

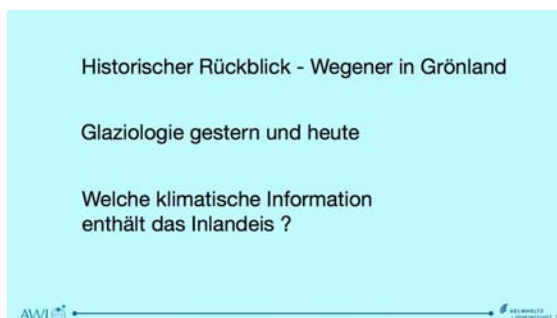
Klimageschichte aus Eiskernen

Dr.-Ing. Hans Oerter, AWI Bremerhaven

Hans.Oerter@awi.de



Meine Damen und Herren, vielen Dank für die Einladung hier in Ihrem Kreis über Klimageschichte aus Eisbohrkernen zu sprechen. Wie Sie auf meiner Titelfolie sehen, handelt es sich um ein kaltes Thema. Beim Bohren der Eiskerne in den Polargebieten und zum zweiten Mal beim Aufbereiten der einzelnen Eisproben im Eislabor des Alfred-Wegener-Instituts in Bremerhaven, muss man sich warm anziehen. Der Temperaturbereich, in dem diese Arbeiten stattfinden liegt zwischen minus 20 Grad Celsius und minus 50 Grad Celsius. Heiß wird es meist erst später, wenn die Interpretation der Messdaten zu hitzigen Debatten führt.

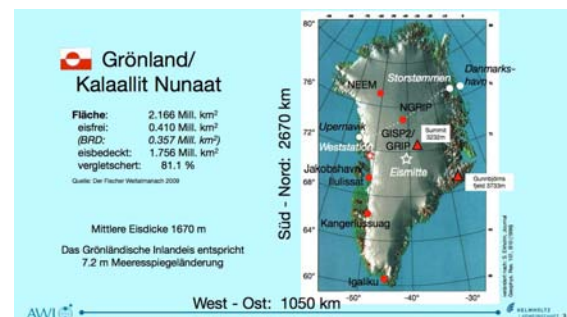


Lassen Sie mich zuerst das Stichwort „Geschichte“ aus dem Titel der Veranstaltung aufgreifen und in der Zeit zurückblicken, um dadurch den Zusammenhang mit Alfred Wegener und seinen glaziologischen Arbeiten in Grönland herzustellen.

Ich möchte Ihnen dabei auch vor Augen führen, dass wir zwar in den letzten 100 Jahren große Fortschritte erzielt haben, aber einige

grundlegende Fragestellungen geblieben sind. Bei den Arbeiten im Gelände hat sich ein grundlegender Wandel vollzogen; geblieben ist nur die Kälte. Die bei den Untersuchungen an Eisbohrkernen angewandten analytischen Methoden haben sich in den letzten beiden Jahrzehnten enorm verbessert. Die Fortschritte der Geodäsie und Fernerkundung muss man wohl schon als Revolution bezeichnen.

Ich will Ihnen zeigen, welche klimatische Information im Eis verborgen ist und was wir über das Klima der Vergangenheit lernen können wenn wir den richtigen Schlüssel für dieses Archiv gefunden haben.



Grönland wird in diesem Vortrag immer wieder der Ort des Geschehens sein. Deshalb vorweg einige geographische Angaben zu dieser mit 2,17 Quadratkilometern größten Insel auf unserem Globus. Eisfrei sind davon nur 0,410 Quadratkilometer, also weniger als 20 Prozent. Die Fläche der Bundesrepublik Deutschland ist mit 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 weist eine Meereshöhe von 3232 Metern auf. Der Eiskörper ist im Mittel 1670 Meter dick. Seine Masse würde ausreichen, um den heutigen Meeresspiegel um 7,2 Meter zu heben.

Einige Ortsnamen: Danmarkshavn im Osten war der Ausgangspunkt für die Durchquerung Grönlands, die Koch & Wegener im Sommer 1913 geschafft haben. Die Route ist weiß punktiert eingetragen. Eismitte war der zentrale Punkt der Wegener'schen Expedition von 1930/31. Auf „Summit“ wurden die Eiskerntiefbohrungen GRIP und GISP2 abgeteuft, NGRIP und NEEM waren danach weitere Bohransatzpunkte. Die Karte zeigt, dass Koch & Wegener seinerzeit bereits den Ort der Bohrstelle NGRIP, zumindest angenähert, gequert haben.



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 waren nur wenige, die vor Koch & Wegener im Jahre 1913 das Grönländische Inlandeis bereits 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 & Wegener wollten die Querung im Sommer 1913 von Nordostgrönland nach Westgrönland versuchen. Wo der höchste Punkt des Inlandeises liegt, war zu dieser Zeit noch nicht bekannt. Es war eine dänische Expedition, da der größte Teil der Finanzierung aus dänischen Mitteln, dem Carlsbergfonds, stammte. Sie hieß offiziell: „Die dänische Expedition nach Königin-Luise-Land und quer über das Inlandeis Nordgrönlands 1912-13“. Außer Koch und Wegener nahmen noch der Däne Lars Larsen und der Isländer Vigfus Sigurdsson teil. Koch schreibt: „Unser wissenschaftlicher Hauptzweck bestand im naturwissenschaftlichen Untersuchungen in der Randzone des Inlandeises, und zwar in erster Linie solchen meteorologischer und glaziologischer Art.“ (Koch, 1919).

Es sind auch heute noch Spuren jener Expedition, beziehungsweise der Danmark-Expedition von 1906-08, in Danmarkshavn zu sehen. Ein Beispiel dafür ist die „Villa“, in der Koch und Wegener während ihrer Überwinter-



ung 1906-08 lebten, und die sie am Anfang der neuen Expedition wieder bewohnbar machten.



Die gesamte Expeditionsausrüstung, die mit dem Schiff des Grönländischen Handels *Godthaab* nach Danmarkshavn, Nordostgrönland, gebracht wurde, musste vor der Querung des Inlandeises über die Dovebucht (Distanz etwa 100 km) bis zum Eisrand transportiert werden. Dafür standen 2 Boote und 16 Pferde zur Verfügung. Es waren insgesamt circa 20 Tonnen, davon unter anderem etwa 10 Tonnen Pferdefutter und ein Holzhaus für die Überwinterung. 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.

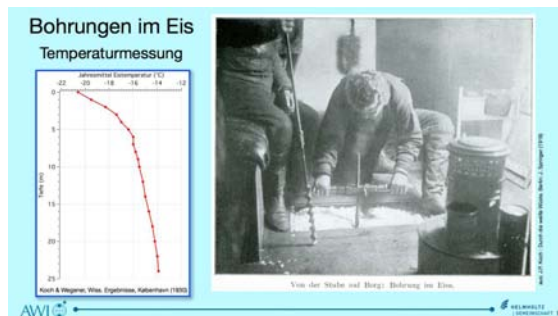


Der Aufstieg auf das Inlandeis, auf den Storstrømmen gelang damals nur, als im Spätsommer die Dovebucht vor der Gletscherfront bereits wieder zugefroren war. Wir blicken hier auf die schwimmende Gletscherfront des Storstrømmen, das Ursprungsgebiet für die Eisberge in der Dovebucht, die dann später entlang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

driften.



Welchen Ort hat sich die Expedition damals als Platz für das Überwinterungshaus ausgesucht? Sie war bereits sehr in Zeitverzug gekommen und musste deshalb den ursprünglichen Plan aufgeben, auf festem Grund in Dronning-Louises-Land zu überwintern. Es blieb nichts anderes übrig als vor Einbruch des Winters das Quartier auf dem Storstrømmen, 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.



Aus der Not eine Tugend zu machen, kann man auf Expeditionen lernen. Koch & 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 sei und so etwas wie eine Jahresmitteltemperatur gemessen werden könnte. Vom Boden eines 7,50 Meter tiefen Schachtes bohrten sie auf 18 und 24 Meter Tiefe bezogen auf die Gletscheroberfläche. Es sind die ersten mir bekannten, wissenschaftlichen Eisbohrungen in Grönland.

Wenn wir heute glaziologisch auf Grönland oder in der Antarktis arbeiten, dann geschieht das oft mit einer Selbstverständlichkeit und Ungeduld, die Fehlschläge oder Wartezeiten nicht mehr zulassen möchte. Ich denke, den jüngeren Kollegen, frisch von der Uni kommend, täte es gut einmal zurück zu schauen, unter welchen Bedingungen andere gearbeitet haben.



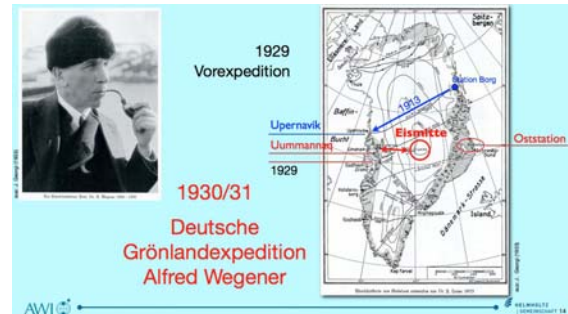
Erstes Problem: Wie viel Zeit darf für An- und Abreise ins Expeditionsgebiet „verloren“ gehen? Diese Zeit wird leider zu häufig als verlorene Zeit gewertet. Koch & Wegener fuhrten zwei volle Wochen mit dem Schiff von Island nach Danmarkshavn. Jeder Punkt auf der blauen Schiffsroute zeigt eine Tagesetappe. Man erkennt dadurch auch ganz gut, wo und wie lange das Schiff im Meereis festsaß. Heute haben wir die Möglichkeit, mit dem Flugzeug innerhalb eines Tages, jedoch gutes Wetter vorausgesetzt, anzureisen. Der Flug kann von Akureyri in Island ausgehen und wird Zwischenstopps in Scoresby Sund/Constable Point und Daneborg an der Ostküste Grönlands haben.



Zweites Problem: 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. 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 auf Grönland in Windeseile die Daheimgebliebenen.

Wenn man heute deutlich tiefer als 2-3 Meter beproben möchte, dann gibt es dafür passendes Bohrwerkzeug um den Schnee an die Oberfläche zu befördern.



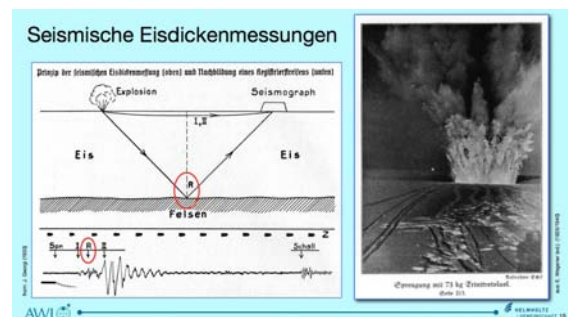
Drittes Problem: Wie transportiere ich meine Expeditionsausrüstung? Von den ursprünglich 16 isländischen Pferden standen Koch & Wegener beim Start zur Durchquerung des Inlandeises noch fünf Pferde zur Verfügung. Die anderen elf Pferde waren bereits durch die Strapazen des vorhergehenden Sommers verendet. 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 ebenfalls eingeplant.

Zeitsprung: Fast zwanzig Jahre später. Wegener hat „seine“ Grönlandexpedition vor sich. Sie trägt den Namen *Deutsche Grönlandexpedition Alfred Wegener*. 1929 unternimmt Wegener eine Vorexpedition, 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.

Ich will nur ein wissenschaftliches Programm dieser beiden Expeditionen herausgreifen, die Bestimmung der Eisdicke mit Sprengseismik. Es war ein absolutes Novum auf Grönland. Aber Daten zur Eisdicke sind auch heute noch ein absolutes Muss zur Planung von Eiskerntiefbohrungen.

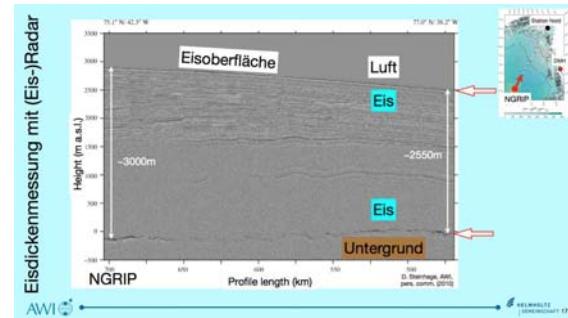


Was ist gleich geblieben? Schneescharten werden nun seit über hundert Jahren gegraben, um Information über die Schneescharten zu erhalten und Schneeproben für weitere Analysen mit nach Hause zu nehmen. Sieben Meter tiefe Schneescharten bleiben jedoch die Ausnahme, auch Koch & Wegener gruben nur zwei solcher Mammutwerke (etwa auf dem höchsten Punkt ihres Querungsprofils; wahrscheinlich nicht weit von NGRIP entfernt). Die abgeleitete Jahresakkumulation lag zwischen 150 und 180 Kilogramm pro Quadratmeter.

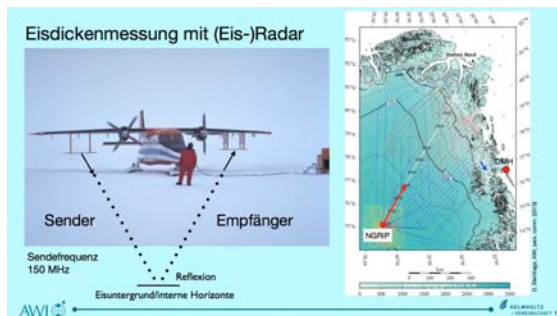


Was ist das Messprinzip? Man hat eine seismische Quelle, die bei der Sprengung Wellen verursacht, die sich im Eis und in der Luft ausbreiten. Man misst die Laufzeit der Welle vom Ort und Zeitpunkt der Detonation bis zum Empfänger, dem Seismographen. Entscheidend ist dabei die Welle, die durch den Eisschild läuft und am Boden reflektiert wird, mit R in der Abbildung markiert. Kennt man die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle im Eis, so lässt sich der zurückgelegte

Weg und damit die Eisdicke berechnen. Auf diese Art wurde erstmals die Eismächtigkeit im Innern Grönlands gemessen. Das Bild zeigt eine Sprengung mit besonders großer Sprengladung nahe bei Eismitte. Abhängig von der vermuteten Eisdicke und Firnaufgabe lagen die Sprengladungen normalerweise zwischen 15 und 40 Kilogramm. Die gemessenen Eisdicken von 2500-2750 Metern stimmten 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. Erstmals wurde der schüsselförmige Untergrund Grönlands erkannt. Kurt Wölcken schätzte damals ab, dass die Eismasse Grönlands vierzigmal größer sei als Ostsee und Nordsee zusammengekommen und, dass sie ausreichen würde um den Meeresspiegel um acht Meter zu erhöhen. Die heutige Zahl ist 7,2 Meter. Also damals eine Abschätzung, die nur um 10 Prozent über den heutigen Werten lag!

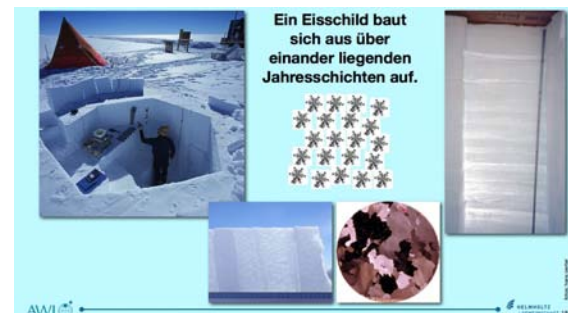


Beispiel Radargramm von NGRIP nach NO. Entscheidend ist die Bestimmung der Eisoberfläche und der Lage des Eisuntergrundes. Aus der Differenz ergibt sich dann die Eismächtigkeit. In diesem Beispiel ergibt sich an NGRIP eine Eismächtigkeit von etwa 3000 Metern. Die Eismächtigkeit nimmt entlang des dargestellten 250 Kilometer langen Flugweges auf ca. 2550 Meter ab. Es sind weitere interne Reflektoren erkennbar, die als Isochronen gedeutet werden und eine große Hilfe sind, wenn man zwei Eiskerntiefbohrungen, zum Beispiel GRIP und NGRIP miteinander vergleichen will und nach gemeinsamen Schichtpaketen sucht.



Ein anderes Messprinzip macht sich die Reflexion von elektromagnetischen Wellen an internen Horizonten im Eis und am Eisuntergrund zu Nutze. Es ist das sogenannte Eisradarverfahren, das sowohl am Boden als auch vom Flugzeug aus eingesetzt werden kann. Beim Flugradar befindet sich unter der einen Tragfläche eine Sendeantenne, unter der anderen eine Empfangsantenne. Gemessen wird wieder die Laufzeit, und zwar von der Sendeantenne zum Untergrund und weiter zur Empfangsantenne. Kennt man die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen im Eis so lässt sich die Eismächtigkeit berechnen. Mit dem nächsten Bild will ich Ihnen als Beispiel ein Radargramm zeigen, das auf dem Flug von der Bohrstelle NGRIP nach Station Nord in Nordgrönland aufgezeichnet wurde.

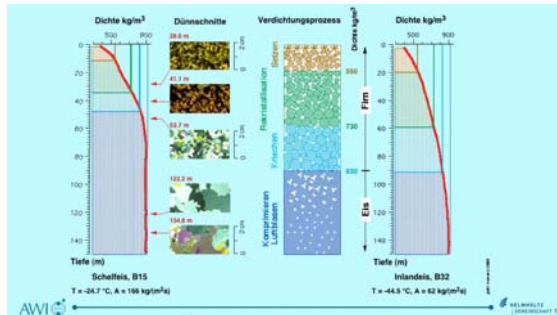
Fragen wir uns, wie baut sich ein Eisschild auf?



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 z. B. am Südpol die jährliche Schneeakkumulation nur 80 Kilogramm pro Quadratmeter, an der Kohnen-Station 64 Kilogramm pro Quadratmeter. 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 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.

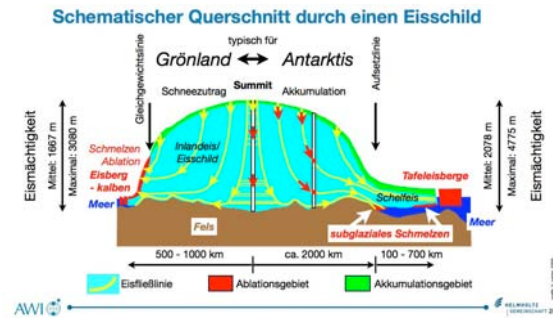
Mit der Kompaktion der Schichten ist gleichzeitig eine **Zunahme der Dichte des Firns** verbunden.



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 erfolgt dann durch Kompaktion der Luftblasen und ab ca. 1000 Meter durch Klathratbildung.

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).



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 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.

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.

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.



Atmosphärische Luft wird beim Übergang von Firn zu Eis ins Eis eingeschlossen und bleibt dort erhalten. Anfänglich ist die Luft in Luftblasen eingeschlossen, die sich jedoch mit zunehmendem hydrostatischen Druck (bei ca. 1000-1200m Eisauflast) in Klathrate umwandeln, 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 der eingeschlossenen Luft.

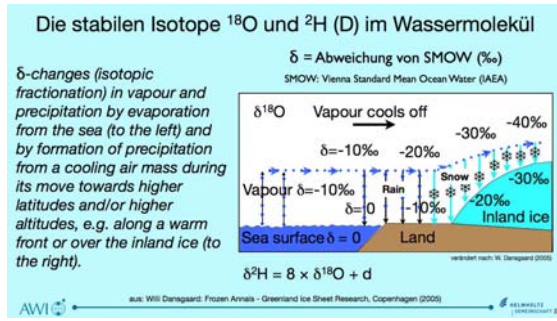
Aerosole sind feste und flüssige Teilchen, die in der Atmosphäre transportiert werden. Sie stammen z.B. von Vulkaneruptionen, von weiten vegetationslosen Flächen oder werden an der Meeresoberfläche bzw. vom Meereis in die Luft abgegeben und weiter transportiert. Hier spielen vor allem die biologische Aktivität nahe der Meeresoberfläche und die Meereisbildung eine wichtige Rolle. Entsprechend gelangen schwefelhaltige Verbindungen aus dem Wasser in die Atmosphäre oder Seesalzkomponenten, die dann später in den Eiskernen nachgewiesen werden können.

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 Internationale 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.



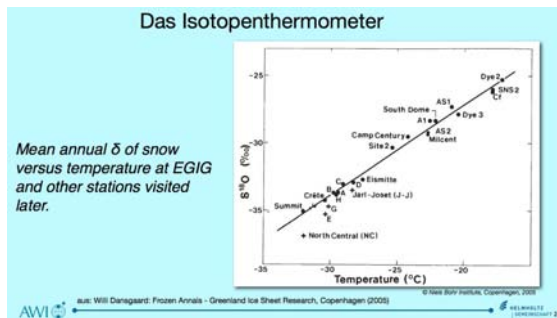
Eine zweite wichtige Persönlichkeit war Prof. Dr. Hans Oeschger aus Bern, der sich stärker mit radioaktiven Isotopen im Eis und vor allem mit dem Problem des Gaseinschlusses im Eis und dem Gehalt an Kohlendioxid in der Paläoatmosphäre, das er aus Eiskernen extrahiert hat, beschäftigte. Auf dem rechten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

Die stabilen Isotope im Wassermolekül, ^{18}O und ^2H (Deuterium) sind 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.

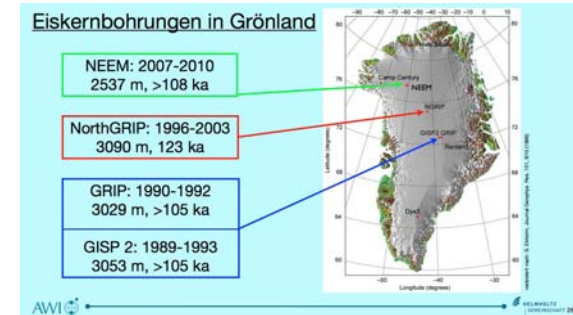


Meerwasser verdunstet, der entstehende Wasserdampf wird isotopisch leichter. Bei der nachfolgenden Niederschlagsbildung, kondensiert zuerst das schwere Isotop, also ^{18}O oder Deuterium, so dass der Wasserdampf leichter und der Regen schwerer wird. Kühlt der Wasserdampf weiter ab, so wiederholt sich die Fraktionierung und der Wasserdampf wird 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.

In dieser Abbildung wird deutlich, dass sich die Gradienten deutlich ändern, je nachdem ob adiabatische oder isobare Abkühlung der dominierende Prozess ist. Im Randbereich der Antarktis, wo isobare Abkühlung vorherrschen dürfte, ergab sich für $\delta^{18}\text{O}$ ein Gradient von 1,2 ‰/K. Über dem Inlandeisplateau unter der Bedingung einer adiabatischen Abkühlung ein Gradient von 0,7 ‰/K. Mit diesen Gradienten werden Änderungen im Isotopengehalt in Temperaturänderungen umgerechnet.

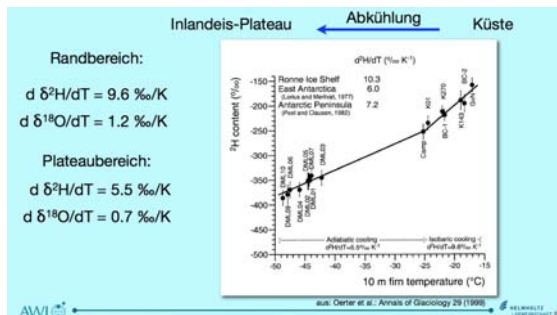


Dansgaard hat auf dem Grönländischen Inlandeis eine solche Studie durchgeführt und damit den linearen Zusammenhang zwischen Temperatur und $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalt für grönländischen Schnee bestimmt.



Blicken wir zurück nach Grönland. Welche tiefen Eiskerne wurden dort 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 Bohrsatzpunkte, 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.

Eine ähnliche Studie wurde in der Zeit der Vorerkundung für eine Eiskerntiefbohrung im Dronning-Maud-Land, Antarktis, durchgeführt.

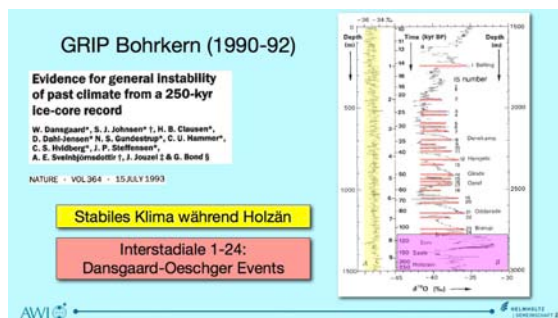
In beiden Bohrungen wurde das letzte Inter-glazial, das so genannte Eem nicht ungestört erbohrt. Es ist offensichtlich Eem-Eis vorhanden, wie auf der nächsten Folie zu sehen sein wird, aber es ist zu stark in seiner Schichtenabfolge gestört, um es klimatisch zeitlich kor-

rekt 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.



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

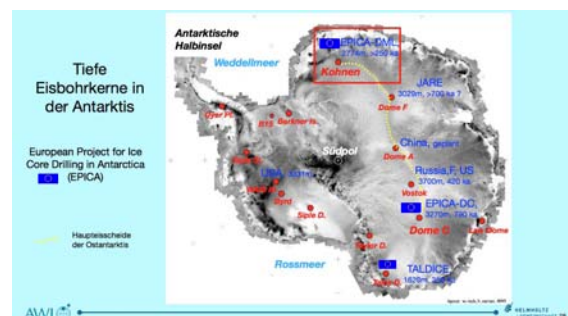
Im Holozän zeigt der Isotopengehalt wenig Variation (etwa 2 Promille). Man kann also von einem relativ stabilen Klima in den letzten 10.000 Jahren ausgehen. Anders in der Zeit des letzten Glazials auf der rechten Seite. Hier sind die Schwankungen wesentlich größer. Es wurden 24 sogenannte Interstadiale 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 Bohrungen 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 sollte heute als Referenz für paläoklimatische Fragen verwendet werden. 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.

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 Haupteis-scheide 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 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 Westantartic Ice Divide die jüngste Bohrung bei einer Tiefe von 3331 Metern abgeschlossen.

Ich will Sie im Folgenden 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 Kohnen-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, Lager-raum, Generatorraum, Schlafräume Sanitär-räume, 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): Kohnen Station – the Drilling Camp for the EPICA Deep Ice Core in Dronning Maud Land. *Polarforschung* **78**(1-2), 1-23 (über www.polarforschung.de als pdf abrufbar).



Im Falle der Kohnen-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 Eiskerne. 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.

Wie das vor sich geht, zeigt Ihnen eine kleine Filmszene.



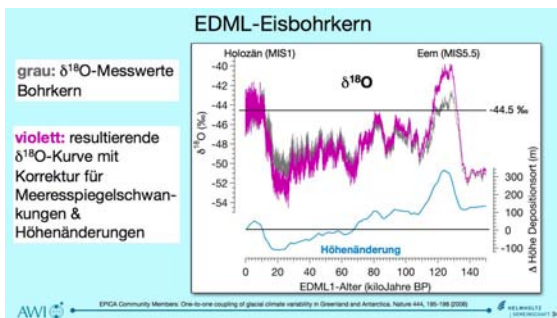
Videoclip



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

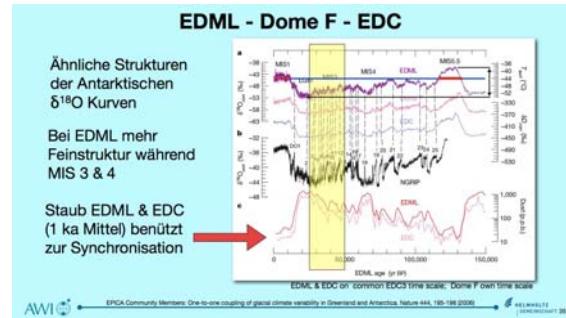


Was lernen wir aus den Eiskernen über das Klima der Vergangenheit? Sie sehen hier, wie kristallklar das Eis in großer Tiefe ist. Zu sehen ist Beispiel aus etwa 2500 Meter Tiefe. Dort ist das Eis schon über 150 000 Jahre alt.



Die Kohlen-Station liegt zwar auf einer Eisscheide aber eben nicht auf einer Kuppe. Deshalb muss bei der Auswertung der Messwerte berücksichtigt werden, dass der Schnee einst weit oberhalb der Bohrstelle abgelagert wurde. Die damit verbundenen Änderungen längs des Fließweges des Eises, zum Beispiel Änderungen des Isotopengehalts, muss man von den am Eiskern gemessenen Werten abziehen um die zeitlichen Änderungen zu erhalten. Gleichzeitig muss man bei den stabilen Isotopen noch berücksichtigen, dass sich im Verlauf eines Glazialzyklus auch der Ausgangsisotopengehalt im Meerwasser geändert hat. Addiert man diese Korrekturen aus Höhenänderung und Meeresspiegeländerung zu den Messwerten, so erhält man die korrigierte violette Kurve, die dann die zeitlichen Änderungen bezogen auf die Lokalität der Bohrstelle wieder gibt. Mit diesem Profil kann man dann weiterrechnen. Vergleicht man die holozänen Werte mit den Werten des letzten Interglazials, so erkennt man, dass es in jener Zeit wärmer als heute gewesen sein muss. Ich werde darauf später noch einmal zurückkommen.

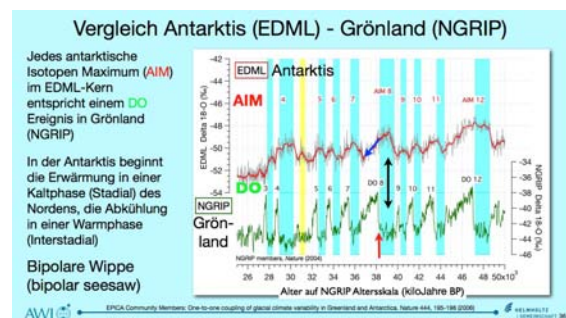
**Wie repräsentativ ist ein einzelner Eiskern?
Wie gut stimmen die Daten der Antarktischen Eiskerne überein?**



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 besser 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 gegenüber bemerkbar.

Verwenden wir die oben eingeführten Gradienten für Isotopengehalt und Temperatur von 0,7 $\delta^{18}\text{O}$ -‰/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 näher diskutiert. Für diesen Vergleich konzentrieren wir uns auf den Zeitraum von 25 bis 50 Tausend Jahren vor heute.

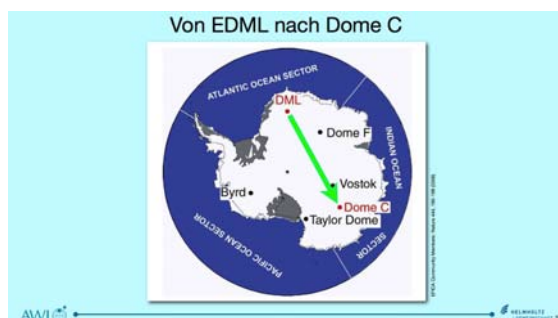


Vergleichen wir den Kern aus der Antarktis (EDML) mit dem NGRIP-Kern aus Grönland

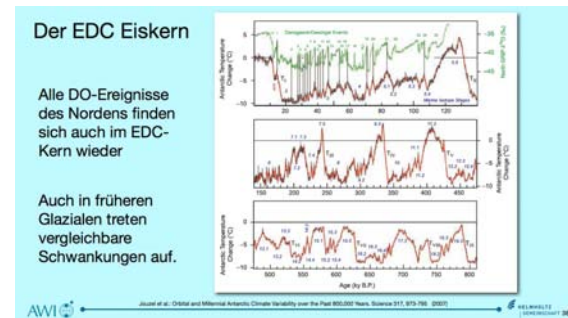
um zu sehen, ob die klimatischen Schwankungen zusammenhängen. Die beiden Kerne wurden über den Methangehalt synchronisiert und über einer gemeinsamen Zeitskala aufgetragen. Die Interstadiale werden in der Antarktis bislang als Antarktische Isotopenmaxima (AIM) bezeichnet. (Vielleicht werden sie noch 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 Abkühlung im Süden und einer sprunghaften Erwärmung im Norden zusammen. Der Wärmetransport erfolgt über die Atlantische meridionale Ozeanzirkulation (AMOC), die in nördlichen Stadien reduziert ist (Erwärmung im Süden) und in Interstadialen voll wirksam wird (Abkühlung im Süden).



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



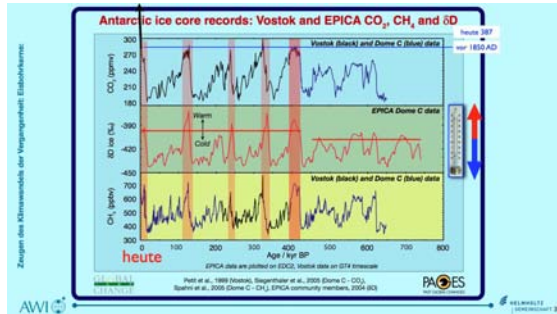
EDC umfasst insgesamt acht Glazialzyklen. Die drei Teile der Abbildung haben jeweils unterschiedliche Zeitachsen. Oben sind die letzten 140.000 Jahre dargestellt, also der Zeitraum, den wir bereits von der EDML-Bohrung her kennen und der mit den grönländischen Eiskernen verglichen werden kann. In der Mitte ist der Zeitraum von 140.000 bis 475.000 Jahre vor heute gezeichnet. Im unteren Teil die Zeit zurück bis 800.000 vor heute. Ungestört und klimatisch interpretierbar scheint der Zeitbereich bis insgesamt 790.000 vor heute zu sein.

Dargestellt sind die aus Isotopengehalten (im Falle von EDC waren es Deuteriumwerte) berechneten Temperaturschwankungen in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung. Im oberen Zeitfenster werden 100jährige Mittelwerte in schwarz gezeigt. Im mittleren und unteren Fenster entsprechen die schwarzen Kurven den Mittelwerten von 55 Zentimeter langen Kernstücken. Den detaillierten Werten ist in rot eine weitere Kurve überlagert, die mit einem 700jährigen Binomialfilter berechnet wurde.

Im oberen Fenster erkennt man, dass bei genügend hoher zeitlicher Auflösung alle D/O-Ereignisse in Grönland (grüne Kurve, rechte Ordinate) auch im antarktischen EDC-Kern ihre Entsprechung haben. Dies war in der ersten Phase der Auswertung nicht so klar ersichtlich, da das Isotopenprofil aus Proben mit geringerer zeitlicher Auflösung (55cm Proben) bestimmt wurde.

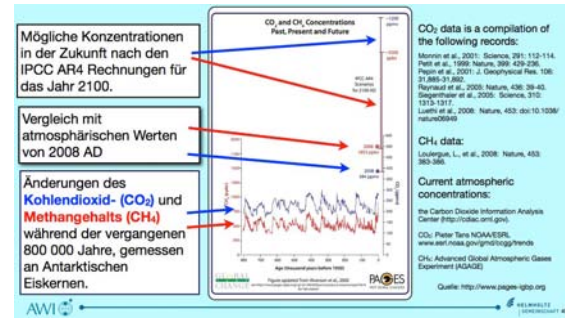
Aber auch in den früheren Glazialen lassen sich Schwankungen erkennen, die sicherlich vergleichbare Ursache haben wie die AIMs des letzten Glazials. Daraus zogen die Autoren der Studie den Schluss, dass sehr wahrscheinlich auch im Norden in früheren Glazialzeiten Dansgaard-Oeschger-Ereignisse aufgetreten sind. Da das Eis auf Grönland jedoch nicht so alt ist wie das Eis der Antarktis können solche D/O-Ereignisse dort nicht direkt nachgewiesen werden.

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



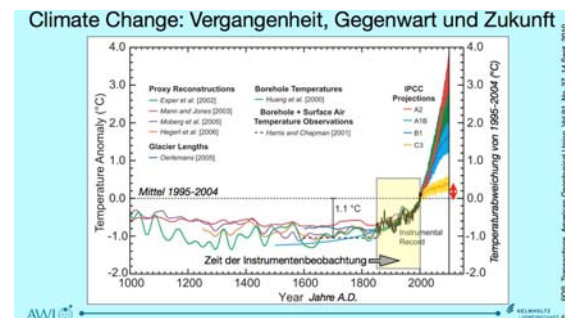
Die δD -Kurve (äquivalent zu $\delta^{18}O$) stellt den Temperatur-Proxy dar. In der Zeit von Heute bis vor ca. 400.000 Jahren ist die Zeitreihe durch fünf (einschl. des Holozäns) deutlich erkennbare, vergleichsweise kurze Warmzeiten (Interglaziale) gekennzeichnet, die im Abstand von ca. 100.000 Jahren auftreten. Dies entspricht der Zyklizität der Exzentrizität der Erdumlaufbahn (Milankovich-Zyklus). In der Zeit davor sind die Warmzeiten weniger warm, länger und die Kaltzeiten (Glaziale) entsprechend kürzer aber vergleichbar kalt wie die späteren Glaziale. Vergleicht man das holozäne Temperaturmittel mit den vier vorhergehenden Interglazialen, erkennt man, dass die Temperaturen früher offensichtlich höher gewesen sind als heute. Die Zeitreihen von Kohlendioxid (CO_2 oben) und Methan (CH_4 unten) sind gut korreliert und zeigen einen nahezu synchronen Verlauf. Es kann jedoch festgestellt werden, mit den Unsicherheiten der bisherigen Datierung, dass der Temperaturanstieg jeweils vor dem Anstieg von CO_2 oder CH_4 begann. Beim Vergleich der CO_2 -Gehalte der zurückliegenden 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 387 ppmv wurden in den Eiskernen zu keiner Zeit nachgewiesen. (Quelle der Abb.: www.pages.unibe.ch).

Treibhausgas-Gehalt in der Atmosphäre. Was ist der Status heute und wie werden sich der Kohlendioxid- und Methangehalt weiter entwickeln?



Dazu eine letzte Abbildung. Den Verlauf während der vergangenen 800.000 Jahre habe ich Ihnen bereits vorgeführt. Den Status heute können wir messen. 2008 lag der Kohlendioxidgehalt bei 384 ppmv. Er betrug also das 1,4-fache des für ein Interglazial typischen Wertes von ca. 275 ppmv. Die weitere Entwicklung wird stark von der wirtschaftlichen Entwicklung und dem Verbrauch fossiler Brennstoffe abhängen. Die Szenarien, die der IPCC-Report von 2007 enthält, halten uns Werte zwischen 490 und 1200 ppmv für das Kohlendioxid und zwischen 1500 und 3500 ppmv für das Methan vor Augen, die bis zum Jahr 2100 erreicht werden könnten. Das Kohlendioxid lag 2008 bereits bei 384 ppmv (am oberen Limit der IPCC-Projektionen). Das Methan liegt mit 1855 ppmv im Jahr 2008 bereits über dem unteren Wert, der für das Jahr 2100 als möglich erschien! (Quelle: <http://www.pages-igbp.org>). Diese Entwicklung der Treibhausgase führt zwangsläufig zu der Frage, wie wird sich die Temperatur auf unserem Planeten in den nächsten 100 Jahren und darüber hinaus entwickeln?

Climate Change: Vergangenheit, Gegenwart and Zukunft.



Der vierte Bericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) von 2007 enthält Aussagen über die mögliche Änderung der globalen Lufttemperatur bis zum Jahr 2100 AD, so genannte Klimaszenarien. Wie sich diese Zukunftsprojektionen zu den klimatischen Änderungen während der vergangenen 1000 Jahre verhalten, zeigt diese Abbildung aus der Zeitschrift EOS.

Die Abbildung ist zeitlich in drei Perioden unterteilt. Die gemittelten Messdaten für eine globale Temperatur aus der Zeit der Instrumentenbeobachtung (ca. 1850 bis heute) zeigt die dicke schwarze Kurve.

Die aus verschiedenen Archiven und unterschiedlichen Proxydaten rekonstruierte mittlere Temperatur für die nördliche Hemisphäre ist nach verschiedenen Quellen mit den farbigen Linien dargestellt. Je weiter wir zeitlich zurückschauen, desto ungenauer werden die rekonstruierten Daten.

Für die Zeit nach 2000 AD sehen wir die IPCC-Projektionen als farbige Bänder dargestellt.

Betrachten wir als erstes die Projektion C3, das gelbe Band. Für dieses Szenario wurde angenommen, dass sich der Kohlendioxidgehalt aus dem Jahr 2000 nicht weiter erhöht, was natürlich (leider) nicht der Fall ist. Aber man erkennt, dass selbst dann die Lufttemperatur bis zum Jahr 2100 um etwa 0,4 °Celsius ansteigen wird. Der Prozess der einmal angestoßen wurde, lässt sich also kurzfristig nicht mehr aufhalten!

Den anderen Projektionen liegen unterschiedliche Annahmen über die weitere Zunahme des Kohlendioxidgehaltes beziehungsweise der das Klima beeinflussenden Stoffen zu Grunde. Wichtig ist zu erkennen, dass die Temperaturen in den nächsten 100 Jahren und darüber hinaus ansteigen und weit über den Temperaturen liegen werden, die in den vergangenen 1000 Jahren geherrscht haben.

Aus den vergangenen 1000 Jahren können wir jedoch auch erkennen, dass der Temperaturverlauf über Zeiträume von einigen Jahrzehnten große natürliche Schwankungen aufgewiesen hat. Diese natürliche Variabilität wird auch in Zukunft auftreten, so dass wir nicht erwarten können, dass die Temperaturen immer geradlinig steigen werden, vor allem dann nicht, wenn wir nur das regionale Klima betrachten. Aber der Trend wird regional und global nach oben weisen.



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, 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 Jüngeren 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 Jüngeren 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 Durchquerung des Grönländischen Inlandeises im Sommer 1913 geschlossen. Ich danke Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit.

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

Ausgewählte Literatur

Bücher

Dansgaard, Willi (2004): *Frozen Annals. Greenland Ice Cap Research*. edited by The Department of Geophysics of The Niels Bohr Institute for Astronomy, Physics and Geophysics at The University of Copenhagen, Denmark. 122pp.

Georgi, Johannes (1933): *Im Eis vergraben. Erlebnisse auf Station „Eismitte“ der letzten Grönland-Expedition Alfred Wegeners*. München: Paul Müller, 1. Aufl., 224 S

Herdemerten, Kurt (1951): *Die weisse Wüste (Mit Alfred Wegener in Grönland)*. Wiesbaden: Eberhard Brockhaus, 172 S.

Koch, J. P. (1919): *Durch die weiße Wüste. Die dänische Forschungsreise quer durch Nordgrönland 1912-13*. Deutsche Ausgabe besorgt von Prof. Alfred Wegener. Berlin: Julius Springer, 247 S.

Koch J.P. und Wegener, A. (1911): *Die glaciologischen Beobachtungen der Danmark-Expedition. Danmark-Ekspeditionen Til Grønlands Nordøstkyst 1906-1908, Bind VI, Nr. 1. Meddelelser om Grønland, Bd. XLVI*. København: Bianco Lunos Bogtrykkeri, 77 S.

Koch J.P. und Wegener, A. (1930): Wissenschaftliche Ergebnisse der dänischen Expedition nach Dronning-Louises-Land und quer über das Inlandeis von Nordgrönland 1912-13 unter Leitung von Hauptmann J.P. Koch. Abteilung I, Meddelelser om Grønland, Bd. LXXV. København: Bianco Lunos Bogtrykkeri, 404 S.

Lange, Gert (Hrsgb.) (2001): Eiskalte Entdeckungen. Forschungsreisen zwischen Nord- und Südpol. Bielefeld: Delius Klasing, 359 S., 1. Aufl.

Nansen, Fridtjof (1951): Auf Schneeschuhen durch Grönland. herausgegeben von Ernst Herrmann. Berlin: Safari-Verlag, 303 S.

Quervain, Alfred de (1914): Quer durchs Grönlandeis. Die schweizerische Grönland-Expedition 1912/13. mit Beiträgen von P.L. Mercanton und A. Stolberg. München: Verlag Ernst Reinhardt, 196 S.

Wegener, Alfred (1930): Mit Motorboot und Schlitten in Grönland. Mit Beiträgen von Johannes Georgi, Fritz Loewe und Ernst Sorge. Bielefeld u. Leipzig: Velhagen & Klasing, 192 S.

Wegener, Else (Hrsgb.) (1932): Alfred Wegeners letzte Grönlandfahrt. Die Erlebnisse der deutschen Grönlandexpedition 1930/31 geschildert von seinen Reisegefährten und nach Tagebüchern des Forschers. Unter Mitwirkung von Dr. Fritz Loewe Leipzig: F. A. Brockhaus, 304 S.

Zeitschriftenartikel:

Chapmann, S and M. G. Davis (2010): Climate Change: Past, Present, and Future. EOS, Transactions, American Geophysical Union, Vol.91, No. 37, 14 Sept. 2010, 325-326.

Dansgaard, W. (1964): Stable Isotopes in Precipitation. *Tellus XVI* (4), 436-468.

Dansgaard, W. et al. (1993): Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature* 364, 218-220.

Ekholm, S. (1996): A full coverage, high-resolution, topographic model of Greenland computed from a variety of digital elevation data. *J. Geophys. Res.* 101, B10, 21,961-21,972.

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

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

198.

Jouzel, J. et al. (2007): Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. *Science* 317, 973-795.

Louergue, L., et al. (2008): Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH₄ over the past 800,000 years. *Nature* 453, 383-386.

Luethi et al., 2008: *Nature*, 453: doi:10.1038/nature06949

Monnin et al., (2001): Atmospheric CO₂ Concentrations over the Last Glacial Termination *Science*, 291, 112-114.

NGRIP members (2004): High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature* 431, 147-151.

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.

Oerter, H. et al. (1999): Accumulation studies on Amundsenisen, DronningMaud Land, Antarctica, by means of tritium, dielectric profiling and stable-isotope measurements: first results from the 1995-96 and 1996-97 field seasons. *Annals of Glaciology* 29, 1-9.

Pepin, L. et al., 2001: Hemispheric roles of climate forcings during glacialinterglacial transitions as deduced from the Vostok record and LLN-2D model experiments. *J. Geophysical Res.* 106: 31,885-31,892.

Petit, J.-R. et al. (1999): Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399, 429-236.

Raynaud, D. et al. (2005): The record for marine isotopic stage 11. *Nature* 436, 39-40.

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

Websites:

CO₂ Konzentration Mauna Loa, Hawaii: Pieter Tans, NOAA/ESRL

www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends

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