

# Polareis und Klima

Dr.-Ing. Hans Oerter

Hans.Oerter@awi.de

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



Ski-Club Kandel, Waldkirch, 16. Juni 2009



Polareis und Klima, ein umfassendes Thema, zu dem auch in der Presse in der letzten Zeit immer wieder viel zu lesen gewesen ist. Schlagzeilen wie „der Nordpol schmilzt“ oder „wieder ein Rieseneisberg von der Größe des Saarlandes von der Antarktis abgebrochen“ oder dazwischen die Meldung „ein riesiges Gebirge, vergleichbar den Alpen, unter dem Eis der Antarktis entdeckt“, lenken unseren Blick in die Polarregionen.

Das Eis in den Polarregionen ist nicht „ewig“, es entsteht und vergeht und wird wieder durch neues Eis ersetzt. Eis, sei es Meereis, also gefrorenes Meerwasser, oder Gletschereis ist ständig in Bewegung und von daher Veränderungen unterworfen.

Ich will versuchen, Ihnen in den nächsten eineinhalb Stunden einen kleinen Einblick in die Welt der Polarregionen zu geben und Ihnen das Polareis vorstellen.



- Einleitung: Vergleich Arktis - Antarktis
- Bilder aus der Arktis
- Landeis und Massenhaushalt
- Zeugen des Klimawandels in der Gegenwart:  
das Meereis im Nordpolarmeer
- Bilder aus der Antarktis
- Zeugen des Klimawandels in der Vergangenheit:  
Eisbohrkerne

Beginnen möchte ich mit einem kurzen Vergleich zwischen Arktis und Antarktis und hoffe, dass Sie am Ende des Vortrages auch wissen, wo Sie die Arktis und Antarktis auf dem Globus suchen müssen. Ein kurzer Exkurs soll Ihnen die Mengenverhältnisse und die Verteilung der Eismassen auf der Erde vor Augen führen.

Eine Serie von Bildern wird Sie in die Arktis führen und Ihnen zeigen, wie Polareis in Wirklichkeit aussieht und wie ein Gletscher ernährt wird und wieder abschmilzt. Die Bilder sollen Ihnen auch zeigen, dass es sich um bewohntes Land handelt. Die Arktis ist kein Niemandsland. Kalaallit Nunaat nennen die Grönländer ihr Land, was soviel heißt wie Land der Menschen oder Bewohntes Land“.

Besonders augenfällig werden wir mit den zur Zeit ablaufenden Änderungen des Klimas im Bereich des Nordpolarmeeres konfrontiert. Etwas von diesen Veränderungen will ich Ihnen vorstellen.

Dann geht die Reise weiter in die südliche Polarregion, in die Antarktis. Auch hier soll Ihnen eine Serie von Bildern einen kleinen Einblick in das Aussehen dieser Landschaft vermitteln. Es sind Bilder von Eis, Gebirgen und den dort lebenden Tieren. Menschen sind in der Antarktis nicht heimisch. Die Antarktis bietet keinen natürlichen Lebensraum für den Menschen, ein großer Unterschied zur Arktis.

Der Vortrag wird Sie dann mitnehmen auf eine Reise auf das Inlandeis der Antarktis und Ihnen zeigen, wie wir die Geschichte unseres Klimas über die vergangenen 800.000 Jahre entschlüsseln können.



# 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 Arktis liegt im Norden, es ist die nördliche Polarregion. Ihre geografische Grenze ist nicht eindeutig definiert. Wichtig ist zu wissen, die Arktis ist ein Meer, das Nordpolarmeer, umgeben von einer Landmasse. Der Nordpol liegt im Meer. Auf vielen Karten ist die Gegend um den Nordpol weiss dargestellt, um zu zeigen, dass das Meer dort meist ganzjährig mit Eis bedeckt ist. Aber, es handelt sich um Meereis, gefrorenes Meerwasser, im Mittel 2-4 Meter dick und nicht um einen ewigen, auf dem Meeresgrund aufliegenden Eispanzer!

Bis zu 3000 Meter dickes Eis finden wir in der Arktis nur auf Grönland, wie ich später noch genauer ausführen werde.

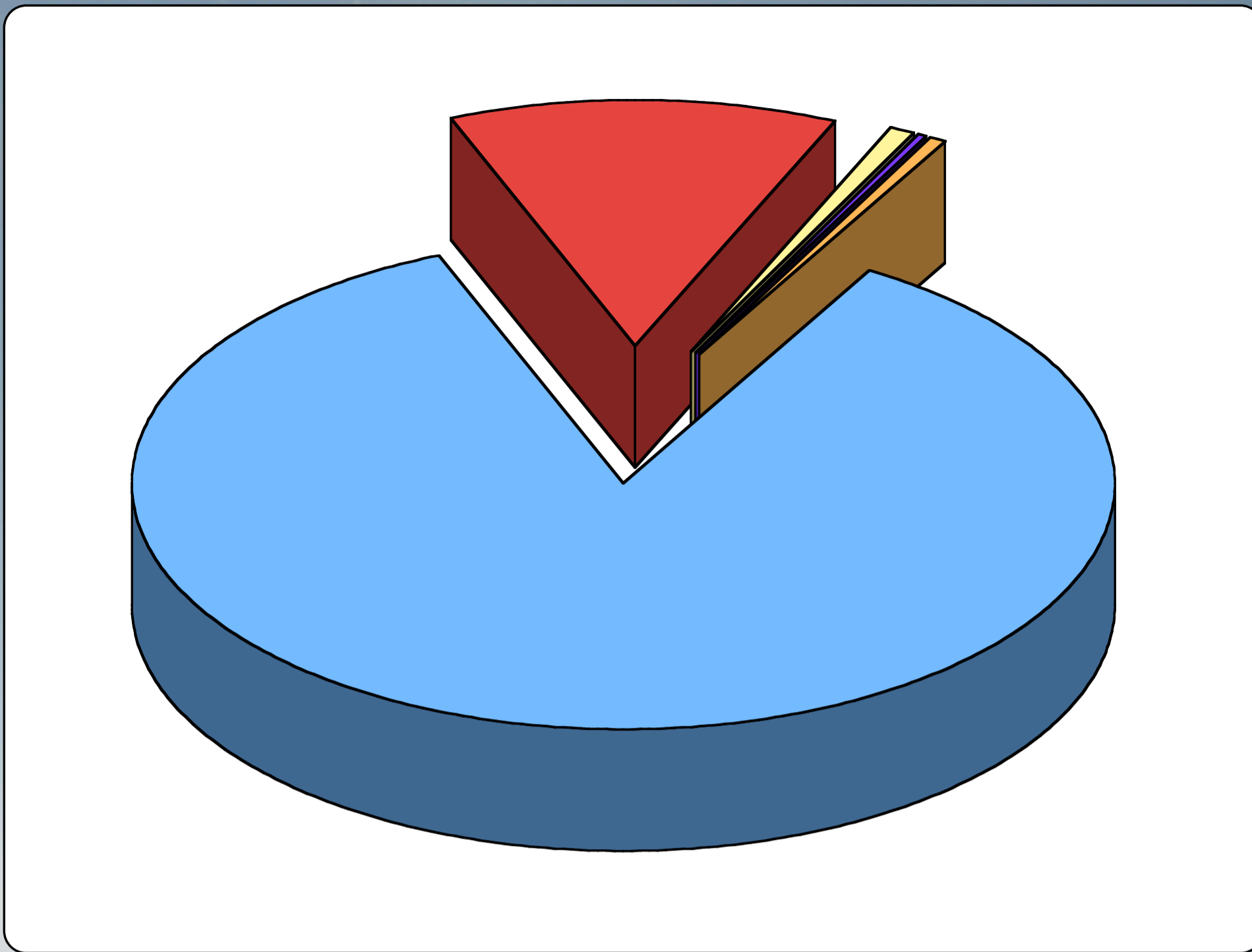
Im Gegensatz dazu ist die Antarktis ein Kontinent, vom Meer umgeben. Der Südpol liegt im Zentrum von Antarktika, dem antarktischen Festland, das mit einem im Mittel mehr als 2000 Meter dicken Eispanzer bedeckt ist. Der Südpol selbst liegt auf einer Höhe von 2830 Meter über dem Meer.

Schon der Höhenunterschied zwischen Nordpol und Südpol gibt eine erste Erklärung, warum es am Südpol wesentlich kälter ist als am Nordpol. Denn, es ist zum Beispiel auch auf der Zugspitze viel kälter als in Hamburg.

Das Nordpolargebiet und das Südpolargebiet ist Heimat für jeweils eine Tiergruppe, die nur im Norden oder im Süden vorkommt. Typisch für die Region um den Nordpol ist der Eisbär, *Ursus maritimus*, typisch für die Antarktis sind die Pinguine. Hier als Beispiel gezeigt der Kaiserpinguin, der am Rand des eisbedeckten Kontinents Antarktika lebt, sich aber ausschließlich aus dem Meer ernährt!



# Verteilung des Eises



Meerwasser 97,5%

Süßwasser 2,5%

77 % des  
Süßwassers als  
Eis gespeichert

Gestatten Sie mir einen kleinen Exkurs zur Verteilung der Wassermenge und der Eismassen auf unserer Erde.

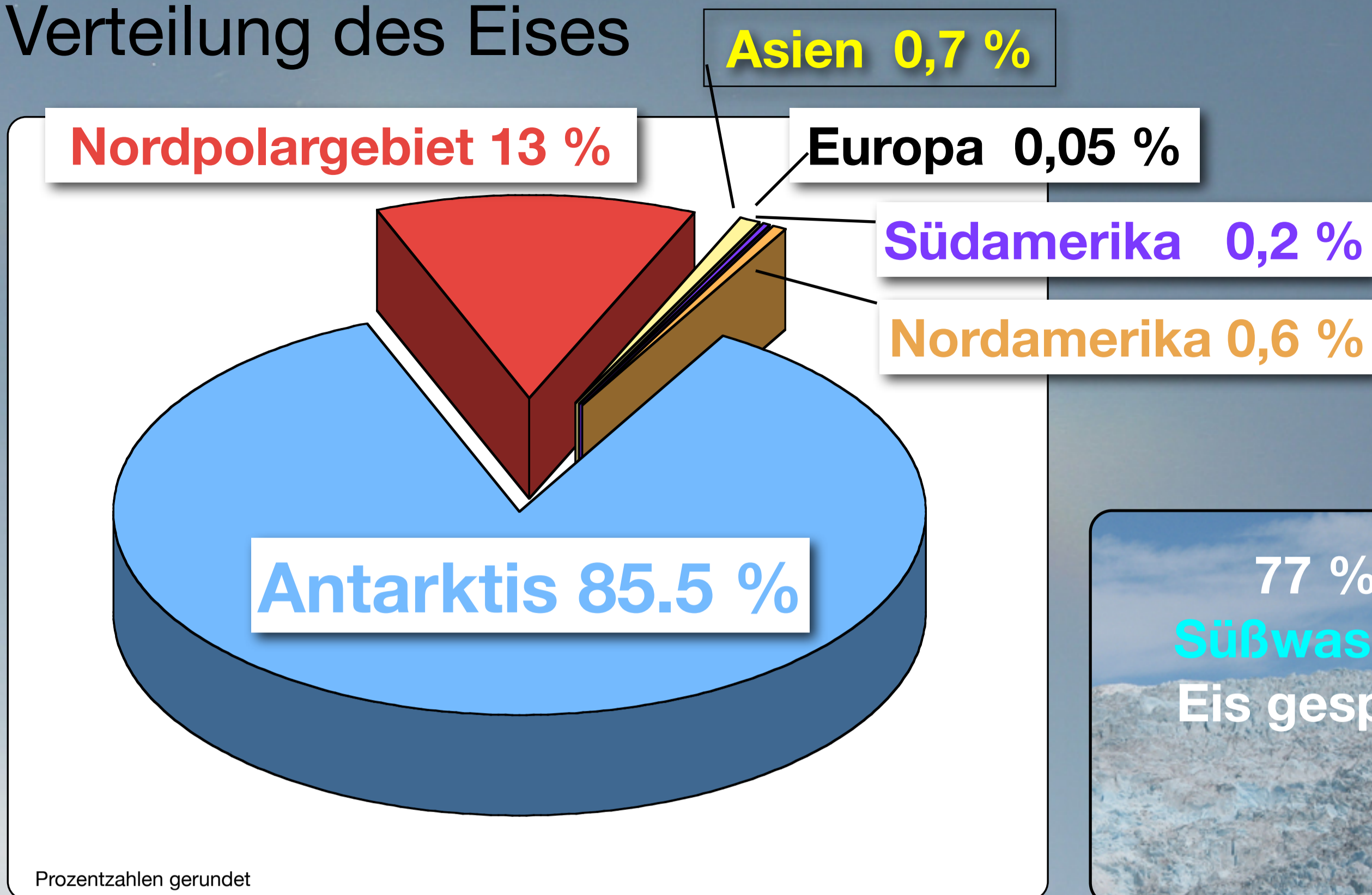
Von dem gesamten auf der Erde verfügbaren Wasser sind 97.5 Prozent Meerwasser, also Salzwasser. Nur 2,5 Prozent sind Süßwasser, das Wasser also, das wir trinken und mit dem wir uns täglich waschen können.

Aber nicht alles Süßwasser steht uns tatsächlich zur Verfügung. Denn 77 Prozent des Süßwassers sind als Eis, vorwiegend Gletschereis, gespeichert.

Wie ist dieses Gletschereis auf der Erde verteilt?



# Verteilung des Eises



Die weitaus größte Eismasse, nämlich 85,5 Prozent finden wir in der Antarktis. Im Nordpolargebiet, vorwiegend auf Grönland, finden wir weitere 13 Prozent. In den großen alpinen Gebirgen unsere Erde lagert der Rest: 0,6 Prozent in Nordamerika, 0,2 Prozent in Südamerika, 0,05 Prozent in Europa und 0,7 Prozent in Asien. Sie mögen erkennen, wie wichtig polare Gletscherforschung oder glaziologische Forschung ist, wenn wir wissen wollen, wie es um unsere Süßwasservorräte auf der Erde bestellt ist.



# Die Arktis

## Grönland

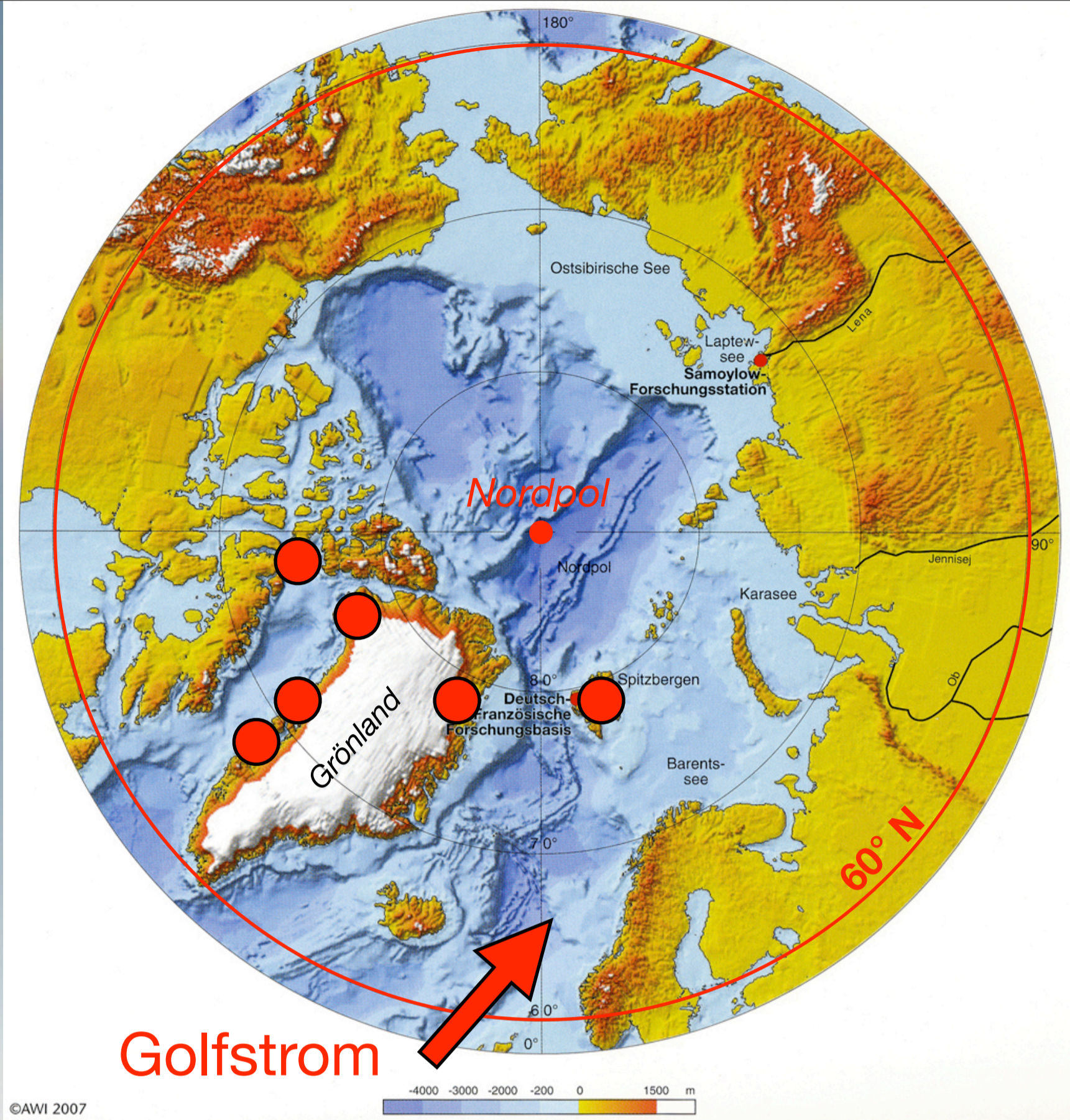
Fläche: 2,166 Mill. km<sup>2</sup>  
eisfrei: 0,410 Mill. km<sup>2</sup>  
(BRD: 0,357 Mill. km<sup>2</sup>)  
eisbedeckt: 1,756 Mill. km<sup>2</sup>  
Vergletscherung: 81,1 %

Quelle: Der Fischer Weltatlas 2009

Süd - Nord: 2670 km

Mittlere Eismächtigkeit 1670 m

Golfstrom ist die  
Warmwasserheizung  
Nordeuropas



©AWI 2007

### Die Arktis

Wie bereits erwähnt, liegt der Nordpol im Nordpolarmeer, das unter dem Nordpol mehrere Tausend Meter tief ist. Diese Karte zeigt Ihnen den Untergrund des Meeres, so als ob es ohne Wasser wäre. Das Nordpolarmeer ist im Winter nahezu komplett zugefroren, im Sommer werden große Teile eisfrei. Dazu später mehr.

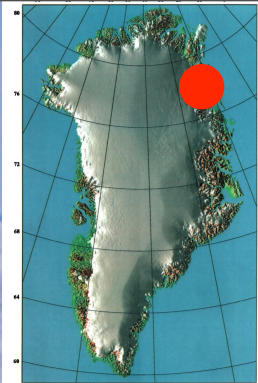
Die größte Eismasse in der Arktis liegt auf der größten Insel der Welt, nämlich auf Grönland. Grönland hat eine Fläche von 2,166 Millionen Quadratkilometern. Davon sind etwa 19 Prozent oder 410.000 Quadratkilometer eisfrei. Zum Vergleich, die Bundesrepublik Deutschland hat eine Fläche von etwa 357.000 Quadratkilometern.

Von Nord nach Süd misst Grönland in seiner größten Ausdehnung etwa 2670 Kilometer. Der Eispanzer auf Grönland ist im Mittel 1670 Meter dick.

Wenn wir von Klima in Nordeuropa reden, ist es wichtig, den Golfstrom nicht zu vergessen. Er ist unsere Warmwasserheizung und lässt es in Nordeuropa weit wärmer werden als auf der gleichen geografischen Breite in Grönland oder Nordamerika. Das warme Wasser aus dem Golf von Mexiko bringt uns Wärme.

Nach diesen allgemeinen, kurzen Erläuterungen zur Arktis lade ich Sie ein, zu einer kurzen Bilderreise in die Arktis, mit Bildern von Grönland, aus der kanadischen Arktis und von Spitzbergen

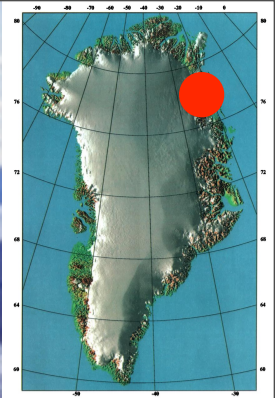




Hier schauen wir aus dem Hubschrauber auf das Grönländische Inlandeis, mit den tiefblau strahlenden Schmelzwasserseen an der Oberfläche. Im Sommer schmilzt da Eis an der Oberfläche, in einem breiten Streifen, der 100-150 Kilometer vom Eisrand auf das Inlandeis hinauf reicht. Das Schmelzwasser sammelt sich in Mulden auf dem Inlandeis und bildet diese Seen. Diese Seen gefrieren im Winter, wenn sie nicht vorher trocken gefallen sind.

Die kleine Karte von Grönland mit dem roten Punkt oben rechts hilft Ihnen, die gezeigten Bilder geografisch einzuordnen.





Bilder der Arktis: Grönland, Schmelzwasserflüsse auf dem Eis

© foto: hans oester, 1993

An anderer Stelle sammelt sich das Schmelzwasser in Flüssen, und fließt so zum Meer ab.



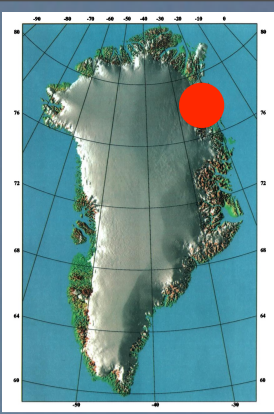


foto: hans oerter, 1993

Das Schmelzwasser bildet reißende Bäche und Flüsse. Das Bachbett vergleichbar glatt wie eine Rutsche im Freibad und es ist besser, nicht dort hinein zu fallen.





Dort, wo das Eis bis ins Meer fließt, schwimmen die Gletscherzungen meist auf. Von diesen Gletscherzungen brechen die Eisberge ab. Man spricht vom Kalben eines Gletschers. Hier als Beispiel die Kalbungsfront des Storstrømmen, des großen Eisstroms, in Nordostgrönland.

Das Inlandeis verliert also auch Eismasse, ohne dass es vorher geschmolzen sein muss. Der Eisabfluss ist etwa für die Hälfte des jährlichen Massenverlustes des Grönländischen Inlandeises verantwortlich.





Bilder der Arktis: Grönland, Walrosse mit Eisberg, Dove Bucht, Nordostgrönland

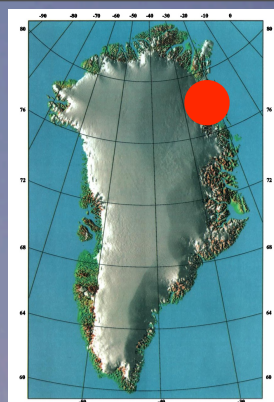


foto: hans oerter

11

Die Eisberge, die vom Storstrømmen kalben, treiben dann durch die Dovebucht dem offenen Meer, dem Nordatlantik, zu. An der Küsten der Dovebucht treffen wir auf eine Herde von Walrössern, die dort am Strand in der Sonne liegen. Beeindruckend die gewaltigen Stoßzähne, deren wegen die Walrösser früher stark gejagt wurden.





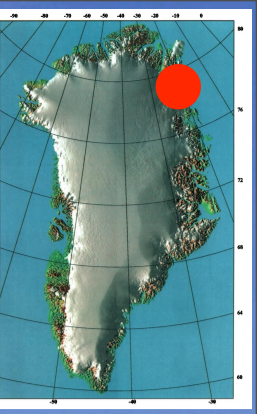
Bilder der Arktis: Grönland, Eisrand Kronprins Christian Land, Nordostgrönland

eiszeitliches Eis

foto: hans oerter, 1993

Etwas weiter nördlich, in Kronprins Christian Land, fließt das Inlandeis nicht mehr bis ins Meer. Der Rand des grönländischen Inlandeis liegt auf dem Lande. An der Gletscheroberfläche ist eine starke Bänderung erkennbar. Der bräunliche Saum, der sich am Eisrand über weite Distanzen verfolgen lässt, lässt erkennen, dass dort eiszeitliches Eis, also Eis, das älter als 11.500 Jahre ist, an der Oberfläche ansteht. In der letzten Eiszeit war der Staubgehalt in der Atmosphäre höher als in der heutigen Warmzeit. Es wurden dementsprechend auch mehr Staubteilchen ins Eis eingelagert. Das Eis schmilzt und die festen Partikel bleiben an der Oberfläche liegen und färben die Eisoberfläche entsprechend.





Steht man im Gletschervorfeld und blickt auf die Gletscherfront, dann erkennt man, wie hoch diese über das Gelände heraus ragt. In den beiden roten Kreisen kann man mit guten Augen einen kleinen Hubschrauber (links) und zwei Menschen (rechts) erkennen.



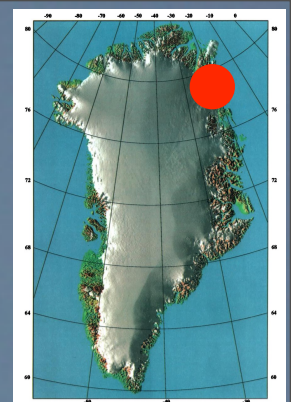


foto: hans oerter, 1993

Geht man noch näher heran, dann mag man vermuten, dass sich hier im Gletscher zwei Eisschichten übereinander schieben. Ein Wasserfall wird von Schmelzwasser gespeist.



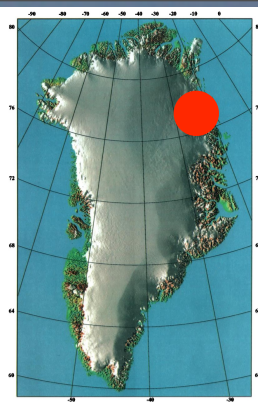


foto: hans oerter, 1989

An anderer Stelle an der Ostküste Grönlands fließt das Inlandeis über den Heinkelgletscher in einen Fjord. Hier erkennt man deutlich, mit welcher Gewalt Eisströme im Laufe der Jahrtausende Landschaft gestalten und tiefe Täler formen können. Vielleicht hätte der Inntalgletscher in der Eiszeit ähnlich ausgesehen.  
Hier oben hatten wir einmal zu zweit ein kleines Camp für zwei Wochen um Eisproben von der Gletscheroberfläche zu sammeln.



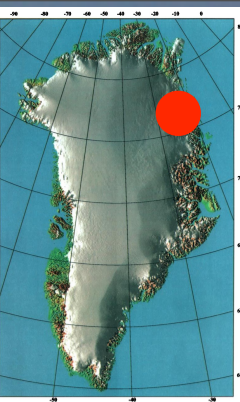
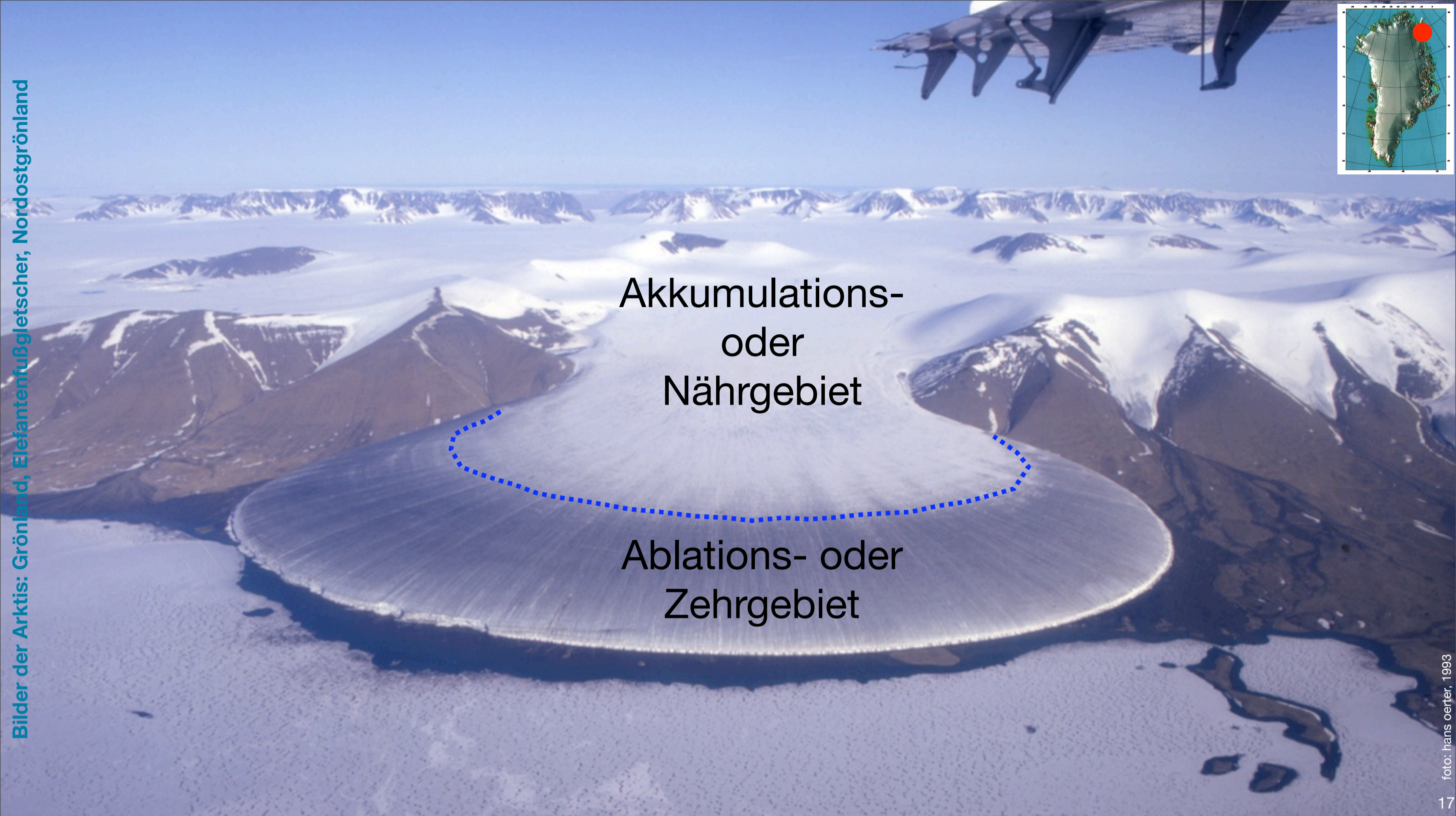
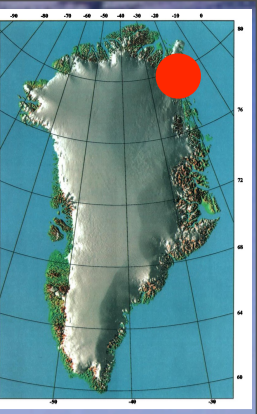


foto: hans oerter, 1989

Und sah das Camp aus. Permafrostboden mit Polygonmustern. Ziemlich steiniger Untergrund!





Akkumulations-  
oder  
Nährgebiet

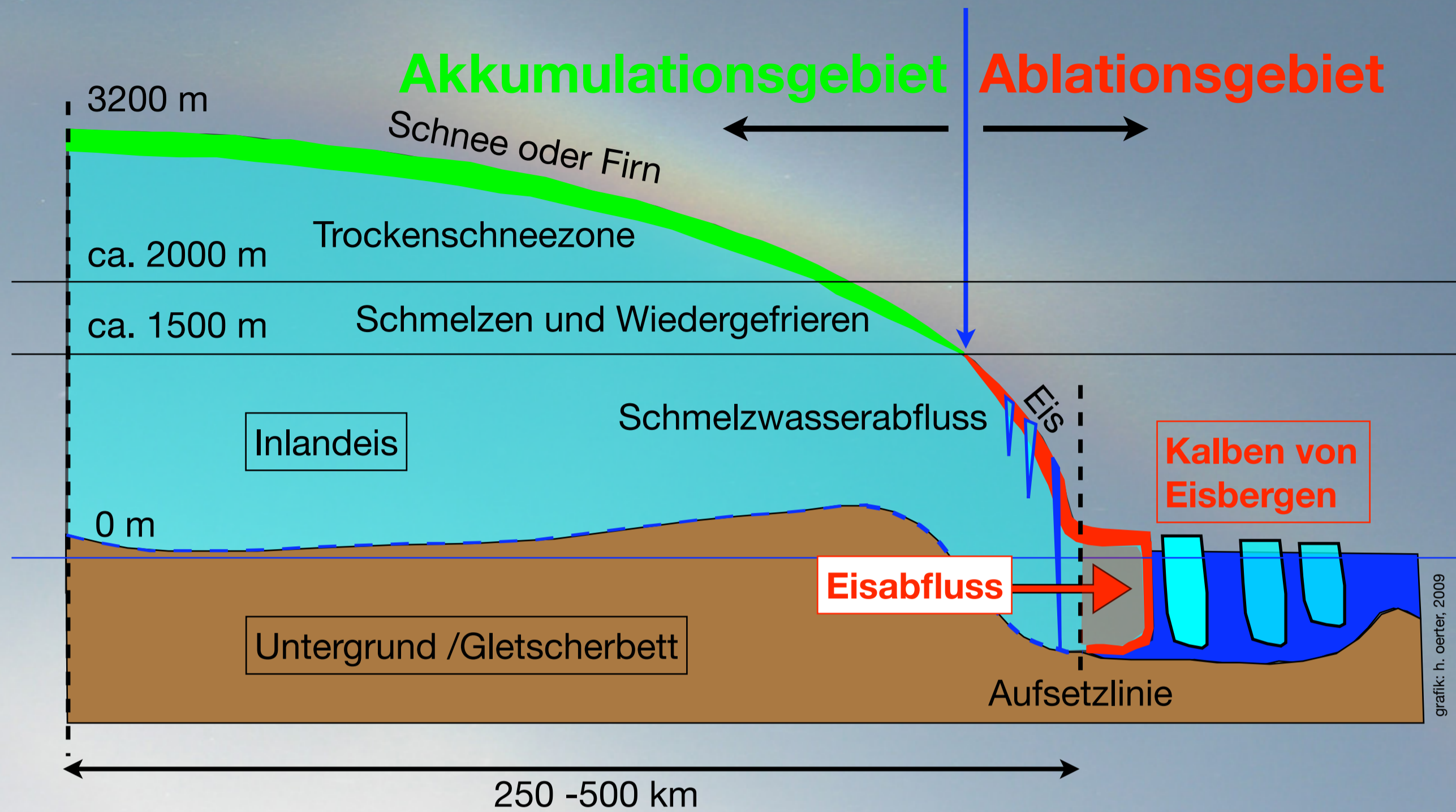
Ablations- oder  
Zehrgebiet

Nicht alle Gletscher Grönlands hängen mit dem Inlandeis zusammen. Hier ein Beispiel aus dem Randgebirge. Der Elefantenfußgletscher liegt in Kronprins Christian Land, Nordostgrönland, bei ca. 80 grad 53 min N, 19 grad 25min W. Das Eis fließt aus der Plateaugletscherung des Gebirgszuges nach Westen, zum Landesinneren hin ab. Der Gletscher gehört zum Typ des Piedmont- oder Vorlandgletschers. Die dunkler gefärbte Oberfläche im unteren Teil des Gletschers ist das Ablations- oder Zehrgebiet. Dort schmilzt im Sommer der winterliche Schnee vollständig ab und das kompakte Gletschereis steht an der Oberfläche an. Das Akkumulations- oder Nährgebiet des Gletschers liegt fast vollständig im Bereich der hochgelegenen Plateaugletscherung. Der See vor dem Gletscher ist Romer Sø. Der maximale Durchmesser des Elefantenfußes bzw. der Gletscherzunge beträgt etwa fünf Kilometer. Die Aufnahme entstand am 14. Juli 1993 beim Flug von Station Nord zu einem Feldcamp bei Centrum Sø.



# Schema zur Massenbilanz von Grönland

## Gleichgewichtslinie



### Was versteht man unter der Massenbilanz eines Gletschers?

Wenn wir der Frage der Massenbilanz des Grönländischen Inlandeises, und damit der Frage nach dem Abschmelzen des Inlandeises, nachgehen wollen, müssen wir einige Zusammenhänge und Begriffe verstehen lernen.

Man unterscheidet bei einem Gletscher und bei den Inlandeisen beziehungsweise Eisschilden das Akkumulationsgebiet (grüne Schicht) und das Ablationsgebiet (rote Schicht).

Das Akkumulationsgebiet ist durch eine positive Massenbilanz an der Oberfläche gekennzeichnet, das heißt der Schneeniederschlag, der dort fällt, bleibt ganz oder zumindest teilweise erhalten.

Die Trennlinie zwischen Ablations- und Akkumulationsgebiet wird als Gleichgewichtslinie bezeichnet.

Im Ablationsgebiet, wo im Allgemeinen kompaktes Eis an der Oberfläche ansteht, wird im Jahresmittel der jährliche Schneeniederschlag und zusätzlich alte Eismasse abgeschmolzen. Dort ist die Massenbilanz negativ.

Wichtig zu wissen ist, ob das Schmelzwasser von geschmolzenem Schnee auch wirklich zum Abfluss gelangt oder aber in tieferen Schichten des Firns wieder gefriert und so als Masse dem Eisschild erhalten bleibt. Derartige läuft in der Zone oberhalb der Gleichgewichtslinie ab. Die Größe der Schneefläche auf der Abschmelzen auftritt, ist also nicht ohne weiteres ein Maß für den tatsächlichen Schmelzwasserabfluss.

In der so genannten Trockenschnee-Zone tritt kein nennenswertes Schmelzen mehr auf.

Zusätzlich kommt es an der Unterseite der schwimmenden Eismassen (Gletscherzungen bzw. Schelfeise) zum Abschmelzen von Eis. In geringem Maße kann auch gegründetes Inlandeis an seiner Unterseite schmelzen. Wasser im Gletscher und am Gletscheruntergrund erleichtert das Fließen des Eises. Es wirkt als Schmiermittel. Der hydrostatische Druck, der sich durch Schmelzwasser oder eindringendes Meerwasser aufbauen kann, kann das Eis etwas anheben und damit das Fließen beschleunigen.

Entscheidend für Zunahme oder Abnahme der Eismasse sind nicht nur die Prozesse an der Oberfläche, also die Oberflächenmassenbilanz, sondern auch der direkte Abfluss von Eis ins Meer, über die so genannte Aufsetzlinie. Aus diesen, dann schwimmenden, Gletscherzungen entstehen die Eisberge.

Wie groß sind die Komponenten der Massenbilanz,

die Akkumulation beziehungsweise der Schneezutrag,

die Ablation beziehungsweise Abschmelzung und der daraus resultierende Schmelzwasserabfluss

sowie der direkte Eisabfluss ins Meer?



# Oberflächen-Massenbilanz des Inlandeises

Akkumulation  
ansteigend

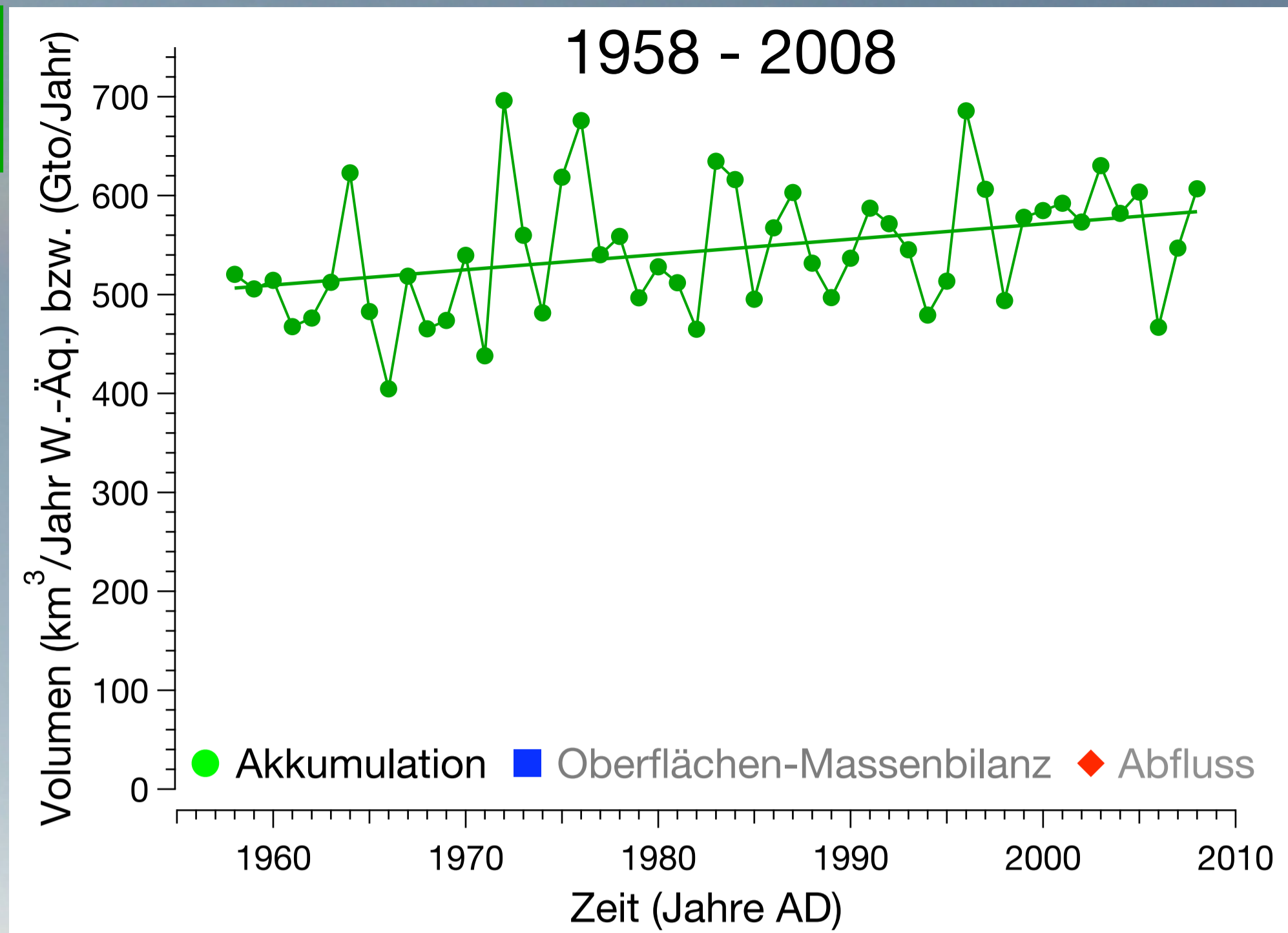


Abbildung nach Hanna et al. (2008); Daten für 2008 von Hanna (pers. Mitt.)

E. Hanna et al. (2008): Increased Runoff from Melt from the Greenland Ice Sheet: A Response to Global Warming. *J. Climate* **21**, 331-341

Edward Hanna et al. haben versucht, eine Zeitreihe der Oberflächenmassenbilanz für das ganze Inlandeis zu berechnen und sie haben diese Ergebnisse 2008 im Journal of Climate veröffentlicht. Die Zeitreihe umfasst die Jahre 1958-2007, also die zurückliegenden fünfzig Jahre zwischen Internationalem Geophysikalisches Jahr (IGY) 1957/58 (beziehungsweise dem 3. Internationalen Polarjahr) und dem im Februar 2009 zu Ende gegangenen vierten Internationalen Polarjahr 2007/2008. Für diesen Vortrag bekam ich zusätzlich noch die Werte für 2008.

Betrachten wir zuerst die berechneten Akkumulationswerte. Man erkennt, dass die Akkumulationswerte in diesen fünfzig Jahren deutlich angestiegen sind und dass große Schwankungen zwischen den einzelnen Jahren die Zeitreihe charakterisieren.



# Oberflächen-Massenbilanz des Inlandeises

Akkumulation  
ansteigend

Schmelz-  
wasserabfluss  
ansteigend

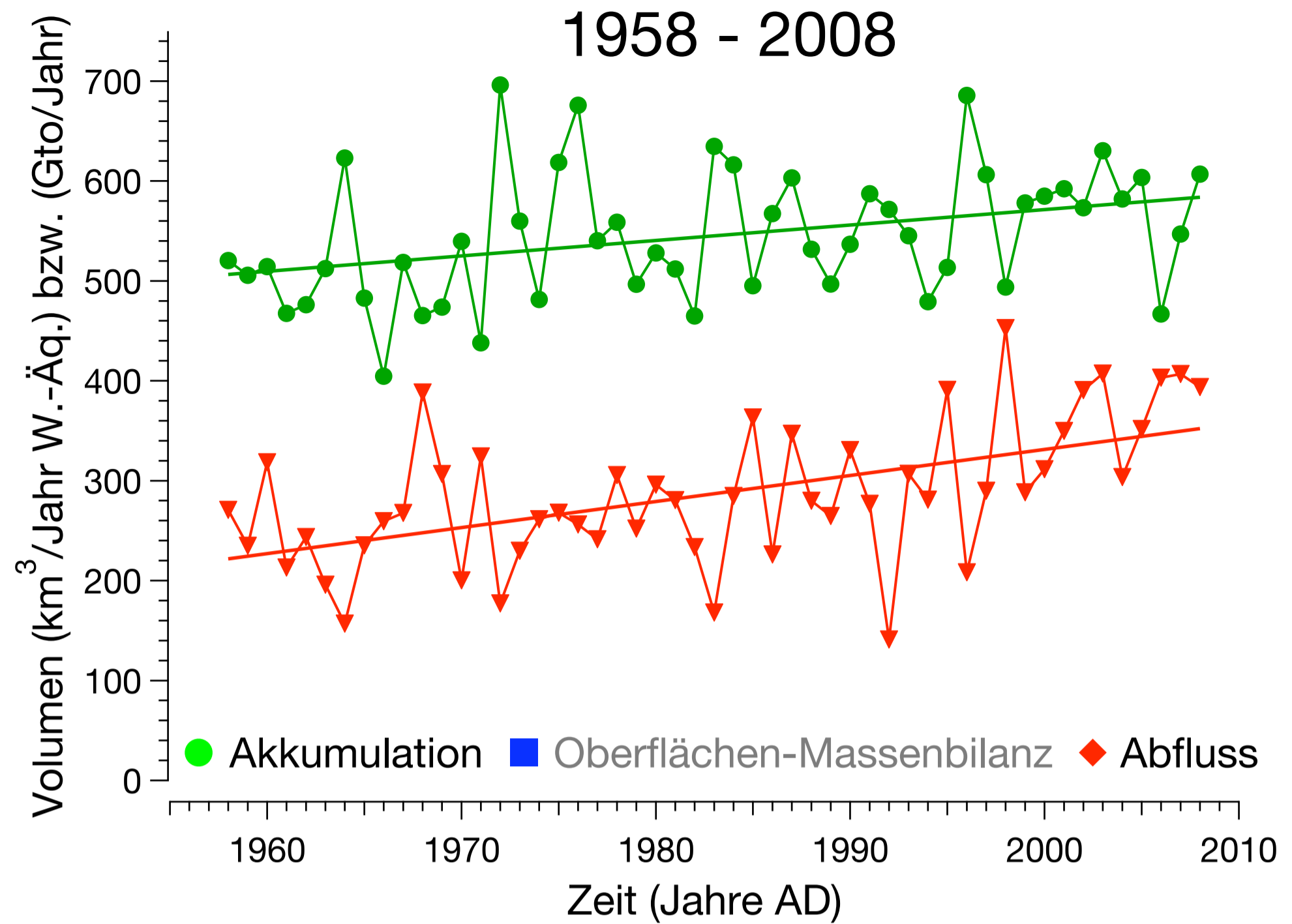


Abbildung nach Hanna et al. (2008); Daten für 2008 von Hanna (pers. Mitt.)

E. Hanna et al. (2008): Increased Runoff from Melt from the Greenland Ice Sheet: A Response to Global Warming. *J. Climate* **21**, 331-341



# Oberflächen-Massenbilanz des Inlandeises

Akkumulation  
ansteigend

Oberflächen-  
Massenbilanz  
leicht  
abnehmend

Schmelz-  
wasserabfluss  
ansteigend

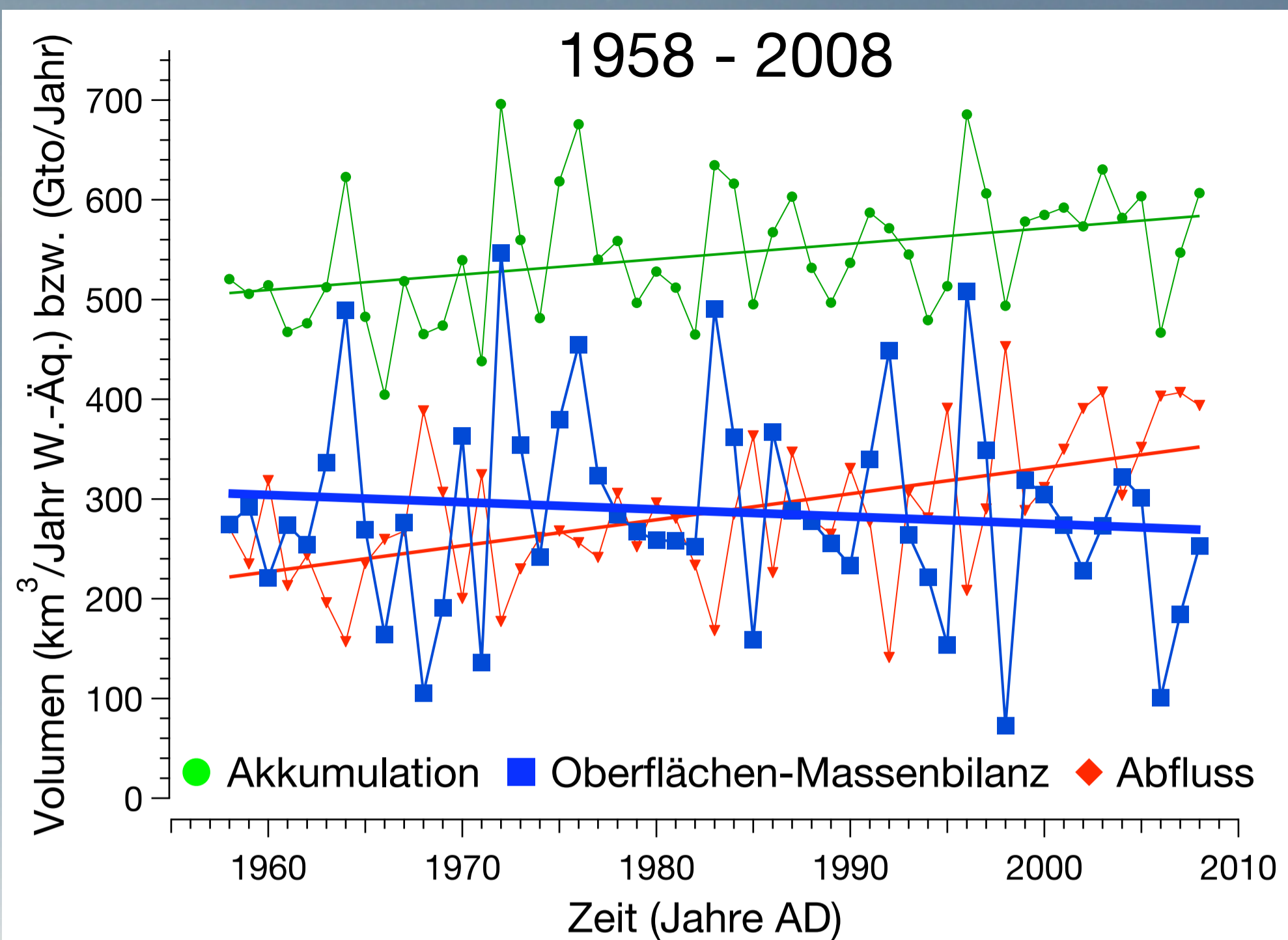
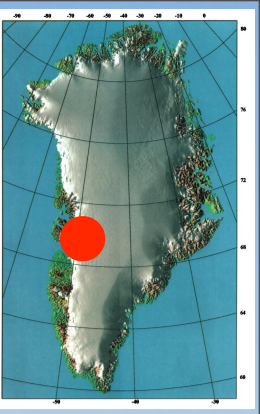


Abbildung nach Hanna et al. (2008); Daten für 2008 von Hanna (pers. Mitt.)

E. Hanna et al. (2008): Increased Runoff from Melt from the Greenland Ice Sheet: A Response to Global Warming. *J. Climate* **21**, 331-341

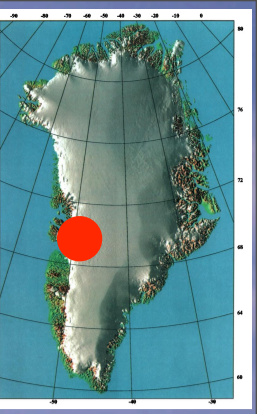
Die resultierende Massenbilanz an der Oberfläche weist eine geringe Abnahme auf. Das heißt, ein Teil der gestiegenen Schmelzbeträge wurde durch zunehmende Schneeniederschläge kompensiert. Wie wir später sehen werden, sind die steigenden Abschmelzraten nicht die entscheidende Komponente für die deutlich negative Gesamtmassenbilanz des Eisschildes. Diese lässt sich erst erklären, wenn wir auch den direkten Eisabfluss ins Meer mit berücksichtigen.





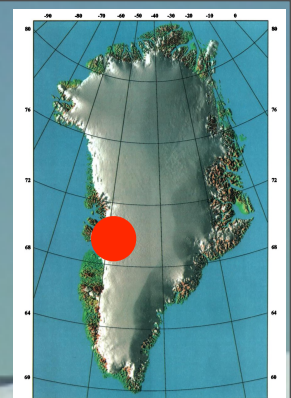
Gehen wir nun zur Westküste Grönlands in die Diskobucht, in die Nähe der Stadt Jakobshavn oder mit grönländischem Namen Ilulissat. Hier können wir einen Blick auf den Jakobshavn Isfjord und seine wunderbaren Eisberge werfen.





Der Gletscher oder Eisstrom, der diese Eisberge produziert liegt am Ende des 50 Kilometer langen Fjords. 40 Meter pro Tag schiebt sich die Kalbungsfront ins Meer vor. Entsprechend viel Eis wird so ins Meer abgeführt. Es ist wohl der schnellste Gletscher Grönlands. Erst in den letzten Jahren hat der Gletscher deutlich an Fahrt zugelegt und seine Geschwindigkeit nahezu verdoppelt und so den Wert von 40 Metern pro Tag erreicht. Wahrscheinlich sind dafür die steigenden Temperaturen in Grönland verantwortlich. Es wird mehr Schmelzwasser an der Oberfläche produziert, das ans Gletscherbett gelangt und dort als zusätzliches Schmier- oder Gleitmittel wirkt.

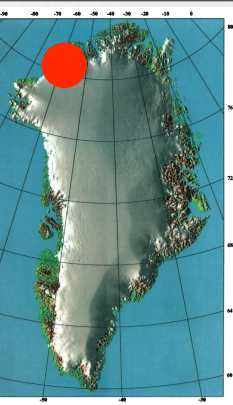




Auch von See aus betrachtet, wirken die Eisberge gewaltig.

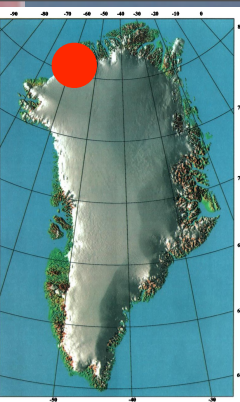
Soviel vorerst vom Eis auf Grönland, das infolge des Klimawandels heute stärker schmilzt als vor zwanzig Jahren. Ich hatte eingangs bereits gesagt, die Arktis ist bewohntes Land und deshalb betrifft der Klimawandel in der Arktis nicht nur die Eismassen, sondern auch Menschen. Deshalb jetzt ein paar Bilder von den Menschen, die dort leben und die wir früher Eskimo nannten.





Besuchen wir zuerst die nördlichste Gemeinde in Grönland, Qaanaaq oder auch Thule genannt. Sie liegt bei  $77^{\circ}29'N$ ,  $69^{\circ}20'W$ , wurde an diesem Ort erst 1953 gegründet und hat etwa 650 Einwohner.





129

Bilder der Arktis: Menschen, Qaanaaq (Thule), Nordgrönland



foto: hans oerter, 2006

Zu der Festtagstracht der im Norden wohnenden Inuit, so werden die einheimischen Bewohner der Arktis heute genannt, gehören die Hosen aus Eisbärenfell. Solche warmen Hosen werden auch bei der winterlichen Jagd getragen.





In der kanadischen Arktis hat sich eine andere Mode entwickelt.





Die großen Kapuzen der Kleider haben eine wichtige Funktion: In ihnen werden Babies und Kleinstkinder getragen.

Wenn wir uns Gedanken über klimatische Veränderungen, ihre Ursachen und Wirkungen machen, müssen wir auch an jene Kinder denken, die heute noch in den Kapuzen der Inuit getragen werden. Wie wird sich die Arktis, wie wird sich ihr Lebensraum verändern?

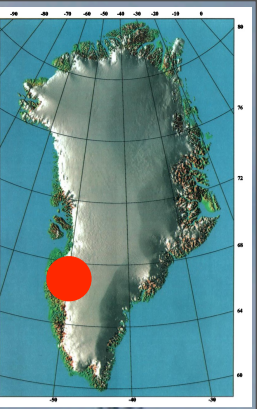




foto: hans oerter

Fischfang und Robbenjagd gehören seit Jahrhunderten zum Lebensalltag der einheimischen arktischen Bevölkerung. Robben bieten Fleisch für menschliche Nahrung und mit Robbenfleisch werden auch die Schlittenhunde gefüttert.





Der Lebensalltag in Grönland ist jedoch mehr als die bisher gezeigten, vielleicht etwas idealisierend wirkenden Bilder. Kommt man in die Hauptstadt Nuuk, eine Stadt mit etwa 15.000 Einwohnern, dann erkennt man, die Grönländer wohnen in Häusern, kaufen in Supermärkten ein und tragen die gleichen Modemarken, die auch in Dänemark oder bei uns bei der Jugend beliebt sind. Es ist eine Gesellschaft im Umbruch, zwischen Tradition und Globalisierung. Handy und Internet sind gängige Kommunikationsmittel.



# Zeugen des Klimawandels in der Gegenwart: das Meereis im Nordpolarmeer



foto: hans oerter, 2007

## Zeugen des Klimawandels in der Gegenwart: das Meereis im Nordpolarmeer.

Sie alle haben in den Medien gesehen, gehört oder gelesen, dass die sommerliche Meereisbedeckung im Nordpolarmeer in den letzten Jahren drastisch zurückging. Es gibt Abschätzungen, dass das Nordpolarmeer in den nächsten 50-100 Jahren im Sommer komplett eisfrei sein könnte. Das weckt Begehrlichkeiten, denn dann wäre das Nordpolarmeer im Sommer mehr oder weniger frei schiffbar und man könnte Bodenschätze vom Meersboden abbauen. Die Aussicht auf wirtschaftlichen Gewinn überwiegt sehr schnell die Sorge um das Überleben einer Tierart. Und daraus können in der Zukunft auch politische Konflikte entstehen. Ich will Ihnen in den nächsten Folien einiges über das arktische Meereis zeigen.





Ein reichhaltiges Nahrungsangebot bietet, zumindest bisher, nur das Meer. Wer sich aus dem Meer ernähren kann, wird in der Arktis 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 durch diese klimatischen Veränderungen 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.





Hauptnahrung für den Bären die auf dem Meereis ruhenden Robben. Wenn aber, wie hier für diese Bartrobbe nur noch einzelne kleine Schollen als Rastplatz verfügbar sind, hat der Bär keine Chance auf Jagderfolg. Eine schwimmende und tauchende Robbe ist zu schnell für ihn.



Gefrieren von  
Meerwasser bei ca.  
-1.9 °C

frühes Stadium der  
Meereisbildung:

Pfannkucheneis

Beim Gefrieren wird  
Wasser und Salz  
getrennt.  
Salz sinkt nach unten

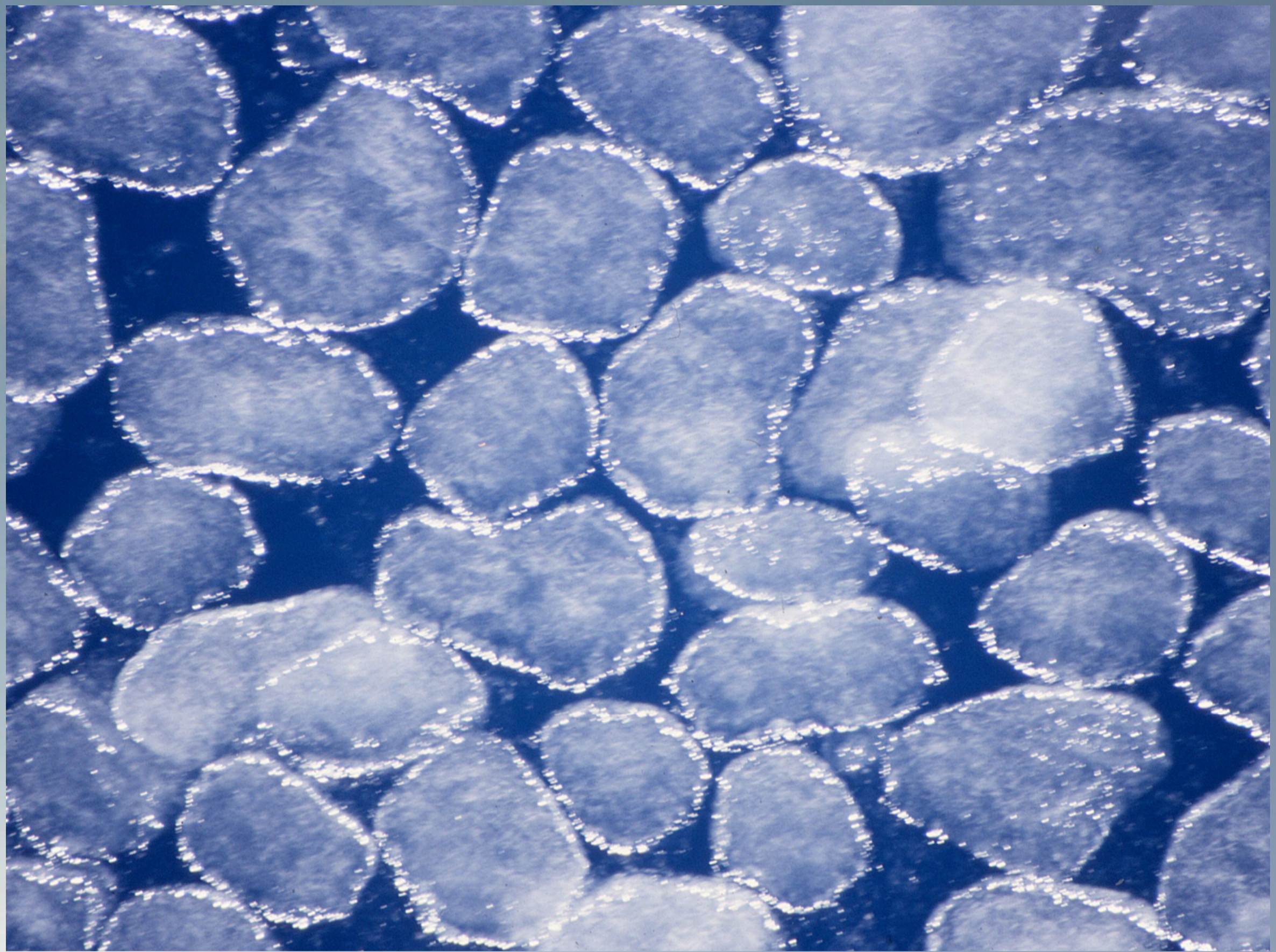


foto: hans oerter, 1987

#### Wie entsteht Meereis?

Meerwasser gefriert bei ca. -1.9 °C, abhängig vom Salzgehalt. Beim Gefrieren von Meerwasser wird das gefrierende Wasser vom eingeschlossenen Salz getrennt. Das Meereis wird also süß und das Salz sinkt nach unten ab. Dadurch werden die darunter liegenden Wasserschichten kälter und salzreicher, und damit schwerer und sinken weiter in die Tiefe. Dieser Prozess hat große Bedeutung für die globalen Meeresströmungen. Denn nur wenn an einer Stelle Wasser in die Tiefe absinkt, kann an der Oberfläche neues Wasser einströmen. Diesen Mechanismus treffen wir zum Beispiel im Nordatlantik an. Das warme Golfstromwasser kann nur nach Norden strömen, wenn entsprechend viel kaltes, salzreiches Wasser als neu gebildetes Tiefenwasser nach Süden aus dem arktischen Becken ausströmt.

Das neue Meereis durchläuft verschiedene Stadien, bevor sich eine geschlossene Eisdecke gebildet hat. Eines davon ist das so genannte Pfannkucheneis. Diese kleinen, dünnen Eisschollen, stößt der Wind immer wieder gegen einander und lässt dadurch die aufgewölbten Ränder entstehen.

Meereis bleibt immer in Bewegung und wird von Wind und Meeresströmung über das Nordpolarmeer bewegt.



# geschlossene Meereisdecke



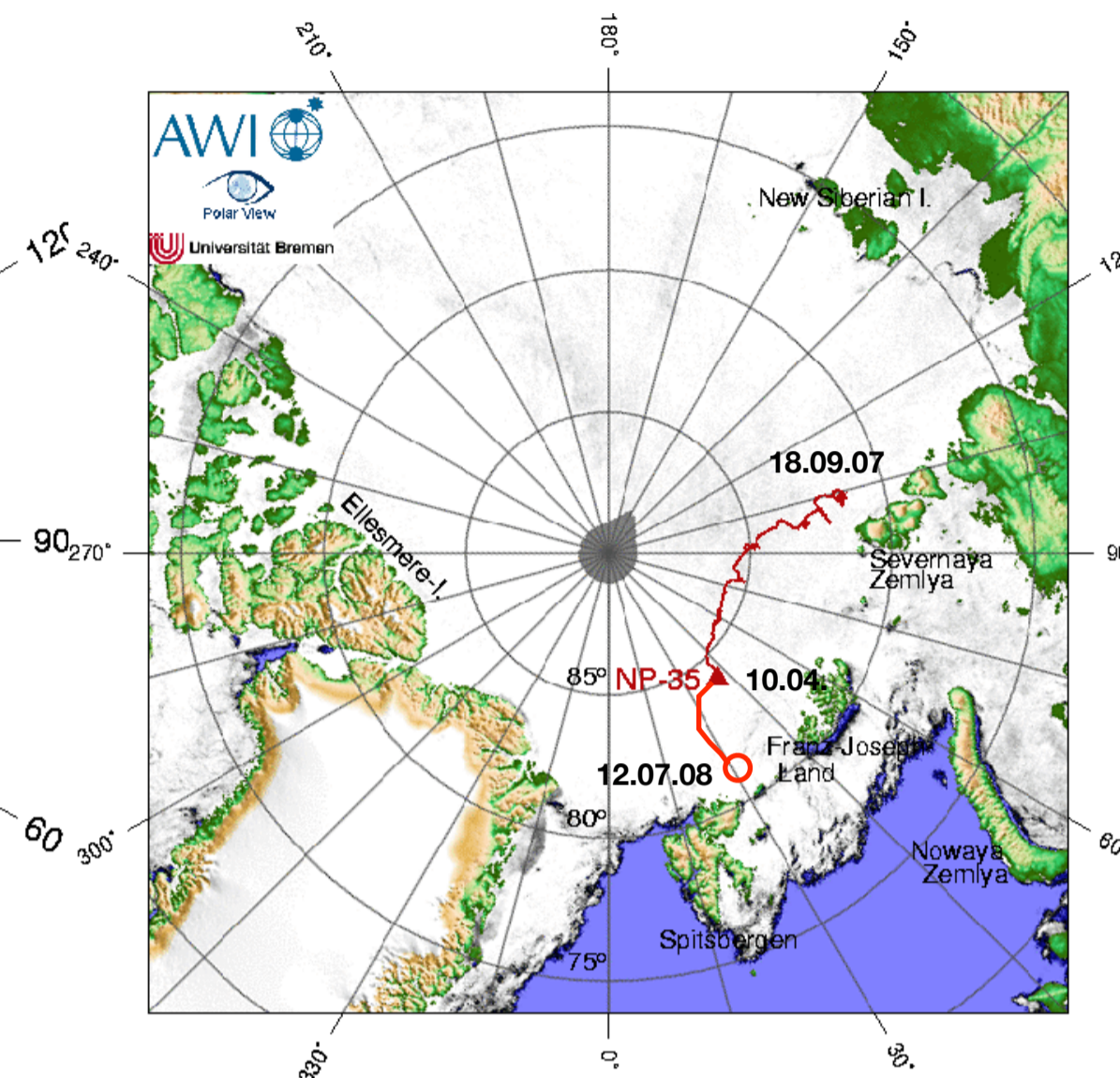
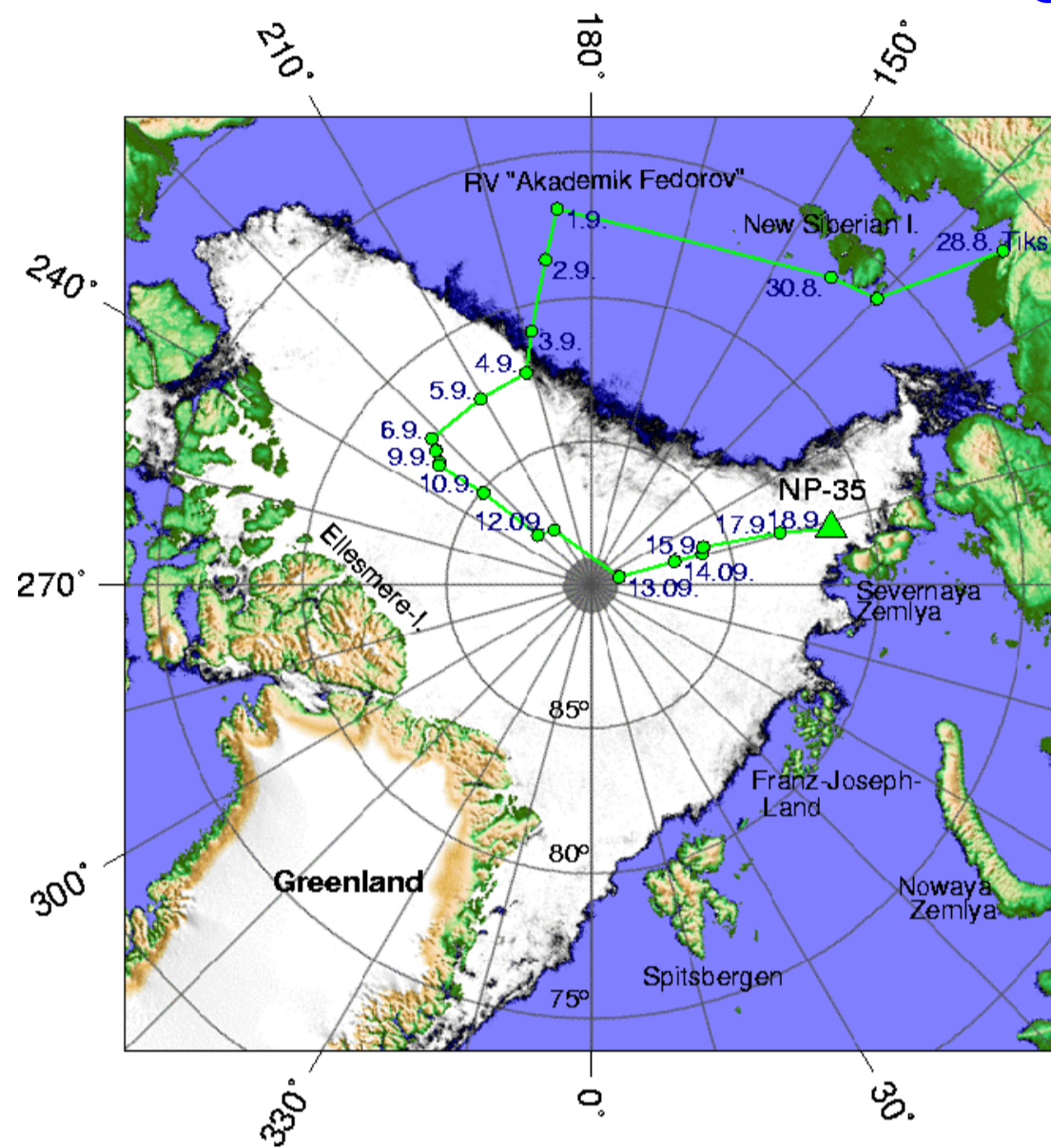
Eine Eisscholle als  
Forschungsplattform:  
Russische Driftstation  
NP 35, 2008

Im Laufe des Winters bildet sich eine geschlossene Meereisdecke aus, die aber nach wie vor mit den Meeresströmungen driftet. Von Russland werden seit Jahrzehnten Camps auf großen Eisschollen ausgesetzt, die dann quer durch das Nordpolarmeer driften sollen. Hier als Beispiele die Station NP35 aus dem Jahr 2008.



## Rekordminimum (Sep. 2007) Arktische Meereisbedeckung

## NP 35 Route

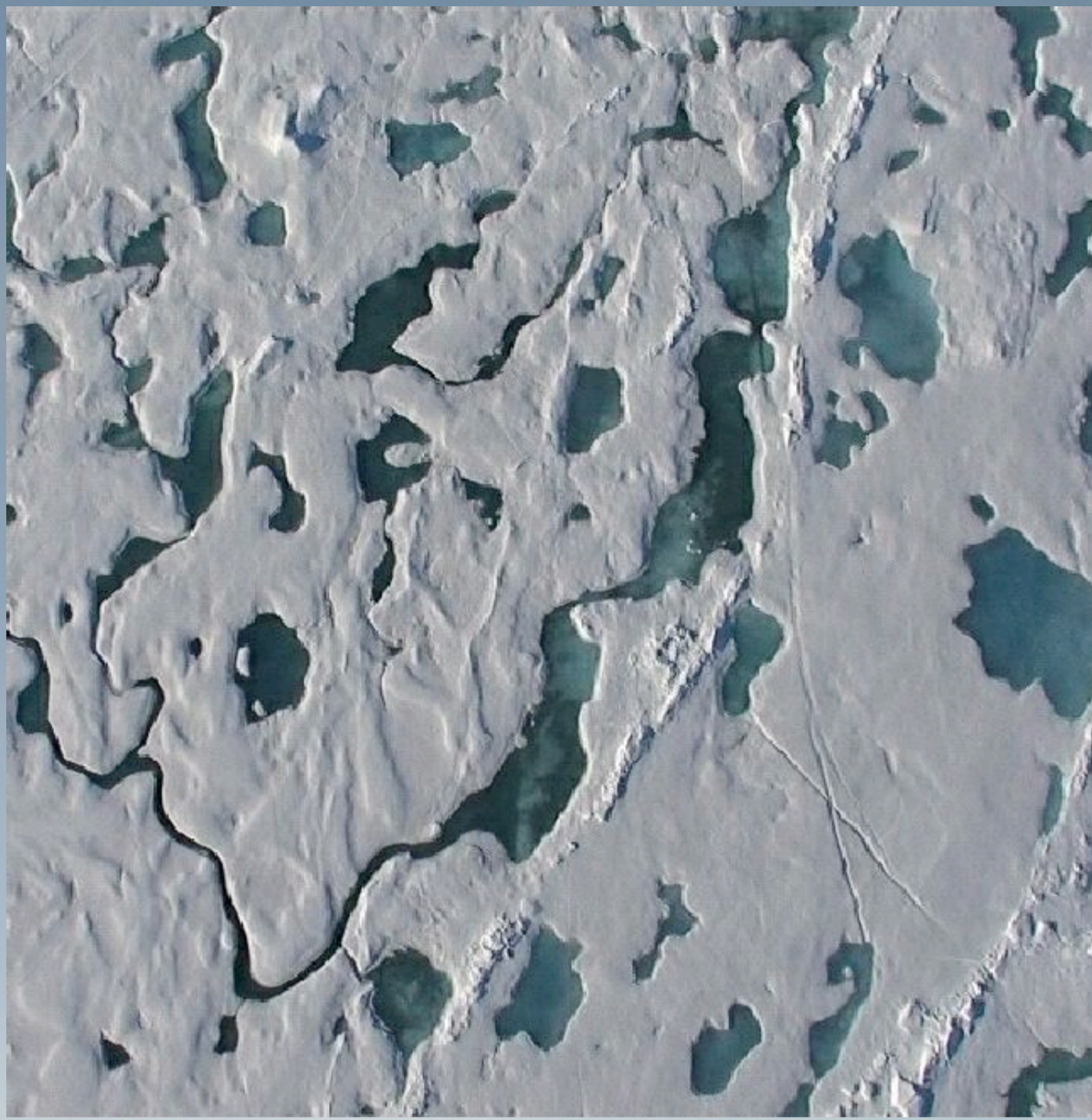


K. Dethloff/AWI (pers. Mitt., 2008)

Der russische Eisbrecher Akademik Fedorov hat das Camp NP35 im September 2007 auf der Eisscholle ausgesetzt. Die linke Abbildung zeigt die Route des Schiffes, bis eine auch am Ende des Sommers noch genügend große Eisscholle gefunden wurde. Auf der rechten Abbildung ist die Route eingezeichnet, entlang der die Eisscholle durch das Nordpolarmeer driftete. Im April 2008 wurde der deutsche Teilnehmer der Expedition, der meteorologische Messungen durchgeführt hatte, mit dem Flugzeug von der Scholle abgeholt. Im Juli 2008 musste das Camp dann aufgelöst werden, da die Eisscholle zu klein geworden war



# schmelzendes Meereis in der Arktis



← 150 m →

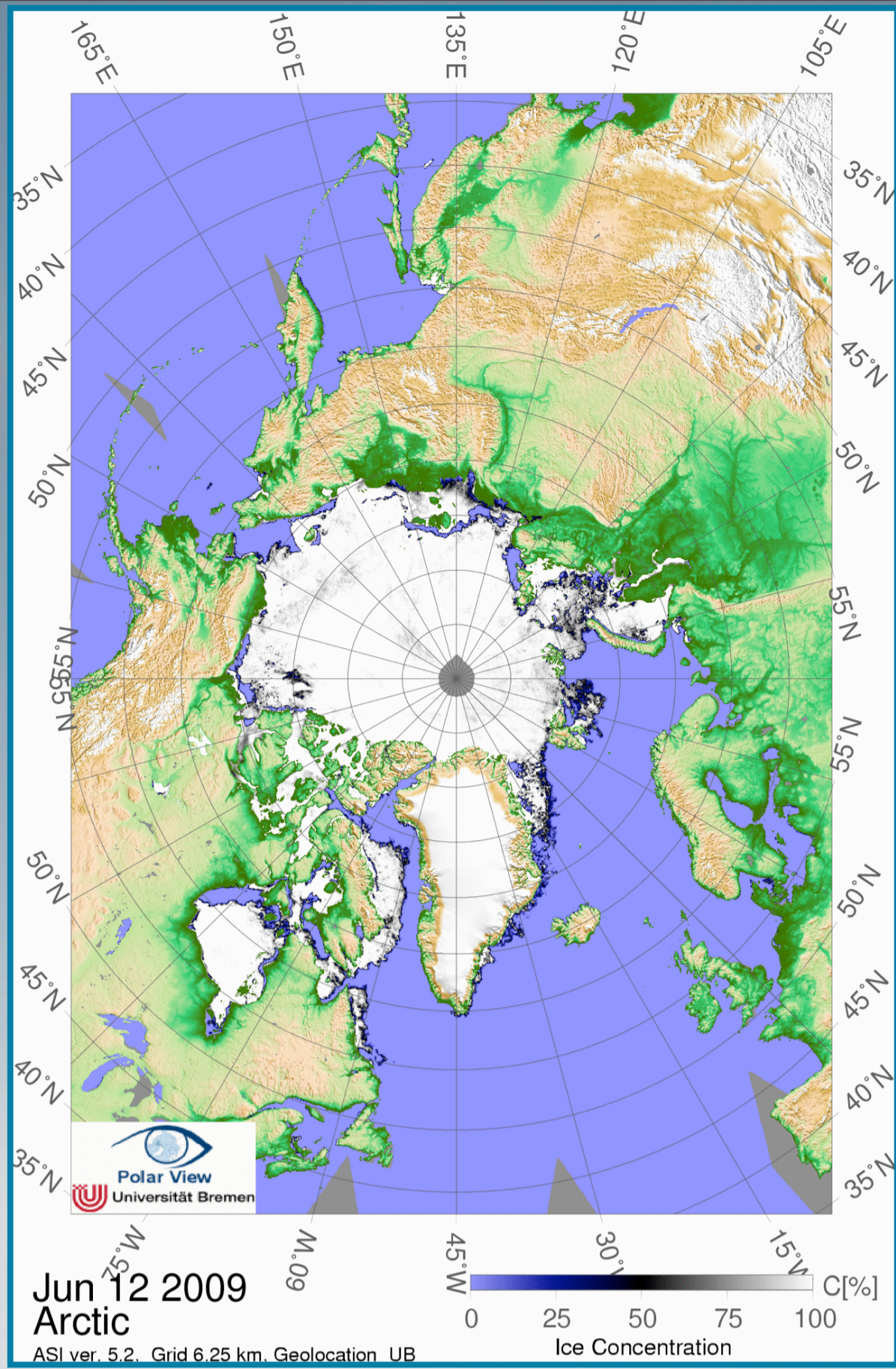


fotos: Christian Haas/AWI

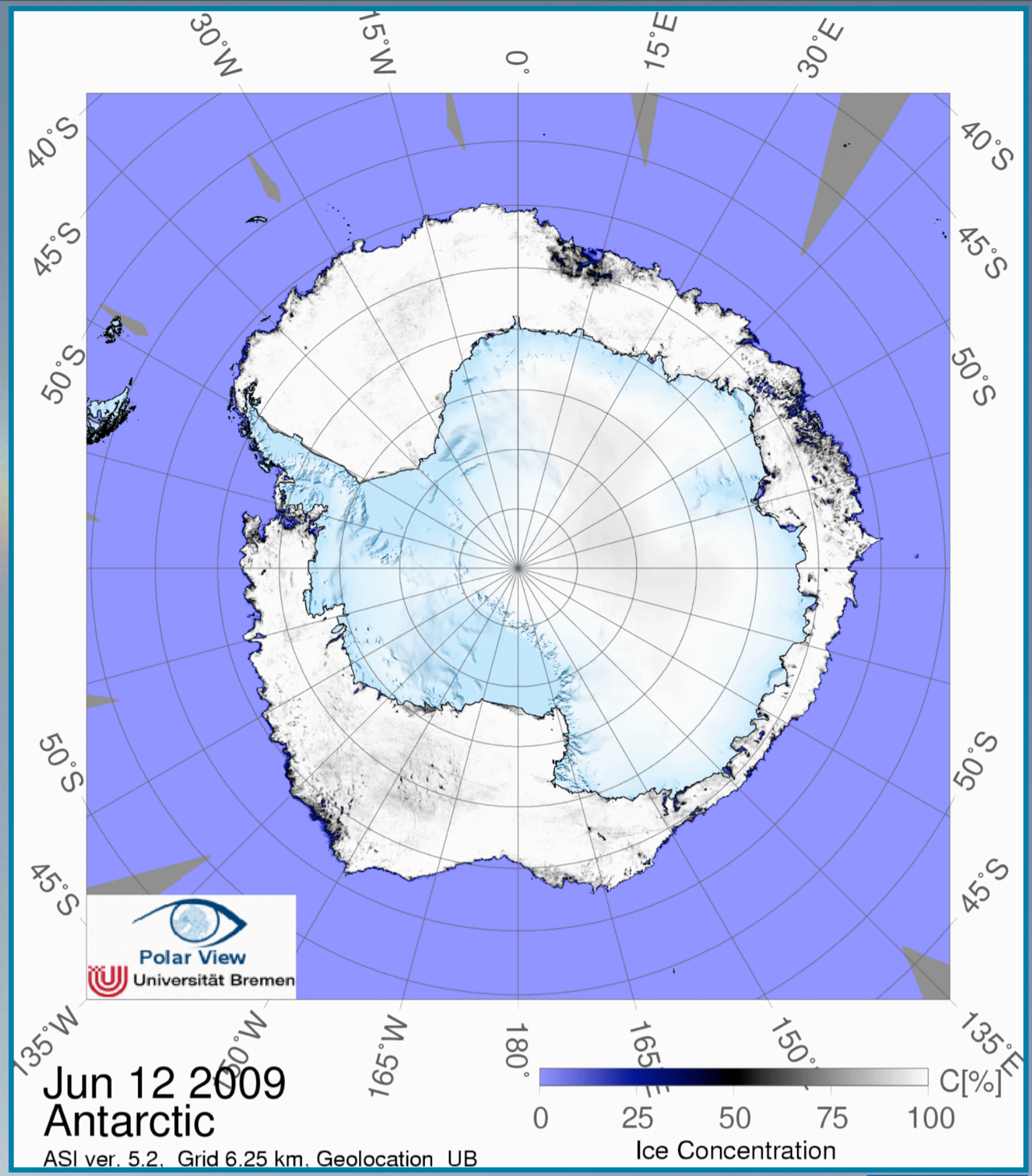
Im Sommer schmilzt das Meereis im Nordpolarmeer. Das Schmelzwasser sammelt sich in Tümpeln auf dem Meereis, die der sommerlichen Meereisoberfläche in der Arktis eine sehr eigene, charakteristische Struktur verleihen. Das Eis am Boden dieser Tümpel, sozusagen durch ein kleines Treibhaus geschützt, wird stärker schmelzen als das weiße Eis in der Umgebung.



# Meereisausdehnung Arktis



# Meereisausdehnung Antarktis



Durch den Zyklus von Gefrieren, Verfrachtung und Schmelzen verändert sich die eisbedeckte Meereisfläche im Lauf eines Jahres ständig.

Werfen wir einen Blick auf eine aktuelle Meereiskarte für die Arktis, so sehen wird, dass die maximale, winterliche Ausdehnung bereits überschritten ist und die eisbedeckte Fläche anfängt wieder abzunehmen. Ende September wird dann das Minimum erreicht sein.

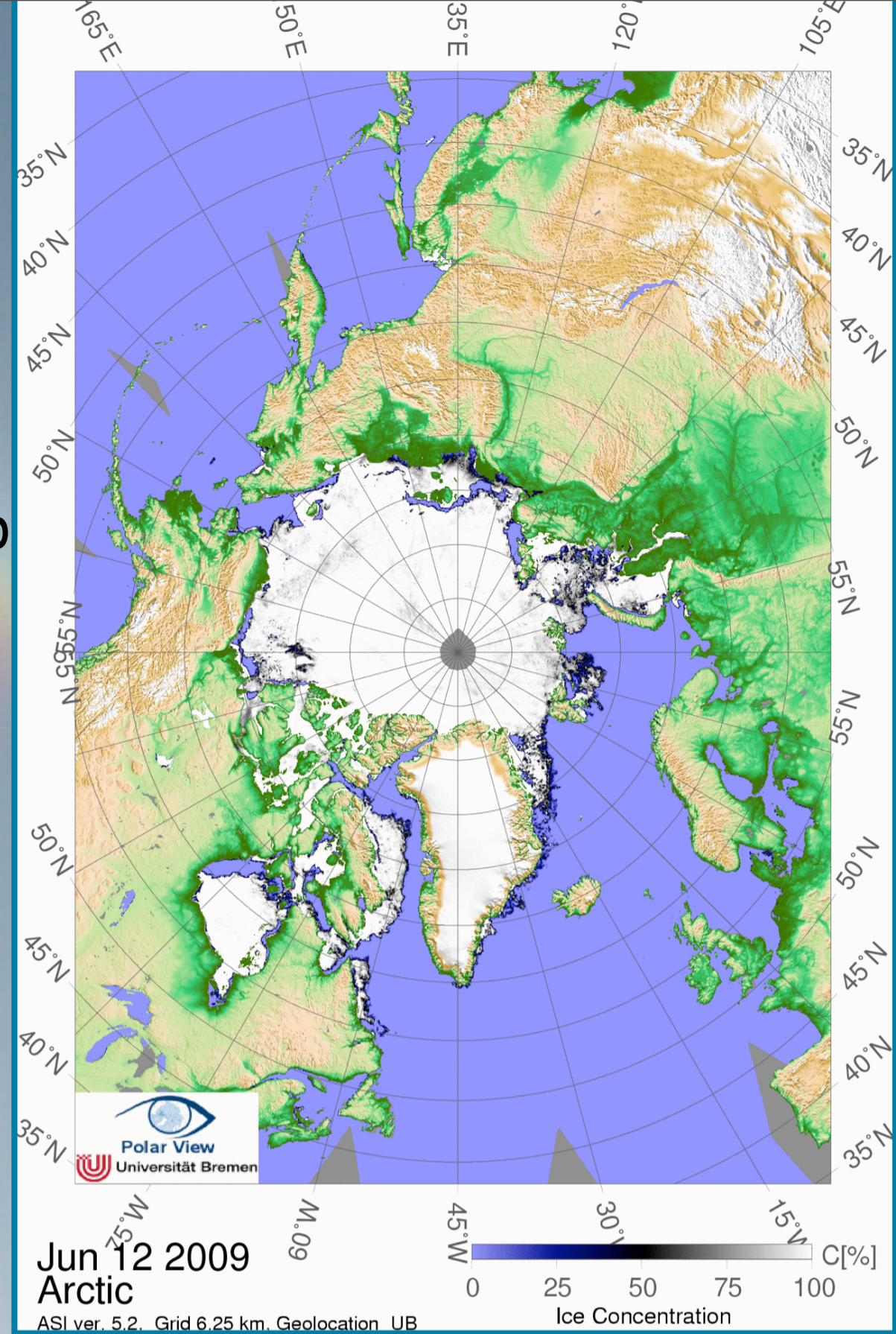
Noch ist das zentrale Nordpolar völlig eisbedeckt und auch in der kanadischen Arktis waren über den Winter alle jene Fjorde und Sunde wieder zugefroren, die im letzten Herbst ein freies Passieren der Nordwestpassage erlaubt hatten.

Vielleicht zur Erinnerung: Auf der andere Seite der Erde, in der Antarktis ist es jetzt mitten im Winter und die Meereisausdehnung erreicht ihr Maximum.



# Veränderung der Meereisausdehnung von Sommer 2002 bis Sommer 2005

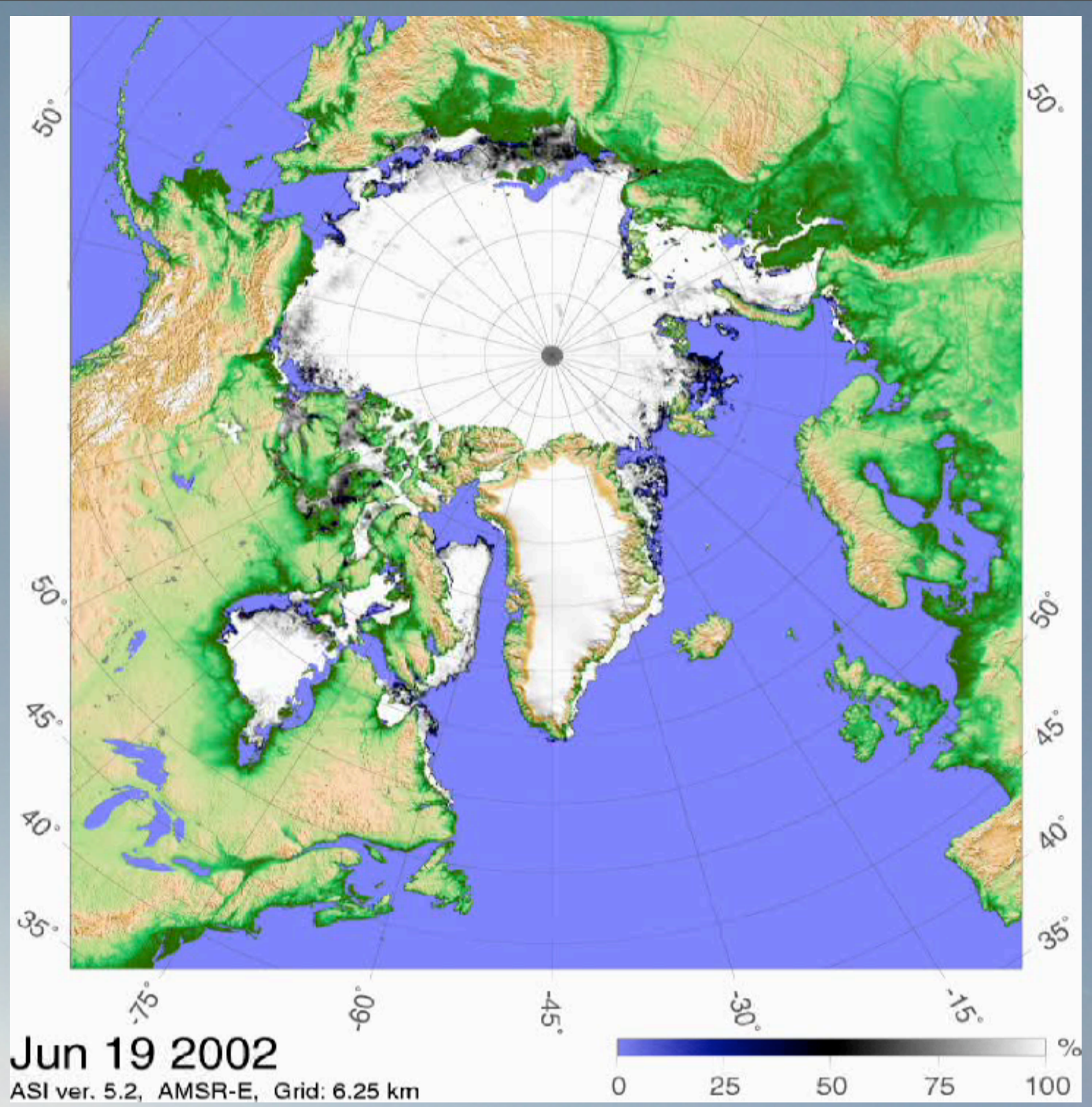
## Meereisausdehnung Arktis



Ein kleiner Film zeigt die Veränderung der Meereisausdehnung von Sommer 2002 bis Sommer 2005. Achten Sie dabei besonders auf die Küsten um Grönland und die kanadische Arktis um zu sehen, wie stark sich in diesen Gebieten die eisbedeckte Fläche im Lauf eines Jahres verändert.



# Veränderung der Meereisausdehnung von Sommer 2002 bis Sommer 2005







Karte des Meereises im Nordpolarmeer, berechnet von AMSR-E Daten unter Verwendung des ARTIST Meereis-Algorithmus (ASI 5).  
Quelle: Universität Bremen; <http://www.iup.uni-bremen.de:8084/amr/amre.html>

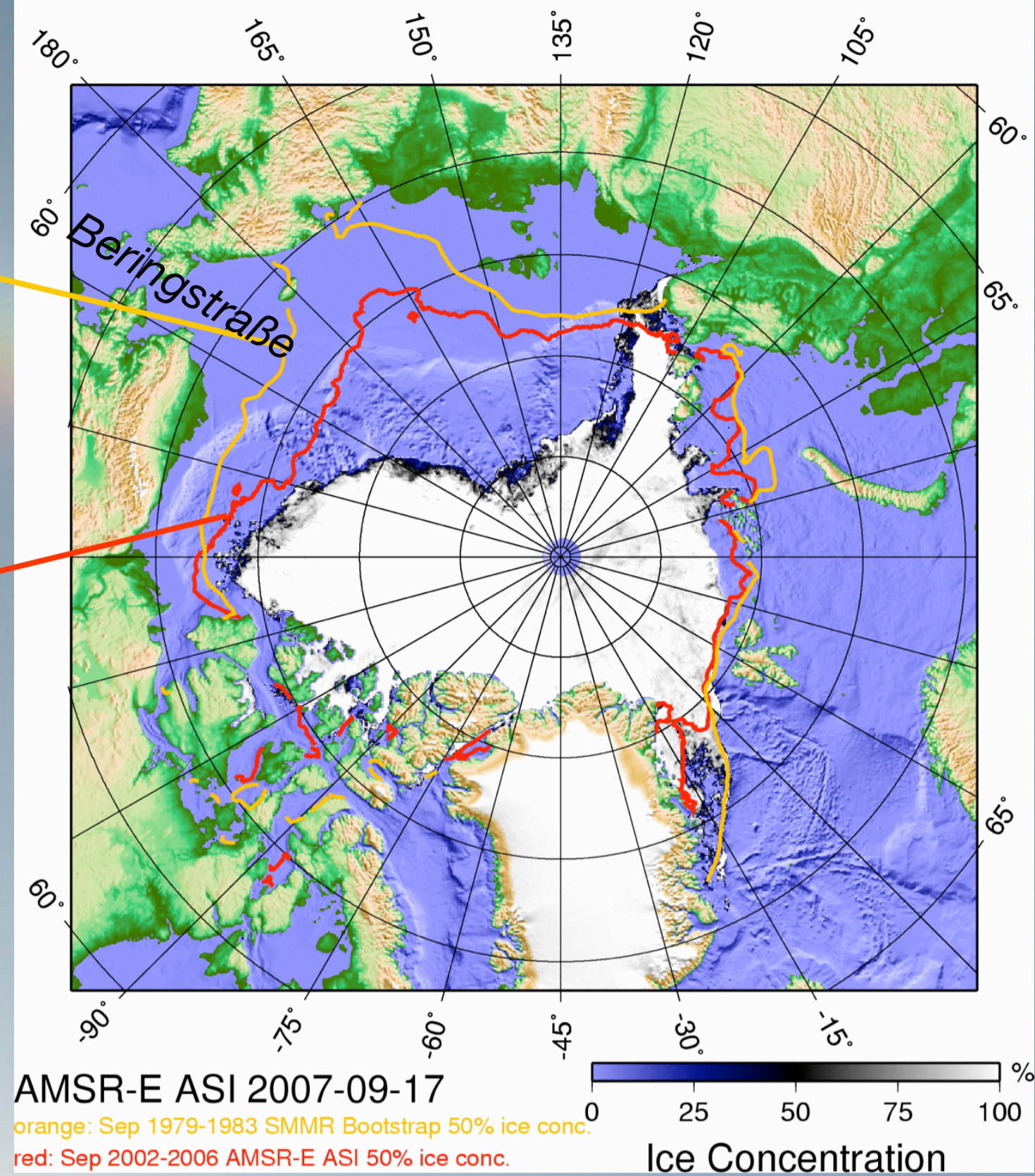
Nach den vorliegenden Aufzeichnungen war Ende September 2007 die Meereisbedeckung bisher am geringsten. Die Nordwestpassage war völlig eisfrei, die Nordostpassage nur in einem kleinen Gebiet mit Meereis blockiert. Besonders auffallend und bedenklich ist das weite Zurückweichen des Eises im Bereich der Behringstraße und nördlich des sibirischen Schelfes. 2008 war die Meereisbedeckung nur geringfügig größer. Das besondere aber war, das Nordwest- und Nordostpassage gleichzeitig eisfrei waren. Und die Prognose für das Ende des Sommers 2009 geht dahin, dass wahrscheinlich wieder ein so geringer Stand wie 2008 erreicht wird.



# minimale Ausdehnung Meereis 2007

Mittel Meereisausdehnung  
Ende September 1979-1983  
(50% Bedeckung)

Mittel Meereisausdehnung  
Ende September 2002-2006  
(50% Bedeckung)



Quelle: Universität Bremen; <http://www.iup.uni-bremen.de:8084/amsr/amsre.html>

Wieviel Meereisbedeckung in den letzten 25 Jahren verloren ging, wird deutlich, wenn man die mittlere Grenze des Meereises für die Jahre 1979-1983 (orange Linie) und 2002-2006 (rote Linie) in die Karte einzeichnet und mit der minimalen Ausdehnung von 2007 vergleicht. Ältere Daten sind kaum erhältlich, da die Beobachtung unserer Erde mit Satelliten aus dem Weltraum erst Ende der 1970er Jahre begann.

Die Karte kann uns nur Flächenänderungen mitteilen. Wie groß die Eismassenänderung gewesen ist, kann man daraus nicht ableiten. Es könnte zum Beispiel sein, dass sich die Eisdicken geändert dadurch verändert haben, dass das Meereis gegen die kanadische Arktisküste gedrückt wurde und sich dort aufgestaut hat.

Systematische Eisdickenmessungen über diesen Zeitraum sind jedoch noch seltener, als die Satellitenbilder. Eisdicken aus dem Weltraum zu messen wird erst in jüngster Zeit möglich. Man misst die Höhe des Freibords (Eisoberfläche über Meeresspiegel) und berechnet daraus die Eisdicke. Aber diese Messungen müssen mit Messungen auf dem Meereis selbst kalibriert werden.



# Eisdickenmessungen des AWI, Bremerhaven mit FS Polarstern 1991-2007



foto: Archiv AWI

Der deutsche Forschungseisbrecher Polarstern, der vom Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven betrieben wird, war seit 1996 mehrfach im Nordpolarmeer unterwegs. Wissenschaftler an Bord haben mit der aus der Geophysik bekannten Methoden der Elektromagnetik Eisdicken gemessen.



# Eisdickenmessungen des AWI, 1991-2007

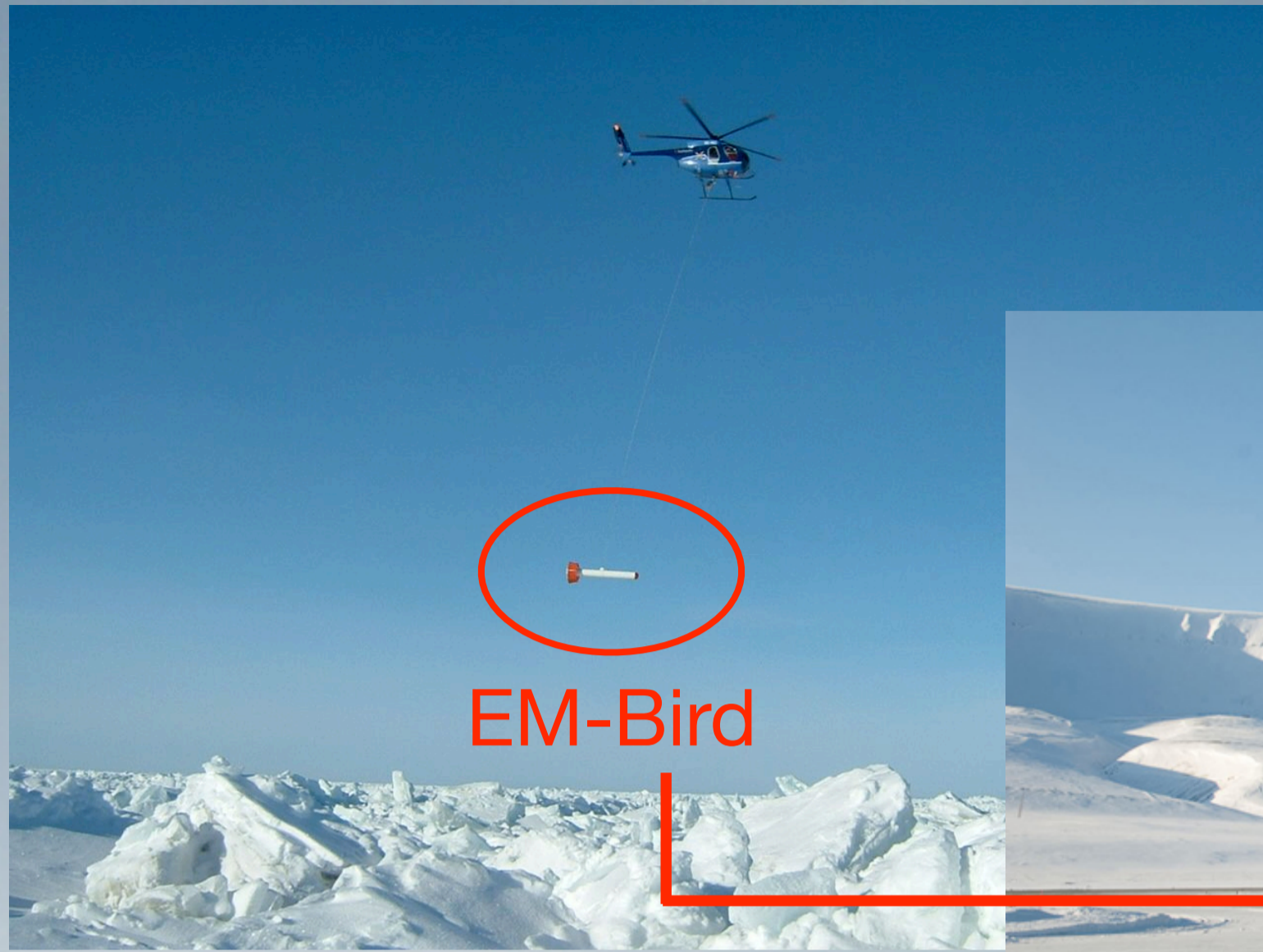


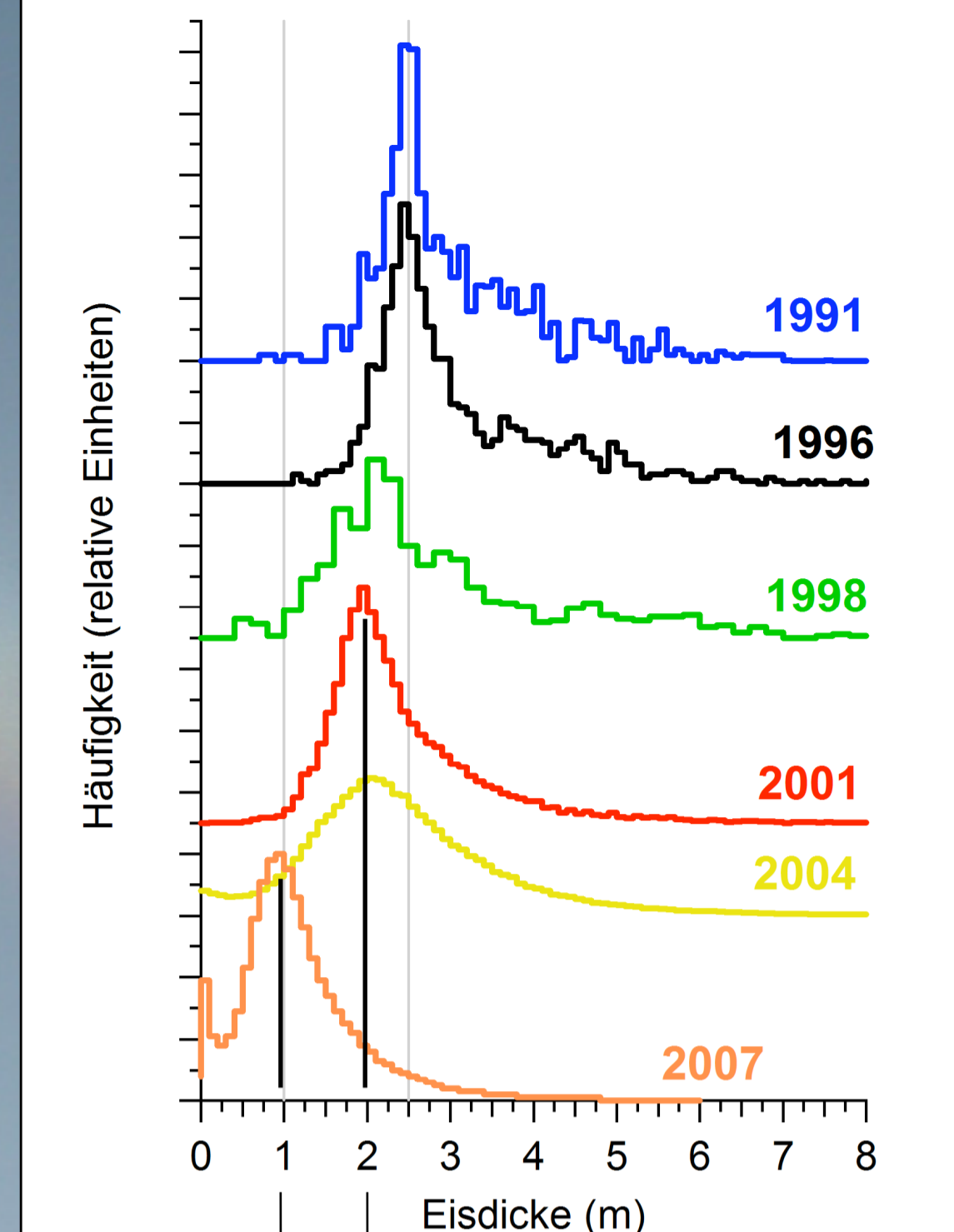
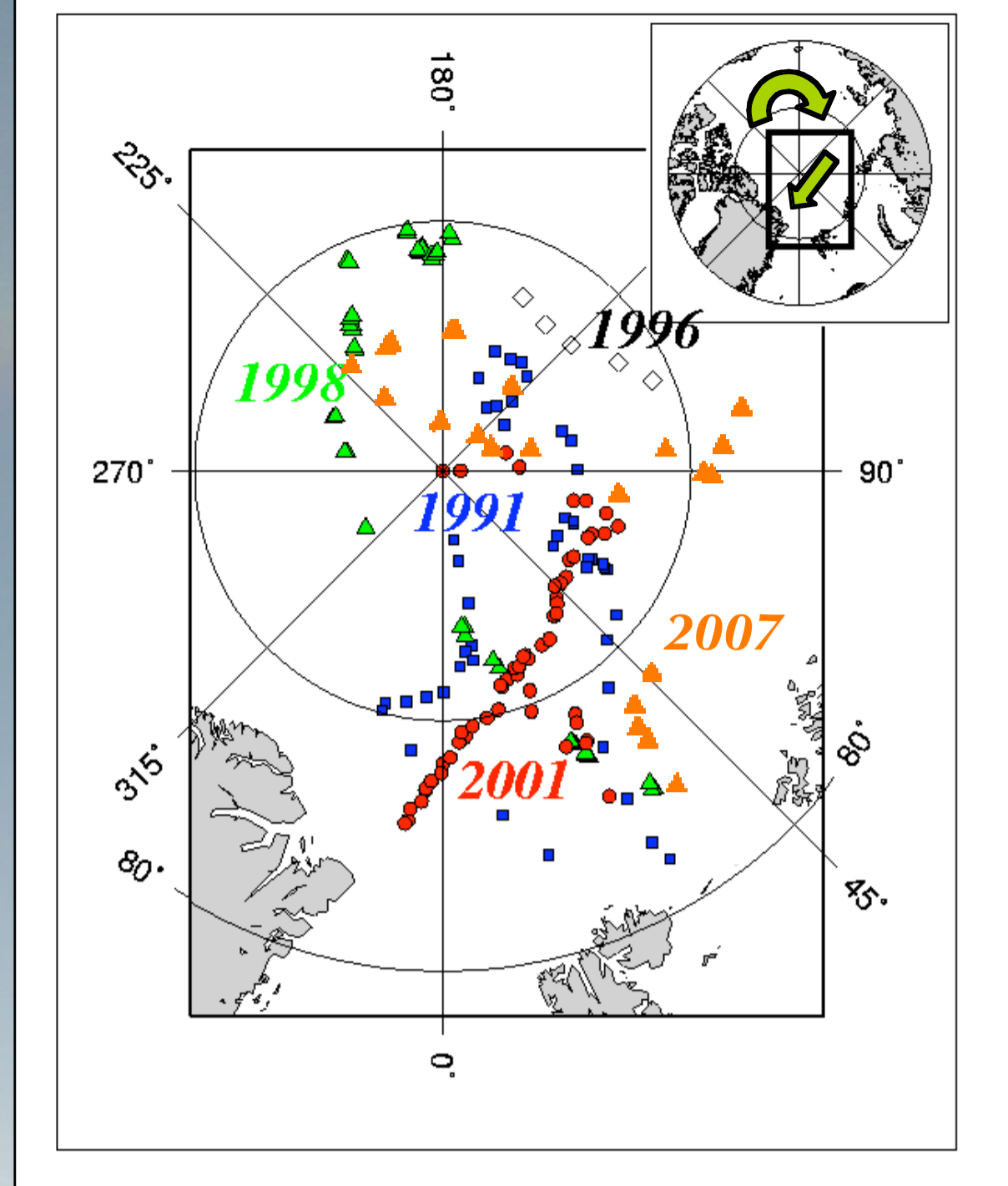
foto: J. Kässbohrer

Die Messungen wurden vom fahrenden Schiff aus durchgeführt oder zu Fuß auf den Eisschollen, wobei die Messapparatur in einem Kanu übers Eis gezogen wurde oder mit Hilfe eines Hubschraubers, der die Messapparatur, das sog. EM-Bird am Haken hatte. Im vergangenen Frühjahr wurde dazu erstmalig auch das Polarforschungsflugzeug POLAR 5 des Instituts eingesetzt. Man sieht die Messsonde am Rumpf des Flugzeuges montiert. Im Flug wurde sie dann mit einer Winde abgefiert und vergleichbar der Hubschrauber-Anordnung übers Eis geflogen.



# Eisdickenmessungen des AWI, Bremerhaven mit FS Polarstern 1991-2007

Änderung des Eisregimes  
von mehrjährigem zu  
einjährigem Eis

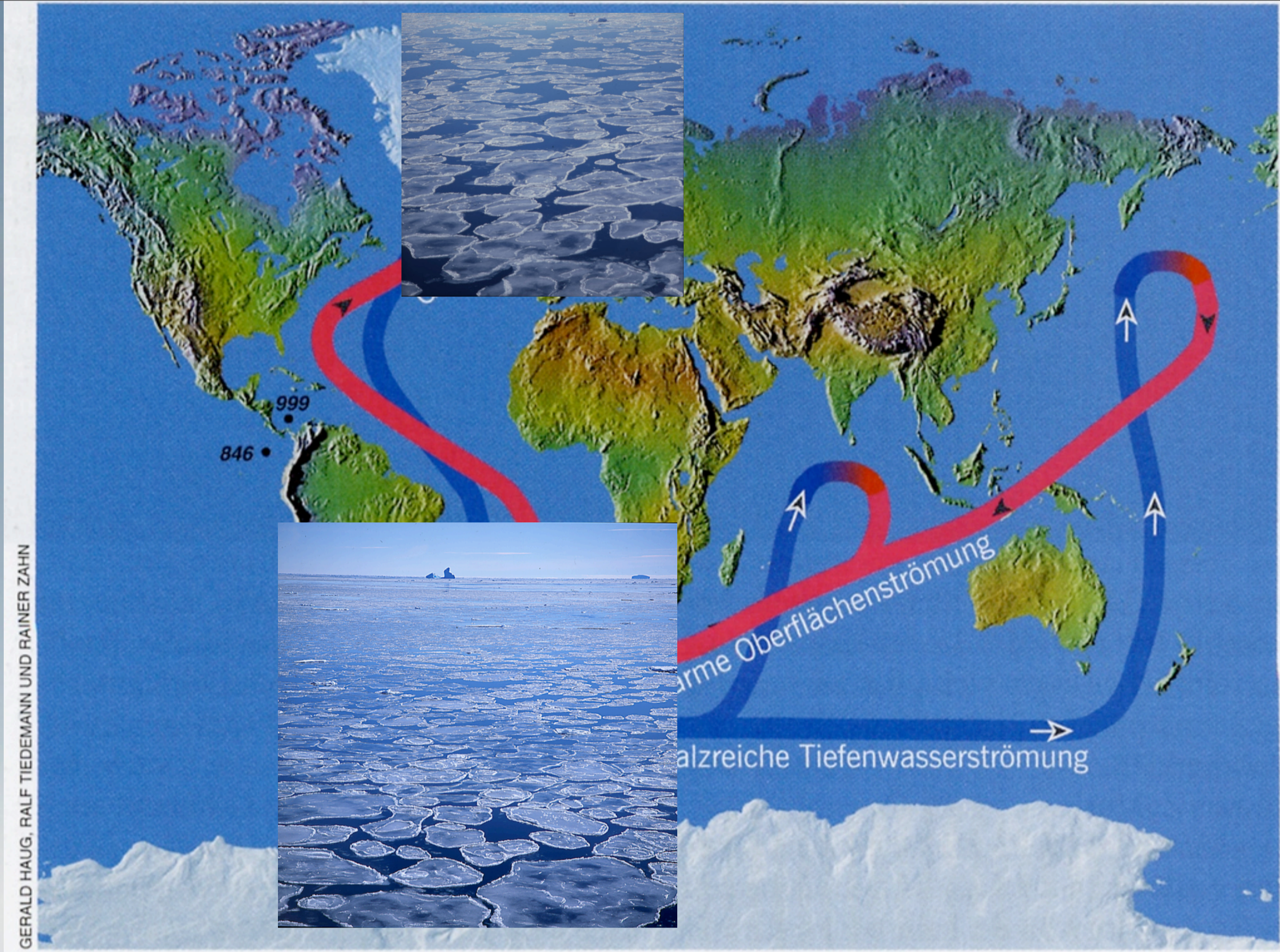


ca. 1 m Eisdickenänderung

Quelle: C. Haas, S. Hendricks, L. Rabenstein, AWI (pers. Mitt.)

Die in den Jahren 1996-2007 gemessenen Daten können miteinander verglichen werden. Auch wenn die Messprofile der verschiedenen Jahre nicht an identischen Positionen lagen, so scheint es doch eindeutig zu sein, dass sich die Verteilung der Eismächtigkeit geändert hat. Die horizontale Achse zeigt die Eisdicke, die vertikale Achse wie häufig eine bestimmte Eisdicke in den einzelnen Jahren auftrat. Lag in den 1990er Jahren die häufigste Eisdicke im Bereich zwischen 2 und 2,5 Metern, so zeigen die Messungen von 2007, dass die Eisdicken abgenommen haben. 2007 betrug die häufigste gemessene Eisdicke nur noch 1 Meter. Bei allen Unsicherheiten dieser Messungen wird doch deutlich, dass nicht nur Eisfläche sondern auch Eismasse verloren ging. Die Menge an mehrjährigem und damit dickerem Eis hat drastisch abgenommen. Der Anteil an einjährigem Eis hat dagegen deutlich zugenommen.





Die Abbildung zeigt die Hauptströmungssysteme in den Weltmeeren mit der warmen Oberflächenströmung und einer kalten, salzreichen Tiefenwasserströmung.

Ich hatte bereits auf die Bedeutung der Neueisbildung für die Ozeanzirkulation hingewiesen. Ein Antrieb für die globalen Meeresströmungen aufgrund der so genannten thermo-halinen Zirkulation ist die Bildung von Meereis. Damit ist die Freisetzung von Salz verbunden. Das schwere, weil abgekühlte und salzreiche Wasser unter dem neuen Meereis sinkt in die Tiefe, bildet das Tiefenwasser und schafft so an der Oberfläche Platz für nachströmendes wärmeres Wasser, z. B. Golfstrom im Norden. Das Weddellmeer im Süden und das Meeresgebiet zwischen Grönland und Spitzbergen, die Framstraße, sind hier von besonderer Bedeutung.

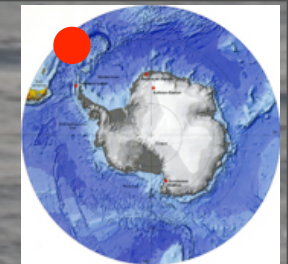
Wenn infolge steigender Temperaturen die Meereisbildung nachlässt und mehr Süßwasser infolge von stärkerer Abschmelzung auf Grönland oben auf dem Nordpolarmeer schwimmt, kann dieser Mechanismus gestört und im schlimmsten Fall der Golfstrom zum Erliegen kommen.





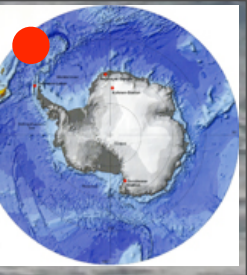
Verlassen wir die Arktis und wenden wir uns den südpolaren Regionen, der Antarktis zu.  
Die Gletscher auf Jan Mayen, sozusagen die letzten eisigen Boten der Arktis, sagen uns Good-bye.





Ein erster Bote antarktischer Gewässer, der südliche Glattwal.





Dieser Bote zeigt sich nur kurz an der Oberfläche, um sich auf seinen nächsten Tauchgang vorzubereiten.





Im Bereich der subantarktischen Inseln, wie z. B. Südgeorgien, treffen wir auf die Brutkolonien des Königspinguins, wo tausende von Tieren zusammenstehen.





Der Königspinguin ist nicht der größte Pinguin, das ist der Kaiserpinguin. Aber in meinen Augen ist er der schönste.



# Die Antarktis

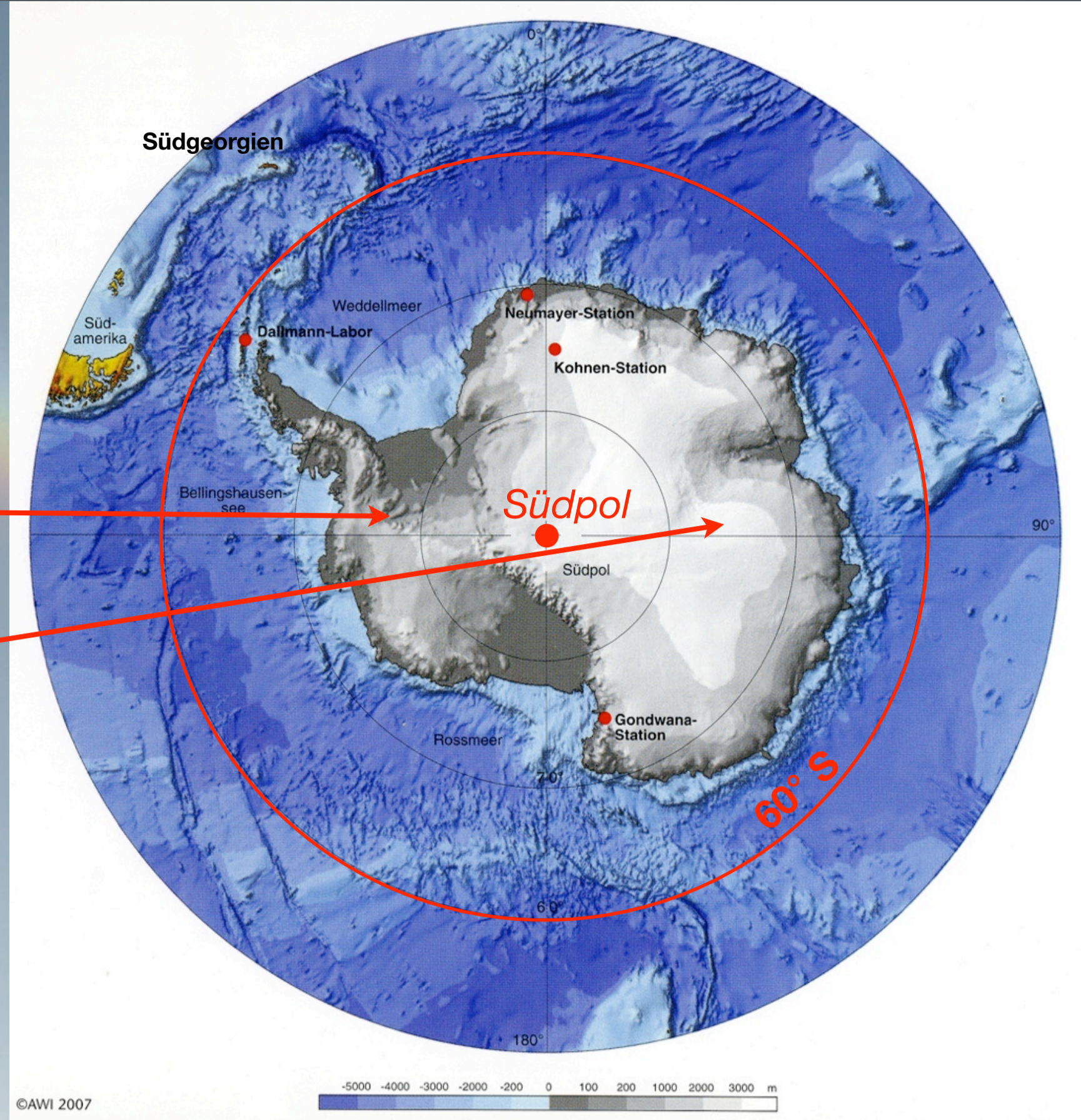
Gesamtfläche (mit Schelfeis):  
14,2 Mill qkm  
ca. 98 % eisbedeckt

Höchster Berg: Vinson Massif  
4897 m (78°35'S, 85°25'W)

Höchster Punkt auf dem Eis: Dome A, 4030 m

Südpol: 2830 m

mittlere Höhe: 2160 m



Die Antarktis ist, wie bereits eingangs gezeigt, ein Kontinent vom Meer umgeben.

Den eisbedeckten Kontinent bezeichnen wir oft als Antarktika, um ihn von den umgebenden Meeresgebieten und Inseln abzugrenzen.

Antarktika hat einschließlich der Schelfeisgebiete eine Fläche von 14, 2 Millionen Quadratkilometern. Nur 2 Prozent sind eisfrei.

Der höchste Berg der Antarktis ist der 4897 Meter hohe Mt. Vinson.

Der höchste Punkt auf dem Inlandeis ist der Dome A der Ostantarktis mit einer Höhe von 4030 Metern über dem Meer.

Der Südpol liegt auf 2830 Metern und ist in Bezug auf den antarktischen Eisschild und Antarktika eigentlich kein besonderer Punkt.

Die Antarktis ist mit einer mittleren Höhe von 2160 Metern der höchste Kontinent unserer Erde.





## Größenvergleich Antarktika - Europa



wie stelle ich mir die Antarktis vor ?

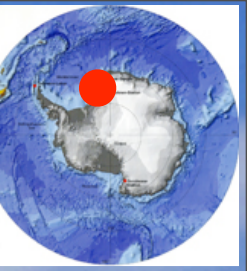


foto: hans oerter, 1995

55

Wie stelle ich mir die Antarktis vor? Alles voll mit Pinguinen, wie vielleicht das Bild von Südgeorgien oder dieses Bildd suggerieren könnten?



# wie stelle ich mir die Antarktis vor ?

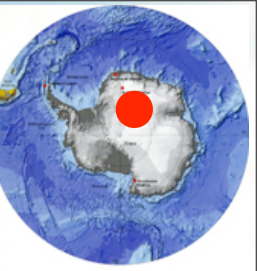


foto: hans oerter, 2006

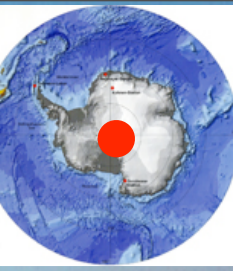
56

Oder vielleicht doch so, endlos weit. Leer, einsam ?

Die Wirklichkeit wird irgendwo dazwischen liegen, je nachdem wo man sich in der Antarktis aufhält.



# Der Südpol



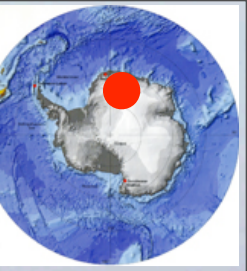
↑  
alte Scott-Amundsen Base (US)  
von 1957/58 (IGY)

↑ neue Station

foto: Forest Banks, IceCube project, 2005  
57

So schaut es am Südpol aus. Links im Bild gerade noch erkennbar die alte amerikanische Südpolstation „Scott-Amundsen Base“, die im Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58, also vor etwa 50 Jahren erbaut worden war. Rechts daneben die neue Station, die vor zwei Jahren bezogen wurde. Rechts im Bild, die Einrichtungen für das große internationale astro-physikalische Projekt „Icecube“.



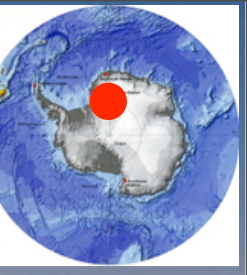


Bilder aus der Antarktis: Orvinfjella

foto: hans oerter, 2008  
58

An einigen wenigen Stellen durchbrechen bizarre Bergspitzen die Eisdecke, wie hier im Bereich der Orvinfjella in der Ostantarktis.



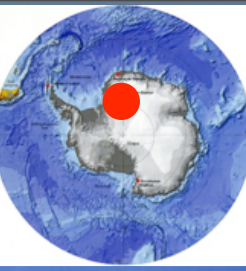


Bilder aus der Antarktis: Kottasberge, Heimefrontfjella

Weiter westlich treffen wir auf den Gebirgszug der Kottasberge, eine steile, markante Geländestufe mit etwa 500 Metern Höhenunterschied.



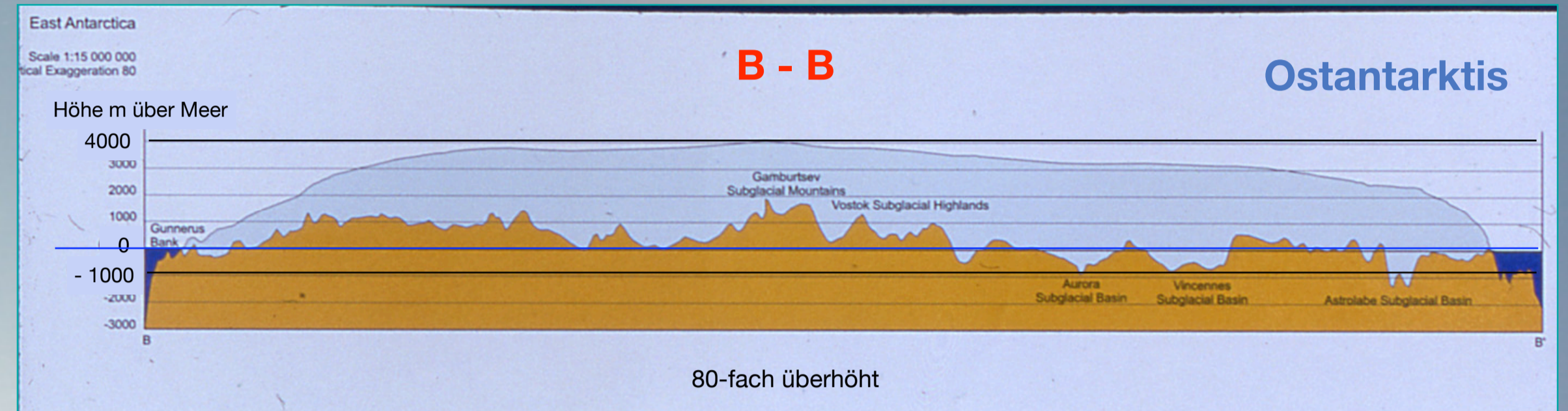
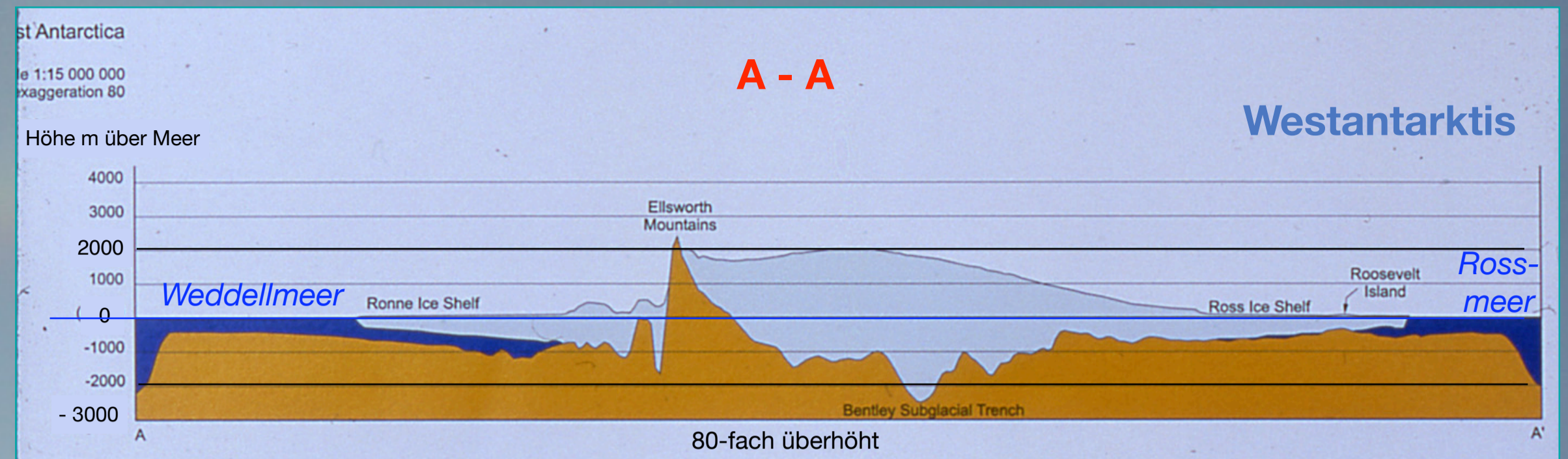
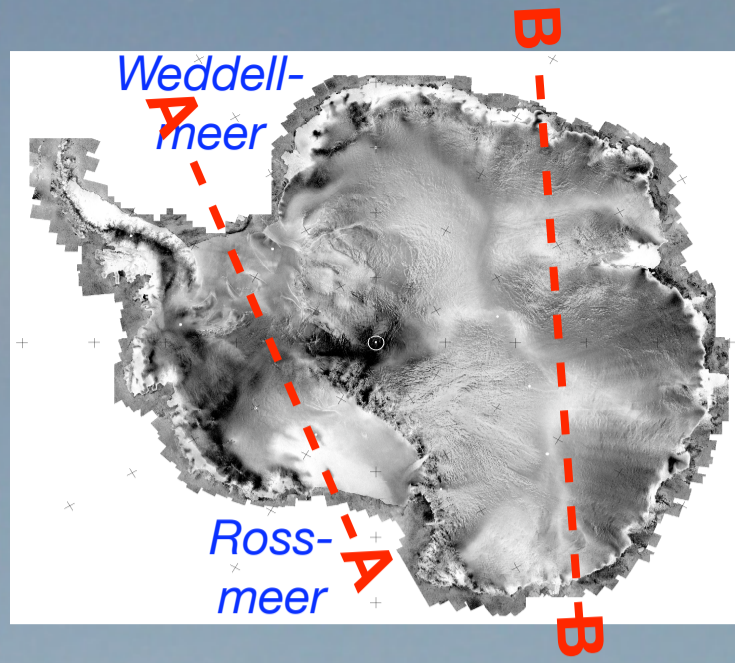
# Kottasberge, Heimefrontfjella, Dronning-Maud-Land



Die Felsen liegen blank, sie sind nicht von Boden bedeckt. Ihr Ursprung ist unterschiedlich. Wir treffen auf metamorphe Gesteine, wie z.B. Gneise (links), die an manchen Stellen noch von Basalten oder auch Sandstein (rechts) überlagert sind. Die Sandsteine wurden in einer erdgeschichtlichen Zeit abgelagert, als die Antarktis noch nicht am Südpol lag, sondern wesentlich weiter nördlich.



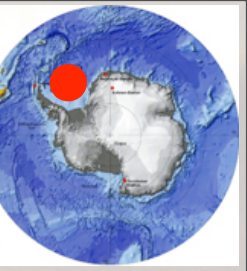
# Die Verteilung der Eismächtigkeit



Quelle: Drewry, Scott Polar Res. Inst.

Zeichnet man einen Querschnitt durch die Westantarktis (oben) und die Ostantarktis (unten), dann sieht man, dass der Eisschild in in diesen beiden Teilen der Antarktis unterschiedlichen Charakter hat. In der Westantarktis liegt die Grenze zwischen Eis und Gestein weitestgehend unter dem Meeresspiegel. In der Ostantarktis dagegen ruht der Eisschild auf einer zusammenhängenden kontinentalen Platte, die über dem Meeresspiegel liegt. Nur an wenigen Stellen sind tiefe Gräben eingeschnitten, deren Sohle unter dm Meeresspiegel liegt. Für die Westantarktis weiterhin typisch sind die großen schwimmenden Schelfeistafeln, das Filchner-Ronne-Schelfeis und das Ross-Schelfeis. Von diesen, jeweils etwa 500.00 Quadratkilometern großen Schelfeistafeln kalben die riesigen Tafeleisberge ab, die manchmal auch in unseren Medien für Schlagzeilen sorgen.





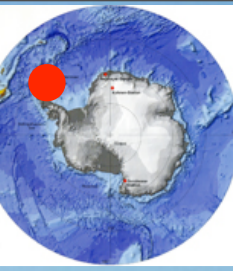
Bilder der Antarktis: Tafelberge, Antarctic Sund

foto: hans oerter, 2007

62

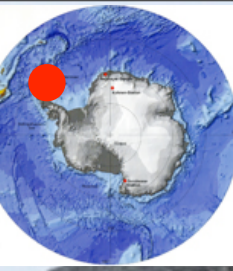
Ein Beispiel für einen solchen Tafelberg sehen Sie auf diesem Bild. Die Höhe dieser Tafelberge über der Meeresoberfläche liegt typischerweise so zwischen 20 und 30 Metern.





Auf die Antarktische Halbinsel möchte ich nicht weiter eingehen, obwohl es der Teil der Antarktis ist, in dem zurzeit die stärksten klimatischen Veränderungen ablaufen. An der britischen Station Faraday, die seit einigen Jahren unter dem Namen Vernadsky von der Ukraine weitergeführt wird, betrug der Temperaturanstieg 2,5 °C in 50 Jahren. Die Antarktische Halbinsel ist am besten mit einer Hochgebirgslandschaft zu vergleichen, in der die Gletscher bis auf das Meeresniveau herabreichen.





Bilder der Antarktis: Adelpinguine auf Paulet Island - Antarktische Halbinsel

foto: hatis oerter, 2007

64

Die Antarktische Halbinsel ist im Sommer mit Hunderttausenden von Pinguinen bevölkert, die hier brüten. Im antarktischen Winter ziehen sie dann wieder weiter nach Norden, an den Rand des Packeises.

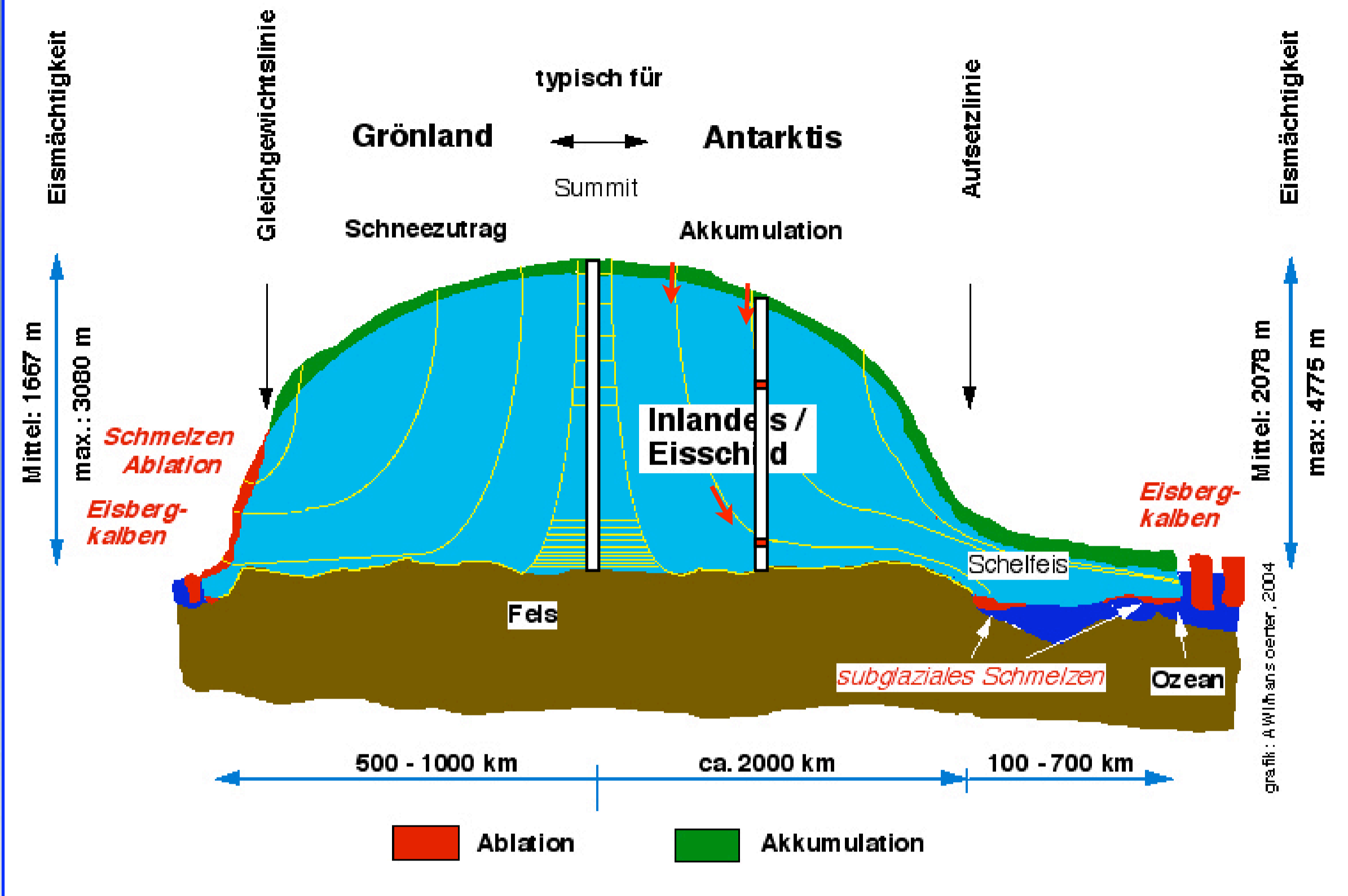


Inlandeis Antarktika  
entspricht 61,1 m  
Meeresspiegeländerung

Inlandeis von Grönland  
entspricht 7,2 m  
Meeresspiegeländerung

(IPCC 2001)

## Schematischer Querschnitt durch einen Eisschild



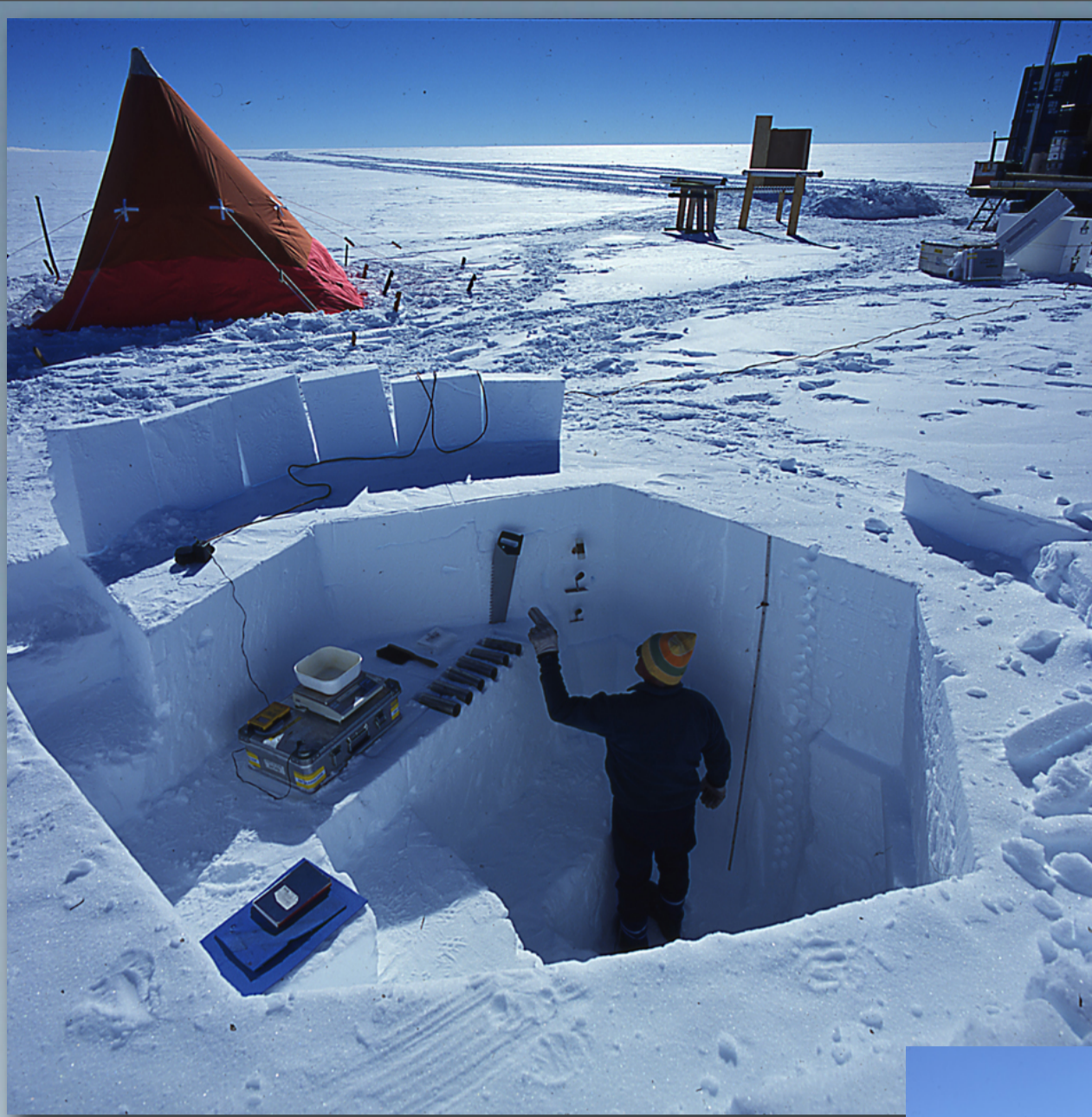
Ski-Club Kandel, Waldkirch, 16. Juni 2009



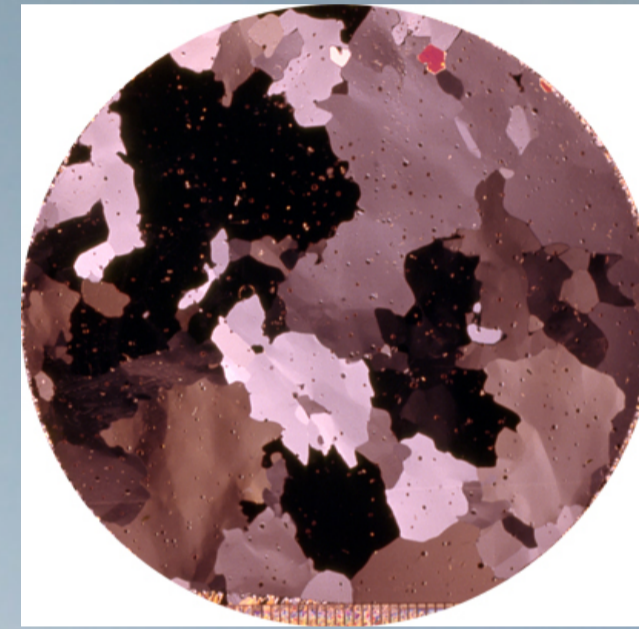
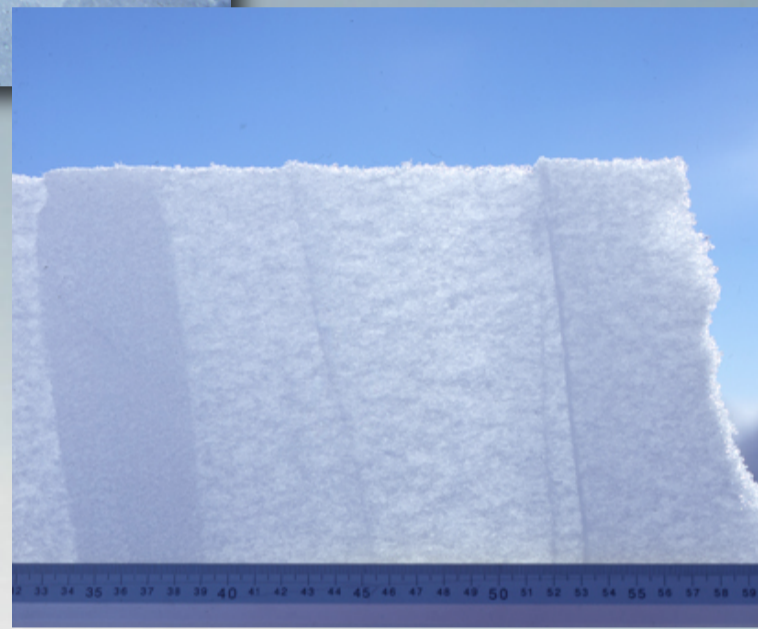
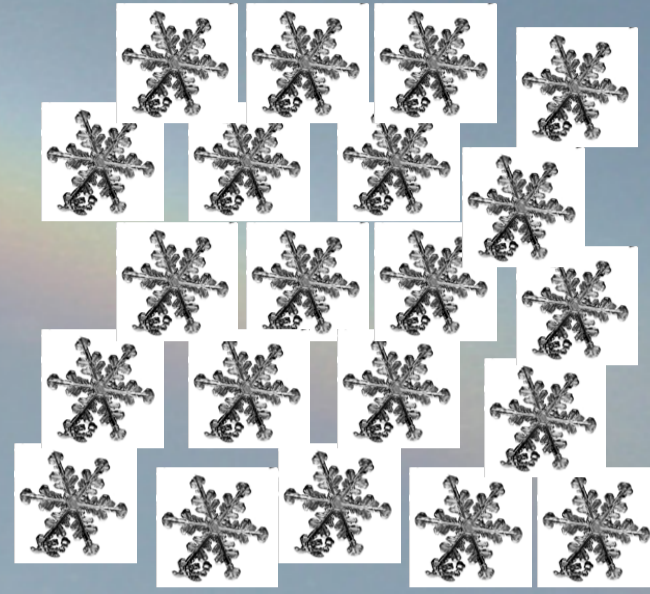
### Aufbau eines Eisschildes oder Gletschers

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





Ein Eisschild baut sich aus über einander liegenden Jahresschichten auf.

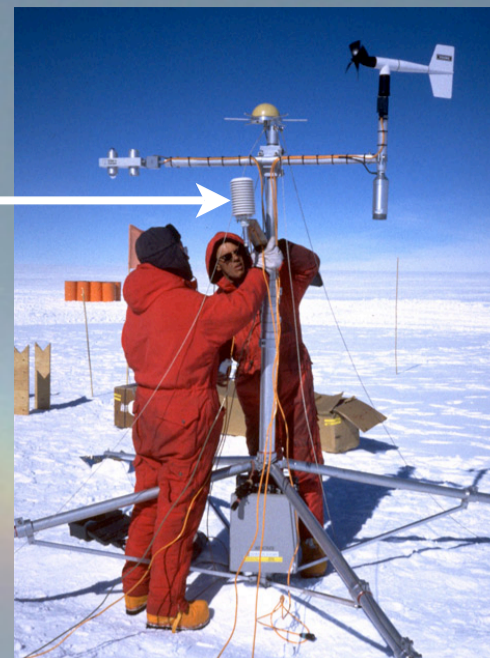
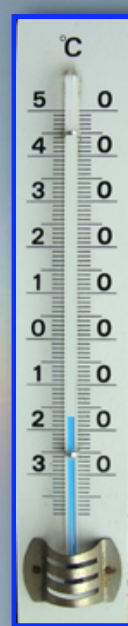


Ein Eisschild baut sich aus über einander liegenden Jahresschichten auf. Die Niederschlagsverhältnisse in der Antarktis entsprechen einem ariden Klima. So beträgt z. B. am Südpol die Jahresschneeakkumulation etwa  $80 \text{ kg m}^{-2}\text{a}^{-1}$ , an der Kohnen-Station  $64 \text{ kg m}^{-2}\text{a}^{-1}$ , an der an der Küste liegenden Neumayer-Station etwa  $340 \text{ kg m}^{-2}\text{a}^{-1}$ . Die Jahresschichten lassen sich in den oberen Metern der Firndecke noch gut erkennen. Mit zunehmender Tiefe werden die Jahresschichten in der Antarktis 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.



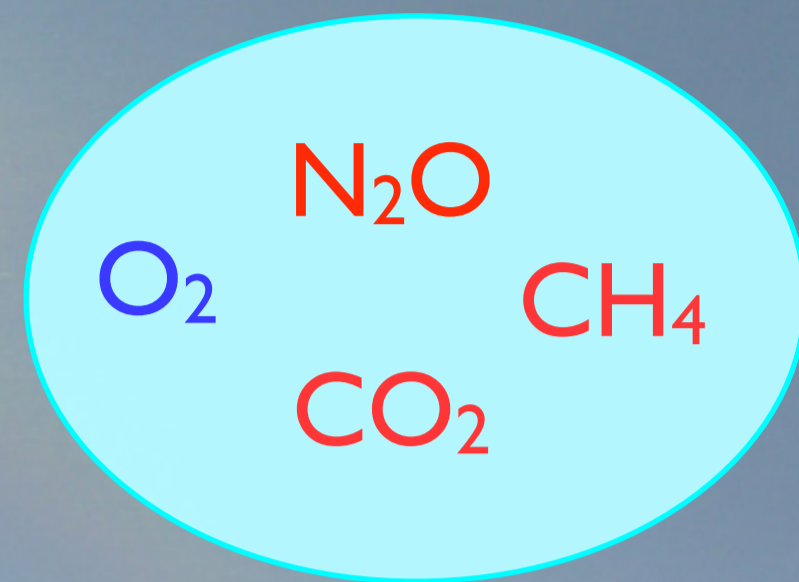
# Das Klima-Archiv Eis speichert Informationen zu:

## Lufttemperatur

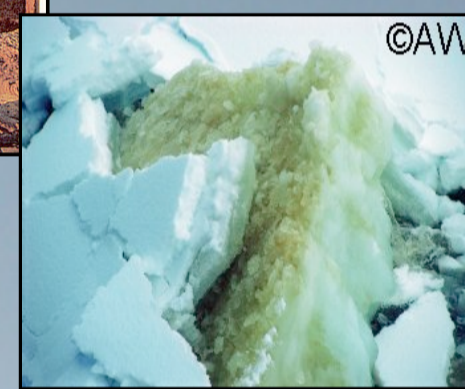


$\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$

## Gasgehalt in der Atmosphäre



## Aerosole



### Klimainformationen aus dem Eis

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 Isotopen  $^{18}\text{O}$  und Deuterium ( $^2\text{H}$ ) 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 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 aufgenommen und weitertransportiert. Hier spielen vor allem die biologische Aktivität nahe Meeresoberfläche und die Meeresbildung eine wichtige Rolle. Entsprechend gelangen schwefelhaltige Verbindungen aus dem Wasser in die Atmosphäre oder Seesalzkomponenten, die dann später in den Eiskernen nachgewiesen werden können.

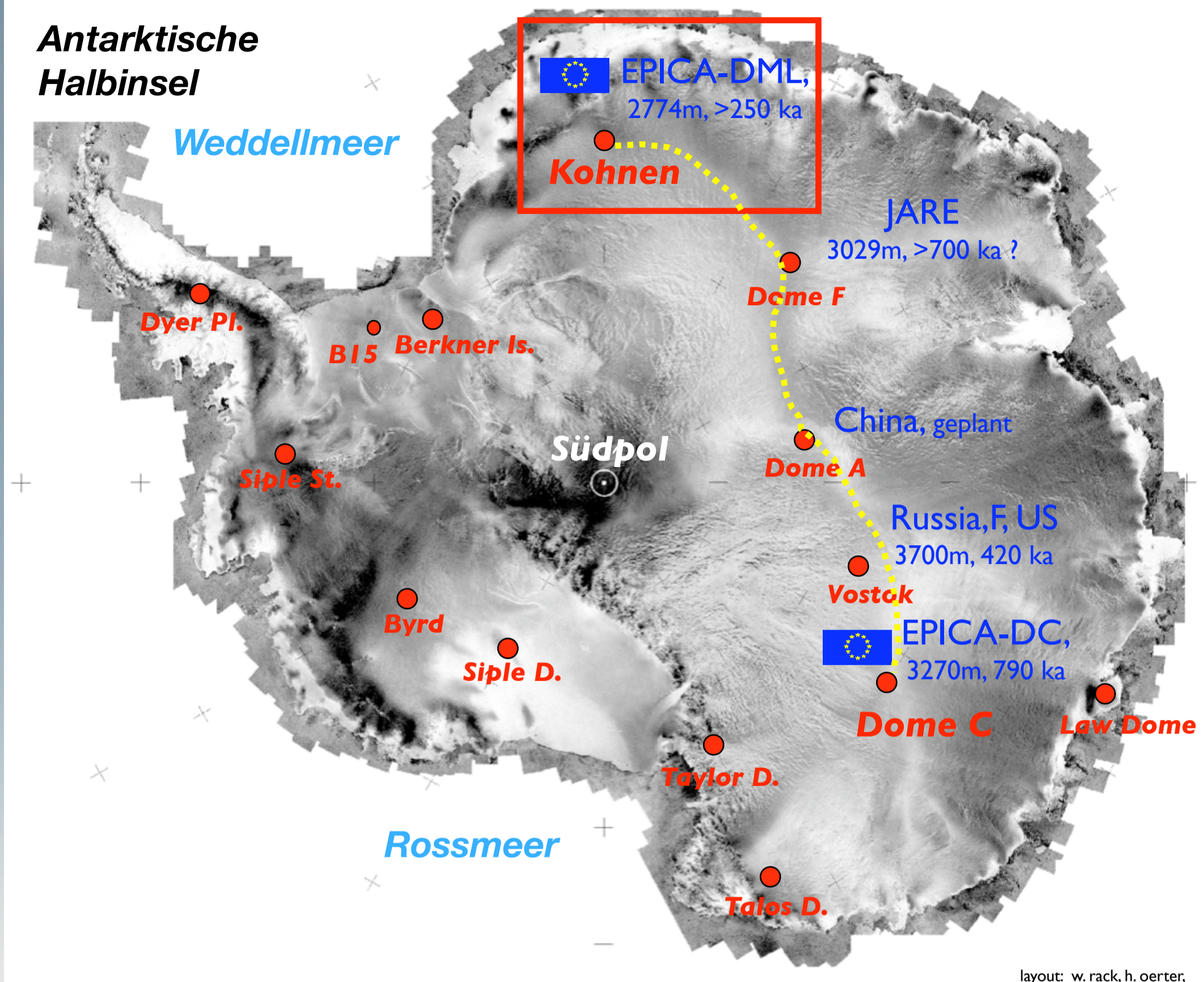


# Tiefe Eisbohrkerne in der Antarktis

European Project for Ice Core Drilling in Antarctica (EPICA)



Haupteisscheide der Ostantarktis



layout: w. rack, h. oerter,



Ski-Club Kandel, Waldkirch, 16. Juni 2009



68

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

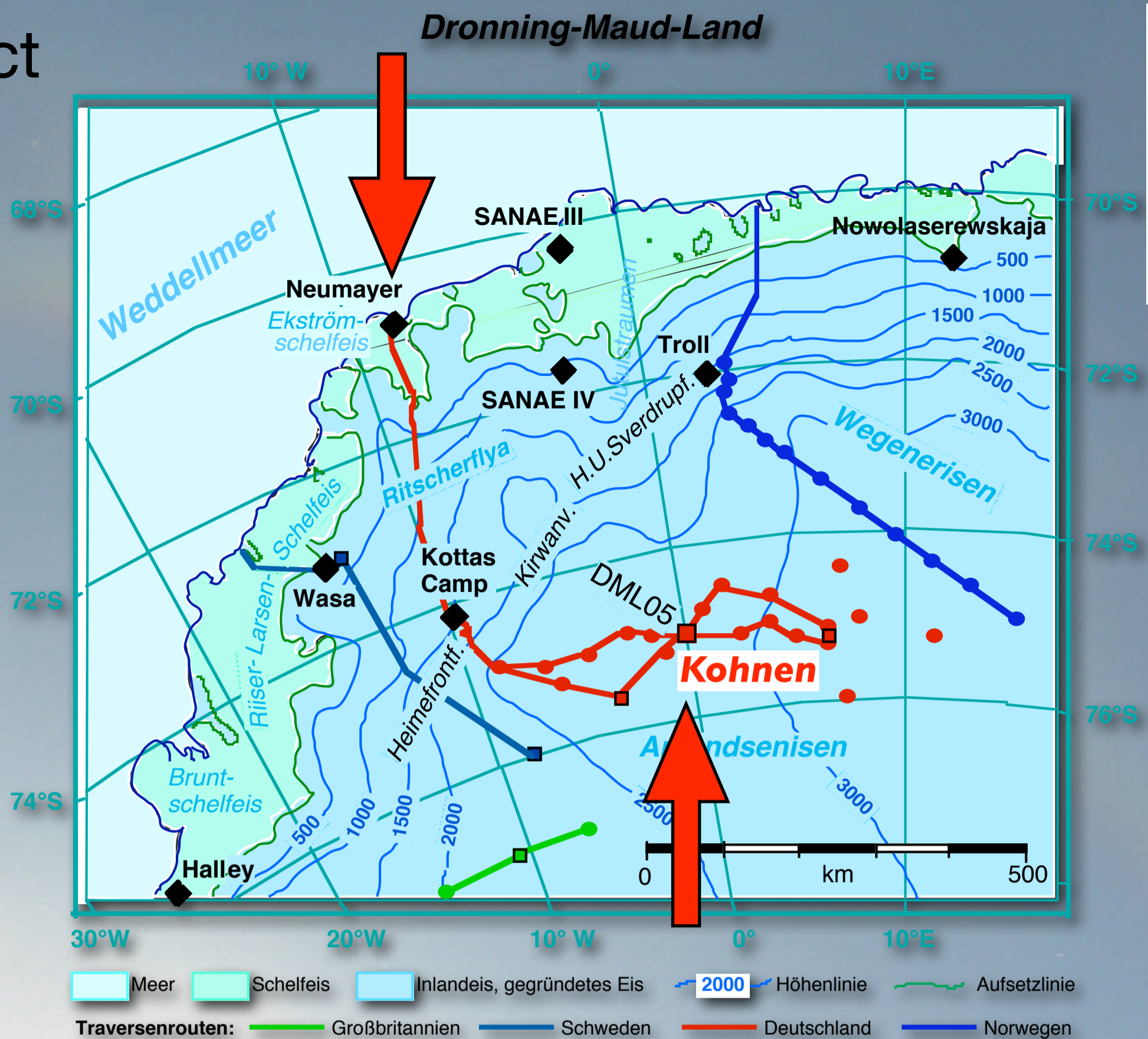
**Dome Fuji** Zweithöchste Erhebung (3810 m Meereshöhe) des antarktischen Eisschildes bei 77° 19' S, 39° 42' O; Eismächtigkeit 3030 m, Jahresmitteltemperatur -54,4 °C, Minimum -79,9 °C, jährlicher Schneezutrag 25 kg /m<sup>2</sup>

1995 errichtete das Nationale Institut für Polarforschung (NIPR) in Tokyo, Japan, (<http://www.nipr.ac.jp/english/>) auf Dome Fuji ein Forschungsstation, an der ein tiefer Eisbohrkern abgeteuft und Atmosphärenforschung ganzjährig betrieben werden sollte. Die Station besteht aus acht Gebäuden mit einer Gesamtfläche von 407 m<sup>2</sup>. Im Dezember 1996 erreichte die erste Eiskerntiefbohrung eine Tiefe von 2503 m. Der Bohrer blieb jedoch dann etwa bei 2300 m stecken und konnte auch in den beiden Folgejahren nicht wieder frei bekommen werden. NIPR entwickelte daraufhin einen neuen Bohrer. Während der Überwinterung 2001 wurde 43 m nördlich des ersten Bohransatzpunktes ein neues 122 m tiefes Bohrloch gebohrt und verbohrt. In den beiden folgenden Jahren wurden weitere



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

Zeugen des Klimawandels der Vergangenheit: Eisbohrkerne



Ski-Club Kandel, Waldkirch, 16. Juni 2009



**Dronning-Maud-Land.** 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 Überwinterungsstation Neumayer an der Küste.



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



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

Zeugen des Klimawandels der Vergangenheit: Eisbohrkerne



Ski-Club Kandel, Waldkirch, 16. Juni 2009

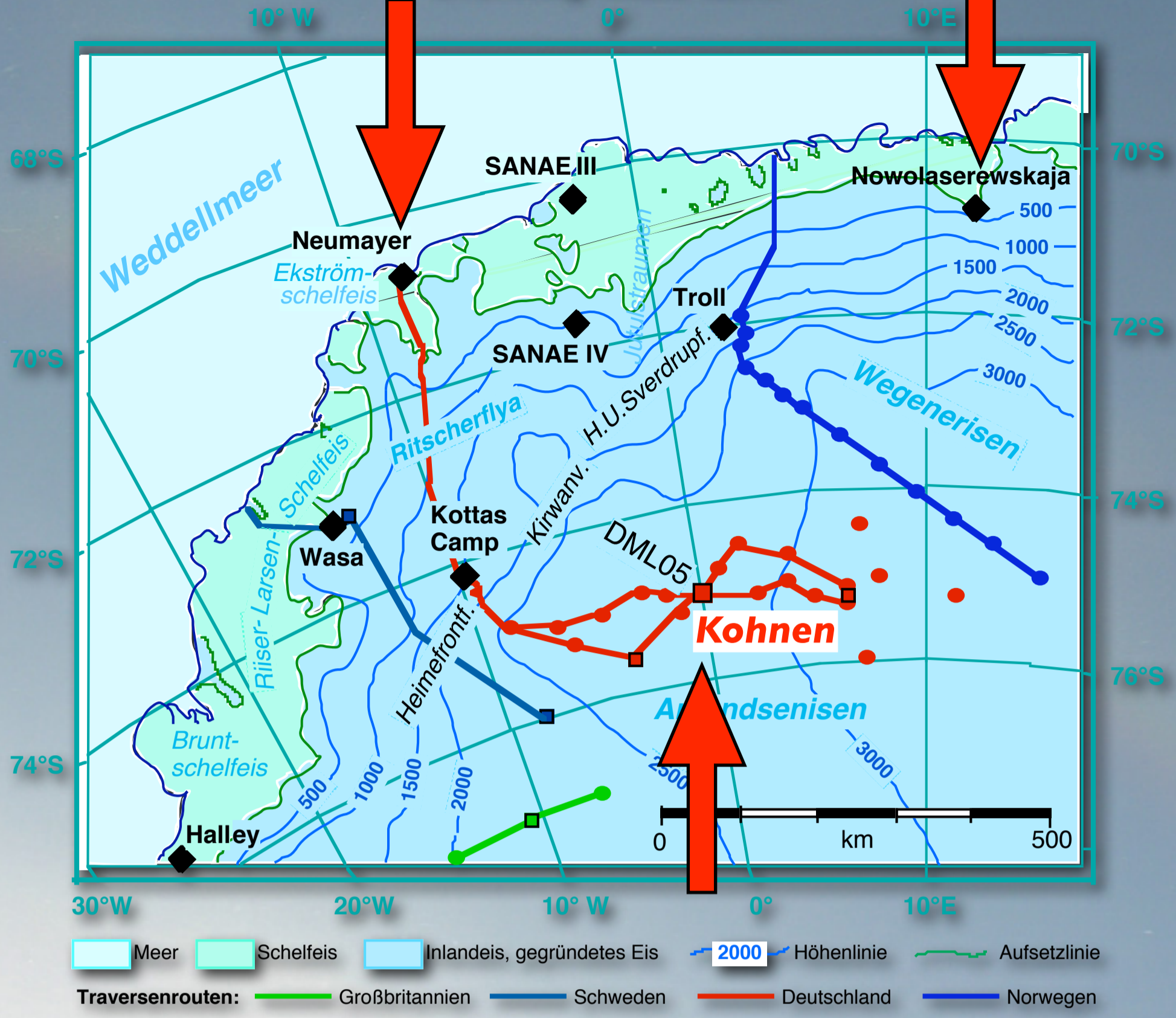


Im Februar dieses Jahres wurde die Station Neumayer III, die dritte deutsche Überwinterungsstation seit 1981, in Betrieb genommen. Luftaufnahme der Neumayer-Station III, im Hintergrund die Atka-Bucht. (Foto: Ude Cieluch, Alfred-Wegener-Institut, 2009). Die Station ist seit dem 20. Februar 2009 in Betrieb.



# Dronning-Maud-Land

Zeugen des Klimawandels der Vergangenheit: Eisbohrkerne



Ski-Club Kandell, Waldkirch, 16. Juni 2009



**Dronning-Maud-Land.** Seit einigen Jahren ist der Zugang ins Dronning-Maud-Land auch über die russische Station Nowolaserewskaja möglich.



### Dronning-Maud-Land



Ski-Club Kandel, Waldkirch, 16. Juni 2009



fotos: hans oerter

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 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 Kohlen-Station vor allem ausreichend mit Treibstoff versorgen zu können.

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 - Kohlen-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.



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

Zum Bohren

## Kohnen-Station

75°S, 0 °E, 2882 m

foto: hans oerter, 2006



Ski-Club Kandel, Waldkirch, 16. Juni 2009



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

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

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

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

Die Universität Utrecht betreibt in Stationsnähe eine automatische Wetterstation.

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





Küche

Sanitärcontainer

2 Schlafräume  
à 4 Pers.

Generator



foto: hans oerter, 2006





Die Messe der Kohnen-Station. Alltag (links unten, rechts oben), Sylvester 2005 (links oben) und Weihnachten 2005 (rechts unten).



# Kohnen Station

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

Bohrzeitraum:  
2001-2006

Mittlere Jahres-  
temperatur: -45 °C

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

Eis-Fließgeschwindigkeit:  
0,756 m/a

Eisdicke:  
2782 ±10m

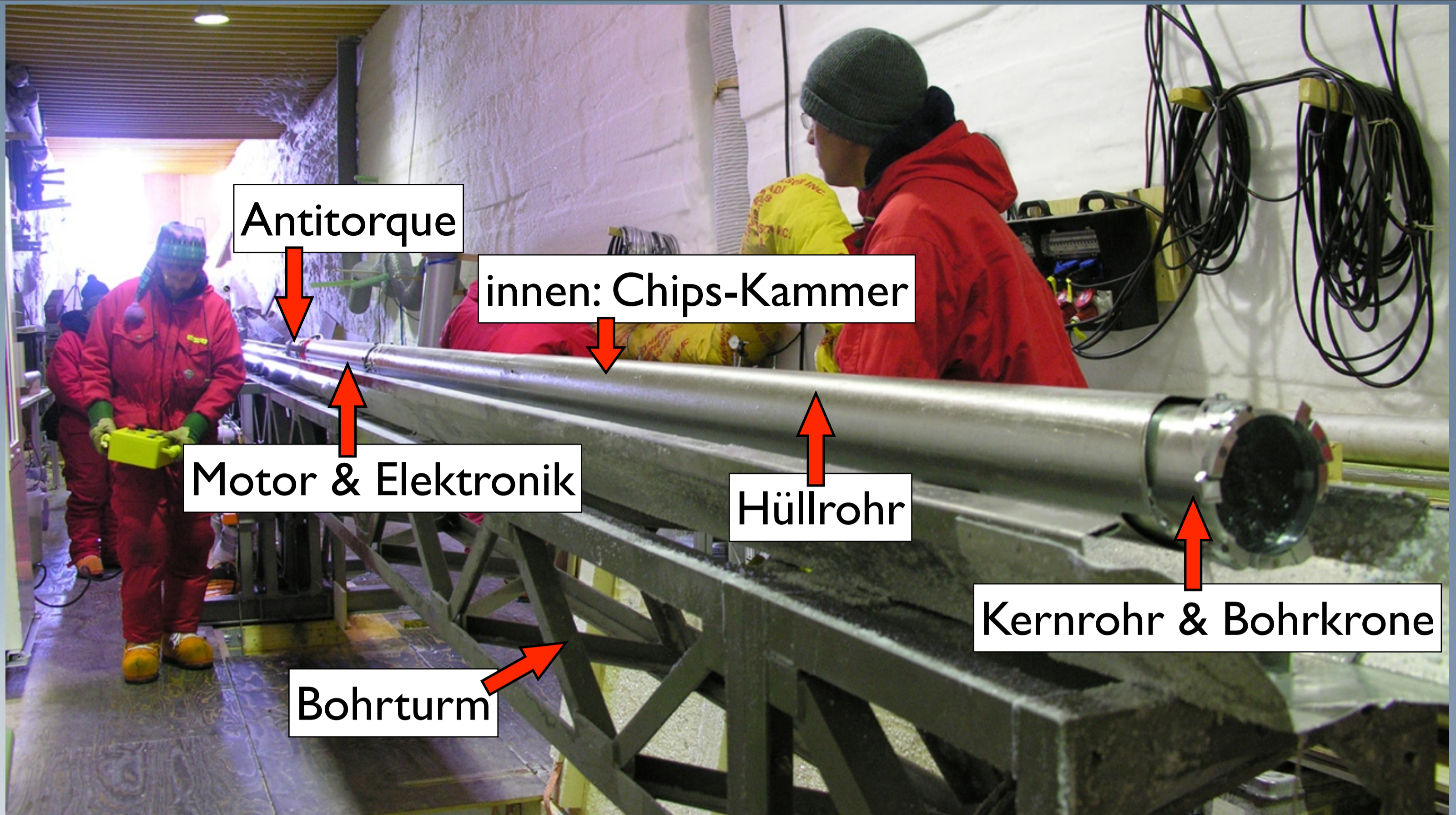
Länge Eiskern:  
2774,1 m



foto: hans oerter, 2006

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 sind Arbeitstische. Unter dem Fußboden liegt ein schmaler, 6 m tiefer geneigter Graben, um das Bohrgerät (Gesamtlänge ca. 12 m) in die Horizontale schwenken zu können. Er wird während des Bohrvorgangs abgedeckt und nur zum Schwenken des Bohrers geöffnet. Die Temperatur im Drill-Trench lag bei ca. -30°C.





### Bohrtechnik

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

Bei Teufen über 200 Meter muss das Bohrloch mit einer Stützflüssigkeit gefüllt werden, um eine Verformung des Bohrlochs durch den hohen hydrostatischen Eisdrucks 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. Bisherige Bohrlochflüssigkeiten waren Alkohol (greift jedoch den Bohrkern geringfügig an), hochreines Petroleum (D40 oder D60) mit Zusätzen (sog. Densifier) von chlorierten Kohlenwasserstoffen (HCFC 141 bzw. Solkane®141), die jedoch ab 2010 weltweit nicht mehr vertrieben werden dürfen. Bei der EDML-Bohrung wurde EXXOL®D40 mit Solkane®141 eingesetzt.



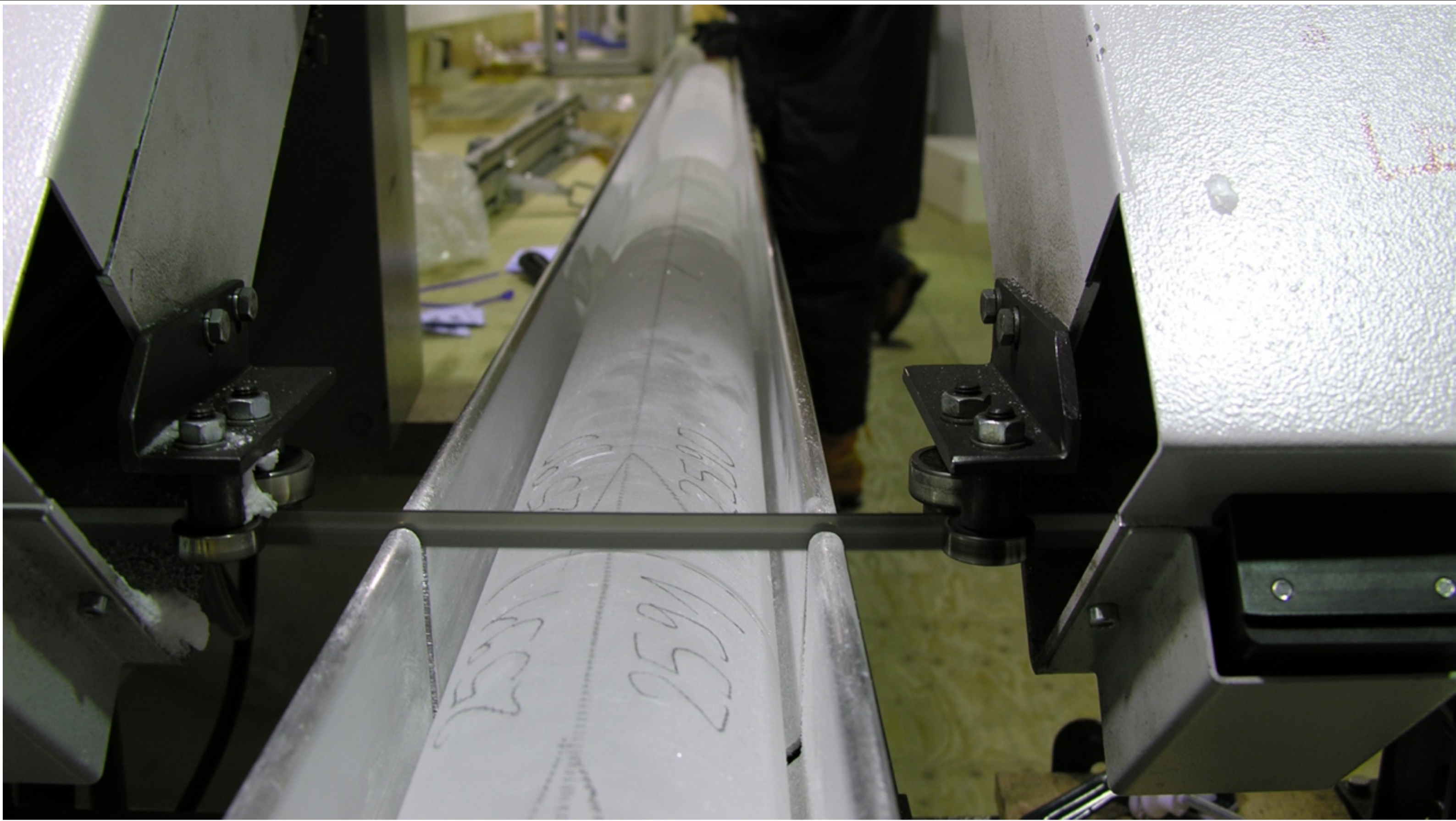


foto: hans oerter, 2006









foto: hans oerter, 2006

# Twin-Otter von British Antarctic Survey (BAS)



Ski-Club Kandel, Waldkirch, 16. Juni 2009



Start der Twin-Otter an der Kohlen-Station zum Flug zur Neumayer-Station an der Küste.



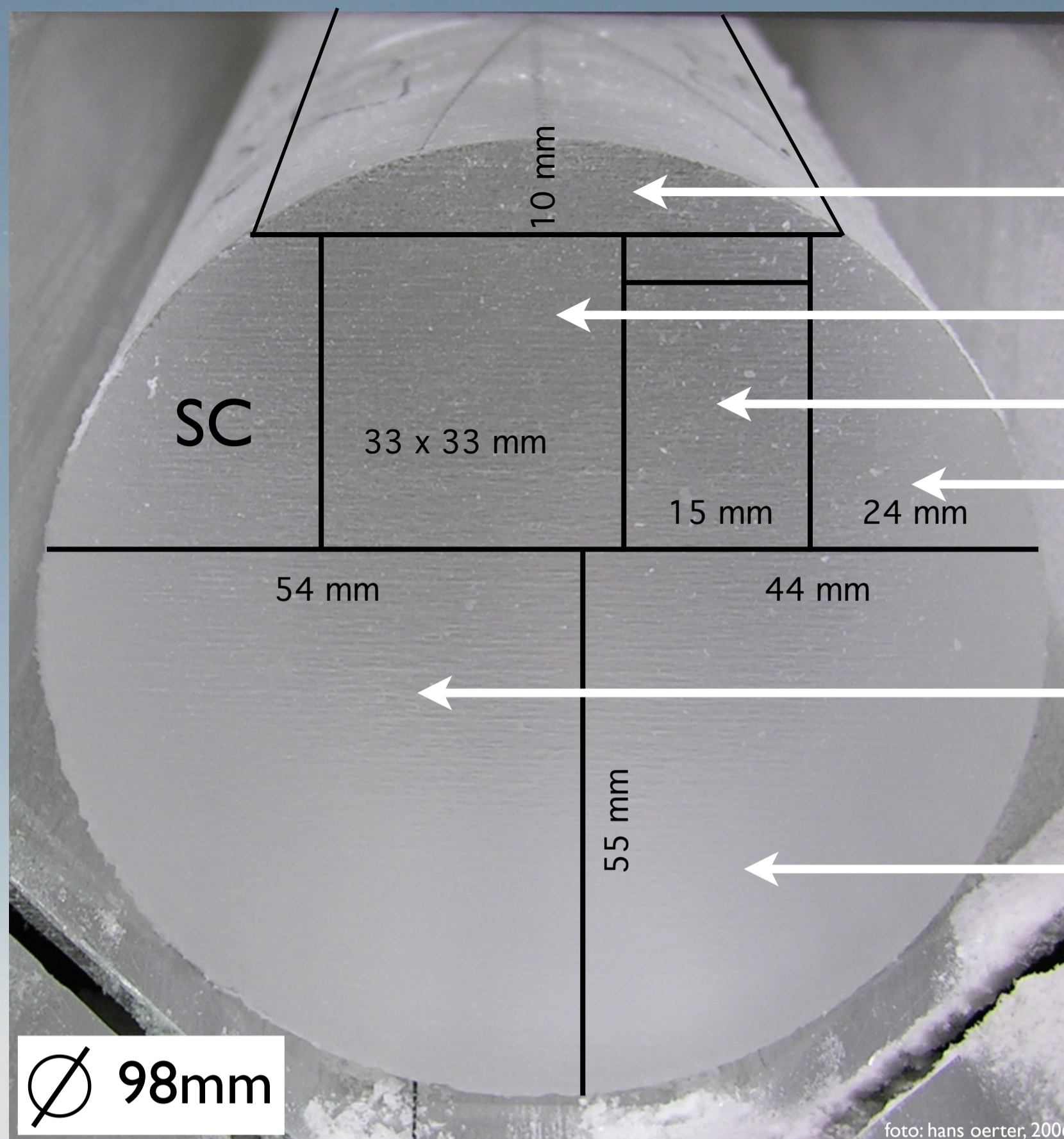


foto: sepp kipfstuhl, 2006

**Gruppenbild des internationalen Bohrteams** nach Abschluss der tiefen EPICA-Eiskernbohrung. Der Bohrer ist komplett vereist, nachdem er Kontakt mit dem subglazialen Wasser im untersten Bereich des Bohrlochs hatte.

Das Bohrteam, zu sehen sind: Karin Weiler (Schweiz), Tobjörn Karlin (Schweden), Sepp Kipfstuhl, Jens Köhler, Birthe Twarloh, Fernando Valero, Sergio Faria, Gunter Lawer, Dorothee Dick, Anja Lambrecht, Diedrich Fritzsche, Frank Wilhelms, Klaus Trimborn, Heinz Miller, Hans Beiersdorf, Johannes Freitag, Patrik Kaufmann (Schweiz), Jochen Krischat, Marc Blattner, Andreas Frenzel, Adi Ackermann, Cord Drücker, Hans Oerter, Gerit Birnbaum, Andreas Brehme, Günter Stoof. (Foto S. Kipfstuhl, 17.01.2006).





Dünnschnitte

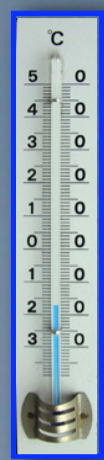
CFA

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

$^{10}\text{Be}$

Archiv

Gase, Staub

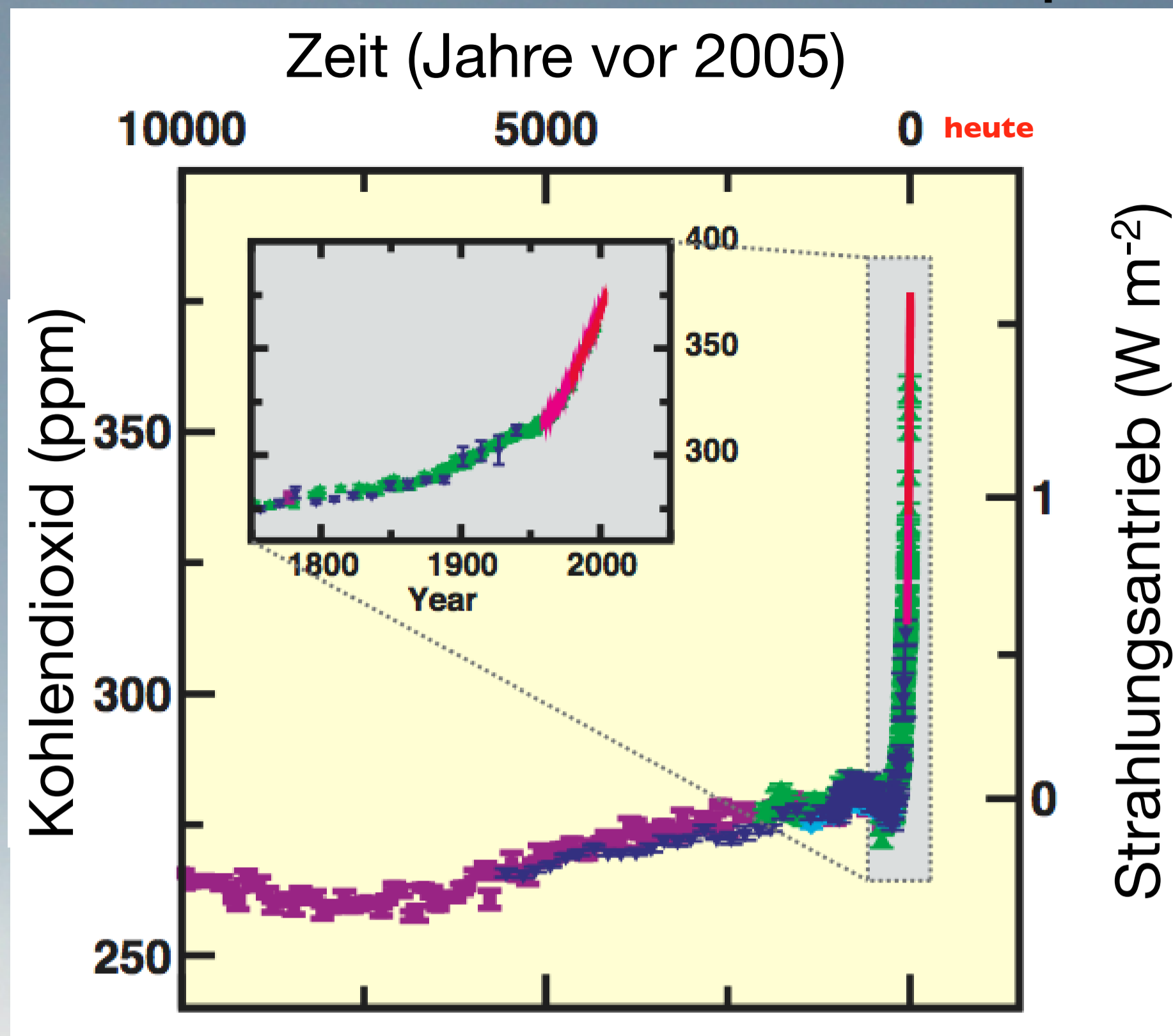


Schnittplan für den EDML-Eiskern. Die Standardbreite für die  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  und  $^{10}\text{Be}$  Proben war 15 und 24 mm. Nur einige ausgewählte Kernstücke (bag??), an denen  $^{18}\text{O}$  und  $^2\text{H}$  mit 2,5 cm Tiefenauflösung gemessen wurden, hatten eine davon unterschiedliche Breite. Der Kerndurchmesser ist 98 mm; alle Maße angegeben in mm. SC = Stück, über das das EPICA-Steering-Committee gesondert verfügen konnte. CFA = Kontinuierliche Durchflussmessung (Continuous Flow Analysis). Phys. prop = physikalische Eigenschaften. Discont. samples = An diesen Proben wurden Gasgehalte und isotopische Zusammensetzung der Gase sowie Staub gemessen, jedoch nicht kontinuierlich über den gesamten Eiskern.



# Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre

Zeugen des Klimawandels der Vergangenheit: Eisbohrkerne:



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

**Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre.** Eine Zusammenstellung der Entwicklung des Kohlendioxidgehalts in der Atmosphäre finden wir in dem 2007 veröffentlichten Bericht des Weltklimarates, IPCC. Wir sehen eine Kurve, die seit 5.000 Jahren vor heute langsam ansteigt. Ab 1850 wird der Anstieg stärker und ab 1950 geht dann die Kurve dann steil nach oben.

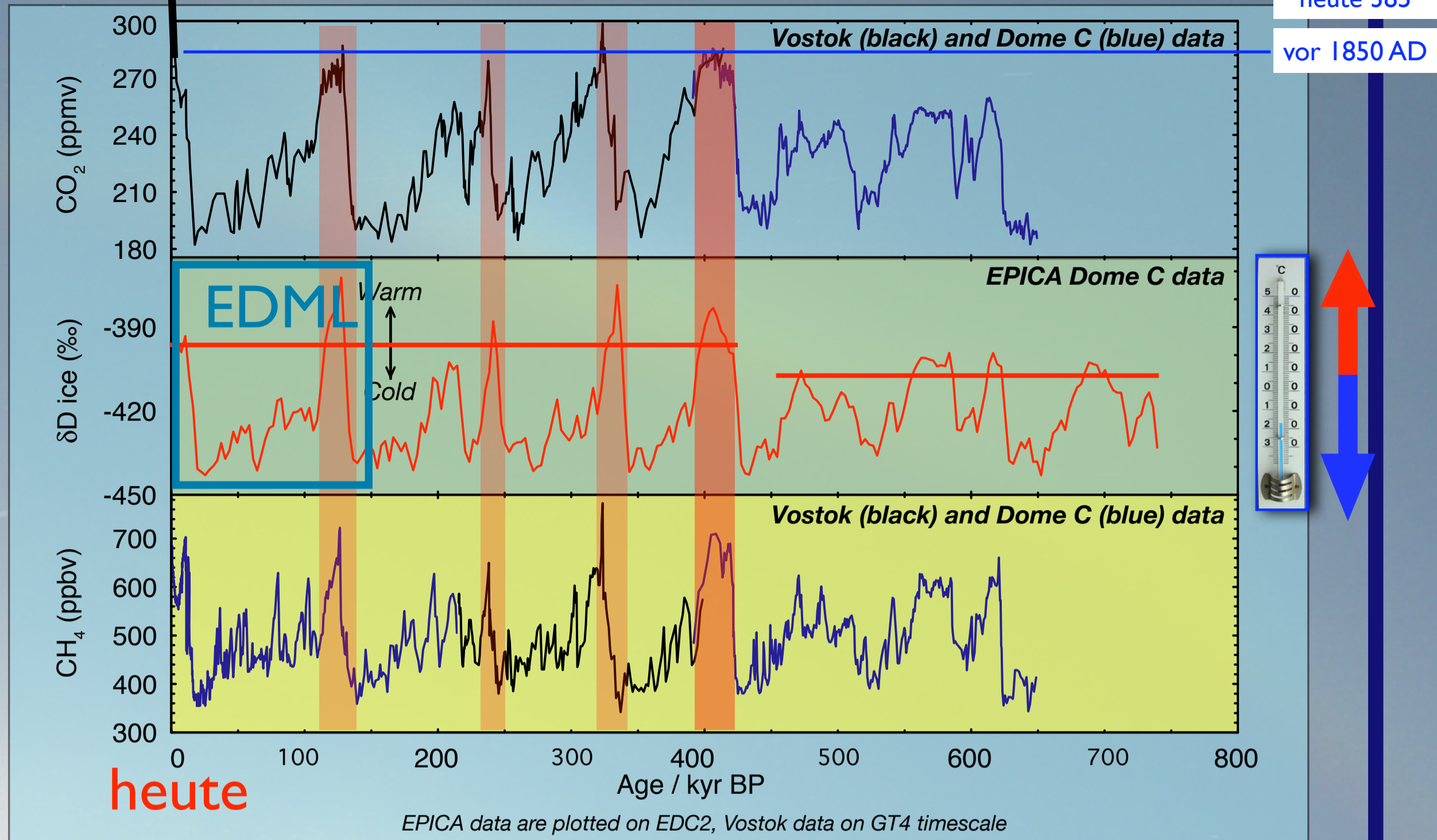
Die unterschiedliche Farbgebung bei der Darstellung der Kurve verweist auf den unterschiedlichen Ursprung für die Messdaten. Nur die rote Kurve zeigt Messwerte an atmosphärischen Luftproben, gemessen an der Station Mauna Loa auf Hawaii. Diese Messreihe begann erst 1958! Alle anderen Messwerte wurden 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.



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

Zeugen des Klimawandels der Vergangenheit: Eisbohrkerne:



GLOBAL  
I G B P  
CHANGE

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

PAGES  
PAST GLOBAL CHANGES



Ski-Club Kandel, Waldkirch, 16. Juni 2009



## Antarctic Ice Core Records: Vostok and EPICA.

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

Credits:

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

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

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

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

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

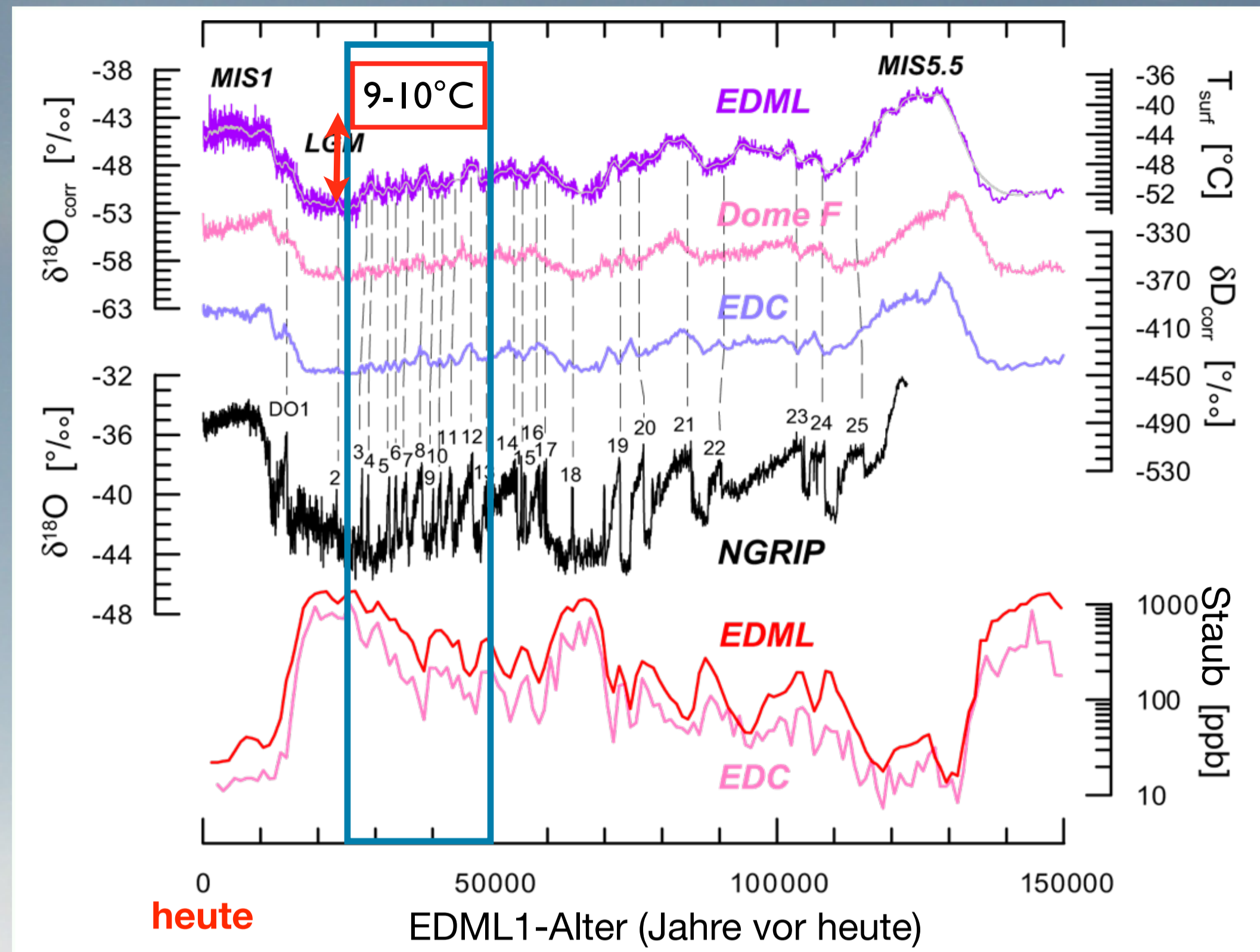
Quelle der Abb.: [www.pages.unibe.ch](http://www.pages.unibe.ch)



# Der neue Kern aus der Antarktis: EDML

Antarktiskerne  
verlaufen  
gleichsinnig

Im neuen EDML-  
Kern sind mehr  
Details erkennbar:  
Für Vergleich mit  
Grönland am  
besten geeignet



Quelle: EPICA Community members: *Nature* 444, 195-198 (2006)

Ski-Club Kandel, Waldkirch, 16. Juni 2009

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

Originalabb.-Unterschrift:

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

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

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

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

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

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

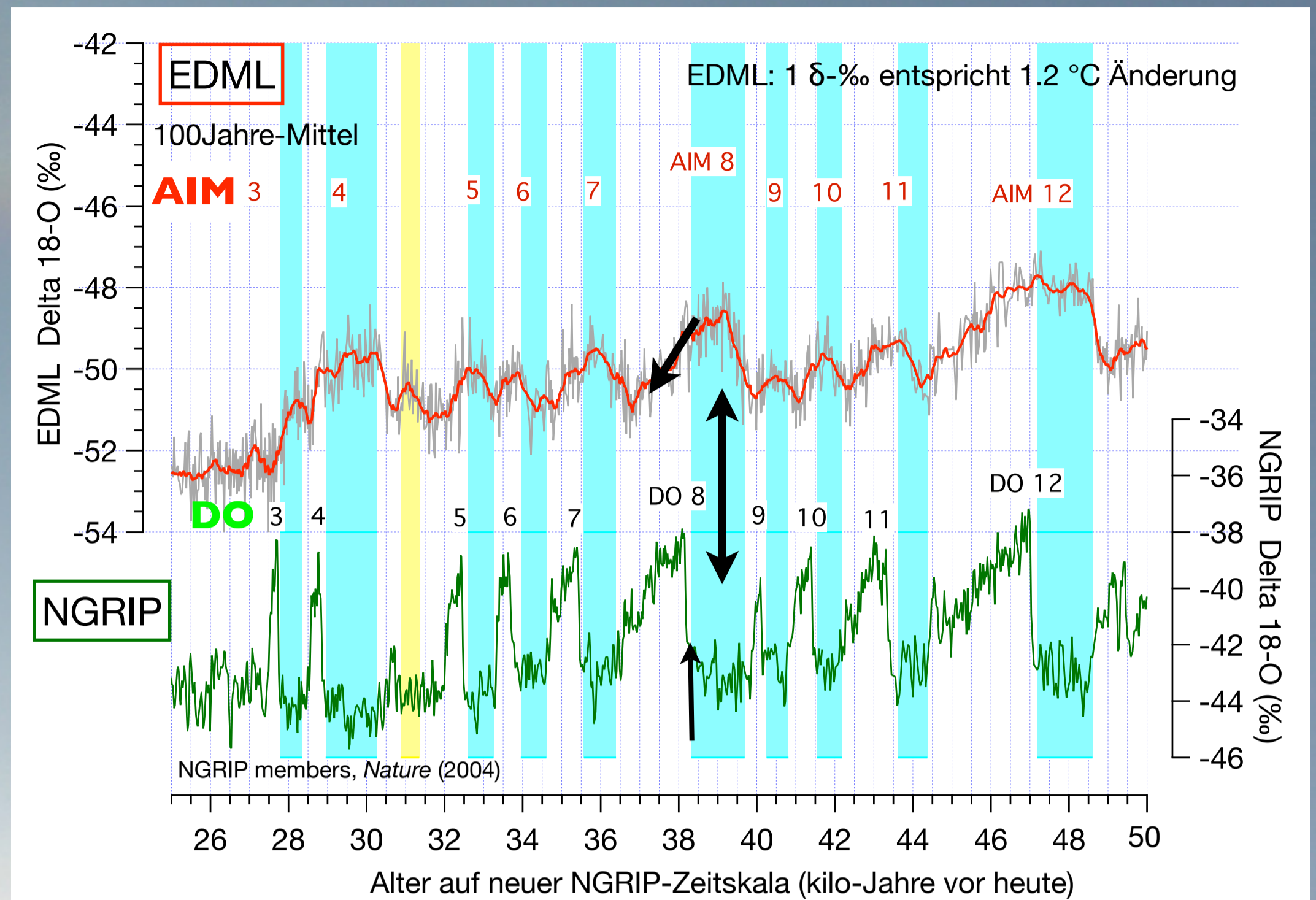
Quelle: EPICA Community Members: One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature* 444, 195-198 (2006)



# Vergleich Antarktis (EDML) - Grönland (NGRIP)

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

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



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

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

Die Erwärmung im Süden beginnt während eines Stadials (kalte Phase) im Norden und führt zu einem sog. Antarktischen Isotopenmaximum (AIM). Mit einsetzender Abkühlung im Süden kommt es zu einem sprunghaften Temperaturanstieg im Norden, den sog. schnellen klimatischen Schwankungen oder Dansgaard-Oeschger-Ereignissen (D/O). Allen DO-Ereignissen im Norden sind AIMs im Süden zugeordnet.

Dieses Wechselspiel wird als „Bipolar Seesaw“ (bipolare Wippe) bezeichnet. Es hängt mit einem Wärmestau im Süden (wahrscheinlich Erwärmung des südlichen Ozeans) und einem plötzlichen Wärmetransport nach Norden und damit einer Abkühlung im Süden und einer sprunghaften Erwärmung im Norden zusammen. Der Wärmetransport erfolgt über die Atlantische meridionale Ozeanzirkulation (AMOC), die in nördlichen Stadialen reduziert ist (Erwärmung im Süden) und in Interstadialen voll wirksam wird (Abkühlung im Süden).

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

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

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

## Dansgaard-Oeschger-Ereignisse

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

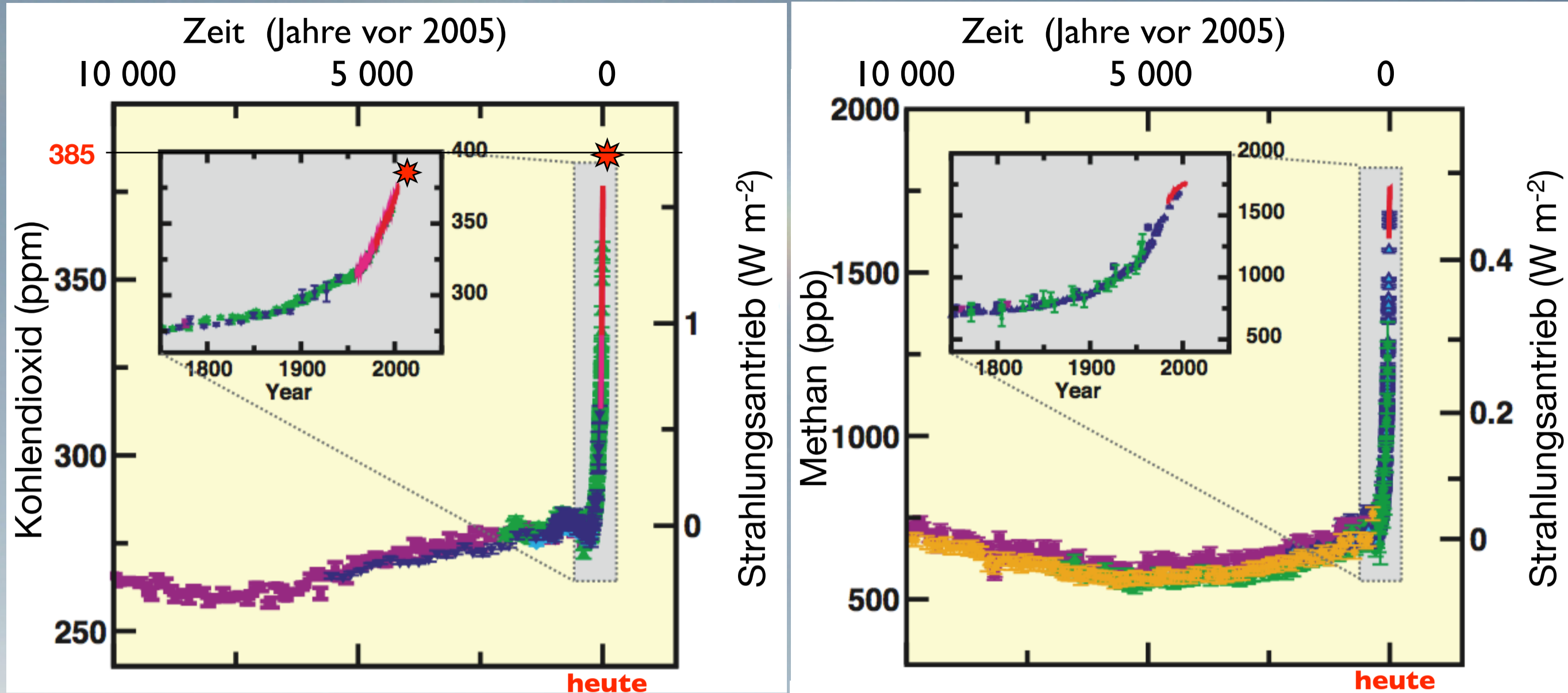


# Der Blick in die Zukunft





# Informationen aus dem IPCC- Report 2007: Treibhausgase

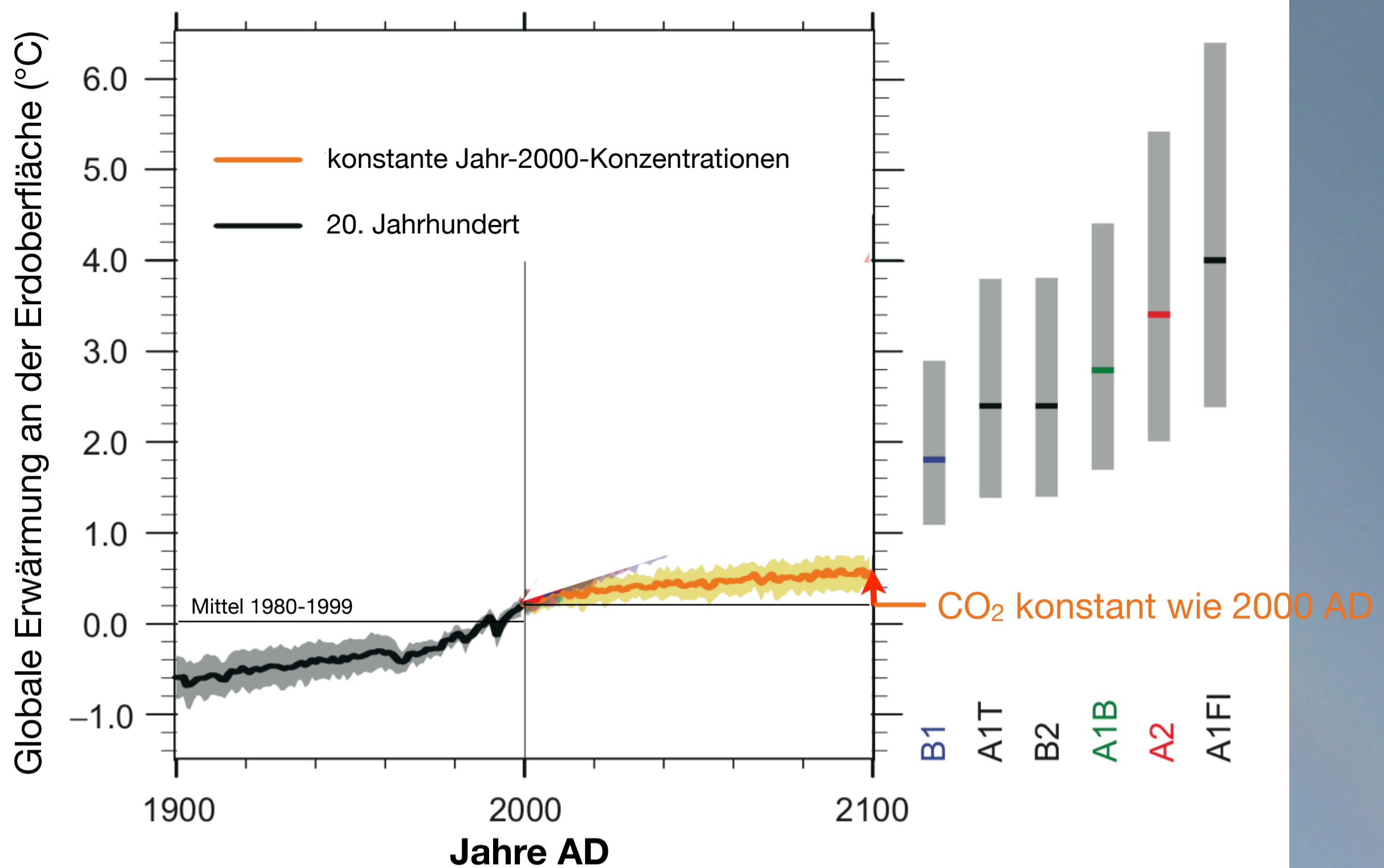


Quelle: IPCC, Climate Change 2007: The Physical Basis, Summary for Policy Makers ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch))

Informationen aus dem IPCC-Report 2007: Der Anstieg des Kohlendioxidgehaltes und des Methangehaltes. Beide Gase sind zusammen mit dem Wasserdampf die am stärksten klimawirksamen Treibhausgase. Der mit dem Anstieg der Treibhausgase verbundene Strahlungsantrieb (rechte Achsen) führt u.a. zu einer Erhöhung der Lufttemperatur. Mit verschiedenen Wirtschaftsszenarien wird der Anstieg der Treibhausgase für die Zukunft simuliert.



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



**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.

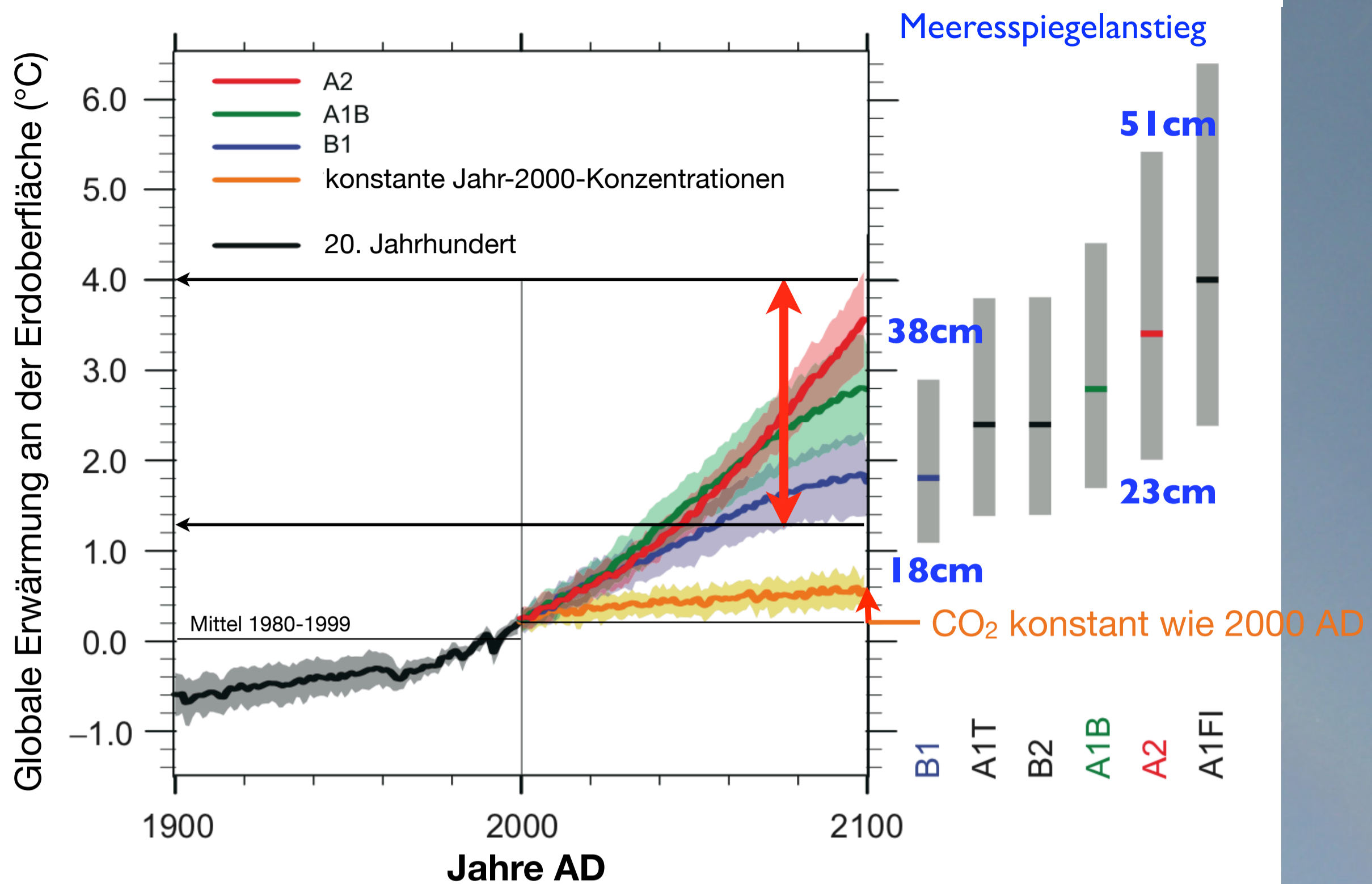
Die orangefarbene Kurve steht für eine Simulation, bei der die Treibhausgaskonzentrationen konstant auf dem Wert von 2000 gehalten werden. Selbst dann würde die Temperatur bis zum Jahr 2100 global um etwa 0.4 °C steigen.

Die Kurven für den Zeitraum 200-2100 verdeutlichen den Schwankungsbereich der einzelnen Modelle. Der wahrscheinlichste Anstieg des globalen Temperaturmittels an der Erdoberfläche liegt zwischen 1,3 und 4,0 °C.

Mit der blauen Schrift rechts ist der daraus resultierende Meeresspiegelanstieg angedeutet.



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



Der Blick in die Zukunft



Ski-Club Kandel, Waldkirch, 16. Juni 2009



**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.

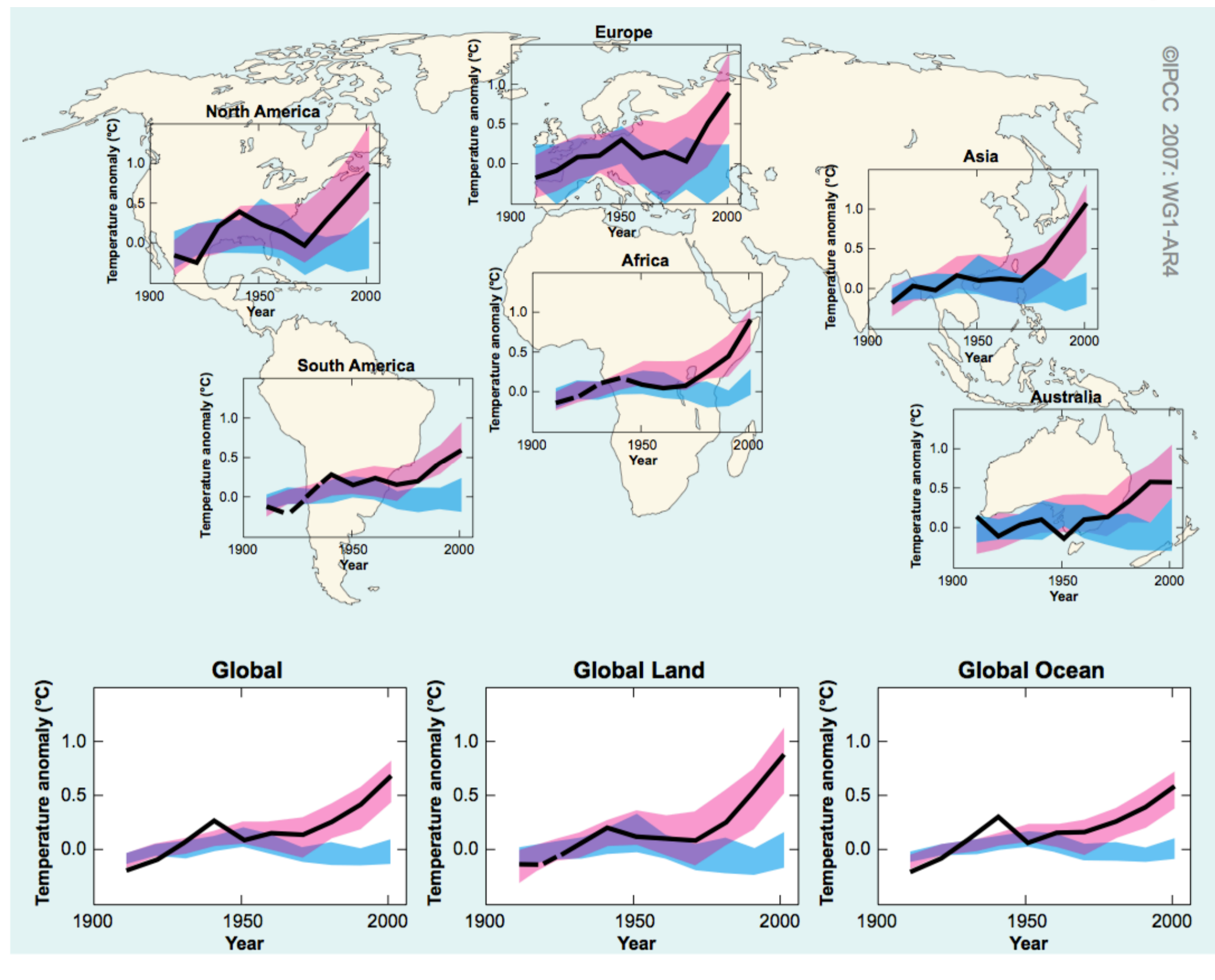
Die orangefarbene Kurve steht für eine Simulation, bei der die Treibhausgaskonzentrationen konstant auf dem Wert von 2000 gehalten werden. Selbst dann würde die Temperatur bis zum Jahr 2100 global um etwa 0.4 °C steigen.

Die Kurven für den Zeitraum 200-2100 verdeutlichen den Schwankungsbereich der einzelnen Modelle. Der wahrscheinlichste Anstieg des globalen Temperaturmittels an der Erdoberfläche liegt zwischen 1,3 und 4,0 °C.

Mit der blauen Schrift rechts ist der daraus resultierende Meeresspiegelanstieg angedeutet.



# Globale und kontinentale Temperaturänderungen



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

©IPCC 2007: WG1-AR4

Der Blick in die Zukunft



## Treibhausgase oder Änderung Erdumlaufbahn?



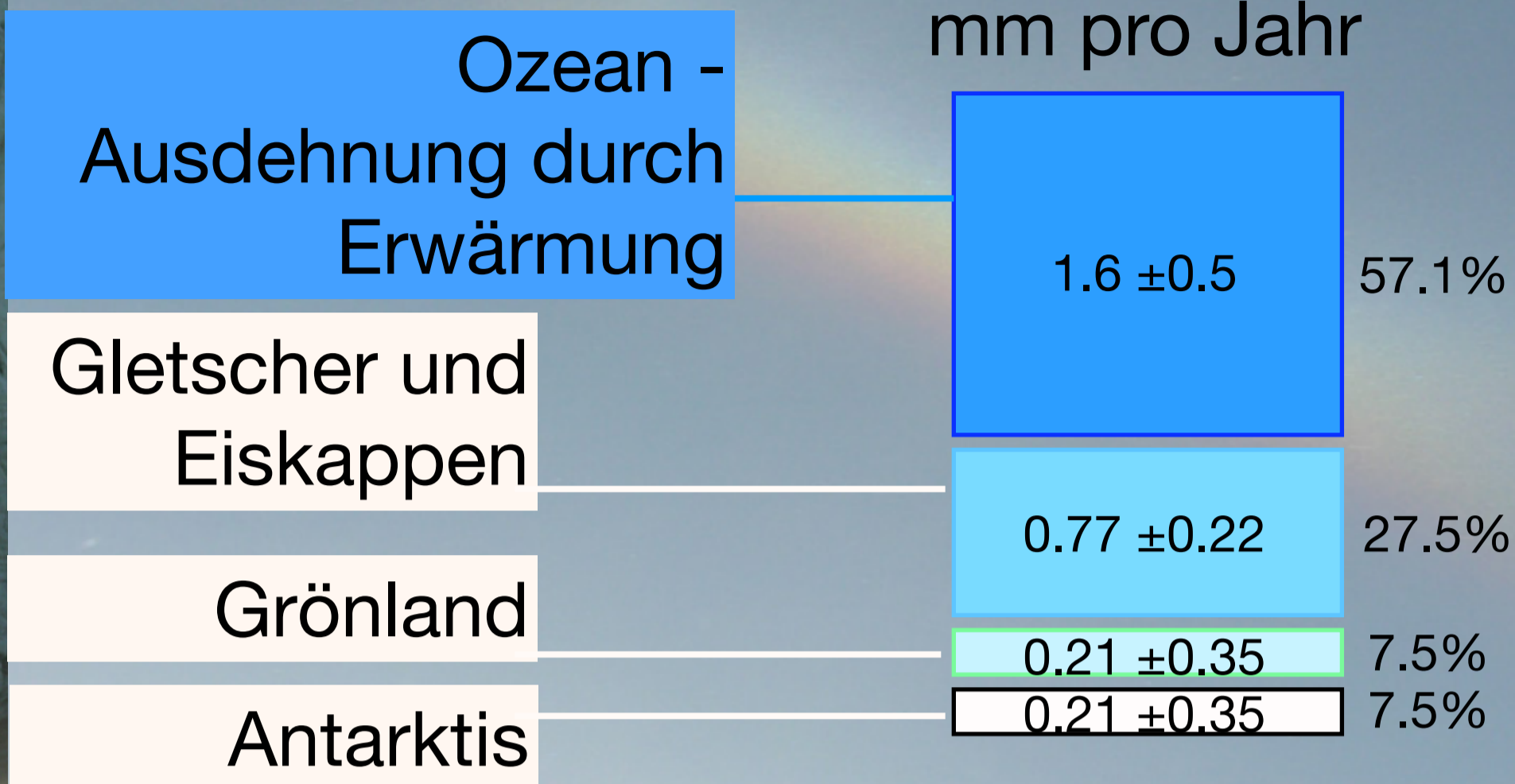
Vergleich der beobachteten Änderungen der Erdoberflächentemperatur auf kontinentaler und globaler Skala mit den von Klimamodellen auf Grund entweder natürlicher oder sowohl natürlicher als auch anthropogener Antriebe berechneten Resultaten. Die 10-Jahres-Mittel der Beobachtungen sind für den Zeitraum 1906-2005 (schwarze Linien) im Zentrum des Jahrzehnts und relativ zum entsprechenden Mittel von 1901-1950 eingezeichnet. Die Linien sind gestrichelt, wenn die räumliche Abdeckung weniger als 50% beträgt. Blau schattierte Bänder zeigen die 5-95%-Bandbreite für 19 Simulationen von 5 Klimamodellen, welche nur die natürlichen Antriebe durch Sonnenaktivität und Vulkane berücksichtigen. Rot schattierte Bänder zeigen die 5-95%-Bandbreite für 58 Simulationen von 14 Klimamodellen unter Verwendung sowohl der natürlichen als auch der anthropogenen Antriebe.

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

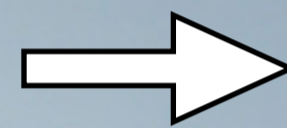


# Informationen aus dem IPCC- Report 2007: Was verursacht Meeresspiegelanstieg?

1993-2003  
mm pro Jahr



Summe: 2.8 mm pro Jahr



28 mm  
in 10 Jahren

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

Was verursacht Meeresspiegelanstieg? Der Bericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) enthält dazu einige Zahlen 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. 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 die Fließgeschwindigkeit einiger Eisströme deutlich zugenommen hat.





Meine Damen und Herren, ich komme zum Schluss. Ich hoffe ich konnte Ihnen einen kleinen Einblick in die Welt des polaren Eises, sowohl des Meereises als auch des Gletschereises, geben und zeigen, wie sich das polare Eis zur Zeit verändert.

Das polare eis zeigt uns aber auch, dass heute offensichtlich Prozesse ablaufen, die das Eis der Antarktis so noch nicht erlebt hatte.

Es ist sicher, dass wir große Anstrengungen unternehmen müssen, um den globalen Verbrauch an fossilen Brennstoffen einzudämmen. Im Vergleich zu dieser Herausforderung, ist es für den Bären nur ein kleiner Sprung von einer Scholle zur nächsten.





















Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.