

**Zeitschrift:** Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern  
**Herausgeber:** Naturforschende Gesellschaft in Bern  
**Band:** 69 (2012)

**Artikel:** Klimabotschaften aus dem ewigen Eis  
**Autor:** Fischer, Hubertus  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-389784>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 24.12.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

HUBERTUS FISCHER<sup>1</sup>

# Klimabotschaften aus dem ewigen Eis

## Zusammenfassung des Vortrags vom 26. Juli 2011

Infolge der Industrialisierung im Verlauf der letzten Jahrhunderte begann der Mensch zunehmend Umweltressourcen aufzubrauchen und sich dabei immer weiter von geschlossenen Stoffkreisläufen und einer nachhaltigen Entwicklung zu entfernen. Dies schlägt sich in der jüngsten Vergangenheit in einer Vielzahl von Umweltproblemen nieder, beispielsweise dem Rückgang der Artenvielfalt, steigender Luft- und Wasserverschmutzung oder der zunehmenden Verknappung von elementaren Lebensgrundlagen (Nahrung, Energie, Wasser usw.). Eines der dabei herausragenden Probleme, denen sich unsere Gesellschaft heute gegenüber sieht, ist der globale Klimawandel, verursacht durch die anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen. Dieser Klimawandel kann langfristig wiederum andere der oben genannten Umweltprobleme verstärken.

Um die Auswirkungen der anthropogenen Klimaveränderung einzuschätzen zu können, benötigen wir neben der Voraussage der zukünftigen Klimaentwicklung mithilfe von Computermodellen auch die Rekonstruktion der natürlichen vorindustriellen Klimavariabilität. Neben der Dokumentation der Klimaveränderungen in der Vergangenheit ist hier das Verständnis der Prozesse, die zu solchen Klimaänderungen geführt haben (z.B. die Rolle der Treibhausgase), von grosser Bedeutung. Weiterhin ist die Kenntnis der Klimasensitivität unterschiedlicher Teile des Erdsystems (z.B. Ozeanzirkulation, Land- und Meereisbedeckung, Vegetation) für die Einschätzung möglicher zukünftiger Veränderungen essenziell.

Direkte Messungen der Temperatur stehen global aber nur über die letzten 150 Jahre, direkte atmosphärische Messungen des Treibhausgases Kohlendioxid nur über die letzten 50 Jahre und Methan-Messungen sogar nur über die letzten rund 30 Jahre zur Verfügung. Aufgrund dieser zeitlich sehr limitierten Abdeckung direkter Klimabeobachtungen können die natürlichen Veränderungen der Temperatur und der Treibhausgase nur anhand von sensitiven Umweltbeobachtungen und mithilfe natürlicher Klimaarchive rekonstruiert werden.

<sup>1</sup> Hubertus Fischer, Klima- und Umweltphysik, Physikalisches Institut & Oeschger Centre für Klimafolgenforschung, Universität Bern

## Einfluss des Klimas auf Gletscher und Eisschilde

Die kontinentalen Eismassen der Erde (alpine Gletscher, die Eisschilde der Arktis und Antarktis) liefern sensitive Aufzeichnungen der Klimaveränderungen in der kürzeren Vergangenheit sowie über viele Eiszeit/Warmzeit-Zyklen.

Gletscher und Eisschilde bilden einen wichtigen Bestandteil des Erdsystems, die sogenannte Kryosphäre. Deren Grösse und damit deren eingeschlossene Eismasse hängen sensitiv von Änderungen in Temperatur und Niederschlag ab. Die Massenänderung eines Gletschers mittelt dabei über längerfristige Änderungen der Klimabedingungen. Glaziologische Studien an Gletschern in mittleren Breiten zeigen dabei, dass bei einem Gletscherrückzug der Massenverlust durch sommerliches Schmelzen dominiert wird und nicht durch potenziell höhere Schneefälle im Winter kompensiert werden kann. Es zeigt sich deshalb weltweit, dass alpine Gletscher in den vergangenen 150 Jahren aufgrund der Erwärmung deutlich geschrumpft sind (OERLEMANS, 2005). In der Schweiz kann jeder diesen Rückgang einer Vielzahl von Gletschern selbst beobachten. Erwärmt sich das Klima so stark, dass der über die gesamte Gletscheroberfläche im Winter gefallene Schnee im darauffolgenden Sommer abschmilzt, verschwindet der betroffene Gletscher längerfristig vollständig.

Der Rückgang alpiner Gletscher führt zwangsläufig auch zum Anstieg des Meeresspiegels. Jedoch sind nur etwa 0,3% der weltweiten Eismassen in alpinen Gletschern gebunden, und so ist deren langfristiger Einfluss auf den Meeresspiegel begrenzt. Schon heute ist der Einfluss der thermischen Ausdehnung des Ozeans durch die klimabedingte Erwärmung des Meerwassers etwa zweimal grösser als der Einfluss des Schmelzens alpiner Gletscher (IPCC, 2007). Eine viel grössere Auswirkung auf den Meeresspiegel hätte langfristig jedoch ein Abschmelzen der polaren Eisschilde. So würde ein vollständiges Verschwinden des grönländischen Eisschildes (welches allerdings einige Tausend Jahre dauern würde) eine Meeresspiegeländerung von rund 5 m verursachen. Im gesamten antarktischen Eisschild ist sogar ein Meeresspiegeläquivalent von etwa 70 m gebunden. Hochpräzise Beobachtungen der Massenbilanz der grossen Eisschilde sind somit unerlässlich, um die Gefahren eines polaren Eisrückgangs beurteilen zu können.

Traditionelle glaziologische Feldstudien wurden schon seit Alfred de Quervain's Grönlanddurchquerung im Jahr 1912 durchgeführt, wobei die heutigen technischen und logistischen Möglichkeiten der luft- und bodengestützten Polarforschung das Einzugsgebiet solcher Studien beträchtlich vergrössern. Dennoch ist eine flächendeckende Untersuchung beispielsweise des gesamten antarktischen Kontinents mithilfe von Feldstudien auch heute nicht möglich. Satellitengestützte Vermessungstechniken (Gravimetrie, Laser- und Radaraltimetrie) gestatten heutzutage jedoch eine präzise Beobachtung der polaren Eisschilde. Diese Messungen zeigen, dass auch die polaren Eisschilde heute bereits geringfügig zu einem Meeresspiegelanstieg beitragen (IPCC, 2007). Dabei beschränkt sich der Massenverlust in Grönland noch auf die Randgebiete (Abb. 1 a), die vom Schmelzen im Sommer

beeinflusst sind (Pritchard et al., 2009). In der Westantarktis, in der es noch nicht zu Massenverlust durch Schmelzen kommt, sind es zunehmende Eis-Fliessgeschwindigkeiten (Pritchard et al., 2009), die zu einem Ausdünnen des Eisschildes führen (Abb. 1 b). Eine zunehmende Erwärmung wird die Rolle Grönlands und der Antarktis für den Meeresspiegel zukünftig noch weiter ansteigen lassen.

## Klimageschichte aus Eisbohrkernen

Die Eismassen der Erde haben noch weit mehr Klimainformation zu bieten als nur die zeitliche Änderung ihrer Gesamtmasse. So stellen Gletscher und vor allem die polaren Eisschilde eines der besten natürlichen Klimaarchive dar. Denn trotz der schier unfassbaren Grösse dieser Eisschilde bestehen die Eismassen dennoch nur aus der Gesamtheit aller Schneefälle in der Vergangenheit, die übereinandergeschichtet archiviert sind und somit mit zunehmender Tiefe im Eis immer älter werden. Diese Abfolge von chronologisch geordneten Niederschlägen lässt sich durch Eis kernbohrungen erschliessen. In den einzelnen Schichten werden neben der Menge des jährlichen Niederschlags auch Informationen zur Temperatur zum Zeitpunkt des Niederschlags (kodiert in der Veränderung des Verhältnisses stabiler Wasserisotope) sowie luftgetragene Aerosolteilchen (z.B. Russ, Meersalz, Wüstenstaub, anthropogene Luftverschmutzung, Vulkanemissionen) deponiert. Änderungen der Aerosolkonzentrationen geben Aufschluss über die Klimabedingungen in den Quellgebie-

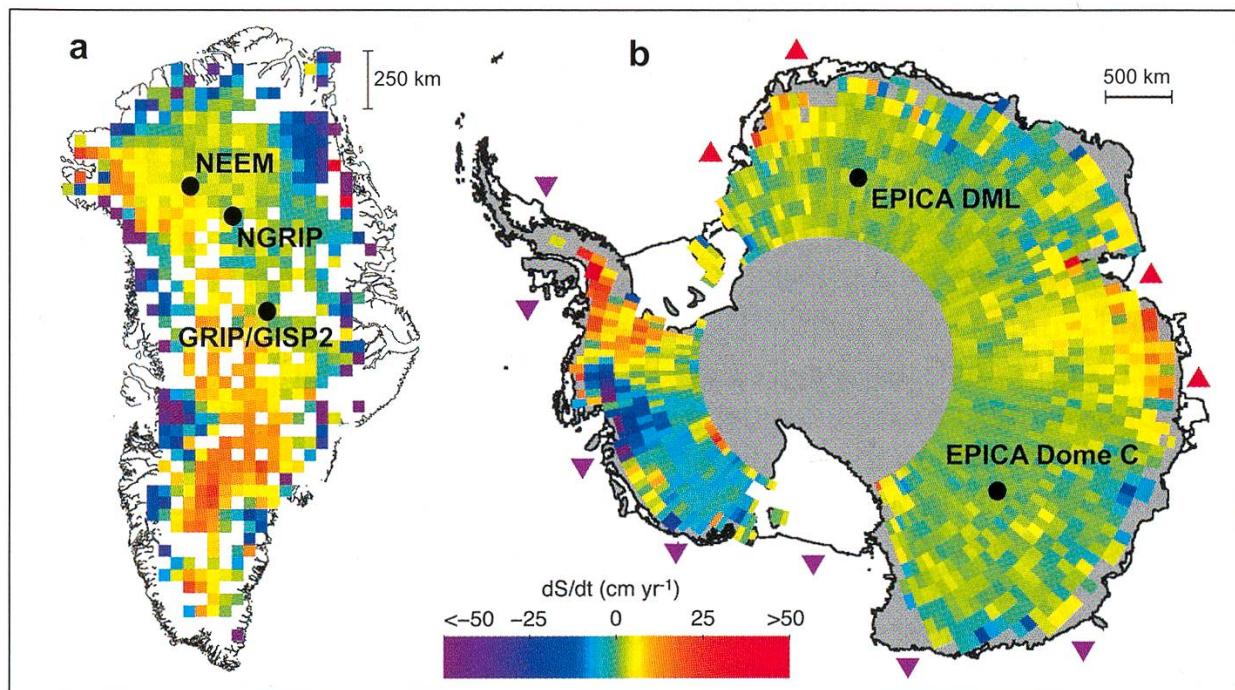


Abbildung 1: Zeitliche Änderung der Eisoberfläche in Grönland (a) und der Antarktis (b) aus Satellitenmessungen (farbkodiert, blau: Abnahme der Eishöhe, rot: Zunahme der Eishöhe). Schwarze Punkte geben die Position einiger der wichtigsten Eisbohrungen an. (Abbildung adaptiert von IPCC, 2007).

ten dieser Aerosole sowie über Veränderungen der Atmosphärenzirkulation, die zum Transport dieser Aerosole zu den Eisschichten führt. Hochauflösende Messungen der Wasserisotope und der Aerosolkonzentrationen gestatten weiterhin, Eiskerne durch Abzählen von Jahresschichten zu datieren.

Einzigartig in polaren Eiskernen ist vor allem aber die Information, die aus kleinen, im Eis eingeschlossenen Luftblasen gewonnen werden kann. Nur in diesen Blasen ist die Atmosphärenzusammensetzung der Vergangenheit direkt archiviert. Durch Extraktion der Gase aus den Luftblasen lassen sich beispielsweise auch die Treibhausgas-Konzentrationen der Vergangenheit bestimmen.

Eiskernstudien wurden in den letzten 50 Jahren sowohl in Grönland als auch in der Antarktis durchgeführt (Abb. 1). Der längste Eiskern in Grönland (North Greenland Ice Core Project – NGRIP) reicht etwa 124 000 Jahre und damit gerade bis zum Ende der letzten Warmzeit zurück (North Greenland Ice Core Project members, 2004). In der Antarktis konnte im Rahmen des «European Project for Ice Coring in Antarctica» (EPICA) sogar ein Eiskern erbohrt werden, der 800 000 Jahre Klimgeschichte überdeckt und somit die Klimaänderungen der letzten acht Eiszeit/Warmzeit-Zyklen, die jeweils rund 100 000 Jahre dauerten, gespeichert hat (EPICA COMMUNITY MEMBERS, 2004; JOUZEL et al., 2007).

Einer der wichtigsten Klimaparameter, die an Eisbohrkernen bestimmt werden, ist das Verhältnis der stabilen Wasserisotope im Eis ( $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ ,  $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ ). Dieses Verhältnis ist eng an die Temperatur über dem Eisschild gekoppelt. Messungen des Isotopenverhältnisses zeigen, dass die Temperatur der Antarktis im Verlauf der letzten Eiszeiten rund 8–9 °C kälter war als heute (Abb. 2 b). Vergangene Warmzeiten waren teilweise kälter oder in Ausnahmefällen auch etwas wärmer als heute (EPICA COMMUNITY MEMBERS, 2004; JOUZEL et al., 2007). Auch Eiskernmessungen in Grönland zeigen (Abb. 2 c), dass das Ende der letzten Warmzeit vor etwa 125 000 Jahren etwas wärmer war als heute (NORTH GREENLAND ICE CORE PROJECT MEMBERS, 2004).

Die Warmzeit/Eiszeit-Temperaturänderungen liefern dabei aber auf Zeitskalen von Jahrtausenden ab, also deutlich langsamer als der heutige Klimawandel. In Grönland wurden in der letzten Eiszeit aber auch sehr schnelle Klimaänderungen beobachtet (NORTH GREENLAND ICE CORE PROJECT MEMBERS, 2004). Diese werden nach zwei der wichtigsten Pioniere der Eiskernwissenschaften Dansgaard/Oeschger-Ereignisse genannt. Während dieser Dansgaard/Oeschger-Ereignisse (Abb. 2 c) änderte sich die Temperatur in Grönland in nur wenigen Jahrzehnten um 10–15 °C (HUBER et al., 2006). Dies erscheint zwar deutlich schneller als der heutige Klimawandel, allerdings sind diese schnellen natürlichen Klimaänderungen nur ein Phänomen der Eiszeiten und können so nicht mit dem heutigen Klimawandel verglichen werden. Darüber hinaus ist der heutige Klimawandel deshalb so einzigartig, da er global komplex vernetzte Gesellschaften mit einer Gesamtbevölkerung von mehr als 8 Milliarden Menschen trifft.

Die in Eiskernen dokumentierten Änderungen der Treibhausgase Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Methan ( $\text{CH}_4$ ) über die letzten 800 000 Jahre zeigen, dass Temperatur

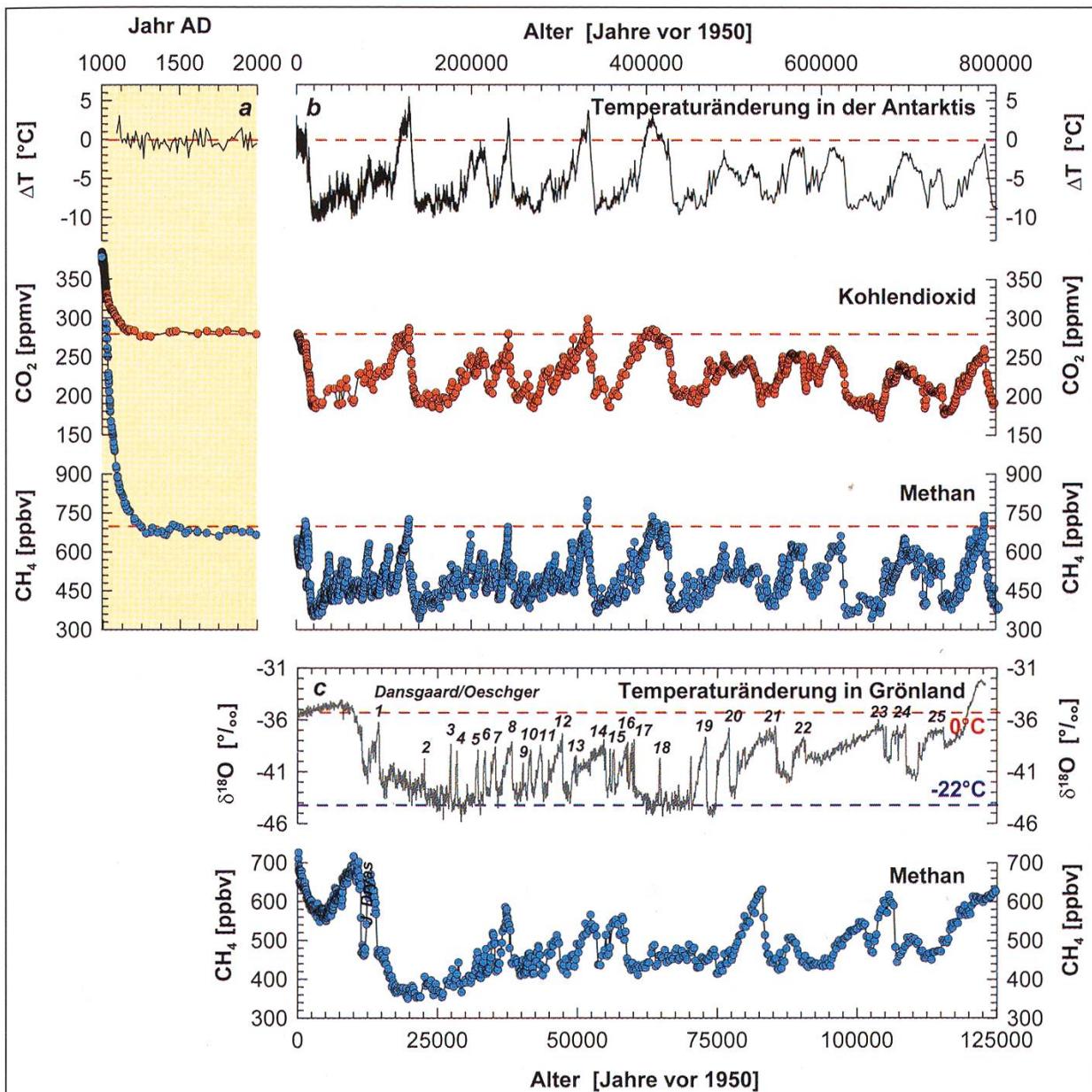


Abbildung 2: a) Temperatur in der Antarktis (aus Wasserisotopen-Messungen) und Kohlendioxid- bzw. Methanzunahme über die letzten 1000 Jahre. b) Temperatur in der Antarktis (aus Wasserisotopen-Messungen) und natürliche Kohlendioxid- bzw. Methan-Konzentrationen über die letzten 800000 Jahre. c) Wasserisotopen-Temperatur in Grönland und natürliche Methankonzentrationen über die letzten 125000 Jahre. Die Nummerierung gibt die Zahl der Dansgaard/Oeschger Ereignisse an.

und Treibhausgase eng aneinander gekoppelt sind (Abb. 2 b). Wie unsere Eiskernmessungen zeigen, variieren die Treibhausgase vorindustriell zwischen gut definierten natürlichen Grenzen (LOULORGUE et al., 2008; LÜTHI et al., 2008; MONNIN et al., 2001; SCHILT et al., 2010), im Fall von  $\text{CO}_2$  zwischen etwa 180 ppmv (ein Volumenanteil  $\text{CO}_2$  in einer Million Volumenanteilen Luft) während Eiszeiten und 280 ppmv während Warmzeiten (Abb. 2 b). Methan ist zwar rund 200-fach geringer konzentriert in der Atmosphäre als  $\text{CO}_2$ , aber jedes einzelne Methanmolekül ist etwa 30-mal stärker treibhausaktiv als ein  $\text{CO}_2$  Molekül.  $\text{CH}_4$  variierte zwischen

350 ppbv (ein Volumenanteil  $\text{CH}_4$  in einer Milliarde Volumenanteilen Luft) im Verlauf von Eiszeiten und rund 700 ppbv während Warmzeiten (Abb. 2 b&c).

Die Eiskernmessungen zeigen unmissverständlich, dass die natürlichen Treibhausgaskonzentrationen in den letzten 800 000 Jahren nie auch nur annähernd so hoch waren wie heute (Abb. 2 a&b). 2010 wurden mittlere  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen von 385 ppmv und  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen von 1750 ppbv gemessen, das heisst, die heute vom Menschen verursachten Treibhausgas-Konzentrationen sind im Fall von  $\text{CO}_2$  mehr als 30% höher als vorindustriell und im Fall von  $\text{CH}_4$  sogar mehr als 150% höher.

Neben den langfristigen Glazial/Interglazial-Änderungen zeigen die  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen auch kleinere Schwankungen auf Zeitskalen von mehreren Jahrhunderten bis Jahrtausenden. Diese sind eng gekoppelt mit den Klimabedingungen im Südozean, der eine entscheidende Rolle für die natürliche Variation der  $\text{CO}_2$ -Konzentration spielt (FISCHER et al., 2010; SCHMITT et al., 2012). Die  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen zeigen weiterhin den Einfluss der schnellen Dansgaard/Oeschger-Ereignisse auf den Methankreislauf und hier insbesondere auf die Methanproduktion in Feuchtgebieten der niederen und hohen Breiten (FISCHER et al., 2008; FLÜCKIGER et al., 2004). Hier erhöhen sich die  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen zeitgleich mit den schnellen Erwärmungen um 100–250 ppbv.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die letzten zwei Jahrzehnte brachten völlig neue Einblicke in das Klimageschehen und insbesondere in die Reaktion der kontinentalen Eismassen auf den Klimawandel der letzten 150 Jahre. Mit Sicherheit gehörten die letzten 20 Jahre auch zu den erfolgreichsten auf dem Gebiet der Eiskernforschung. Aber noch immer gibt es wichtige Fragen, die nur durch neue Eisbohrkerne beantwortet werden können. So fehlt immer noch ein Eisbohrkern aus Grönland, der die Klimaentwicklung im Verlauf der gesamten letzten Warmzeit dokumentiert. Ein solcher Kern wäre notwendig, um die Reaktion des grönlandischen Eisschildes in einer wärmeren Welt der Vergangenheit direkt beobachten zu können. Mit dem NEEM Eisbohrkern (Abb. 1 a), der erfolgreich im Jahr 2010 erbohrt wurde, steht noch älteres Eis als im NGRIP-Eiskern zur Verfügung. Allerdings scheint die zeitliche Abfolge der Niederschlagsereignisse in diesem tiefsten Eis gestört zu sein.

Auch in der Antarktis stehen neue grosse Herausforderungen in der Eiskernforschung bevor. Ein wichtiges Zeitintervall ist der Übergang von Eiszeit/Warmzeit-Zyklen mit einer Periodizität von 40 000 Jahren auf eine Periodizität von 100 000 Jahren. Dieser Übergang erfolgte vor 1–1,5 Millionen Jahren. Warum sich zu diesem Zeitpunkt der Takt der Eiszeit/Warmzeit-Zyklen änderte, ist noch völlig unverstanden. Nur ein Eiskern, der über die letzten 1,5 Millionen Jahre zurückreicht, kann beantworten, welche Rolle die Treibhausgas-Konzentrationen für diese Veränderung hatten. Die internationale Eiskernforschergemeinschaft hat

einen solchen Eiskern aus der Antarktis als oberstes Ziel für das nächste Jahrzehnt erklärt, und die schweizerische Eiskernforschung hofft, hier an vorderster Stelle mitzuwirken.

## Literatur

- EPICA COMMUNITY MEMBERS. (2004). Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* 429, 623–628.
- FISCHER, H., BEHRENS, M., BOCK, M., RICHTER, U., SCHMITT, J., LOUERGUE, L., CHAPPELLAZ, J., SPAHNI, R., BLUNIER, T., LEUENBERGER, M., AND STOCKER, T. F. (2008). Changing boreal methane sources and constant biomass burning during the last termination. *Nature* 452, 864–867.
- FISCHER, H., SCHMITT, J., LÜTHI, D., STOCKER, T. F., TSCHUMI, T., PAREKH, P., JOOS, F., KÖHLER, P., VÖLKER, C., GERSONDE, R., BARBANTE, C., LE FLOC'H, M., RAYNAUD, D., AND WOLFF, E. (2010). The role of Southern Ocean processes in orbital and millennial CO<sub>2</sub> variations – A synthesis. *Quaternary Science Reviews* 29, 193–205.
- FLÜCKIGER, J., BLUNIER, T., STAUFFER, B., CHAPPELLAZ, J., SPAHNI, R., KAWAMURA, K., SCHWANDER, J., STOCKER, T. F., AND DAHL-JENSEN, D. (2004). N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> variations during the last glacial epoch: Insight into global processes. *Global Biogeochemical Cycles* 18, doi:10.1029/2003GB002122.
- HUBER, C., LEUENBERGER, M., SPAHNI, R., FLÜCKIGER, J., SCHWANDER, J., STOCKER, T. F., JOHNSON, S., LANDAIS, A., AND JOUZEL, J. (2006). Isotope calibrated Greenland temperature record over Marine Isotope Stage 3 and its relation to CH<sub>4</sub>. *Earth and Planetary Science Letters* 243, 504–519.
- IPCC (2007). «Climate change 2007 – The physical science basis.» Cambridge University Press, Cambridge.
- JOUZEL, J., MASSON-DELMOTTE, V., CATTANI, O., DREYFUS, G., FALOURD, S., HOFFMANN, G., MINSTER, B., NOUET, J., BARNOLA, J.-M., CHAPPELLAZ, J., FISCHER, H., GALLET, J. C., JOHNSON, S., LEUENBERGER, M., LOUERGUE, L., LÜTHI, D., OERTER, H., PARRENIN, F., RAISBECK, G., RAYNAUD, D., SCHWANDER, J., SPAHNI, R., SOUCHEZ, R., SELMO, E., SCHILT, A., STEFFENSEN, J. P., STENNI, B., STAUFFER, B., STOCKER, T. F., TISON, J.-L., WERNER, M., AND WOLFF, E. W. (2007). Orbital and millennial Antarctic climate variability over the last 800,000 years. *Science* 317, 793–796.
- LOUERGUE, L., SCHILT, A., SPAHNI, R., MASSON-DELMOTTE, V., BLUNIER, T., LEMIEUX, B., BARNOLA, J.-M., RAYNAUD, D., STOCKER, T. F., AND CHAPPELLAZ, J. (2008). Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH<sub>4</sub> over the past 800,000 years. *Nature* 453, 383–386.
- LÜTHI, D., LE FLOC'H, M., BEREITER, B., BLUNIER, T., BARNOLA, J.-M., SIEGENTHALER, U., RAYNAUD, D., JOUZEL, J., FISCHER, H., KAWAMURA, K., AND STOCKER, T. F. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature* 453, 379–382.
- MONNIN, E., INDERMÜHLE, A., DÄLLENBACH, A., FLÜCKIGER, J., STAUFFER, B., STOCKER, T. F., RAYNAUD, D., AND BARNOLA, J.-M. (2001). Atmospheric CO<sub>2</sub> concentration over the last termination. *Science* 291, 112–114.
- NORTH GREENLAND ICE CORE PROJECT MEMBERS (2004). High resolution climate record of the northern hemisphere reaching into the last interglacial period. *Nature* 431, 147–151.
- OERLEMANS, J. (2005). Extracting a climate signal from 169 glacier records. *Science* 308, 675–677.
- PRITCHARD, H. D., ARTHURN, R. J., VAUGHAN, D. G., AND EDWARDS, L. A. (2009). Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets. *Nature* 461, 971–975.
- SCHILT, A., BAUMGARTNER, M., SCHWANDER, J., BUIRON, D., CAPRON, E., CHAPPELLAZ, J., LOUERGUE, L., SCHÜPBACH, S., SPAHNI, R., FISCHER, H., AND STOCKER, T. F. (2010). Atmospheric nitrous oxide during the last 140 000 years. *Earth and Planetary Science Letters* 300, 33–43.
- SCHMITT, J., SCHNEIDER, R., ELSIG, J., LEUENBERGER, D., LOURANTOU, A., CHAPPELLAZ, J., KÖHLER, P., JOOS, F., STOCKER, T. F., LEUENBERGER, M., AND FISCHER, H. (2012). Quantitative carbon isotope constraints on the deglacial CO<sub>2</sub> rise from ice cores. *Science*, (in press).

