

Auf Wegeners Spuren im Eis - Klimageschichte aus Eisbohrkernen

Hans.Oerter@awi.de

Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
in der Helmholtz-Gemeinschaft (AWI),
Bremerhaven

Historischer Rückblick - Wegener in Grönland

Glaziologische Expeditionen
gestern und heute

Welche klimatische Information
enthält das Inlandeis ?



Grönland/ Kalaallit Nunaat

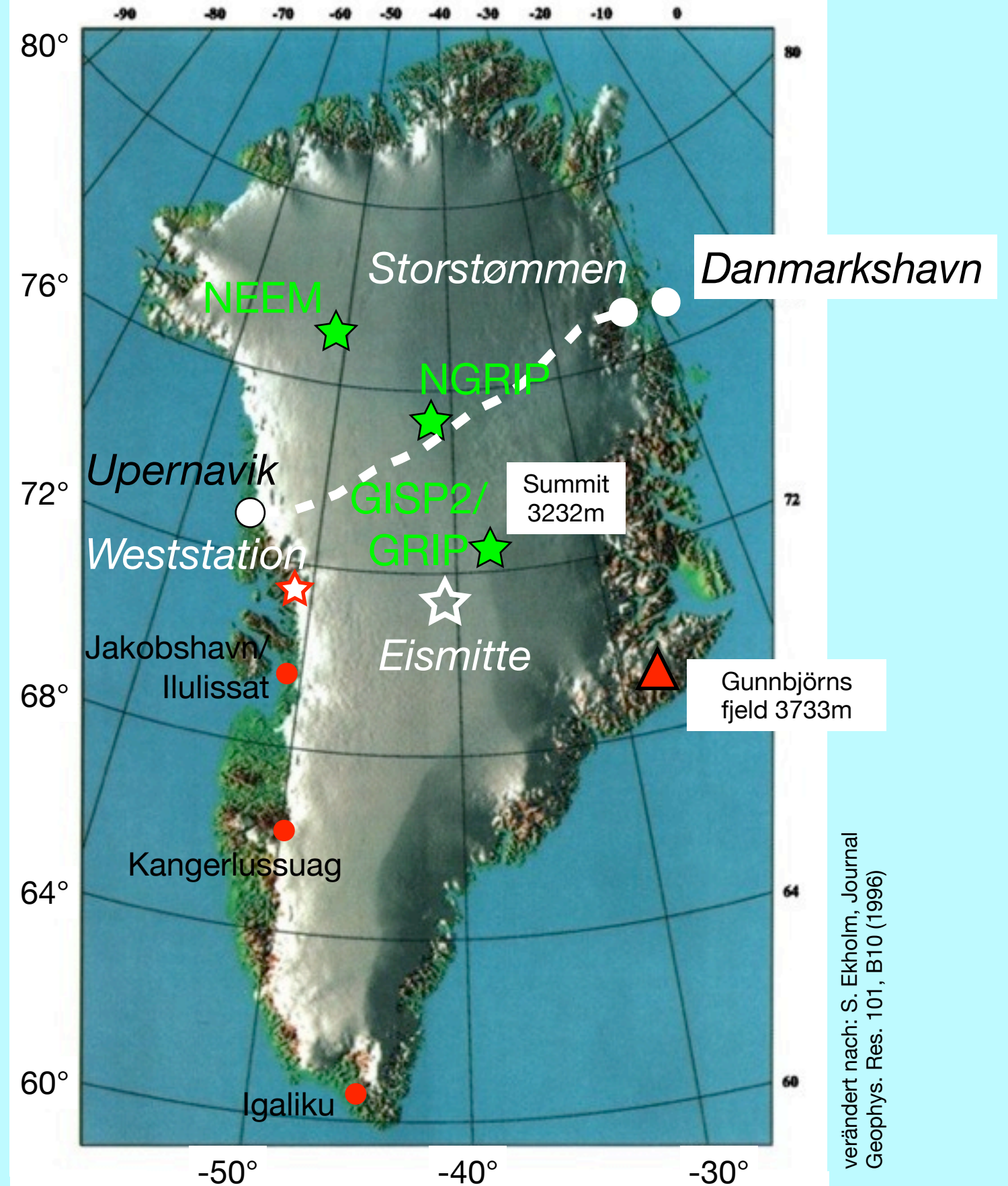
Fläche: 2.166 Mill. km²
 eisfrei: 0.410 Mill. km²
 (BRD: 0.357 Mill. km²)
 eisbedeckt: 1.756 Mill. km²
 vergletschert: 81.1 %

Quelle: Der Fischer Weltatlas 2009

Mittlere Eisdicke 1670 m

Das Grönländische Inlandeis entspricht
7.2 m Meeresspiegeländerung

Süd - Nord: 2670 km



verändert nach: S. Ekholm, Journal Geophys. Res. 101, B10 (1996)

West - Ost: 1050 km

1906-08

„Die VILLA“, Danmarkshavn, Germania Land

1992



Die „Villa“ am Danmark-Hafen. Nach einer Aufnahme der Danmark-Expedition.

aus: J.P. Koch : Durch die weiße Wüste. Berlin: J. Springer (1919)

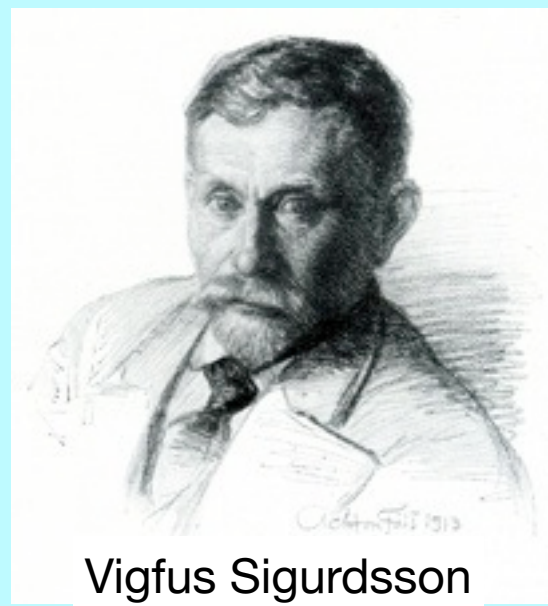


foto: hans oerter, 1992

Die dänische Expedition nach Dronning-Louises-Land und quer über das Inlandeis Nordgrönlands 1912-13



Infanteriehauptmann J.P. Koch
Kartograph, Glaziologe



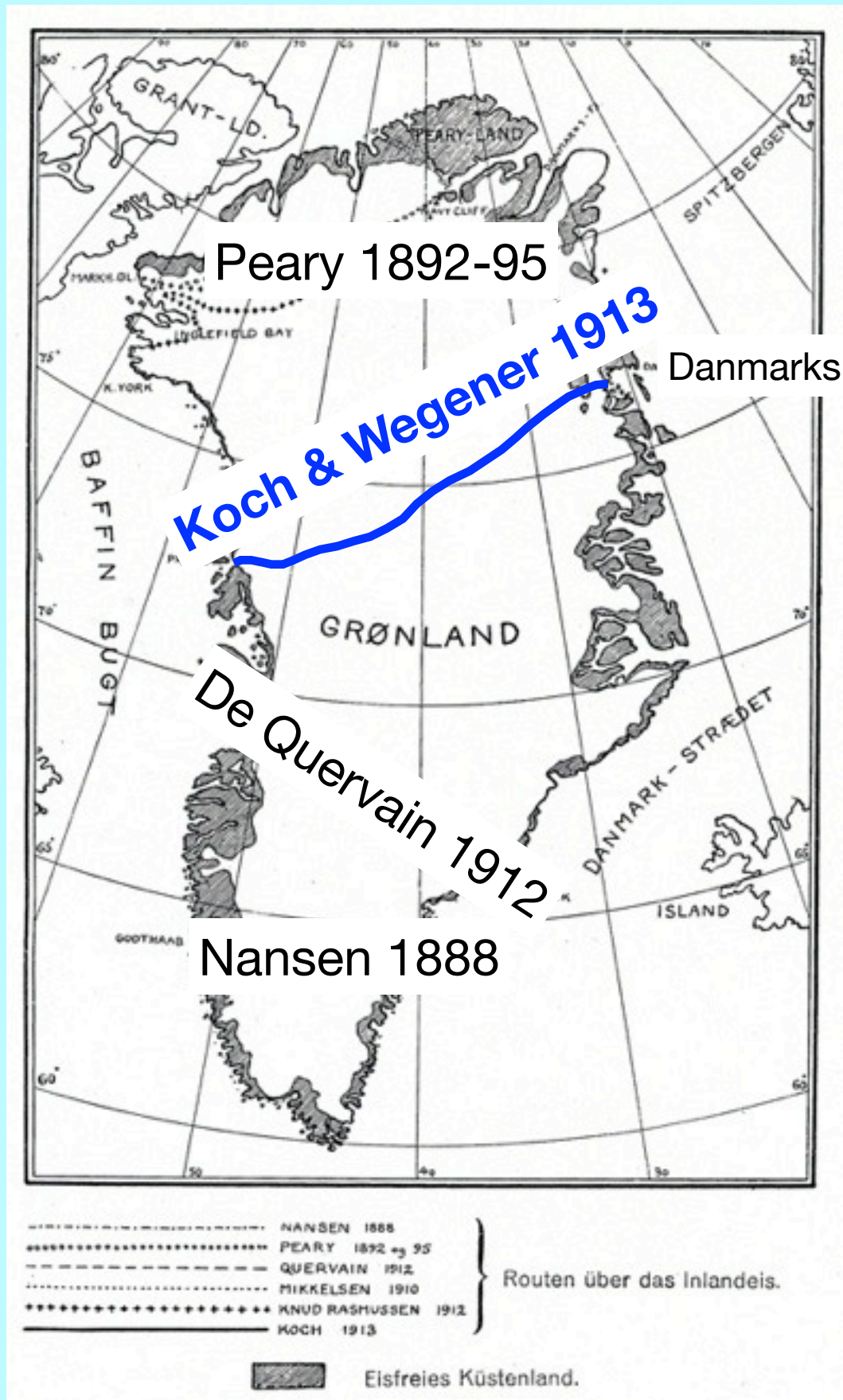
Vigfus Sigurdsson



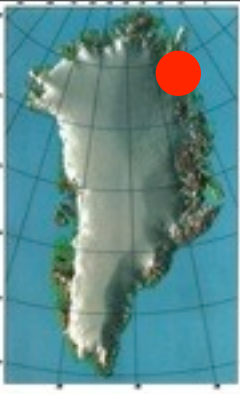
Lars Larsen

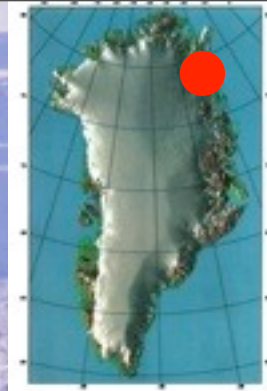


Priv.-Dozent Dr. A. Wegener
Meteorologe



aus: J.P. Koch : Durch die weiße Wüste. Berlin: J. Springer (1919)





Bei Station Borg



Die Oberfläche des Storström nahe bei Borg.

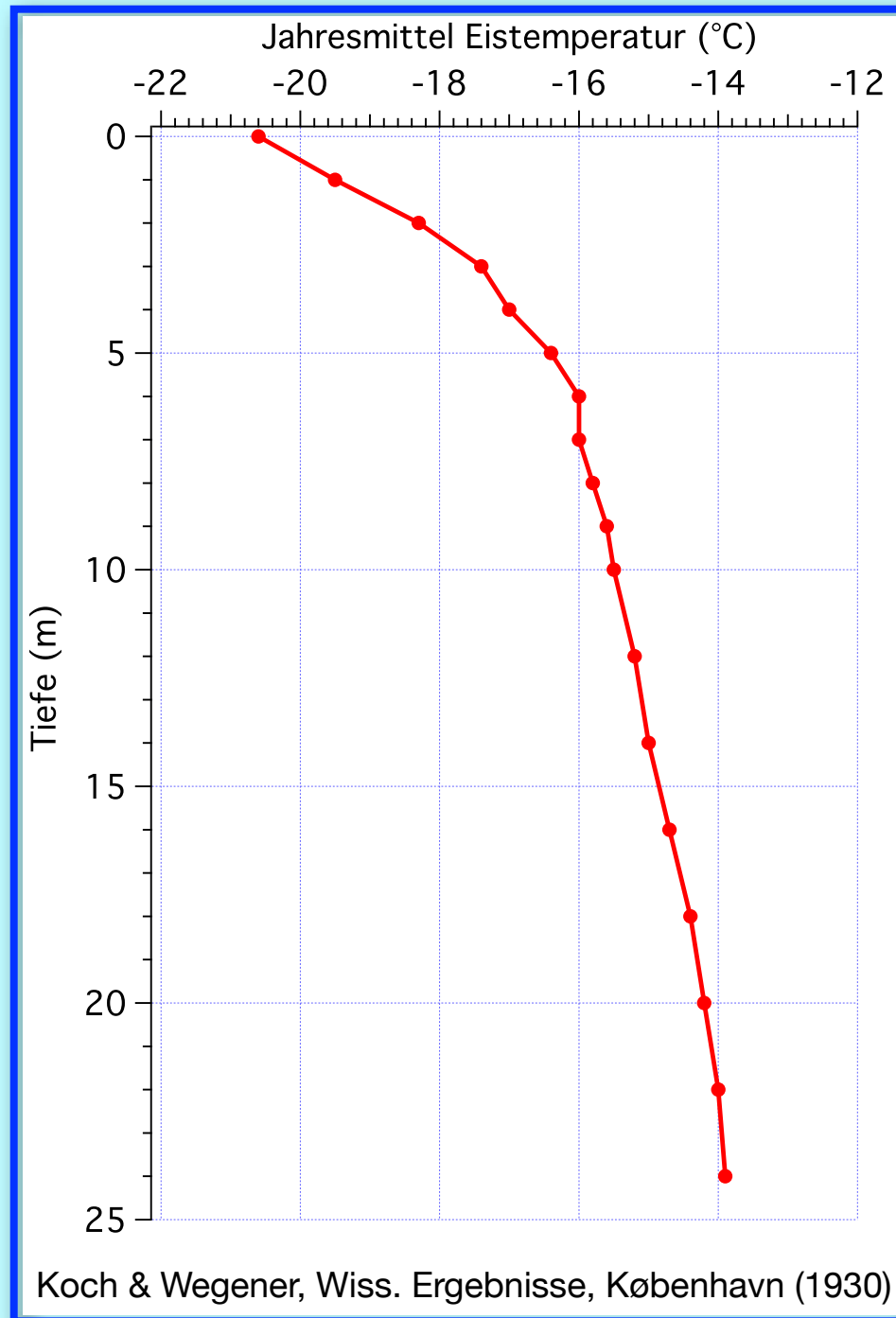


foto: hans oerter, 1993

aus: J.P. Koch : Durch die weiße Wüste. Berlin: J. Springer (1919)

Bohrungen im Eis

Temperaturmessung

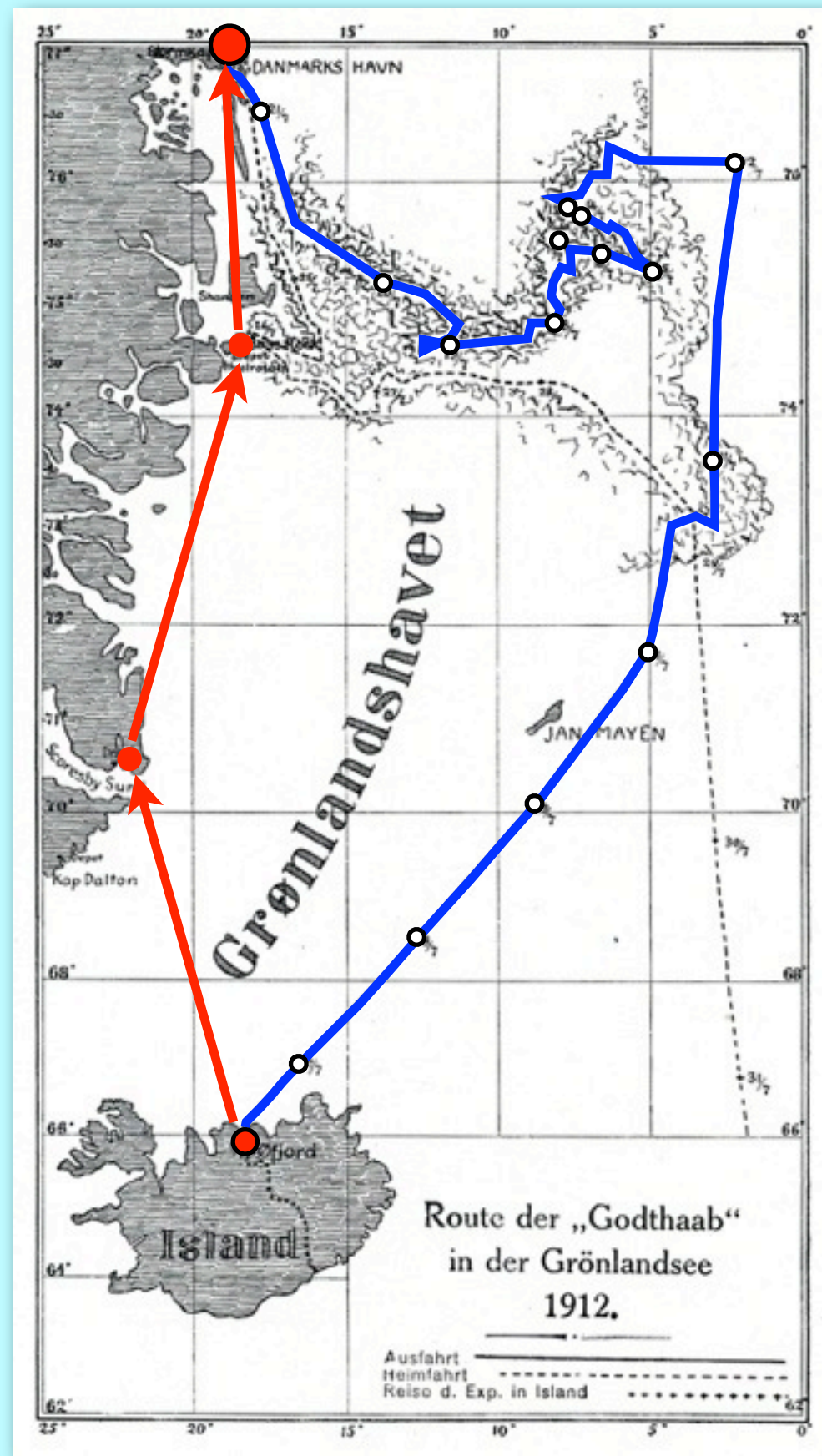


Von der Stube auf Borg: Bohrung im Eise.

aus: J.P. Koch : Durch die weiße Wüste. Berlin: J. Springer (1919)

Glaziologische Expeditionen gestern und heute

Anreise
von
Island:
6. - 21.
Juli 1912



Anreise nach Danmarkshavn



foto: hans oerter

Steinmann versus Blog



http://neem.nbi.ku.dk/field_diaries_folder/uk_diaries_2010/2010-07-27/



2010-07-27

Bedrock!!!

The official termination of the deep drilling project.

After a few runs with no penetration and totally grinded down cutters we made the decision to terminate the deep ice core drilling. We celebrated this with a glass of champagne in the drill trench and every nation present gave a small speech. Later we all went by skidoo to the shallow drill site 3 km from the NEEM camp to enjoy an afternoon of with scones with whipped cream and strawberry jam. We all dressed for a party and had a wonderful evening with big smiles everywhere. To imagine – it is done!!

No more drilling and logging.

Final logged depth is: 2537.36 m

Processing: 9.90 m (bag 1645-1662), processing depth: 914.10 m

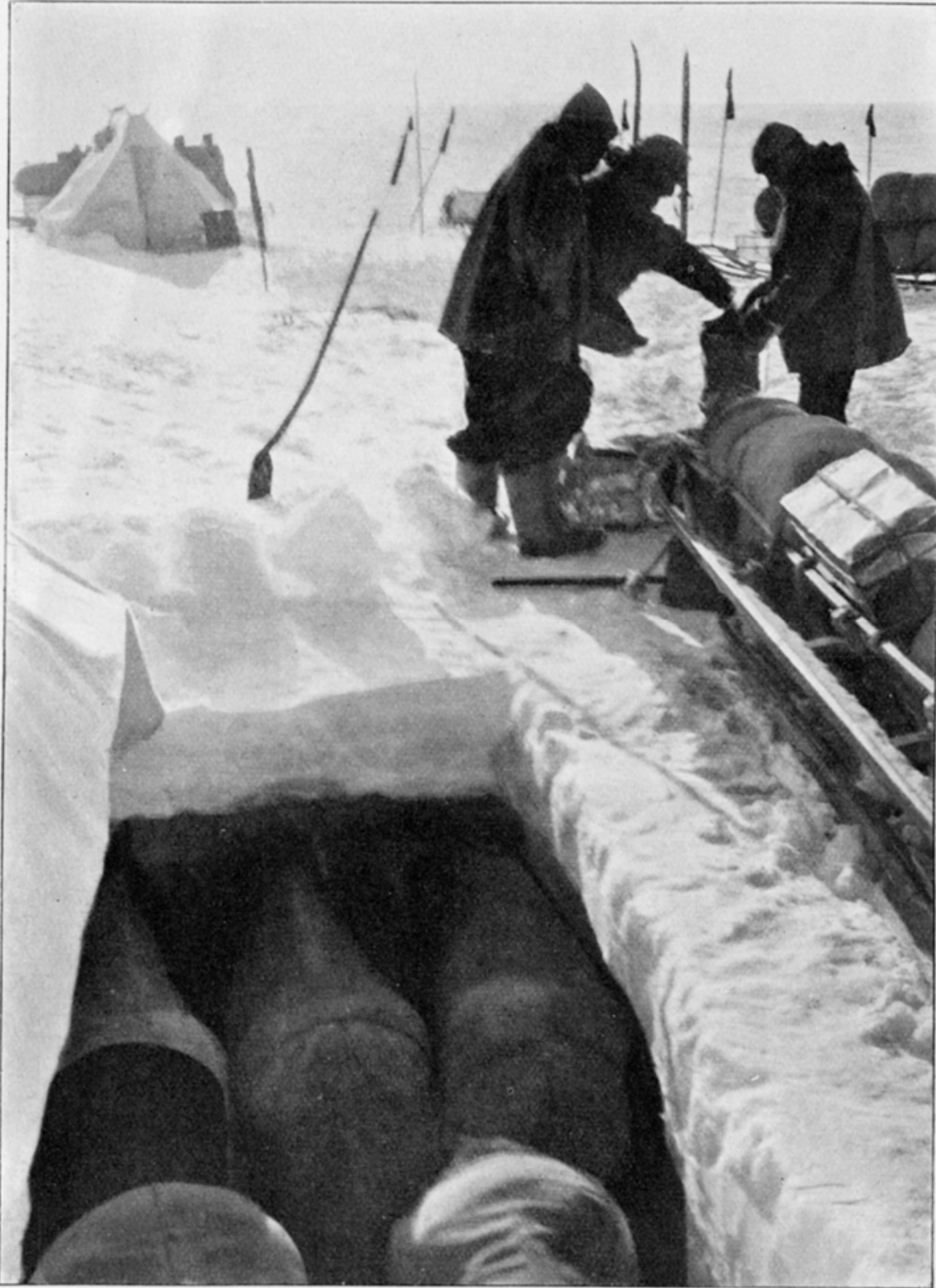


Fig. 10. Pferdestall im Firn.

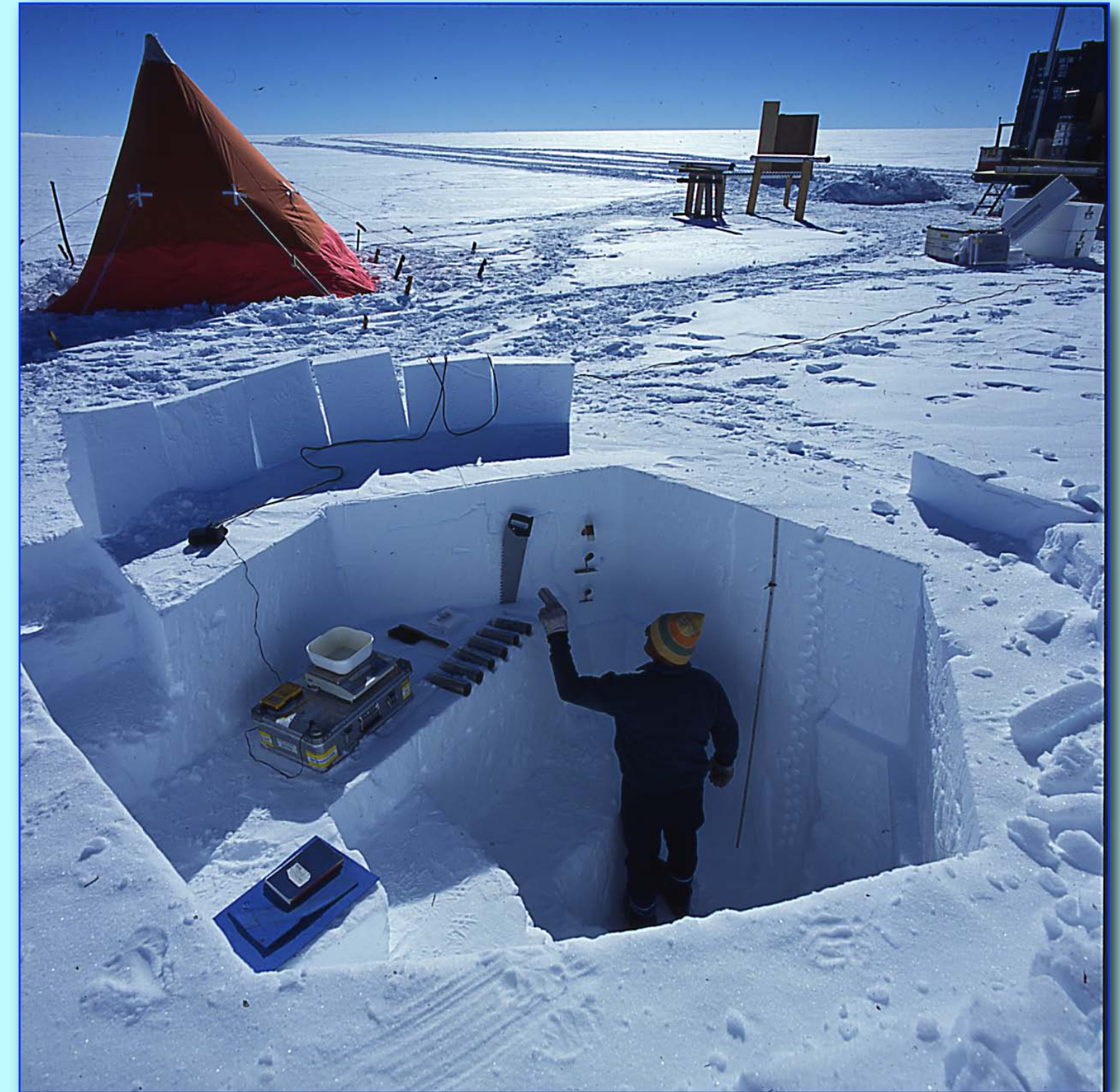
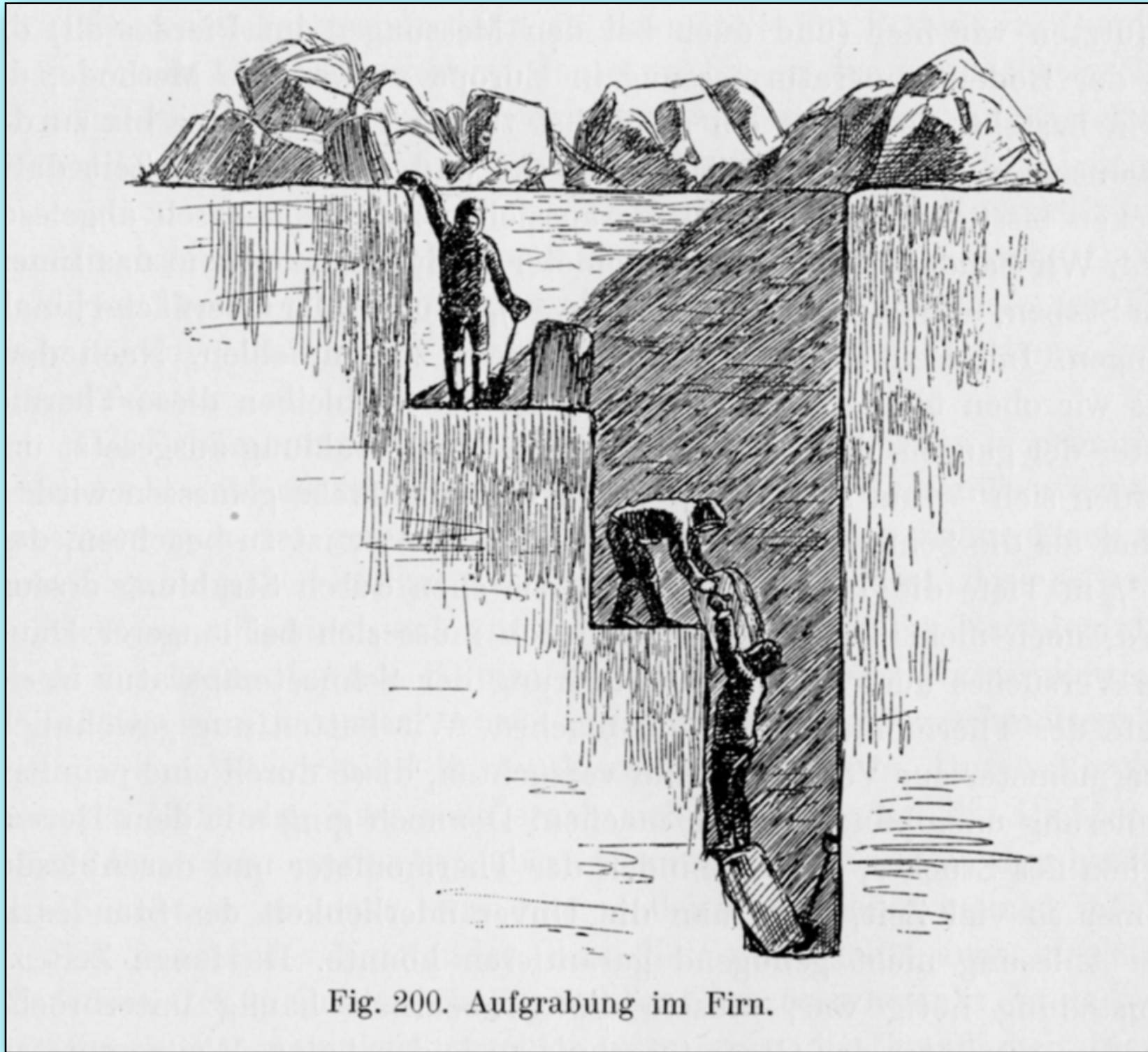
Vom Pferdeschlitten zum FlexMobil



foto: Sepp Kipfstuhl, AWI

AWI-Nordgrönlandtraverse 1993-95

Schneeschart - Schneeproben, Dichte, Schneeezutrag



from: Koch & Wegener: Meddelelser om Grønland, Bd. LXXV(1930)

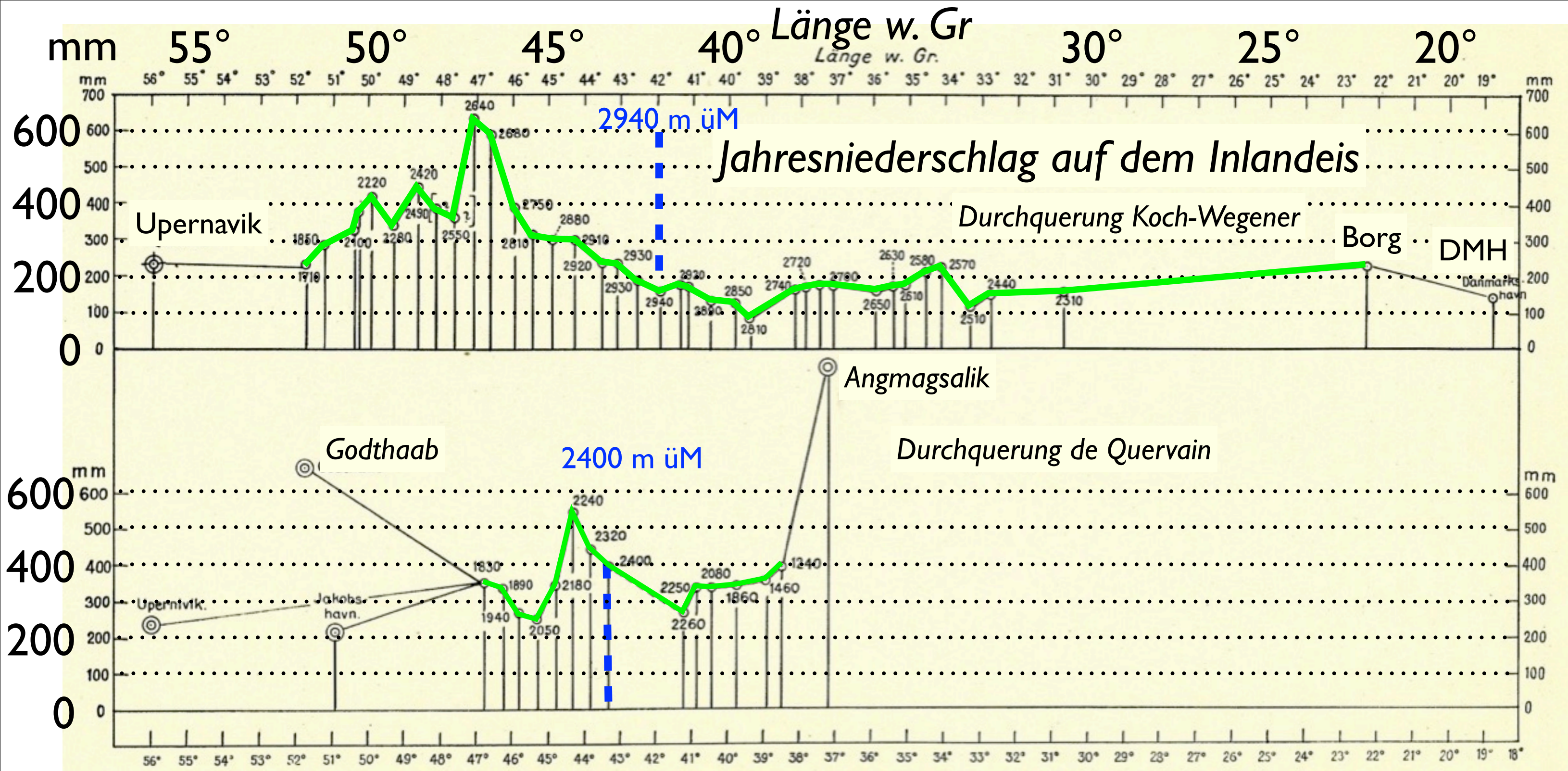


Fig. 211. Jahresniederschlag auf der Durchquerungsrouten. Unten: Derselbe auf de Quervains Durchquerung.

Jahresniederschlag auf der Durchquerungsrouten



Der Expeditionsleiter Prof. Dr. A. Wegener 1880-1930

1929
Vorexpedition

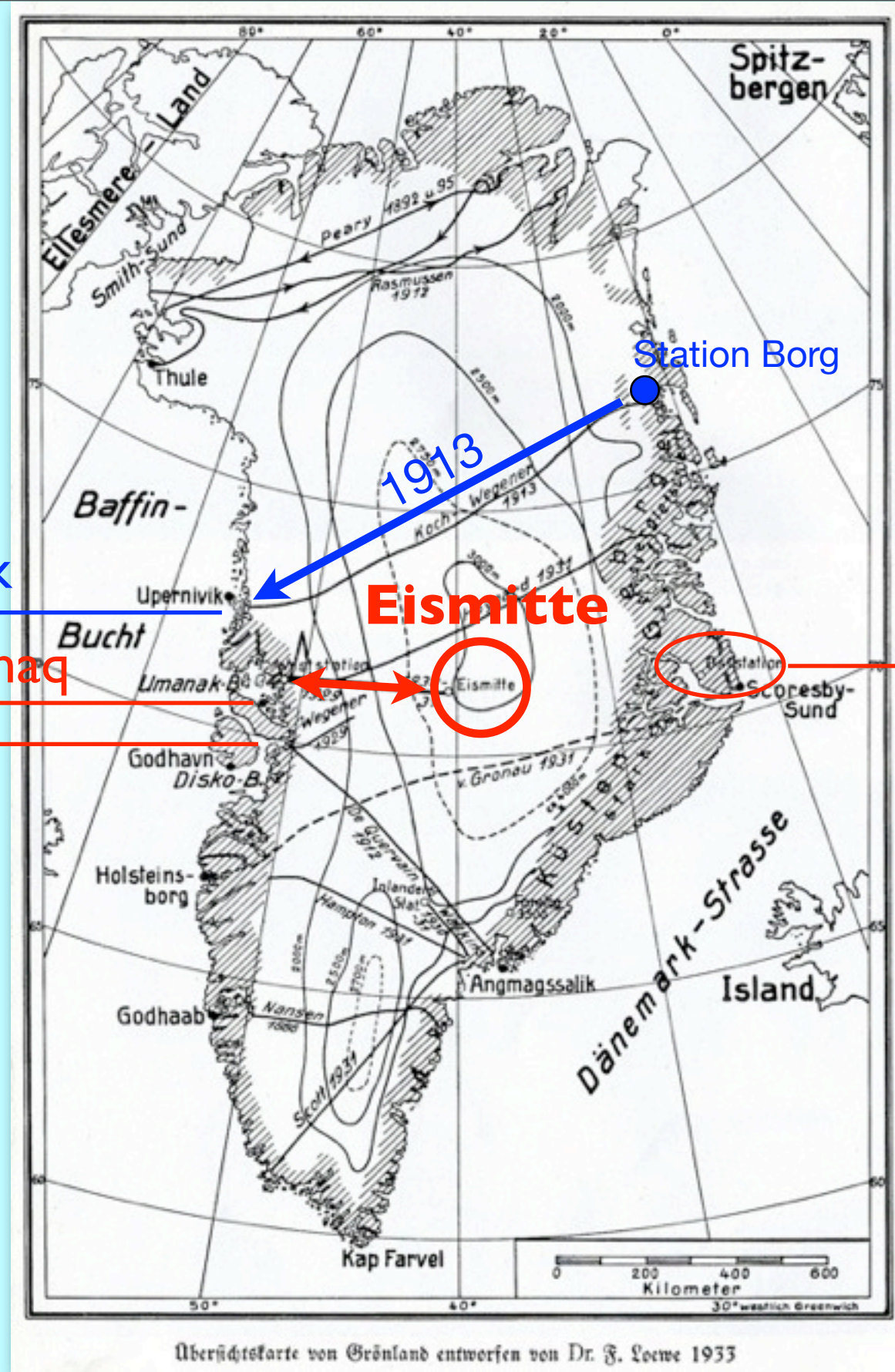
Upernavik

Uummannaq

1929

1930/31

Deutsche
Grönlandexpedition
Alfred Wegener



aus: J. Georgi (1933)

aus: J. Georgi (1933)

Dichtemessung an Firnblöcken

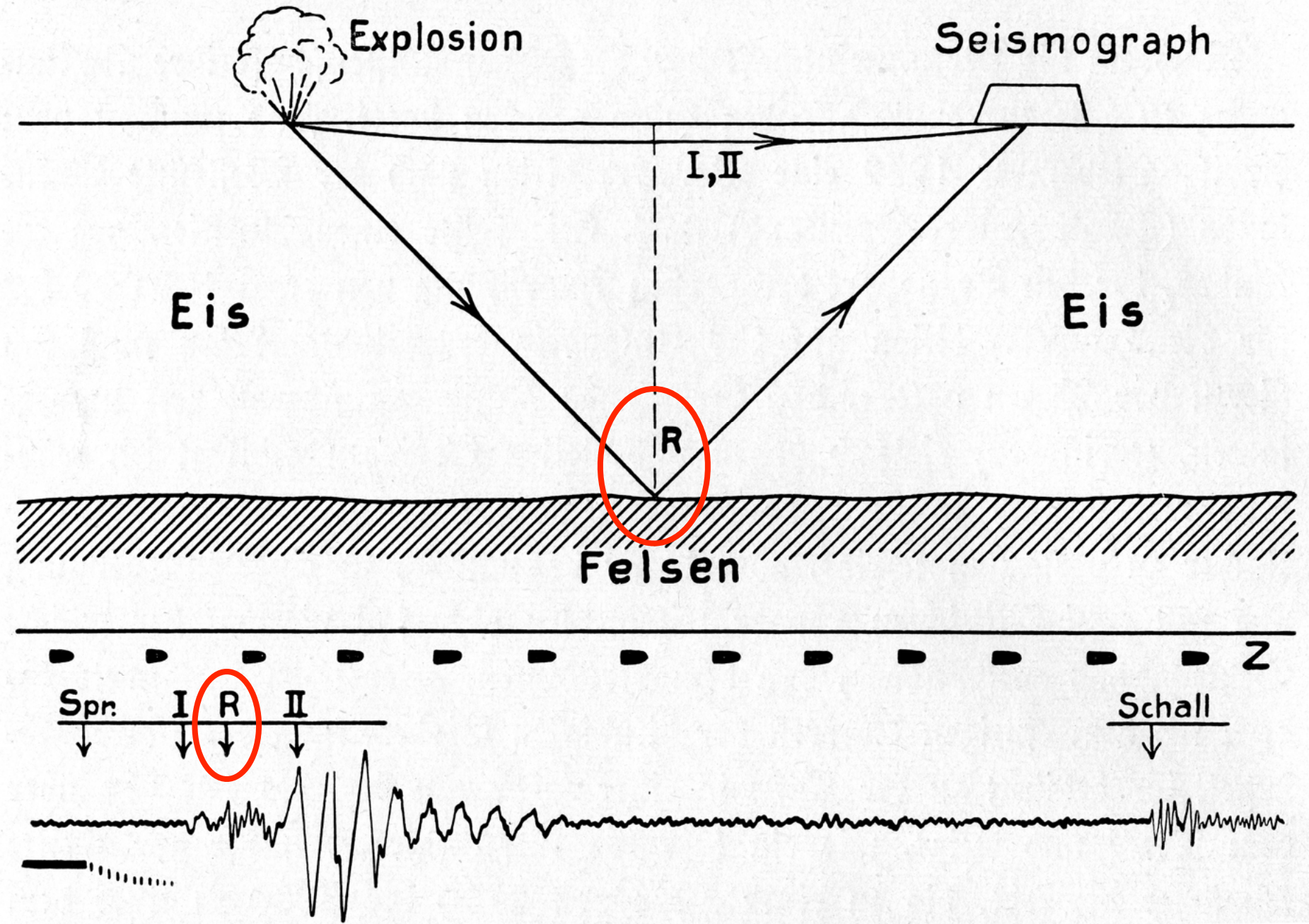


Aufnahme Georgi
Ein Firnblock wird zum Ausmessen und Wiegen zurechtgeschnitten. An der
Decke die Waage.
Seite 178.

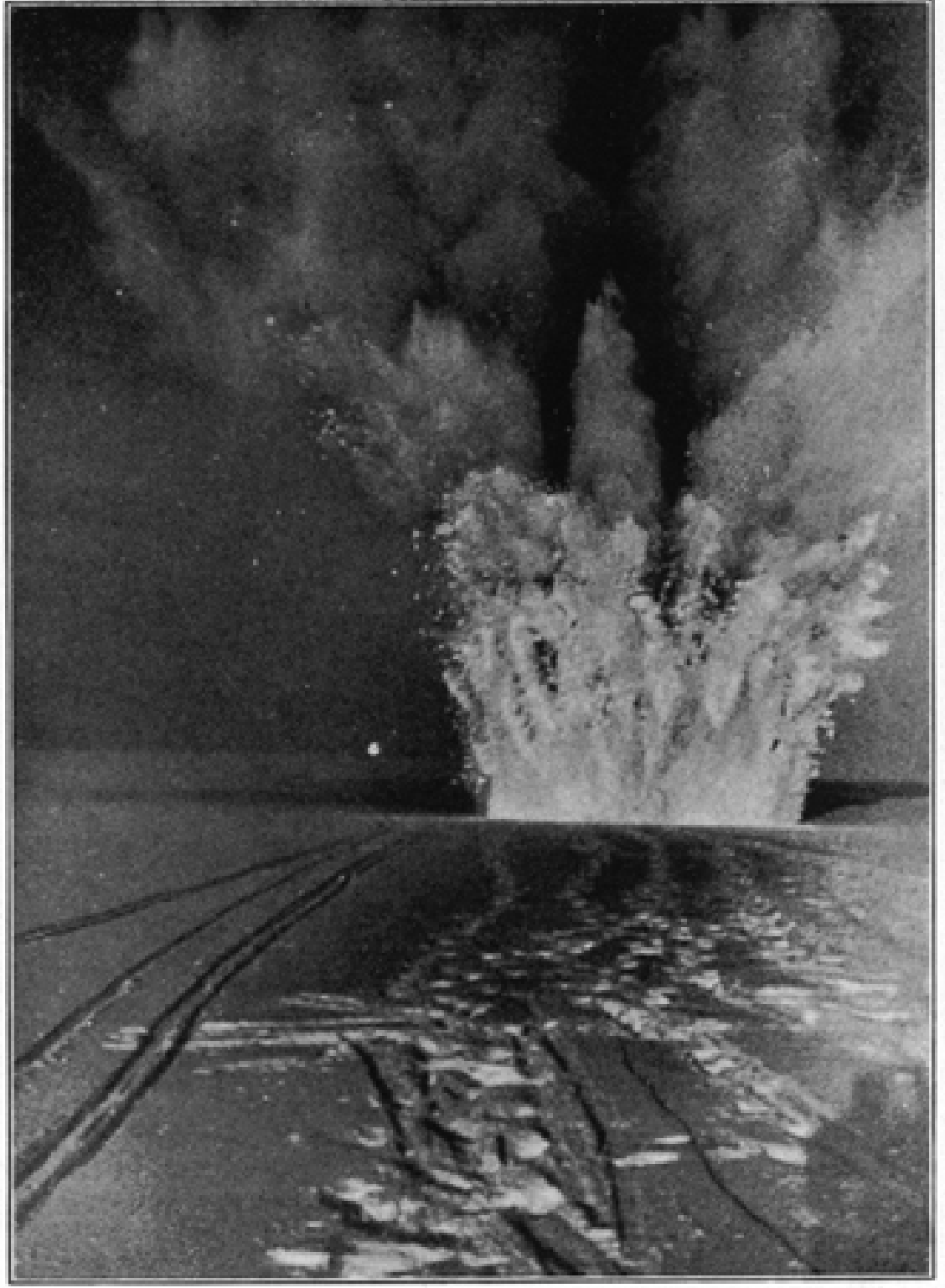
aus: J. Georgi: Im Eis vergraben (1933)

Seismische Eisdickenmessungen

Prinzip der seismischen Eisdickenmessung (oben) und Nachbildung eines Registrierstreifens (unten)



from: J. Georgi (1933)



Sprengung mit 73 kg Trinitrotoluol.
Seite 213.

Aufnahme E. W.

aus: E. Wegener (ed.) (1933/1940)

aus: J. Georgi (1933)

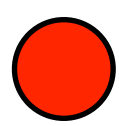


• • •

Koch-Wegener 1913

—

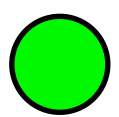
De Quervain 1912



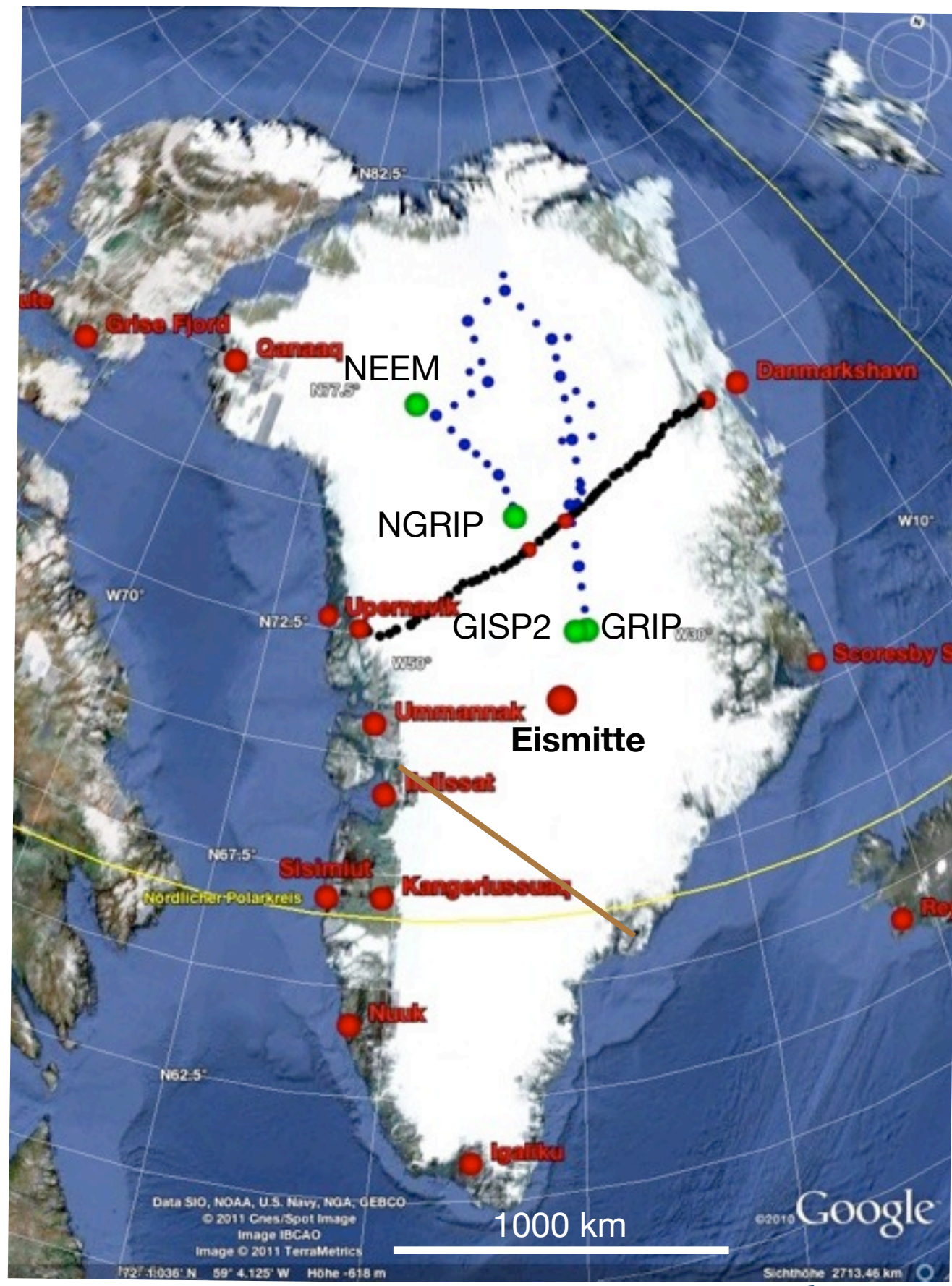
Wegener 1930/31

• • • •

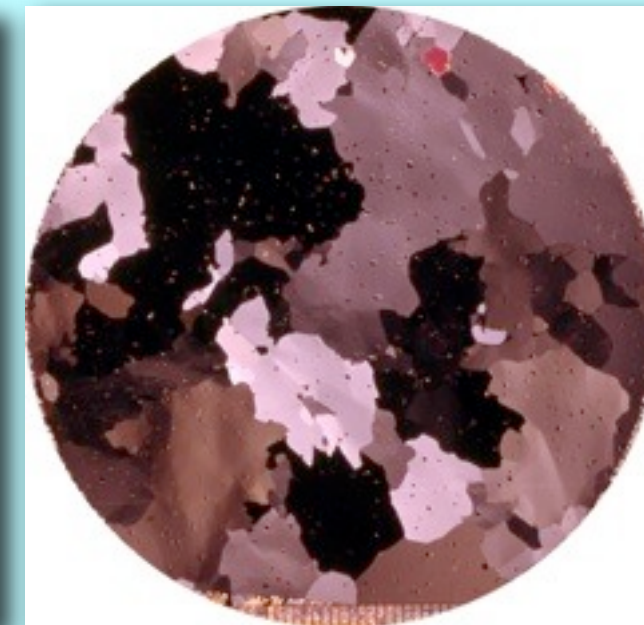
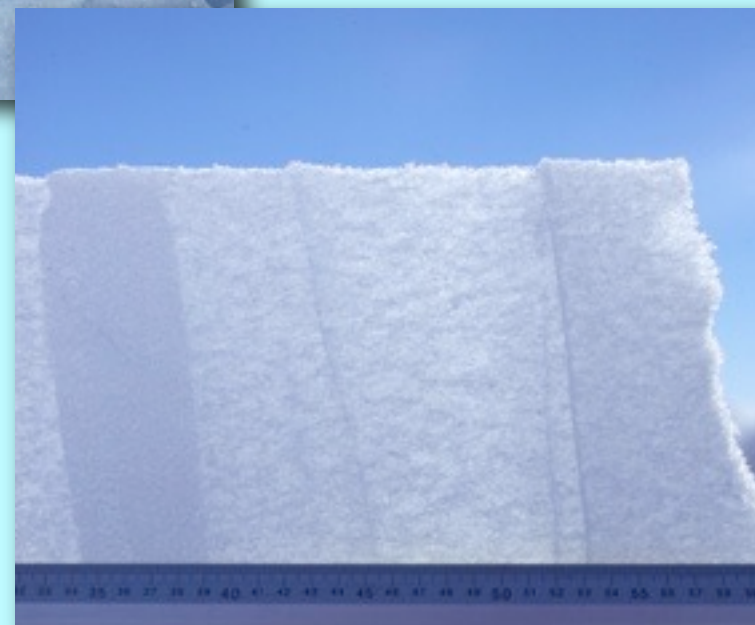
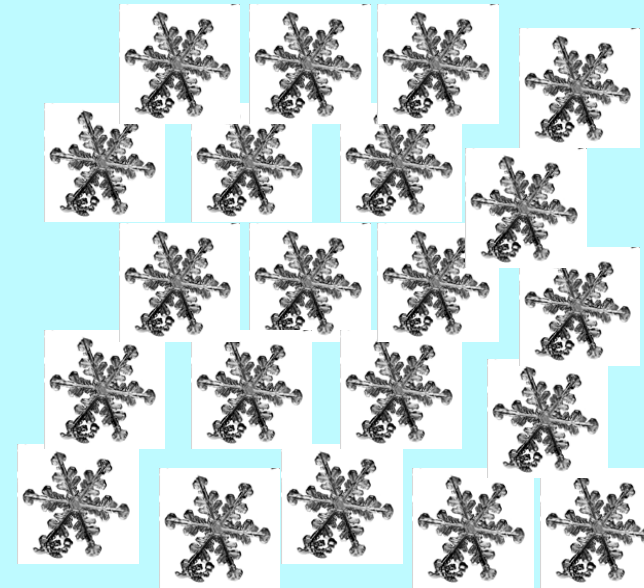
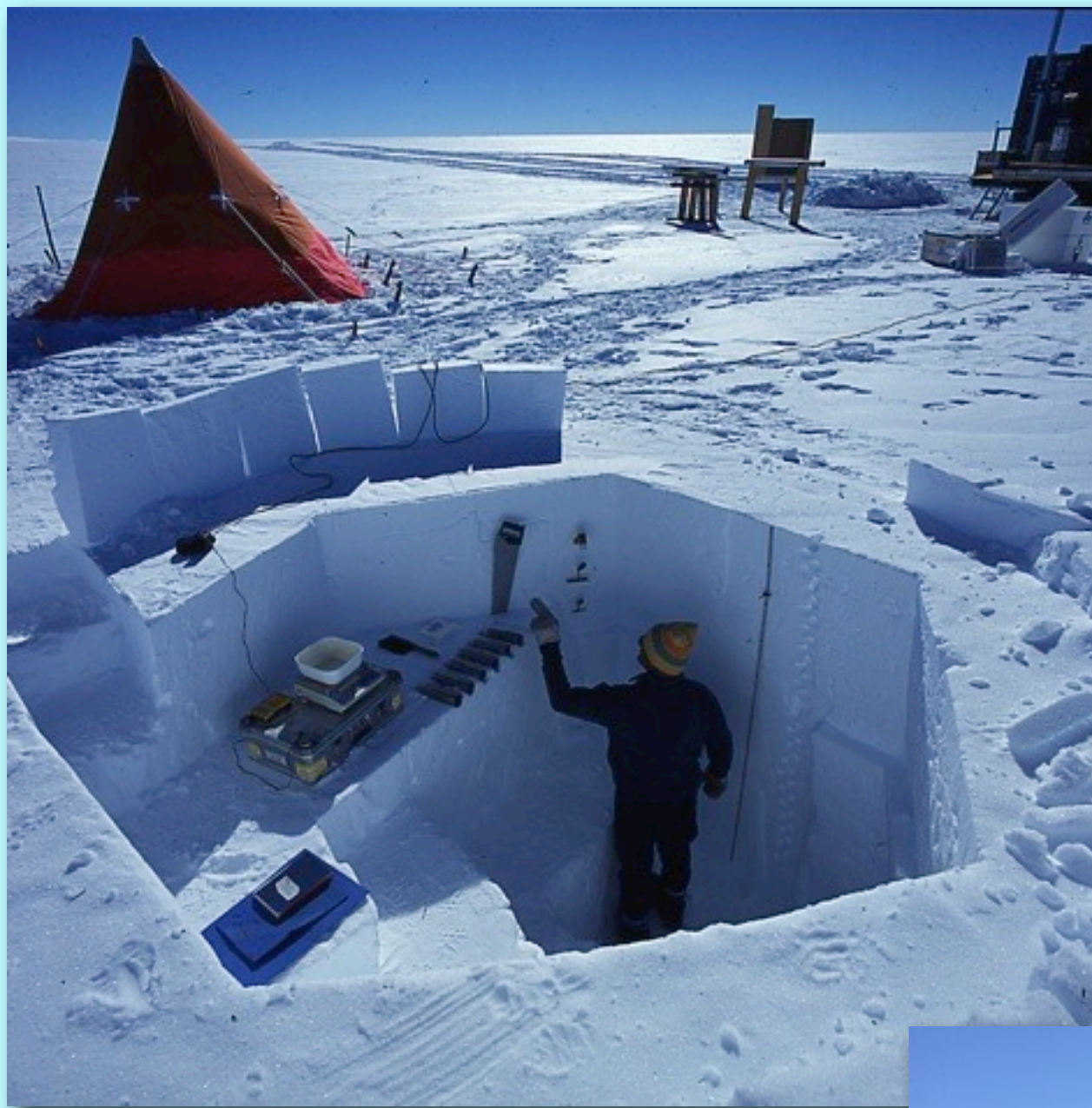
AWI Nordgrönland-
Traverse 1993-1995

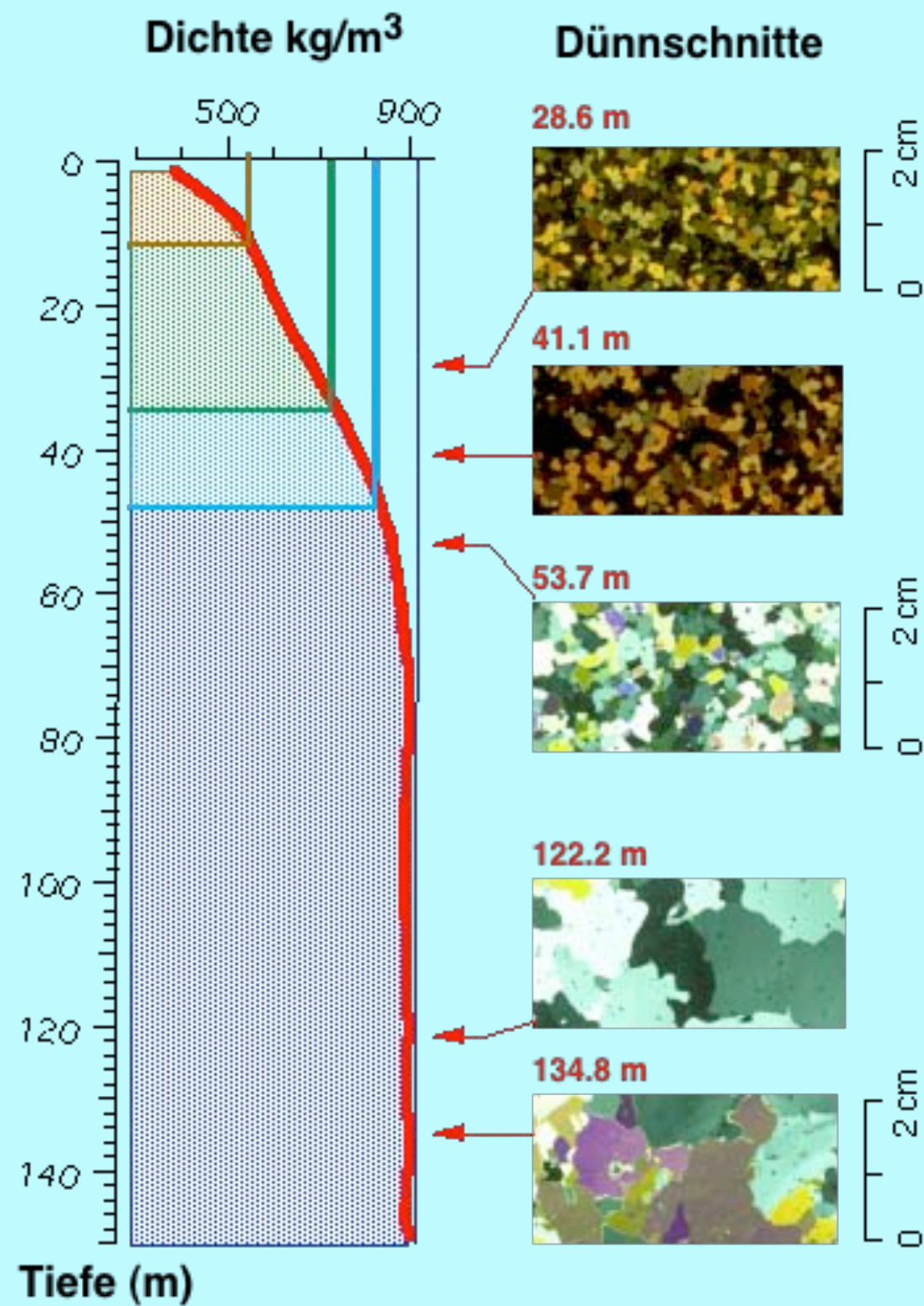


Eiskerntiefbohrung



Ein Eisschild baut sich aus über einander liegenden Jahresschichten auf.

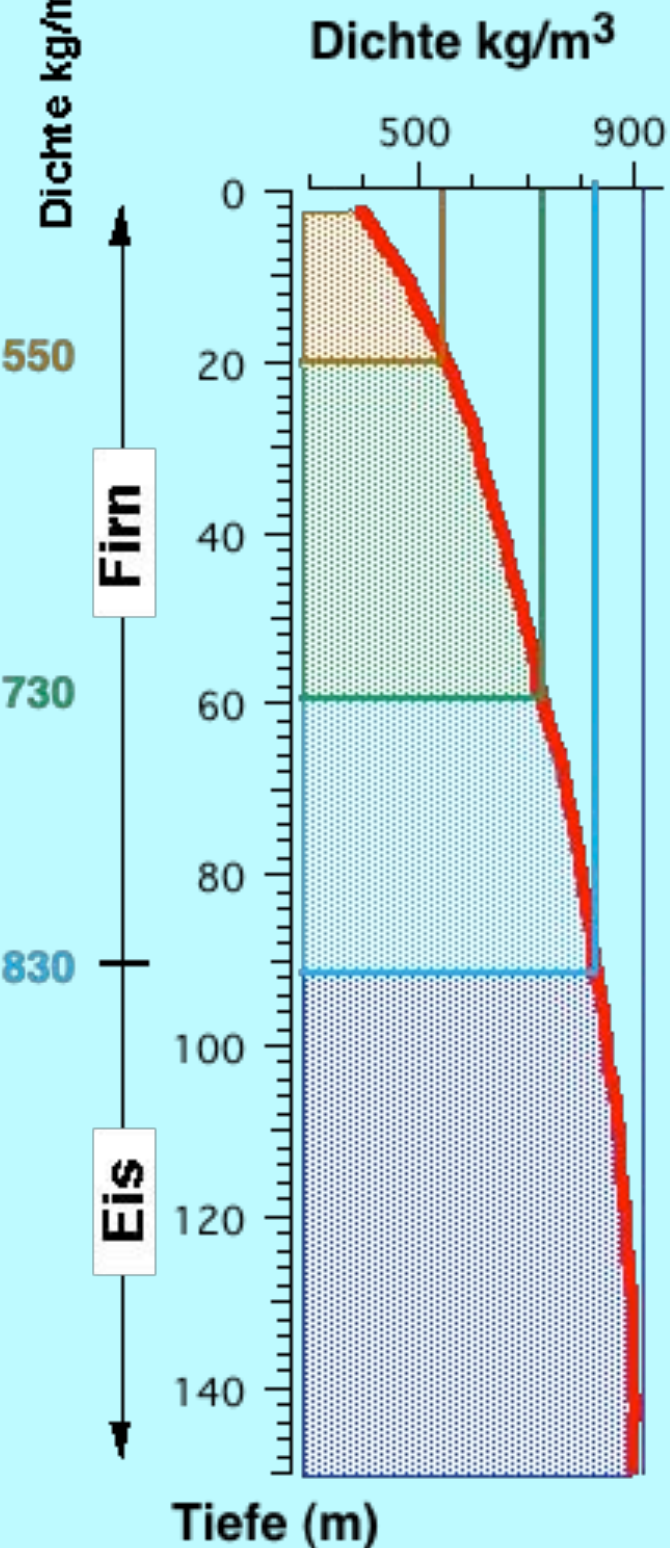
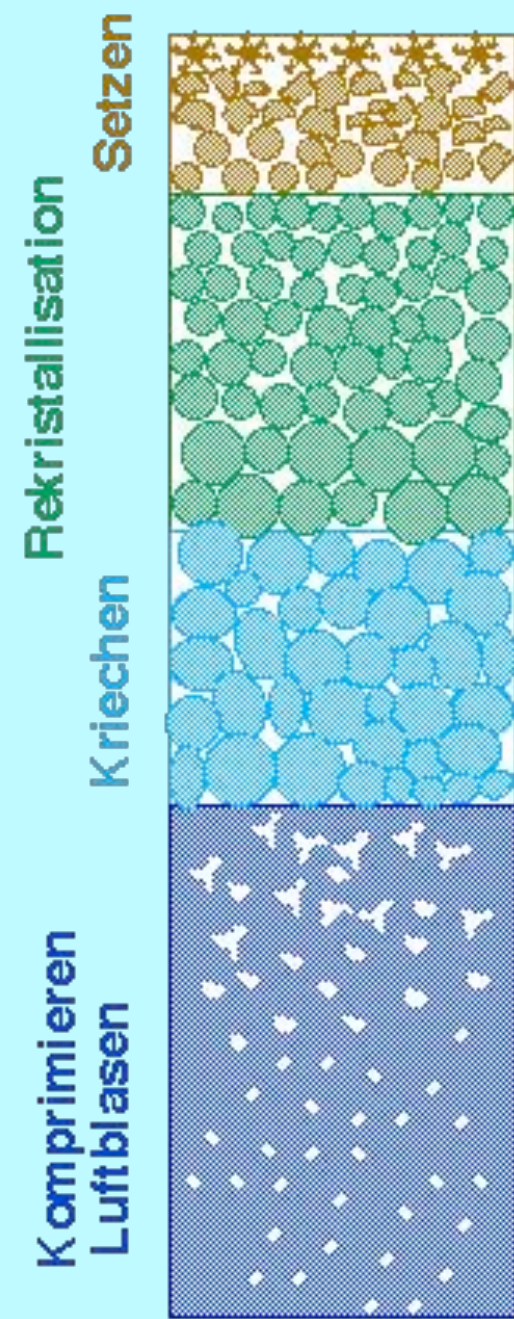




Schelfeis, B15

$T = -24.7 \text{ }^\circ\text{C}$, $A = 166 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{a})$

Verdichtungsprozess

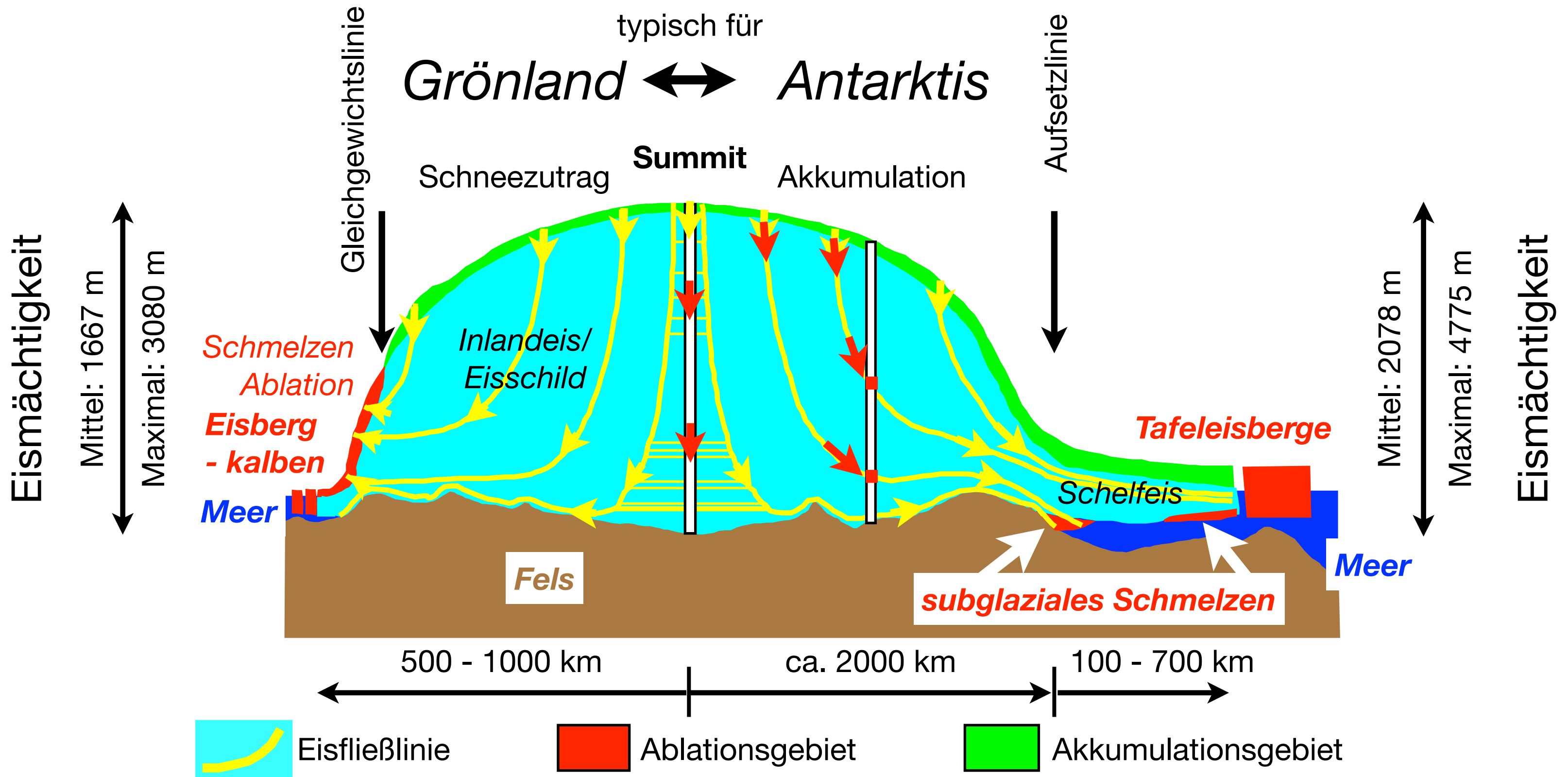


Inlandeis, B32

$T = -44.5 \text{ }^\circ\text{C}$, $A = 62 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{a})$

grafik: h. oerter 1/2000

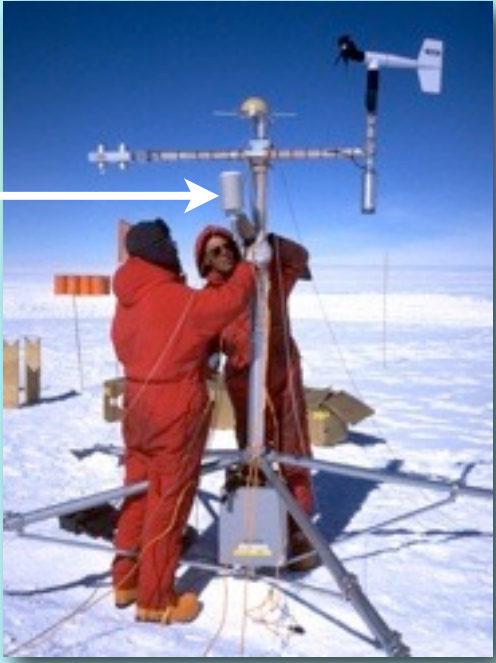
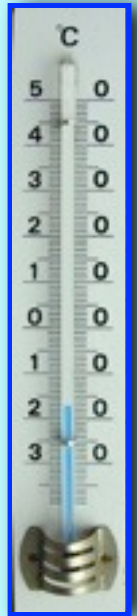
Schematischer Querschnitt durch einen Eisschild



Das Klima-Archiv Eis speichert Informationen zu:

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

Lufttemperatur



Gasgehalt in der Atmosphäre



Aerosole



Mt. Pinatubo 1991

foto: NOAA



foto: h. oerter, 1973



©AWI

Willi Dansgaard (1922-2011)



Fig. 7.5 *I served as a coolie and a packing master*

Hans Oeschger (1927-1998)



Fig. 7.6 *We were called The Three Musketeers. Chester Langway between Hans Oeschger and myself. Chet told a story well, here on how he let himself be lowered into the 80 m deep shaft to the water reservoir at Camp Century. The telephone connection to the crew at surface had broken down, and when he approached the water surface they misunderstood his shout for stopping – or did they?*

© Niels Bohr Institute, Copenhagen, 2005

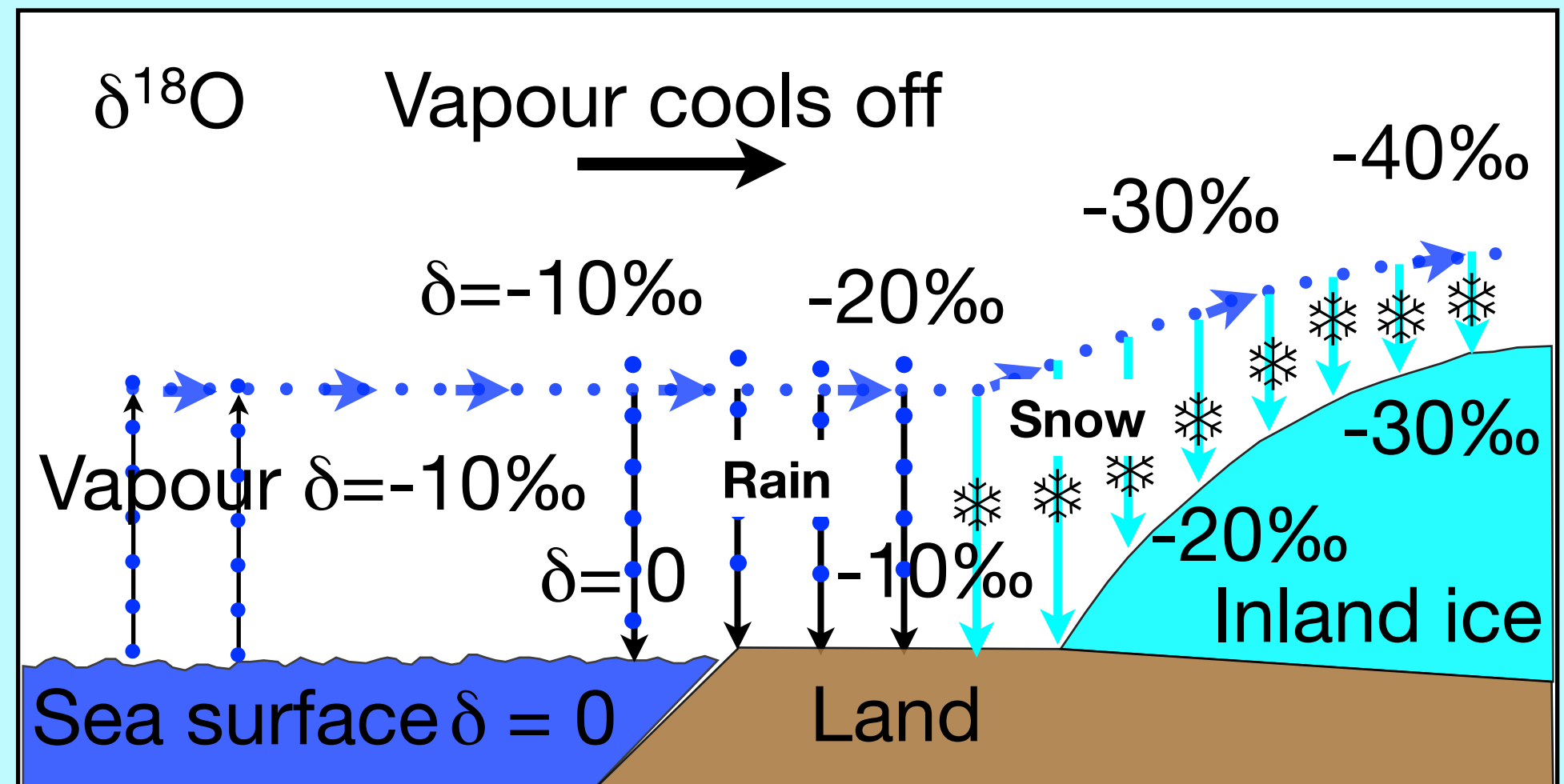
aus: Willi Dansgaard: Frozen Annals - Greenland Ice Sheet Research, Copenhagen (2005)

Die stabilen Isotope ^{18}O und ^2H (D) im Wassermolekül

δ = Abweichung von SMOW (‰)

SMOW: Vienna Standard Mean Ocean Water (IAEA)

δ -changes (isotopic fractionation) in vapour and precipitation by evaporation from the sea (to the left) and by formation of precipitation from a cooling air mass during its move towards higher latitudes and/or higher altitudes, e.g. along a warm front or over the inland ice (to the right).



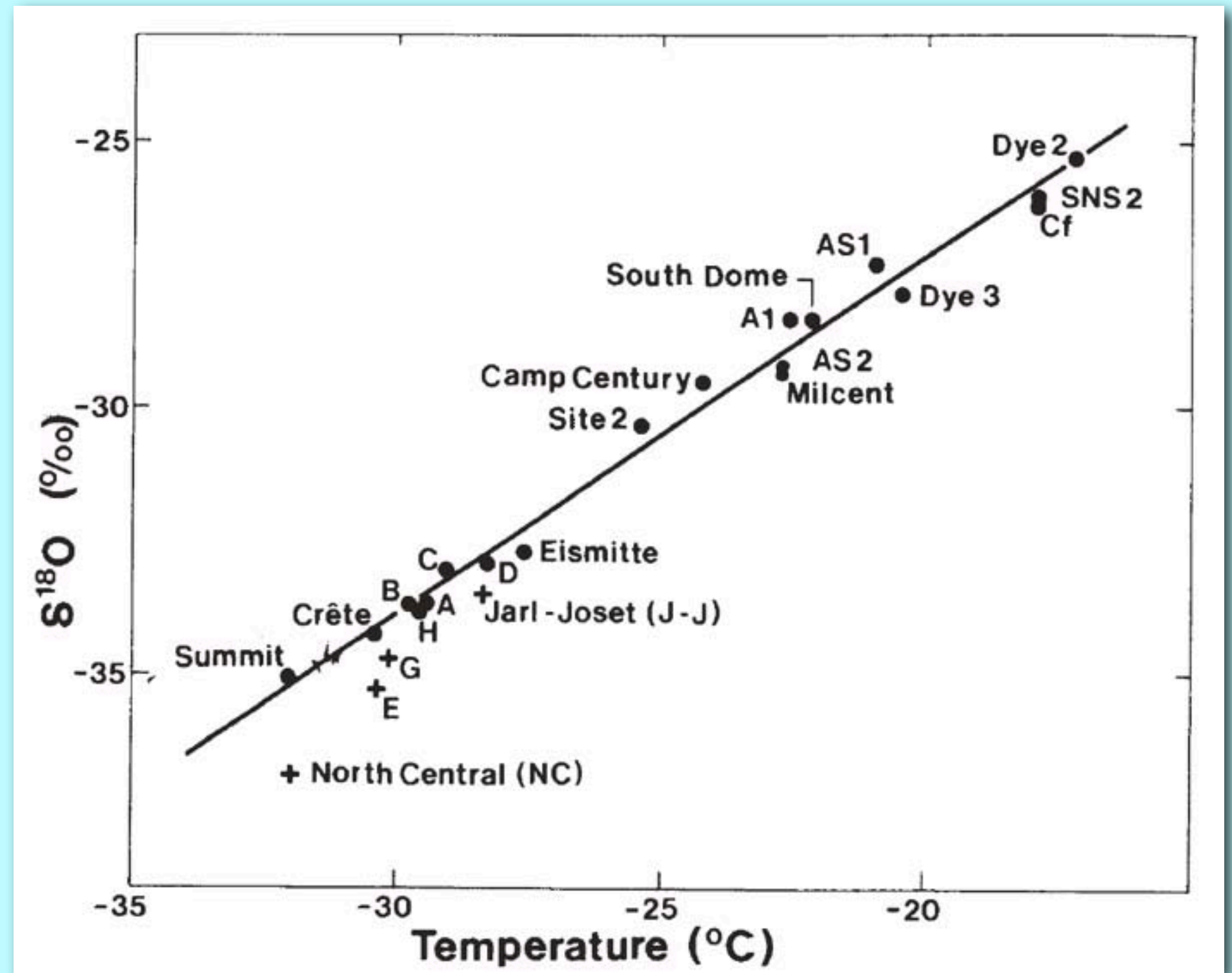
verändert nach: W. Dansgaard (2005)

$$\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + d$$

aus: Willi Dansgaard: Frozen Annals - Greenland Ice Sheet Research, Copenhagen (2005)

Das Isotopenthermometer

Mean annual δ of snow versus temperature at EGIG and other stations visited later.



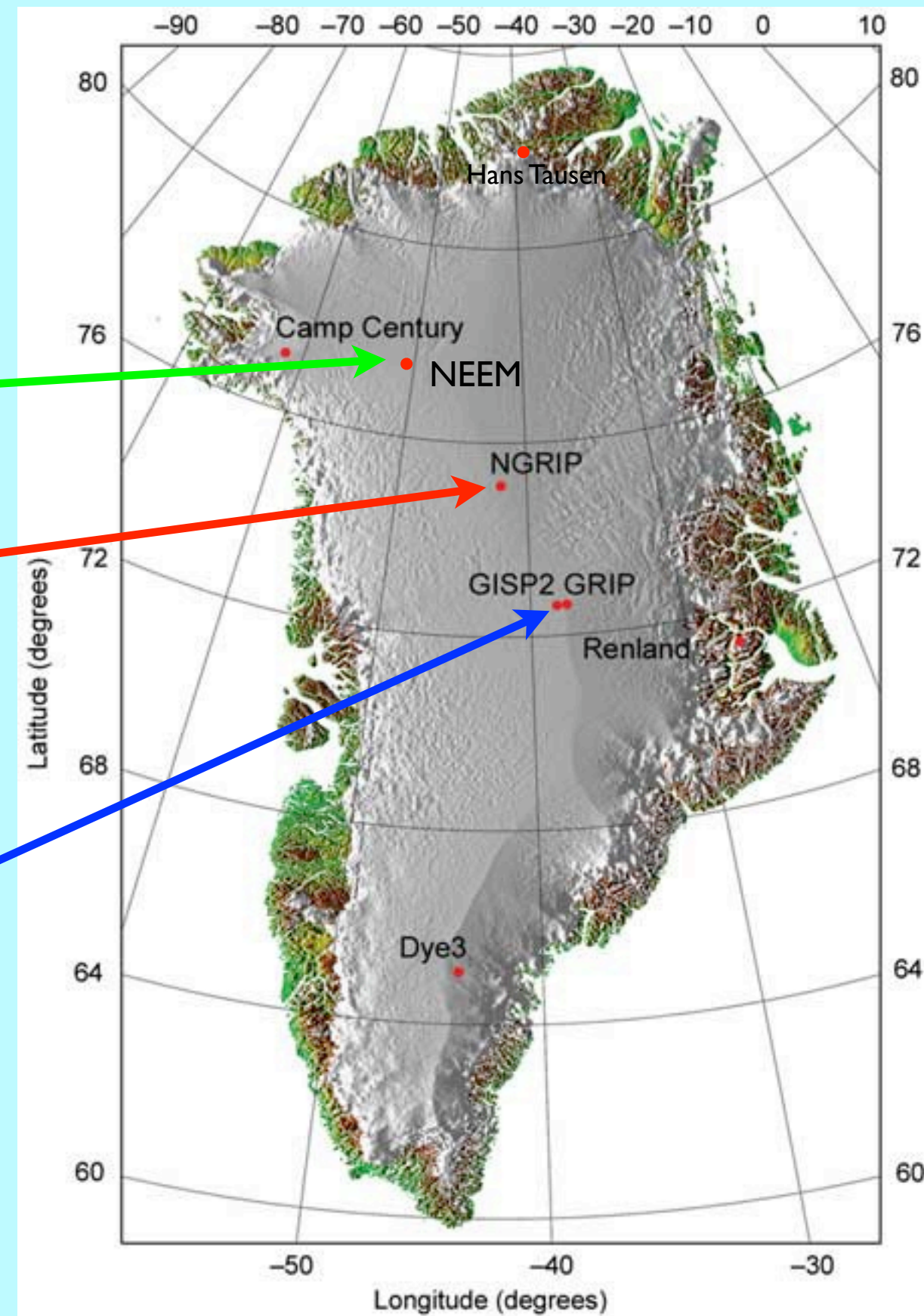
Eiskernbohrungen in Grönland

NEEM: 2007-2010
2537 m, >108 ka

NorthGRIP: 1996-2003
3090 m, 123 ka

GRIP: 1990-1992
3029 m, >105 ka

GISP 2: 1989-1993
3053 m, >105 ka



verändert nach: S. Ekholm, Journal Geophys. Res. 101, B10 (1996)

GRIP Bohrkern (1990-92)

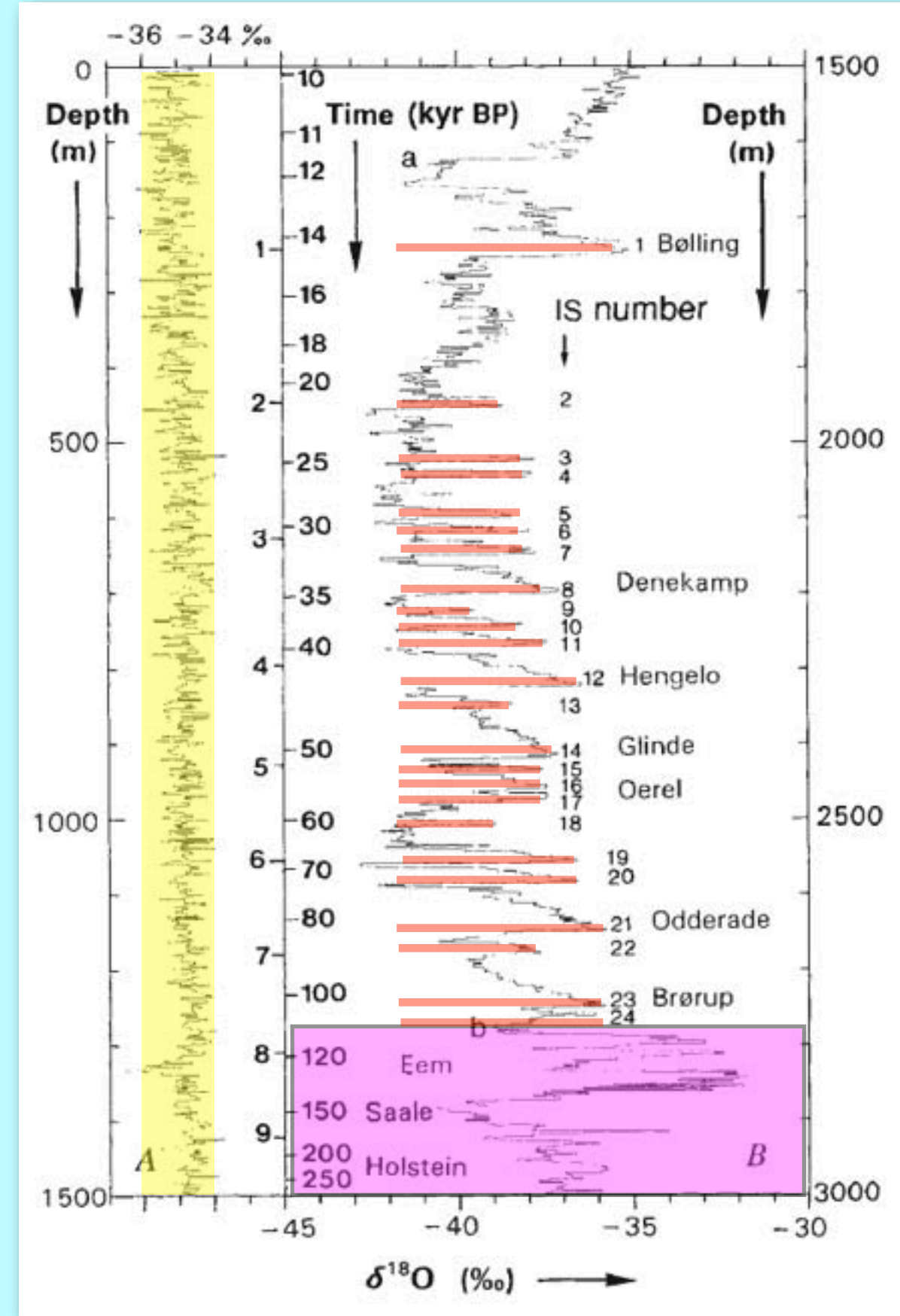
Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record

W. Dansgaard*, S. J. Johnsen* †, H. B. Clausen*,
 D. Dahl-Jensen* N. S. Gundestrup*, C. U. Hammer*,
 C. S. Hvidberg*, J. P. Steffensen*,
 A. E. Sveinbjörnsdottir †, J. Jouzel ‡ & G. Bond §

NATURE · VOL 364 · 15 JULY 1993

Stabiles Klima während Holzän

Interstadiale 1-24:
 Dansgaard-Oeschger-Ereignisse

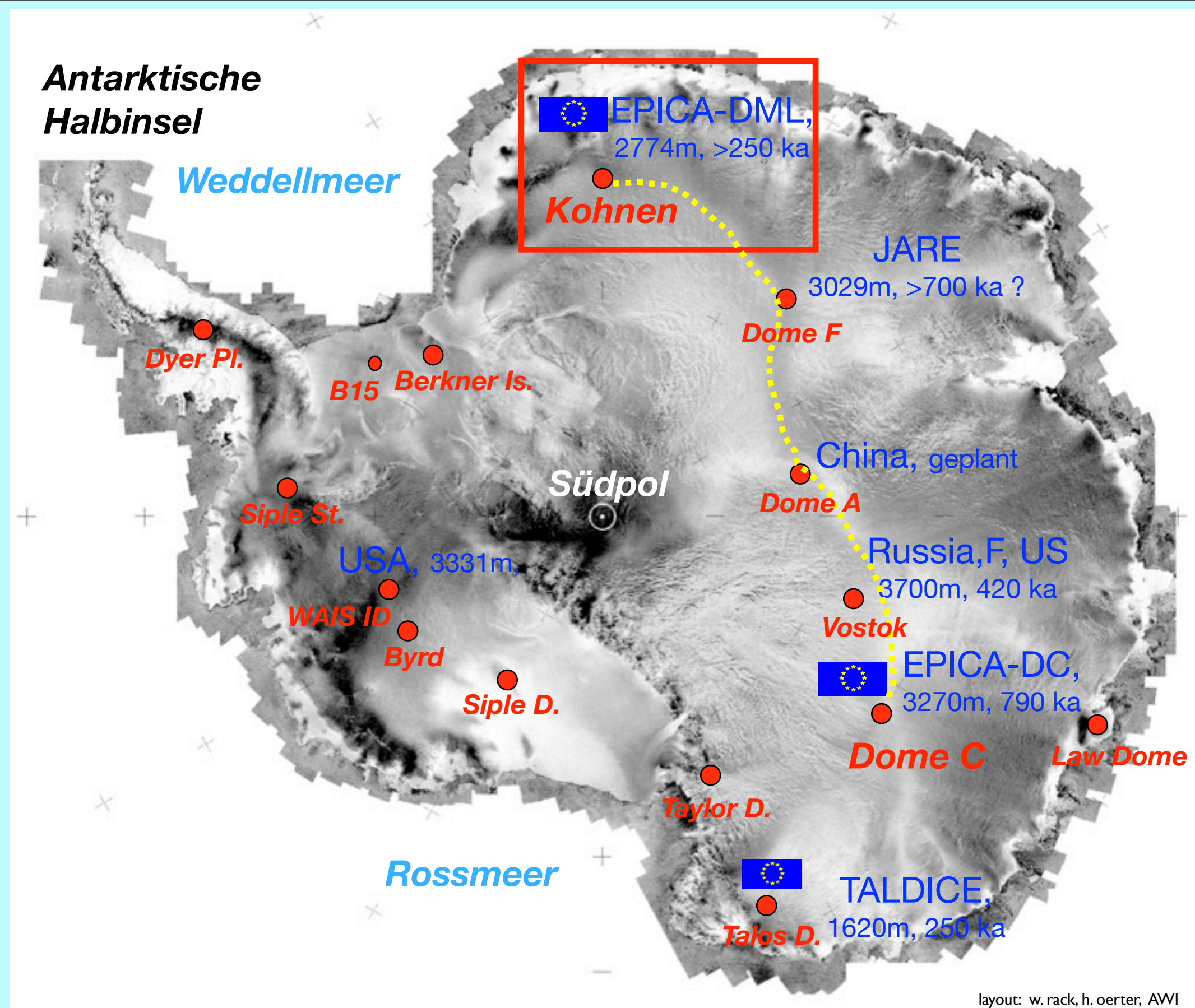


Tiefe Eisbohrkerne in der Antarktis

European Project for Ice Core Drilling in Antarctica
(EPICA)



Haupteissscheide der Ostantarktis



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

Kohnen Station

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

Bohrzeitraum:
2001-2006

Mittlere Jahres-
temperatur: -44.6 °C

Akkumulationsrate:
64 kg m⁻²a⁻¹

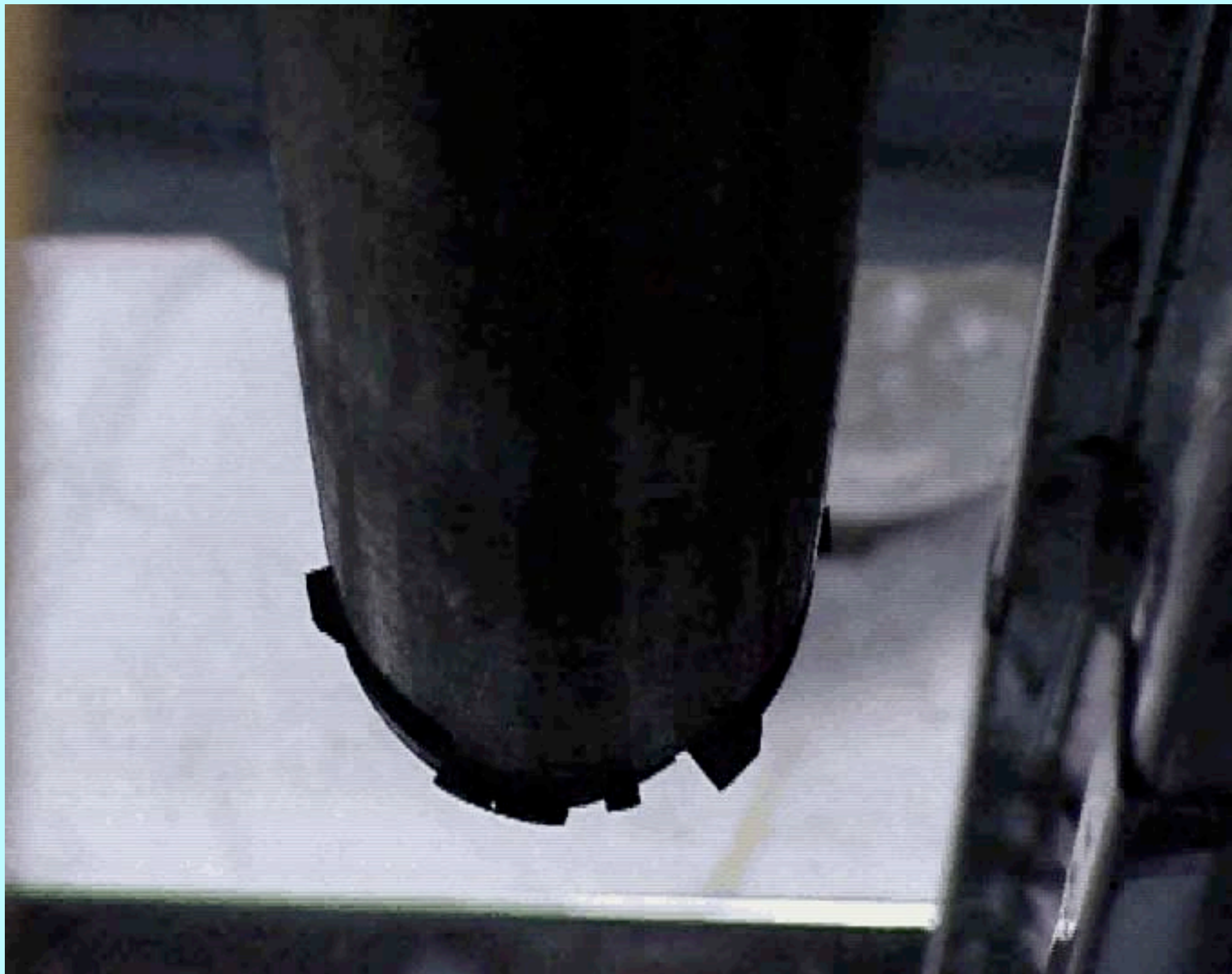
Eis-Fließgeschwindigkeit:
0,756 m/a

Eisdicke:
2782 ±10m

Länge Eiskern:
2774,1 m



foto: hans oerter, 2006

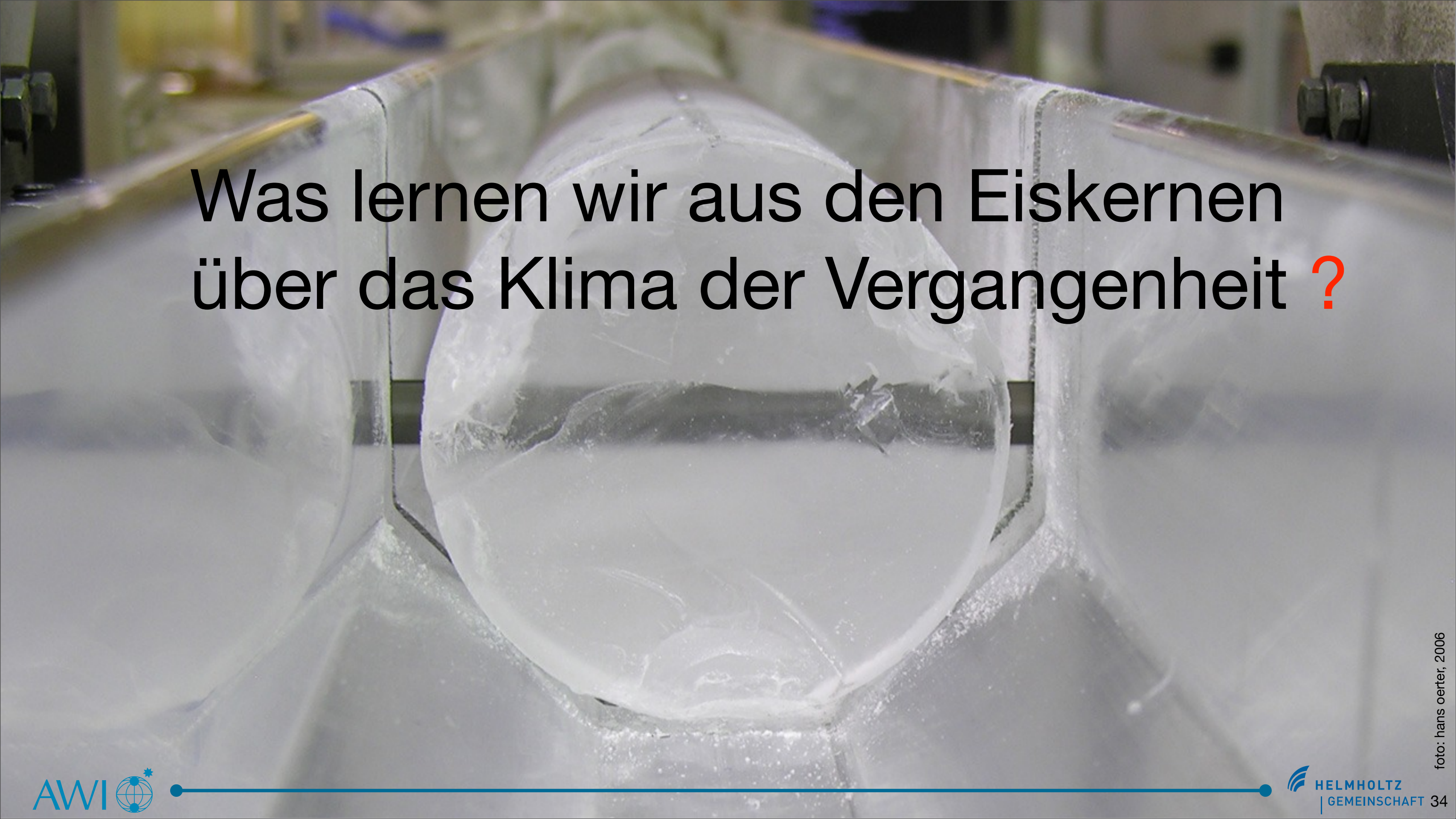


Bohren eines Eiskerns

Archiv AWI/Kipfstuhl



foto: hans oerter, 2006



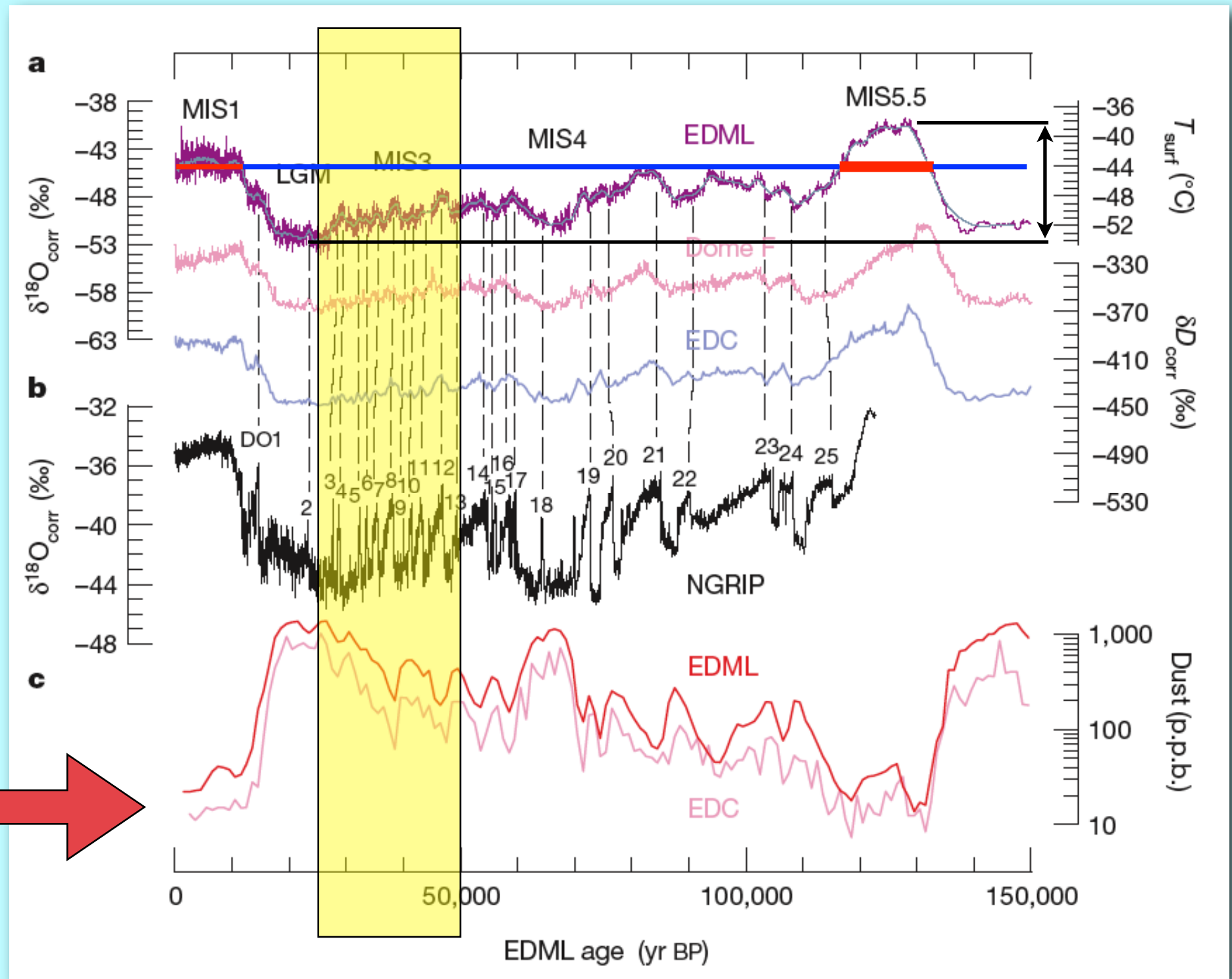
Was lernen wir aus den Eiskernen
über das Klima der Vergangenheit ?

EDML - Dome F - EDC

Ähnliche Strukturen
der Antarktischen
 $\delta^{18}\text{O}$ Kurven

Bei EDML mehr
Feinstruktur während
MIS 3 & 4

Staub EDML & EDC
(1 ka Mittel) benützt
zur Synchronisation



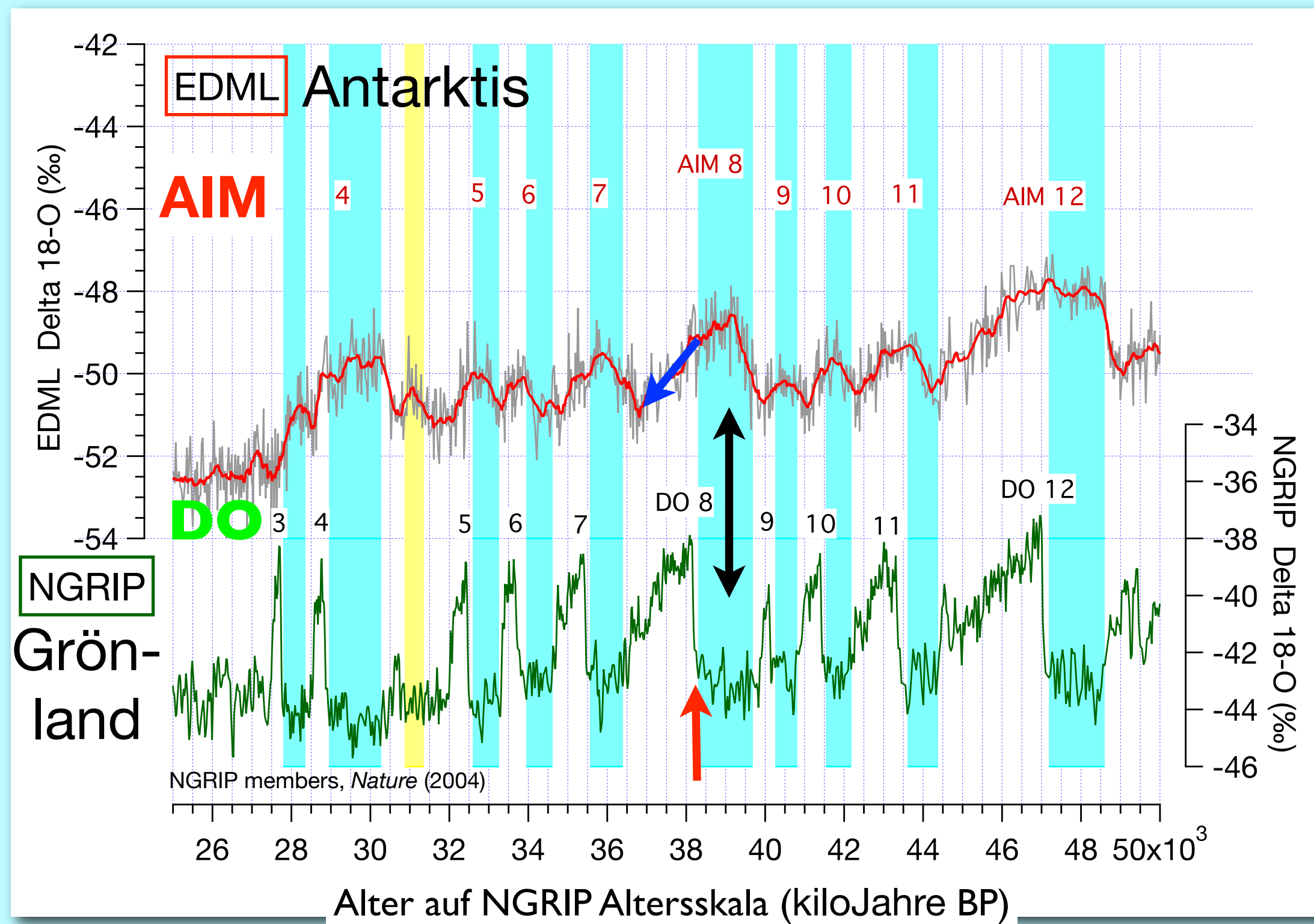
EDML & EDC on common EDC3 time scale; Dome F own time scale

Vergleich Antarktis (EDML) - Grönland (NGRIP)

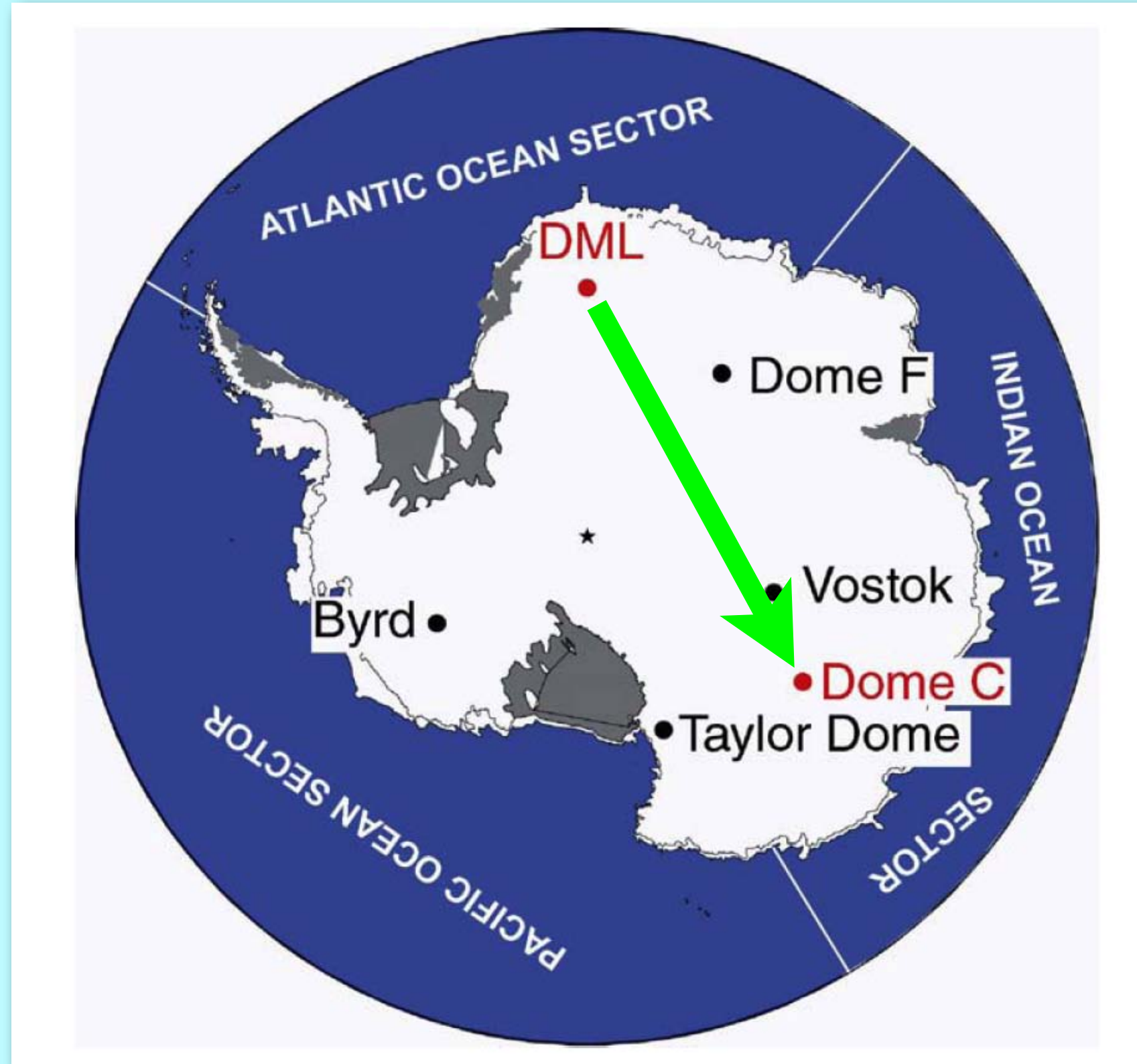
Jedes antarktische Isotopen Maximum (AIM) im EDML-Kern entspricht einem DO Ereignis in Grönland (NGRIP)

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

Bipolare Wippe (bipolar seesaw)

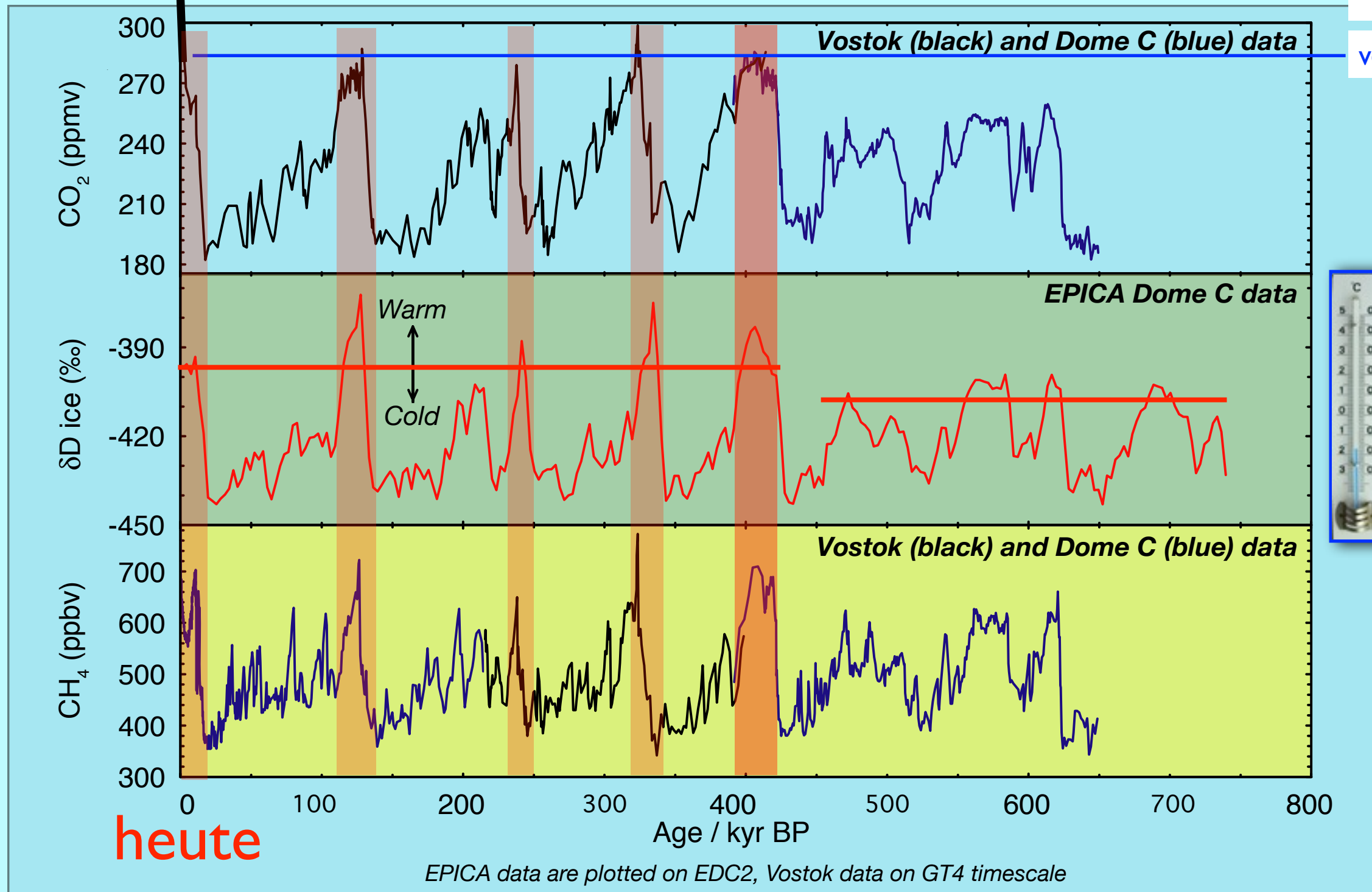


Von EDML nach Dome C



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

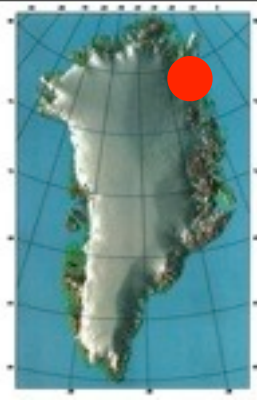
Antarctic ice core records: Vostok and EPICA CO₂, CH₄ and δD



Dryas integrifolia



Grönland. Silberwurz



← Jüngere Dryas
Holozän (seit 11.7 ka BP)

Letztes Glazial (Eiszeit)

foto: hans oerter, 1993

Auf Wegeners Spuren im Eis - Klimageschichte aus Eisbohrkernen

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

Folie 1:

Meine Damen und Herren,

vielen Dank für die Einladung hier in Ihrem Kreis über Alfred Wegener, Grönland und die Klimageschichte aus Eisbohrkernen sprechen zu dürfen. Ich will versuchen, einen Bogen zu spannen zwischen den Expeditionen, die Alfred Wegener nach Grönland führten und ihm so Gelegenheit boten sich intensiv mit dem grönländischen Inlandeis zu beschäftigen, und den Untersuchungen tiefer Eisbohrkerne, an denen das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven beteiligt war.

Folie 2:

Am Anfang soll ein historischer Rückblick stehen, der bei Ihnen die Erinnerung an die Aktivitäten Wegeners in Grönland wecken soll. Ich will mich dabei auf die Untersuchungen des grönländischen Inlandeises beschränken.

Ich denke, man kann die große Leistung der Expeditionen in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts und natürlich auch der noch früheren, nur dann recht würdigen, wenn man einen kurzen Augenblick innehält und sich beispielhaft fragt, was hat sich bei Anreise, Kommunikation und Logistik auf dem Inlandeis verändert? Man könnte diesen Vergleich natürlich noch vielfach erweitern. Besonders die Fortschritte der Geodäsie und Fernerkundung muss man als revolutionär bezeichnen. Oder bedenken Sie den Gewichtsunterschied von Kleidung aus Rentierfellen und die heutige Gore-Tex-Kleidung.

Im dritten großen Block will ich der Frage nachgehen, welche klimatische Information das Inlandeis, sei es nun in Grönland oder in der Antarktis, birgt und wie wir diese Information erschließen können.

Folie 3:

Grönland wird in diesem Vortrag immer wieder der Ort des Geschehens sein. Deshalb vorweg einige geographische Angaben zu dieser mit 2,17 Millionen Quadratkilometern größten Insel auf unserem Globus. Eisfrei sind davon nur 0,410 Millionen Quadratkilometer, also weniger als 20 Prozent. Die Fläche der Bundesrepublik Deutschland ist mit 0,357 Millionen Quadratkilometern kleiner als die eisfreie Fläche Grönlands! Die West-Ost Ausdehnung beträgt etwa 1050 Kilometer, die Nord-Süd-Ausdehnung 2670 Kilometer.

Der höchste Berg liegt im Osten und ist 3733 Meter hoch. Der höchste Punkt auf dem Inlandeis, der sogenannte Summit, weist eine Meereshöhe von 3232 Metern auf. Der Eisschild ist im Mittel 1670 Meter dick. Seine Masse würde ausreichen, um den heutigen Meeresspiegel um 7,2 Meter zu heben.

Einige Ortsnamen: In Danmarkshavn in Nordostgrönland überwinterte Alfred Wegener während der Danmarks-Expedition 1906-08. Westlich davon liegt der Eisstrom Storstrømmen. Danmarkshavn war auch der Ausgangspunkt für die Durchquerung Grönlands, die Koch und Wegener im Sommer 1913 erfolgreich abgeschlossen haben. Die Route ist als weiße, gestrichelte Linie eingetragen. Sie endete in Upernavik an der Westküste Grönlands. Eismitte war der zentrale Punkt der „Deutschen Grönlandexpedition Alfred Wegener“ von 1930/31. Auf „Summit“ wurden die Eiskerntiefbohrungen GRIP und GISP2 abgeteuft, NGRIP und NEEM waren danach weitere Bohransatzpunkte für tiefe Eisbohrkerne. Die Karte zeigt, dass Koch und Wegener seinerzeit bereits den Ort der Bohrstelle NGRIP, zumindest angenähert, gequert haben.

Igaliku ganz im Süden Grönlands ist die Gegend, in der Erik der Rote 982 AD in Grönland an Land ging. Kangerlussuaq ist der internationale Flughafen von Grönland. Ilulissat in der Discobucht ist bekannt durch den schnellsten Eisstroms Grönlands, den Jakobshavn Isbræ.

Folie 4:

Blicken wir zurück in die Zeit von 1906 bis 1908, als Alfred Wegener an der dänischen „Danmark-Expedition“ teilgenommen hat. In Danmarkshavn sind auch heute noch Reste jener Expedition zu sehen. Ein Beispiel dafür ist die „Villa“, in der Koch und Wegener während Ihrer Überwinterung lebten, und die sie im Sommer 1912, am Beginn der zweiten Grönlandexpedition 1912/13 wieder bewohnbar machten.

Folie 5:

Blicken wir auf die Karte Grönlands, die Koch seiner Reisebeschreibung „Durch die weiße Wüste“ beigegeben hat. Das Buch wurde in seiner deutschen Fassung von Alfred-Wegener, nach dem 1. Weltkrieg herausgegeben. Es sind nur wenige Linien, die anzeigen, dass vor Koch und Wegener im Jahre 1913 nur wenige das Grönländische Inlandeis gequert hatten. Fridtjof Nansen 1888 im Süden, Robert Peary in

den Jahren 1892-95 im äußersten Norden und 1912 der Schweizer Alfred de Quervain, ebenfalls im südlichen Teil Grönlands. Koch und Wegener versuchten im Sommer 1913 das Inlandeis von Nordostgrönland nach Westgrönland zu überqueren. Und sie waren erfolgreich! Wo der höchste Punkt des Inlandeises liegt, war zu dieser Zeit noch nicht bekannt. Auch über den Schneezutrag im Innern Grönlands wusste man noch nichts. Die Expedition war eine dänische Expedition, da der größte Teil der Finanzierung aus dänischen Mitteln, dem Carlsbergfonds, stammte. Sie hieß offiziell: die „Dänische Expedition nach Dronning-Louises-Land und quer über das Inlandeis Nordgrönlands 1912-13“. Außer Koch und Wegener nahmen an der Expedition auch der Däne Lars Larsen und der Isländer Vigfus Sigurdsson teil. Koch schreibt: „Unser wissenschaftlicher Hauptzweck bestand in naturwissenschaftlichen Untersuchungen in der Randzone des Inlandeises, und zwar in erster Linie solchen meteorologischer und glaziologischer Art.“ (Koch, 1919). Auch diese Expedition war mit einer Überwinterung verbunden; denn zu jener Zeit schaffte man es zeitlich nicht in nur einem Sommer die Nordostküste Grönlands zu erreichen und dann noch das Inlandeis zu queren!

Folie 6:

Die gesamte Expeditionsausrüstung, die mit dem Schiff des Grönländischen Handels *Godthaab* nach Nordostgrönland gebracht wurde, musste über die Dovebucht bis zum Eisrand transportiert werden. Dafür standen 2 Boote und 16 Pferde zur Verfügung. Es waren insgesamt ca. 20 Tonnen zu befördern, davon unter anderem ca. 10 Tonnen Pferdefutter und ein Holzhaus für die Überwinterung vor der Querung des Inlandeises. Dies ist eigentlich eine bescheidene Fracht verglichen mit der Tonnage einer heutigen Tiefbohrung auf dem Inlandeis. Aber die Dovebucht war damals, wie auch in neuerer Zeit voll mit Eis, wie auf diesem Bild zu sehen ist.

Folie 7:

Storstrømmen, Nordostgrönland.

Wir blicken hier im Sommer auf die schwimmende Gletscherfront des Storstrømmen, das Ursprungsgebiet für die Eisberge in der Dovebucht, die dann später entlang der Ostküste Grönlands nach Süden driften. Der Aufstieg auf das Inlandeis, auf den Storstrømmen gelang damals nur, als im Spätsommer die Dovebucht vor der Gletscherfront bereits wieder mit tragfähigem Meereis bedeckt war.

Folie 8:

Welchen Ort haben sich Koch und Wegener damals als Platz für das Überwinterungshaus ausgesucht? Sie waren bereits sehr in Zeitverzug geraten und mussten deshalb den ursprünglichen Plan aufgeben, auf festem, eisfreiem Grund in Dronning-Louises-Land zu überwintern. Es blieb nichts anderes übrig als auf dem Storstrømmen, vor Einbruch des Winters, das Quartier zu errichten. Ich zeige Ihnen hier eine Aufnahme von damals aus der Umgebung der Station „Borg“ im Vergleich mit einem Bild aus den 1990er Jahren an der Stelle, die etwa den damaligen Stationskoordinaten entsprach. Das Schmelzwasser hatte sich in diesem wie wahrscheinlich auch in jenem Sommer mehrere Meter tief ins Eis eingeschnitten. Diese Bilder mögen eine Vorstellung vermitteln, wie schwer es damals war mit 20 Tonnen Ausrüstung hier zu passieren.

Folie 9:

Aus der Not eine Tugend machen, kann man auf Expeditionen lernen. Koch und Wegener nutzten die Möglichkeiten ihres Baugrundes und bohrten direkt vom Winterquartier aus Löcher ins Eis, um die Eistemperatur in mindestens 15 Meter zu messen. Sie erwarteten, zu recht, dass in dieser Tiefe das saisonale Temperatursignal abgeklungen ist und so etwas wie eine Jahresmitteltemperatur gemessen werden könnte. Es ist die erste mir bekannte, wissenschaftliche Eisbohrung in Grönland und auch das erste Temperaturprofil.

Zuerst wurde unter dem Haus ein 7,5 Meter tiefer Schacht mit der Eisaxt ausgehauen. Das zersplitterte Eis wurde dann eimerweise hochgezogen. Zwei Bohrungen wurden anschließend von der Schachtsohle aus abgeteuft und so eine Tiefe von 18 und 24 Metern unter der Eisoberfläche erreicht. Man kann nachlesen, dass für die Schachtgrabung 2,5 Stunden aufgewendet wurden um einen Meter auszuheben.

Auch bei den heutigen tiefen Eisbohrungen werden 6 bis 7 Meter tiefe Schächte ausgehoben bevor der Bohrturm aufgestellt werden kann. Da diese Bohrungen jedoch im Firngebiet stattfinden, wird der sogenannte Drill Trench (Bohrgraben) mit Schneefräsen ausgehoben und somit erspart man sich doch erhebliche Knochenarbeit.

Folie 10:

Halten wir kurz inne und fragen nach gravierenden Änderungen seit den Expeditionen Alfred Wegeners.

Folie 11:

Erstens die Anreise:

Wie viel Zeit darf für An- und Abreise ins Expeditionsgebiet „verloren“ gehen? Diese Zeit wird leider zu häufig als verlorene Zeit gewertet. Koch und Wegener fuhren zwei volle Wochen mit dem Schiff von Island nach Danmarkshavn. Jeder der 16 Punkte auf der Schiffsroute zeigt eine Tagesetappe. Heute haben wir die Möglichkeit, mit dem Flugzeug innerhalb eines Tages, gutes Wetter vorausgesetzt, anzureisen. Das gilt in gleicher Weise für Danmarkshavn in Nordostgrönland und für das Plateau des Inlandeises.

Folie 12:

Zweitens die Kommunikation: Wie übermittele ich Nachrichten an einzelne Expeditionsgruppen oder nach Hause? Damals waren die sogenannten Steinmänner (cairns) die Briefkästen, in denen man Nachrichten ablegen konnte, die, wann auch immer und von wem auch immer, wieder gefunden werden konnten. Sonst war für die Expeditionszeit Funkstille. Kurzwellenfunk verbesserte später die Situation bereits erheblich, auch wenn Alfred Wegener 1930/31 noch keinen Gebrauch davon machte. Und heute ist es nicht mehr der Block aus Stein, sondern der Blog im Internet (für einen Franken allerdings klingt beides sprachlich gleich!). Mit Satellitenkommunikation kann man heute die Welt nahezu in Echtzeit an den Geschehnissen teilhaben lassen. So erreichte auch die Nachricht vom Abschluss der jüngsten

Tiefbohrung NEEM in Nordgrönland die Daheimgebliebenen in Windeseile.

Folie 13:

Drittens die Logistik auf dem Inlandeis:

Wie transportiere ich meine Expeditionsausrüstung? Von den ursprünglich 16 isländischen Pferden, die im Sommer 1912 in Danmarkshavn angekommen waren, standen Koch und Wegener noch fünf Pferde zur Durchquerung des Inlandeises im Frühjahr 1913 zur Verfügung. Von den anderen elf Pferde waren acht durch die Strapazen des vorhergehenden Sommers verendet und drei waren entlaufen. In den Jahren 1993-95 führte das Alfred-Wegener-Institut eine große Traverse über das Inlandeis von Nordgrönland durch. Startpunkt war die Bohrstelle GRIP, Endpunkt die spätere Bohrstelle NGRIP. Die motorisierten Fahrzeuge zogen sämtliche Lasten. Eine Unterstützung aus der Luft, war im Bedarfsfall, vor allem aber zu Beginn und am Ende jeder Sommersaison ebenfalls eingeplant. Die Traverse wurde in drei Sommern durchgeführt. Die dazwischen liegenden Winter verbrachten die Teilnehmer zu Hause, nicht auf dem Inlandeis.

Folie 14:

Aber, ist auch etwas ist gleich geblieben?

Schneeschnäcke werden nun seit über hundert Jahren gegraben, um Information über die Schneeschnäcke zu erhalten und Schneeproben für weitere Analysen mit nach Hause zu nehmen. Sieben Meter tiefe Schneeschnäcke bleiben jedoch die Ausnahme, auch Koch und Wegener gruben nur zwei solcher Mammutwerke. Wenn man heute deutlich tiefer als 2-3 Meter will, dann gibt es dafür passendes Bohrwerkzeug um den Schnee geordnet an die Oberfläche zu befördern.

Folie 15:

Täglich gruben Koch und Wegener einen Schacht in den Schnee. Diese Schächte dienten zwei Zwecken. Zum einen waren sie gedacht als Unterstand für die Pferde (am Ende hatten sie allerdings nur noch ein Pferd unterzustellen) zum anderen dienten sie wissenschaftlichen Zwecken. Wegener nutzte die Aufgrabungen für Temperaturmessungen im Schnee und zur Bestimmung von Schneedichte und Dicke der Schneerücklage seit dem vorhergehenden Sommer. Die Abbildung zeigt die Messwerte der Schneeakkumulation längs der Route in Nordgrönland (oberer Teil der Abbildung). Im unteren Teil der Abbildung hat Wegener auch die Messungen von Alfred de Quervain aus dem Jahr 1912 dargestellt. Wegener diskutiert in seinem beschreibenden Text den Unterschied zwischen Jahresniederschlag und Akkumulation und stellt klar, dass die gezeigten Messwerte eigentlich die deponierte Schneerücklage repräsentieren, also im glaziologischen Sprachgebrauch die Schneeakkumulation. Ihm fiel dabei besonders auf, dass das Maximum der Schneeakkumulation nicht auf dem Hauptkamm (im Profil von Koch & Wegener bei 2940 m Meereshöhe) zu finden ist, sondern weiter westlich. Dies wird auch durch das Profil von de Quervain bestätigt. Die Abbildungen von damals zeigt auch sehr deutlich, dass der östliche Teil des Eisschildes wesentlich weniger Niederschlag erhält als der Westen.

Folie 16:

Machen wir einen Zeitsprung:

Fast zwanzig Jahre später. Wegener hat „seine“ Grönlandexpedition vor sich. Sie trägt den Namen *Deutsche Grönlandexpedition Alfred Wegener*. 1929 führte Wegener eine Vorexpedition aus, der dann 1930/31 die Hauptexpedition folgen sollte. Ausgangspunkt war dieses Mal Westgrönland, die Discobucht im Sommer 1929, das Hinterland von Uummannaq im Sommer 1930. Der Mittelpunkt der Expedition sollte die Überwinterungsstation „Eismitte“ auf dem Grönländischen Inlandeis werden.

Folie 17:

Hinweisen möchte ich beispielhaft auf zwei wissenschaftliche Programme dieser Expeditionen, zuerst auf die Untersuchungen am Schnee und Firn bei Eismitte und anschließend auf die Eisdickenmessungen.

Georgi hat während der Überwinterung auf Eismitte, wie das Photo zeigt, mit großer Sorgfalt an Schneeblöcken die Schneedichte bestimmt.

Der Verdichtungsprozess von Firn ist bis in unsere Zeit immer Gegenstand glaziologischer Untersuchungen geblieben. So wurde zum Beispiel während der EGIG-Überwinterung 1957/58 auf Jarl-Joset ein 50 Meter tiefer Firnschacht glaziologisch untersucht. Am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven ist seit zwei Jahren ein Computertomograph (Röntgenstrahlung) im Einsatz, der es erlaubt einen Firn- oder Eiskern von einem Meter Länge im Submillimeterbereich dreidimensional zu analysieren.

Folie 18:

Um die Geometrie des Eisschildes beschreiben zu können muss man die Form seiner Oberfläche und die Form seiner Unterseite kennen. Während der verschiedenen Querungen des Inlandeises wurde die Höhe der Eisoberfläche längs des Reiseweges bestimmt, so dass 1930 bereits eine erste Karte mit Isolinien der Eisoberfläche vorlag. Die Bestimmung der Höhe der Eisoberfläche erfolgt heute großflächig mit flugzeug- oder satellitengestützten Laser-Altimetern, so dass die heutigen Karten Grönlands die Oberfläche des Inlandeises sehr gut abbilden.

Schwieriger ist es die Unterseite des Eisschildes zu bestimmen. Dazu muss man die Eismächtigkeit genau vermessen. Ich will dazu ein weiteres wissenschaftliches Programm von Alfred Wegeners Expeditionen 1929 und 1930/31 herausgreifen, die Bestimmung der Mächtigkeit des grönländischen Inlandeises. Wegener und seine Mitarbeiter setzten dazu Sprengseismik ein. Ein absolutes Novum auf Grönland.

Was ist das Messprinzip? Man hat eine seismische Quelle, die bei der Sprengung Wellen verursacht, die sich im Eis und in der Luft ausbreiten. Man misst die Laufzeit der Welle vom Ort und Zeitpunkt der Detonation bis zum Empfänger, dem Seismographen.

Entscheidend ist dabei die Welle, die durch den Eisschild läuft und am Boden reflektiert wird (Mit R in der Abbildung markiert). Kennt man die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle im Eis dann lässt sich der zurückgelegte Weg und damit die Eisdicke berechnen. Auf diese Art wurde erstmals die Eismächtigkeit im Innern Grönlands gemessen. Die damals gemessenen Eisdicken von 2500-2750 Metern stimmen sehr gut überein, mit den Eisdicken, die in jüngerer Zeit, auch mit anderen Verfahren bestimmt wurden. Diese Messungen waren ein großer Fortschritt auf dem Weg zur geometrischen Beschreibung des Eisschildes.

Über Eisdickenmessung wird in einem Vortrag von Dr. Olaf Eisen am 30. November noch ausführlich referiert werden. Deshalb kann ich mich heute auf diese kurzen Erläuterungen beschränken. Aber Daten zur Eisdicke sind ein absolutes Muss zur Planung von Eiskerntiefbohrungen.

Folie 19:

Ich schließe die Ära Wegener ab und fasse mit Hilfe von Google-Earth noch einmal zusammen. Die schwarze punktierte Linie zeigt die Route der Durchquerung von Koch und Wegener im Sommer 1913. Die beiden roten Punkte markieren die Lage der außerordentlich tiefen Schneeschächte von 6 beziehungsweise 7 Meter Tiefe. Die braune Linie im Süden zeigt die Reiseroute von Alfred de Quervain im Sommer 1912. Die blauen Punkte sind die Orte, die von der AWI-Nordgrönlandtraverse 1993-95 angefahren wurden. An den dickeren Markierungen wurden jeweils mindestens 100 Meter tiefe Eiskerne gezogen. Die grünen Punkte schließlich verweisen auf die Bohransatzpunkte die tiefen Eiskerne GRIP, GISP2, NGRIP und NEEM und führen uns zum dritten Fragenkomplex.

Folie 20:

Kommen wir nun zu der Frage, welche klimatische Information das Inlandeis, sei es nun in Grönland oder in der Antarktis, birgt und wie wir diese Information erschließen können. Dazu will ich Ihnen zuerst noch einige grundsätzliche Erklärungen über das Inlandeis geben.

Wie baut sich ein Eisschild auf?

Ein Eisschild baut sich aus über einander liegenden Jahresschichten auf. Der jährlich fallende Schnee bildet jeweils eine Jahresschicht, ähnlich wie ein Baum jährlich einen Baumring ansetzt. Die Niederschlagsverhältnisse auf Grönland und in noch stärkerem Maße in der Antarktis entsprechen einem ariden Klima. So beträgt zum Beispiel auf dem Summit von Grönland die jährliche Schneeakkumulation nur etwa 150 Kilogramm pro Quadratmeter (entsprechend einer 150 mm dicken Wasserschicht) und in der Antarktis, am Südpol, nur 80 Kilogramm pro Quadratmeter, an anderen Stellen noch deutlich weniger. Die Jahresschichten lassen sich in den oberen Metern der Firndecke noch gut erkennen. In Grönland war es möglich diese jährliche Schichtung zwar nicht visuell, aber mit Messungen des Ionengehaltes (starkes saisonales Signal) über 40.000 Jahre zurück abzuzählen. Mit zunehmender Tiefe werden die Jahresschichten 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.

Folie 21:

Mit der Ausdünnung der Schichten ist gleichzeitig eine Zunahme der Dichte des Firns verbunden. Hier zwei Beispiele aus der Antarktis, bestimmt an zwei Lokationen mit stark unterschiedlichem jährlichem Schneezutrag. Rechts beträgt die Jahresakkumulation 82 Kilogramm pro Quadratmeter und links 166 Kilogramm pro Quadratmeter. Der Verdichtungsprozess durchläuft verschiedene Stadien, die hier stark vereinfacht dargestellt sind. Bis zu einer Dichte von 550 kg/m^3 ist es mehr oder weniger eine mechanische Verdichtung, bis die dichteste Packung erreicht ist. Dann folgen Rekristallisation und Kriechen und bei einer Dichte von etwa 830 kg/m^3 setzt der Übergang von Firn zu Eis ein. Im Firn existiert ein zusammenhängender Porenraum, der einen Luftaustausch durch Konvektion oder tiefer durch Diffusion erlaubt. Im Eis ist dies nicht mehr möglich, da wir dort abgeschlossene Luftblasen ohne gegenseitige Verbindung antreffen. Die weitere Verdichtung bis zur physikalischen Eisdichte von 917 kg/m^3 erfolgt dann durch Kompaktion der Luftblasen und ab ca. 1000 Meter durch Klathratbildung.

Folie 22:

Fassen wir das bisher Gesagte oder Angedeutete in einem schematischen Querschnitt durch einen Eisschild zusammen. Ich hoffe, dass dadurch auch leichter verständlich wird, warum ein Eisschild ein gutes Klimaarchiv sein kann.

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

Der Grönländische Eisschild weist eine deutliche Trennung zwischen Ablations- und Akkumulationsgebiet auf. Die Trennlinie wird als Gleichgewichtslinie bezeichnet. Das Akkumulationsgebiet ist durch eine positive Massenbilanz an der Oberfläche gekennzeichnet, d.h. im Jahresmittel bleibt der Schneeniederschlag erhalten. Im Ablationsgebiet werden 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.

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.

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 diesem Punkt lag in Grönland die Eiskerntiefbohrung GRIP. An allen anderen Stellen eines Eisschildes, wurde der Schnee einst an höherer Stelle abgelagert und ist erst allmählich zum Bohransatzpunkt geflossen. Bei der Interpretation der Eiskerndaten müssen also Veränderungen längs dieses Fließweges berücksichtigt werden.

Folie 23:

Klimainformation aus dem Eiskern. Im Eis sind **Informationen** zu Schwankungen der **Lufttemperatur**, zur **Gas-Zusammensetzung** in der Paläo-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. Sie sind das sogenannte Isotopenthermometer, das die Beziehung zwischen der Kondensationstemperatur und dem Gehalt an den stabilen Sauerstoffisotopen ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) und an Deuterium ($^2\text{H}/^1\text{H}$) im Niederschlag beschreibt.

Die Temperaturinformation ist nicht direkt gespeichert. Sie muss aus so genannten Proxy-Daten berechnet werden. Als Temperaturproxy dienen die stabilen Isotope im Wassermolekül. Sie sind das sogenannte Isotopenthermometer, das die Beziehung zwischen der Kondensationstemperatur und dem Gehalt an den stabilen Sauerstoffisotopen ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) und an Deuterium ($^2\text{H}/^1\text{H}$) 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 hydrostatischem Druck (bei ca. 1000-1200m Eisauflast) in Klathrate umwandeln, das heißt 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 jedoch die Differenz zwischen dem Alter des umgebenden Eises und dem 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 weiter transportiert. Hier spielen vor allem die biologische Aktivität nahe der Meeresoberfläche und die Meereisbildung eine wichtige Rolle. Entsprechend gelangen beispielsweise schwefelhaltige Verbindungen aus dem Wasser oder den Meersalzkomponenten in die Atmosphäre. Sie können dann später in den Eiskernen nachgewiesen werden.

Folie 24:

Das Isotopenthermometer.

Bei der Anwendung von Isotopenmethoden im Eis muss als erstes ein Name genannt werden: Prof. Dr. Willi Dansgaard aus Kopenhagen, der am 8. Januar dieses Jahres im Alter von 88 Jahren verstorben ist. Er hatte seit der Zeit von E.G.I.G. (Expedition Glaciologique International au Groenlande) 1957/58 Pionierarbeit dazu in Grönland geleistet und die Eiskernforschung vorangetrieben. Seine grundlegende Arbeit *Stable Isotopes in Precipitation* in Tellus XVI (4), 436-468 von 1964 wird auch heute noch häufig zitiert.

Eine zweite wichtige Persönlichkeit war Prof. Dr. Hans Oeschger aus Bern, der sich stärker mit radioaktiven Isotopen im Eis und vor allem mit dem Problem des Gaseinschlusses im Eis und dem Gehalt an Kohlendioxid in der Paläoatmosphäre, das er aus Eiskernen extrahiert hat, beschäftigte. Auf dem rechten Bild sehen wir Dansgaard und Oeschger gemeinsam mit dem Amerikaner Chester Langway, einem weiteren Urgestein der Eiskernforschung.

Folie 25:

Das Messen der stabilen Isotope im Wassermolekül, ^{18}O und ^2H (Deuterium) ist heute Stand der Technik, wenn es darum geht Paläotemperaturen zu rekonstruieren. Angegeben werden die Isotopenverhältnisse nicht in absoluten Werten, sondern als relative Abweichung in Promille von einem Standardwasser. Als Standardwasser wird ein bestimmtes Meerwasser, das sogenannte Vienna Mean Standard Ocean Water (SMOW) verwendet, das in Wien von der Internationalen Atomenergiebehörde verwaltet wird. Das Prinzip dieser Methode basiert auf der isotopischen Fraktionierung beim Phasenübergang, also bei Verdunstung und Kondensation. Generell gilt, dass das leichtere Isotop bevorzugt verdunstet und das schwerere bevorzugt kondensiert. Die Abbildung, die einer Arbeit von Dansgaard entnommen ist und von mir etwas eingefärbt wurde, soll dies verdeutlichen.

Meerwasser verdunstet, der entstehende Wasserdampf wird isotopisch leichter. Bei der nachfolgenden Niederschlagsbildung, kondensiert zuerst das schwere Isotop, also ^{18}O oder Deuterium, so dass der Wasserdampf leichter und der Regen schwerer wird. Kühlt der Wasserdampf weiter ab, so wiederholt sich die Fraktionierung und der Wasserdampf wird dementsprechend immer leichter. Dieser Fraktionierungsprozess, der von der Temperatur bei der Niederschlagsbildung abhängt, verläuft unterschiedlich, je nachdem ob es sich um adiabatische oder isobare Abkühlung handelt. Deshalb ist die Beziehung zwischen Kondensationstemperatur und Isotopengehalt nicht eindeutig und muss in regionalen Studien empirisch bestimmt werden.

Folie 26:

Dansgaard hat auf dem Grönländischen Inlandeis eine solche Studie durchgeführt und damit den linearen Zusammenhang zwischen Temperatur und $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalt für grönländischen Schnee bestimmt.

Folie 27:

Welche tiefen Eiskerne wurden in Grönlandt in den letzten zwanzig Jahren gebohrt?

Bereits in den 1960er Jahren wurde die 1390 Meter tiefe Bohrung bei Camp Century gebohrt. 1973 folgte die 400 Meter tiefe Bohrung bei Dye 3. Die Bohrlokationen lagen damals aus logistischen Gründen jeweils an den von den Amerikanern besetzten Punkten. Die Planung in den späten 1980er Jahren suchte dann Bohransatzpunkte, die aus wissenschaftlicher Sicht optimal erschienen. Als erstes sollte daher auf dem höchsten Punkt, dem Summit von Grönland gebohrt werden.

Es begann mit dem Europäischen Greenland Ice Core Project (**GRIP**) in den Jahren 1990-1992. GRIP hat eine Tiefe von 3029 Metern erreicht. Der klimatisch interpretierbare Bereich hat ein Alter von wenigstens 105.000 Tausend Jahren.

Fast gleichzeitig und nur 30 Kilometer westlich lief das amerikanische Greenland Ice Sheet Project 2 (**GISP2**). Es begann ein Jahr früher (1989) und endete ein Jahr später (1993). GISP2 erreichte eine Tiefe von 3053 Metern, das klimatisch interpretierbare Eisalter entspricht dem von GRIP, nämlich 105.000 Jahren.

In beiden Bohrungen wurde das letzte Interglazial, das so genannte Eem nicht ungestört erbohrt. Es ist offensichtlich Eem-Eis vorhanden, wie auf der nächsten Folie zu sehen sein wird, aber es ist zu stark in seiner Schichtenabfolge gestört, um es klimatisch zeitlich korrekt interpretieren zu können. Deshalb wurde ein weiteres Projekt geplant, das Projekt NGRIP.

NGRIP steht für North Greenland Ice Core Project. Die Bohrung erreichte in 3090 Metern den Eisuntergrund und überraschenderweise drang Wasser von unten in das Bohrloch hinein. Das Eisalter wurde zu 123.000 Jahren bestimmt. Damit war die Endphase der Eem-Warmzeit im Bohrkern erfasst. Dank des subglazialen Schmelzens war das Eis auch nicht deformiert. Aber, der Anfang des Eem-Zeitalters blieb nach wie vor verborgen.

Deshalb wurde in den Jahren 2007-2010 ein weiteres Bohrprojekt durchgeführt. Die Bohrung **NEEM** erreichte in 2537 Metern den Untergrund. Enttäuscht war man allerdings, als man feststellen musste, dass auch hier der tiefe Bereich des Kerns durch Verfaltung gestört ist und der Kern nur bis 108.000 Jahre vor heute klimatisch interpretierbar ist.

Die Suche nach dem **ungestörten** Eem geht also weiter.

Folie 28:

Betrachten wir das **Isotopenprofil der Tiefbohrung GRIP**.

Was hat man daraus gelernt? Die Abbildung zeigt das Isotopenprofil in zwei Teilen. Links der Tiefenbereich bis 1500 Meter, zeitlich etwa dem Holozän, der heutigen Warmzeit bzw. dem heutigen Interglazial entsprechend. In der rechten Hälfte ist dann der weitere Kern bis 3000 Meter Tiefe dargestellt. Die vertikale Achse in der Mitte gibt die Alterszuordnung wieder. Die Altersskala links geht bis etwa 10.000

Jahre vor heute, die Skala rechts reicht von 10.000 bis 250.000 Jahre vor heute. Das war die erste Datierung, wie sie 1993 in der Zeitschrift Nature veröffentlicht wurde.

Im Holozän zeigt der Isotopengehalt wenig Variation (etwa 2 $\delta^{18}\text{O}$ -Promille). Man kann also von einem relativ stabilen Klima in den letzten 10.000 Jahren ausgehen. Anders in der Zeit des letzten Glazials auf der rechten Seite. Hier sind die Schwankungen wesentlich größer. Es wurden 24 sogenannte Interstadiale gezählt. Diese Interstadiale (Warmphase innerhalb einer Eiszeit/Glazials) haben die Eigenschaft, dass innerhalb weniger Jahrzehnte die Temperatur um bis zu mehrere Grad Celsius ansteigt und etwas langsamer wieder abfällt. Diese schnellen Schwankungen waren bereits bei der früheren Bohrung bei Camp Century aufgefallen und fanden jetzt im Zentrum Grönlands ihre endgültige Bestätigung. Sie wurden später als Dansgaard-Oeschger-Ereignisse bezeichnet. Die Professoren Dansgaard und Oeschger hatte ich Ihnen ja schon vorgestellt.

In der ersten Euphorie der Auswertung glaubte man auch erstmalig ein instabiles Interglazial mit dem tiefsten Bereich des GRIP-Eiskerns erbohrt zu haben. Dieses Ergebnis wurde auch zügig 1993 in Nature veröffentlicht. Als aber die GISP2-Bohrung ein Jahr später abgeschlossen wurde, musste man zurückrudern. Es zeigte sich, dass bis zu einer Tiefe von etwa 2750 Metern eine ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen den Isotopenprofile von GRIP und GISP2 bestand. Darunter jedoch waren die Profile stark unterschiedlich und die Schichtenfolge offensichtlich durch Faltung gestört. Der GRIP-Kern ist deshalb nur bis zu einem Alter von 105.000 Jahren vor heute klimatisch interpretierbar.

Der nächste Kern NGRIP ist insgesamt besser datiert als GRIP und wird heute als Referenz für paläoklimatische Fragen verwendet. Er erreicht ein Alter von 123.000 Jahren vor heute und ist dank der subglazialen Abschmelzung auch in den tiefsten Bereichen ungestört. Der Bereich bis 105.000 Jahre ist praktisch deckungsgleich mit GRIP und, wie wir seit letztem Jahr wissen, auch mit der jüngsten Bohrung NEEM.

Folie 29:

Wenn wir noch weiter als bis zum letzten Interglazial in die Klimageschichte zurückblicken wollen müssen wir in die Antarktis gehen.

Dort gibt es inzwischen eine Serie von Bohrkernen, die vorwiegend auf der Haupteissscheide der Ostantarktis, dem East Antarctic Ice Divide gebohrt wurden und weitere sind geplant. Es ist hier zu nennen die Bohrung bei der russischen Station Wostok, die japanische Bohrung auf Dome F beziehungsweise Dome Fuji und vor allem die beiden europäischen Bohrungen, nämlich auf Dome C (EDC) und im Dronning-Maud-Land (EDML). Die Bohrung auf Dome A, die von China gebohrt werden soll, ist noch in der Planung.

Im vergangenen Antarktissommer hat ein amerikanisches Team auf dem Westantarctic Ice Divide die jüngste Bohrung bei einer Tiefe von 3331 Metern abgeschlossen.

Folie 30:

Ich will Sie heute vorwiegend mit den beiden europäischen Bohrungen auf Dome C (EDC) und in dem Dronning-Maud-Land (EDML) vertraut machen und Ihnen auch etwas von der Bohrtechnik zeigen.

Nehmen wir als Beispiel die Bohrung EDML im Dronning-Maud-Land. Für dieses Bohrprojekt wurde die Kohlen-Station vom Alfred-Wegener-Institut in den beiden Südsommern 1999-2001 gebaut. Die Bohrcamps, in denen meist 25-35 Leute während des Sommers arbeiten, haben alle in etwa die gleichen Funktionsräume. Es sind dies: Werkstatt, Lagerraum, Generatorraum, Schlafräume Sanitärräume, Küche, Messe und einen Raum für Funk, Computer und dergleichen. Wie diese Räume letztlich baulich gestaltet werden hängt stark von den Transportmöglichkeiten ab.

Gebohrt wird üblicherweise unter der Oberfläche in einem gefrästen Graben im Schnee. Der Graben soll möglichst gleichbleibend kalte Temperaturen gewährleisten und sowohl die Sonneneinstrahlung als auch starke Schneestürme abhalten.

Details können Sie nachlesen bei Oerter et al. (2009): Kohlen Station – the Drilling Camp for the EPICA Deep Ice Core in Dronning Maud Land. *Polarforschung* 78(1-2), 1-23 (über www.polarforschung.de als pdf abrufbar).

Folie 31:

Im Falle der Kohlen-Station wurde ein 60 Meter langer, 4,70 Meter breiter und 6 Meter tiefer Graben ausgehoben, der dann Raum zum Bohren, Lagern und Bearbeiten des Eiskerns bot. Die Bohranlage besteht aus einem 12 Meter langen, schwenkbaren Bohrturm, an dem der Bohrer hängt und einer Winde mit wenigstens 3000 Meter Kabel. Gebohrt werden im Idealfall jeweils 3,50 Meter lange Eiskernstücke. Das heißt, man bohrt 3,50 Meter, hievt den Bohrer nach oben, entnimmt den Bohrkern und fiert den Bohrer dann wieder zurück ins Bohrloch. Bei einer Tiefe von etwa 2000 Metern dauert einmal Hieven etwa 45 Minuten, entsprechend lang dauert auch das Fieren. Es kommt also jeweils im Abstand von knapp zwei Stunden ein neues Kernstück an die Oberfläche.

Folie 32:

Wie das vor sich geht, zeigt eine kleine Filmszene. (55 sec)

Folie 33:

Sobaldee der Kern an der Oberfläche ist, wird er genau vermessen und dann verpackt.

Folie 34:

Was lernen wir aus den Eiskernen über das Klima der Vergangenheit? Sie sehen hier, wie kristallklar das Eis in großer Tiefe ist. Zu sehen ist Kernstück aus etwa 2640 Meter Tiefe. Dort ist das Eis schon weit über 150 000 Jahre alt.

Folie 35:

Wie repräsentativ ist ein einzelner Eiskern? Wie gut stimmen die Daten verschiedener Antarktischer Eiskerne überein?

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 höher aufgelöste Feinstrukturen, zumindest bis 80.000 Jahre vor heute (Tiefe ca. 1970 m bzw. 71% der Gesamttiefe). Darunter macht sich dann die in größerer Tiefe gegenüber EDC stärkere Ausdünnung gegenteilig bemerkbar.

Verwenden wir die von anderen Untersuchungen her bekannten Gradienten für Isotopengehalt und Temperatur von $0,7 \delta^{18}\text{O}\text{-‰/K}$ so können wir aus den Schwankungen des Isotopengehalts im Profil des EDML-Kerns ableiten, dass die Temperaturdifferenz an der Bohrstelle vom letzten Interglazial bis zum so genannten Späten Glazialen Maximum (Late Glacial Maximum, LGM) um 18.000 Jahre vor heute etwa 14 Grad Celsius betragen haben muss.

Im Vergleich mit der NGRIP-Kurve (gestrichelte Linien) sieht man, dass offensichtlich die schnellen klimatischen Schwankungen im letzten Glazial (Dansgaard-Oeschger-Ereignisse) auch in der Antarktis ihre Gegenstücke haben. Dies wird in der nächsten Folie für den Zeitraum von 25 bis 50 Tausend Jahren vor heute näher diskutiert.

Folie 36:

Vergleichen wir den Kern aus der Antarktis (EDML) mit dem NGRIP-Kern aus Grönland um zu sehen, ob die klimatischen Schwankungen zusammenhängen. Die beiden Kerne wurden über den Methangehalt synchronisiert und über einer gemeinsamen Zeitskala aufgetragen. Die Interstadiale werden in der Antarktis bislang als Antarktische Isotopenmaxima (AIM) bezeichnet. (Vielleicht werden sie noch einmal umbenannt um zwei rezente Persönlichkeiten aus dem Isotopengeschäft zu ehren.) Bereits aus der vorhergehenden Abbildung konnte man erkennen, dass sich die Dansgaard-Oeschger-Ereignisse im Norden und die Antarktischen Isotopenmaxima im Süden jeweils entsprechen, ohne jedoch synchron abzulaufen. Betrachten wir beispielhaft das AIM 8 beziehungsweise D/O-Ereignis 8.

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

Folie 37:

Gehen wir in der Antarktis von der EDML-Bohrung zur der Eiskernbohrung auf Dome C, genannt EDC. Diese Bohrung ist die bislang älteste Eiskernbohrung weltweit.

Folie 38:

Das Klimaarchiv Eis hat ein Alleinstellungsmerkmal: Es ist das einzige Archiv, das alte Luft direkt gespeichert hat. Ich möchte die Messungen an alter Luft summarisch in einer Abbildung zusammenfassen, die sowohl Profile des Methangehalts und des Kohlendioxidgehalts als auch ein Isotopenprofil (Deuterium) über einer gemeinsamen Zeitachse zeigt.

Die δD -Kurve (äquivalent zu $\delta^{18}O$) stellt den Temperatur-Proxy dar. In der Zeit von heute bis vor ca. 400.000 Jahren ist die Zeitreihe durch fünf (einschl. des Holozäns) deutlich erkennbare, vergleichsweise kurze Warmzeiten (Interglaziale) gekennzeichnet, die im Abstand von ca. 100.000 Jahren auftreten. Dies entspricht der Zyklizität der Exzentrizität der Erdumlaufbahn (Milankovich-Zyklus). In der Zeit davor sind die Warmzeiten weniger warm und länger, die Kaltzeiten (Glaziale) dagegen entsprechend kürzer aber vergleichbar kalt wie die späteren Glaziale. Vergleicht man das holozäne Temperaturmittel mit den vier vorhergehenden Interglazialen, erkennt man, dass die Temperaturen früher offensichtlich höher gewesen sind als heute. Die Zeitreihen von Kohlendioxid (CO_2 oben) und Methan (CH_4 unten) sind gut korreliert und zeigen einen nahezu synchronen Verlauf. Es kann jedoch festgestellt werden, mit den Unsicherheiten der bisherigen Datierung, dass der Temperaturanstieg jeweils vor dem Anstieg von CO_2 oder CH_4 begann. Beim Vergleich der CO_2 -Gehalte der zurückliegenden 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 CO_2 -Konzentrationen von 389 ppmv wurden in den Eiskernen zu keiner Zeit nachgewiesen. (Quelle der Abb.: www.pages.unibe.ch).

Was ist der Status des Treibhausgas-Gehaltes in der Atmosphäre heute und wie werden sich der Kohlendioxid- und Methangehalt weiter entwickeln? Diesen Blick vom Gestern zum Morgen mit der Frage wie sich das Klima weiter entwickeln wird. Überlasse ich Prof. Peter Lemke, der am hier am 16. November unter dem Thema „Klimaänderungen der Vergangenheit – ein Lehrstück für die Zukunft“ vortragen wird.

Folie 39:

Meine Damen und Herren, ich komme zum Schluss und möchte Sie noch einmal mit nach Nordostgrönland nehmen. Blicken wir auf das Eis am Rand des Grönländischen Eisschildes (Aufnahmedatum: 30.7.1993), so liegen, wie auf diesem Bild, einige zehntausend Jahre Klimageschichte offen vor uns. Das bräunlich gefärbte Eis am Rand ist das sehr staubhaltige Eis des letzten Glazials. Der dünne Streifen darüber wird von dem Eis der Jüngerer Dryas gebildet. Es ist jene kleine Blume, im Deutschen Silberwurz genannt, die dieser sehr kalten Zeit den Namen gegeben hat. Wir finden die Silberwurz auch heute in Nordostgrönland. Gehen wir über den Streifen der Jüngerer Dryas hinaus, treten wir auf holozänes Eis, bis wir an der Gleichgewichtslinie auf den Schnee des letzten Winters treffen.

Damit hat sich Kreis, ausgehend von Alfred Wegeners Überwinterung bei Danmarkshavn 1906-08 geschlossen. Ich danke Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit.

Copyright der Bilder und Abbildungen, soweit nicht anders angegeben, beim Autor.