

4.8 Polare Eiskerne – Archive globaler Klima- und Umweltveränderungen

HUBERTUS FISCHER

Polar ice cores – unique archives of global climate and environmental change: Together with marine and lake sediments, tree rings, corals etc., ice cores represent natural climate archives, which allow us to reconstruct climate and environmental changes in the past. Apart of their very high temporal resolution (in many ice cores allowing us to resolve individual years or even seasonal cycles) and their long time coverage (the longest ice core records cover the last 800,000 years), ice cores represent the one and only climate archive that enables us to directly measure the atmospheric composition of the past in little air bubbles enclosed in the ice. Only with the use of ice cores it became possible to quantitatively document the significant increase in atmospheric air pollution and in greenhouse gas concentrations since the beginning of the industrialization. This revealed that recent concentrations of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide in the atmosphere have not been encountered anywhere close in preindustrial ice core records over the last 800,000 years. Ice cores also opened the eyes of climatologists for the occurrence of rapid climate changes during glacial times and their interhemispheric coupling and provide a better understanding of the interaction of climate and biogeochemical cycles in the past and, thus, also in the future.

Temperaturrekorde, Wirbelstürme, Dürre- und Flutkatastrophen! Die Meldungen extremer Wetterbedingungen in den Medien häufen sich und bei jedem neuen Unwetter stellt sich die Frage, ob wir Zeugen einer vom Menschen verursachten Klimaveränderung oder nur vereinzelter Ereignisse sind, wie es sie schon immer gegeben hat. Klimaforscher, die diese Frage auf wissenschaftlicher Basis zu beantworten haben, stehen jedoch vor einem Dilemma: Direkte Messungen, die uns etwas über die natürliche Variabilität des Klimas sagen können, gibt es meist nur für die letzten Jahrzehnte, die bereits mitten in der industrialisierten Zeitspanne liegen.

Um den vom Menschen ungestörten Zustand des Klimas zu bestimmen, nutzen (Paläo-) Klimatologen deshalb natürliche Klimaarchive (s. auch Kap. 4.9 - HEBELN & VOGT), wie z.B. Baumringe, Meeres- und Seesedimente, Korallen aber auch polare Eiskerne, in denen Informationen über vergangene Klimabedingungen verborgen sind. Eiskerne (Abb. 4.8-1) stellen dabei ein außergewöhnlich vielfältiges Archiv dar, das gestattet, die Klimageschichte der letzten bis zu 800.000 Jahre in hoher zeitlicher Auflösung zu rekonstruieren.

Die großen polaren Eiskappen Grönlands und der Antarktis bestehen aus vielen tausend einzelnen Schneefällen, die zeitlich geordnet übereinander geschichtet

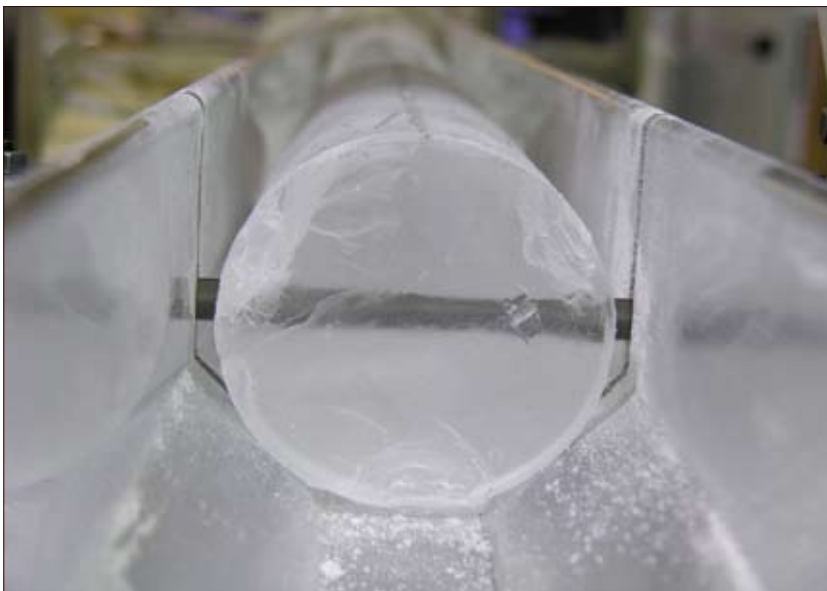


Abb. 4.8-1: Im kristallklaren Eis der Antarktis sind wertvolle Klimainformationen verborgen (Bild: Hans Oerter, Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung).

sind. An der Isotopen-Zusammensetzung des Wassers ($\delta^{18}\text{O}$) jeder dieser Schichten können Wissenschaftler die Temperatur zum Zeitpunkt des Schneefalls ablesen, anhand der Menge des Schnees, der jedes Jahr fällt, die Niederschlagsrate. Weiterhin werden mit den Schneeflocken auch kleinste in der Luft schwebende Aerosole (wie z.B. lösliche Salze oder Staubpartikel) abgelagert und im Eis archiviert. Die Menge solcher Aerosole im Eis ist ein Maß für die ursprüngliche Konzentration in der Luft, die sich wiederum – abhängig von den Klimabedingungen – zeitlich verändert hat.

Einzigartig ist, dass in Eisbohrkernen auch direkt die Atmosphärenzusammensetzung vergangener Zeiten gespeichert ist. Polares Eis besteht nur zu ca. 90% aus Wasser. Die restlichen 10 Volumenprozent sind Luftblasen, die vor Tausenden von Jahren zwischen den Eiskristallen eingeschlossen wurden. Besonders wichtig bei der Untersuchung dieser Lufteinschlüsse ist die Messung der Konzentrationen der Treibhausgase Kohlendioxid und Methan.

Luftverschmutzung und Reinluftgebiete in polaren Breiten

Mit dem Beginn der Industrialisierung Mitte des 19. Jahrhunderts setzte auch die intensive Nutzung fossiler Brennstoffe ein. Die dabei produzierten Partikel wie z.B. Ruß wurden bereits in kurzer Zeit zu einem gesundheitlichen Problem (London smog) für die Bevölkerung in Ballungsgebieten. Aufgrund der kurzen atmosphärischen Lebensdauer dieser Aerosolpartikel ist deren Konzentration in der Luft räumlich sehr variabel und nimmt mit zunehmender Entfernung von ihrer Quelle stark ab. Insbesondere Niederschlag, der entlang des Transportwegs von Aerosolen fällt, ist in der Lage, solche Luftschadstoffe effizient wieder aus der Atmosphäre auszuwaschen. Dennoch können auch in Gebieten wie z.B. der Arktis, die weit entfernt von industriellen Ballungsgebieten liegen, heute erhöhte Schadstoffmengen wie z.B. Schwermetalle nachgewiesen werden (siehe Kap. 5.4 - KALLENBORN).

Eisbohrkerne können hier zur Rekonstruktion der Luftbelastung im Verlauf der letzten Jahrhunderte, in denen es keine direkten Schadstoffmessungen gab, beitragen. Eines der prägnantesten Beispiele ist die zeitliche Veränderung der Sulfat (SO_4^{2-})- und Nitrat (NO_3^-)-Konzentrationen, beides Substanzen, die aus natürlichen Quellen aber auch aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe stammen. So wird Sulfat bei der Oxidation von Schwefeldioxid (SO_2) in der Atmosphäre gebildet, welches wiederum bei der Verbrennung schwefelhaltiger Treibstoffe entsteht. Auch Nitrat ist ein solches Folgeprodukt aus gasförmigen Stickoxiden (NO_x), die z.B. in Verbrennungsmotoren entstehen. Zeitlich aufgelöste

Messungen der Sulfatkonzentration in Eisbohrkernen aus Grönland (FISCHER et al. 1998), d.h. aus einem Gebiet das selbst nahezu frei von industriellen Quellen ist, zeigen seit Ende des 19. Jahrhunderts einen ersten deutlichen Anstieg über den natürlichen Zustand hinaus (Abb. 4.8-2a). In den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts, d.h. zur Zeit der großen Depression, nahmen die Konzentrationen kurzfristig wieder ab, um im Anschluss noch stärker anzusteigen. Das Maximum der Sulfatkonzentration wurde in der Mitte der 1970er Jahre erreicht. So sind Konzentrationen in Grönland nachweisbar, die das natürliche Niveau um bis zu einen Faktor 4 übersteigen. Dabei folgt der Anstieg der Sulfatkonzentration im Eis eng dem Anstieg der SO_2 -Emissionen in Nordamerika und Eurasien. Erfreulicherweise ist in den letzten 2 Jahrzehnten aber auch eine signifikante Abnahme von Sulfat im grönländischen Eis nachzuweisen. Dies ist zum einen auf den vermehrten Einsatz von Abgasentschwefelungsanlagen in Kraftwerken, aber vermutlich auch auf den Rückgang der industriellen Produktion in Osteuropa seit dem Zusammenbruch der Sowjetunion zurückzuführen.

Im Fall von Nitrat (Abb. 4.8-2b) sieht die derzeitige Entwicklung noch nicht so vielversprechend aus. Auch hier ist ein erster schwacher Anstieg bereits um 1900 zu entdecken und ein Hauptanstieg nach Ende des 2. Weltkrieges. Im Gegensatz zum Sulfat zeigen jedoch heutige Nitrat-Konzentrationen noch keinen nennenswerten Abfall. Bemühungen zur Reduktion des Ausstoßes von Stickoxiden, wie z.B. durch Einführung der Katalysatoren in Kraftfahrzeugen, werden vermutlich durch die starke Zunahme des Individualverkehrs kompensiert. Interessanterweise hat die Belastung der Arktis durch Blei nach Einführung des bleifreien Benzins rapide abgenommen, wie Eiskernmessungen aus Grönland belegen (BOUTRON et al. 1991). Erhöhte Bleigehalte wurden auch in der Antarktis gemessen, wo sie vor allem auf Erzverhüttung auf der Südhemisphäre zurückzuführen sind. Im Gegensatz dazu findet man keine vom Menschen künstlich erhöhten Sulfat- oder Nitratwerte in der Antarktis, was die große Entfernung des antarktischen Eisschildes zu industriellen Quellen widerspiegelt. Insofern kann die Antarktis als eines der letzten Reinluftgebiete der Erde angesehen werden.

Geschichte der Treibhausgas-Emissionen durch Menschen

Während die Emission von Aerosolpartikeln und Vorläufergasen im Grunde ein Nebenprodukt bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe darstellt, ist die Emission von Kohlendioxid (CO_2) direkt mit der Kohlenstoffverfeuerung verbunden. Entsprechend nimmt der Ausstoß von CO_2 seit Beginn der Industrialisierung

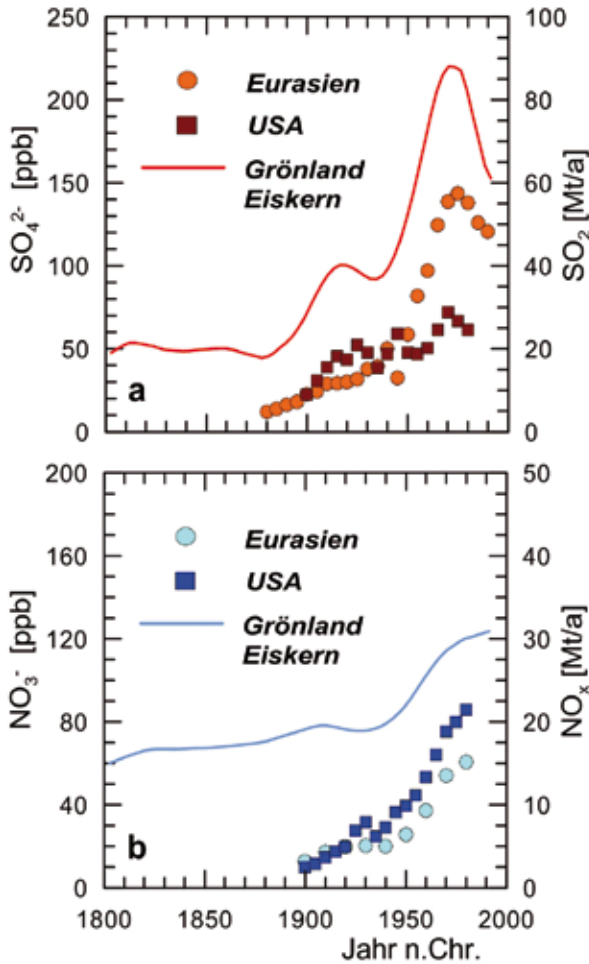


Abb. 4.8-2: Entwicklung der Sulfat (a) und Nitrat (b) Konzentration in ppb (10^9 g Spurenstoff pro Gramm Eis) in Nordgrönland im Verlauf der letzten zwei Jahrhunderte [FISCHER et al. 1998]. Im Vergleich dazu sind mittlere Emissionsraten der USA [GSCHWANDTNER 1986] und Eurasiens [HOV 1987; MYLONA 1996] dargestellt.

rapide zu. Darüber hinaus verflüchtigen sich bei der Gewinnung und Aufbereitung fossiler Brennstoffe gasförmige Kohlenwasserstoffe wie z.B. Methan (CH_4). Weiterhin entsteht Methan auch in der Landwirtschaft. So ist ein zunehmender CH_4 -Ausstoß vor allem durch die vermehrte Zucht von Wiederkäuern bzw. durch ausgeweiteten Reisanbau bedingt. Sowohl CO_2 als auch CH_4 sind in der Lage Wärmestrahlung, die von der Erdoberfläche abgestrahlt wird, zu absorbieren und somit die Energiebilanz der Erde signifikant zu verändern. Entsprechend gelten diese Substanzen als die wichtigsten anthropogenen Treibhausgase.

Direkte atmosphärische Messungen über die Änderung der CO_2 -Konzentration existieren erst seit Mitte der 50er Jahre des

20. Jahrhunderts, für CH_4 sind solche kontinuierlichen Messungen sogar nur für die letzten ca. 30 Jahre verfügbar. D.h. unsere heutige Kenntnis der langfristigen Änderung dieser Treibhausgase basiert im Wesentlichen auf Messungen an Luftbläschen in Eisbohrkernen. So konnten (ETHERIDGE et al. 1996) den exponentiellen Anstieg der CO_2 Konzentration seit Beginn des 19. Jahrhunderts detailliert dokumentieren (Abb. 4.8-3a). Mit einer mittleren Konzentration von heute (2013) ca. 395 ppmv (10^{-6} Volumenanteile CO_2 pro Volumen Luft) werden die natürlichen vorindustriellen Werte um ca. 115 ppmv überstiegen. Im Fall von Methan (Abb. 4.8-3b) wird der Einfluss des Menschen noch eindrücklicher im Eis dokumentiert (ETHERIDGE et al. 1998). Die heutigen mittleren Konzentrationen von ca. 1.850 ppbv (10^{-9} Volumenanteile CH_4 pro Volumen Luft) übersteigen den vorindustriellen Hintergrund um etwa 1.150 ppbv, d.h. heute stammt ca. doppelt soviel CH_4 in der Atmosphäre aus anthropogenen als aus natürlichen Quellen. Die Frage stellt sich, ob derart hohe CO_2 - und CH_4 -Konzentrationen in der jüngeren Erdgeschichte auch durch natürliche Klimaveränderungen erreicht worden sind. Auch hier können nur Eisbohrkerne eine verlässliche Antwort geben. Messungen der CO_2 - und CH_4 -Konzentration in der Luft des Dome C Eiskerns (LOULERGUE et al. 2008; LÜTHI et al. 2008), der im Rahmen des European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA) erbohrt wurde, zeigen, dass die atmosphärische Kohlendioxidkonzentration in den letzten ca. 800.000 Jahren zwischen ca. 180 ppmv während Eiszeiten und 280 ppmv im Verlauf von Warmzeiten schwankte (Abb. 4.8-4). Auch Methan zeigt mit ca. 700 ppbv deutlich erhöhte Konzentrationen in Warmzeiten gegenüber ca. 350 ppbv in Eiszeiten (Abb. 4.8-4). Diesen langfristigen Änderungen sind im Fall von Methan aber noch schnelle Konzentrationsänderungen von bis zu 150 ppbv in den Kaltzeiten überlagert (s. auch Kap. 4.13 - KUTZBACH et al.). Letztere sind an kurzfristige Klimaschwankungen während der letzten Eiszeit im Bereich des Nordatlantikraums gekoppelt. Die heutigen Treibhausgaskonzentrationen sind in Eisbohrkernen der letzten 800.000 Jahre nie erreicht worden. Somit ist das natürliche Gleichgewicht des Kohlendioxid- und des Methankreislaufs, eindeutig vom Menschen gestört worden.

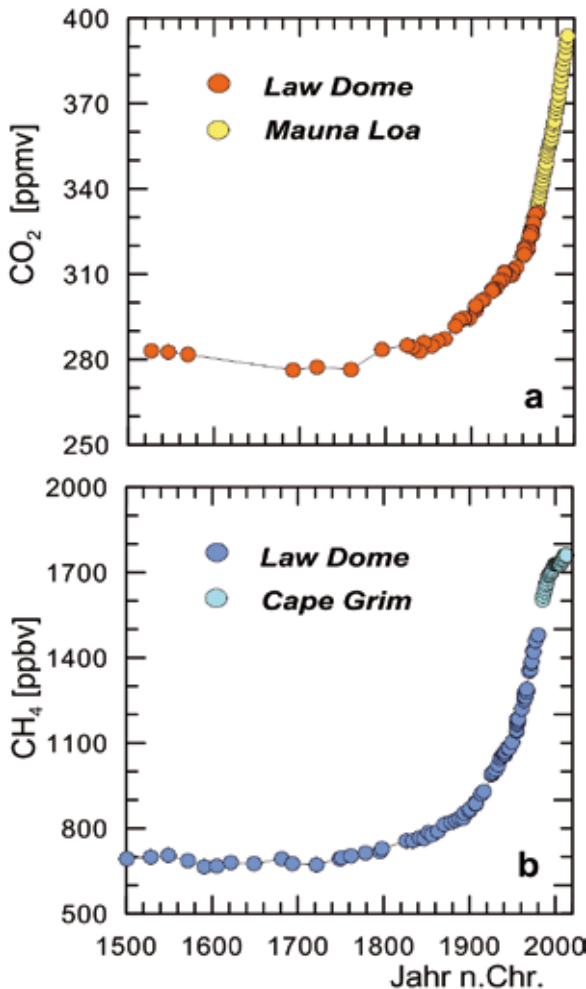


Abb. 4.8-3: Entwicklung der CO₂ (a) und der CH₄ (b) Konzentration im Verlauf der letzten 5 Jahrhunderte [ETHERIDGE et al. 1998; ETHERIDGE et al. 1996]. Aufgetragen sind Messungen an Luftblaseneinschlüssen im Law Dome Eiskern, Antarktis, und an direkten Luftproben von Mauna Loa, Hawaii (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/) und Cape Grim, Tasmanien (www.csiro.au/greenhouse-gases/).

Klimaerwärmung und schnelle Klimaschwankungen

Der Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen hat einen deutlichen Einfluss auf die Energiebilanz der Erde. Entsprechend ist mit einer lange anhaltenden Erwärmung zu rechnen, die bei weiter zunehmenden Treibhausgas-Emissionen sich noch beschleunigen wird. Je nach Annahme der Entwicklung des fossilen Brennstoffverbrauchs und je nach Klimamodell wird eine Erwärmung zwischen 1 °C und 6 °C bis zum Jahr 2100 vorausgesagt (IPCC 2007), wobei eine Erwärmung von nur 1 °C aus heutiger Sicht unrealistische Forderungen an die Reduktion des CO₂-Ausstoßes erfordern. Für die heutige Zeit zeigen

globale Daten eine Erwärmung von ca. 0,8 °C im Verlauf der letzten 50 Jahre. Die Frage stellt sich, ob bereits im Verlauf des letzten Jahrtausends eine ähnliche globale Erwärmung vorkam. Auch hier sind die Klimatologen auf natürliche Umweltarchive angewiesen. Eine Synthese verschiedenster global verteilter Klimaarchivdaten wurde vom (PAGES 2k consortium 2013) zusammengestellt. Die unterschiedlichen Regionen der Erde zeigen dabei zwar unterschiedlich dekadische Klimaänderungen, aber im globalen Mittel waren die letzten 2.000 Jahre durch eine langfristige Abkühlung geprägt, die erst durch die einzigartige Erwärmung seit Beginn der Industrialisierung beendet wurde. Dabei wurden die heutigen Temperaturen in den rekonstruierten globalen Temperaturen der letzten 1.400 Jahre nie erreicht.

Natürlich können Eiskerne nicht in die Zukunft blicken, jedoch stammt noch ein weiteres Warnzeichen einer zukünftigen Klimaentwicklung aus grönländischen Eisbohrkernen. Untersuchungen des Anteils des Sauerstoffisotops ¹⁸O im Eis ($\delta^{18}\text{O}$: ein Maß der lokalen Temperatur über dem Eisschild bei der Niederschlagsbildung) in Grönland zeigen, dass während der letzten intensiven Vereisung schnelle Klimaschwankungen eher die Regel als die Ausnahme waren (NORTH GREENLAND ICE CORE PROJECT MEMBERS 2004). Diese in Abb. 4.8-5 dargestellten sogenannten Dansgaard-Oeschger Ereignisse (benannt nach zwei Pionieren der Eiskernforschung) weisen Anstiege der mittleren Jahrestemperatur über Grönland von 10–15 °C in wenigen Jahrzehnten auf (HUBER et al. 2006), Temperaturänderungen, die in Größe und Geschwindigkeit nirgendwo anders gefunden worden sind. Klimamodelle zeigen, dass diese rapiden Wechsel eine Eigenart des Klimasystems im Verlauf der Eiszeit sind und vermutlich mit dem stotternden Wärmetransport des Nordatlantik-Stroms verknüpft sind. Interessanterweise leiten diese schnellen Erwärmungen im Nordatlantik gleichzeitig eine Abkühlung im Südozean ein (KNUTTI et al. 2004). Man nennt dieses Phänomen deshalb auch die bipolare Schaukel (EPICA community members 2006). Im Gegensatz dazu sind die letzten 10.000 Jahre, d.h. unsere heutige Warmzeit, durch eine außergewöhnliche Konstanz der Temperatur geprägt, die auch in gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modellen wieder zu finden ist. Treibt man aber die Erwärmung in die Zukunft ungehindert fort, so könnte – wie einige Klimamodellen zeigten

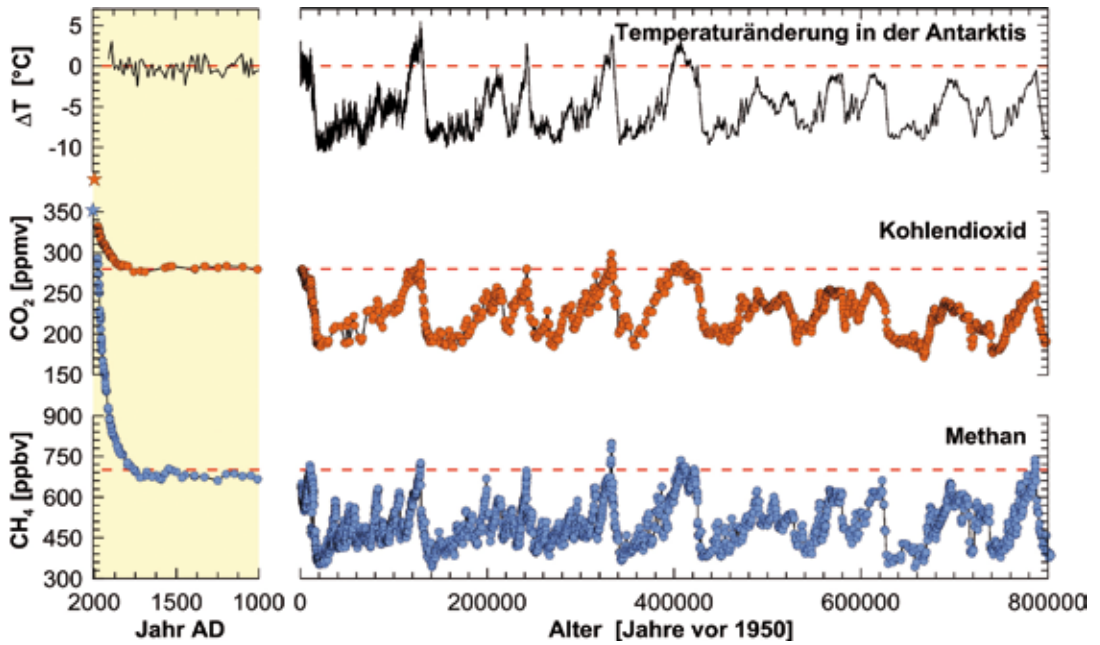


Abb. 4.8-4: Langzeitentwicklung der antarktischen Temperatur [JOUZEL et al. 2007] sowie der CO_2 und CH_4 Konzentration [LOULERGUE et al. 2008; LÜTHI et al. 2008] im Verlauf der letzten acht glazialen Zyklen (rechte Graphiken). Die Graphiken auf der linken Seite zeigen die CO_2 und CH_4 Konzentrationen der letzten 1.000 Jahre [ETHERIDGE et al. 1998; ETHERIDGE et al. 1996]. Sternchen deuten die derzeitigen Konzentrationen an.

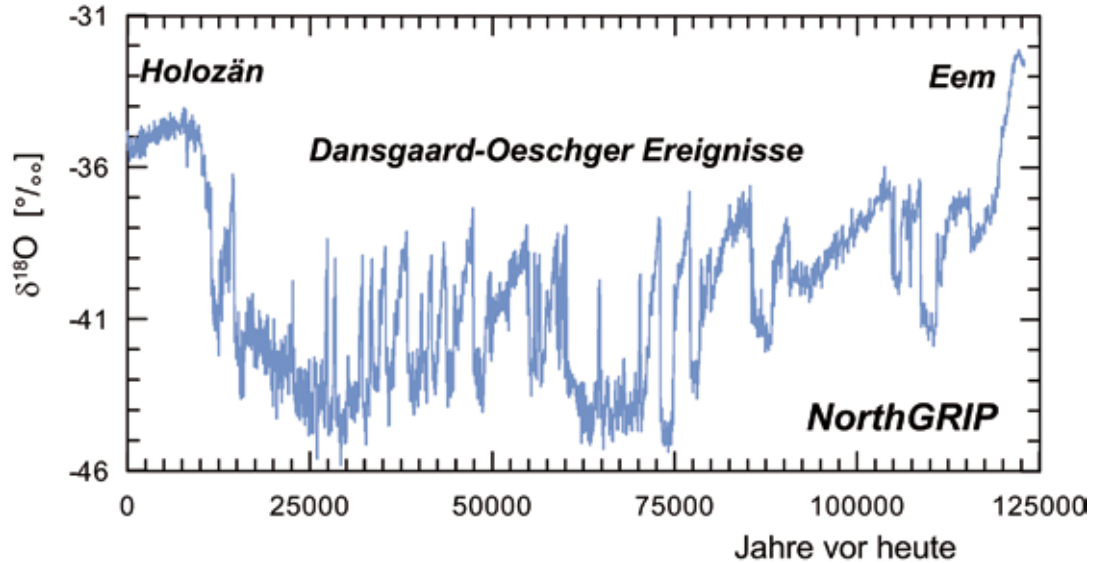


Abb. 4.8-5: Isotopentemperatur-Zeitreihe des nordgrönländischen NorthGRIP Eiskerns [NORTH GREENLAND ICE CORE PROJECT MEMBERS, 2004], der von unserer heutigen Warmzeit (Holozän) bis zum Ende der letzten Warmzeit (Eem) zurückreicht. Im Verlauf des letzten Glazials (25.000-75.000 Jahre vor heute) treten schnelle Klimaschwankungen, sogenannte Dansgaard-Oeschger Ereignisse, auf.

– aufgrund erhöhter Süßwassereinträge im Nordatlantik auch unter Warmzeitbedingungen »der Golfstrom« gestoppt werden, was mit einer rapiden Abkühlung im Nordatlantikraum verknüpft ist. Ein solcher Stopp ist zwar in den nächsten 100 Jahren eher unwahrscheinlich, aber ob, wie und wann solche Klimasprünge in der Zukunft eingeleitet werden könnten, ist Gegenstand der Klimaforschung.

Ausblick

Nur Klimamodelle ermöglichen eine Prognose der Klimaentwicklung und des möglichen Auftretens solcher schneller Klimaschwankungen in der Zukunft. Die detaillierte und quantitative Rekonstruktion schneller Klimaschwankungen, ihrer Auswirkungen auf Stoffkreisläufe und Fernwirkungen sowie ihrer Auslöser kann aber nur anhand von Eisbohrkernen und anderer Klimaarchive erreicht werden. Diese Untersuchungen sind nicht zuletzt deshalb notwendig, um die Prozesse, die mit solchen Klimaänderungen verknüpft sind, besser zu verstehen und in Klimamodelle zu integrieren.

Literatur

- BOUSTRON, C. F., U. GOERLACH, J. P. CANDELONE, M. A. BOLSHOV & R. J. DELMAS (1991): Decrease in anthropogenic lead, cadmium and zinc in Greenland snows since the late 1960s., *Nature*, 353, 153-156.
- EPICA COMMUNITY MEMBERS (2006): One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature* 444, 195-198.
- ETHERIDGE, D. M., L. P. STEELE, R. J. FRANCEY & R. L. LANGENFELDS (1998): Atmospheric methane between 1000 A.D. and present: Evidence of anthropogenic emissions and climatic variability, *J Geophys Res*, 103(13), 15979-15993.
- ETHERIDGE, D. M., L. P. STEELE, R. L. LANGENFELDS, R. J. FRANCEY, J.-M. BARNOLA & V. I. MORGAN (1996): Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn, *J Geophys Res*, 101(2), 4115-4128.
- FISCHER, H., D. WAGENBACH & J. KIPFSTUHL (1998): Sulfate and nitrate firm concentrations on the Greenland ice sheet 2. Temporal anthropogenic deposition changes, *J Geophys Res*, 103(17), 21935-21942.
- GSCHWANDTNER, G., GSCHWANDTNER, K., ELDRIDGE, K., MANN, C. & D. MOBLEY (1986): Historic emissions of sulfur and nitrogen oxides in the United States from 1900 to 1980, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 36(2), 139-149.
- HOV, O., ALLEGRINI, I., BEILKE, S., COX, R. A., ELIASSEN, A., ELSHOUT, A. J., GRAVENHORST, G., PENKETT, S. A. & R. STERN (1987): Evaluation of atmospheric processes leading to acid deposition in Europe, *Air pollution research report Rep.*, Commission of the European Communities.
- HUBER, C., M. LEUENBERGER, R. SPAHNI, J. FLÜCKIGER, J. SCHWANDER, T. F. STOCKER, S. JOHNSEN, A. LANDAIS & J. JOUZEL (2006): Isotope calibrated Greenland temperature record over Marine Isotope Stage 3 and its relation to CH₄, *Earth Pla Sci Let*, 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., JOHNSEN, S., LEUENBERGER, M., LOULERGUE, 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. & E. W. WOLFF (2007): Orbital and millennial Antarctic climate variability over the last 800,000 years, *Science*, 317, 793-796.
- KNUTTI, R., J. FLÜCKIGER, T. F. STOCKER & A. TIMMERMANN (2004): Strong hemispheric coupling of glacial climate through freshwater discharge and ocean circulation, *Nature*, 430, 851-856.
- LOULERGUE, L., A. SCHILT, R. SPAHNI, V. MASSON-DELMOTTE, T. BLUNIER, B. LEMIEUX, J.-M. BARNOLA, D. RAYNAUD, T. F. STOCKER & J. CHAPPELLAZ (2008): Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH₄ over the past 800,000 years, *Nature*, 453, 383-386.
- LÜTHI, D., LE FLOCH, M., BEREITER, B., BLUNIER, T., BARNOLA, J.-M., SIEGENTHALER, U., RAYNAUD, D., JOUZEL, J., FISCHER, H., KAWAMURA, K. & T. F. STOCKER (2008): High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present, *Nature*, 453, 379-382, doi:10.1038/nature06949.
- MYLONA, S. (1996): Sulphur dioxide emissions in Europe 1880-1991 and their effect on sulphur concentrations and depositions, *Tellus*, 48(5), 662-689.
- 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.
- PAGES 2k consortium (2013): Continental-scale temperature variability during the past two millennia, *Nature Geoscience*, 6, 339-346, doi:10.1038/NCEO1797.

Kontakt:

Prof. Dr. Hubertus Fischer
 Climate and Environmental Physics, Physics Institute
 & Oeschger Centre for Climate Change Research
 University of Bern
 hubertus.fischer@climate.unibe.ch