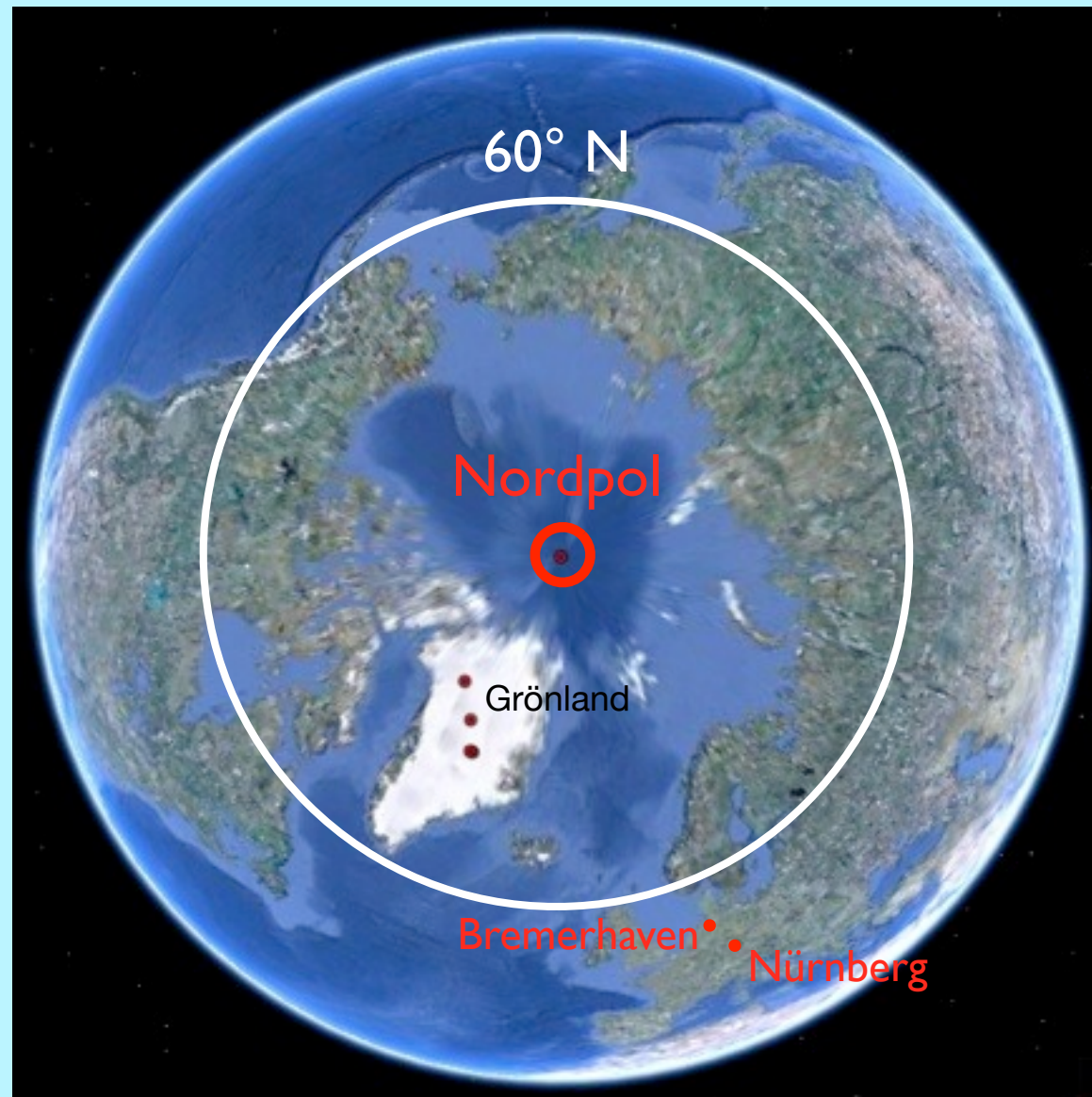


# Die Polarregionen:

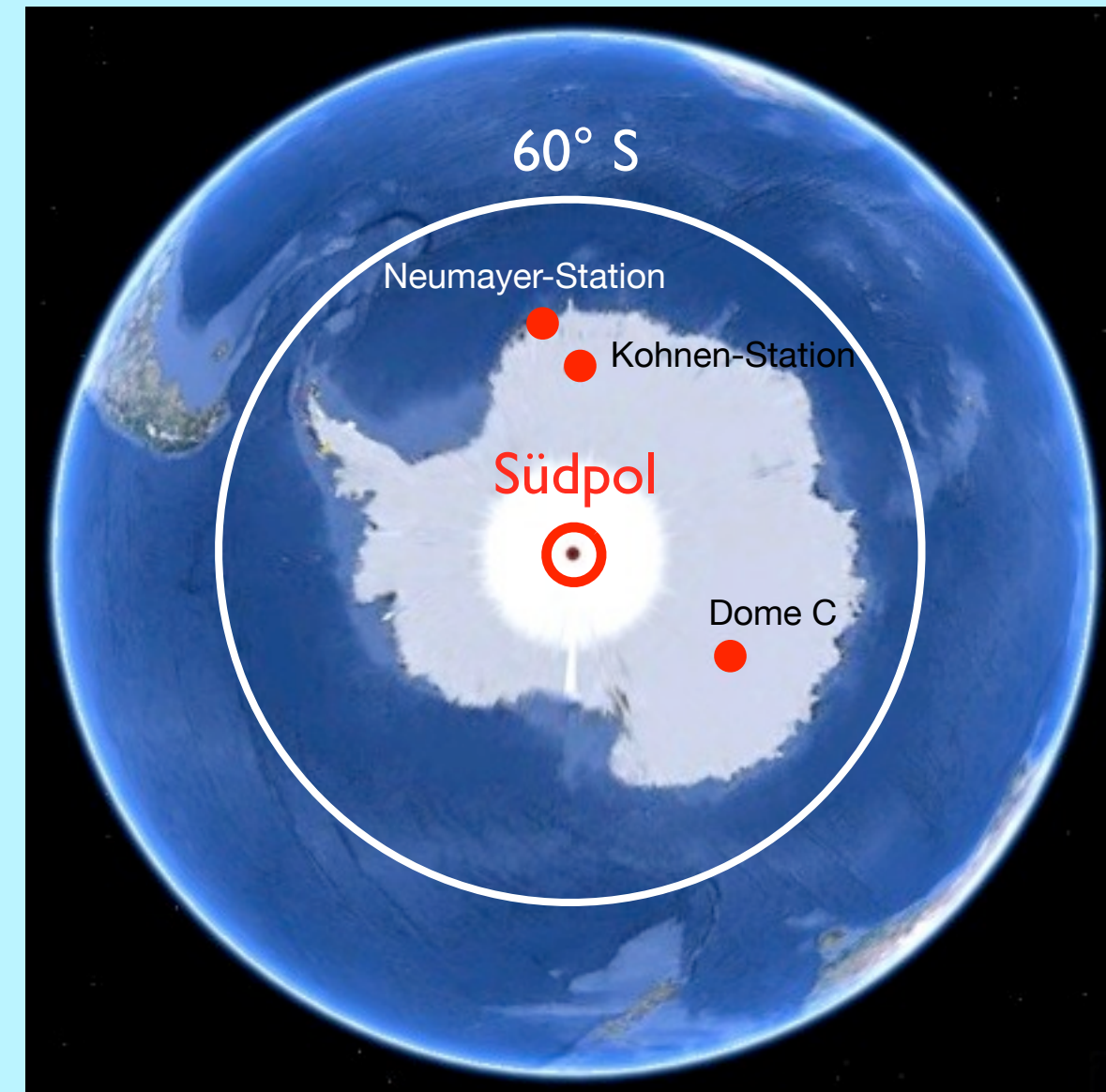
## Arktis

und

## Antarktis



Meer von Land umgeben  
Nordpol liegt im Meer



Land von Meer umgeben  
Südpol liegt auf eisbedecktem  
Kontinent (ca. 2830 m ü.M.)

# Die Polarregionen:

Arktis

und

Antarktis



Meer von Land umgeben  
Nordpol liegt im Meer



Land von Meer umgeben  
Südpol liegt auf eisbedecktem  
Kontinent (ca. 2830 m ü.M.)

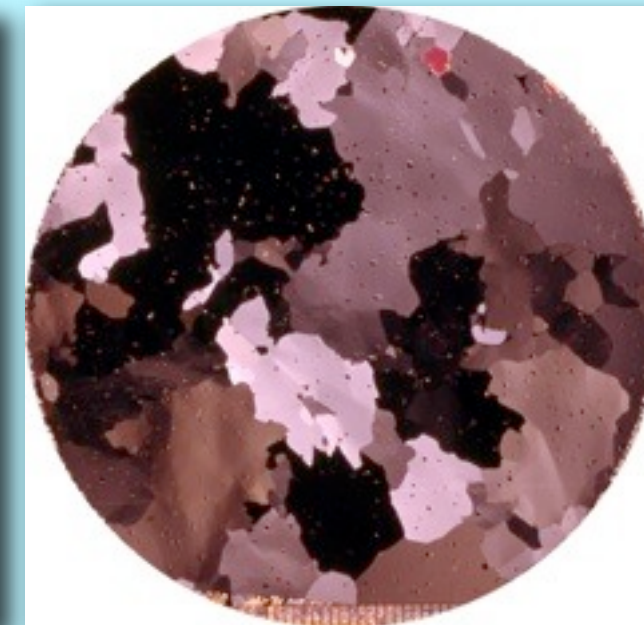
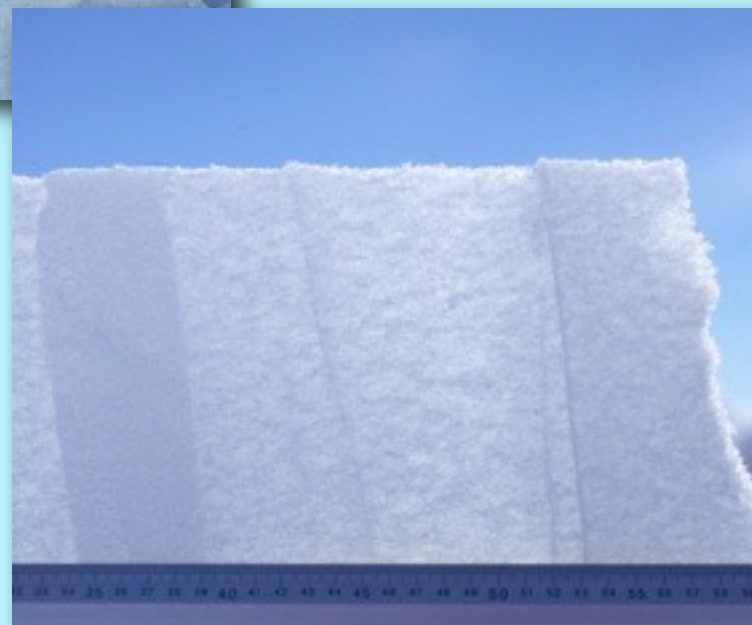
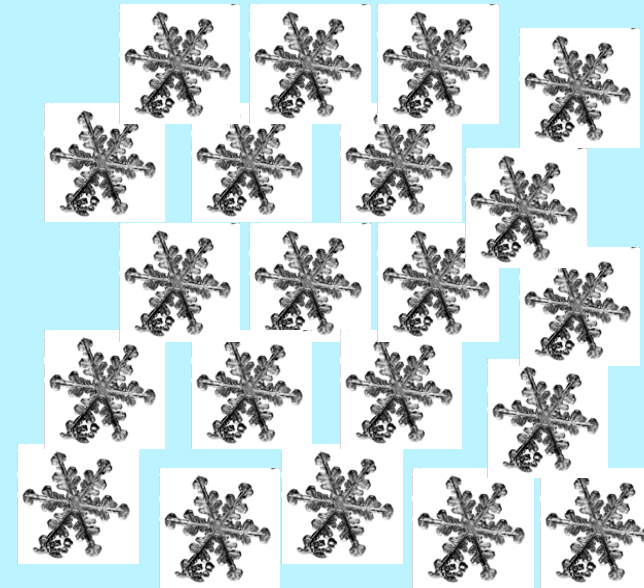
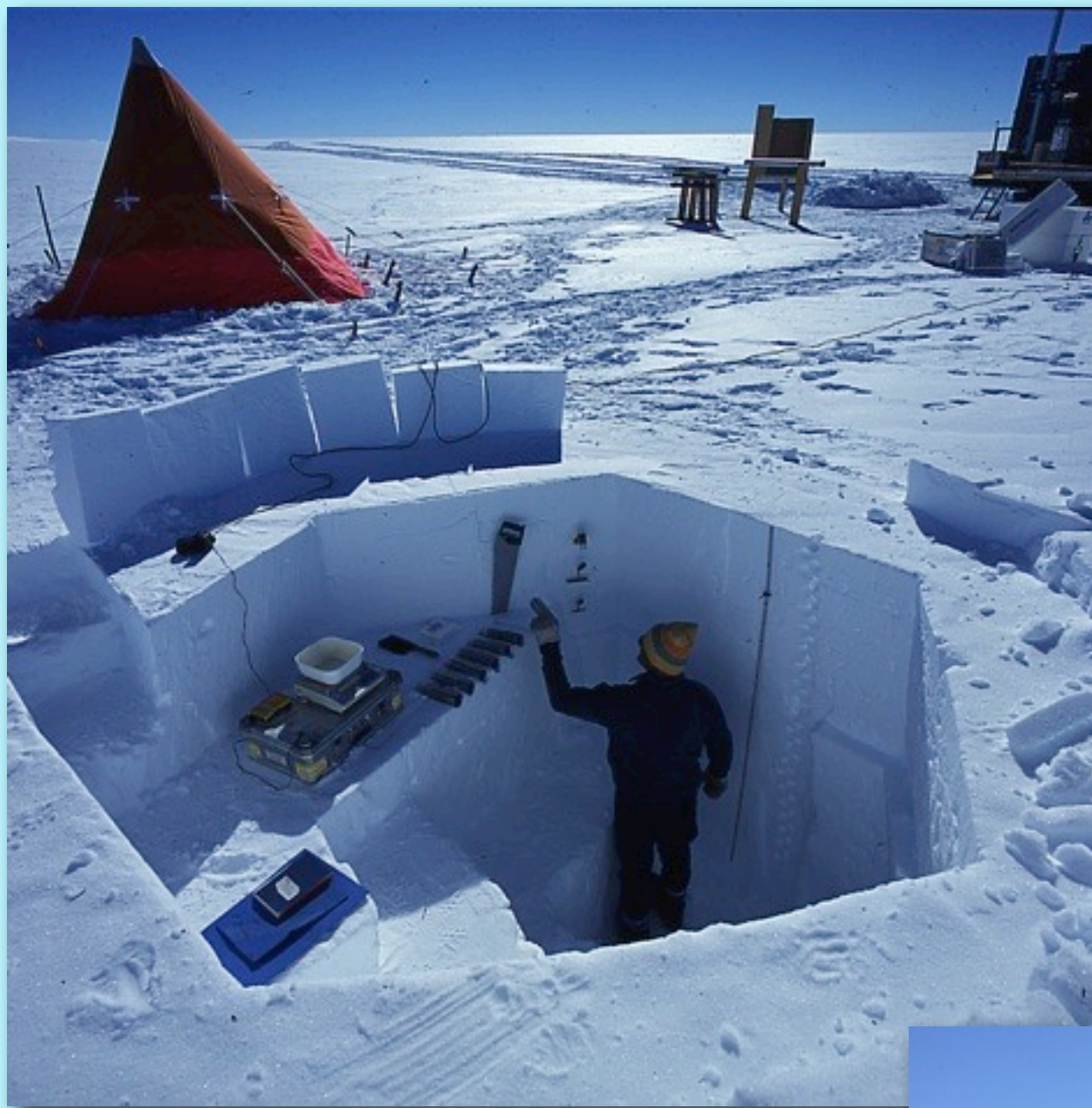
Google Earth, 2010



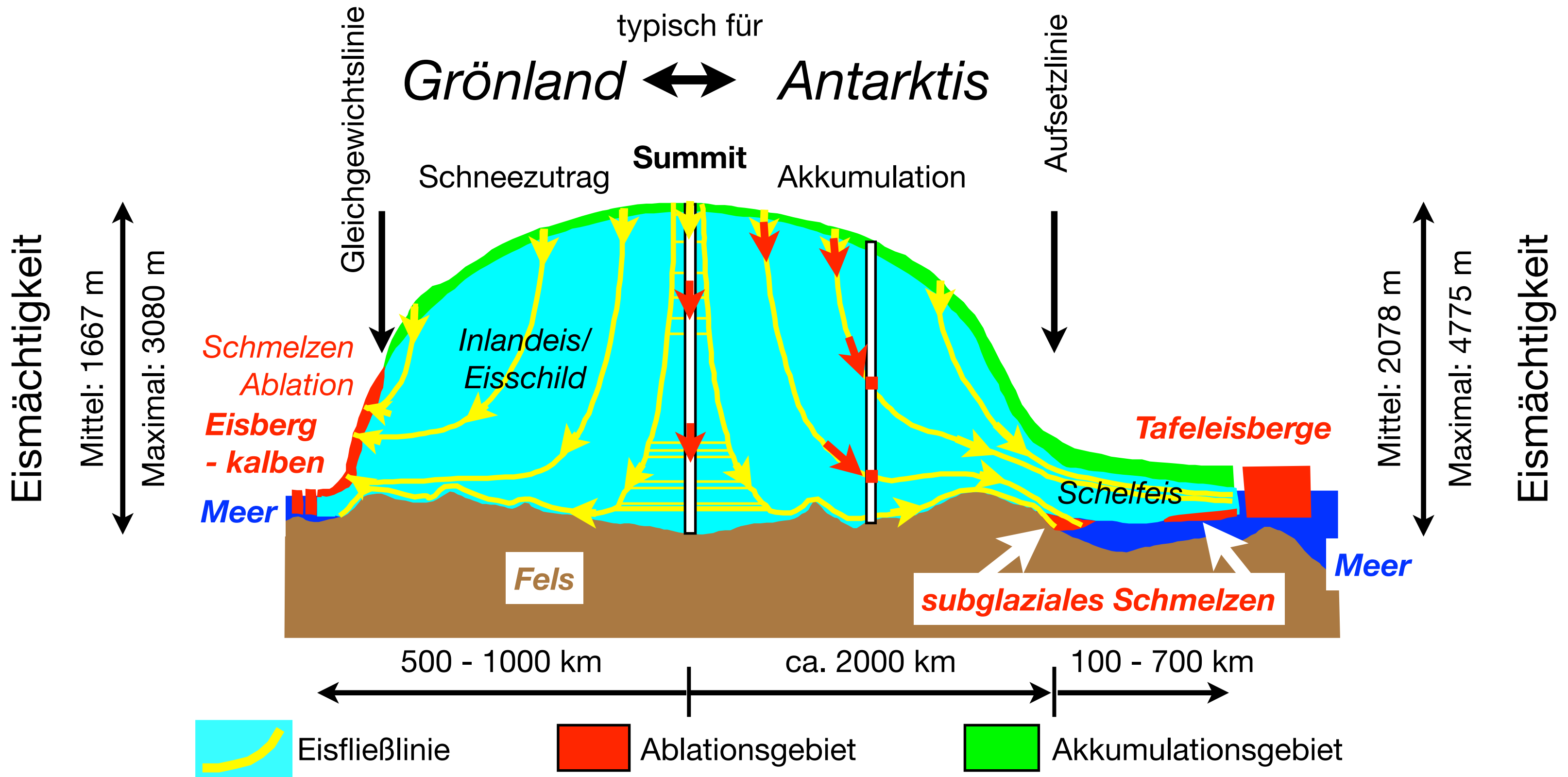
# Wo und wie bohrt man Eiskerne ?



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



# Schematischer Querschnitt durch einen Eisschild



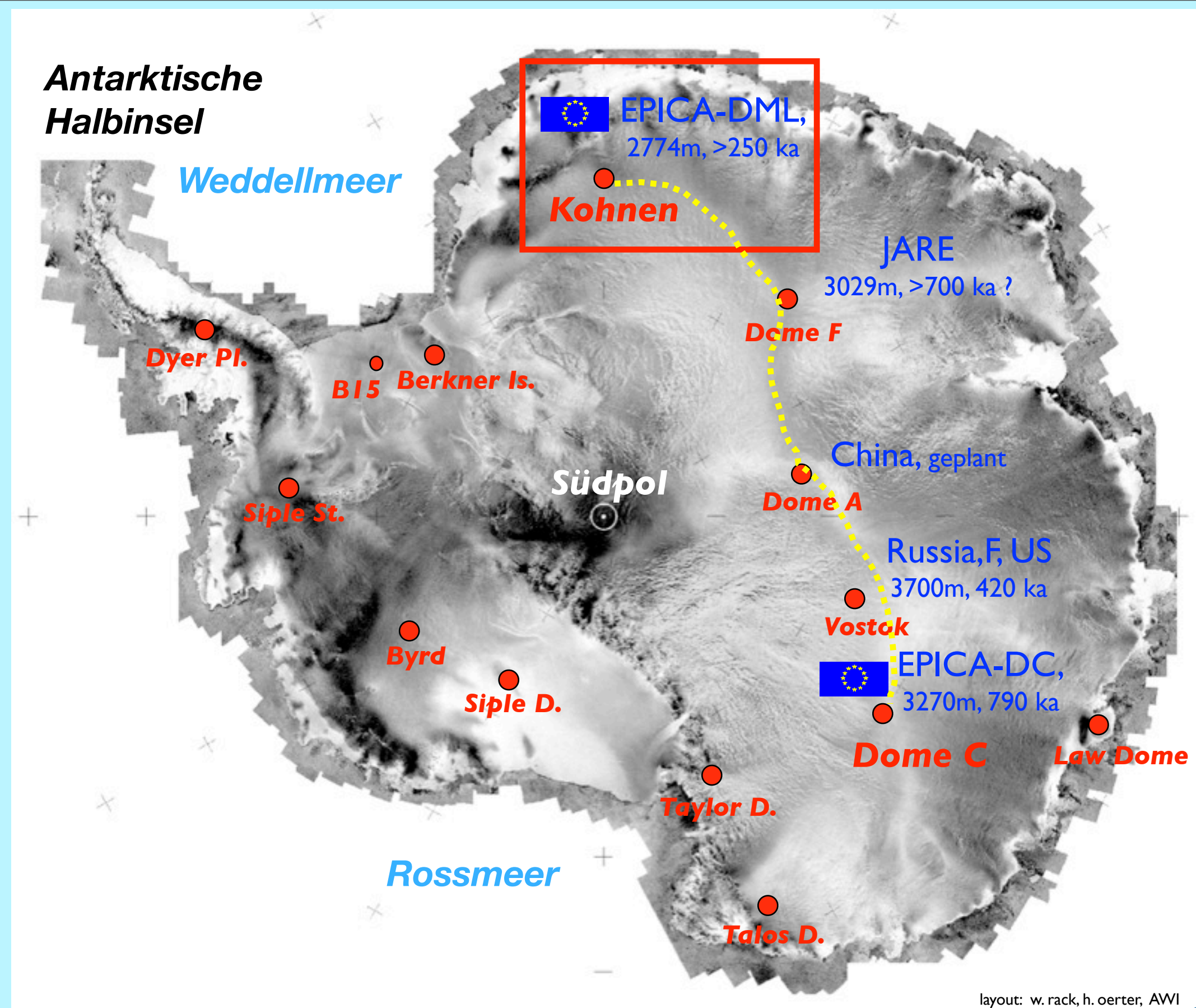
grafik: h. oerter, 2009

# Tiefe Eisbohrkerne in der Antarktis

European Project for Ice Core Drilling in Antarctica  
(EPICA)



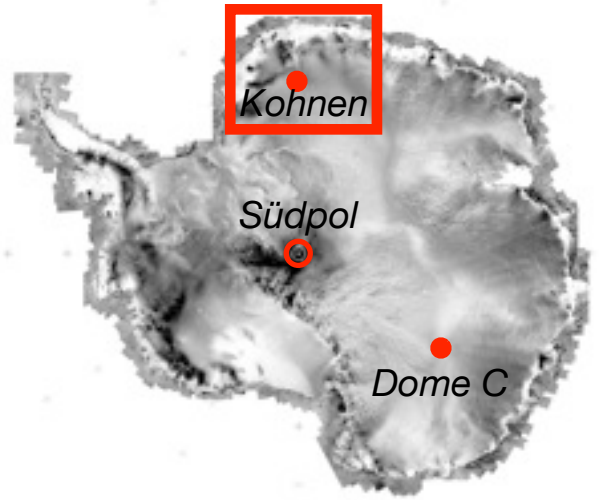
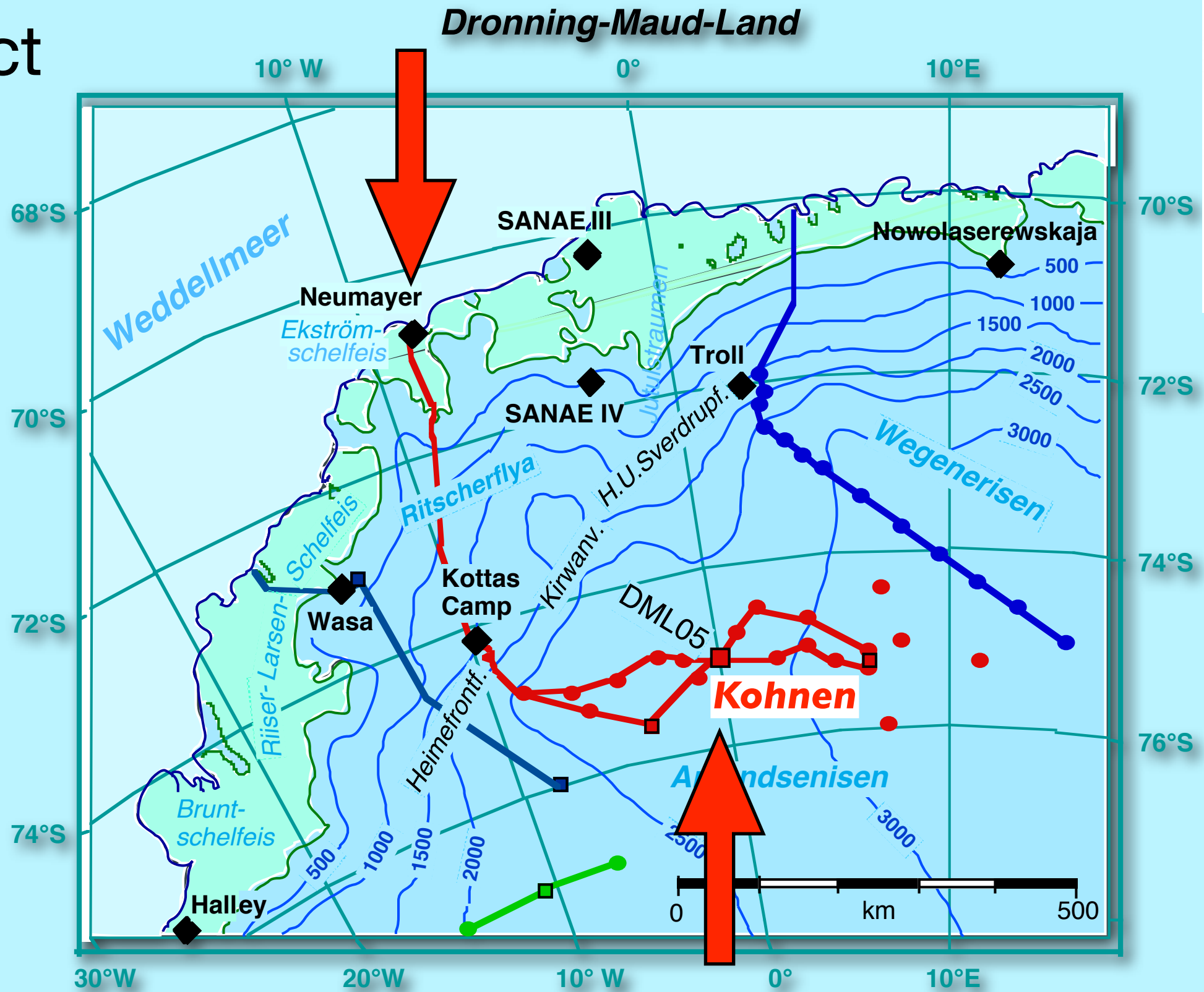
Haupteissscheide der Ostantarktis



layout: w. rack, h. oerter, AWI



# European Project for Ice Core Drilling in Antarctica (EPICA)



Meer
  Schelfeis
  Inlandeis, gegründetes Eis
  2000 Höhenlinie
  Aufsetzlinie

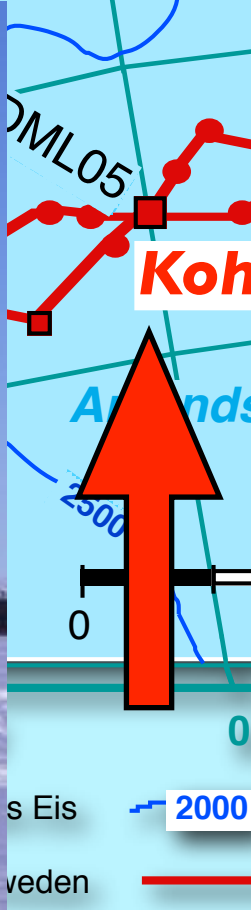
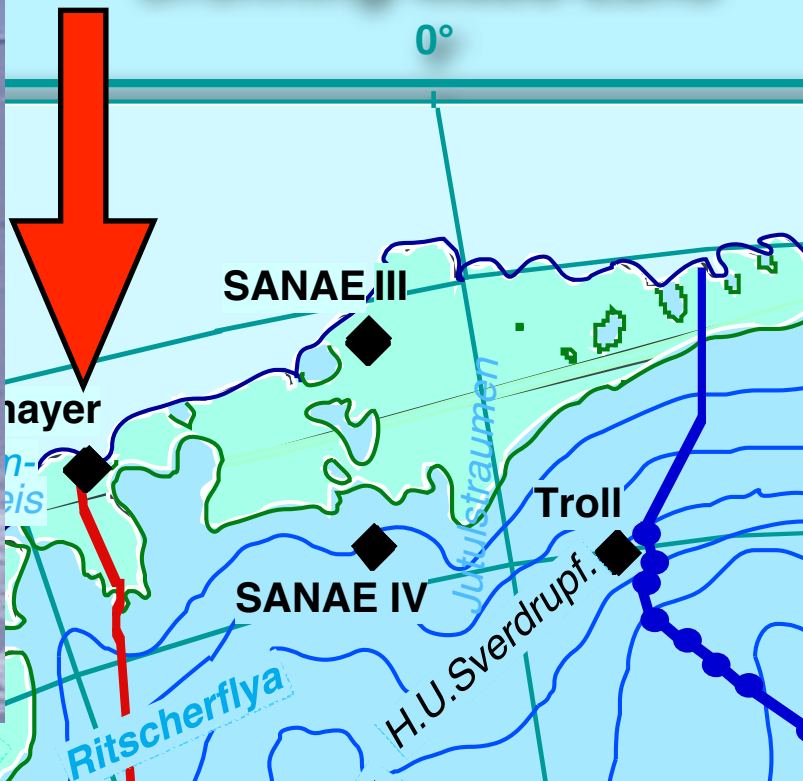
**Traversenrouten:**
 Großbritannien
  Schweden
  Deutschland
  Norwegen

# Luftaufnahme der Neumayer-Station III, im Hintergrund die Atka-Bucht.



Foto: Ude Cieluch, Alfred-Wegener-Institut, 2009

# Dronning-Maud-Land



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

Zum Bohren

**Kohnen-Station**  
75°S, 0 °E, 2882 m

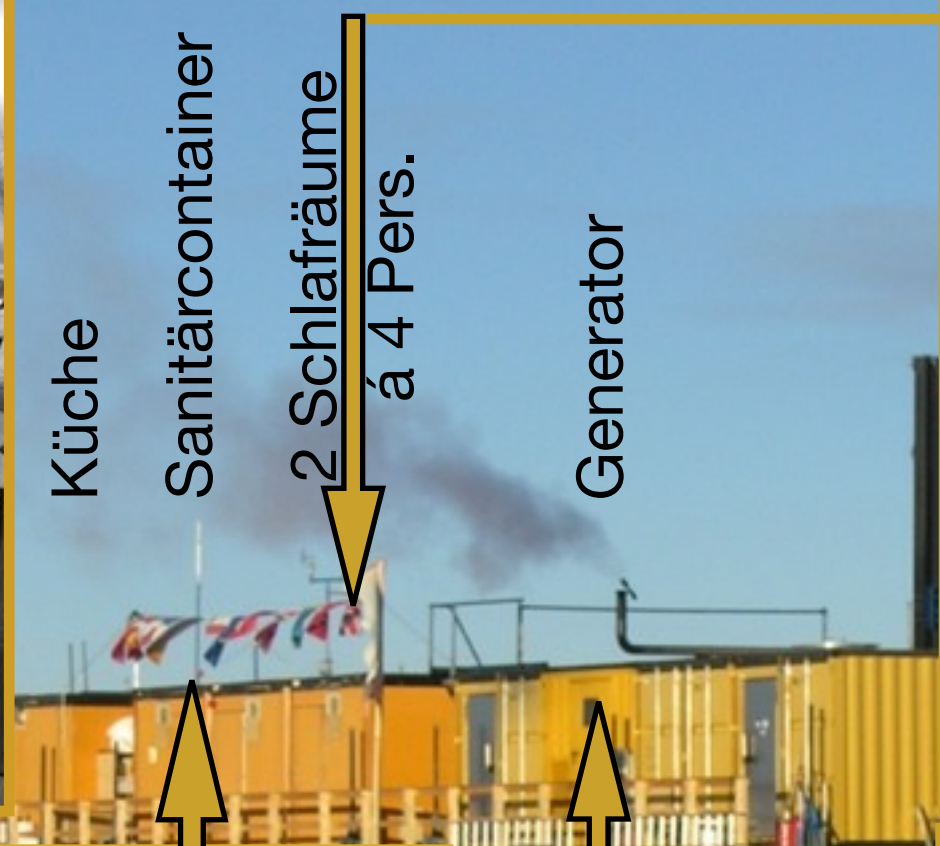


Küche

Sanitärcontainer

2 Schlafräume  
à 4 Pers.

Generator



# Kohnen Station

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

Bohrzeitraum:  
2001-2006

Mittlere Jahres-  
temperatur: -44.6 °C

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

Eis-Fließgeschwindigkeit:  
0,756 m/a

Eisdicke:  
2782 ±10m

Länge Eiskern:  
2774,1 m



foto: hans oerter, 2006

Antitorque



innen: Chips-Kammer



Motor & Elektronik



Hüllrohr



Kernrohr & Bohrkrone



Bohrturm

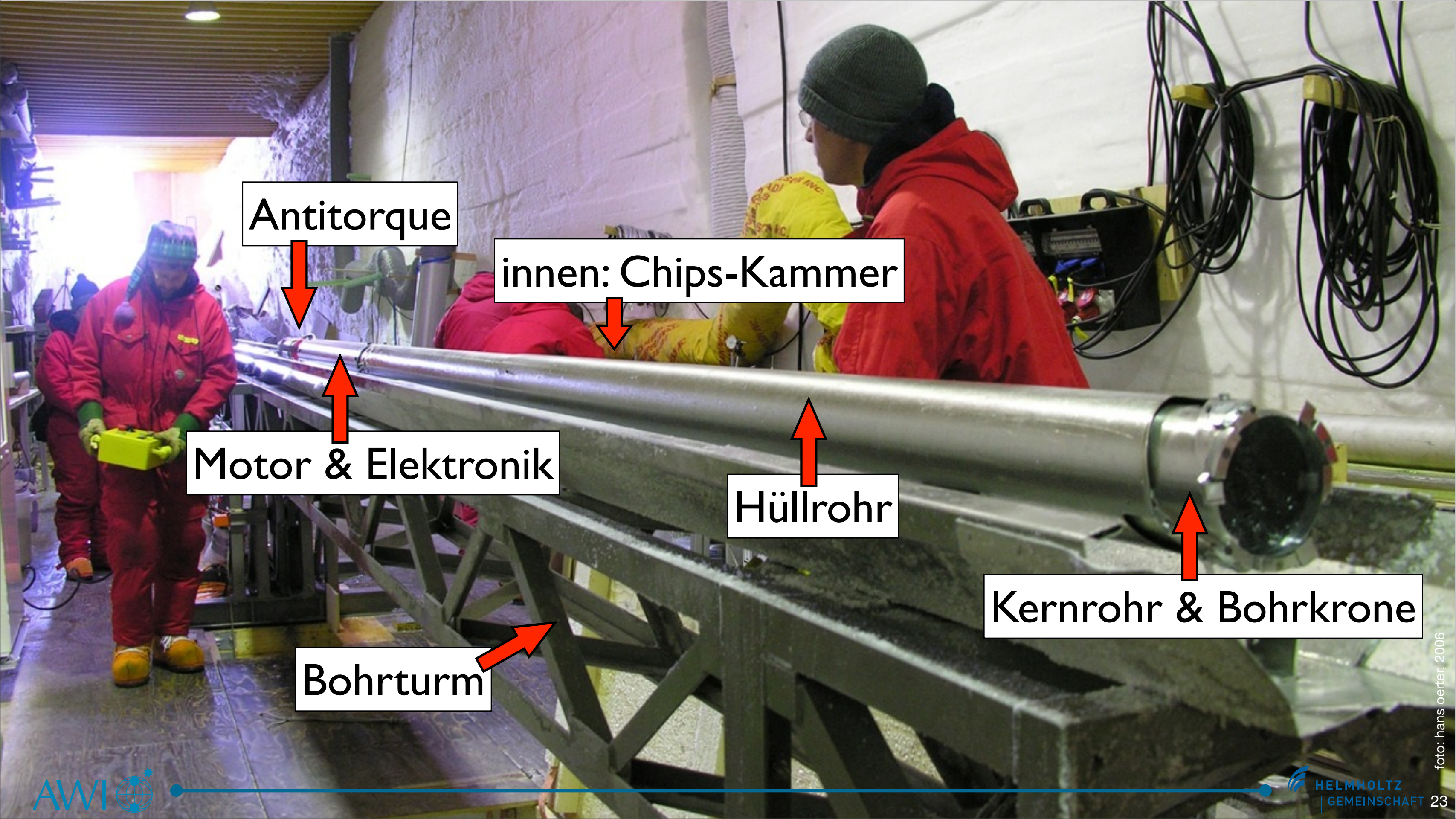
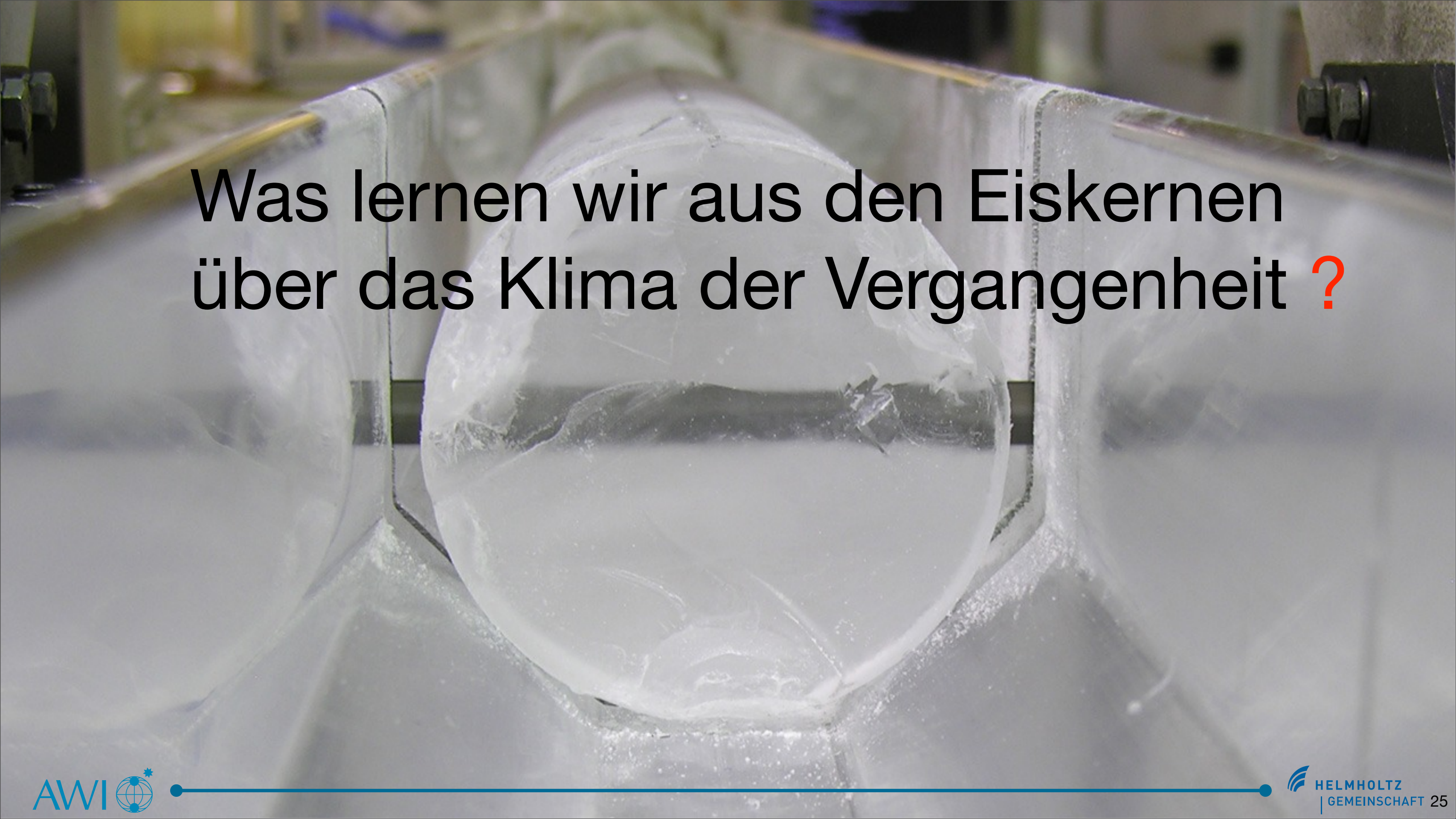


foto: hans oerter, 2006



foto: hans oerter, 2006

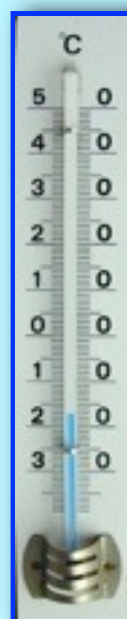


A close-up photograph of a cylindrical ice core sample held within a metal frame. The ice core shows distinct horizontal layers, indicating different time periods. The background is slightly blurred, showing more of the metal frame and some mechanical parts.

Was lernen wir aus den Eiskernen  
über das Klima der Vergangenheit ?

# Das Klima-Archiv Eis speichert Informationen zu:

## Lufttemperatur



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

## Gasgehalt in der Atmosphäre

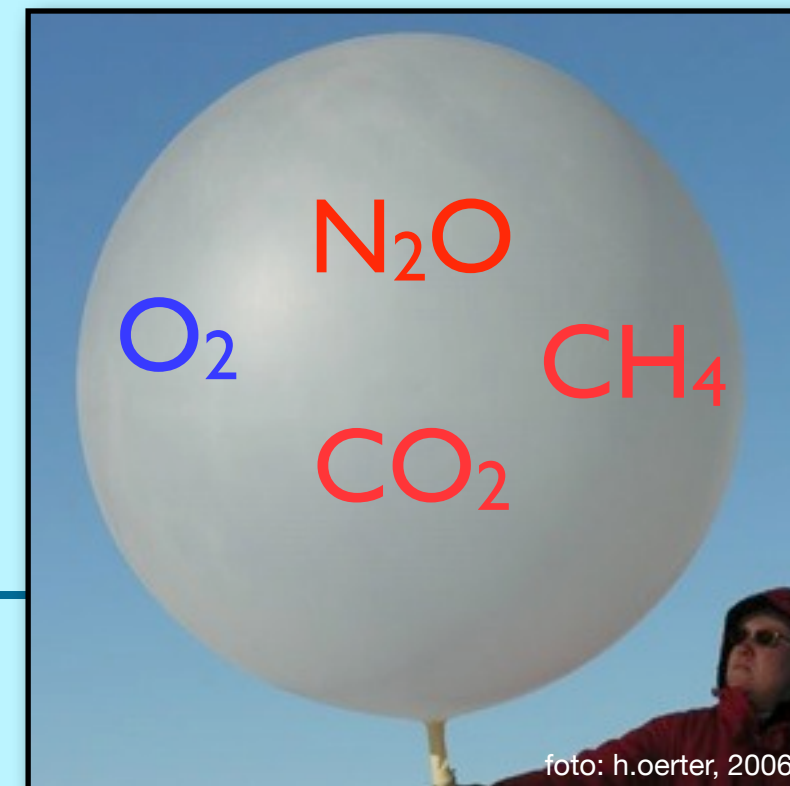


foto: h.oerter, 2006

## Aerosole

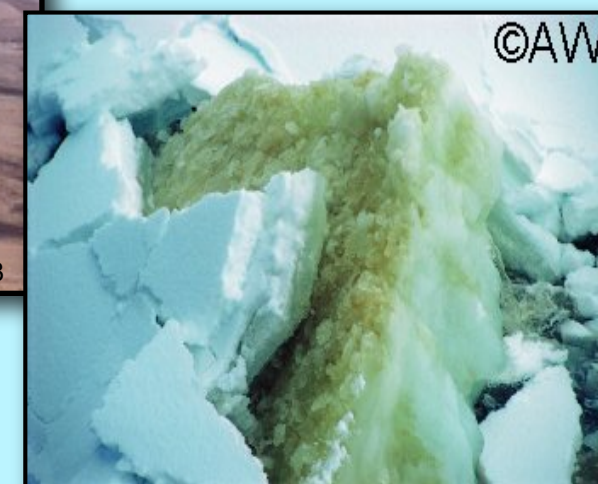


Mt. Pinatubo 1991

foto: NOAA



foto: h. oerter, 1973



©AWI

# Das Eislabor am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven

Horizontalsäge

Line-Scan

Längs- und Querschnitte

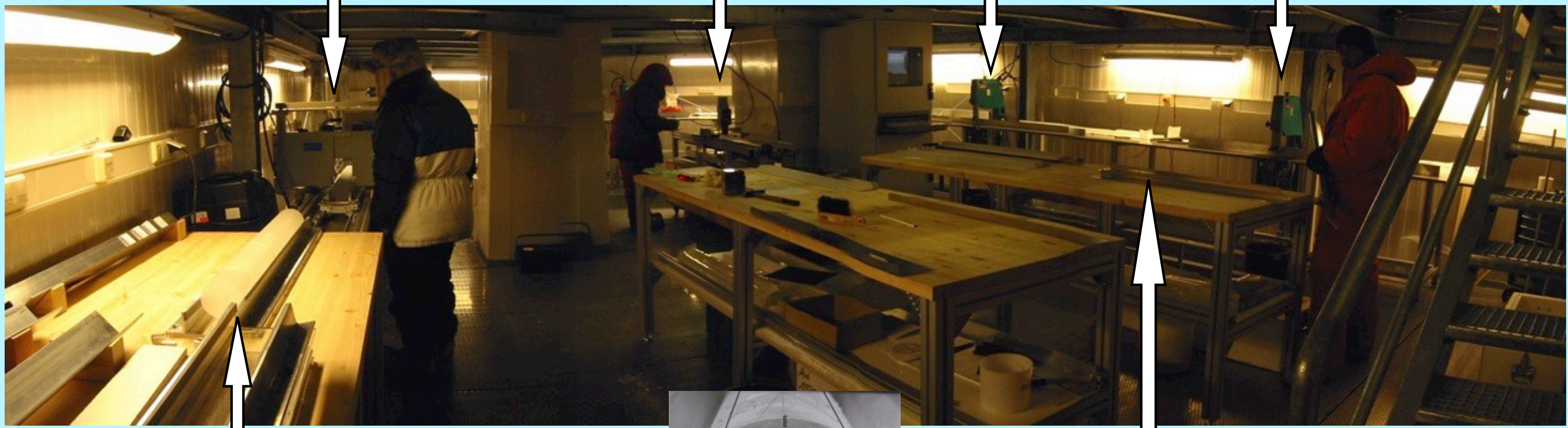
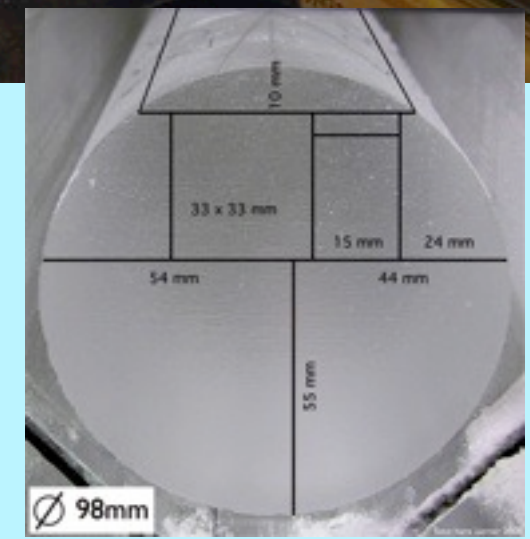


foto: hans oerter, 2002

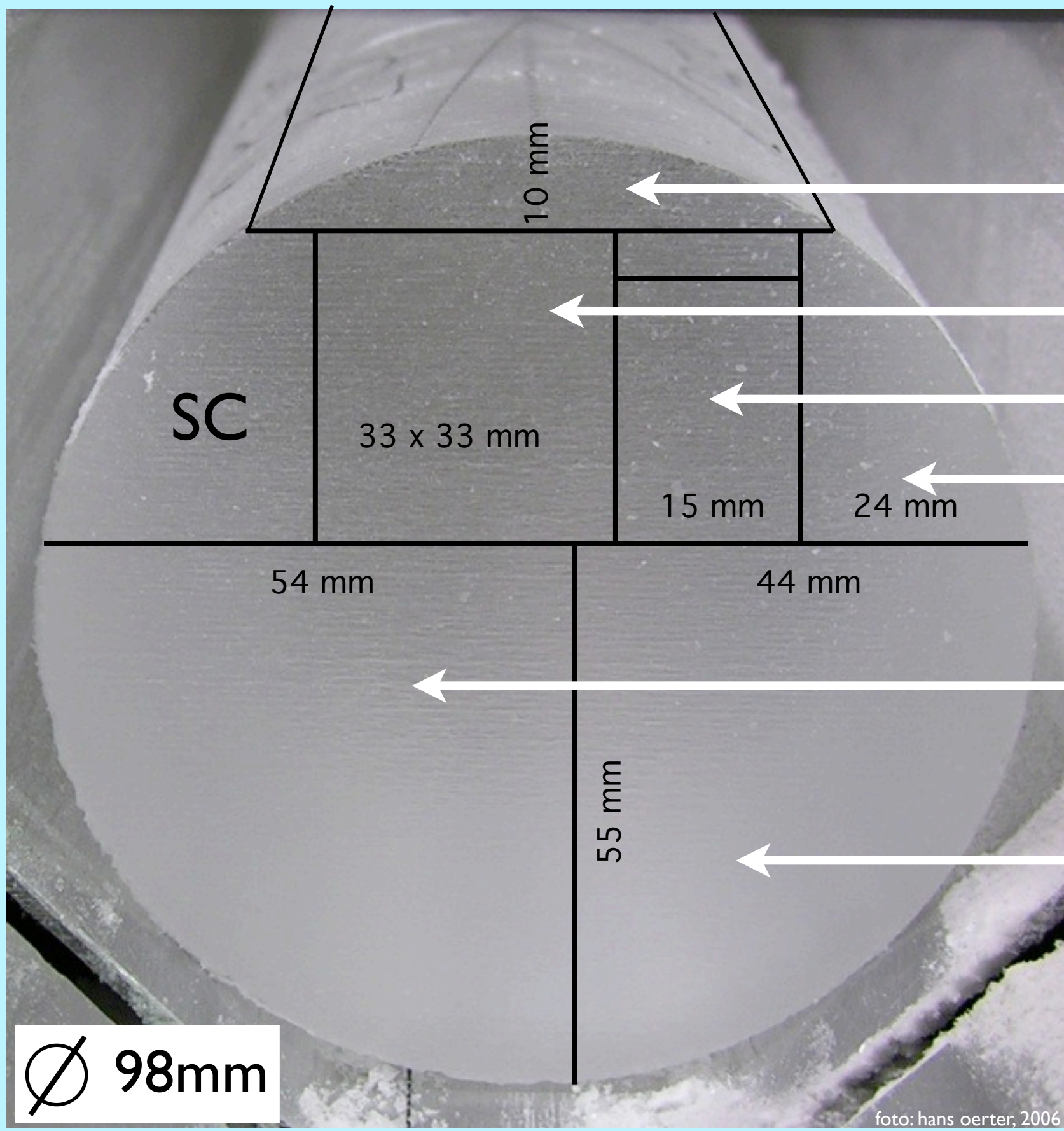
Auspacken des Kerns



Vorbereitung für Line-Scan

im Eislabor





**Dünnschnitte**

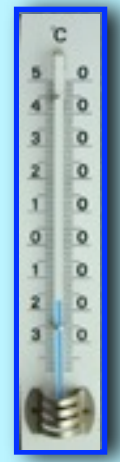
**CFA**

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

$^{10}\text{Be}$

**Archiv**

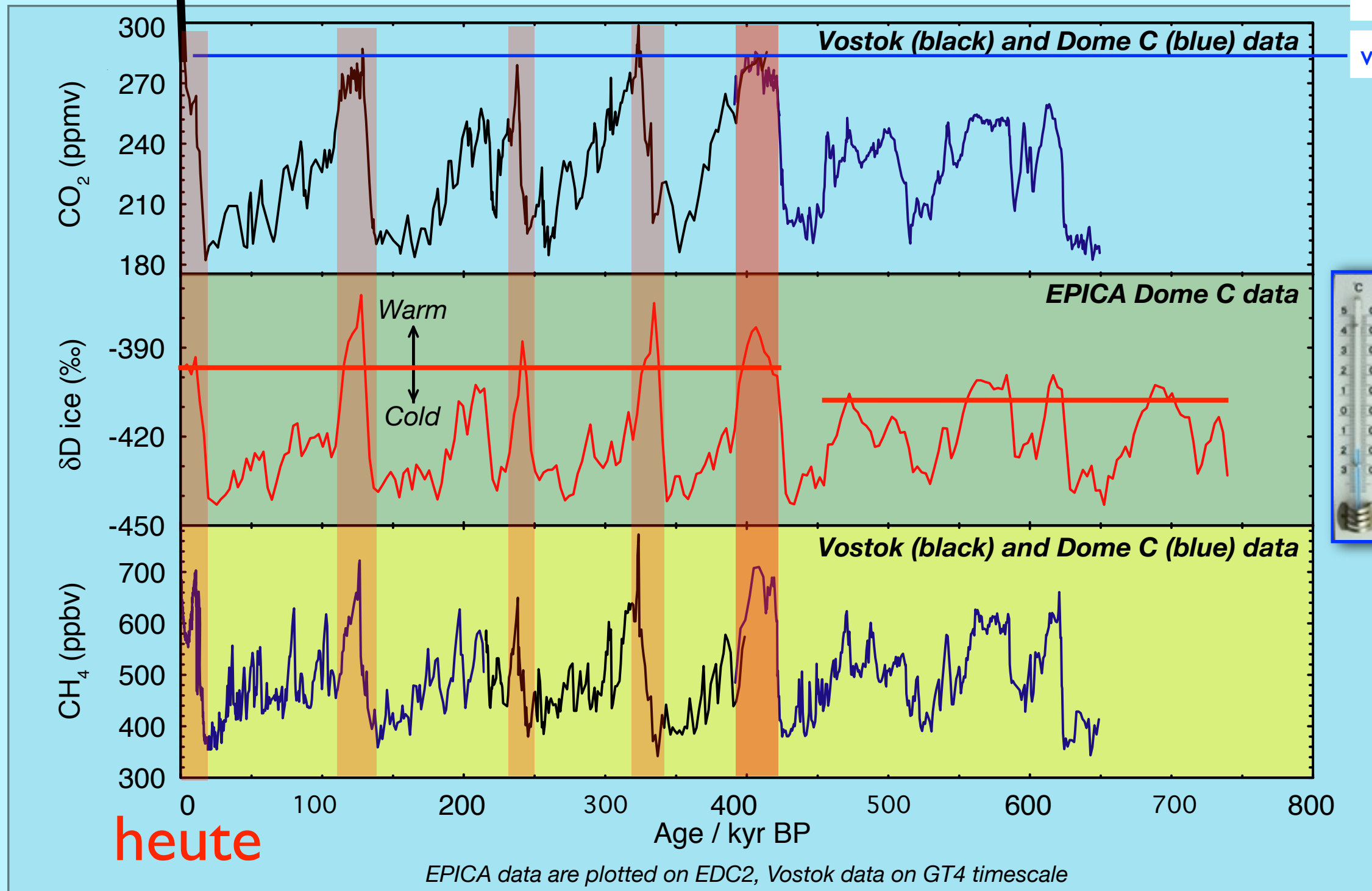
**Gase, Staub**



Ø 98mm

foto: hans oerter, 2006

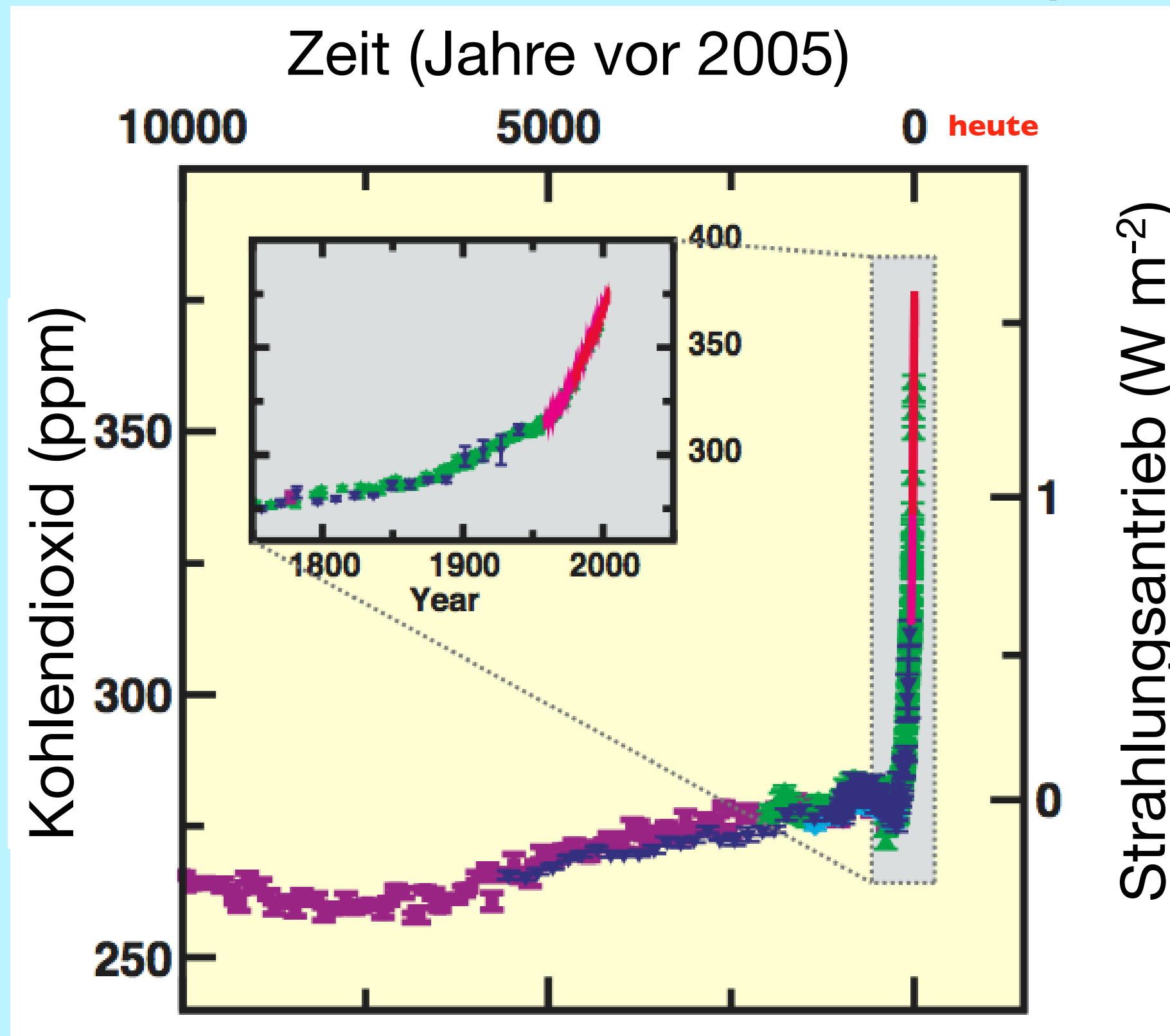
# Antarctic ice core records: Vostok and EPICA CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and δD



# Was erwartet uns in der Zukunft ?



# Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre

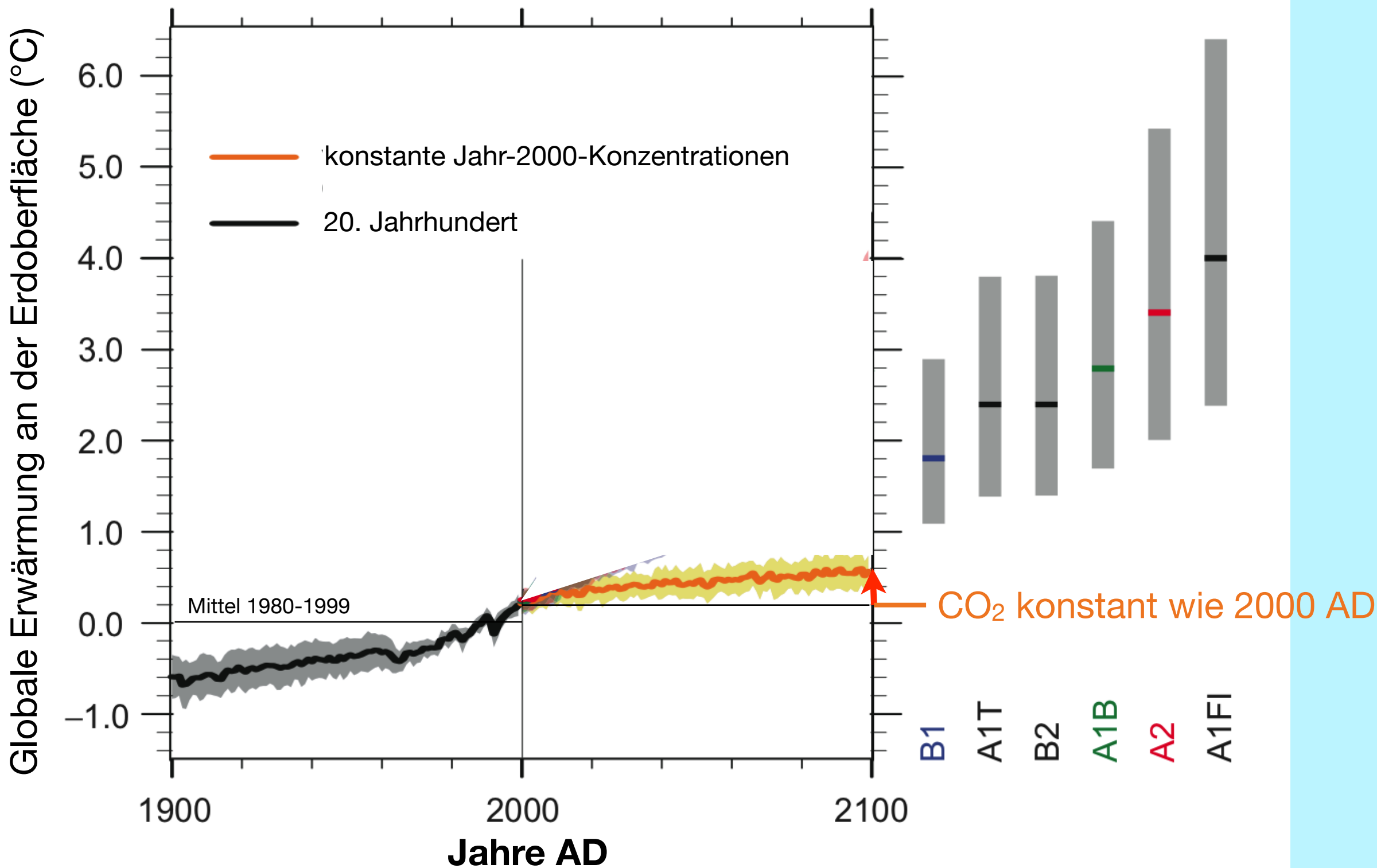


Quelle: IPCC, Climate Change 2007: The Physical Basis, Summary for Policy Makers ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch))

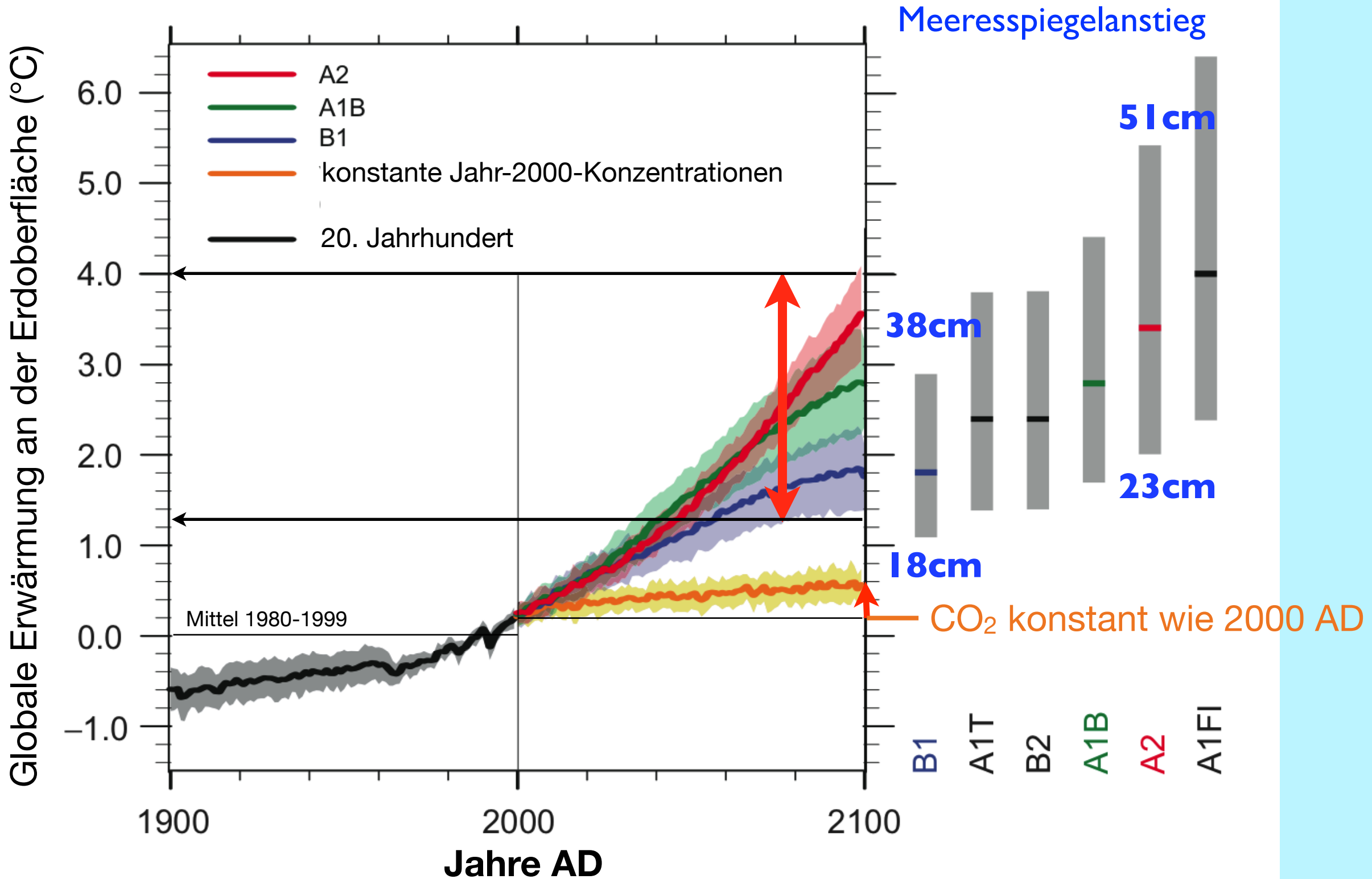


Quelle: IPCC, Climate Change 2007: The Physical Basis, Summary for Policy Makers (www.ipcc.ch)

# Informationen aus dem IPCC- Report 2007: Erhöhung der mittleren globalen Lufttemperatur



# Informationen aus dem IPCC- Report 2007: Erhöhung der mittleren globalen Lufttemperatur

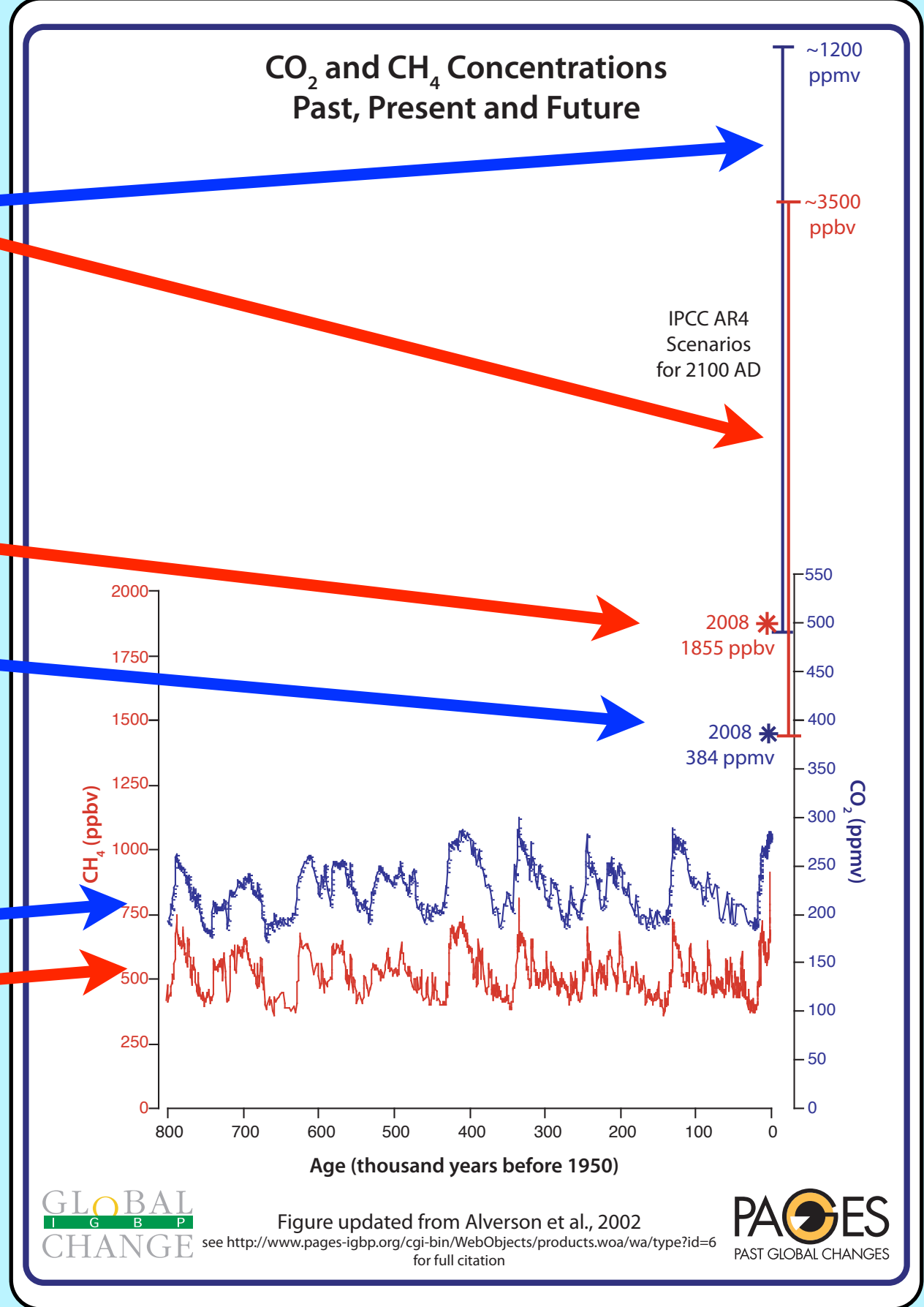


Quelle: IPCC, Climate Change 2007: The Physical Basis, Summary for Policy Makers (www.ipcc.ch)

Mögliche Konzentrationen in der Zukunft nach den IPCC AR4 Rechnungen für das Jahr 2100.

Vergleich mit atmosphärischen Werten von 2008 AD

Änderungen des **Kohlendioxid- (CO<sub>2</sub>)** und **Methangehalts (CH<sub>4</sub>)** während der vergangenen 800 000 Jahre, gemessen an Antarktischen Eiskernen.



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

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

CH<sub>4</sub> data:

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

Current atmospheric concentrations:

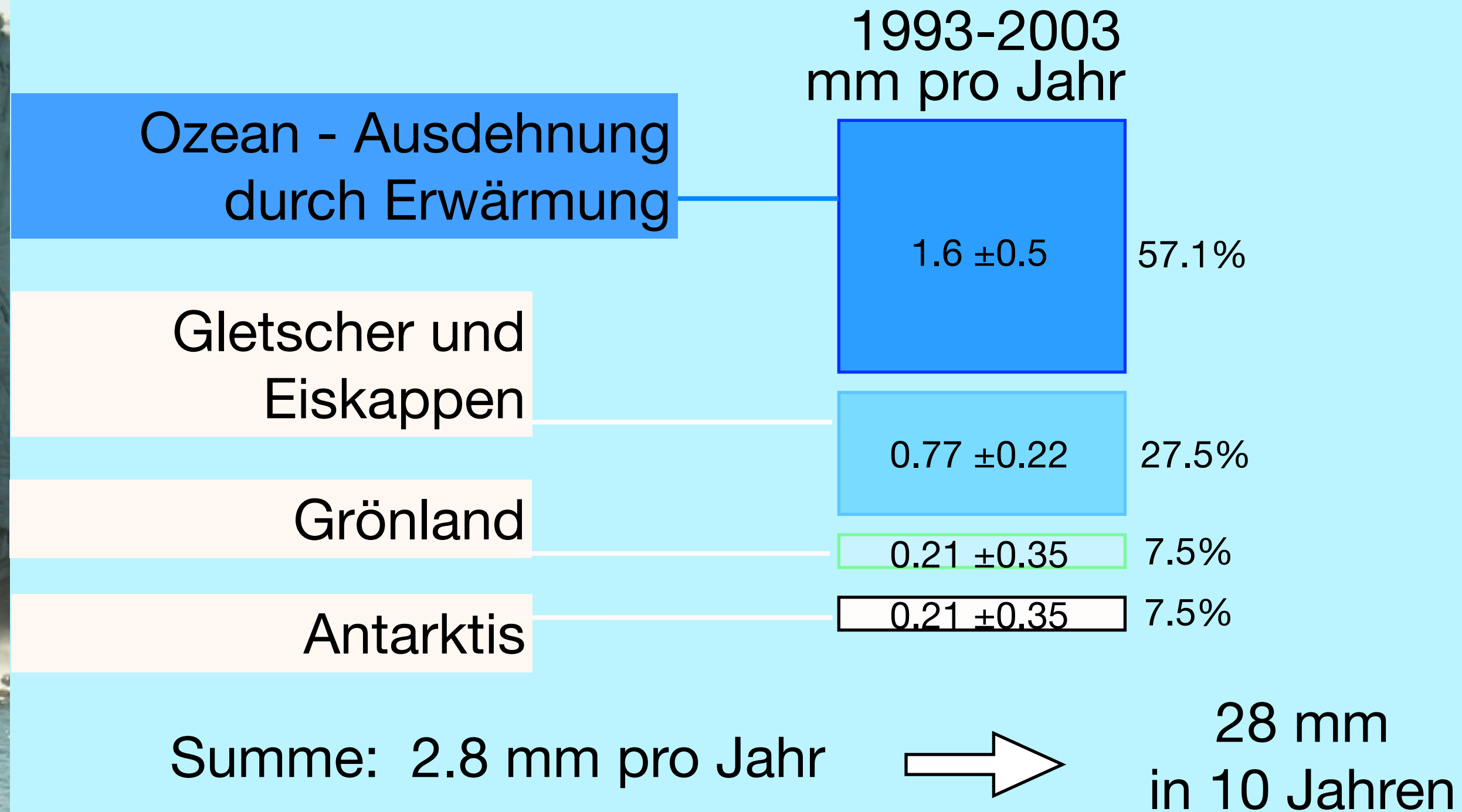
the Carbon Dioxide Information Analysis Center (<http://cdiac.ornl.gov>).

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

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

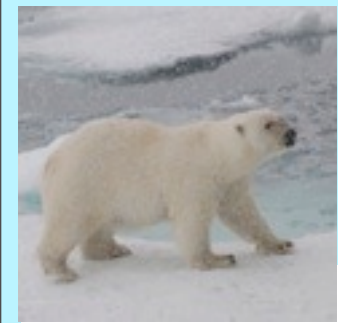
Quelle: <http://www.pages-igbp.org>

# Informationen aus dem IPCC- Report 2007: Was verursacht Meeresspiegelanstieg ?



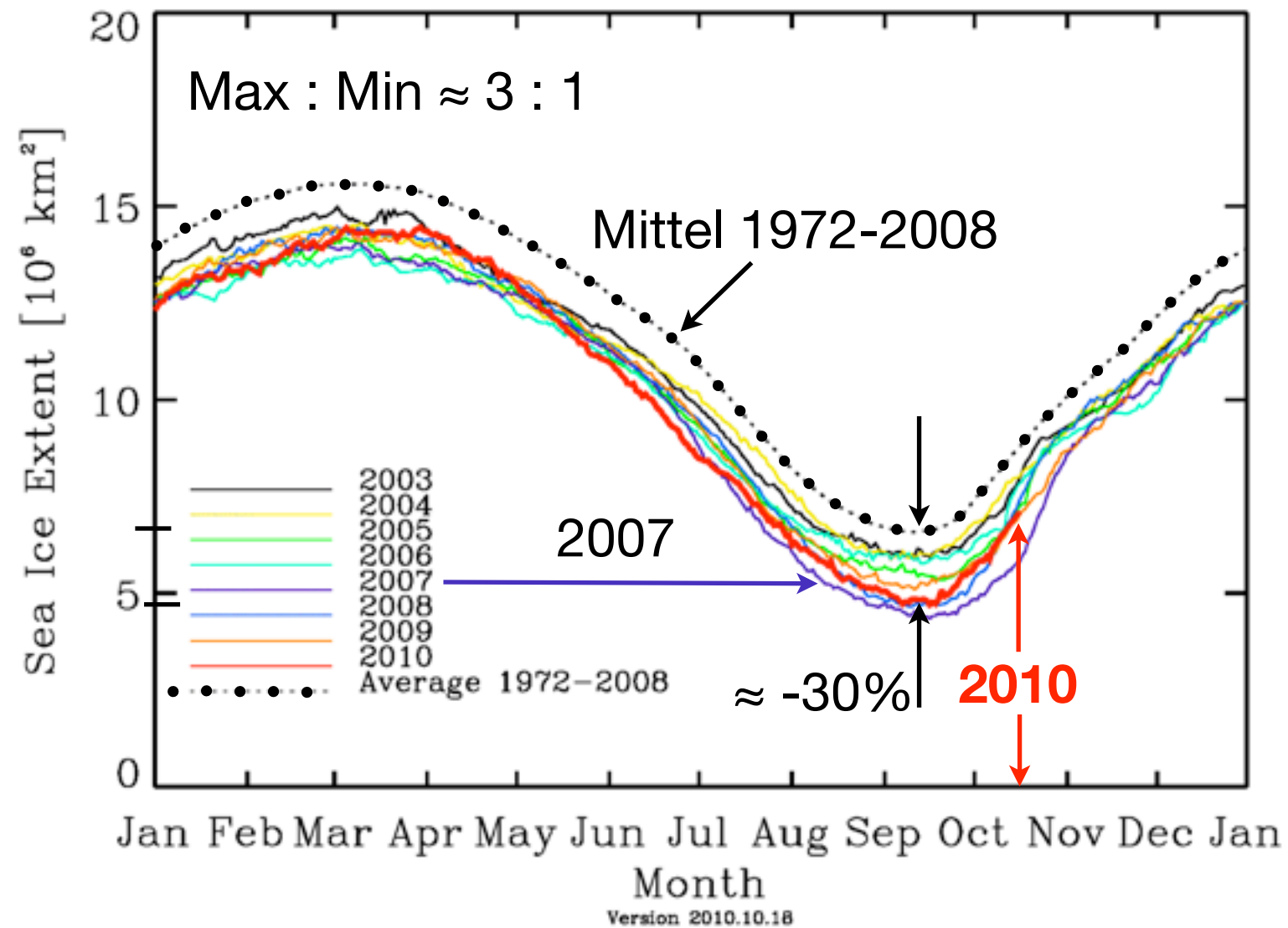
Quelle: IPCC, Climate Change 2007: The Physical Basis, Summary for Policy Makers ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch))

# Jahreszeitliche Veränderung der Meereisbedeckung



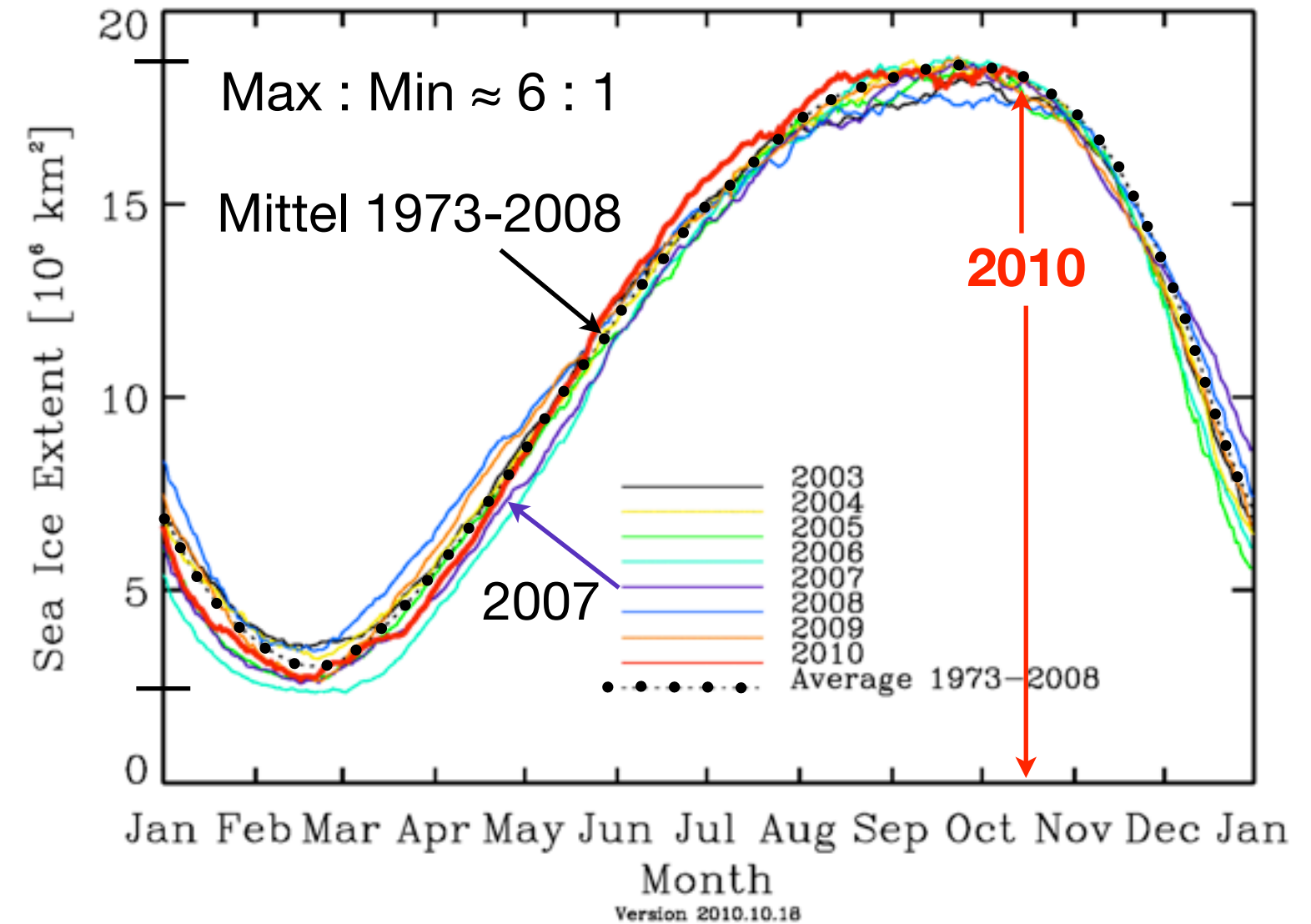
## Arktis

Arctic Sea Ice Extent



## Antarktis

Antarctic Sea Ice Extent



Quelle: [www.iup.physik.uni-bremen.de](http://www.iup.physik.uni-bremen.de)

# Abnahme des arktischen Meereises

**Ausdehnung des Meereises in der nördlichen Hemisphäre** am Ende des Nord-Sommers (September).

Dargestellt sind **Ergebnisse von 15 Modellen**, wie sie für unterschiedliche Szenarien im IPCC-Bericht 2007 verwendet wurden (**punktierte Linien**).

Der **Mittelwert** aus den 15 Modellen ist als **schwarze durchgezogene Linie** dargestellt.

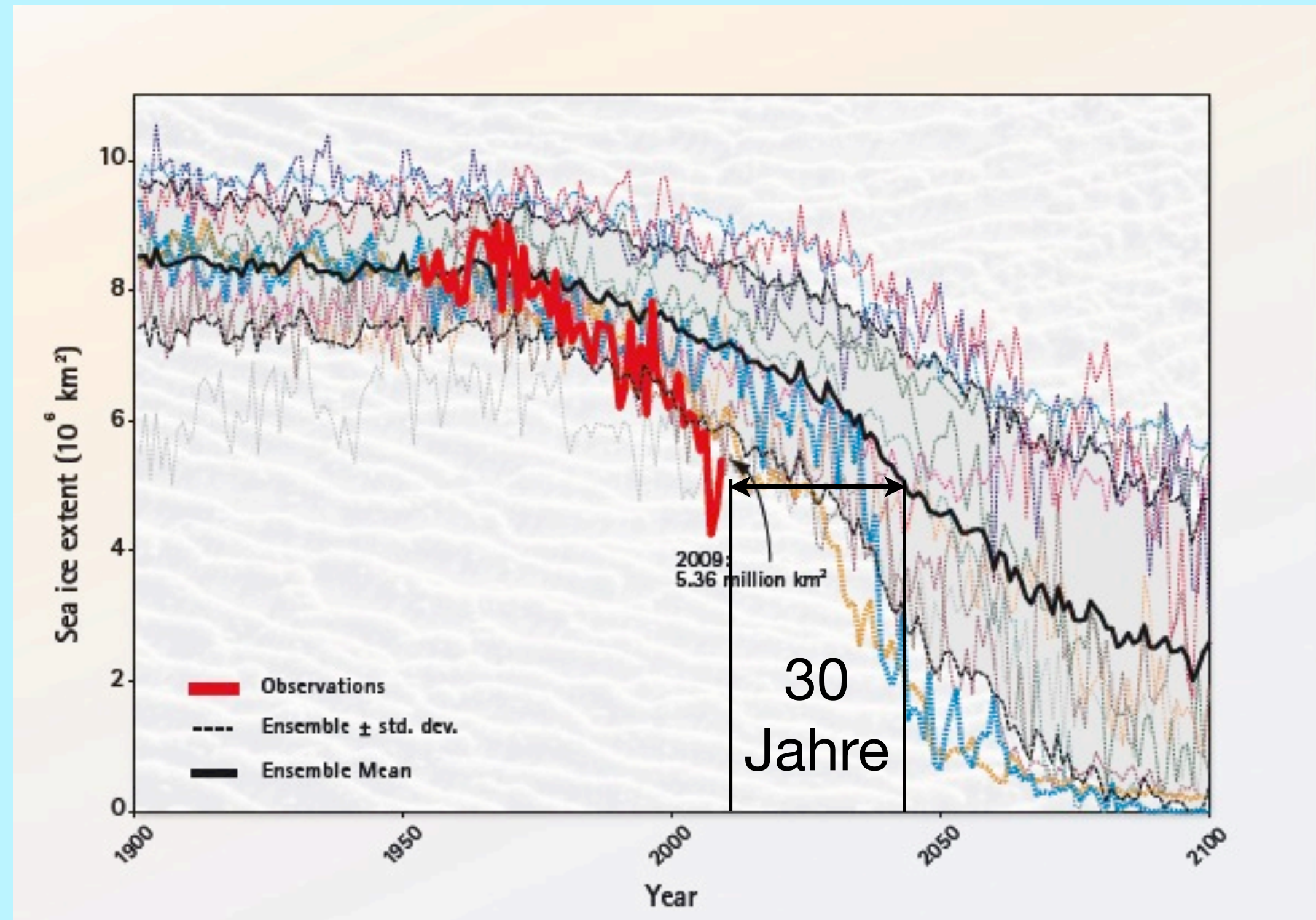
Die aus **Satellitendaten** abgeleiteten Werte zeigt die dicke **rote Kurve**.

Die Abbildung zeigt, dass die Eisfläche um 11,2% pro Dekade abnimmt, eine deutliche stärkere Abnahme als in allen IPCC-Szenarien.

Am Ende des Sommers 2009 (und 2010) war die mit Meereis bedeckte Fläche in der Arktis zwar größer als in den Jahren 2007 und 2008 mit der bisher beobachteten minimalen Meereis-Ausdehnung. Man muss aber beachten, dass die meereisbedeckte Fläche noch nicht wieder den Status früherer Jahre erreicht hat und, dass die **Abnahme der Eisfläche den IPCC-Szenarien um 30 Jahre voraus ist!**

Neuere Modellläufe zeigen, dass ein im Sommer fast eisfreies Nordpolarmeer noch vor der Mitte dieses Jahrhunderts erwartet werden kann.

Quelle: National Snow and Ice Data Center, University of Colorado at Boulder, USA. Updated from Stroeve et al. 2007.iii



Koç N, Njåstad B, Armstrong R, Corell RW, Jensen DD, Leslie KR, Rivera A, Tandong Y & Winther J-G (eds) 2009. Melting snow and ice: a call for action. Centre for Ice, Climate and Ecosystems, Norwegian Polar Institute.

Die großen Eisschilde der Erde sind ein einzigartiges Klimaarchiv.

Das Eis unserer Erde, sowohl Landeis wie Meereis, reagiert sichtbar auf klimatische Änderungen.

Klimaveränderungen lassen sich nicht aufhalten, nur verzögern.

Klimaänderung ist ein globales Problem.

Reduzierung des Verbrauchs fossiler Brennstoffe dringend notwendig.

Abtauchen ist keine Lösung !

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit





## **Polares Eis – Archiv für das Klima der Vergangenheit und Indikator für die Zukunft.**

Dr.-Ing. Hans Oerter, AWI Bremerhaven

Meine Damen und Herren,

vielen Dank für die Einladung zu Ihrer Fachtagung. Ich bin gerne nach Kloster Banz gekommen. Ich möchte Ihnen einen (kleinen) Einblick in die eisige Welt der Klimaforscher, in der ich zusammengerechnet insgesamt fast vier Jahre zugebracht habe, und einen Ausblick auf das Klima von morgen geben. Als Einstieg ein Blick auf die Gletscherfront eines arktischen Gletschers mit einem herabstürzenden Wasserfall. Das Schmelzen des alpinen und polaren Eises begegnet uns in vielen Schlagzeilen der Medien und ist zum Synonym für die globalen klimatischen Veränderungen, die wir heute erleben, geworden.

**Was erwartet Sie in den nächsten fünfundvierzig Minuten?** Eine kurze Einführung soll Sie Ihnen zuerst die Landschaften, die zu unserem Thema gehören, näher bringen. Ich möchte Sie mit einigen Bildern und Erklärungen in die Alpen, die Arktis und Antarktis führen. Drei Fragezeichen werden das Gerüst des weiteren Vortrags bilden: **Wo und wie bohrt man Eiskerne? Was lernen wir aus den Eiskernen über das Klima der Vergangenheit? Was erwartet uns in der Zukunft?**

Beginnen wir mit einem Blick in die alpine Welt, sie liegt uns näher und ist leichter erreichbar als die polare Welt. Beim Wandern im Hochgebirge blicken wir auf ausgeschürfte Täler mit hohen Moränenwällen zu beiden Seiten. Der Gletscher selbst hat sich weit zurückgezogen und uns eine kahle Landschaft hinterlassen. Hier als Beispiel ein Blick auf den Hintereisferner in den Ötztaler Alpen. **Die alpinen Gletscher sind ein deutliches Indiz für Klimaveränderung.**

Wie anders die Hochgebirgslandschaft noch vor hundert Jahren ausgeschaut hat, führt uns der Vergleich einer Postkarte, die um 1910 aufgenommen wurde, mit einer Fotografie aus diesem Jahr vor Augen. Beide Bilder zeigen die Vernagthütte und den Vernagtferner in den Ötztaler Alpen. Der Vernagtferner ist der Gletscher auf dem ich meine glaziologischen Lehrjahre verbracht habe. Der Rückzug der Alpengletscher begann um 1850, dem Ende der so genannten kleinen Eiszeit, kam in den 1980er Jahren kurzzeitig zum Stillstand und hat sich seit den 1990er Jahren drastisch beschleunigt. Auf beiden Bildern markiert das rote Dreieck dieselben Landmarken. Die Vernagthütte auf dem linken Bild im Vordergrund zu sehen, ist auf dem linken Bild durch einen Kreis markiert. Die gestrichelte Linie rechts markiert etwa die seit Anfang des 20. Jahrhunderts eisfrei gewordene Fläche. Zwei Zeitmarken zeigen die Lage der Gletscherfront um 1930 und 1980. In den 50 Jahren zwischen 1930 und 1980 wich die Gletscherfront etwa einen Kilometer zurück, in den 30 Jahren seit 1980 um gut weitere 800 Meter.

**Blicken wir in die Arktis**, hier zum Beispiel auf einen **Eisstrom auf Grönland**, den so genannten 79°-Gletscher. Er liegt in Nordostgrönland bei 79° nördlicher Breite (Roter Punkt auf kleiner Karte von Grönland oben rechts). Auf der Gletscheroberfläche

fließt das Schmelzwasser Richtung Meer ab. Das wäre an und für sich etwas durchaus Normales, wenn wir nicht auch hier eine drastische Zunahme der Ausdehnung der schmelzenden Oberfläche und eine Erhöhung der Schmelzbeträge im letzten Jahrzehnt beobachten müssten. Dieser Prozess wird in der folgenden Abbildung eindrucksvoll dargestellt.

**Schmelzen des Grönländischen Inlandeises:** Die Abbildung zeigt die Fläche des Grönländischen Eisschildes auf der in der Zeit von 1979-2008 Eisschmelze auftrat. Man beachte die gewaltigen Maße von Grönland, Nord-Süd-Erstreckung etwa 2670 Kilometer, West-Ost-Erstreckung etwa 1050 Kilometer. Die Fläche mit schmelzendem Eis wurde aus Satellitenbildern abgeleitet. Zwischen 33 and 55% des gesamten Eismassenverlustes des Grönländischen Eisschildes stammen von der Eismenge, die an der Oberfläche schmilzt und abfließt. Die Fläche mit Eisschmelze nahm zwischen 1979 und 2008 um etwa 30% zu. Die beiden Extremjahre waren 2007, mit der maximalen Flächenausdehnung, und 1992, mit der minimalen Ausdehnung. Aus Modellrechnungen und Satellitenbeobachtung ergab sich für 2007, dass die Fläche mit oberflächlichem Schmelzen etwa 50% der gesamten Oberfläche des Grönländischen Eisschildes entsprach. Auffallend sind die großen Schwankungen zwischen den einzelnen Jahren. Dies mahnt zur Vorsicht bei der Interpretation von zu kurzen Zeitreihen. (Quelle: NSIDC/Steffen et al. 2008.)

Verlassen wir das auf festem Land gegründete Eis und gehen auf das schwimmende Meereis. Das **Arktisches Meereis ist ein deutlicher Indikator für die heute ablaufenden Klimaveränderungen**. Ein reichhaltiges Nahrungsangebot bietet in der Arktis und auch der Antarktis, nur das Meer. Wer sich aus dem Meer ernähren kann, wird überleben. Wichtig im marinen Nahrungskreislauf ist das Meereis, da an seiner Unterseite große Mengen an Algen wachsen. Steigen die Lufttemperaturen über dem Nordpolarmeer, gerät das Meereis in seiner sommerlichen Ausdehnung zunehmend in Gefahr. An der Spitze der Nahrungskette steht der König der Arktis, der Eisbär. Er ist davon abhängig, auf dem Meereis Robben jagen zu können und sich im Sommer genügend Reserven für den Winter anzufressen, besonders gilt dies für die Muttertiere. Der Eisbär entwickelte sich in den letzten Jahren zur Symbolfigur für die Veränderungen in der Arktis, um nicht zu sagen zur Kultfigur.

Das Meereis in der Arktis unterliegt **großen natürlichen Schwankungen zwischen Winter und Sommer**. Die linke Karte zeigt die winterliche Ausdehnung des arktischen Meereises. Meereis entsteht durch Gefrieren von Meerwasser, sobald im Herbst die Temperaturen unter  $-2\text{ °C}$  fallen. Der Gefrierpunkt von Meerwasser ist bedingt durch den Salzgehalt niedriger als bei Süßwasser und liegt bei minus  $1,9\text{ °C}$ . Im Sommer, wenn die Temperaturen wieder über dem Gefrierpunkt liegen, schmilzt das Meereis. Außerdem muss man beachten, dass das Meereis mit den Meeresströmungen durch das Nordpolarmeer driftet. Vor allem zwischen Spitzbergen und Nordgrönland wird durch die Framstraße viel Meereis aus dem Nordpolarmeer exportiert.

Wie sieht es auf der südlichen Hälfte unseres Erdballes, in der **Antarktis** aus? Das Bild führt Sie in den antarktischen Herbst (Ende Februar/Anfang März). Auf einer offenen Wasserfläche hat sich gerade **junges Meereis** gebildet, das für das deutsche For-

schungsschiff Polarstern noch kein Hindernis darstellt. Im Bildhintergrund sind altes Meereis und Eisberge sichtbar.

Auch für die Antarktis zeige ich Ihnen zwei Karten, die die Meereisausdehnung im Winter (links) und im Sommer (rechts) abbilden. Man sieht, wie weit sich das Meereis im Winter nach Norden ausdehnt. Nur im Bereich der antarktischen Halbinsel macht sich der Einfluss des Pazifiks bemerkbar, so dass dort die Küste fast eisfrei bleibt. Im Vergleich zur Arktis erkennt man, dass die Unterschiede zwischen Sommer und Winter wesentlich größer sind. Ich werde darauf später noch genauer eingehen.

Google Earth stellt uns ein wunderbares Werkzeug zum Blick auf unseren Globus zur Verfügung. Stellen wir einmal nicht das Frankenland in den Mittelpunkt unseres Weltbildes, sondern den Nordpol, und nehmen wir das Meereis weg, so wird deutlich, dass die **Arktis ein Meer von Land umgeben** ist. Der Nordpol liegt im Meer. Das Nordpolmeer wirkt als großes Wärmereservoir, Meerwasser kann ja nicht kälter als  $-2^{\circ}\text{C}$  werden! Die Meereisdecke, die auf dem Nordpolarmeer schwimmt ist im Mittel nicht mehr als zwei Meter dick. Die größte Landeismasse im Norden liegt auf der Insel Grönland. Im Gegensatz dazu finden wir im Süden die **Antarktis als einen eisbedeckten Kontinent vom Meer umgeben**, der im Mittel über 2000 Meter hoch ist. Damit ist die Antarktis der höchste Kontinent der Erde. Der Südpol liegt auf einer Meereshöhe von 2830 Metern. Am Südpol beträgt das Jahresmittel der Lufttemperatur etwa  $-50^{\circ}\text{C}$ . Der gewaltige Eisschild ist ein riesiges Kältereservoir. Dies allein erklärt schon, warum die Antarktis im Mittel wesentlich kälter als die Arktis ist. Auch auf der Zugspitze ist es wesentlich kälter als in Hamburg. Die drei roten Punkte auf der Antarktiskarte markieren die Lage der deutschen Überwinterungsstation Neumayer sowie von zwei Bohrlokalationen, auf die ich später noch weiter eingehen werde.

Zwei **Tiergruppen sind Symbol für Arktis und Antarktis**, denn sie sind jeweils nur im Norden oder im Süden heimisch. In der Arktis ist es der Eisbär, in der Antarktis sind es die Pinguine.

Um das Klima der Vergangenheit zu erforschen, müssen wir auf das Plateau des Inlandeises hinauffahren. Hier ist die Landschaft wenig spektakulär, wie Ihnen dieses Bild veranschaulichen soll. **Zum ersten Fragezeichen: Wo und wie bohrt man Eiskerne?**

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 jährliche Schneeakkumulation nur 80 Kilogramm pro Quadratmeter und Jahr<sup>1</sup>, an der Kohnen-Station 64 Kilogramm pro Quadratmeter<sup>1</sup>, an der an der Küste liegenden Neumayer-Station etwa 340 Kilogramm pro Quadratmeter<sup>1</sup>. Die Jahresschichten lassen sich in den oberen Metern der Firndecke noch gut erkennen. Mit zunehmender Tiefe werden die Jahresschichten in der Antarktis soweit ausgedünnt, dass sie nicht mehr nachweisbar sind. Der Dünnschnitt aus größerer Tiefe (rechts unten; Durchmesser ca. 76 mm) lässt erkennen, dass die einzelnen Eiskristalle mit zunehmender Tiefe wachsen und kleine Luftblasen eingeschlossen werden. Unterschiedliche Färbung der Kristalle zeigt unterschiedliche Orientierung der optischen c-Achsen

an.

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

**Aus der Antarktis** nun ein Beispiel aus den Forschungsarbeiten, an denen ich selbst in den letzten 15 Jahren beteiligt gewesen bin, das European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA). Schauen wir aus dem Weltraum auf die Antarktis. Um das dargestellte RADARSAT-Bild zu erhalten, mussten viele Einzelbilder zusammengesetzt werden. 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, punktierte 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 Kohnen-Station (EPICA (EU), EDML), auf Dome Fuji (Japan), bei der Station Wostok (Russland) und auf Dome C (EPICA (EU), EDC) 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 aus nationalen Beiträgen. An EPICA beteiligten sich Belgien, Dänemark, Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien, 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 Wostok-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. 790.000 Jahren (in einer Tiefe von 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.

Die Bohrstelle an der Kohnen-Station liegt im **Dronning-Maud-Land**, dem Teil der Antarktis, der Südafrika zugewandt ist (roter Ausschnitt in der Übersichtskarte, rechts oben). Der Zugang zur Kohnen-Station, vor allem was den Transport von schweren Gütern, einschließlich des Treibstoffes, angeht, erfolgt über die deutsche Überwintungsstation Neumayer an der Küste.

Am 20. Februar 2009 wurde die Station Neumayer III, die dritte deutsche Überwintungsstation seit 1981, in Betrieb genommen. Über dieses Ereignis, ein Höhepunkt im 4. Internationalen Polarjahr 2007/08, wurde in den Medien ausführlich berichtet. Hier zeige ich Ihnen eine Luftaufnahme der Neumayer-Station III, im Hintergrund die Atka-Bucht.

Die **Anreise zur Neumayer-Station** erfolgt klassischer Weise 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 Kohnen-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 Kohnen-Station 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 - Kohnen-Station wird mit kleineren Flugzeugen vom Typ Basler BT67 geflogen. Dafür wird entweder die AWI-eigene Polar5 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.**

**Kohnen-Station** (75°00' S, 00°04' O, 2882 m ü. Meer). Die Kohnen-Station wurde benannt nach dem dt. Geophysiker Dr. Heinz Kohnen (\*1938, †1997). H. Kohnen war 1982-1997 der erste Leiter der Abteilung Logistik des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft (AWI), Bremerhaven. Die Kohnen-Station wurde als Sommerstation für die 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](http://www.awi.de)) weiterbetrieben. Für das Bohrprojekt EPICA, einschließlich der Errichtung der Kohnen-Station, wurde nach den Richtlinien des Umweltschutzprotokolls (1991) zum Antarktisvertrag eine Umweltverträglichkeitsstudie erstellt. Das Projekt wurde am 6.10.2000 vom Umweltbundesamt genehmigt. Die Station besteht aus elf 20-Fuss-Containern, die auf einer 32 m langen, 8 m breiten stählernen Plattform stehen. Die Plattform liegt etwa 2 m über der Schneeoberfläche und ruht auf 16 im Firn gegründeten, verlängerbaren Stahlstützen. Die Stationsplattform wird alle zwei Jahre um ca. 60 cm gehoben, um den Schneezutrag auszugleichen. Die Container beherbergen Funktionsräume für Generator, Schneeschmelze, Werkstatt, Lager, Schlafen, Toilette u. Waschraum, Küche, Messe sowie Telekommunikation. Neben der Station werden weitere Schlafmodule, Nahrungsmittelcontainer u. Tankcontainer auf Schlitten platziert, sodass insgesamt 20-25 Personen beherbergt werden können. Die Stromversorgung leistet ein 100kW Dieselgenerator, dessen Abwärme zum Schmelzen von Schnee für die Wasserversorgung genutzt wird. Für die Bohrarbeiten wurde 2001 neben der Station ein 66 m langer, 4,6m 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. 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 (über [www.polarforschung.de](http://www.polarforschung.de) als pdf abrufbar).

Einblick in Generator-Container, Sanitär-Container, Wohn-Container und Küche mit dem Koch Adi. Weitere Schlafplätze sind in mobilen Wohneinheiten neben der Station verfügbar.

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 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) in die Horizontale schwenken zu können. Er wird während des Bohrvorgangs abgedeckt und nur zum Schwenken des Bohrers geöffnet. Die Temperatur im Drill-Trench lag bei ca. -30°C.

Zum **Bohren von Eiskernen** wird heute hauptsächlich das elektromechanische Bohrverfahren eingesetzt, bei dem die Bohrmesser der Bohrkronen einen Ring um den Bohrkern frei fräsen. Der 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.  $-60^{\circ}\text{C}$  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 Solkan®141 eingesetzt (darf ab 2010 weltweit nicht mehr vertrieben werden).*

Die in Längen von 3-3,5 Metern zu Tage geförderten Bohrkern werden auf jeweils **ein Meter geschnitten**. An diesen Meterstücken werden dann sofort die elektrischen Eigenschaften des Eises gemessen. Anschließend werden Ein-Meter-Stücke in Polypropylenkisten verpackt. In diesen Kisten wurden die Eiskerne vom Bohrcamp bis nach Bremerhaven transportiert und dann dort in ein Kühlhaus eingelagert.

Das zweite Fragezeichen: **Was lernen wir aus den Eiskernen über das Klima der Vergangenheit?**

Im Eis sind **Informationen** zu Schwankungen der **Lufttemperatur**, zur **Gas-Zusammensetzung** in der Paleo-Atmosphäre und zum **Gehalt an Aerosolen** in der Vergangenheit gespeichert. Die Temperaturinformation ist nicht direkt gespeichert. Sie muss aus so genannten Proxy-Daten berechnet werden. Als Temperaturproxy dienen die stabilen Isotope im Wassermolekül, das sog. Isotopenthermometer (z.B. Stauffer 2001), das die Beziehung zwischen Kondensationstemperatur und Gehalt an den stabilen Sauerstoffisotopen ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) und an Deuterium ( $^{22}\text{H}/^1\text{H}$ ) im Niederschlag beschreibt. 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 hydrostatischen Druck (bei ca. 1000-1200m Eisauflast) in Klathrate umwandeln, d.h. ins Kristallgitter des Eises eingebaut werden. Bei Druckentlastung können sie wieder frei gesetzt werden. Eis ist das einzige Klimaarchiv, das Gase gespeichert hat. Ein Problem bei der Interpretation der Gasgehalte bzw. der Umrechnung von Tiefenprofilen in Zeitreihen ist die Differenz zwischen dem Alter des umgebenden Eises und der eingeschlossenen Luft. Aerosole sind feste und flüssige Teilchen, die in der Atmosphäre transportiert werden. Sie stammen z.B. von Vulkaneruptionen, von weiten vegetationslosen Flächen oder werden an der Meeresoberfläche bzw. vom Meereis in die Luft abgegeben 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.

Im **Eislabor des Alfred-Wegener-Instituts** werden die Eiskerne bei Temperaturen unter minus zwanzig Grad Celsius zersägt und in einzelne Probestückchen aufgeteilt. Das Ice Core Processing beginnt mit dem Auspacken der Kernstücke, wobei alle noch einmal kontrolliert werden und gegebenenfalls Auffälligkeiten, wie zum Beispiel Brüche protokolliert werden. Dann werden die Einmeter-Stücke auf der Horizontalsäge parallel zur Kernachse geteilt. Eine Scheibe wird für die Line-Scan-Messungen vorbereitet. Nach dem Scannen wird diese Scheibe an Bandsägen weiter zerteilt.

Auch im Eislabor muss man sich warm anziehen und manchmal bedarf es großer

Sorgfalt gebrochene Stücke wieder richtig zusammensetzen.

**Schnittplan für den EDML-Eiskern.** Der Kerndurchmesser beträgt 98 mm. Die Standardbreite für die  $^{18}\text{O}$ -, D- (Temperatur-Proxy) und  $^{10}\text{Be}$ -Proben war 15 und 24 mm. Über das SC-Stück, konnte das EPICA-Steering-Committee gesondert verfügen. Für kontinuierliche Durchflussmessung (Continuous Flow Analysis oder CFA) wurde ein Quadratstab mit 32 Millimeter Kantenlänge geschnitten. An einem einen Zentimeter dicken Streifen, aus dem anschließend noch Dünnschnitte präpariert wurden, physikalische Eigenschaften des Eises (phys.-prop.) bestimmt. An Proben, die nicht kontinuierlich über die ganze Kernlänge, sondern in festgelegten Abständen geschnitten wurden (Discont. samples) wurden Gasgehalte und isotopische Zusammensetzung der Gase sowie Staub gemessen.

**Antarctic Ice Core Records: Vostok and EPICA.** Die  $\delta\text{D}$ -Kurve (äquivalent zu  $\delta^{1818}\text{O}$ ) 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 (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  $\text{CO}_2$  (oben) und Methan ( $\text{CH}_4$  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  $\text{CO}_2$  oder  $\text{CH}_4$  begann. Beim Vergleich der  $\text{CO}_2$ -Gehalte der zurückliegenden vier 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  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen von 385 ppmv wurden in den Eiskernen zu keiner Zeit nachgewiesen. (Quelle der Abb.: [www.pages.unibe.ch](http://www.pages.unibe.ch)).

Kommen wir zum dritten Fragezeichen: **Was erwartet uns in der Zukunft?** Wir kehren von den Polargebieten zurück in unsere Lebenswelt. Die Veränderungen des Meeresspiegel spielen dabei, als Teil des hydrologischen Systems unserer Erde, eine wichtige Rolle. Für Sie hier im Fränkischen sicher eine Frage, die Ihnen nicht so auf den Nägeln brennt, wie jenen Menschen, die an den Küsten wohnen. Aber, wenn wir über Klima reden, müssen wir global denken. Was erwartet den kleinen Jungen, der hier noch am Ufer der Weser ins Wasser schaut, im Laufe seines Lebens?

**Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre.** Eine Zusammenstellung der Entwicklung des Kohlendioxidgehalts in der Atmosphäre finden wir in dem 2007 veröffentlichten Bericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, abgekürzt IPCC). Sie erinnern sich vielleicht, dass jener Ausschuss im Jahr 2007 gemeinsam mit dem Amerikaner Al Gore den Friedensnobelpreis zugesprochen bekam. Wir sehen eine Kurve, beginnend etwa am Ende der letzten Eiszeit vor gut 10.000 Jahren, die seit 5.000 Jahren vor heute langsam ansteigt. Ab



1850 wird der Anstieg stärker und ab 1950 geht die Kurve dann steil exponentiell nach oben. Die unterschiedliche Farbgebung bei der Darstellung der Kurve verweist auf den unterschiedlichen Ursprung der Messdaten. Nur die rote Kurve zeigt Messwerte an atmosphärischen Luftproben, gemessen an der Station Mauna Loa auf Hawaii. Diese Station wird seit 1956 von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) der USA betrieben. Die kontinuierliche Messreihe für Kohlendioxid begann erst 1958! Alle anderen Messwerte, die hier aufgetragen sind, wurden vorwiegend an antarktischen Eisproben gemessen. Der Anstieg des Kohlendioxidgehalts in der Atmosphäre hängt ursächlich mit der Verbrennung fossiler Brennstoffe zusammen. Er ist also zum größten Teil anthropogen verursacht. Der aus dem Anstieg des Kohlendioxids resultierende Strahlungsantrieb (radiative forcing) ist auf der rechten Achse angegeben. 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)!

Informationen aus dem IPCC-Report 2007: Mit **verschiedenen Szenarien**, die jeweils eine unterschiedliche Entwicklung der Treibhausgase ergeben, können verschiedene Temperaturszenarien für die Zukunft berechnet werden. Der heute gemessene Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre liegt bereits über den höchsten Modellannahmen! Die schwarze Kurve links ist die gemessene/rekonstruierte Temperaturkurve für das 20. Jahrhundert. Die graue Fläche zeigt die Ergebnisse der Modelle, die für die späteren Simulationen verwendet wurden. Die orangefarbene Kurve steht für eine Simulation, bei der die Treibhausgaskonzentrationen konstant auf dem Wert des Jahres 2000 gehalten werden. Selbst dann würde die Temperatur bis zum Jahr 2100 global um etwa 0,4 °C steigen.

Die Kurven für den Zeitraum 2000-2100 verdeutlichen den Schwankungsbereich der einzelnen Modelle. Der wahrscheinlichste Anstieg des globalen Temperaturmittels an der Erdoberfläche liegt zwischen 1,3 und 4,0 °C. Die EU ist bestrebt, die Temperaturerhöhung bei 2°C zu begrenzen. Um das zu erreichen bedarf es weltweit größter Anstrengungen. Mit der blauen Schrift rechts ist der daraus resultierende Anstieg des Meeresspiegels angedeutet. Je nach den getroffenen Modellannahmen muss mit Werten zwischen 18 und 51 Zentimeter gerechnet werden. Diese Zahlen sind jedoch keine Vorhersage, sondern Ergebnisse von möglichen Szenarien und werden je nach Wissensstand immer wieder (nach oben) revidiert werden müssen. Es sind sicherlich untere Grenzen von dem, was auf uns zukommt!

**Treibhausgas-Gehalt in der Atmosphäre.** Was ist der Status heute und wie werden sich der Kohlendioxid- und Methangehalt weiter entwickeln? Dazu eine letzte Abbildung. Den Verlauf während der vergangenen 800.000 Jahre habe ich Ihnen bereits vorgeführt. 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 490 und 1200 ppmv für das Kohlendioxid und zwischen 1500 und 3500 ppmv für das Methan vor Augen, die bis zum Jahr 2100 erreicht werden könnten. Das Kohlendioxid lag 2008 bereits bei 384 ppmv (am oberen Limit der IPCC-Projektionen). Das Methan liegt mit 1855 ppmv im Jahr 2008 bereits über dem unteren Wert, der für das Jahr 2100 als möglich erschien! (Quelle: <http://www.pages-igbp.org>). Was können wir über die Veränderung der Landeismassen und die damit verknüpfte Änderung des Meeresspiegels sagen?

**Was verursacht Meeresspiegelanstieg?** Der Bericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) enthält dazu einige Zahlen u.a. für den Zeitraum 1993-2003. Demnach lässt sich der globale Meeresspiegelanstieg zu etwa 57 Prozent auf die thermische Ausdehnung des Meerwassers zurückführen, zu etwa 28 Prozent auf das Schmelzen von den so genannten kleinen Gletschern und Eiskappen. Grönland trug mit etwa 0,21 Millimetern pro Jahr, entsprechend 7,5 Prozent zum Meeresspiegelanstieg bei. Beachten Sie den angegebenen Schwankungsbereich von plus/minus 0,35 Millimetern pro Jahr. Er trägt den Unsicherheiten, die diesen Berechnungen immer noch anhaften, Rechnung. Die Antarktis trug etwa gleich viel bei, aber nicht auf Grund erhöhter Abschmelzung sondern weil auch hier, wie in Grönland, die Fließgeschwindigkeit einiger Eisströme deutlich zugenommen hat. Die Abschmelzbeträge zeigen zunehmende Tendenz!

Wie eingangs bereits angedeutet, unterliegt das Meereis stetiger Veränderung. Schmelzendes Meereis trägt nicht direkt zum Meeresspiegelanstieg bei, da schwimmendes Eis soviel Wasser verdrängt wie die äquivalente Wassermenge. Ich kann hier nicht im Detail darauf eingehen, welchen Einfluss das Meereis auf den Salzgehalt des Nordpolarmeeres hat und welche Konsequenzen für die Änderungen im Rückstreuvermögen (sog. Albedo-Wert) beim Wechsel von einer weißen Eisdecke zu einer dunklen Meeresoberfläche verbunden sind. Ich will Ihnen nur noch kurz die quantitativen Veränderungen im Nordpolarmeer vor Augen führen. Als erstes **Veränderung der mit Meereis bedeckten Meeresfläche** im Laufe eines Jahres. Das Verhältnis der winterlichen zur sommerlichen Meereisfläche beträgt in der Arktis etwa 3:1, in der Antarktis 6:1. Die gepunktete, schwarze Linie zeigt den mittleren Verlauf für die Jahre 1972-2008. Dabei sieht man deutlich, dass in der Arktis seit 2003 die Meereisfläche zu allen Jahreszeiten deutlich unter dem langjährigen Mittelwert liegt. Das Meereis hat nach Fläche und Dicke abgenommen! Im September 2007 wurde im bestehenden Beobachtungszeitraum die bislang kleinste Fläche erreicht. In den Jahren 2007-2010 lag das Septemberminimum etwa 30% unter dem langjährigen Mittel! Die Situation in der Antarktis ist bislang anders. Hier wird keine drastische Reduktion der Meereisfläche beobachtet. Die Kurve der Beobachtungsjahre 2003-2008 hüllen das langjährige Mittel von 1973-2008 ein.

**Wie decken sich die Modellrechnungen des IPCC-Reports mit der Wirklichkeit?** Dazu eine Abbildung des National Snow and Ice Data Centers in den USA. Dargestellt sind die **Ergebnisse von 15 Modellen**, wie sie für unterschiedliche Szenarien im IPCC-Bericht 2007 verwendet wurden (**punktierte Linien**). Der **Mittelwert** aus den 15 Modellen ist als **schwarze** durchgezogene **Linie** dargestellt. Die aus **Satellitendaten** abgeleiteten Werte zeigt die dicke **rote Kurve**. Die Abbildung lässt erkennen, dass die beobachtete Eisfläche um 11,2% pro Dekade abnimmt, eine deutliche stärkere Ab-

nahme als sie in allen IPCC-Szenarien berechnet wurde. Am Ende des Sommers 2009 (und 2010) war die mit Meereis bedeckte Fläche in der Arktis zwar größer als in den Jahren 2007 und 2008 mit der bisher beobachteten minimalen Meereis-Ausdehnung. Man muss aber beachten, dass die meereisbedeckte Fläche noch nicht wieder den Status früherer Jahre erreicht hat und, dass die **Abnahme der Eisfläche den IPCC-Szenarien um 30 Jahre voraus ist !** Neuere Modellläufe zeigen bereits, dass ein im Sommer fast eisfreies Nordpolarmeer noch vor der Mitte dieses Jahrhunderts erwartet werden kann. (Quelle: National Snow and Ice Data Center, University of Colorado at Boulder, USA. Updated from Stroeve et al. 2007.iii).

Meine Damen und Herren, lassen Sie mich zum Schluss kommen. Ich hoffe, ich konnte Ihnen zeigen, dass die großen Eisschilde der Erde ein einzigartiges Klimaarchiv bergen. Das Eis unserer Erde, sowohl das Landeis wie auch das Meereis reagiert sichtbar auf klimatische Änderungen. Wir müssen uns bewusst machen, dass sich Klimaveränderungen und deren Konsequenzen für die Weltbevölkerung nicht mehr aufhalten lassen, sie lassen sich nur verzögern. Wir müssen uns immer vor Augen halten, dass Klimaveränderung ein globales Problem ist und von keinem Land oder Kontinent im Alleingang gelöst werden kann. Die Reduzierung des Verbrauchs fossiler Brennstoffe ist dringend notwendig. Und hier sind auch schon viele kleine Beiträge nützlich. Ich habe versucht, Ihnen einige Fakten aus der Forschung zu vermitteln. Dass der Mensch einen erheblichen Anteil an den Veränderung hat, ist unumstritten. Jeder Mensch braucht Energie und seit dem Jahr 1800 leben heute etwa 6-mal so viele Menschen auf der Erde als damals. Wir dürfen die Augen nicht vor den Problemen verschließen und müssen uns vor allem Gedanken darüber machen, wie wir mit den Folgen umgehen können.

Meine Damen und Herren, **Abtauchen ist keine Lösung!** Aber, wenn ich mir den Namen Ihrer Arbeitsgemeinschaft und das Thema Ihrer Fachtagung ansehe, dann gleicht diese Aufforderung schon Eulen nach Athen tragen. Ich wünsche Ihnen viel Erfolg bei Ihrem Bemühen um Effizienzsteigerung und danke Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit.