

# **GRÖNLÄNDISCHE EISKERNDATEN UND IHRE INTERPRETATION: ABSOLUTE DATIERUNG DURCH ZÄHLUNG VON JAHRESSCHICHTEN?**

Michael Kotulla



August 2013

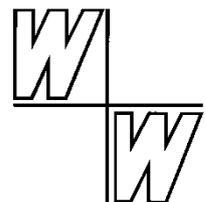




Foto: Sepp Kipfstuhl; NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk>.

*„(...) recent climate stability may be the exception rather than the rule.“*

DANSGAARD et al. 1993

W+W Special Paper G-13-1

Herausgegeben von der Studiengemeinschaft Wort und Wissen e. V.

Verfügbar online als pdf unter: <http://www.wort-und-wissen.de/download.html>

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Fragestellung</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Der grönländische Eisschild</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Stratigraphie und Alterskalkulation</b> .....	<b>5</b>
3.1	Tiefbohrung Camp Century – wegweisende Erstinterpretation .....	5
3.2	Eisflussmodell und Eiskerndatierung.....	8
3.3	Sauerstoffisotopendaten und klimatostratigraphische Interpretation.....	11
<b>4</b>	<b>Tiefbohrungen 1966-2012</b> .....	<b>12</b>
4.1	Dye 3 .....	12
4.2	Greenland Ice Sheet Project 2, GISP2 .....	13
4.3	Greenland Ice Core Project, GRIP .....	14
4.4	North Greenland Ice Core Project, NGRIP .....	14
4.5	The North Greenland Eemian Ice Drilling, NEEM .....	15
<b>5</b>	<b>Ereignislagen und Jahresschichten</b> .....	<b>17</b>
5.1	Visuelle Stratigraphie .....	17
5.2	Sauerstoffisotopenkonzentrationen und Feinoszillationen .....	19
<b>6</b>	<b>Physikochemische Signale – Eichung und Interpretation</b> .....	<b>21</b>
6.1	Messung der elektrischen Leitfähigkeit, ECM .....	22
6.2	Messung von Spurenstoffkonzentrationen mit CFA-Systemen.....	23
6.3	Messung von Staubkonzentrationen, LLS.....	27
6.4	Optoelektronische Visual-Stratigraphie, VS .....	29
<b>7</b>	<b>Eiskernchronologie</b> .....	<b>31</b>
7.1	Pleistozän/Holozän-Grenze .....	31
7.2	Vedde-Asche und Saksunnavatn-Asche .....	33
7.3	Konstruktion der holozänen Zeitskala .....	34
7.4	Verifizierung der Grönland-Eiskern-Chronologie .....	37
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>40</b>
<b>9</b>	<b>Schlussfolgerung</b> .....	<b>41</b>
<b>10</b>	<b>Glossar</b> .....	<b>41</b>
<b>11</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>42</b>
<b>12</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>42</b>
<b>13</b>	<b>Bildnachweis</b> .....	<b>43</b>
<b>14</b>	<b>Datennachweis</b> .....	<b>43</b>
<b>15</b>	<b>Dank</b> .....	<b>43</b>
<b>16</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>43</b>

*„Rhythmically laminated sequences provide a fascinating stimulation for the human psyche.“*

GLENN & KELTS 1991

## 1 Fragestellung

Die Tiefbohrungen in das grönländische Inlandeis dienen hauptsächlich einem Zweck: der Rekonstruktion des Klimas<sup>1</sup> der Vergangenheit. Ohne eine zeitliche Verankerung aber sind die gewonnenen Klimadaten, so glaubt man, nutzlos. Der Aufstellung von Eiskernchronologien\* und deren absolut-zeitlichen (jahrgenauen<sup>2</sup>) Eichung kommt deshalb eine essentielle Bedeutung zu. Die dabei angewendeten Datierungsmethoden sind überwiegend Eigenentwicklungen der Eiskern-Bearbeiter. HAMMER et al. (1986) definieren Eiskerndatierung methodisch ausschließlich bezogen auf eine Jahresschichtenzählung: „Eiskerndatierung ist eine unabhängige Methode absoluter Datierung auf der Basis der Zählung von individuellen Jahresschichten in großen Eisschilden.“<sup>3</sup> Werden die Altersangaben zu den gewonnenen Eiskernen betrachtet – 100.000 Jahre und mehr<sup>4,5</sup> –, stellt sich die Frage, wie diese Alter konkret ermittelt worden sind, was sie bedeuten und ob es sich in der Tat und ohne Einschränkung um eine unabhängige wie auch absolute Datierungsmethode handelt.

---

<sup>1</sup> Die klimatische Interpretation der Daten ist nicht Gegenstand dieses Beitrages; der Verfasser geht auf diesbezügliche Aussagen der Eiskern-Bearbeiter nicht weiter ein.

<sup>2</sup> „Jahr“, „Jahresschicht“, „Jahresschichtenzählung“, „jahrgenau“: in Anführungszeichen, um deutlich zu machen, dass es sich nicht um echte Kalenderjahre handelt; häufig in [ ] ergänzend, welche Methode die „Jahre“ bedingen, z.B. [Eiskern-]Jahre für die Eiskernchronologie.

<sup>3</sup> „Ice-core dating is an independent method of absolute dating based on counting of individual annual layers in large ice sheets.“ (HAMMER et al. 1986, 284)

<sup>4</sup> Science-Titel (17. 10. 1969): One Thousand Centuries of Climatic Record from Camp Century on the Greenland Ice Sheet. (DANSGAARD et al. 1969)

<sup>5</sup> Nature-Titel (15. 7. 1993): Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. (DANSGAARD et al. 1993)



**Abb. 1** Das NEEM-Camp.

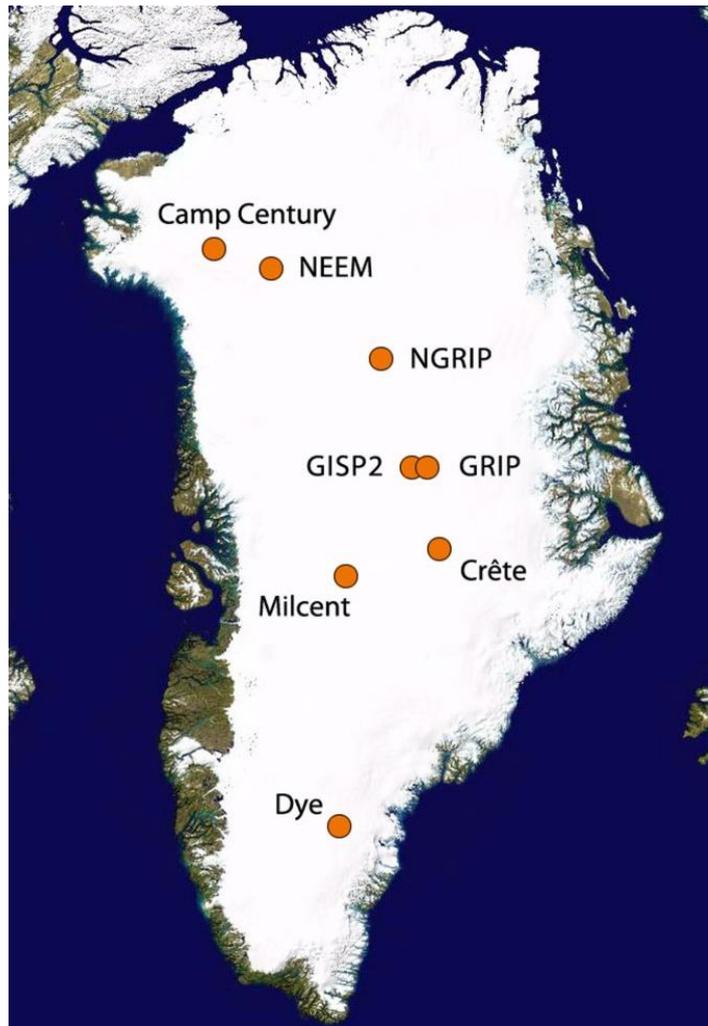
(Foto: Helle Kjaer, 2010; NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk>.)

## 2 Der grönländische Eisschild

Das grönländische Inlandeis bedeckt eine Fläche von 1,8 Millionen km<sup>2</sup> und umfasst ein Volumen von 2,9 Millionen km<sup>3</sup>; sowohl Flächen- als auch Massenbilanz sind gegenwärtig negativ (KARGEL et al. 2012). Der Eisschild baut sich auf aus atmosphärischen Niederschlägen von Schnee sowie, in geringem Umfang, Staub und Tephra. Die akkumulierten\* Schneeniederschläge sind ihrem Wesen nach ein Sediment. Unter dem Druck der Auflast (Luftentweichung, Dichtezunahme, Rekristallisation) erfolgt schrittweise eine Umwandlung in Firn und sodann in Eis; der Diagenese folgt eine Metamorphose.

Geologisch lässt sich die bis zu über 3000 m mächtige Eisdecke nur durch Tiefbohrungen (Tab. 1, Abb. 2) erschließen. Die erbohrte Eissäule (vgl. Abb. 4, Abb. 5 und Abb. 6) gibt zunächst Aufschluss über die physische und lithologische\* Beschaffenheit; beispielhaft von oben nach unten am GISP2-Eiskern (Gow et al. 1997, Tab. 6): Firn (bis etwa 75 m), Eis (75–650 m), sprödes Eis (650–1400 m), plastisches Eis (1400–3040 m), bodennahes „verschlammtes“ Eis (3040–3054 m). Dichtemaximum ( $\geq 0,92 \text{ Mg/m}^3$ ) und Kristallgrößenmaximum ( $\geq 4 \text{ mm}$ ) werden in einer Tiefe zwischen etwa 1000 m und 2000 (1700) m erreicht (abgesehen von der basalen Einheit). Die teilweise lagige Ausbildung („Schichtung“) wird im oberen Bereich ( $< 1300 \text{ m}$ ) des Eiskerns vorwiegend von einem Wechsel aus blasenreichem und blasenfreiem Eis hervorgerufen, im unteren Bereich durch einen Wechsel aus staubreichem und staubarmem Eis.

**Abb. 2** Satellitenaufnahme von Grönland. Eingefügt sind die Orte ausgewählter Bohrungen in den Eisschild. (Foto: NASA)



	C. Century	DYE-3	GISP2	GRIP	NGRIP	NEEM
Bohrkampagne, Kalenderjahre	1963-66	1979-81	1989-93	1990-92	1996-2003	2008-12
Höhe über NN	1890 m	2490 m	3230 m	3238 m	2917 m	2450 m
Mittlere Oberflächentemperatur	-24° C	-20° C	-32° C	-32° C	-31,5° C	-29° C
Oberflächenakkumulation p.a. (1)	0,38 m	0,56 m	0,23 m	0,23 m	0,19 m	0,22 m
Tiefe der Bohrung	1390 m	2035 m	3027 m	3028,8 m	3085 m	2540 m
Bodennähe/Untergrunderbohrung	ja/nein	ja/nein	ja/ja	ja/nein	ja/nein	ja/nein
Stratigraphische Interpretation (2)	Eem	Eem	Eem	Holstein	Eem	Eem
Eisalter, Basis [radiometr.] Jahre	~ 120.000	~ 90.000	> 110.000	~ 250.000	~ 123.000	> 128.500

**Tab. 1** Fakten und Zahlen zu sechs Tiefbohrungen in die grönländische Eisdecke. (1) Eis-Äquivalent, (2) Gegenwart bis Eem- bzw. Holstein-Warmzeit.

Abkürzungen und Quellen: Camp Century (DANSGAARD et al. 1969); Dye 3 (DANSGAARD et al. 1982); GISP2 = Greenland Ice Sheet Project 2 (MEESE et al. 1997); GRIP = Greenland Ice Core Project (GRIP MEMBERS 1993); NGRIP = North Greenland Ice Core Project (NORTH GREENLAND ICE CORE PROJECT MEMBERS 2004); NEEM = The North Greenland Eemian Ice Drilling (NEEM COMMUNITY MEMBERS 2013).

### 3 Stratigraphie und Alterskalkulation

#### 3.1 Tiefbohrung Camp Century – wegweisende Erstinterpretation

Die erste Vollbohrung durch die grönländische Eisdecke wurde in den Jahren 1963-66 im NW, 225 km E Thule, am US-amerikanischen Militärstützpunkt Camp Century (Tab. 1, Abb. 2) niedergebracht (HANSEN & LANGWAY 1966). Entlang des 1390 m langen Eiskerns wurden zahlreiche chemische und physikalische Reihenmessungen vorgenommen.

Serie	Terrestrisch	Terrestrisch	Eiskern (Grönland)	Marin
Epoche	Glazial-Gliederung NW-Europa	Kalt-/Warmchwankungen "Klimostratigraphie" NW-Europa	Ereignis-Stratigraphie	Isotopenstufen (MIS)
Holozän	Postglazial (Warmzeit)	Subatlantikum Subboreal Atlantikum Boreal Präboreal		MIS 1 [w] .....
Pleistozän	Weichsel-Kaltzeit	Jüngere Dryas [k]	G. Stadial 1 (GS-1) G. Interstadial 1 (GI-1)	MIS 2 - MIS 5d .....
		Alleröd [w] Ältere Dryas [k]	G. Stadial 2 (GS-2) G. Interstadial 2 (GI-2) (weitere)	
		Bölling [w] (weitere)		
	Eem-Warmzeit	Gliederung nicht ausgewiesen		MIS 5e [w] .....
	Saale-Kaltzeit			MIS 6 - MIS 7d .....
Hollstein-Warmzeit (weitere)			MIS 7e [w]	
(...)				

**Tab. 2** Gliederung der jüngeren Abschnitte des Quartärs und Eis/Land/Meer-Korrelation  
[w] = relativ wärmer; [k] = relativ kälter; G = Grönland

Die stratigraphische Verlinkung (DANSGAARD et al. 1970) erfolgte durch Vergleich und Korrelation der Intervalle extremer Sauerstoffisotopen-Oszillationen (gedeutet als extreme Klimaschwankungen) der Eissäule mit denen des terrestrischen\* und marinen\* Milieus. Dabei waren zwei Ankerpunkte maßgeblich: Das Ende der Jüngeren Dryas (entspricht dem Ende der Weichsel-Kaltzeit und der Pleistozän/Holozän-Grenze, s. u.) mit einem markanten Anstieg

der Sauerstoffisotopenwerte ( $\delta^{18}\text{O}^*$ ) und der Übergang Eem-Warmzeit/Weichsel-Kaltzeit mit einem markanten Abfall der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (Tab. 2).

Für die Interpretation des Eisalters übernahmen DANSGAARD et al. für diese zwei Ankerpunkte die bereits bestehenden Alterswerte, nämlich etwa 10.000 [ $^{14}\text{C}$ -]Jahre v. h. (nach TAUBER 1970) in 1120 m Tiefe und 80.000-85.000 [radiometrische] Jahre v. h. (gemäß Emiliani-Kurve, EMILIANI 1966, sowie BROECKER et al. 1968) in 1358 m Tiefe (extremes Warmhoch am Ende der Eem-Warmzeit). Über ein adaptiertes physikalisches Eisflussmodell kalkulierten sie sodann annäherungsweise jahrgenau die Alter über die gesamte Eissäule hinweg. Die „Eintausend Jahrhunderte der Klimaaufzeichnung von Camp Century“ (DANSGAARD et al. 1969) sind demnach nicht durch Zählung ausgebildeter und identifizierter Jahresschichten begründet, sondern durch eine Alterskalkulation auf Basis einer Vorgabe durch  $^{14}\text{C}$ - und weitere radiometrische Alter.

Über das Eisflussmodell wird eine durchgängige Alters-zu-Tiefen-Beziehung hergestellt; d. h., jedem Meter und Zentimeter der Eissäule wird ein rechnerisches Alter zugewiesen. Den Modellen (mehrere Varianten) liegt die (nicht nachgewiesene!) Basisannahme einer gleichbleibenden jährlichen durchschnittlichen Akkumulationsrate zu Grunde (entspricht der aktuellen Oberflächenakkumulation, siehe Tab. 1); spätere Verfeinerungen der Modelle variieren abschnittsweise die Akkumulationsrate im begrenzten Umfang. Die Modelle gehen des Weiteren von einer plastischen Deformierung und einer zunehmenden Ausdünnung mit der Tiefe aus.

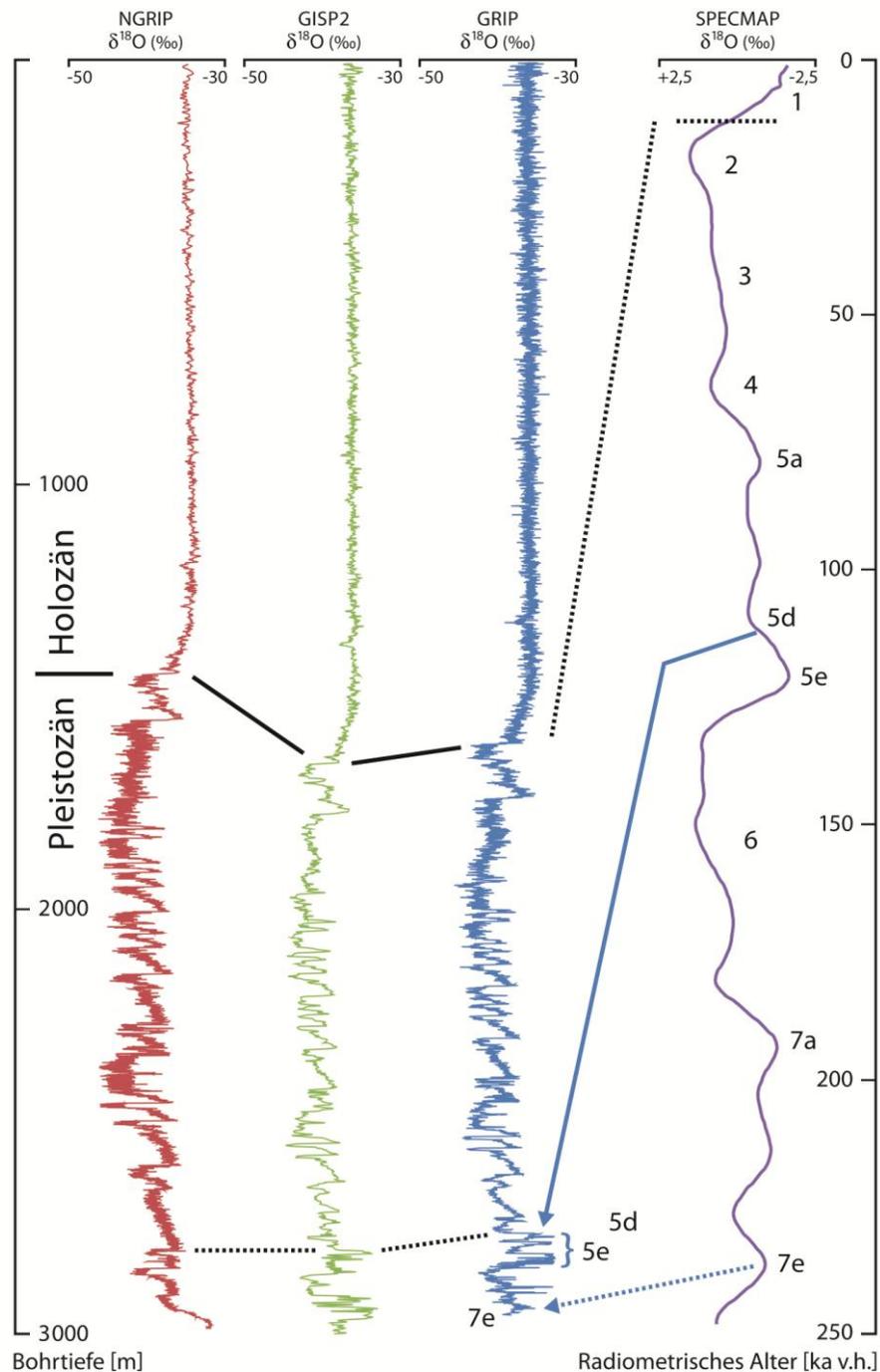
Diese methodische Vorgehensweise war wegweisend für alle nachfolgenden Tiefbohrungen. Die zwei Altersverankerungen für den GRIP-Eiskern (DANSGAARD et al. 1993)<sup>6</sup> waren erneut das Ende der Jüngeren Dryas (nunmehr 11.500 [kalibrierte  $^{14}\text{C}$ -]Jahre v. h., 1624 m Tiefe) sowie die marine Isotopenstufe (MIS)\* 5d mit (nunmehr) 110.000 [radiometrischen] Jahren v. h. (nach dem Ende der Eem-Warmzeit, MIS 5e, 2788 m Tiefe) mit einem markanten Abfall der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (Abb. 3)<sup>7</sup>. So bezieht sich das „Zeugnis einer generellen Instabilität des Klimas der Vorzeit von einem 250.000 Jahre-Eiskernbericht“ (Titel von DANSGAARD et al. 1993) gleichermaßen auf eine Alterskalkulation auf Basis einer Vorgabe durch  $^{14}\text{C}$ - und weitere radiometrische Alter.

Die klimatostratigraphische Deutung (Korrelation der  $\delta^{18}\text{O}$ -Profile) ist erst drei Jahrzehnte später durch die Identifizierung von Tephralagen (NGRIP- und GRIP2-Eiskern) über eine nord- und mitteleuropäische Land/Meer/Eis-Korrelation in Teilen bestätigt worden. Es sind dies die Vedde- (ehemals Z1) und Saksunnarvatn-Asche im Grenzbereich Pleistozän/Holozän sowie die Z2-Asche in der Weichsel-Kaltzeit (GRÖNVOLD et al. 1995, MORTENSEN et al. 2005; Vedde-Asche inzwischen nachgewiesen bis in die Julianischen Alpen, Slowenien, LANE et al. 2011).

---

<sup>6</sup> „The h and fb values are chosen so as to assign well-established ages to two characteristic features in the  $\delta$  record: 11.5 kyr for the end of the Younger Dryas event and 110 kyr for the marine isotope stage (MIS) 5d, which appear at depths of 1,624 m and 2,788 m, respectively, in the  $\delta$  record.“ (DANSGAARD et al. 1993, 219)

<sup>7</sup> Desgleichen für NGRIP: „The modeled NorthGRIP “ss09sea” time scale is based on an empirical  $\delta^{18}\text{O}$  – accumulation relationship, an ice flow model, and two fixed points at 11.55 and 110 ka, respectively (Johnsen et al., 2001).“ (SVENSSON et al. 2008, 51)



**Abb. 3** Sauerstoffisotopenprofil und Korrelation mit der SPECMAP-Kurve.

Sauerstoffisotopenwerte ( $\delta^{18}\text{O}$ ) des NGRIP-, GISP2- und GRIP-Eiskerns, abgetragen mit der Tiefe, und Ausweis der Pleistozän/Holozän-Grenze, formal definiert am NGRIP-Eiskern (vgl. Kasten). Das Holozän zeichnet sich durch eine stabile, im Wesentlichen enge  $\delta^{18}\text{O}$ -Bandbreite aus; das liegende Pleistozän dagegen zeigt einen instabilen Verlauf stark schwankender  $\delta^{18}\text{O}$ -Oszillationen. Die  $\delta^{18}\text{O}$ -Signatur ist in allen drei Eiskernen im Wesentlichen identisch, sodass bei der Korrelation markanter Abschnitte/Ausschläge von zeitgleichen Bildungen ausgegangen werden kann (z.B. graue durchgezogene und gepunktete Linie). Nach DANSGAARD et al. (1993) erfolgte die Verankerung des GRIP-Eiskerns mit der marinen SPECMAP-Kurve durch Übertragung des radiometrisch geeichten Alterswertes von 110.000 [radiometrischen] Jahren an der Wende der marinen Isotopenstufen (MIS) 5e(Eem-Warmzeit)/5d, Beginn des Weichsel-Glazials (blauer durchgezogener Pfeil); auch erfolgte eine jedoch „unsichere“ Übertragung von 7e, Holstein-Warmzeit (blauer gepunkteter Pfeil). Die mit der Verankerung verbundene Übertragung radiometrischer Altersdaten auf die Eissäule erfordert unter der von den Eiskern-Bearbeitern vorgenommenen Annahme einer (nicht nachgewiesenen!) gleichbleibenden Akkumulationsrate die Annahme einer zunehmenden bis extremen Ausdünnung des Eises zur Basis hin (dies wird in den Eisflussmodellen abgebildet); ka: Tausend Jahre – Datennachweis siehe Kap. 14.

Die Stratigraphie des grönländischen Eisschildes beruht demnach in der Hauptsache auf geochemische Indikatoren (Chemostratigraphie) sowie vulkanische Aschenlagen (Tephrostratigraphie).



**Abb. 4** Bohrkopf mit Eiskern.  
(Foto: Marie Kjaergaard, 2010; NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk.>)

**Abb. 5** Bohrraum mit Gestänge und Bohröffnung.  
(NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk.>)

### 3.2 Eisflussmodell und Eiskerndatierung

Die Datierung des Camp Century-Eiskerns erfolgte näherungsweise über ein physikalisches Eisflussmodell, da (zu diesem Zeitpunkt) keine aktuell bekannte andere Datierungsmethode

für den gesamten Eiskern hätte in Anwendung gebracht werden können.<sup>8</sup> Für den obersten Bereich der Eissäule gilt die vereinfachte Gleichung (1), für tiefere Bereiche sind die Beziehungen (2a) und (2b) maßgeblich (DANSGAARD et al. 1969, 1970; DANSGAARD & JOHNSON 1969; JOHNSON et al. 1972). Aus den Gleichungen (2a) und (2b) können weitere Verfeinerungen abgeleitet werden, prinzipiell für jeden beliebigen Abschnitt der Eissäule. Die jeweils kalkulierten Zeitskalen werden als erste Annäherungen zu einer absoluten Chronologie verstanden.

$$(1) \quad t = \tau \frac{H}{\lambda_H} \ln \frac{H}{y}, \quad \tau = 1 \text{ Jahr}$$

$$(2a) \quad t = \tau \frac{2H-h}{2\lambda_H} \ln \frac{2H-h}{2\lambda_H}, \quad h \leq y \leq H$$

$$(2b) \quad t = \tau \frac{2H-h}{2\lambda_H} \left[ \left( \frac{2H}{h} - 1 \right) + 2 \left( \frac{h}{y} - 1 \right) \right], \quad 0 < y < h$$

**Tab. 3** Eisflussmodell zur Kalkulation der Zeitskala.

Konstanten:  $H$  = Gesamtmächtigkeit,  $\lambda_H$  = Nettoakkumulationsrate; Variablen:  $h$  = gewählter/kalkulierter Punkt, der zu einem Wechsel von Gleichung 2a zu 2 b veranlasst (angenommene Änderung der Horizontalgeschwindigkeit  $V_x$ , Scherfläche),  $y$  = Distanz vom Boden.

	CC (1)	CC (2)	GRIP (1)	GRIP (2)
$\tau$	1	1	1	1
$H$ [m]; Anpassung um -23 m	1367 (1390)	1367 (1390)	2981 (3003,8)	2981 (3003,8)
$\lambda_H$ [m]	0,35	0,35	0,23	0,23
$y$ [m]	247	31	1379,8	215,8
Tiefe [m], Pleistozän/Holozän-Grenze	1120		1601 (1624)	
Tiefe [m], Übergang MIS 5e/5d		1336		2765 (2788)
$h$ [m]	400	400	1200	1200
Ergebnis (Gleichung 2a), Eiskernjahre			11553	
Ergebnis (Gleichung 2b), Eiskernjahre	10012	85529		108695

**Tab. 4** Ankerpunkte und ihre kalkulierten Alter.

Über die Wahl von  $h$  und Anpassungen von  $\lambda_H$  (vgl. Tab. 1, Tab. 3) können die Alterswerte angepasst werden. Für die jeweiligen Ankerpunkte (Tiefe [m]) sind die rechnerischen Werte unter Ergebnis ausgewiesen. CC, Camp Century, 1120 bzw. 1336 m Tiefe: DANSGAARD et al. 1970, Hammer et al. 1978; GRIP, 1624 bzw. 2788 m Tiefe: DANSGAARD et al. 1993.

<sup>8</sup> „Unfortunately, none of the ice-dating techniques available at present can be applied to the ice core. (...) In principle, it is possible to use the seasonal  $\delta$ -variations measured on small ( $10\text{cm}^3$ ) samples of the core and count the summer maxima and winter minima downwards from the surface to obtain, as in tree rings, an absolute chronology, this procedure would not only require an enormous number of measurements, it would also not bring us very far back in time, because molecular diffusion in the solid ice gradually obliterates the oscillations that remain after firnification (Johnsen & Dansgaard 1970). Consequently (...) the most obvious possibility is to calculate the age-depth relationships of the ice core by developing a physical model, which will incorporate (1) the generally accepted glacier-flow theory (...), and (2) reasonable assumptions concerning the parameters that influence it (...).“ (DANSGAARD et al. 1970, 338)

Die Akkumulationsrate  $\lambda_H$  (die jährliche durchschnittliche Akkumulationsrate) wird als konstant angenommen; dies ist den Eiskern-Bearbeitern wohl bewusst (DANSGAARD et al. 1969, 341). „Tatsächlich ist  $\lambda_H$  eine Funktion von  $t$  und es ist unmöglich, eine Beziehung zwischen diesen beiden Parametern zu finden, (...)“. Anders ausgedrückt: Ohne die Annahme einer gleichbleibenden Akkumulationsrate ist das Eisflussmodell hinfällig. Unter weiter: Die Basisannahme einer gleichbleibenden Akkumulationsrate ist bisher nicht nachgewiesen worden und äußerst unwahrscheinlich.

Das für den grönländischen Eisschild angepasste physikalische Eisflussmodell geht des Weiteren bei zunehmender Überlagerung (Schneeakkumulation) von einer plastischen Deformierung und zunehmenden Ausdünnung mit der Tiefe aus.<sup>9</sup>

Die vermeintliche Gültigkeit ihres Eisflussmodells überprüften DANSGAARD & JOHNSON (1969) durch zwei unabhängige Wege („*experimental evidence*“). Erstens, der Kalkulation des Temperaturprofils entlang des Bohrloches und Abgleich mit den empirisch ermittelten Temperaturwerten. Hier zeigte sich eine hohe Übereinstimmung (Abweichung von lediglich 0,3°C). Allerdings ist diese Anwendung nicht Bestandteil der Gleichungen (1) bis (2b) und für das Alter-zu-Tiefen-Modell irrelevant. Zweitens, der klimatologische Vergleich, die Übereinstimmung klimatischer Wechsel der nördlichen Hemisphäre während der letzten 100.000 [radiometrischen] Jahre.<sup>10</sup> Der klimatologische Vergleich aber führt in einen Zirkelschluss. Denn erst mit der Übernahme zweier Ankerpunkte bereits bestehender Alterswerte, nämlich etwa 10.000 [<sup>14</sup>C]-Jahre v. h. und 80.000-85.000 [radiometrische] Jahre v. h. (vgl. Kap. 3), erfolgte die Datierung des Eiskerns mit dem Eisflussmodell. Die so erstellte Zeitskala kann keinesfalls als eine Bestätigung (Verifizierung) für das Eisflussmodell selbst gewertet werden.

Interessant in diesem Zusammenhang ist die damalige Irritation um Datierung und Kalkulation beim 12. Nobel-(Radiokarbon)Symposium 1969. Nachdem DANSGAARD seine Eiskerninterpretation mit dem Titel *Ice Cores and Paleoclimatology* vorgestellt hatte, wurde er in der anschließenden Diskussion explizit auf die Art und Weise der Datierung angesprochen: „*Wurden sie [die Alterswerte zum Eiskern, M.K.] wirklich datiert? - Nein. Sie sind alle kalkuliert.*“<sup>11</sup> So stellte sich heraus, dass diese Kalkulationsmethode der Eiskern„datierung“ für eine Kalibrierung der <sup>14</sup>C-Methode unbrauchbar war. Denn zur Kalibrierung der <sup>14</sup>C-Methode war eine absolute (jahrgenaue) sowie unabhängige und verifizierte Zeitskala notwendig. So sollten Eiskerne bis auf Weiteres keine Rolle in dem <sup>14</sup>C-Dating-Game spielen.

<sup>9</sup> Um eine laterale (Fließ-)Komponente weitgehend zu vermeiden, wurden spätere Tiefbohrungen vorwiegend auf oder in der Nähe der Eisscheide niedergebracht.

<sup>10</sup> „*The agreement with other quite independent climatological estimates, covering nearly 100000 years, leads us to the conclusion that the time scale and therefore our flow model is basically correct down to 30 or 35 m above the bottom.*“ (DANSGAARD & JOHNSON 1969, 222)

<sup>11</sup> „*Willis: May we have the slide showing the Glacial and Post-glacial of the past 15,000 years? To what extent were the dating points on the lower curve measured? Where they actually dated? - Dansgaard: No. They are calculated.*“ (DANSGAARD et al. 1970, 350-1)

### 3.3 Sauerstoffisotopendaten und klimatostratigraphische Interpretation

Das Sauerstoffisotopenprofil des Camp Century-Eiskerns basierte auf 7000 Einzelproben. Entlang des Eiskerns aufgetragen zeigten die  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte ein markantes Profil, das in Tab. 5 anhand von 4 Abschnitten charakterisiert ist. Besonders auffällig ist die abrupte Beendigung des Glazials mit der Jüngeren Dryas-Periode (DANSGAARD et al. 1989).

Die klimatostratigraphische Interpretation des Eiskerns beruhte alleine auf eine Beziehung der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zum modellierten/kalkulierten Alter. Eine Korrelation auf Basis von vulkanischen Aschenlagen war zu diesem Zeitpunkt nicht gegeben (vgl. Kap. 7.2). Hierbei hatten sich DANSGAARD et al. (1969, 1970) insbesondere von ANDERSEN et al. (1960), VAN DER HAMMEN et al. (1967), EMILIANI (1966), RONA & EMILIANI (1969) sowie BROECKER & KU (1969) leiten lassen. Der Eiskern umspannte demnach eine Periode bis in die letzte Warmzeit (Eem), d.h. (zum damaligen Zeitpunkt) eine Zeitspanne von über 100.000 [radiometrischen] Jahren (DANSGAARD et al. 1970).

Ab-schnitt	Bohr-tiefe [m]	Kalkulierte Alter v.h. [Eiskern-]Jahre	$\delta^{18}\text{O}$	Interpretation	Vergleich/Referenz [Autoren]	Datierung radiometrisch
(I)			stabil, - 30 bis - 28 ‰	Postglazial		
(II)		12200 - 9950	Min. - 42 ‰; extremer Anstieg um 11 ‰-Punkte	Glazialer/postglazialer Übergang: Bolling bis Jüngere Dryas-Periode	Iversen 1954, Tauber 1970	12400 - 10200
	1190	12600				
		32000 - 12000	extrem niedrig, stark variierend	(19-23) Lascaux Interstadial ?		
		? 42000 - 32000	klimatische Oszillationen; 7 Warmausschläge	(39-34) Denekamp Interstadial oder Henegelo Interstadial	van der Hammen et al. 1967	32000 - 28000 39000 - 35000
		? 58000 - 42000		(56-46) Upton Warren Interstadial	van der Hammen et al. 1967	52000 - 45000
(III)		80000 - ? 58000	- 36 bis - 29 ‰	Weichsel Frühglazial; (74-68) Brorup Interstadial, (78-75) Amersfoort Interstadial	Andersen et al. 1960	60000
(IV)	1359	85000 - 80000	hoch (> -29 ‰)	Ende des Eem Interglazials; Übereinstimmung mit Barbados I Meeresspiegel-Maximum	Broecker et al. 1968, Ku 1968	82000 ± 3000
		> 120000 - 85000	zwei Maxima	(104) Barbados II Meeresspiegel-Maximum (126) Barbados II Meeresspiegel-Maximum	Veeh 1966, Brocker et al. 1968	103000 122000 ± 3000

**Tab. 5** Klimatostratigraphische Interpretation des Camp Century Eiskerns. (nach DANSGAARD et al. 1970)

## 4 Tiefbohrungen 1966-2012

Nach Camp Century sind fünf weitere Tiefbohrungen (> 2000 m) niedergebracht worden (Tab. 1). Mit zunehmendem Interesse an Paläo-Klimadaten, Stichwort „Klimawandel“, und damit einhergehender finanzieller Unterstützung sowie jeweiliger technischer Ausstattung sind die generierten Datenmengen signifikant angestiegen. Die gewonnenen Daten und Ergebnisse sind im jeweiligen Kontext der technischen Entwicklung, der Wissenszunahme und der stratigraphischen Neuorientierung des Quartärs zu betrachten.



**Abb. 6** NEEM-Bohrstation mit Bohrteam.

(Foto: Wang Shimeng, 2010; NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk>.)

### 4.1 Dye 3

Dye 3 war ein Standort einer Reihe US-amerikanischer Radarstationen in Südgrönland, etwa 41 km E der Eisscheide. Die Dye 3-Tiefbohrung (2035 m) von 1979-81 war der Abschluss eines etwa 10 Jahre andauernden Projektes (GISP, Greenland Ice Sheet Project) mit etwa 20 ansonsten flachen und mitteltiefen Bohrungen, u. a. Crête (404 m) und Milcent (398 m).

Nach DANSGAARD et al. (1982) erschließt die Dye 3-Tiefbohrung in einer kontinuierlichen Abfolge den Zeitraum von der Gegenwart bis zum Ende der Eem-Warmzeit (etwa 90.000 radiometrische Jahre). Grundlage dieser Verankerung ist der Vergleich des Sauerstoffisotopenprofils mit dem des Camp Century-Eiskerns und den EMILIANI-Stufen der Tiefsee, insbesondere für das Wisconsin (Weichsel-Kaltzeit). Eine Überarbeitung der Modelldatierung des

Camp Century-Eiskerns lasse zudem eine drastische („*dramatic*“) Beendigung des Sangamon (Eem-Warmzeit) vermuten.

Die Lokation Dye 3 war logistisch und finanziell ein Kompromiss. Unmittelbar nach Dye 3 äußerten DANSGAARD und Kollegen ihre Erwartung, dass eine Bohrung im zentralen Bereich des grönländischen Eisschildes „*einige Hunderttausend oder möglicherweise Millionen Jahre in die Vergangenheit*“ zurückreichen könne.<sup>12</sup>

Aufgrund der Analyse von Biomolekülen des basalen (silty) Eises schließen WILLERSLEV et al. (2007) auf ein koniferenbewaldetes Südgrönland vor dem Eis (vgl. 4.4).

## 4.2 Greenland Ice Sheet Project 2, GISP2

Gleich zwei Bohrungen wurden im Bereich der zentralen Scheitelhöhe des grönländischen Eisschildes in über 3000 m NN niedergebracht: GISP2, auf der Eisscheide (1989-93), und GRIP, 28 km E GISP2. Es ist die einzige Tiefbohrung, die in das anstehende Grundgebirgs-  
stein eindringt (Tab. 6). Das aufliegende Lockergestein (Geschiebegeröll?) hat nur eine Mächtigkeit von 0,5 m.

Bohrkern Tiefe [m]	jeweilige Mächtigkeit [m]	Lithologie	Weitere Beobachtungen
0 -- 75-77	75	Firn	
75 - 650	575	Eis	
650 - 1400	750	sprödes Eis	
1400 - 3040,34	1640,34	duktils Eis	Verswinden von Gasblasen; ab 2200 m: Kleinfalten ab 2400 m: überkippte Falten ab 2810 m: gestörte Lagerung im m-Bereich ab 2990 m: Kristallbildung >= 50-60 mm
3040,34 - 3053,44	13,1	"verschlammtes" Eis	silty ice; braun, mit Schlammklumpen und Gesteinsbruchstücken
3053,44 - 3053,92	0,48	Geschiebegeröll (?)	boulder till (?); mit schiefrigen Gesteinen (top 20 cm), unterlagert von frischem Biotitgranit (top 35 cm); "diroritisch" aussehendes Gestein (35-39 cm), unterlagert von etwa 10 cm unkonsolidiertem (nunmehr gefrorenem) Materials, möglicherweise Boden (? Lockergestein), bestehend aus siltigen und körnigen Klasten (1-2 cm) granitischen und mafischen Gesteins
3053,92 - 3054,99 (Abbruch der Bohrung)	1,07	grauer Biotitgranit	anstehendes Grundgebirgs-gestein

**Tab. 6** Profil und physische Beschaffenheit des GISP2-Eiskerns.

GISP2 ist die einzige Tiefbohrung in das anstehende Grundgebirgs-gestein. (nach Gow et al. 1997)

<sup>12</sup> „A central Greenland ice core is expected to reach several hundred thousand or perhaps million years back in time.“ (DANSGAARD et al. 1982, 1276)

### 4.3 Greenland Ice Core Project, GRIP

An der GRIP-Lokalität (3.238 m über NN), E der zentralen Scheitelhöhe, wurde von 1990-92 ein 3029 m langer Bohrkern gewonnen, der bis nahe an den Untergrund reichte.

Als wichtigstes Ergebnis ihrer Eiskernanalysen präsentierten die GRIP-Mitglieder (GRIP MEMBERS 1993, 203) eine klimatische Instabilität während der letzten Interglazialperiode (Eem-Warmzeit). Demnach sei das Klima in Grönland während dieser Warm-Periode durch eine Serie strenger Kalt-Abschnitte charakterisiert, die extrem schnell einsetzten („*began extremely rapidly*“) und Jahrzehnte bis Jahrhunderte andauerten („*lasted from decades to centuries*“). Dies werfe – die Eem-Warmzeit scheine etwas wärmer gewesen zu sein als unser heutiges Klima – Fragen über die Effekte zukünftiger globaler Erwärmung auf.

Zur Erstellung einer vorläufigen GRIP-Eiskernchronologie bis 14.500 Jahre v. h. schlugen die GRIP-Mitgliedern vor, diese auf Stratigraphie zu basieren. Eine Ausweitung der Chronologie bis in das Eem erfolgte dagegen durch Modellierung des Eisflusses; sie werde durch Korrelation des Sauerstoffisotopen-Profils u. a. mit der marinen SPECMAP Standardisotopenkurve bestätigt („*confirmed by demonstrating a close correlation*“; Diskussion vgl. Kap 3.1 und 3.2). DANSGAARD et al. (1993) zufolge reicht der Eiskern bis in den Saale/Holstein-Glazialzyklus hinein, insgesamt also etwa 250.000 radiometrische Jahre umfassend.

Ein Grund für die Doppelbohrung müssen auch Zweifel an den bisherigen Ergebnissen gewesen sein. Nach JOHNSEN et al. (1992, 311) sollte eine Antwort auf die brennende Frage gefunden werden, ob die Versätze, die das  $\delta^{18}\text{O}$ -Profil im Weichsel-Glazial charakterisiert, wirklich authentische Veränderungen des Klimas repräsentieren oder nur Gegenstand einer gestörten Schichtung darstellen. Sie resümierten: „*Die Ergebnisse reproduzierten die bisherigen Resultate zu solch einem Grad, dass die Existenz interstadialer Episoden nicht länger angezweifelt werden kann.*“<sup>13</sup>

### 4.4 North Greenland Ice Core Project, NGRIP

Die Bohrstelle befindet sich in Nordgrönland, knapp 200 km NNW GISP2/GRIP auf der Eisscheide in 2917 m über NN. Dort wurde von 1996-2003 der bisher längste Eiskern mit einer Gesamtlänge von 3085 m erbohrt.

Die Lokalität wurde mittels Echolotsondierung sorgfältig ausgewählt (flache Bodentopographie), um ein ungestörtes Profil des Eem-Interglazials in dem tieferen bodennahen Eis zu gewinnen. Denn in diesem Bereich (die untersten 10%) waren die GRIP- und GISP2-Eiskerne durch Eisfaltung so stark gestört, dass die gewonnenen Daten nicht mit genügender Sicherheit interpretiert werden konnten. So lag zum Beginn der NGRIP-Bohrung ein zuverlässiges Klimaarchiv nur bis zum Beginn der Weichsel-Kaltzeit vor (NORTH GREENLAND ICE CORE PROJECT MEMBERS 2004, 147). Allerdings wurde (unerwartet) in Bodennähe mächtigeres geschmolze-

<sup>13</sup> „(...) whether the shifts in oxygen isotope ratio were genuine representations of changes in climate, rather than artefacts due to disturbed stratification. (...) The results reproduce the previous findings to such a degree that the existence of the interstadial episodes can no longer be in doubt.“ (JOHNSEN et al. 1992, 311)

nes und wiedergefrorenes Eis aufgefunden, sodass einer Auswertung zufolge nur das Ende des Eem-Interglazials angetroffen wurde. Damit waren die Ziele nicht erreicht worden. Das Ergebnis war eine „hochauflösende, bis in die letzte Interglazialperiode hineinreichende Aufzeichnung des Nordhemisphärenklimas“.<sup>14</sup>

Anhand des NGRIP-Isotopenprofils ( $\delta^{18}\text{O}$ ) wurden das Holozän, das gesamte letzte Glazial und Teile der Eem-Periode ausgewiesen. Es konnten alle 24 abrupten, warm-klimatischen DO\*-Ereignisse (auch als Grönland Interstadiale, GIS, bezeichnet) sowie die folgenden Grönland-Stadiale (GS) klar identifiziert werden. Der NGRIP-Eiskern wurde mit der GRIP-Chronologie datiert („cross-dated“); anhand der hochauflösenden Isotopenprofile und vulkanischer Referenzhorizonte (bis 105.000 radiometrische Jahre v. h.). Darüber hinaus wurde das Isotopenprofil mit dem Vostock-Profil (Antarktis) abgeglichen, was zu einem Isotopenalter des Basalteils von 124.000 radiometrischen Jahren führte.

Im Basalbereich wurde 2003, bisher einzigartig, organisches Material gefunden (Abb. 7 und Abb. 8). Dem ersten Anschein nach könnte es sich dabei um eine Kiefernadel handeln. Bis heute allerdings sind Analysen dieses Fundes nicht veröffentlicht worden. In einer diesbezüglichen Pressemitteilung des Niels Bohr Instituts (Universität Copenhagen) hieß es, dass das Vorkommen von Pflanzenmaterial unter dem Eis ein Hinweis darauf sei, dass sich der grönländische Eisschild relativ schnell formte.<sup>15</sup>



**Abb. 7** NGRIP-Eiskern der basalen Zone mit Koniferennadel.

**Abb. 8** Koniferennadel.

(Fotos: Department of Geophysics, Niels Bohr Institute, University of Copenhagen;  
www.glaciology.gfy.ku.dk/ngrip/)

#### 4.5 The North Greenland Eemian Ice Drilling, NEEM

Die Lokalität in Nordwestgrönland (2450 m über NN, Abb. 1) wurde erneut unter Zuhilfenahme von Bodenradarmessungen ausgewählt. Diese jüngste Tiefbohrung wurde in den Jah-

<sup>14</sup> Nature-Titel am 9. September 2004: High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period.

<sup>15</sup> Mitteilung vom 7. August 2004, Prof. Dorthe DAHL-JENSEN: „The presence of plant material under the ice indicates, that the Greenland ice sheet formed relatively fast, as a slowly growing glacier would have flushed or pushed these light particles away.“

ren 2008 bis 2012 niedergebracht und förderte einen Eiskern mit einer Gesamtlänge von 2540 m (vgl. Abb. 9 und Abb. 10, Eisbeschaffenheit in der Basalzone).



**Abb. 9** NEEM-Eiskern der Bodenzone mit Einschlüssen von Granit.  
(Foto: Kenji Kawamura; NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk>.)



**Abb. 10** Eiskern der Bodenzone mit kleinen Gesteinsbruchstücken, Tiefe 2519,65 m.  
(NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk>.)

Der Name des Projektes war gleichzeitig Programm: Eine Gewinnung von aussagefähigen Klimadaten über das Eem-Interglazial. Denn alle bisherigen Tiefbohrungen lieferten für die-

sen Abschnitt unzureichendes Datenmaterial. Das Eem-Glazial war in den Eiskernen des zentralen Eisschildes hochgradig entstellt, im NGRIP-Eiskern unvollständig und in den Camp Century- und Dye 3-Eiskernen zu komprimiert.<sup>16</sup>

Die wesentlichen Ergebnisse des Bohrprojektes wurden kürzlich von DAHL-JENSEN und Co-Autoren (NEEM COMMUNITY MEMBERS 2013)<sup>17</sup> veröffentlicht. Demnach soll es in der Eem-Warmzeit zu einer partiellen Schmelze des grönländischen Eisschildes mit einem Höhenverlust um  $400 \pm 250$  m gekommen sein.

## 5 Ereignislagen und Jahresschichten

### 5.1 Visuelle Stratigraphie

In einem Teil der Eiskern-Publikationen ist seit Anfang der 1990er-Jahre ein überproportional häufiges Auftreten von Jahr-Worten wie jährlich (annual), Jahresschicht (annual layer) und Jahresschichtenzählung (annual layer counting) auffällig. So formulieren beispielsweise WALKER et al. (2009, 7): „*Eisschilde bilden sich durch die jährlich inkrementelle Akkumulation von Schnee.*“ Das Wort „jährlich“ ist hier irritierend. Denn Schnee fällt nicht einmal im Jahr bzw. wird nicht in Jahrespaketen dem Eisschild „zugefügt“. Wohl werden meteorologisch Niederschläge in monatlichen oder jährlichen Mengen angegeben; hier handelt es sich aber im geologischen Sinne um ein Sediment, welches, sofern keine „Erosion“ (Verdunstung, Abschmelzung, Ausblasung) erfolgt, sich an der Oberfläche des Eisschildes durch Schneefallereignisse oder Schneeverwehungsereignisse ansammelt. So gilt es, zwischen einem Ereignis (und der dazugehörigen Ereignislage) und der Abgrenzung und Identifizierung von Lagen eines Jahres zu unterscheiden.

Mit dem bloßen Auge können in Eisprofilen zahlreiche lagige Gefüge beobachtet werden. Sie sind Ausdruck von Veränderungen der Dichte oder der Korngröße oder von Einschlüssen wie Gasblasen oder Staubpartikel. Anhand von Beobachtungen an der Eisoberfläche und in Schneegruben (Abb. 11 und Abb. 12) werden diese Veränderungen den jeweiligen atmosphärischen Bedingungen zugeschrieben, z.B. der Bildung von Oberflächen- und Tiefenreif, partieller Schmelze, Schneeverwehungen, Sturmablagerungen. So beschrieb bereits BENSON (1962) für die vier untersuchten Jahre 1952-1955, dass die Sommerlagen geringfügig weicher waren als die Winterlagen<sup>18</sup>. Die erkennbaren Lagen an der Lokalität „Site A“ (die obersten 2 m) wurden nach ALLEY & KOCI (1988) von Sturmlagen dominiert (15-16 pro Jahr). Diese dichten, feinkörnigen Lagen wechselten mit Lagen grobkörnigeren Materials (Oberflächenreifwachstum), mit Lagen aus Ruhe-Schneefall oder mit Bildungen der Oberflächendiagenese (Verfestigung). Eine stärkere grobkörnige Lage interpretierten sie als Herbstfirn (etwa 5 cm im Vergleich zu der Gesamtmächtigkeit von etwa 1 m für das ausgewiesene Jahr 1983). Mit

---

<sup>16</sup> <http://neem.dk/neeminfo.pdf/>, Abfrage 27. 3. 2013

<sup>17</sup> Nature, 24. 1. 2013

<sup>18</sup> BENSON (1962, 13) definierte wahrscheinlich als Erster die stratigraphische Vorgehensweise im Firn des Inlandeises: „*Stratigraphic work in firn consists of identifying variations in a layered sequence and extending recognizable features laterally by correlation with other measured sections.*“

diesen oberflächennahen Beobachtungen war das Ausweisen einer „Jahresschicht“ verknüpft, einer Akkumulation (Summe) zahlreicher Lagen und dem „Jahressignal Herbstfirn“. Es wurde weiter angenommen, dass diese Merkmale bei der Umwandlung in Firneis und Eis (Rekristallisation) sowie einer Ausdünnung erhalten bleiben.



**Abb. 11** Firn im Durchlicht.

Zwischen zwei Schneegruben (double pit) wird eine schmale Wand stehen gelassen. Im Durchlicht (Sonne) werden die Schichten (Ereignislagen) in der abgedunkelten Schneegrube sichtbar; NGRIP. (Foto: Department of Geophysics, Niels Bohr Institute, University of Copenhagen; [www.glaciology.gfy.ku.dk/ngrip/](http://www.glaciology.gfy.ku.dk/ngrip/))

ALLEY et al. (1997, 26378) behaupteten, für den GISP2-Eiskern eine visuelle Identifizierung („visuelle Stratigraphie“) von der Gegenwart (Oberfläche) bis 50.000 [Eiskern-]Jahre zurück anwenden zu können. Bis in etwa 1300-1400 m Tiefe schieden sie „Jahresschichten“ anhand gasblasenreicher und grobkörniger Lagen aus (die im Durchlicht hell erscheinen), u. a. anhand staubreicher Lagen. Diesen Einzellagen bzw. Lagenpaaren wurden *einfach* „Jahre“ zugewiesen. Die Methode ist allerdings selbst unter den Eiskern-Bearbeitern sehr umstritten; HAMMER et al. (1978, 5) beispielsweise messen dieser Art der Datierung nur für die jüngsten 200 Jahre eine Gültigkeit bei.

In diesem Zusammenhang ist erwähnenswert, dass eine Eisbohrkampagne lange und intensiv vorbereitet wird. Dazu gehören auch die Vorausberechnungen der Alters-zu-Tiefen-Beziehung anhand des Eisflussmodells und daraus folgend die Mächtigkeiten (Dicken) der

„Jahresschichten“.<sup>19</sup> Anhand dieser Modellrechnungen „weiß“ der Stratigraph, wie viele „Jahresschichten“ er in einem Bohrkernabschnitt aus einer bestimmten Tiefe zu erwarten hat. Mit zunehmender Tiefe (spätestens nach ca. 200 m, s. o.) ist eine Identifizierung bzw. eine Abgrenzung (Interpretation) eines Jahres ohne Zusatzinformation nicht mehr möglich. Diese Zusatzinformation liefert – abgesehen von den limitierten Feinoszillationen (s. u.) – das Modell. Scheinbar lassen sich aber visuell nicht genügend Lagen (Signale) finden, die in das Modell passen. ALLEY et al. (1997, 26371) drücken ihre Unsicherheit dabei so aus: „Die Indikationen für jährliche Schichtung sind häufig ziemlich schwach.“ Gemeint ist damit, dass es schwierig ist, überhaupt ein lagiges Gefüge zu erkennen und dementsprechend eine Zeitskala auf der Basis von „Jahresschichten“ zu konstruieren. Doch wichtiger ist die Feststellung, dass für die Ansprache dieser Lagen als Jahresschichten kein Nachweis erbracht worden ist.



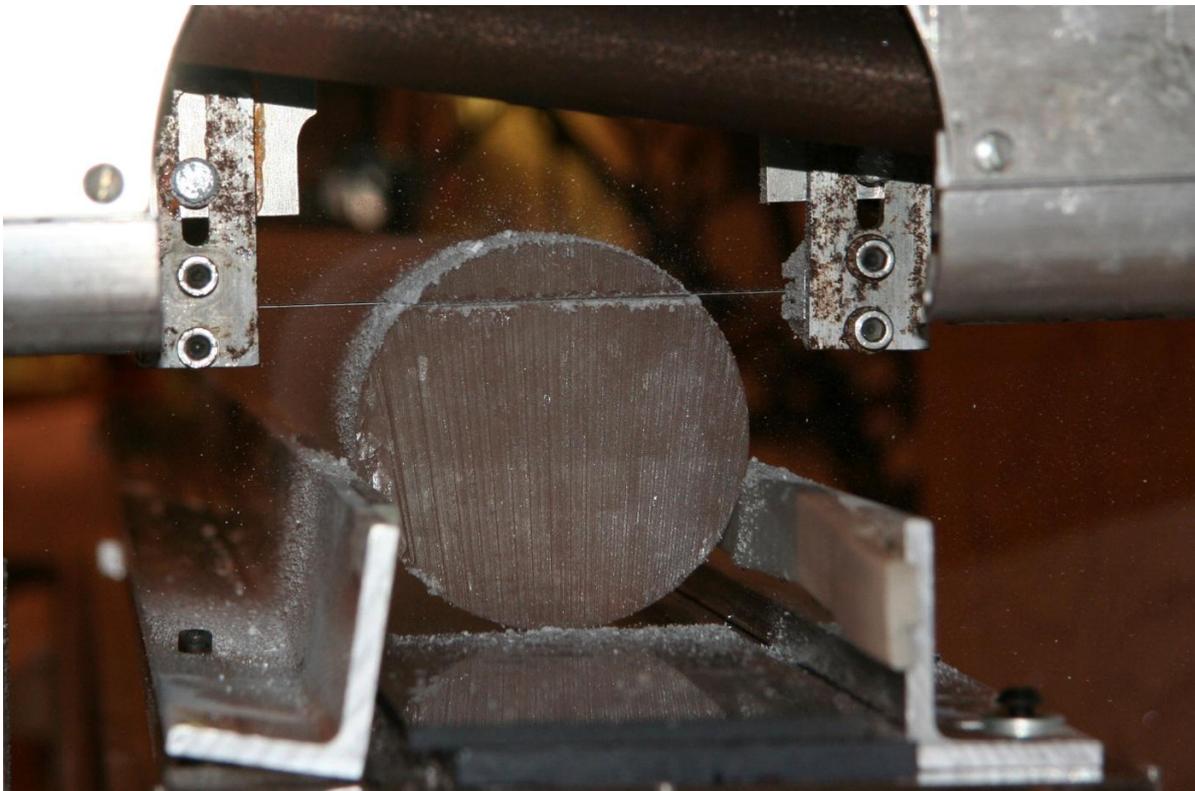
**Abb. 12** Probennahme in einer Schneegrube an der Oberfläche des Eisschildes.  
(Foto: Catherine Ritz; NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk>.)

## 5.2 Sauerstoffisotopenkonzentrationen und Feinoszillationen

Die massenspektrometrische Messung von  $^{18}\text{O}$ - und  $^{16}\text{O}$ -Konzentrationen an geschmolzenen Eisproben und die Ermittlung des  $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisses dient in erster Linie der Rekonstruktion

<sup>19</sup> Für eine Tiefe von 1622 m: „Von der vorläufigen NGRIP-Modellzeitskala wird eine mittlere Jahresschichtdicke von etwa 2 cm erwartet.“ (RASMUSSEN et al. 2005); vgl. auch <http://www.gisp2.sr.unh.edu/poster/2f.html> (Abfrage 10. 04. 2013).

der Temperatur des Schnees zum Zeitpunkt des Niederschlages auf die Oberfläche der Eisdecke (JOHNSON et al. 1972). Es wird eine strenge  $\delta^{18}\text{O}$ /Temperatur-Beziehung angenommen. Sie fußt auf aktuellen Beobachtungen der Isotopenfraktionierung des atmosphärischen Wasserkreislaufs (Meer  $\rightarrow$  Eisschild), insbesondere einer Verschiebung der Häufigkeit der Isotopen mit der Entfernung zum Meer und der Höhe über dem Meeresspiegel, sodass lokalspezifische Charakteristika ausgebildet sind. Monatliche Messungen der letzten Jahrzehnte an grönländischen Wetterstationen belegen eine jährliche  $\delta^{18}\text{O}$ -Periodizität (Feinoszillation) mit einem Maximum im Sommer und einem Minimum im Winter. Direkte Vergleiche von  $\delta^{18}\text{O}$ -Werten zur Temperatur weiter in die Vergangenheit sind aber nicht möglich (WHITE et al. 1997). Und erst kürzlich wurde festgestellt, dass keine Beziehung zwischen  $\delta^{18}\text{O}$ -Werten und Akkumulationsraten besteht (BUCHARD et al. 2012).



**Abb. 13** Eiskern-Anschnitt zur Beprobung.

(Foto: Marie Kjaergaard, 2010; NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk>.)

Kontinuierliche  $\delta^{18}\text{O}$ -Profile (mit  $\geq 8$  Proben pro modellkalkuliertem „Jahr“) sind nur für die obersten hunderte Meter publiziert (z.B. Milcent-Eiskern, 398 m Tiefe, bis 1197 n. Chr., HAMMER et al. 1978; Lokalität Abb. 2). Für diesen Bereich scheint dem Werte- und Kurvenverlauf folgend eine jährliche Periodizität vorzuliegen; die Alter sind aber nicht durch unabhängige, zeitlich bekannte Ereignisse bestätigt (s. u.). Für anschließende, tiefere Bereiche, insbesondere bis zur Pleistozän/Holozän-Grenze, sind keine kontinuierlichen  $\delta^{18}\text{O}$ -Profile in entsprechender Auflösung veröffentlicht. Es überlagern sich zahlreiche Einflüsse, die eine Datengewinnung und Interpretation erschweren oder unmöglich machen: Aufbereitungstechnisch problematische Zone des spröden Eises; Diffusion, dadurch Nachlassen bis Ersterben der  $\delta^{18}\text{O}$ -Feinoszillation (bzw. Missinterpretation der  $\delta^{18}\text{O}$ -Oszillation, ggf. entsprechen die

gröberen Periodizitäten echten Jahren); nicht nachgewiesene Annahme einer gleichbleibenden jährlichen durchschnittlichen Akkumulationsrate (Eisflussmodelle); keine Kenntnisse über unterjährige Oszillationen; keine Kenntnisse über die Isotopenfraktionierung in der Vergangenheit; Mindestakkumulationsrate von 0,25m/Jahr. Für diese Tiefenbereiche ist von den Eiskern-Bearbeitern kein Nachweis dafür erbracht worden, dass die  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte bzw. -Oszillationen kontinuierlich eine jahreszeitliche Periodizität nachzeichnen und damit Jahres-schichten abgezählt werden könnten.

## 6 Physikochemische Signale – Eichung und Interpretation

Sowohl der Aufwand als auch die Anzahl physikalischer und chemischer Reihenuntersuchungen entlang der Eiskerne hat mit jeder neuen Tiefbohrung zugenommen. Hauptzweck ist die Identifizierung und Ausgliederung von Jahresschichten. Die kombinierte Anwendung mehrerer Verfahren (und ihre Interpretation) wird als Multiparameter-Jahresschichtenzählung (multiparameter annual layer counting) bezeichnet.



**Abb. 14** Untertage-Werkbank (science trench).  
Arbeitsteilung zur NEEM-Eiskernbearbeitung.  
(Foto: Sepp Kipfstuhl; NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk>.)

Die am häufigsten eingesetzten Messungen bzw. Verfahren sind:

- Messung der Sauerstoffisotopenkonzentrationen ( $\delta^{18}\text{O}$ , s. o.) und Deuteriumkonzentrationen ( $\delta\text{D}$ );
- Messung der elektrischen Leitfähigkeit (Electrical Conductivity Measurement, ECM) direkt am Eiskern und Bestimmung des Säuregehaltes (Azidität);

- Messungen von Spurenstoffen, u.a.  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ , und  $\text{SO}_4^{2-}$  sowie der elektrolitischen Leitfähigkeit des Schmelzwassers, mit CFA-Systemen (Continuous Flow Analysis);
- Messung der Lichtintensität zur Identifizierung von Fremdbestandteilen, insbesondere Staub: LASER-gestützte optoelektronische Visual-Stratigraphie (Visual Stratigraphy, VS);
- Messung von Staubkonzentrationen (Laser Light Scattering, LLS).

Für die Interpretation der erhobenen Daten bedarf es weiterer Informationen; die Daten können nicht für sich selbst sprechen. Das Aziditätsprofil kann sich nicht selbst erklären; es muss zuvor jahrgenau geeicht werden (HAMMER et al. 1980). Für CFA bedarf es der Vorinformation der zu erwartenden Dicken der Jahreslage im entsprechenden Profilabschnitt (RASMUSSEN et al. 2005). Das VS-Profil des NGRIP-Kerns ist an einer bereits bestehenden Chronologie geeicht worden. Wäre dies nicht der Fall gewesen, hätten die Autoren nach eigener Einschätzung von einer (neuen) absoluten Datierungsmethode berichten können (SVENSSON et al. 2005): „Weil unsere Methode geeicht ist, beanspruchen wir nicht, dass unsere Resultate eine absolute Datierung des NGRIP-Eiskerns liefern.“ Für die LLS-Methode liegt ein besonders aussagekräftiges Beispiel einer zielgerichteten Anpassung von 25.000 „Jahresschichten“ bzw. „Jahren“ vor (MEESE et al. 1994, 1997).



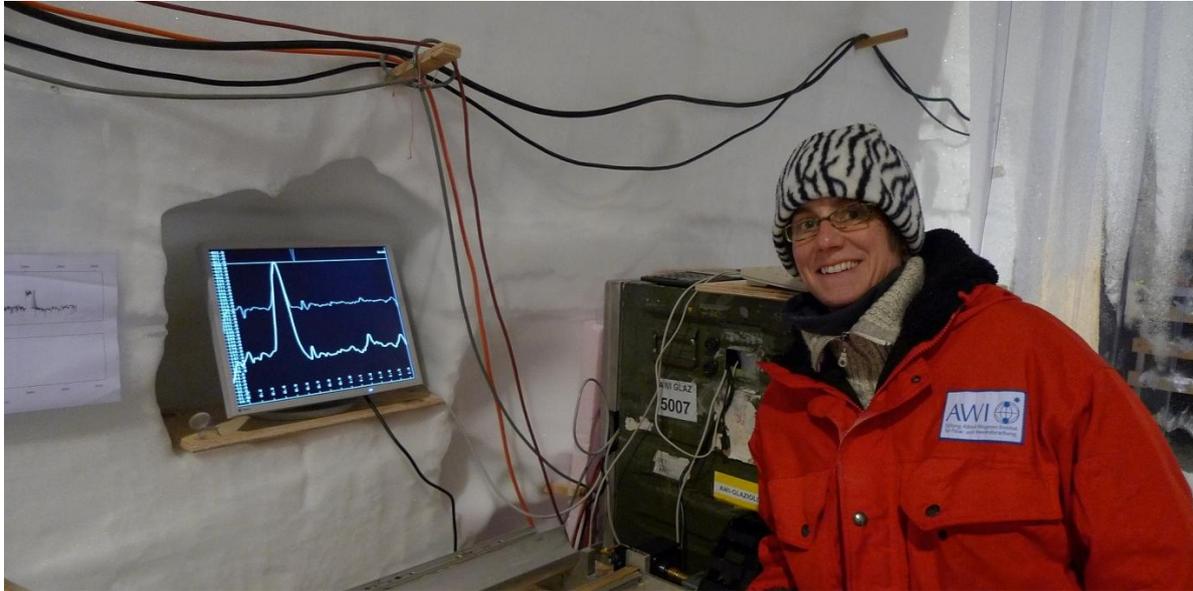
**Abb. 15** Messung der elektrischen Leitfähigkeit (ECM) direkt am Eiskern.  
(Foto: Sepp Kipfstuhl, 2010; NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk.>)

## 6.1 Messung der elektrischen Leitfähigkeit, ECM

### *Beschreibung und Relevanz*

Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit (Electrical Conductivity Measurement, ECM) dient primär der mittelbaren Bestimmung des Säuregehalts (Azidität). Sie erfolgt entweder (in einer Auflösung bis zu 1 mm) über zwei Elektroden direkt am Eiskern (Abb. 15) oder über pH-

Messungen an geschmolzenen Proben. Über den erstgenannten Weg können ECM-Profile mit extrem hoher Auflösung entlang des gesamten Eiskernes erstellt werden. Hohe Ausschläge (Aziditätsspitzen) werden als Säureniederschläge von Vulkaneruptionen gedeutet (Abb. 16). Seit der Einführung von HAMMER (1980) wird ECM grundsätzlich an allen Eiskernen vorgenommen.



**Abb. 16** Messung der elektrischen Leitfähigkeit (ECM) und grafische Datenpräsentation. Der ECM-Ausschlag wird als vulkanisches Signal (volcanic spike) gedeutet, einem Säure-Niederschlag (acid-fall) einer explosiven Vulkaneruption.  
(Foto: Sepp Kipfstuhl, 2010; NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk.>)

### **Interpretation und Diskussion**

Das Aziditätsprofil muss zuvor jahrgenau geeicht werden.<sup>20</sup> An den Aufzeichnungen zum Crête-Eiskern (Lokalität Abb. 2) kann dies an zwei ausgewiesenen Segmenten nachvollzogen werden (HAMMER et al. 1980, Fig. 2a und 2b). Für die Kalenderjahre 1814-1819 (*sechs* Jahre) sind unregelmäßig *neun* Aziditätsmaxima (1816-Spitze wird dem Tambora-Ausbruch 1815 zugewiesen) ausgebildet. Das entsprechende Aziditätsprofil zu dem  $\delta^{18}\text{O}$ -Profil für die Kalenderjahre 1600-1608 zeigt für die Jahre 1600 und 1603-1606 keine deutliche, eher schon eine gegenläufige Periodizität und für 1601/02 extreme Ausschläge, die als vulkanische Säureniederschläge gedeutet werden. Die Eichung erfolgte jeweils am  $\delta^{18}\text{O}$ -Profil (zur Verifizierung siehe Kap. 7.4).

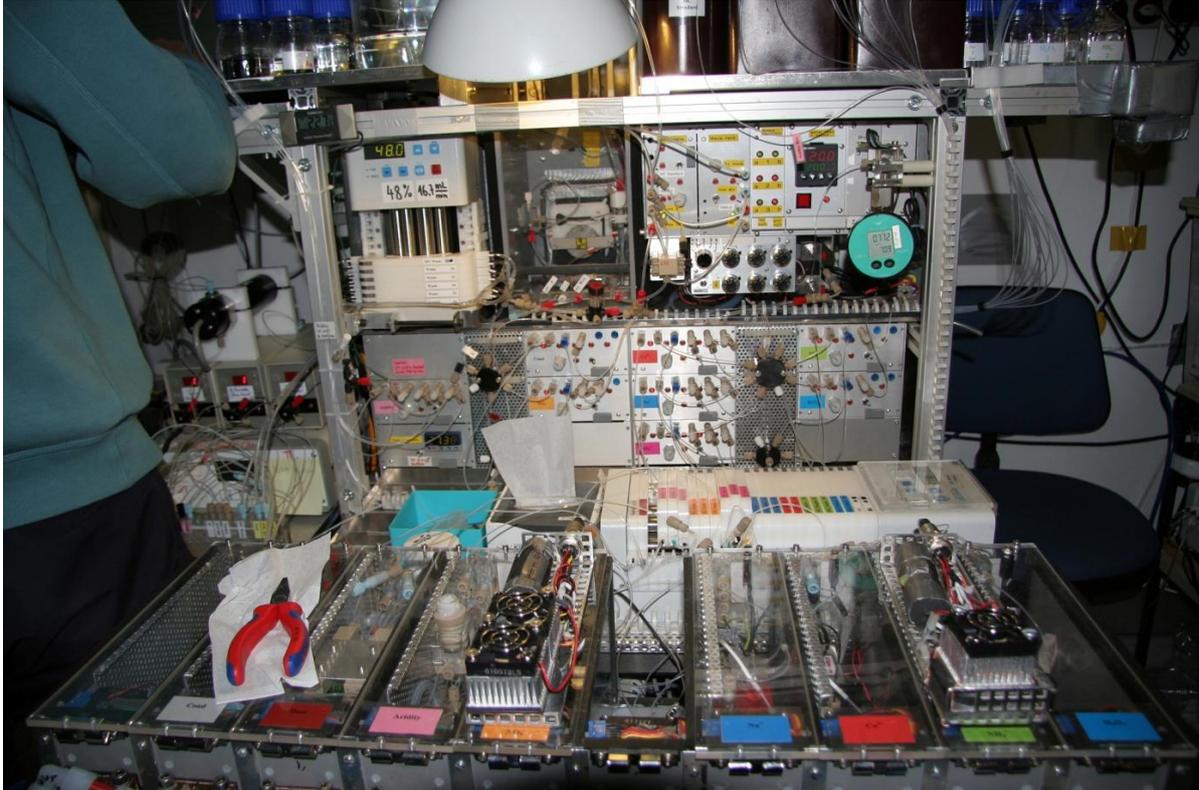
## **6.2 Messung von Spurenstoffkonzentrationen mit CFA-Systemen**

### **Beschreibung und Relevanz**

Die physikochemische Eiskernanalyse mit CFA-Systemen (Abb. 17 bis Abb. 19) erlaubt eine kontinuierliche Verarbeitung und sofortige Messung von (geschmolzenen) Eiskerneinheitenproben mit der Fluoreszenz- und Absorptionsspektroskopie. Neben anderen Parametern

<sup>20</sup> „Acidity profiles along well dated Greenland ice core reveal (...)“ (HAMMER et al. 1980)

werden Konzentrationen (häufig im ppb-Bereich) von  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  und Staub sowie die elektrolytische Leitfähigkeit des Schmelzwassers gemessen (BIGLER 2004, RASMUSSEN et al. 2005). Für die Identifikation der „Jahreslagen“ des NGRIP-Eiskerns wurden primär die CFA-Daten genutzt (RASMUSSEN et al. 2006).<sup>21</sup>



**Abb. 17** Eiskernschmelzwasser-Reihenmessungen von Spurenstoffen. Ermittelt werden Konzentrationen u. a. von  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  und Staub sowie die elektrolytische Leitfähigkeit mit CFA-Systemen (Continuous Flow Analysis). (Foto: Marie Kjaergaard, 2010; NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk.>)

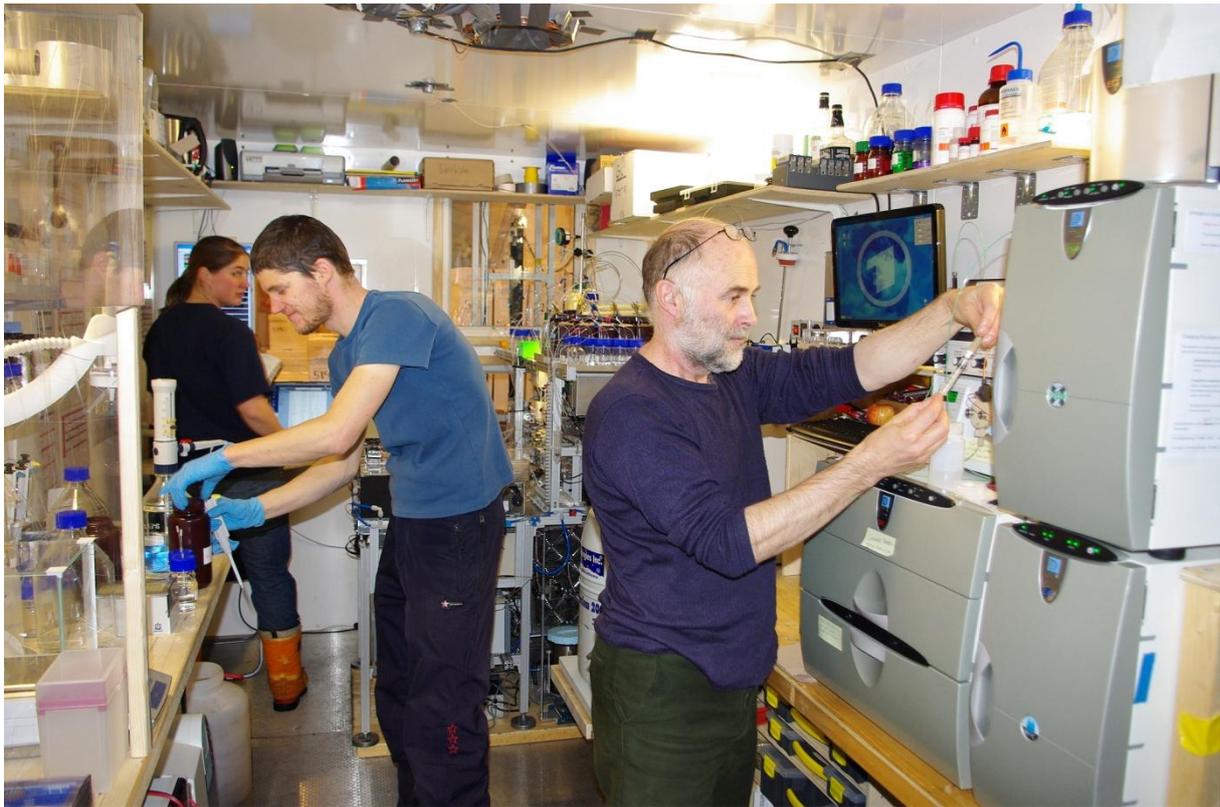
### **Interpretation und Diskussion**

Für die Interpretation der Signale (Ausschläge) bedarf es der Vorinformation der zu erwartenden Dicken der „Jahresschicht“ im entsprechenden Profilabschnitt (vgl. Fußnote 19).

Hinsichtlich einer Gültigkeit der Interpretation chemischer Signale als Ausdruck saisonaler Schwankungen wird insbesondere auf die Arbeit von ANKLIN et al. (1998) verwiesen<sup>22</sup>. Doch weder konnten die Datierungsergebnisse von ANKLIN et al. bestätigt noch können Auftreten und Häufigkeit einzelner physikochemischer Parameter, die einzeln betrachtet keine kontinuierlichen Periodizitäten aufwiesen, einfach auf die Vergangenheit übertragen werden.

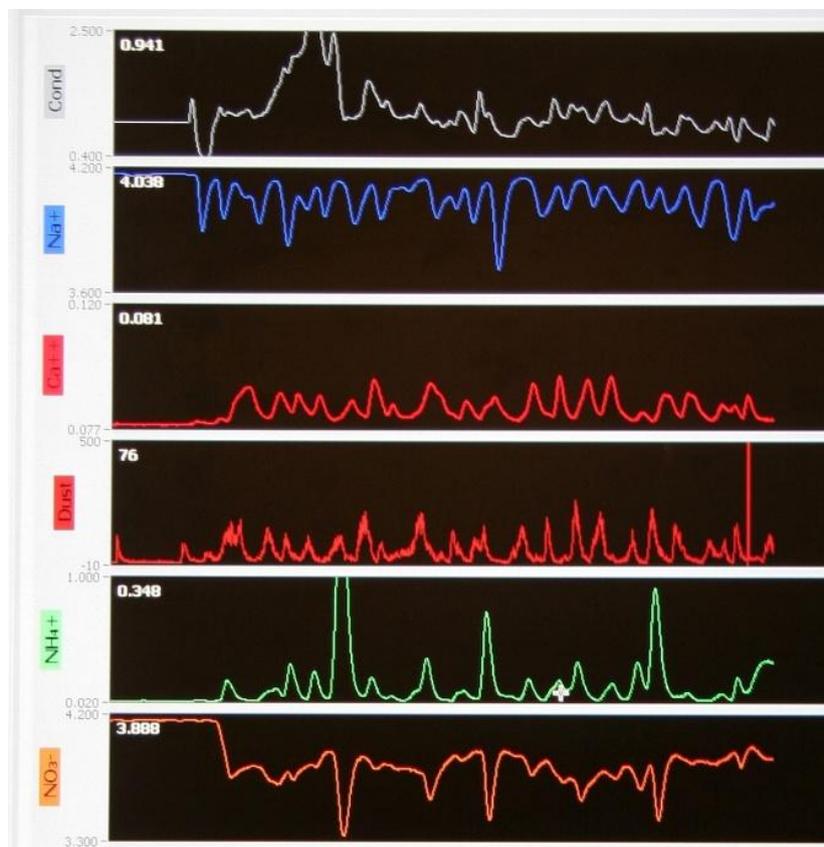
<sup>21</sup> „For NGRIP, Continuous Flow Analysis (CFA) data of soluble ions were used for identification of annual layers.“ (RASMUSSEN et al. 2006)

<sup>22</sup> RASMUSSEN et al. 2006: „Greenland ice cores can be dated by annual layer counting when the accumulation rate is sufficient to resolve annual layers, and the timescales of different ice cores can be matched and validated using volcanic layers and other independently dated stratigraphic markers [Clausen et al., 1997; Anklin et al., 1998].“



**Abb. 18** CFA-Labor.

(Foto: NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk.>)



**Abb. 19** Datenpräsentation ausgewählter CFA-Messungen.

(Foto: Marie Kjaergaard, 2010; NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk.>)

### **Zu Anklin et al. (1998)**

In dieser Arbeit wurden die Ergebnisse von Oberflächenuntersuchungen und zwei 150 m tiefen in 1995 niedergebrachten Bohrungen an der Lokalität NASA-U [Mittelgrönland, Abk. U] und Humboldt [Nordgrönland, Abk. H] präsentiert. Zweck der Untersuchung war, die Bestimmung und Verteilung von jährlichen Schneeakkumulationsraten und damit Daten für das von der NASA 1991 aufgesetzte Programm zur Laserhöhenmessung des Grönländischen Eisschildes Daten zu generieren (im Rahmen des Sub-Programms PARCA, Program for Arctic Regional Climate Assessment).

Es wurden sechs verschiedene physikalische und chemische Spurenstoffe entlang der 150-Meter-Kerne untersucht; Auflösung (Beprobungsabstand) in Klammern: Staub (U: 40 mm; H: 30 mm),  $\delta^{18}\text{O}$  (U: 40 mm),  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{NO}_3^-$ . Hinsichtlich der Saisonalität verwiesen ANKLIN et al. auf andere Untersuchungen:

- Staubpartikel und  $\text{Ca}^{2+}$ , Eintrag vorwiegend von Lockerböden im Frühjahr (WITHLOW et al. 1992)<sup>23, 24</sup>
- $\delta^{18}\text{O}$ , Kondensationstemperatur des Niederschlags, angezeigt durch das Sauerstoffisotopenverhältnis mit einem Sommer-Maximum im Juni und Juli (DANSGAARD et al. 1973);
- $\text{H}_2\text{O}_2$ , entsteht in der Atmosphäre unter UV-B-Strahlung des Wasserdampfes, mit einem Maximum im Spätsommer, Juli und August (LOGAN et al. 1981, SIGG 1990);
- $\text{NH}_4^+$ , Hintergrund-Konzentrationen mit in der Regel 2-3 Spitzen pro Jahr, überprägt/verstärkt durch biologische Aktivität und Biomassenverbrennung (DIBB et al. 1996), ereignisbasiert mit einer Spitze im Spätfrühjahr (FUHRER et al. 1996);
- $\text{NO}_3^-$  aus der Land- und Meeresbiosphäre, überprägt durch anthropogene Einflüsse

Doch bereits in der Aufbereitung der Daten zeigte sich, dass jeder Parameter, abgetragen an der Eissäule, für sich genommen unterschiedliche Signalmuster aufwies. Final verließen sich die Autoren auf das  $\text{Ca}^{2+}$ -Profil.

Bezugnehmend auf die Datierung der 150-Meter-Kerne (U: 350 [Eiskern-]Jahre, H: 852 [Eiskern-]Jahre) ist festzuhalten, dass die Herleitung und Interpretation des Alters weder schlüssig ist noch die Datierung verifiziert worden war. Sie berichteten:

- Die visuelle Stratigraphie lieferte keine brauchbaren „Jahresindikatoren“ und konnte somit nicht zur Datierung herangezogen werden<sup>25</sup>. [Anmerkung: eine Anwendung bis 150 m wäre noch zu erwarten gewesen (siehe Kap. 5.1).]
- Die Einzelauswertung der Parameter zur Definierung (Ermittlung) der „Jahresschichten“ ergab unterschiedliche Werte (bis zu 50%) für die Abschätzung der Akkumulati-

<sup>23</sup> „Aerosol composition and concentration in the air over Greenland is impacted by the close proximity of North America and Eurasia Events such as dust storms, forest fires and air polluted by human activities may be reflected in snow chemistry by high concentrations of nss Ca, of  $\text{NH}_4$ , K and/or  $\text{NO}_3$  (Spencer, pers comm), (...)“ (WITHLOW et al. 1992, 2049)

<sup>24</sup> „It is proposed that during the spring period of enhanced vertical mixing when the polar vortex breaks up, the winter arctic aerosol (corresponding to the time of its maximum dust concentration) would be the dominant aerosol over Summit (Heldam, 1984, 1985, Hogan et al, 1984).“ (WITHLOW et al. 1992, 2051)

<sup>25</sup> „(...) but unfortunately this did not provide as accurate an annual indicator as did the other parameters.“

onsrate für jedes einzelne „Jahr“. Durch Bildung von Mehrjahres-Durchschnitten wurde die Bandbreite sukzessive bis 0% (25-Jahresdurchschnitt) reduziert. [Anmerkung: Diese Vorgehensweise hat mit der Identifizierung einzelner „Jahresschichten“ und der Abzählung dieser konkreten „Jahresschichten“ als absolute Datierungsmethode nichts gemein.]

- Die ermittelte durchschnittliche Akkumulationsrate (Rückrechnung aufgrund der Datierungsergebnisse) war jeweils signifikant geringer zu den Werten der Akkumulationskarte von OHMURA & REEH (1991, interpoliert, jeweils Zweitwert); U: 0,34 zu 0,50; H: 0,14 zu 0,20 m Wasseräquivalent.
- Die „Jahresschichtenzählung“ wurde über ein H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Tief verifiziert, welches die Laki-Eruption (1783-84) markierte und sich durch einen prominenten Sulfatausschlag bestätigte („confirmed“)<sup>26</sup>. [Anmerkung: Die Zuweisung von Säureniederschlägen zu Vulkan- ausbrüchen ist aber nicht bestätigt (vgl. Kap. 7.4).]
- Obwohl eine Datierung der Eiskerne nur durch Anwendung mehrerer Parameter möglich war - jeder Parameter einzeln betrachtet zeigte nur ein schwaches Signal<sup>27</sup> – wurde in der Regel die Ca<sup>2+</sup>-„Frühjahrs“spitze zur finalen Bestimmung des jährlichen Zählers benutzt. So werden auch die korrigierten Akkumulationsraten anhand des Ca<sup>2+</sup>-Profils abgetragen (Figure 5). Schlussendlich verließen sich die Autoren auf das Ca<sup>2+</sup>-Profil. [Anmerkung: Ob es sich hierbei um annuelle Zyklen handelt, bleibt aufgrund der nicht verifizierten Datierung offen.]

### 6.3 Messung von Staubkonzentrationen, LLS

#### **Beschreibung und Relevanz**

Das sogenannte Laser Light Scattering-Verfahren (LLS) zur Ermittlung der Staubkonzentration wird entweder am Eiskernschmelzwasser (RAM & ILLING 1994) oder direkt am (nur gasblasenfreien) Eiskern (RAM et al. 1995) vollzogen. Im zweiten Fall wird die Intensität der Lichtstreuung ermittelt, die ein in einem 90°-Winkel in den Eiskern einfallendes Laserlicht erzeugt. RAM & KÖNIG (1997) erstellten für den GISP2-Eiskern das Staubpartikel-Profil für das Prä-Holozän (Tiefe > 1678 m).

#### **Interpretation und Diskussion**

Methodisch interpretierten RAM & KÖNIG jeden gemessenen Ausschlag als ein jährliches Staubpartikel-Maximum und damit als ein Kalenderjahr. *„Bei der Datierung mit LLS zählten wir jeden Hochpunkt, den wir im Staub-Profil beobachteten, als korrespondierend zu einem*

<sup>26</sup> Beschriftung zu Figure 3 von ANKLIN et al. (1998): „10 m section of NASA-U core showing depression in H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, marking the 1783-84 Laki event, which is confirmed by the SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> concentration peak.“

<sup>27</sup> „The accurate, high-resolution dating of the two cores reported here was only possible by using multiple parameters, since a particular species might show a weak signal in any given year.“

*jährlichen Staub-Maximum.*<sup>28</sup> Der Nachweis, dass es sich um einen saisonalen, jahreszeitlichen Rhythmus handele, war nach ihren Aussagen durch HAMILTON & LANGWAY (1967) erbacht worden.<sup>29</sup> HAMILTON & LANGWAY hatten in knapp 300 m Tiefe des Eiskerns der Lokalität „Site 2“ (grönländische Zentralbereich) über einen kontinuierlichen Abschnitt von 1,29 m lediglich 4 Zyklen untersucht. In diesem Bereich, den sie mit 700 [Eiskern-]Jahren datierten, reklamierten sie einen synchronen Verlauf zwischen Staubpartikel-Maxima und Sauerstoffisotopen-Minima; das Staubpartikelkonzentrationsmaximum trat jeweils im Spätwinter (Februar/März) auf. Aber selbst für diesen kleinen Abschnitt ist eine Synchronisation mehr als fraglich: Die 4-„Jahres“-grafik zeigt (vgl. HAMILTON & LANGWAY, Figure 1, von oben nach unten, Winter zu Winter), dass die Staubpartikelkonzentrationsausschläge in Zyklus 1 (ca. 35 ppb<sup>30</sup>) und Zyklus 4 (ca. 50 ppb) kleiner bzw. etwa gleich groß sind im Vergleich mit zwei unterjährigen Spitzen im Zyklus 3 (ca. 50 und 40 ppb); der Maximalausschlag in Zyklus 2 beträgt 90 ppb (jeweils Volumenkonzentration). Daneben liegen weitere, kleinere unterjährige Spitzen vor. Eine Übertragung dieser unsicheren Ergebnisse eines 4-„Jahres“-Bereiches zum Zeitpunkt vor 700 [Eiskern-]Jahren auf das Weichsel-Glazial mit darüber hinaus signifikant anderen Verhältnissen ist mehr als fragwürdig. Dies zeigt auch im Folgenden die zielgerichtete Interpretation der „jährlichen“ Staubmaxima im GISP2-Eiskern.

### **Zielgerichtete Interpretation**

Auf Basis ihrer „Jahresschichtenzählung“ datierten MEESE et al. (1994)<sup>31</sup> den GISP2-Eiskern bis in eine Tiefe von 2800 m auf 85.000 [Eiskern-]Jahre. SOWERS et al. (1993) allerdings erhielten für das Alter des Eises in 2800 m Tiefe 110.000 Jahre (radiometrisch geeicht) durch Einphasung (Einpassung) der  $\delta^{18}\text{O}$ -GISP2-Daten in die marine SPECMAP-Zeitskala\*. Die offensichtliche Diskrepanz führte durch MEESE und Gow zu einer Nachprüfung des Abschnittes zwischen 2300 m und 2800 m und einer Nachmessung mit einer höheren LLS-Auflösung (1 mm anstelle 8 mm); sie wiesen sodann (passend) zusätzliche 25.000 „Jahre“ aus (MEESE et al. 1997).<sup>32</sup>

RAM & KÖNIG (1997, 26647) konnten sogar noch nachlegen: Für die tiefsten rund 200 GISP2-Eiskernmeter interpretieren sie die Staubpartikel-Signale je nach Auflösung der Apparatur (1 mm vs. 0,5 mm) als 66.000 „Jahresschichten“ oder über 120.000 „Jahresschichten“.

<sup>28</sup> „In dating using LLS, we counted every peak we observed in our dust profile as corresponding to an annual dust maximum.“ RAM & KÖNIG (1997)

<sup>29</sup> „Hamilton & Langway (1967) demonstrated that the dust concentration in the core varied seasonally.“

<sup>30</sup> ppb: parts per billion; 1 Teil pro Milliarde.

<sup>31</sup> Ungerundeten Werte gemäß Bericht: „83736 yr BP - 2800 m (...) 85055 yr BP - 2810 m“. (MEESE et al. 1994, 66)

<sup>32</sup> „(...) below 2500 m the number of LLS layers was consistently higher than the number identified by visible stratigraphy, based on the peaking characteristics of the LLS record.“ Und: „This average was then compared to the Sowers-Bender correlated timescale and showed a maximum difference of 1.1% with an age of approximately 111,000 years B.P.“ (MEESE et al. 1997, 26419).

### **Fazit**

Es zeigt sich zweierlei: Die gewünschte Anzahl von Signalen (Ausschlägen) kann über die Auflösung (bzw. Kontrasteinstellung bzw. -verstärkung) der Apparatur eingestellt werden. Erst durch eine zeitliche Rahmenvorgabe, eine zeitliche (hier: radiometrisch begründete) Eichung, wird die Apparatur passgenau eingestellt; sodann werden die Signale mit „Jahreschichten/Jahren“ assoziiert bzw. als solche interpretiert.

## **6.4 Optoelektronische Visual-Stratigraphie, VS**

### **Beschreibung und Relevanz**

Mit NGRIP wurde die optoelektronische Visual-Stratigraphie eingeführt (SVENSSON et al. 2005), einem Abscannen (line scan) des facettierten Eiskerns mit einem Lichteinfallswinkel von 45° (Abb. 20). Dabei werden einerseits digitale Photographien erstellt (Abb. 22) und andererseits Lichtintensitäten entlang des Eiskernes gemessen, die zu einem VS- oder line scan-Profil zusammengesetzt werden (Abb. 21). Mit der VS-Methode wurde das NGRIP-Profil in der Tiefe von 1130 m bis 3085 m (Basis) aufgenommen. Insbesondere im Weichsel-Glazial treten Zehntausende erkennbare helle, horizontale Lagen auf.

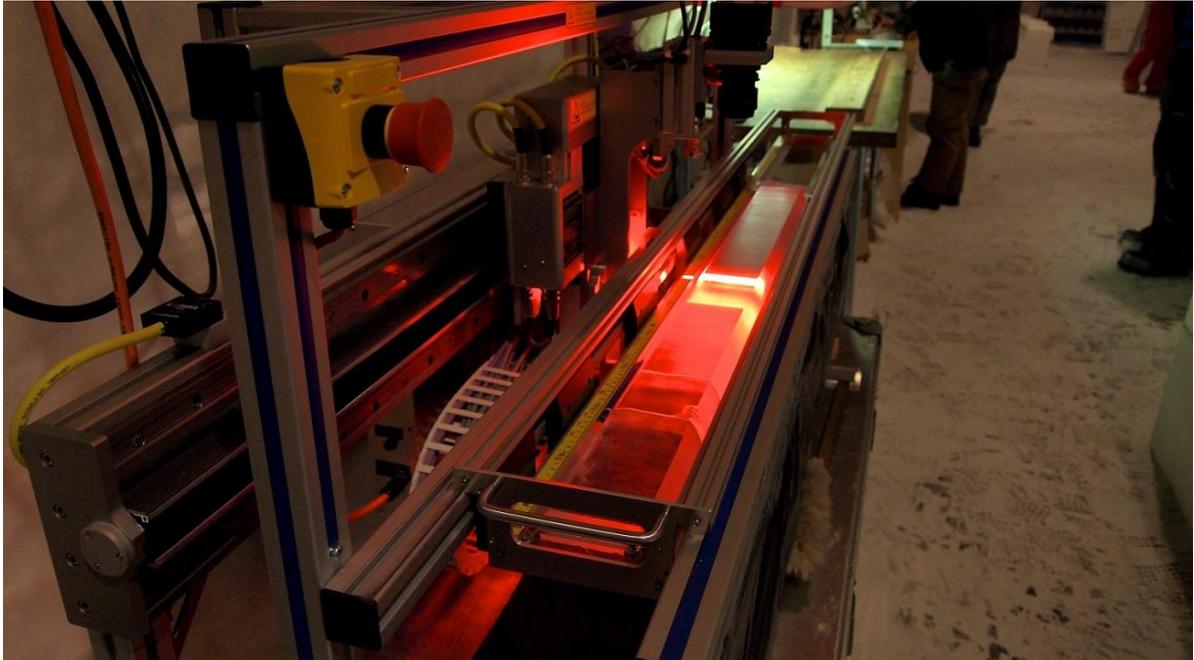
### **Interpretation und Diskussion**

Das VS-Profil wird dahingehend interpretiert, dass es für die untersuchten NGRIP-Segmente (insbesondere das Glazial) die Sedimentationsgeschichte repräsentiert, d.h. dass jede wolke oder klare Lage im Eis ein Sedimentationsereignis (entweder Schneeniederschlag oder windverwehte Schneeakkumulation) abbildet. Die wolkeigen Bänder werden durch Fremdbestandanteile (Staub, Ca<sup>2+</sup>) verursacht. Die Lichtintensität jeder Lage steht zu den Fremdbestandanteilen der jeweiligen Lage im Verhältnis.

Schlussendlich mussten sich auch SVENSSON et al. (2005) der Grundfrage stellen: „*Eine wichtige Frage in diesem Kontext ist, wie gut das glaziale VS-Profil wirklich ein jährliches Signal liefert (...)*“<sup>33</sup> Sie führten weiter aus, dass die große Variabilität in der Intensität der erkennbaren Lagen eine Identifizierung und Zählung von „Jahreslagen“ alleine auf Basis des VS-Profiles erwiesenermaßen schwierig mache. Denn, abhängig von der Kontrasteinstellung bzw. -verstärkung der Bilder und der gewählten Selektionskriterien zur Identifizierung von Lagen („Jahreslagen“), könne für einen gewählten Eiskernabschnitt eine weite Bandbreite von Lagen ausgeschieden werden, d. h., wenn der Kontrast eines Bildes erhöht werde, ist zu beobachten, dass tendenziell mehr und mehr Lagen erscheinen. Um jedoch Ergebnisse präsentieren zu können, hatten die Autoren ihre Methode an der ss09sea-Zeitskala (JOHNSON et al. 2001, auch GRIP2001 genannt) geeicht und folgerichtig klargestellt, dass ihre Methode keine absolute Datierung des NGRIP-Eiskerns darstelle.

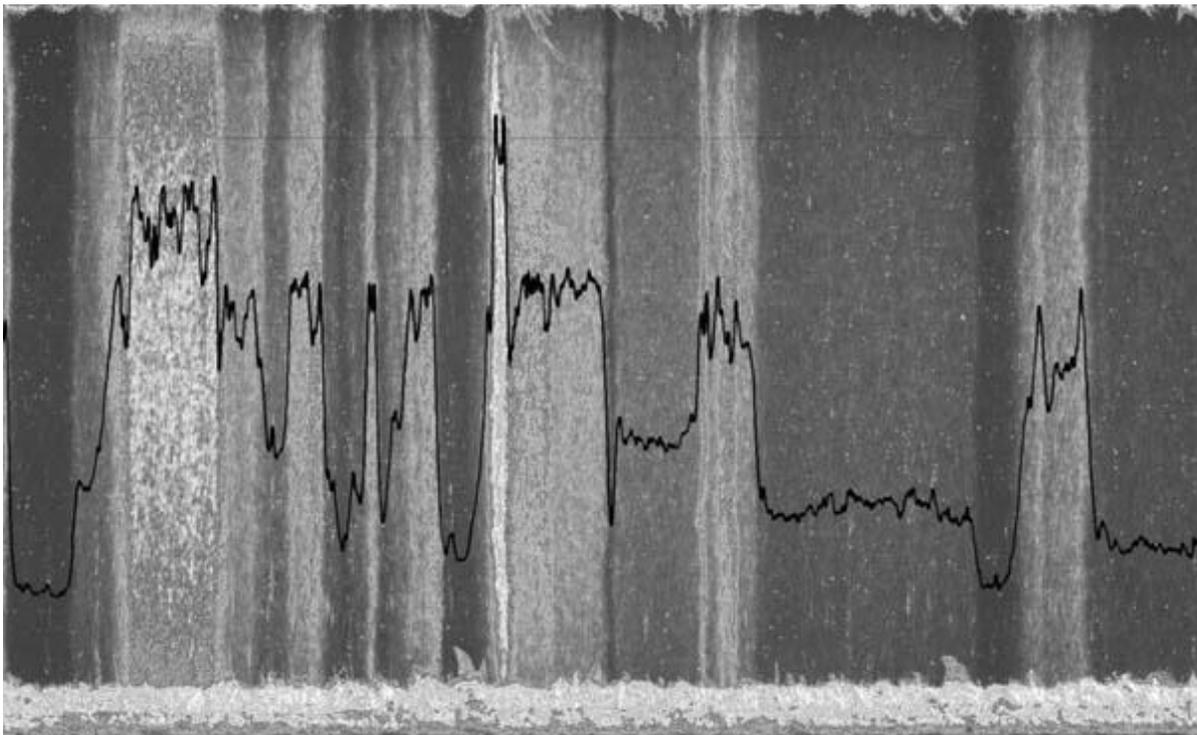
---

<sup>33</sup> „*An important question in this context is how well the glacial VS profile actually provides an annual signal (...)*“ (SVENSSON et al. 2005)



**Abb. 20** Optischer Scanner.

Eine Kamera scannt den facettierten Eiskern. Die Apparatur ist so eingerichtet, dass nur gestreutes Licht von der Kamera registriert wird. (Foto: Kenji Kawamura; NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk>.)



**Abb. 21** Messung der Lichtintensität mit dem Line-Scanner.

Die VS-Kurve ist auf den entsprechenden Messbereich gelegt; je lichtintensiver (Graustufen) desto höher der Ausschlag. NGRIP, ca. 1800 m Tiefe, 20.000 [Eiskern-]Jahre. (Foto: Søren Wedel Nielsen, Department of Geophysics, Niels Bohr Institute, University of Copenhagen; [www.glaciology.gfy.ku.dk/ngrip/](http://www.glaciology.gfy.ku.dk/ngrip/))

## 7 Eiskernchronologie

Die mit „Jahresschichtenzählung“ konstruierte Eiskernchronologie GICC05 (Greenland Ice Core Chronology 2005) umfasste zunächst einen Skalenbereich bis 42.000 [Eiskern-]Jahre (VINTHER et al. 2006, RASMUSSEN et al. 2006, ANDERSEN et al. 2006, SVENSSON et al. 2006) und ist sodann auf einen Skalenbereich bis 60.000 [Eiskern-]Jahre ausgeweitet worden (SVENSSON et al. 2008). Für den holozänen Teil erstellten VINTHER et al. mit den DYE-3-, GRIP- und NGRIP-Eiskernen eine „synchronisierte stratigraphische Zeitskala“ auf Basis der Interpretation von  $\delta^{18}\text{O}$ -,  $\delta\text{D}$ - und CFA-Signalen, die über ECM-Profile abgeglichen („gematched“) wurden. Für den Grenzbereich (und das Ende des letzten Glazials) erfolgte dies durch RASMUSSEN et al. (2006) auf Basis der GRIP- und NGRIP-Eiskerne. Der anschließende Teil bis über das Z2-Eruptionseignis (vgl. Kap. 3.1) hinaus gründet sich ausschließlich auf die Deutung der CFA-Signale des NGRIP-Eiskerns (vgl. Kap. 6).

Die zugrunde liegende Methodologie zur Konstruktion der Eiskernchronologie GICC05 unterschied sich nicht von zuvor erstellten Chronologien. Den Konstrukteuren ist die Anzahl auszuweisender Einzel-„Jahre“ bekannt; sie ist durch die radiometrische Eichung der (zwei) Ereignispunkte im Wesentlichen vorbestimmt. Über eine entsprechende Auflösung hauptsächlich physikochemischer Signale sowie der kalkulierten Tiefen-Alters-Beziehung (Eisflussmodell) werden die notwendigen Skalen- bzw. „Jahres“einheiten durch die Eiskern-Bearbeiter fixiert und schließlich die zugehörige Zeitskala (Eiskernchronologie) konstruiert. Ohne den Nachweis erbracht zu haben, werden die Signale mit „Jahren“ und „Jahresschichten“ assoziiert bzw. als solche interpretiert. So werden beispielsweise für das Ereignis des Endes der Jüngerer Dryas (Pleistozän/Holozän-Grenze, Kap. 7.1) bei einer Vorgabe von 10.700 [radiometrischen] Jahren *absolut* 10.700 Einzel-„Jahre“ gezählt, bei einer Vorgabe von 11.700 [radiometrischen] Jahren am gleichen Eiskern *absolut* 11.700 Einzel-„Jahre“ gezählt (Kap. 7.3). Das zeigt, wie variabel die Signale interpretiert werden.

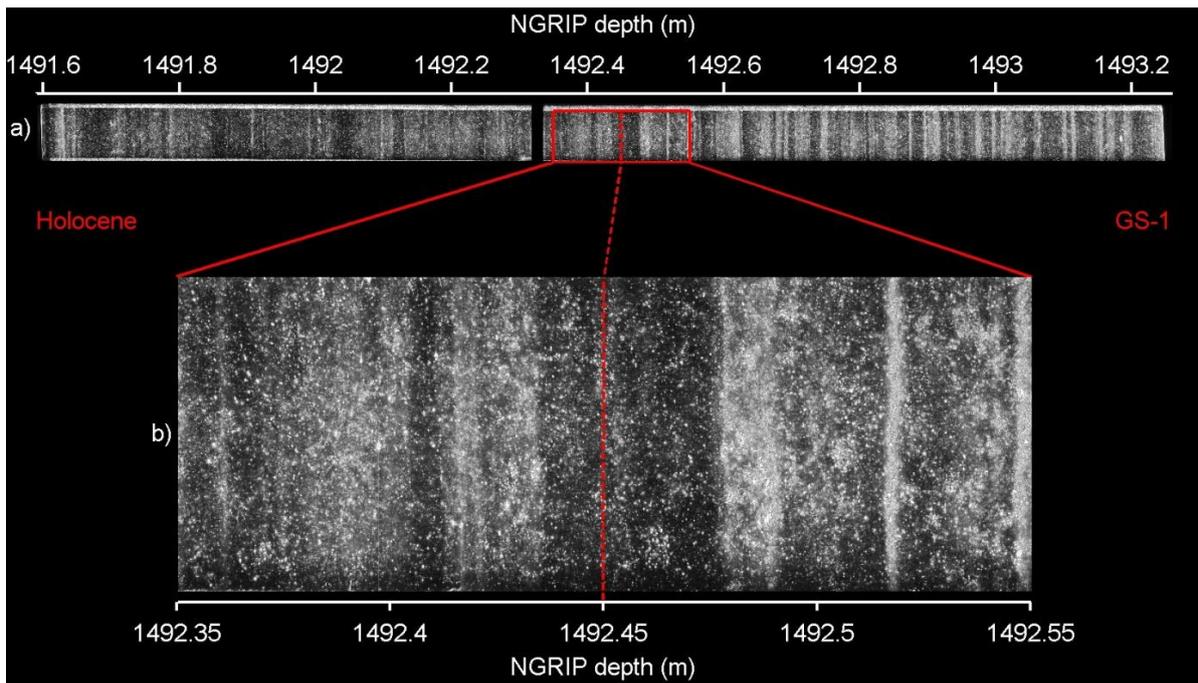
Eine weitere wichtige Feststellung ist, dass die Eiskernchronologie nicht durch eine unabhängige Altersbestätigung verifiziert ist (Kap. 7.4).

### 7.1 Pleistozän/Holozän-Grenze

Die formale Grenzziehung der Pleistozän/Holozän-Grenze erfolgte 2008 am NGRIP-Eiskern in einer Tiefe von 1492,45 m (WALKER et al. 2009). Sie markiert einen Bereich, der das klarste Signal einer klimatischen Erwärmung ( $\delta^{18}\text{O}$ -,  $\delta\text{D}$ -Anstieg) zeigt (Abb. 22).<sup>34</sup> Darüber hinaus liegen zwei weitere signifikante Merkmale beim Übergang vom Glazial zum Postglazial vor: Ein Sauerwerden des Eises sowie eine Beendigung staubreichen Eintrags (sehr hellen Lagen, jeweils in den rechten Bildteilen).

---

<sup>34</sup> „(...) at the horizon which shows the clearest signal of climatic warming, an event that marks the end of the last cold episode (Younger Dryas Stadial/Greenland Stadial 1) of the Pleistocene (...)“ (WALKER et al. 2009)



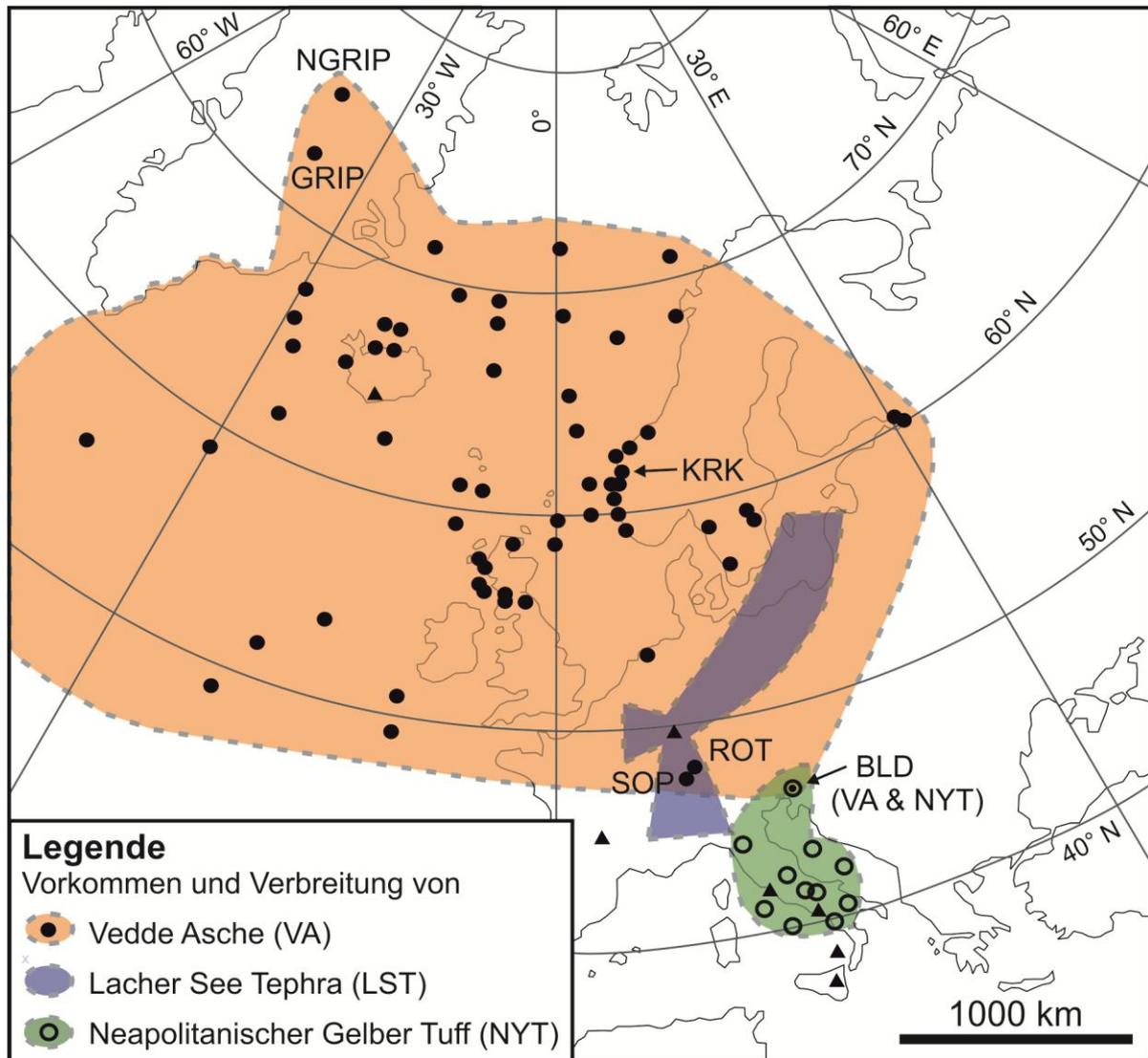
**Abb. 22** Pleistozän/Holozän-Grenze im NGRIP-Eiskern.

Fotografie des polierten NGRIP-Eiskerns zwischen 1491,6 und 1493,25 m Tiefe. Die gestrichelte Linie markiert die formale Pleistozän/Holozän-Grenze in einer Tiefe von 1492,45 m. Durch Anwendung des Visual Scanning-Verfahrens zeigt sich klares Eis dunkel, wolkiges Eis hell (durch Einschlüsse, z.B. Staubpartikel). GS-1 = Grönland Stadial 1, oberster Abschnitt des Pleistozäns (Eiskern), letztes Kaltereignis der Weichsel-Kaltzeit, entspricht etwa der Jüngerer Dryas. (Foto/Grafik: Centre for Ice and Climate, University of Copenhagen; freundliche Überlassung)

Die stratigraphische Absicherung erfolgte durch die Identifizierung der im Grenzbereich aufgefundenen Saksunarvatn- und Vedde-Asche. Die Datierung basiert nach WALKER et al. auf eine Jahresschichtenzählung, die für die Basis des Holozäns ein Alter von 11.700 Kalenderjahren (vor 2000 n. Chr.) mit einem Maximalzählfehler von 99 Jahren liefert [Anmerkung des Verfassers: hier zur Diskussion].

Alle Stufen- bzw. Epochen-Grenzen werden durch die Internationale Stratigraphische Kommission (ICC), einer Unterorganisation der International Union of Geological Sciences (IUGS), methodologisch und formal durch Referenzpunkte (GSSP) definiert. GSSP steht für Global Boundary Stratotype Section and Point (Stratotypusektion und -Punkt einer globalen Grenze). Die Festlegung erfolgt normalerweise an einem zugänglichen Profil, an welchem der Grenzpunkt mit einem „goldenen Nagel“ markiert wird. Bei diesem GSSP liegt allerdings ein besonderer Fall vor. Der NGRIP-Eiskern lagert im Eisschrank der Universität von Kopenhagen.

Ein Hauptgrund, warum der Entscheid zu Gunsten des grönländischen Eises ausfiel, ist die hohe Auflösung. Die holozänen Ablagerungen im Zentralbereich des grönländischen Eisschildes mit etwa 1500 m Eismächtigkeit sind um Größenordnungen mächtiger (dicker) im Vergleich mit denen des Nordatlantiks (Dezimeter-Bereich) oder denen von Festlandsseen (Meter-Bereich).



**Abb. 23** Vorkommen und Verbreitung der vulkanischen Vedde-Asche.

Die Vedde-Asche unmittelbar unterhalb der Pleistozän/Holozän-Grenze ist im grönländischen Eis sowie in marinen und terrestrischen Sedimenten nachgewiesen. Korrelationen mit der Lacher See Tephra und dem Neapolitanischen Gelben Tuff erlauben eine pan-europäische Tephrostratigraphie für das Spätglazial und frühe Holozän von Grönland über den Nordatlantik, Mitteleuropa und die Alpen bis nach Italien. BLD: Bled-See, Slovenien (LANE et al. 2011a); SOP: Soppensee, Schweiz (LANE et al. 2011b); ROT: Rotmeer, Deutschland (Blockley et al. 2007); KRK: Kråkenes, Norwegen (BIRKS et al. 1996); Abbildung nach DAVIES et al. 2012, weitere Referenzen siehe dort (Grafik: Rafael Schäffer).

## 7.2 Vedde-Asche und Saksunarvatn-Asche

In den Eiskernen GISP2, GRIP und NGRIP sind mit Hilfe verbesserter Technik Aschelagen aufgefunden worden, die es erstmals erlaubten die Eiskernstratigraphie tephrostratigraphisch mit der herkömmlichen Quartärstratigraphie abzugleichen. So bestätigte sich nach fast 30 Jahren (GRÖNVOLD et al. 1995)<sup>35</sup>, dass die von DANSGAARD et al. (1969) für den Camp Century-

<sup>35</sup> „The positive identification of ash layers Z-1 and Z-2 in the GRIP ice core connects the ice core unambiguously to the North Atlantic oceanic sediment record and confirms the prediction made by comparing the  $\delta^{18}\text{O}$  ice

Eiskern (1966) erstellte Isotopen-Stratigraphie im Grenzbereich Pleistozän/Holozän korreliert.

Im NGRIP-Eiskern sind in einer Tiefe zwischen 1400 m und 1640 m (~10.000 bis 16.000 Eiskernjahre<sup>36</sup> vor heute) 12 Aschelagen durch Partikel-Screening aufgefunden worden. Zwei dieser Lagen, mit dem bloßen Auge erkennbar, konnten anhand geochemischer Vergleichsuntersuchungen (FeO/TiO<sub>2</sub>-Binärdiagramm) identifiziert werden (MORTENSEN et al. 2005)<sup>37</sup>: Die mm-dicke basaltische Saksunnarvatn-Asche in 1409,89 m Tiefe sowie die bimodale Vedde-Asche (Z1) in 1506,18 m Tiefe.

Die Verbreitung beider Aschen (Abb. 23) erstreckt sich über ein Areal, das vom grönländischen Eisschild, über den Nordatlantik, Island, Skandinavien, Großbritannien und Deutschland bis zur Schweiz (nur Vedde) reicht (BIRKS et al. 1996, DAVIES et al. 2002, BLOCKLEY et al. 2007<sup>38</sup>). Als Herkunfts-/Eruptionsgebiet wird Island vermutet. Die Aschelagen sind eindeutige (und damit verlässliche) zeitparallele Marken zur Korrelation mariner, terrestrischer und Eiskern-Folgen in Zentral- und Nordeuropa.

### 7.3 Konstruktion der holozänen Zeitskala

Die Darstellung der Konstruktion des holozänen Teils der Chronologie durch VINTHER et al. gewährt einen tieferen Einblick in die Eiskerndatenlage, ihre Zuverlässigkeit und ihre Interpretation.

- Auf die Einbeziehung des GISP2-Eiskerns wurde verzichtet. Damit wurde ALLEYS „visueller Stratigraphie“, wohl mangels Reproduzierbarkeit, scheinbar keine ausreichende Zuverlässigkeit zuerkannt.
- Die Ausprägung der  $\delta^{18}\text{O}$ -Oszillationen in den GRIP- und NGRIP-Eiskernen war bereits in den oberen Teilen so schwach (Diffusion), dass auch mit der Dekonvolutionstechnik\* schnell das Limit erreicht wurde: NGRIP bis 1.813 [Eiskern-]Jahre, GRIP bis 3.845 [Eiskern-]Jahre.
- In dem Skalenbereich 3.846 bis 7.902 [Eiskern-]Jahre wurde der „Jahresschichten“zählung der GRIP- und NGRIP-Eiskerne keine Bedeutung beigemessen; sie fielen so gut wie nicht ins Gewicht („almost no weight is given“). Dies, obwohl ein ECM-Profil mit ausreichender Auflösung vorlag.

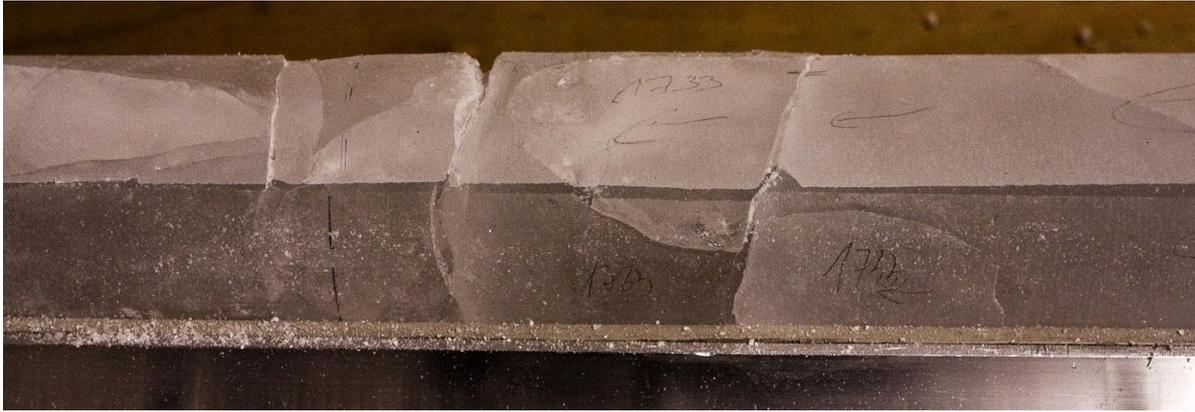
---

*record and sea surface temperatures derived from N. pachyderma (s.) abundances in North Atlantic sediments (...) and their linear correlation.* (GRÖNVOLD et al. 1995)

<sup>36</sup> MORTENSEN et al. (2005) benutzen in diesem Zusammenhang den Terminus „calendar ice core years“.

<sup>37</sup> „Correlation with ice, marine and terrestrial records from volcanic source regions in the northern hemisphere positively identifies the Saksunnarvatn Ash and the Vedde Ash (Ash Zone 1)“. MORTENSEN et al. (2005)

<sup>38</sup> „This discovery is the first evidence that the North Atlantic region can be directly linked to Central Europe, through co-located tephra horizons.“ (BLOCKLEY et al. 2007)



**Abb. 24** NEEM-Eiskern der spröden („brittle ice“) Zone.  
(Foto: Tim Burton; NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk>.)

Zur eigentlich tragenden Säule der Chronologie bis 7.903 [Eiskern-]Jahre wird der (alte) Dye 3-Kern von 1981 mit aussagegemäß deutlich ausgeprägten  $\delta^{18}\text{O}$ -Oszillationen.<sup>39</sup>

- Jedoch lag gerade für diesen Kern – so wurde nunmehr mitgeteilt – kein durchgängiges verlässliches  $\delta^{18}\text{O}$ -Profil vor (s. u.). VINTHER et al. entnahmen für ihre Arbeit für die Teilbereiche 5.816 bis 6.905 und 7.899 bis 8.313 [Eiskern-]Jahre zusätzlich 12.000 Eisproben und bestimmten – aufgrund des Vorteils kleinerer Probenmengen – die Deuteriumkonzentrationen ( $\delta\text{D}$ ).
- Der Skalenbereich 7.903 bis 8.313 [Eiskern-]Jahre basierte auf CFA-Daten des GRIP-Eiskerns, die auf den Dye 3-Kern übertragen wurden. Für den finalen Bereich von 8.314 bis 11.703 [Eiskern-]Jahre war die GRIP-Datierung maßgeblich, die sodann auf das ECM-Profil des Dye 3-Kerns transferiert wurde.
- Ein durchgängiges „Jahres“-Profil ist weder für den Dye 3-Kern noch für die neue Master-Chronologie veröffentlicht.

Die Verlässlichkeit des Dye 3-Kerns ist allerdings mehr als fraglich. Die physische Beschaffenheit wurde seinerzeit von mehreren Eiskern-Bearbeitern als problematisch dargestellt. Unter anderem wurden als Gründe genannt: eine extrem brüchige (und beschädigte) Zone (sog. brittle zone, beispielhaft gezeigt am NEEM-Eiskern, Abb. 24) in dem Tiefenbereich 800 m bis 1400 m (DANSGAARD et al. 1982, ANDERSEN et al. 2006)<sup>40,41</sup>, störende Eisschmelz- und Wiedergefrierereignisse (Perkolationsstrukturen) während des gesamten Holozäns (HERRON

<sup>39</sup> „As the drill site of Dye 3 receives more than twice as much accumulation as central Greenland, the annual layers are well resolved and relatively thick in the upper parts, making the core ideal for dating the most recent millennia. But, the high accumulation rate has resulted in relatively rapid ice flow (flow-induced layer thinning and diffusion of isotopes), Dye 3 1979 cannot be used for annual layer counting much more than 8 kyr back in time.“ RASMUSSEN et al. (2006)

<sup>40</sup> „In the depth interval 800 to 1400 m the ice was extremely brittle, and even careful handling unavoidably damaged this part of the core (...) The depth interval 800 to 1400 m would be a period approximately from about two thousand years ago to about five or six thousand years ago.“ (DANSGAARD et al. 1982, 1274)

<sup>41</sup> „The length of each stratigraphy is limited by the initial accumulation rate at the site determining the isotopic diffusion, together with the sampling resolution and the location of the brittle zone in the cores.“ (ANDERSEN et al. 2006)

et al. 1981)<sup>42</sup> und folglich unregelmäßige  $\delta^{18}\text{O}$ -Zyklen (LANGWAY et al. 1988)<sup>43</sup>. Insgesamt kann nicht von einer Kontinuität und Klarheit der Abfolge ausgegangen werden und das Ausmaß der Störungen ist nicht wirklich bekannt.

### **Absolute Dye 3-Zeitskala variabel**

Befremdlich ist darüber hinaus, dass durch RASMUSSEN et al. (2006) – nach 20 Jahren – dargelegt wurde, dass die von HAMMER et al. (1986) vormals erstellte *absolute* Zeitskala bis zur Pleistozän/Holozän-Grenze (8770 BC  $\pm$  150, also etwa 10.720 [Eiskern-]Jahre)<sup>44</sup> in Teilbereichen durch Interpolation und nicht durch „Jahresschichtenzählung“ konstruiert worden war<sup>45</sup>. Mit ihrer Zielzahl orientierten sich HAMMER und seine Co-Autoren damals an die von STRÖMBERG (1985) veröffentlichte Zahl von 8750 BC  $\pm$  50/-150, also etwa 10.700 Warvenjahren. Da es sich bei der Pleistozän/Holozän-Grenze um ein Ereignis handelt, das datiert wird, mussten sie auch einräumen, dass die Camp Century-Zeitskala um +670 [Eiskern-]Jahre zu korrigieren war. Denn diesem Ereignis war damals der verbreitete Wert von etwa 10.000  $^{14}\text{C}$ -Jahren (unkalibriert) zugeordnet worden. Verständlich werden diese Zeitsprünge, wenn die Motivationslage der Autoren betrachtet wird: Denn ihr Ziel war es, eine unabhängige Kalibrierung der  $^{14}\text{C}$ -Zeitskala durch eine absolute, jahrgenaue Eiskerndatierung bis zur Pleistozän/Holozän-Grenze bereitzustellen.<sup>46</sup>

Wie für das gleiche Ereignis die „Zeit“skala weiter ausgedehnt wird, also noch mehr „Jahresschichten“ hinzukommen, zeigen die Vergleiche mit der Radiokarbon-Kalibrierungskurve Intcal04 (REIMER et al. 2004) mit etwa 11.500 dendrokalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Jahren und mit der in 2008 festgelegten Pleistozän/Holozän-Grenze mit 11.700 „Kalenderjahren“. So erfuhr die ehemals *absolute*, durch Jahresschichtenzählung erstellte holozäne Chronologie des Dye 3-Kerns mit 10.720 „Jahren“ (vgl. oben) eine Erweiterung um etwa 1000 „Jahresschichten“, um an die Marke von 11.700 [Eiskern-]Jahre v. h. anzuschließen.<sup>47</sup>

<sup>42</sup> „An exceptionally warm spell can produce features which extend downwards by percolation, along isolated channels, into the snow of several previous years. This can happen in regions which generally have little or no melting at the snow surface as exemplified during mid July 1954 in north-west Greenland. Such an event could lead to the conclusion that two or three successive years had abnormally warm summers, whereas all the icing formed during a single period which lasted for several days. The location where melt features will have the greatest climactic significance is high in the percolation facies where summer melting is common but deep percolation is minimal. Dye 3 in southern Greenland (65°11'N; 43°50'W) is such a location.“ (HERRON et al. 1981, 389)

<sup>43</sup> „The annual  $\delta^{18}\text{O}$  cycles [des Dye 3-Eiskerns] are not as regular as those from Milcent because penetration and refreezing of melt water offsets the advantages of the high annual rate of accumulation (53 cm of ice equivalent per year) and the low mean annual surface temperature (-20°C).“ (LANGWAY et al. 1988, 103)

<sup>44</sup> „Seasonal variations in  $^{18}\text{O}$  content, in acidity, and in dust content have been used to count annual layers in the Dye 3 deep ice core back to the Late Glacial. In this way the Pleistocene/Holocene boundary has been absolutely dated to 8770 BC with an estimated error limit of  $\pm$  150 years.“ (HAMMER et al. 1986)

<sup>45</sup> „However, at the time when the DYE-3 timescale of Hammer et al. [1986] was constructed, highly resolved stable isotope ratios had only been measured continuously down to 5.9 kyr b2k, and the timescale was therefore to some degree based on interpolation and on ECM measurements below this [Hammer, 1989].“ (Rasmussen et al. 2006)

<sup>46</sup> „A comparison between ice core and  $^{14}\text{C}$  dating of this event, therefore, provides an independent calibration of the  $^{14}\text{C}$  time scale.“ (HAMMER et al. 1986, 284)

<sup>47</sup> Die Anpassung um 1000 „Jahre“ gilt auch für die Camp Century-Zeitskala.

## Fazit

Hier wird besonders deutlich: Die Eiskerndatierung („eiskernchronologische Methode“) auf Basis der Zählung von Jahresschichten ist weder eine absolute noch eine unabhängige Datierungsmethode. Sie folgt mittel- oder unmittelbar den radiometrischen Altersvorgaben und ist extrem variabel und anpassungsfähig.

## 7.4 Verifizierung der Grönland-Eiskern-Chronologie

Eine Verifizierung der Chronologie (oder einzelner Teile davon) ist gegeben, wenn eine unabhängige Altersbestätigung der konstruierten Zeitskala erbracht werden kann. Eine Verifizierung der Chronologie erachteten auch VINTHER et al. für entscheidend: „[Eine, M.K.] direkte Abschätzung des Zählfehlers ist möglich für die vergangenen etwa 1900 Jahre, wo historisch datierte vulkanische Referenzhorizonte in den Eiskernen beobachtet werden.“<sup>48</sup> Als absolut-zeitliche Ankerpunkte der Grönland-Eiskern-Chronologie wählten die Autoren die Eruption des Vesuv (79 n. Chr.) sowie des isländischen Öraefajökull (1362 n. Chr.). Die Ausbruchereignisse umschließen eine Zeitspanne von 1282 Kalenderjahren. Aus einer Kombination der Dye-3-Skala und der GRIP-Skala ermittelten sie 1283 [Eiskern-]Jahre und folgerten daraus einen maximalen Zählfehler für diesen Skalenbereich von 0,25%.

Zur Frage der Identifikation dieser „vulkanischen Referenzhorizonte“ erfolgte ein Verweis auf den Co-Autor CLAUSEN (et al. 1997). Dieser Arbeit zufolge wurden für die besagten Dye-3- und GRIP-Eiskerne anhand der  $\delta^{18}\text{O}$ - und ECM-Profile für die vergangenen 4000 Jahre jahrgenaue Chronologien erstellt. Dabei wurden die ECM-Ausschläge (Aziditätsspitzen, vulkanische Säureniederschläge) benutzt, um an diesen historisch bekannte Vulkaneruptionen zu dokumentieren.<sup>49</sup> Den prominenten Ausschlägen (Signalen) wurden 27 Eruptionereignisse entweder zugewiesen („assigned“) oder bereits genannte Vorschläge einer Korrelation durch andere Autoren übernommen („has been suggested that they correspond to“). Das jüngste Ereignis, 1912 A. D. („Event 1“), die Katmai-Eruption in Alaska, galt scheinbar als wirklich nachgewiesen („the eruption is found“). Ereignis 26, 1636 B. C., wurde der minoischen Thera-Eruption zugeordnet. In Tabelle 5 ihrer Arbeit wurden keine chemischen Signale für 1362 A. D. (Öraefajökull) und 79 A. D. (Vesuv) ausgewiesen.

Es ist allerdings festzustellen, dass für kein einziges der 27 Eruptionereignisse ein Nachweis darüber erbracht wurde, dass es sich tatsächlich um Säureniederschläge der zugewiesenen Vulkaneruptionen handelt. Die Aziditätsspitzen alleine sind keine eindeutigen Fin-

<sup>48</sup> „Direct estimation of the counting bias is possible for the past ~1900 years where historically dated volcanic reference horizons are observed in the ice core records. The period between the A.D. 79 Vesuvius eruption and the A.D. 1362 Öraefajökull eruption has been chosen to evaluate possible biases in the dating technique.“ VINTHER et al. (2006)

<sup>49</sup> „Because it is possible to date the individual strata of the ice core by using, e.g., the detailed  $d^{18}\text{O}$  and ECM profiles to almost the calendar year for the past 4000 years in the Dye 3 and Greenland Ice Core Project (GRIP) Greenland ice cores, the age of the pronounced ECM peaks can be used to document historical known volcanic eruptions.“ CLAUSEN et al. (1997)

gerabdrücke einer Vulkaneruption. Die Zuordnung erfolgte auf Basis eines „best guess“.<sup>50</sup> Das bedeutet, dass die mit „Jahresschichten“ konstruierte „absolute“ Grönland-Eiskern-Chronologie nicht mit Zuweisungen vulkanischer Eruptionen verifiziert werden kann.

Referenz-horizont	Ausbruchs-datum	DYE-3 Tiefe [m]	GRIP Tiefe [m]	NGRIP Tiefe [m]	Zählfehler [Jahre]	DYE-3 Tiefe [%]	GRIP Tiefe [%]	NGRIP Tiefe [%]
Öraefajökull	1362 n. Chr.	326,70	165,10	142,75	0	16%	5%	5%
Vesuv	79 n. Chr.	779,99	429,08	367,80	0	38%	14%	12%
(Thera)	~ 1600-1650 v. Chr.	1227,48	736,47	640,99	5	60%	24%	21%

**Tab. 7** Historische Vulkaneruptionen und ihre Zuweisung

Die Zuordnung vulkanischer Eruptionen zu den Aziditätsspitzen erfolgte auf Basis eines „best guess“; bislang konnte kein Nachweis erbracht werden, dass es sich tatsächlich um Säureniederschläge der besagten Eruptionen handelt.

Um die offenbar bekannten Unsicherheiten zu entkräften, berichteten VINTHER et al. im Weiteren auch von Aschefunden: *„Beide Eruptionen, die des Vesuv 79 n. Chr. und die des Öraefajökull 1362 n. Chr., sind unlängst in Tephra des GRIP-Eiskerns identifiziert worden (C. Barbante, persönliche Mitteilung, 2005; V. A. Hall und J. R. Pilcher, persönliche Mitteilung, 2006).“*<sup>51</sup> Zu beiden Fällen liegen weitere Ergebnisse vor; in beiden Fällen konnte der Nachweis aber nicht erbracht werden.

### **Öraefajökull (1362 n. Chr.)**

Bereits 1991 hatten PALAIS et al. eine Partikelkonzentration vulkanischen Glases (ohne ECM-Ausschlag) im GISP2-Eiskern in einer Tiefe von 174,1 m untersucht, die sie aufgrund der geochemischen Analyse dem Öraefajökull-Ausbruch 1362 n. Chr. zuwiesen (*„is believed to have originated from“*). Die geochemischen Daten allerdings weichen signifikant von anderen sicheren Vorkommen ab<sup>52</sup>. SELBEKK & TRØNNES (2007) führten diese Diskrepanz auf analytische Fehler zurück<sup>53</sup>. Eine andere Erklärung hierfür könnte ganz einfach die sein, dass es sich bei den Partikeln nicht um Material des Öraefajökull-Ausbruchs von 1362 handelt. Somit bleibt eine Bestätigung offen und eine Publikation von Hall und Pilcher ist abzuwarten.

<sup>50</sup> Die Zuweisung ist eine bestehende Praxis; in diesem Zusammenhang schrieben ZIELINSKI et al. (1995, 135) von einer *„so ziemlich als erwiesen angenommen Idee“*: *„The presence of several glass shards in the GISP2 ice core that appear to match the composition of those from the Eldgjá eruption verifies that Eldgjá is at least one source of the large acidity and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> signal in the mid-AD 930s in Greenland ice cores. Although this idea is pretty much taken for granted, there was the potential that this signal was due in part to another volcano given the scarcity of volcanic records from the tenth century in general.“*

<sup>51</sup> *„Both the A.D. 79 Vesuvius eruption and the A.D. 1362 Öraefajökull eruption have recently been identified in tephra from the GRIP ice core (C. Barbante, personal communication, 2005; V. A. Hall and J. R. Pilcher, personal communication, 2006).“*

<sup>52</sup> Vgl. PALAIS et al. (1991, Tab. 1) mit SELBEKK & TRØNNES (2007, Tab. 5): SiO<sub>2</sub> in durchschnittlichen Gew.-%: Eiskern (76,9) vs. isländisches Vorkommen (Tephra 71,3 bzw. Glas 72,8).

<sup>53</sup> *„The analyses of assumed Öraefakull 1362 tephra in ice cores from the central Greenland ice cap (Palais et al. 1991), however, differ markedly from the compositions presented in Table 5. The unusually high silica content of 76.9 wt.% and the large analytical uncertainty quoted for these analyses indicate that this discrepancy may be due to analytical errors.“* SELBEKK & TRØNNES (2007, 51)

### **Vesuv (79 n. Chr.)**

Unter dem Titel *Greenland ice core evidence of the 79AD Vesuvius eruption* veröffentlichten BARBANTE et al. (2013) kürzlich ihre Untersuchungsergebnisse zu den in Tiefe 429,3 m des GRIP-Eiskerns aufgefundenen Tephrapartikel. Aufgrund der geochemischen Zusammensetzung folgern („*strongly suggest*“) die Autoren, dass die Partikel von der Vesuv-Eruption 79 n. Chr. stammen. Obwohl die (nur) sechs Partikel wie auch die Ausbruchprodukte des Vesuvus geochemisch der phonolithischen Klasse angehören, zeigen die Partikel eine relativ hohe Heterogenität<sup>54</sup> und weichen in ihrer Zusammensetzung in Teilbereichen (Verhältnisse FeO und TiO<sub>2</sub> zu CaO)<sup>55</sup> deutlich von den präsentierten Vergleichswerten ab (S. 1227). BARBANTE et al. sehen aber im Zeitraum zwischen 50 und 100 n. Chr. keine wirkliche Alternative zum Vesuv-Ereignis. Da für sie der zeitliche Rahmen durch die bestehende Eiskernchronologie festlag, haben sie darüber hinaus (in einem größeren zeitlichen Rahmen) keine weiteren alternativen Eruptionen untersucht. Auffällig ist auch die zeitliche Abfolge der einzelnen Signale (BARBANTE et al., Fig. 2): So folgt einem ersten prominenten Partikel-Ausschlag (mit Tephrapartikel) im „Sommer 79“ (Ausbruchdatum bisher historisch nicht genau bekannt, zwischen August und Oktober 79 n. Chr.) ein noch prominenterer Partikel-Ausschlag im „Frühjahr 80“ (ohne Tephrapartikel) und erst etwa ein Jahr später, im „Herbst 80 n. Chr.“, ein einzeln stehender Aziditätsausschlag (vulkanischer Säureniederschlag). Eine mögliche August/Oktober-Diskrepanz wird mit Diffusion der Sauerstoffisotopen erklärt; physikalisch möglich (denkbar) in einem Abschnitt von 5 cm.<sup>56</sup> Weiterhin zeigt die Abbildung die Original  $\delta^{18}\text{O}$ -Daten und eine Interpretation durch Dekonvolution. Hierbei wird eine d18O-„Plateaumitte“ zwischen einem d18O-Tief und einem d18O-Hoch als zwei Jahre („Sommer 79“ und „Sommer 80“) und ein d18O-„Plateauhoch“ ebenfalls als zwei Jahre („Sommer 81“ bis „Sommer 82“) interpretiert. Aufgrund der bestehenden Unsicherheit (geochemischen Unterschiede) kann das Vesuv-Ereignis nicht eindeutig nachgewiesen werden; eine Verifizierung der Chronologie mit dem Vesuv-Ereignis ist demnach nicht gegeben.

### **Thera (etwa 1600-1650 v. Chr.) und Extrapolation der Validität**

Für den Zeitraum > 3845 [Eiskern]-Jahre wurden von VINTHER et al. keine Verifikationsmöglichkeiten angegeben. Das zugewiesene (nicht nachgewiesene, s. o.) Thera-Ereignis (etwa 1600-1650 v. Chr.) galt als zusätzliche Überbrückung. Im Weiteren implizierten die Autoren, dass ihre Chronologie für den gesamten Abschnitt bis 11703 (Eiskern)-Jahre (Pleistozän/Holozän-Grenze) valide ist (mit Feinadjustierungen und Fehlerabschätzungen für selekt-

<sup>54</sup> „However, when comparing the tephra fragments with whole-rock and individual pumice samples from the Pompeii 70AD Vesuvius eruption, the GRIP particles appear relatively heterogenous (Fig. 5; Santacroce et al., 2008; Balcone-Boissard et al., 2009).“

<sup>55</sup> „The GRIP tephra differ from the Vesuvius values in FeO and TiO<sub>2</sub> versus CaO biplots (Fig. 5), (...).“

<sup>56</sup> „If the eruption occurred during September or October 79 AD, the settling of tephra into the fresh snow after the eruption and the compaction of this snow during the subsequent  $\approx$  2000 yr of accumulation (429 m) suggests that the location of the tephra particles within the  $\delta^{18}\text{O}$  (warm season) peak is physically possible (Fig. 2). The stratigraphic difference between the  $\delta^{18}\text{O}$  peak (warm season) and the  $\delta^{18}\text{O}$  valley (cold season) is only 5 cm.“ (BARBANTE et al. 2013, S. 1229)

tierte, ältere Teilbereiche insgesamt ein Zählfehler von  $\pm 99$  [Eiskern-]Jahren), und zwar deshalb, weil die jüngsten 1900 Jahre durch eindeutig identifizierte Niederschläge historisch bekannter Vulkaneruptionen bestätigt wurden. Dies ist aber nicht zutreffend. Ebenso überzeugt formulierten auch RASMUSSEN et al. (2006): „Die letzten 1900 Jahre sind ohne kumulierte Unsicherheit datiert worden insofern als der Referenzhorizont des Vesuv (79 n. Chr.) durch historische Aufzeichnungen exakt datiert ist.“ Hier liegt eine gravierende Fehleinschätzung vor.

### **Fazit**

Es wird festgestellt, dass die „Datierung“ der Eisbohrkerne bisher nicht durch unabhängige, zeitlich bekannte Ereignisse (Vulkaneruptionen) verifiziert werden konnte.

## **8 Zusammenfassung**

Eiskerne des grönländischen Inlandeises erlauben über geochemische Indikatoren (Chemo-, Isotopenstratigraphie) und vulkanische Aschelagen (Tephrostratigraphie) eine Einbindung in die Quartärstratigraphie (oberstes Pleistozän, Holozän).

Die Datierung von Eiskernen erfolgt hierarchisch:

1. Klimatostratigraphische Korrelation und Verankerung in die Quartärstratigraphie.
2. Übernahme von zwei radiometrisch geeichten Altersfixpunkten der quartärgeologischen Zeitskala und Übertragung auf konkrete Ereignispunkte der Eissäule, Konstruktion (Approximation) einer meter- bzw. „jahrgenauen“ Tiefen-Alters-Beziehung durch Kalkulation unter Anwendung eines physikalischen Eisflussmodells.
3. „Jahresschichtenzählung“: Die Anzahl auszuweisender Einzel-„Jahre“ ist durch die radiometrische Eichung im Wesentlichen vorbestimmt. Durch Fixierung der notwendigen Skalen- bzw. „Jahres“einheiten über entsprechende Auflösungen stratigraphischer und/oder physikochemischer Signale wird eine „jahrgenaue“ Zeitskala konstruiert (Eiskernchronologie). Ohne den Nachweis erbracht zu haben, werden die Signale mit „Jahren“ und „Jahresschichten“ assoziiert bzw. als solche interpretiert.

Bei den Altersangaben zu den ältesten Abschnitten der gewonnenen Eiskerne, 100.000 bis über 250.000 Jahre, handelt es sich nicht um Kalenderjahre sondern um radiometrische bzw. radiometrisch geeichte „Jahre“. Dasselbe gilt für das Datum der Pleistozän/Holozän-Grenze; die 11.700 [Eiskern-]Jahre sind  $^{14}\text{C}$ -begründet. Es ist nicht bekannt, in welcher Beziehung  $^{14}\text{C}$ -Alter und andere radiometrische Alter dieser Größenordnung zum realen Alter stehen.

Davon differenziert zu betrachten sind die Sauerstoffisotopen-Feinoszillationen, die sich vom Top des Eisschildes je nach Lokalität bis einige Hundert Meter Tiefe erhalten haben. Hier ist eine echte jahreszeitliche Prägung wahrscheinlich; eine unabhängige Bestätigung (z. B. durch Identifizierung von vulkanischen Aschelagen historisch bekannten Alters) steht für diesen obersten Abschnitt jedoch noch aus.

Die Eiskerndatierung in ihrer Gesamtheit ist folglich weder ein unabhängiges noch ein absolutes Datierungsverfahren. Eine absolute Datierung durch Zählung von nachweislich echten Jahresschichten ist nicht gegeben.

## 9 Schlussfolgerung

Die von den Eiskern-Bearbeitern ausgewiesenen Alter zu den gewonnenen Eiskernen des grönländischen Eisschildes sind radiometrisch begründet. Da nicht bekannt ist, in welcher Beziehung  $^{14}\text{C}$ -Alter und weitere radiometrische Alter dieser Größenordnungen zum realen Alter stehen (KOTULLA 2013), können radiometrische Alter nicht mit realem Alter gleichgesetzt werden. Die Altersangaben zu den Eiskernen ohne Ausweis der (mittel- oder unmittelbar) zugrundeliegenden Datierungsmethode, also ohne entsprechende Kennzeichnung, sind irreführend.

## 10 Glossar

**Akkumulation, akkumuliert:** (An)sammlung, (an)gesammelt.

**Eiskernchronologie:** Abfolge definierter Ereignisse im Eiskern, hier im engeren Sinne: „jahr“-genaue Chronologie durch Datierung der Ereignisse.

**„Jahr“, „Jahresschicht“, „Jahresschichtenzählung“, „jahrgenau“:** In Anführungszeichen, um deutlich zu machen, dass es sich nicht um echte Kalenderjahre handelt; häufig in [ ] ergänzend, welche Methode die „Jahre“ bedingen, z.B. [Eiskern-]Jahre für die Eiskernchronologie.

**Lithologisch:** Die Lithologie (Gesteinskunde) betreffend; umfasst auch weitere Merkmale, z.B. Gefüge, Schichtung.

**Marin:** Das Meer betreffend; bezieht sich auf im (oder durch das) Meer (verursachte) ablaufende Prozesse und Bildungen.

**Marine Isotopenstufen (MIS):** Auch Sauerstoffisotopenstufen (OIS); Gliederung der abstrahierten Sauerstoffisotopen-Chronologie in Stufen (Oszillationen interpretiert als relativ wärmere bzw. relativ kältere Perioden) von der Gegenwart bis über die Grenze des Pleistozän/Pliozän hinaus (Grenze: Stufe 103), aktueller Standard LR04 (LISIECKI & RAYMO 2005).

**Sauerstoffisotopenverhältnis:** Verhältnis von schweren zu leichten Isotopen in Relation zu einem internationalen Standard,  $\delta^{18}\text{O} = (((18\text{O}/16\text{O})_{\text{Probe}} / (18\text{O}/16\text{O})_{\text{Standard}}) - 1) \times 1000 \text{ ‰}$ ; in Eiskernen werden höhere  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte als im Verhältnis wärmer, niedrigere  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte als im Verhältnis kälter interpretiert.

**SPECMAP:** Spectral Mapping (Projekt), in den 1980er-Jahren entwickelte Standardchronologie/-zeitskala für den Sauerstoffisotopenbericht mariner Sedimente. Die Kompositkurve ist radiometrisch geeicht, geglättet, gefiltert und auf astronomische Zyklen getuned (eingephasst). Weiterentwicklung vgl. MIS.

**Stratigraphisch:** Die (relative) Altersfolge der (Schicht)gesteine betreffend; hier bezogen auf die Quartärgliederung (vgl. Tab. 2).

**Terrestrisch:** Das Land betreffend; bezieht sich auf Prozesse, Kräfte und Bildungen, die auf dem Festland auftreten.

## 11 Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Fakten und Zahlen zu sechs Tiefbohrungen in die grönländische Eisdecke. ....	4
Tab. 2	Gliederung der jüngeren Abschnitte des Quartärs und Eis/Land/Meer-Korrelation.....	5
Tab. 3	Eisflussmodell zur Kalkulation der Zeitskala.....	9
Tab. 4	Ankerpunkte und ihre kalkulierten Alter.....	9
Tab. 5	Klimatostratigraphische Interpretation des Camp Century Eiskerns.....	11
Tab. 6	Profil und physische Beschaffenheit des GISP2-Eiskerns. ....	13
Tab. 7	Historische Vulkaneruptionen und ihre Zuweisung .....	38

## 12 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Das NEEM-Camp. ....	3
Abb. 2	Satellitenaufnahme von Grönland.....	4
Abb. 3	Sauerstoffisotopenprofil und Korrelation mit der SPECMAP-Kurve.....	7
Abb. 4	Bohrkopf mit Eiskern.....	8
Abb. 5	Bohrraum mit Gestänge und Bohröffnung. ....	8
Abb. 6	NEEM-Bohrstation mit Bohrteam. ....	12
Abb. 7	NGRIP-Eiskern der basalen Zone mit Koniferennadel. ....	15
Abb. 8	Koniferennadel.....	15
Abb. 9	NEEM-Eiskern der Bodenzone mit Einschlüssen von Granit. ....	16
Abb. 10	Eiskern der Bodenzone mit kleinen Gesteinsbruchstücken, Tiefe 2519,65 m. ....	16
Abb. 11	Firn im Durchlicht.....	18
Abb. 12	Probennahme in einer Schneegrube an der Oberfläche des Eisschildes. ....	19
Abb. 13	Eiskern-Anschnitt zur Beprobung. ....	20
Abb. 14	Untertage-Werkbank (science trench). ....	21
Abb. 15	Messung der elektrischen Leitfähigkeit (ECM) direkt am Eiskern. ....	22
Abb. 16	Messung der elektrischen Leitfähigkeit (ECM) und grafische Datenpräsentation....	23
Abb. 17	Eiskernschmelzwasser-Reihenmessungen von Spurenstoffen.....	24
Abb. 18	CFA-Labor.....	25
Abb. 19	Datenpräsentation ausgewählter CFA-Messungen. ....	25
Abb. 20	Optischer Scanner. ....	30
Abb. 21	Messung der Lichtintensität mit dem Line-Scanner. ....	30
Abb. 22	Pleistozän/Holozän-Grenze im NGRIP-Eiskern. ....	32
Abb. 23	Vorkommen und Verbreitung der vulkanischen Vedde-Asche. ....	33

Abb. 24 NEEM-Eiskern der spröden („brittle ice“) Zone .....	35
Abb. 25 Eiskristalle im polarisierten Licht. ....	47

## 13 Bildnachweis

Bildmaterial wie im Einzelnen ausgewiesen.

## 14 Datennachweis

Zu Abb. 3, von links nach rechts: a) NGRIP (<http://www.iceandclimate.nbi.ku.dk/data/>): 2010-11-19\_GICC05modeltext\_for\_NGRIP.xls; b, c) GISP2, GRIP: The Greenland Summit Ice Core CD-ROM (<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore/greenland/summit/>): GISPD180.DAT, GRIPD180.DAT; d) SPECMAP (<http://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.441706?format=html>), IMBRIE JD & MCINTYRE A (2006) SPECMAP time scale developed by IMBRIE et al., 1984 based on normalized planktonic records (normalized O-18 vs time, specmap.017). doi:10.1594/PANGAEA.441706.

## 15 Dank

Dr. Harald Binder, Dr. Martin Ernst und Dr. Reinhard Junker danke ich für die Durchsicht von Teilen des Manuskripts und wertvolle Hinweise, dem Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) der U.S. Army Corps of Engineers für die Zurverfügungstellung des Reports 94-1, dem Centre of Ice and Climate (Universität Kopenhagen) für die Abdruckerlaubnis des Fotos zur Pleistozän/Holozän-Grenze (Abb. 22) sowie Rafael Schäffer für die Erstellung der Abb. 23.

Des Weiteren danke ich den Projektverantwortlichen sowie den Projektmitgliedern von NGRIP (Department of Geophysics, Niels Bohr Institute, University of Copenhagen; [www.glaciology.gfy.ku.dk/ngrip/](http://www.glaciology.gfy.ku.dk/ngrip/); aktuell unter: [http://www.gfy.ku.dk/~www-glac/ngrip/index\\_eng.htm](http://www.gfy.ku.dk/~www-glac/ngrip/index_eng.htm)) und NEEM (NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk>) sowie der Universität von Kopenhagen für das der Öffentlichkeit zugänglich gemachte und zur Verwendung freigestellte Fotomaterial.

## 16 Literatur

- ALLEY RB & KOCI BR (1988) Ice-core Analysis at Site A, Greenland: Preliminary Results. *Annals of Glaciology* 10, 1988.
- ALLEY RB, SHUMAN CA, MEESE DA, GOW AJ, TAYLOR KC, CUFFEY KM, FITZPATRICK JJ, GROOTES PM, ZIELINSKI GA, RAM M, SPINELLI G & ELDER B (1997) Visual-stratigraphic dating of the GISP2 ice core: Basis, reproducibility, and application. *J. Geophys. Res.* 102 (C12), 26367-26381.

- ANDERSEN ST (1960) Vegetation and its environment in Denmark in the early Weichselian Glacial. Survey of Denmark, Ser. II, No. 75, 1-175.
- ANDERSEN KK, DITLEVSEN PD, RASMUSSEN SO, CLAUSEN HB, VINTHER BM, JOHNSON SJ & STEFFENSEN JP (2006) Retrieving a common accumulation record from Greenland ice cores for the past 1800 years. *J. Geophys. Res.* **111**, D15106, doi:10.1029/2005JD006765.
- ANKLIN M, BALES RC, MOSLEY-THOMPSON E & STEFFEN K (1998) Annual accumulation at two sites in Northwest Greenland during recent centuries. *J. Geophys. Res.* **103** (D22), 28775-28783.
- BARBANTE C, KEHRWALD NM, MARIANELL P, VINTHER BM, STEFFENSEN JP, COZZI G, HAMMER CU, CLAUSEN HB & SIGGARD-ANDERSEN M-L (2013) Greenland ice core evidence of the 79 AD Vesuvius eruption. *Clim. Past* **9**, 1221-1232.
- BENSON CS (1962) Stratigraphic Studies in the Snow and Firn of the Greenland Ice Sheet. Reprint 1996.
- BIGLER M (2004) Hochoflösende Spurenstoffmessungen an polaren Eisbohrkernen: Glaziochemische und klimatische Prozessstudien. Bern.
- BIRKS HH, GULLIKSEN S, HAFLIDASON H, MANGERUD J & POSSNERT G. (1996) New radiocarbon dates for the Vedde Ash and the Saksunarvatn Ash from western Norway. *Quaternary Research* **45**, 119–127.
- BLOCKEY SPE, LANE CS, LOTTER AF & POLLARD AM (2007) Evidence for the presence of the Vedde Ash in Central Europe. *Quaternary Science Reviews* **26**, 3030–3036
- BROECKER WS, THURBER DL, GODDARD J, KU TL, MATTHEWS RK & MESOLETTA KJ (1968) Milankovitch hypothesis supported by precise dating of coral reefs and deep-sea sediments. *Science* **159**, 297-299.
- BROECKER WS & KU TL (1969) Caribbean cores P6304-8 and P6304-9: New analysis of absolute chronology. *Science* **166**, 404-406.
- BUCHARD SL, CLAUSEN HB, VINTHER BM & DAHL-JENSEN D (2012) Investigating the past and recent  $\delta^{18}\text{O}$ -accumulation relationship seen in Greenland ice cores. *Clim. Past* **8**, 2053–2059.
- CLAUSEN HB, HAMMER CU, HVIDBERG CS, DAHL-JENSEN D, STEFFENSEN JP, KIPFSTUHL J & LEGRAND M (1997) A comparison of the volcanic records over the past 4000 years from the Greenland Ice Core Project and Dye 3 Greenland ice cores. *J. Geophys. Res.* **102** (C12), 26707-26723.
- DANSGAARD W & JOHNSON SJ (1969) A flow model and a time scale for the ice core from Camp Century, Greenland. *J. Glaciol.* **8**, 215-223.
- DANSGAARD W, JOHNSON SJ, MOLLER J & LANGWAY CC JR (1969) One thousand centuries of climate record from Camp Century on the Greenland ice sheet. *Science* **166**, 377-381.
- DANSGAARD W, JOHNSON SJ, CLAUSEN HB & LANGWAY CC JR (1970) Ice cores and paleoclimatology. In: OLSSON IU (ed.) Radiocarbon Variations and Absolute Chronology. Proceedings of the Twelfth Nobel Symposium held at the Institute of Physics at Uppsala University. New York, 337-351.
- DANSGAARD W, JOHNSON SJ, CLAUSEN HB & GUNDESTRUP N (1973) Stable isotope glaciology. *Medd. Groenl.* **197**, 1-53.
- DANSGAARD W, CLAUSEN HB, GUNDESTRUP N, HAMMER CU, JOHNSON SJ, KRISTINSDOTTIR PM & REEH N (1982) A New Greenland Deep Ice Core. *Science* **218**, 1273-7.
- DANSGAARD W, WHITE JWC & JOHNSON SJ (1989) The abrupt termination of the Younger Dryas climate event. *Nature* **339**, 532–534.
- DANSGAARD W, JOHNSON SJ, CLAUSEN HB, DAHL-JENSEN D, GUNDESTRUP NS, HAMMER CU, HVIDBERG CS, STEFFENSEN JP, SVEINBJÖRNDOTTIR AE, JOUZEL J & BOND G (1993) Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature* **364**, 218–220.
- DAVIES SM, BRANCH NP, LOWE JJ & TURNER CSM (2002) Towards a European tephrochronological framework for Termination 1 and the Early Holocene. *Philosophical Transactions Royal Society, London A* **360**, 767–802.
- Dibb JE, Talbot RW, Whitlow SI, Shipham MC, Winterle J, McConnell J & Bales R (1996) Biomass burning signatures in the atmosphere and snow at Summit, Greenland: An event on 5 August 1994. *Atmos. Environ.* **30**, 553-561.
- EMILIANI C (1966) Paleotemperature analysis of the Caribbean cores P6304-8 and P6304-9 and a generalized temperature curve for the past 435,000 years. *J. Geol.* **74**, 109-126.
- FUHRER K, NEFTEL A, ANKLIN M, STAFFELBACH T & LEGRAND M (1996) High-resolution ammonium ice core record covering a complete glacial-interglacial cycle. *J. Geophys. Res.* **101**(D2), 4147-4164.
- GLENN & KELTS 1991 Sedimentary Rhythms in Lake Deposits. In: EINSELE G, RICKEN W & SEILACHER A (Eds.) Cycles and Events in Stratigraphy. Berlin Heidelberg New York, 188-221.
- GOW AJ, MEESE DA, ALLEY RB, FITZPATRICK JJ, ANANDAKRISHNAN S, WOODS GA & ELDER BC (1997) Physical and structural properties of the Greenland Ice Sheet Project 2 ice core: A Review. *J. Geophys. Res.* **102**, 26559-26575.
- GRIP MEMBERS (1993) Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core. *Nature* **364**, 203-207.
- GRÖNVOLD K, ÓSKARSSON N, JOHNSON SJ, CLAUSEN HB, HAMMER CU, BOND G & BARD E (1995) Ash layers from Iceland in the Greenland GRIP ice core correlated with oceanic and land sediments. *Earth and Planetary Science Letters* **135**, 149–155.

- HAMILTON WL & LANGWAY CC JR (1967) A correlation of microparticle concentrations with oxygen isotope ratios in 700 year old Greenland ice. *Earth Planet. Sci. Lett.* 3, 363-366.
- HAMMEN T VAN DER, MAARLEVELD GC, VOGEL JC & ZAGVIJN WH (1967) Stratigraphy, climatic succession and radiocarbon of the last glacial in the Netherlands. *Geol. En Mijnbouw* 46, 79-95.
- HAMMER CU, CLAUSEN HB, DANSGAARD W, GUNDESTRUP N, JOHNSEN SJ & REEH N (1978) Dating of Greenland ice cores by flow models, isotopes, volcanic debris, and continental dust. *J. Glaciol.* 20, 3-26.
- HAMMER CU (1980) Acidity of polar ice cores in relation to absolute dating, past volcanism, and radio-echoes. *J. Glaciol.* 25, 359-372.
- HAMMER CU, CLAUSEN HB & TAUBER H (1986) Ice-core dating of the Pleistocene/Holocene boundary applied to a calibration of the <sup>14</sup>C timescale. *Radiocarbon* 28, 284-291.
- HANSEN L & LANGWAY CC JR (1966) Deep core drilling in ice and core analysis at Camp Century, Greenland, 1961-1966. *Antarctic J. of the United States* 1, 207-208.
- HERRON MM, HERRON SL & LANGWAY CC JR (1981) Climatic signal of ice melt features in southern Greenland. *Nature* 293, 389-391.
- IMBRIE JD & MCINTYRE A (2006) SPECMAP time scale developed by IMBRIE et al., 1984 based on normalized planktonic records (normalized O-18 vs time, specmap.017). doi:10.1594/PANGAEA.441706.
- JOHNSEN SJ, DANSGAARD W, CLAUSEN HB, LANGWAY CC JR (1972) Oxygen Isotope Profiles through the Antarctic and Greenland Ice Sheets. *Nature* 235, 429-434.
- JOHNSEN SJ, CLAUSEN HB, DANSGAARD W, FUHRER K, GUNDESTRUP N, HAMMER CU, IVERSEN P, JOUZEL J, STAUFFER B & STEFFENSEN JP (1992) Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core. *Nature* 359, 311-313.
- JOHNSEN SJ, DAHL-JENSEN D, GUNDESTRUP N, STEFFENSEN JP, CLAUSEN HB, MILLER H, MASSON-DELMOTTE V, SVEINBJÖRNSDÓTTIR AE & WHITE J (2001) Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and NorthGRIP. *J. Quat. Sci.* 16, 299-307.
- KARGEL JS, AHLSTRØM AP, ALLEY RB, BAMBER JL, BENHAM TJ, BOX JE, CHEN C, CHRISTOFFERSEN P, CITTERIO M, COGLEY JG, JISKOOT H, LEONARD GJ, MORIN P, SCAMBOS T, SHELDON T & WILLIS I (2012) Greenland's shrinking ice cover: "fast times" but not that fast. *The Cryosphere* 6, 533-537.
- KOTULLA M (2013) Gültigkeit und Grenzen geologischer Zeitbestimmung. Online-Loseblattsammlung, Stand: 1. Lieferung 10/2013, www.wort-und-wissen.de.
- KU TL (1968) Protactinium 231 method of dating coral from Barbados Island. *J. Geophys. Res.* 73, 2271-2276.
- LANE CS, ANDRIC M, CULLEN VL & BLOCKLEY SPE (2011a) The occurrence of distal Icelandic and Italian tephra in the Lateglacial of Lake Bled, Slovenia. *Quaternary Science Reviews* 30, 1013-1018.
- LANE CS, BLOCKLEY SPE, RAMSEY CB & LOTTER AF (2011b) Tephrochronology and absolute centennial scale synchronization of European and Greenland records of the last glacial to interglacial transition: A case study of Soppensee and NGRIP. *Quaternary International* 246, 145-56.
- Langway CC Jr, Clausen HB & Hammer CU (1988) An inter-hemispheric volcanic time-marker in ice cores from Greenland and Antarctica. *Annals of Glaciology* 10, 102-108.
- LISIECKI LE & RAYMO ME (2005) A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}O$  records. *Paleoceanography* 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071.
- MEESE DA, ALLEY RB, FIACCO RJ, GERMANI MS, GOW AJ, GROOTES PM, ILLING M, MAYEWSKI PA, MORRISON MC, RAM M, TAYLOR KC, YANG Q & ZIELINSKI GA (1994) Preliminary depth-age scale of the GISP2 ice core. *Special CRREL Report* 94-1, US.
- MEESE DA, GOW AJ, ALLEY RB, ZIELINSKI GA, GROOTES PM, RAM M, TAYLOR KC, MAYEWSKI PA & BOLZAN JF (1997) The Greenland Ice Sheet Project 2 depth-age scale: Methods and results. *J. Geophys. Res.* 102(C12), 26411-26423.
- MORTENSEN AK, BIGLER M, GRÖNVOLD K, STEFFENSEN JP & JOHNSEN SJ (2005) Volcanic ash layers from the Last Glacial Termination in the NGRIP ice core. *J. Quaternary Sci.* 20, 209-219.
- NEEM COMMUNITY MEMBERS (2013) Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core, doi:10.1038/nature11789
- NORTH GREENLAND ICE CORE PROJECT MEMBERS (2004) High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature* 431, 147-151.
- PALAIS JM, TAYLOR K, MAYEWSKI PA & GROOTES P (1991) Volcanic Ash from the 1362 A.D. Oræfajokull Eruption (Iceland) in the Greenland Ice Sheet. *Geophysical Research Letters* 18, 1241-1244.
- RAM M & ILLING M (1994) Polar ice stratigraphy from laser-light scattering: Scattering from meltwater. *J. Glaciol.* 40, 504-508.
- RAM M, ILLING M, WEBER P, KOENIG G & KAPLAN M (1995) Polar ice stratigraphy from laser-light scattering: Scattering from ice. *Geophys. Res. Lett.* 22, 3525-3527.

- RAM M & KOENIG G (1997) Continuous dust concentration profile of pre-Holocene ice from the Greenland Ice Sheet Project 2 ice core: Dust stadials, interstadials, and the Eemian. *Journal of Geophysical Research* *102*, C12, 26641-26648.
- RASMUSSEN SO, ANDERSEN KK, JOHNSEN SJ, BIGLER M & McCORMACK T (2005) Deconvolution-based resolution enhancement of chemical ice core records obtained by Continuous Flow Analysis. *J. Geophys. Res.* *110*, D17304, doi:10.1029/2004JD005717.
- RASMUSSEN SO, ANDERSEN KK, SVENSSON AM, STEFFENSEN JP, VINTHER BM, CLAUSEN HB, SIGGAARD-ANDERSEN M-L, JOHNSEN SJ, LARSEN LB, DAHL-JENSEN D, BIGLER M, RÖTHLISBERGER R, FISCHER H, GOTO-AZUMA K, HANSSON M-E & RUTH U (2006) A new Greenland ice core chronology for the last glacial termination. *J. Geophys. Res.* *111*, D06102, doi:10.1029/2005JD006079.
- REIMER PR, BAILLIE MGL, BARD E, BAYLISS A, BECK JW, BERTRAND CJH, BLACKWELL PG, BUCK CE, BURR GS, CUTLER KB, PAUL E, DAMON PE, EDWARDS RL, FAIRBANKS RG, FRIEDRICH M, GUILDERSON HP, HOGG AG, HUGHEN KA, KROMER B, McCORMACK G, MANNING S, RAMSEY CB, REIMER RW, REMMELE S, SOUTHON JR, STUIVER M, TALAMO S, TAYLOR FW, VAN DER PLICHT J & WEYHENMEYER CE (2004) INTCAL04 Terrestrial Radiocarbon Age Calibration, 0–26 cal kyr BP. *Radiocarbon* *46*, 1029–1058.
- RONA E & EMILIANI C (1969) Absolute dating of Caribbean cores P6404-8 and P6304-9. *Science* *163*, 66-68.
- SELBEKK RS & Trønnes RG (2007) The 1362 AD Öræfajökull eruption, Iceland: Petrology and geochemistry of large-volume homogeneous rhyolite. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* *160*, 42–58.
- SOWERS T, BENDER M, LABEYRIE L, MARTINSON D, JOUZEL J, RAYNAUD D, PICHON JJ & KOROTKEVICH YS (1993) A 135,000-year Vostok-SPECMAP common temporal framework. *Paleoceanography* *8*, 737-766.
- STROMBERG B (1985) Revision of the lateglacial Swedish varve chronology. *Boreas* *14*, 101-105.
- SVENSSON A, NIELSEN SW, KIPFSTUHL S, JOHNSEN SJ, STEFFENSEN JP, BIGLER M, RUTH U & RÖTHLISBERGER R (2005) Visual stratigraphy of the North Greenland Ice Core Project (NorthGRIP) ice core during the last glacial period. *J. Geophys. Res.* *110*, D02108, doi:10.1029/2004JD005134.
- SVENSSON A, ANDERSEN KK, BIGLER M, CLAUSEN HB, DAHL-JENSEN D, DAVIES SM, JOHNSEN SJ, MUSCHELER R, PARRENIN F, RASMUSSEN SO, RÖTHLISBERGER R, SEIERSTAD I, STEFFENSEN JP & VINTHER BM (2008) A 60000 year Greenland stratigraphic ice core chronology. *Clim. Past* *4*, 47-57.
- TAUBER H (1970) The Scandinavian varve chronology and C-14 dating. In: OLSSON IU (ed.) *Radiocarbon Variations and Absolute Chronology. Proceedings of the Twelfth Nobel Symposium held at the Institute of Physics at Uppsala University.* New York, 173-196.
- VINTHER BM, CLAUSEN HB, JOHNSEN SJ, RASMUSSEN SO, ANDERSEN KK, BUCHARDT SL, DAHL-JENSEN D, SEIERSTAD IK, SIGGAARD-ANDERSEN M-L, STEFFENSEN JP, SVENSSON A, OLSEN J & HEINEMEIER J (2006) A synchronized dating of three Greenland ice cores throughout the Holocene. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2005JD006921.
- WALKER M, JOHNSEN S, RASMUSSEN SO, STEFFENSEN JP, POPP T, GIBBARD P, HOEK W, LOWE J, ANDREWS J, BJORCK S, CWCYNAR L, HUGHEN K, KERSHAW P, KROMER B, LITT T, LOWE DJ, NAKAGAWA T, NEWNHAM R & SCHWANDE J (2008) The Global Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period) in the NGRIP ice core. *Episodes* *31*, 264-267.
- WHITE JWC, BARLOW LK, FISHER D, GROOTES P, JOUZEL J, JOHNSEN SJ, STUIVER M & CLAUSEN H (1997) The climate signal in the stable isotopes of snow from Summit, Greenland: Results of comparisons with modern climate observations. *J. Geophys. Res.* *102*(C12), 26425-26439.
- WILLERSLEV E, CAPPELLINI E, BOOMSMA W, NIELSEN R, HEBSSGAARD MB, BRAND TB, HOFREITER M, BUNCE M, POINAR HN, DAHL-JENSEN D, JOHNSON S, STEFFENSEN JP, BENNIKE O, SCHWENNINGER J-L, NATHAN R, ARMITAGE A, DE HOOG C-J, ALFIMOV V, CHRISTL M, BEER J, MUSCHELER R, BARKER J, SHARP M, PENKMAN KEH, HAILE J, TABERLET P, GILBERT MTP, CASOLI A, CAMPANI E & COLLINS MJ (2007) Ancient Biomolecules from Deep Ice Cores Reveal a Forested Southern Greenland. *Science* *317*, 111-114.
- WHITLOW S, MAYEWSKI PA & DIBB JE (1992) A comparison of major chemical species seasonal concentrations and accumulation at the South Pole and Summit, Greenland. *Atmos. Environ.* *26A*, 2045-2054.



**Abb. 25** Eiskristalle im polarisierten Licht.

(Foto: Sepp Kipfstuhl, 2010; NEEM ice core drilling project, <http://www.neem.ku.dk>.)

## Impressum

Studiengemeinschaft Wort und Wissen e. V.  
Geschäftsstelle  
Rosenbergweg 29, 72270 Baiersbronn  
Tel.: 07442-81006  
E-Mail: [sg@wort-und-wissen.de](mailto:sg@wort-und-wissen.de)  
Internet: [www.wort-und-wissen.de](http://www.wort-und-wissen.de)