

8-10 Das bislang älteste Eis

800.000 Jahre oder 800.000 radiometrische Jahre? – Auf den Unterschied kommt es an.

Die Vermessung des Eises – Rekordverdächtige Alter

„Forscher holen 750.000 Jahre altes Eis ans Tageslicht.“¹ – So oder ähnlich waren die Meldungen in 2003, die die breite Öffentlichkeit erreichten, nachdem ein Bohrkern aus 3140 Metern Tiefe aus dem antarktischen Eis gewonnen und datiert worden war (EPICA COMMUNITY MEMBERS 2004). Damit war es das bislang älteste Eis. Die Bohrung an der Station Dome C im Südosten der Antarktis (Abb. 3), etwa 1000 km von der Küste entfernt, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes EPICA² niedergebracht, zu welchem auch eine Bohrung (EPICA COMMUNITY MEMBERS 2006) an der deutschen Kohnen Station gehört.

Mit Abschluss der Bohrung im Dezember 2004 in einer Bohrtiefe von 3270,2 Metern, etwa 5 Meter oberhalb des Felsuntergrundes, wurde sogar angenommen, dass der gesamte Eiskern³ Klimaaufzeichnungen von mehr als 900.000 Jahren enthält.⁴ Weitere Auswertungen schrieben das Alter jedoch auf „nur“ 800.000 Jahre fort (PARRENIN et al. 2007). Inzwischen wird nach noch älterem Eis gesucht. Es sind Regionen in der Antarktis identifiziert worden, die nach Fischer et al. (2013) einen 1,5 Millionen Jahre alten Eiskern liefern könnten.⁵

Es stellt sich die Frage, wie Eiskerne datiert werden und um was für Alter es sich handelt.

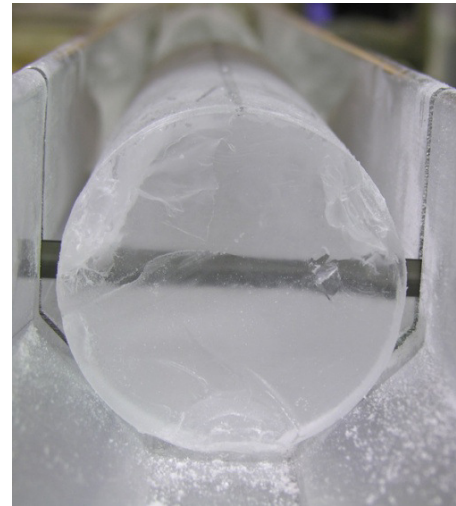


Abb. 1 EPICA-Eiskern, Tiefe ca. 2650 m, Kohnen Station, Antarktis. (Foto: Hans Oerter, AWI, <http://www.awi.de>)

EPICA DOME C (EDC99) Eiskern – Stratigraphie und Alterskalkulation

An dem EDC-Eiskerns wurden, wie bei anderen Eiskernen auch, zahlreiche physiko-chemische Reihenmessungen vorgenommen. Das markanteste, den kompletten Eiskern beschreibende Phänomen ist das Profil der Wasserstoffisotopenverhältnisse (Abb. 2), kurz δD^6 (analog Sauerstoffisotopenverhältnisse, $\delta^{18}O$).

Kennzahlen	Dome C	Vostok
Bohrkampagne, abgeschlossen	2006	1998
Höhe über NN	3233 m	3488 m
Mittlere Oberflächentemperatur	-54,5° C	-55° C
Oberflächenakkumulation p.a. Wasser	25 mm	23 mm
Tiefe der Bohrung	3270,2 m	3623 m
Abstand zum Untergrund, etwa	5 m	120 m
Eisalter an der Basis, [radiometrische] Jahre	> 800.000	> 423.000

Tab. 1 Kennzahlen zu den Bohrungen Dome C und Vostok

¹ Bild der Wissenschaft vom 4. 11. 2003 (http://www.wissenschaft.de/home/-/journal_content/56/12054/1148225/); Abfrage 6. 11. 2013.

² European Project for Ice Coring in Antarctica, Projektlaufzeit 1996-2005.

³ Eiskerne sind erbohrte Eis-Zylinder mit einem Durchmesser von i.d.R. 10 cm. Sie werden stückweise, in Längen von bis zu drei Metern, gefördert. Aus den einzelnen Eis-Zylindern wird ein Gesamtprofil („virtuelle“ Eissäule) erstellt. Das Eis entsteht durch Ansammlung (Akku-mulation) der Schneeflocken, zunehmender Verdichtung (Überlagerungsdruck) und Rekristallisation.

⁴ Pressemitteilung des AWI (Alfred-Wegener-Institut) vom 13. 1. 2005: Der älteste antarktische Eiskern; http://www.awi.de/de/aktuelles_und_presse/pressemitteilungen/detail/item/in_the_cornucopia_of_the_european_project_of_ice_corin_g_in_antarctica_the_oldest_antarctic_ice_core/?tx_list_pi1%5Bmode%5D=6&cHash=387b6e696183817ba4f50f04c5e78f0a; Abfrage 6. 11. 2013.

⁵ Bild der Wissenschaft vom 5. 11. 2013 (http://www.wissenschaft.de/web/wissenschaft.de/erde-weltall/geowissenschaften/-/journal_content/56/12054/2421667); Abfrage 6. 11. 2013.

⁶ Verhältnis 2H (D) zu 1H in Bezug zu einem Standard; durch Isotopenfraktionierung ist das Inlandeis an 1H angereichert, d.h. die δD -Werte sind negativ.

Die auffällige Signatur von Intervallen extremer δD -Oszillationen wird mit dem Sauerstoffisotopenprofil mariner Sedimente (MIS⁷) ausgehend von der Gegenwart über insgesamt „acht Glazialzyklen“ (klimatostratigraphisch) korreliert (EPICA COMMUNITY MEMBERS 2004). Hierbei wird eine strenge Beziehung zwischen den δD - bzw. $\delta^{18}O$ -Werten und der Temperatur angenommen. Abb. 2 zeigt das δD -Profil (Isotopenstratigraphie) mit zunehmender Tiefe (unten) und zunehmenden Alter (oben) jeweils im Vergleich zum Vostok-Eiskern sowie die ausgewiesenen Terminierungen⁸ (Pfeile, vgl. unten).

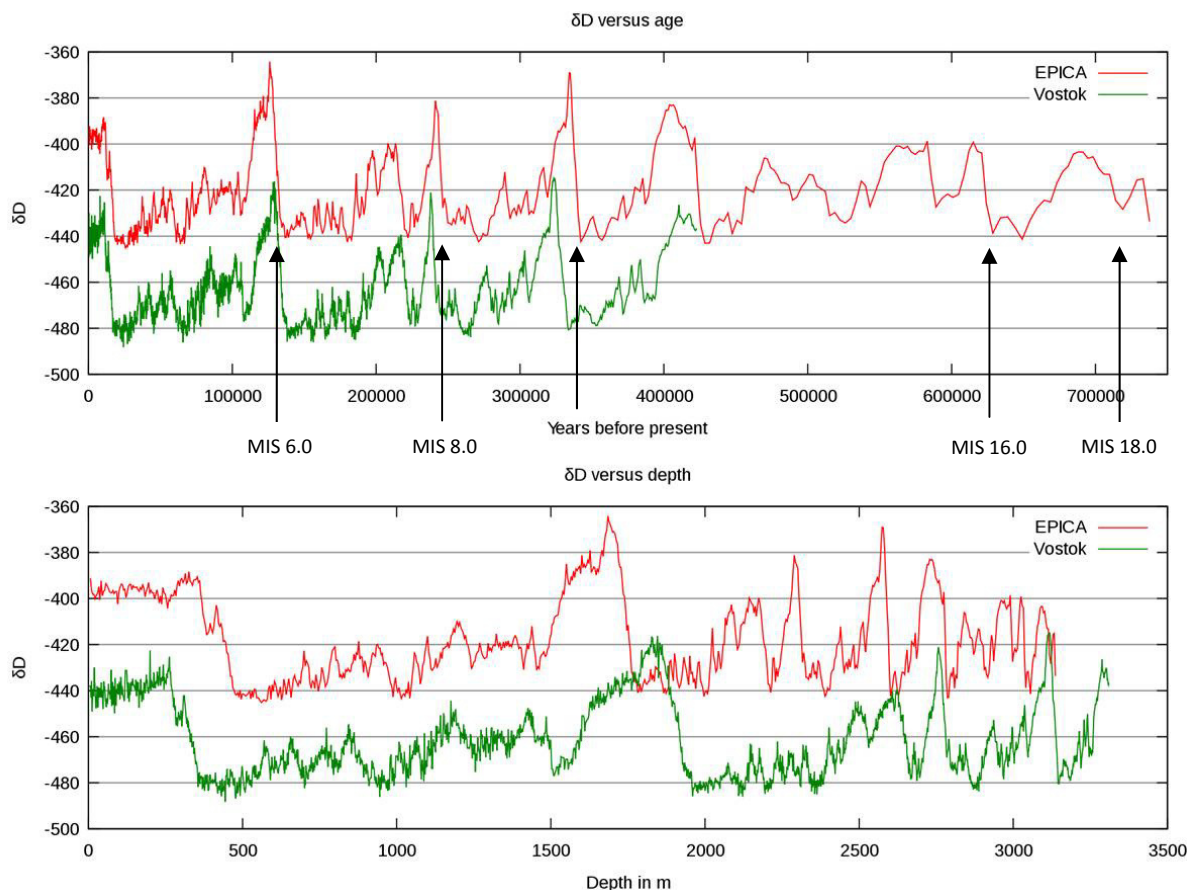


Abb. 2. δD -Profil des EPICA-Dome-C-Eiskerns im Vergleich zum Vostok-Eiskern. Die Signatur mit der Tiefe (untere Grafik) ist bis etwa 1700 m Tiefe identisch. Durch (klimato-)stratigraphische Korrelation werden die Profile zeitlich in Beziehung gesetzt, sodass die obere Grafik eine weitgehende Übereinstimmung über vier Intervalle (interpretiert als Glazialzyklen) erkennen lässt. Ein Glazialzyklus (Kalt-/Warmzeit) ist definiert als zwei MIS-Einheiten. Die fünf Ankerpunkte („Kontrollpunkte“, vgl. Textteil) sind mit Pfeilen markiert. Die Lage der „Kontrollpunkte“ MIS 8.0 und MIS 10.0 (vgl. EPICA COMMUNITY MEMBERS 2004, Fig. 2b, dort markiert durch Diamantensymbole) ist durch den Verfasser korrigiert worden.

(Grafik: NOAA, http://en.wikipedia.org/wiki/File:EPICA_delta_D_plot.svg; nach *Epica_18_plot.png*; Pfeile und MIS-Angaben durch Verfasser ergänzt. Quelle: ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/epica_domec/edc_dd.txt).

Der Datierung des EDC99-Eiskerns gingen zahlreiche Datierungen zuvor gewonnener Eiskerne aus dem antarktischen Inlandeis voraus (z. B. Byrd, Vostok). Die Eiskernbearbeiter haben zahlreiche, sich ergänzende physikalische Modelle/Eisflussmodelle entwickelt, um Eiskern-Zeitskalen (Chronologien) zu konstruieren. Über diese Verfahren wird für jeden Eiskern ein Alters-zu-Tiefen-Modell aufgestellt, d. h. jedem Meter und Zentimeter der Eissäule wird ein rechnerisches Modellalter zugewiesen (siehe Anhang II).

⁷ Auch Sauerstoffisotopenstufen (OIS, oxygen isotope stages); Gliederung der abstrahierten Sauerstoffisotopen-Chronologie in Stufen (Oszillationen interpretiert als relativ wärmere bzw. relativ kältere Perioden) von der Gegenwart bis über die Pliozän/Pleistozän-Grenze hinaus (Grenze: Stufe 103), aktueller Standard LR04 (LISIECKI & RAYMO 2005). Es handelt sich um eine Weiterentwicklung der SPECMAP-Kurve (Spectral Mapping Projekt), eine in den 1980er-Jahren entwickelte Standardchronologie/-zeitskala für den Sauerstoffisotopenbericht mariner Sedimente. Die jeweiligen (Komposit-)Kurven sind radiometrisch geeicht, geglättet, gefiltert und auf astronomische Zyklen getunet (eingephasst).

⁸ Termination: abrupter Wechsel („abrupt shift“) von niedrigen zu hohen Isotopenwerten; werden als Wechsel von glazialen (kalten) zu interglazialen (warmen) Episoden interpretiert; nomenklatorisch durchnummeriert mit geraden x.0-Werten.

a) EDC2-Chronologie

Die Vorgehensweise – insbesondere die Modelle, die für die Datierung des EDC99-Eiskerns herangezogen wurden und zu einem Alter von 740.000 Jahren führten – wird im Methodenteil nach dem eigentlichen Artikel (EPICA COMMUNITY MEMBERS 2004, 627) sowie dem Zusatzmaterial dargelegt; in dieser Reihenfolge (gekürzt):

- Die Berechnung einer (angenommenen) Ausdünnung mit der Tiefe mittels eines Eisflussmodells (nach RITZ 1992), mit vorgegebenen Eisschildhöhen über NN. Hierbei fließen zwei unzureichend bekannte („*poorly known*“) Parameter ein: Die Schmelzrate F [mm/a] im Untergrund an der Basis des Eisschildes sowie ein Parameter m für die Vertikalkomponente.
- Die Berechnung der Akkumulationsrate A [cm/a Eis] mittels eines Kondensationsmodells.
- Anwendung eines Firnmodells zur Anpassung Gasalter/Eisalter.
- Die unzureichend bekannten („*poorly known*“) Parameter (F , m , A_0 sowie einer Konstanten β) der Modelle bzw. deren Werte werden abgeschätzt durch Übernahme bereits datierter Kontrollpunkte- bzw. Kontrollfenster (siehe Tab. 2, Anhang III).

Tatsächlich erfolgt aber die Konstruktion hierarchisch. Denn ohne eine vorherige Alterseichung ist eine Konstruktion nicht möglich.

1. Korrelation (klimatostratigraphisch). Abgleich der δD -Kurve des EDC-Eiskerns mit der marinen Isotopenkurve (MIS) und Feststellung eines weitestgehend ähnlichen Verlaufs (vgl. EPICA COMMUNITY MEMBERS 2004, Fig. 2; JOUZEL et al. 2007, Fig. 1). Mit der Korrelation markanter Abschnitte/Ausschläge (Peaks) wird von zeitgleichen Bildungen ausgegangen. Beide Kurven werden klimatisch interpretiert.
2. Übernahme radiometrisch geeichter Altersfixpunkte (Anker, siehe oben „Kontrollpunkte“ bzw. „Kontrollfenster“). Es werden drei Fixpunkte der EDC1⁹-Skala sowie fünf Fixpunkte der marinen Isotopenkurve MIS (aus BASSINOT et al. 1994) auf konkrete Ereignispunkte der EDC99-Eissäule übertragen. Mit diesen radiometrisch geeichten Fixpunkten erfolgt die Konstruktion einer zentimeter- bzw. „jahrgenaue“ Tiefen-zu-Alters-Beziehung unter Anwendung mehrerer physikalischer Modelle.
3. Feinadjustierung.

b) EDC3-Chronologie

PARRENIN et al. veröffentlichten 2007 eine neue Chronologie des EPICA-Dome-C-Eiskerns (EDC99) mit der Bezeichnung EDC3. Die Vorgehensweise wird schlicht umrissen; EDC3 „*basiert auf eine Anwendung eines 1) Schneeakkumulations- und mechanischen Flussmodells und 2) einem Set unabhängiger Altersmarker entlang des Eiskerns*“ (S. 485). Alle Marker (Tab. 3, Anhang III) > 1000 Jahre sind allerdings radiometrisch begründet, d.h. von einer radiometrischen Zeitskala abgeleitet. Sie sind deshalb auch nicht „unabhängig“. Die Autoren weiten die Skala auf 800.000 [radiometrische] Jahre aus.

c) Vostok-Chronologie

PETIT et al. (1999, 432) nennen drei Basisannahmen zur Konstruktion der glaziologischen Zeitskala GT4¹⁰ des Vostok-Eiskerns. Die dritte besagt, dass der Vostok-Eiskern in einer Tiefe von 1.534 m mit der marinen Isotopenstufe (MIS) 5.4 (110 ka) und in einer Tiefe von 3.254 m mit der Stufe 11.2.4 (390 ka) korrespondiert. Das heißt, dass die GT4-Zeitskala – wie auch in wesentlichen Teilen die EDC2-Zeitskala – an der radiometrisch begründeten MIS-Skala geeicht wurde.

⁹ EDC1 ist eine frühere Chronologie und bezieht sich auf eine erste Bohrung (EDC96) an der Dome C Station, die 1999 in 788 m Tiefe abgebrochen werden musste (SCHWANDER et al. 2001). Die EDC2-Chronologie ist die an dieser Stelle behandelte Tiefbohrung (EDC99) der EPICA-Veröffentlichung in 2004.

¹⁰ GT4: Glaciological Timescale four cycles; glaziologische Zeitskala, die vier Glazialzyklen umfasst.

Fazit – Es gibt einen Unterschied

Das älteste Eis, erbohrt an der Station Dome C und gefördert aus einer Tiefe von knapp 3300 m, ist nicht 800.000 Jahre (Basis: PARRENIN et al., 2007), sondern 800.000 **radiometrische** „Jahre“ alt. Die Vorgehensweise der Eiskernbearbeiter zeigt, dass keine eigenständige, unabhängige und absolute Datierungsmethode entwickelt wurde, sondern eine Sekundäranwendung vorliegt, die das radiometrische Altersgerüst als essentielle Grundlage nutzt. Dies trifft auf alle Lang-Chronologien von Eiskernen der Antarktis und des grönländischen Eisschildes (vgl. KOTULLA 2013) zu.

Da nicht bekannt ist, in welcher Beziehung radiometrische Alter dieser Größenordnungen zum realen Alter stehen (vgl. weitere Beiträge dieser Loseblattsammlung), können radiometrische Alter nicht mit realem Alter gleichgesetzt werden. Die Altersangaben zu den Eiskernen ohne Ausweis der Annahmen und der (mittel- oder unmittelbar) zugrundeliegenden Datierungsmethoden, also ohne entsprechende Kennzeichnung, sind irreführend.

Anhang I: Karte der Antarktis

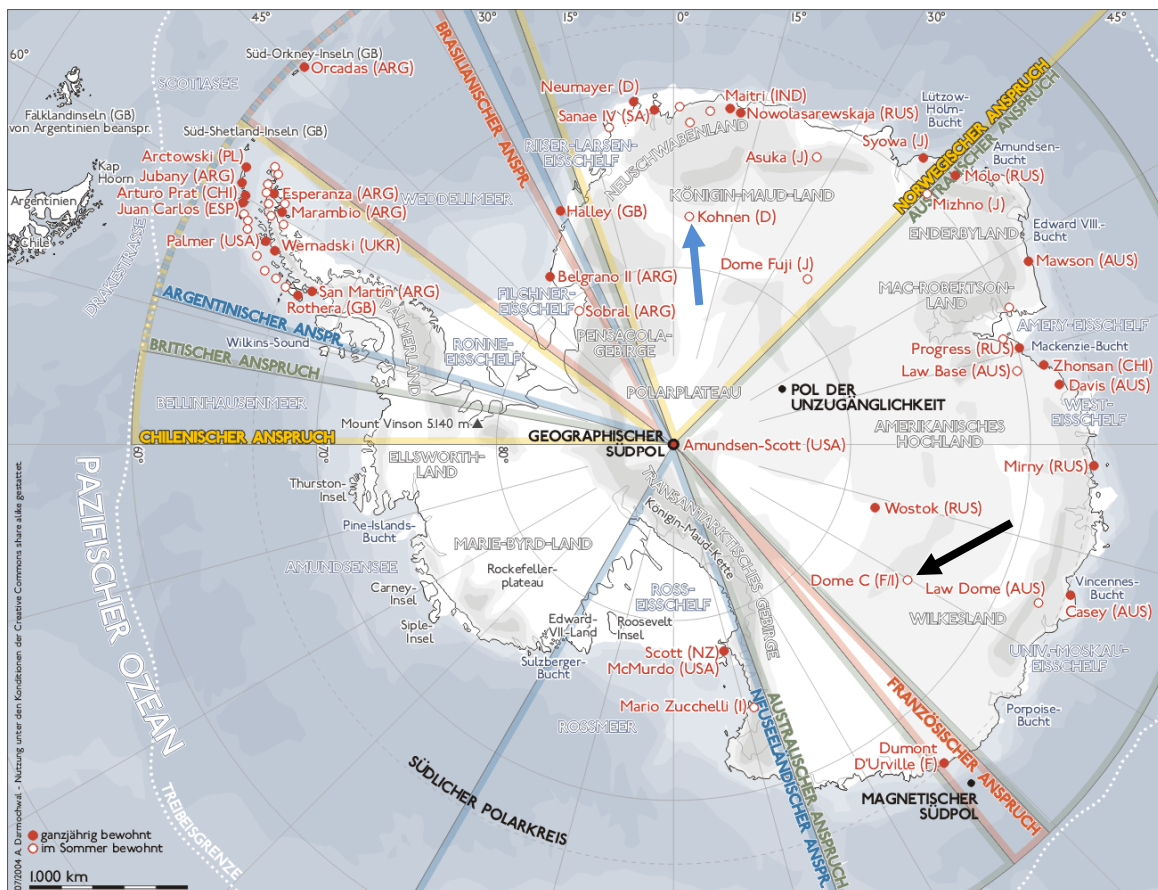


Abb. 3 Antarktis mit Forschungsstationen, u. a. Dome C (F/I) (schwarzer Pfeil) und Kohlen (D) (blauer Pfeil), Stand 2004. (Grafik: Sansculotte, 2004; commons.wikimedia.org: File:Karte antarktis2.png)

Anhang II: Eisflussmodelle

Es werden hauptsächlich 1-dimensionale Modelle angewendet, die die (angenommene) zunehmende Ausdünnung mit der Tiefe als auch die Eisschmelze im Untergrund beschreiben. Nach FISCHER et al. (2013, 2491) ist das Altersprofil (Alters-zu-Tiefen-Beziehung) durch das Integral

$$t(z) = \int_H^z \frac{-1}{\left(A - \frac{\partial H}{\partial t} - M\right) \left(\frac{z}{H}\right)^{m+1} + M} dz \quad (1)$$

gegeben, wobei A die Akkumulationsrate ist, M die Schmelzrate (beide Größen in Meter Eisäquivalente p. a.), H die Eisdicke, z die Höhe über dem Untergrund und m ein adjustierbarer Faktor (nahe 0,5). Die Kurve hat einen exponentiell fallenden Verlauf.

Entscheidend ist, dass die Größen A , M und H der Gleichung (1) alle Funktionen der Zeit sind und angenommen wird, dass diese über die verflossene Zeit konstant waren.¹¹ Hierüber wird also kein Nachweis erbracht. Eine signifikant höhere und wechselnde Niederschlagsrate in der Vergangenheit könnte das Modell in dieser Form nicht abbilden. Höhere Niederschlagsraten würden auf jeden Fall (ohne Abänderung der anderen Parameter) zu jüngeren Alterswerten führen.

Für den EDC-Eiskern wurden folgende Durchschnittswerte zu Grunde gelegt: $A = 0,0181$ m Eisäquivalent p. a., $H = 3151$, $m = 0,5$, T_s 213 K [−60°C] Oberflächentemperatur als wichtiger Parameter für eine Berechnung von M). Mit diesen Werten wurde eine gute Übereinstimmung mit der EDC3-Zeitskala (PARRENTIN et al. 2007) erzielt.

Die auf Basis der Modelle hergeleitete Ausdünnung ist extrem hoch. An Abb. 2 können Circa-Werte mittelbar abgelesen werden. Für den Tiefenbereich 3100-3000 m repräsentieren durchschnittlich etwa 1,0 mm ein „Jahr“; im Vergleich zur Oberfläche (Äquivalent von ca. 25 mm) beträgt der Faktor >20 (95%-Volumenverlust durch seitliches „Abfließen“). Dieser Tiefenabschnitt alleine repräsentiert 100.000 Eiskernjahre.¹²

Anhang III: Korrelations- bzw. Eich Tabellen

Bohrtiefe [m]	Übernahme stratigraphischer Fixpunkte - Korrelation mit ...	Übernahme Alter [radiometrische Jahre]	Referenzen
233	Von EDC 1: Vulkanisches Ereignis, Korrelation mit Vostok-Eiskern (GT4-Zeitskala)	7135 ± 100	Petit et al. 1999
374	Von EDC1: Korrelation mit Ereignis des Byrd-Eiskerns	12390 ± 400	Blunier et al. 1998
740	Von EDC1: Isotopenspitze von ¹⁰ Be (koreliert mit geomagnetischem Ausschlag des Laschamp-Ereignisses, U/Th-datiert)	41 ± 2 k	Schwander et al. 2001
1738	Termination II (MIS 6.0)	131 ± 6 k	Bassinot et al. 1994
2311	Termination III (MIS 8.0)	245 ± 6 k	"
2593	Termination IV (MIS 10.0)	338 ± 6 k	"
3038	Termination VII (MIS 16.0)	626 ± 6 k	"
3119	Termination VIII (MIS 18.0)	717 ± 6 k	"

Tab. 2 Übernahme stratigraphischer Fixpunkte und deren radiometrische Alter (nach EPICA COMMUNITY MEMBERS 2004 und Ergänzung durch den Verfasser; Referenzen siehe dort; k = kilo).

¹¹ „Note that A , M and H are all functions of time. In the following, however, we will assume that A , M and H are constant in time but use their long-term temporal averages.“ (Fischer et al. 2013, 2491)

¹² Die Diskussion eines alternativen Modells ist nicht Gegenstand dieses Beitrages.

Bohrtiefe [m]	Übernahme stratigraphischer Fixpunkte - Korrelation mit ...	Übernahme Alter [radiometrische Jahre]	Referenzen
8,35-41,52	Zuweisung vulkanischer Eruptionen bekannten historischen Alters zu Sulfatausschlägen: 7 Ereignisse (Krakatau und älter, teilweise auch 'unbekannt')	AD 1884±1 - AD 1171±6	Castellano et al. 2005
107,8 181,1	Synchronisation mit GICC05 und INTCAL; Perioden großer ¹⁰ Be/ ¹⁴ C-Variationen	2716 yr BP 5279 yr BP	Reimer et al. 2004 Vinther et al. 2006 Udisti et al. 2004
361,5	Übernahme EDC96 (355,3 m): GICC05, CH ₄ -Profil	11,65 ± 0,32 kyr BP	Severi et al. 2007
427,2	Übernahme EDC96 (421,2 m): GICC05, CH ₄ -Profil	14,64 ± 0,34 kyr BP	Severi et al. 2007
740,1	Isotopenausschlag ¹⁰ Be, GICC05 und EDC96	41,2 kyr BP	Raisbeck et al. 2007
1265	Mount Berlin (Antarktis), Aschenlage Ar/Ar-datiert	92,5 kyr BP	Narcisi et al. 2006
1699	Termination II (MIS 6.0), rapides CH ₄ -Ereignis; U/Th-datierte Höllenspeleotheme	130,1 kyr BP	Yuan et al. 2004 Bar-Matthews et al. 2003
- 2790	Luftblasen-Profil, 10 Fixpunkte, orbital-getuned	- 440 kyr BP	Raynaud et al. 2007
2714-3199	δ ¹⁸ O _{atm} -Profil, 37 Fixpunkte, orbital-getuned	300-800 kyr BP	Dreyfus et al. 2007
3165	Brunhes/Matuyama-Polaritätswechsel, Marker in ¹⁰ Be-Bericht; radiometrisch datiert/orbital-getuned	785 kyr BP	Coe et al. 2004 Raisbeck et al. 2006

Tab. 3 Übernahme stratigraphischer Fixpunkte und deren radiometrische Alter (nach PARRENTIN et al. 2007 und Ergänzung durch den Verfasser; Referenzen siehe dort, BP = before present, vor 1950; yr = years, Jahre). Auch die auf astronomische Zyklen getuneten Reihen („orbital-tuned“), die GICC05-Zeitskala (grönländischer Eisschild; Greenland Ice Core Chronology) und die CH₄-Reihen sind radiometrisch begründet. Eine Ausnahme bilden die obersten Dekameter der Eissäule. Den Sulfatniederschlägen (erhöhte Sulfatkonzentrationen im Eiskern) werden Vulkaneruptionen zugewiesen, im oberen Teil von Ausbrüchen bekannten historischen Alters. Sulfatniederschläge hinterlassen aber keinen eindeutigen Fingerabdruck (im Gegensatz zu Aschenlagen, bei denen das Potential geochemischer Vergleiche besteht). Insofern ist kein Nachweis darüber erbracht worden, dass es sich tatsächlich um diese Ausbruchereignisse handelt (z. B. CASTELLANO et al. 2005).

Literatur

- BASSINOT FC, LABEYRIE LD, VINCENT E, QUIDELLEUR X, SHACKLETON NJ & LANCELOT Y (1994) The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal. *Earth Planet. Sci. Lett.* 126, 91–108.
- CASTELLANO E, BECAGLI S, HANSSON M, HUTTERLI M, PETIT JR, RAMPINO MR, SEVERI M, STEFFENSEN JP, TRAVERSI R & UDISTI R (2005) Holocene volcanic history as recorded in the sulfate stratigraphy of the European Project for Ice Coring in Antarctica Dome C (EDC96) ice core, *J. Geophys. Res.* 116, D06114, doi:10.1029/2004JD005259.
- EPICA COMMUNITY MEMBERS (2004) 8 glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* 429, 623–628.
- EPICA COMMUNITY MEMBERS (2006) One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature* 444, 195–198.
- FISCHER H, SEVERINGHAUS J, BROOK E, WOLFF E, ALBERT M, ALEMANY O, ARTHERN R, BENTLEY C, BLANKENSHIP D, CHAPPELLAZ J, CREYTS T, DAHL-JENSEN D, DINN M, FREZZOTTI M, FUJITA S, GALLEE H, HINDMARSH R, HUDSPETH D, JUGIE G, KAWAMURA K, LIPENKOV VF, MILLER H, MULVANEY R, PARRENIN F, PATTYN F, RITZ C, SCHWANDER J, STEINHAGE D, VAN OMMEN T & WILHELMS F (2013) Where to find 1.5 million yr old ice for the IPICS “Oldest-Ice” ice core. *Clim. Past* 9, 2489–2505.
- JOUZEL J, MASSON-DELMOTTE V, CATTANI O, DREYFUS G, FALOURD S, HOFFMANN G, MINSTER B, NOUET J, BARNOLA JM, CHAPPELLAZ J, FISCHER H, GALLET JC, JOHNSEN S, LEUENBERGER M, LOULERGUE L, LUETHI D, OERTER H, PARRENIN F, RAISBECK G, RAYNAUD D, SCHILT A, SCHWANDER J, SELMO E, SOUCHEZ R, SPAHNI R, STAUFFER B, STEFFENSEN JP, STENNI B, STOCKER TF, TISON JL, WERNER M & WOLFF EW (2007) Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years. *Science* 317, 793–796.
- KOTULLA M (2013) Grönländische Eiskerndaten und ihre Interpretation: Absolute Datierung durch Zählung von Jahresschichten? W+W Special Paper G-13-1, Baiersbronn.
- PARRENIN F, DREYFUS G, DURAND G, FUJITA S, GAGLIARDINI O, GILLET F, JOUZEL J, KAWAMURA K, LHOMME N, MASSON-DELMOTTE V, RITZ C, SCHWANDER J, SHOJI H, UEMURA R, WATANABE O & YOSHIDA N (2007) 1-D-ice flow modelling at EPICA Dome C and Dome Fuji, East Antarctica. *Clim. Past* 3, 243–259.
- LISIECKI LE & RAYMO ME (2005) A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic δ¹⁸O records. *Paleoceanography* 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071.

- PETIT JR, JOUZEL J, RAYNAUD D, BARKOV NI, BARNOLA J-M, BASILE I, BENDER M, CHAPPELLAZ J, DEVIS M, DELAYGUE G, DELMOTTE M, KOTLYAKOV VM, LEGRAND M, LIPENKOV VY, LORIUS C, PEPIN L, RITZ C, SALTZMAN E & STIEVENARD M (1999) Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429–436.
- RITZ C (1992) Un modèle thermo-mécanique d'évolution pour le bassin glaciaire Antarctique Vostok-Glacier Byrd: Sensibilité aux valeurs des paramètres mal connus. Thesis, University J. Fourier.
- SCHWANDER J, JOUZEL J, HAMMER CU, PETIT J-R, UDISTI R & WOLFF E (2001) A tentative chronology for the EPICA Dome Concordia ice core. *Geophysical Research Letters* 28, 4243-4246.