

## 4.9 Die polaren Meeressedimente als Archiv des Weltklimas

DIERK HEBBELN & CHRISTOPH VOGT

***Polar marine sediments as an archive for global climate:** Deep-sea sediments reveal a long-term cooling trend on earth over the last 60 million years, leading from the Cretaceous greenhouse climate to the comparable cold climates of the Late Quaternary. Mainly triggered by plate tectonics this stepwise cooling trend is superimposed by cyclic climate variations driven by the Earth's orbital parameters. These Milankovitch cycles are behind the strong glacial-interglacial changes of the youngest Earth history that e.g. resulted in such huge continental glaciations in North America and northern Europe as they are known from the last ice age. In addition, the history of the North American ice sheet is punctuated by the so-called Heinrich events, which are characterised by the discharge of huge numbers of sediment-laden icebergs into the North Atlantic.*

Für die Erforschung des Klimas vergangener Zeiten stellen die Sedimente am Meeresboden eine Art Tagebuch der Erde dar, in dem jede einzelne Schicht Informationen über die Klima- und Umweltbedingungen ihrer jeweiligen Entstehungszeit liefert. Diese Schichten entstehen zum größten Teil aus dem kontinuierlichen Regen von feinsten Gesteinspartikeln und Resten mariner Organismen, die aus den oberen Wasserschichten des Ozeans hinab zum Meeresboden sinken. Die Zusammensetzung dieses Partikelregens wird in erster Linie von den vorherrschenden Umweltbedingungen vor Ort bestimmt, bei denen das Klima natürlich eine herausragende Rolle spielt. In geologischen Zeiträumen betrachtet sind die Klimabedingungen auf der Erde einer ständigen Veränderung unterzogen, die sich durch die Analyse solcher Sedimente Stück für Stück rekonstruieren lassen.

Im Laufe der Erdgeschichte haben sich immer wieder kältere und wärmere Phasen abgewechselt, in denen die Polarregionen komplett vergletschert oder ganz eisfrei waren. Verglichen mit der letzten »richtigen« Eiszeit vor 20.000 Jahren, während der das skandinavische Inlandeis bis vor die Tore Hamburgs reichte, leben wir heute in einer Warmzeit. Langfristig betrachtet, sozusagen im Jahrmillionendurchschnitt, ist es aber auch heutzutage recht kühl, was z.B. in den kontinentalen Eisschilden in der Antarktis und in Grönland dokumentiert ist. Deshalb nennen wir diese Zeitabschnitte oft auch Zwischeneiszeiten.

Die vereisten Polarregionen, so wie wir sie heute kennen, entstanden erst im Laufe des Tertiärs, nachdem die vorhergehende Kreidezeit noch durch ein warmes Treibhausklima gekennzeichnet war. In den letzten 10 Jahren wurden große internationale Anstrengungen (u.a. im Rahmen des internationalen Polarjahres 2007/2008) unternommen, die frühe Entwicklung der Vereisung der Antarktis und der Nordpolarregionen zu entschlüsseln. Tiefbohrungen im Rahmen des Internationalen Ocean Drilling Programms (IODP) sowie der ANDRILL (ANtartic DRILLing Project) und CRP (Cape Roberts Project) haben nahezu komplette Sedimentfolgen des

frühen bis späten Tertiärs in der Antarktis erbracht. Die Geschichte der zentralen Arktis ist dagegen bis heute nur lückenhaft dokumentiert.

Im frühen Tertiär, im Eozän vor rund 55 Mio. Jahren, setzte dann eine deutliche Abkühlung ein, die schrittweise zum heutigen »Kühlhausklima« führte. Diese Abkühlung ist u.a. in Sauerstoffisotopenwerten dokumentiert, die an Kalkschalen benthischer Foraminiferen (kleine Organismen mit Kalkschalen) aus Tiefseesedimenten gemessen wurden (Abb. 4.9-1). Aus diesen Daten können neben Hinweisen auf das globale Eisvolumen auch Abschätzungen für die Temperaturen des ozeanischen Tiefenwassers abgeleitet werden. So waren z.B. im frühen Eozän dessen Temperaturen ca. 8-10 °C höher als heute, was selbst auf geologischen Zeitskalen einer sehr starken globalen Abkühlung entspricht.

Nach vorherrschender Meinung der Geowissenschaftler ist diese Entwicklung vom Treibhaus- zum Kühlhausklima in erster Linie plattentektonischen Veränderungen zuzuschreiben. Dazu zählen neben großen Gebirgsbildungen (z.B. Himalaja und Alpen) vor allem auch das Öffnen bzw. Schließen von wichtigen Meeresstraßen. Über zahlreiche Rückkopplungseffekte, die von umgeleiteten Meeresströmungen bis zur Abnahme des Kohlendioxidgehaltes in der Atmosphäre infolge einer durch die Gebirgsbildung verstärkten Silikatverwitterung führten, haben diese plattentektonischen Veränderungen zu der beobachteten Abkühlung geführt.

An der Eozän/Oligozängrenze vor ca. 34 Mio. Jahren entstanden die ersten antarktischen Eisfelder und im weiteren Verlauf des Oligozäns kam es zu einer folgenreicheren Entwicklung. Die Antarktis trennte sich von Südamerika und mit der sich öffnenden Drake Passage konnte sich der Antarktische Zirkumpolarstrom etablieren. Dieser kalte Ringstrom verhinderte, dass der Ozean Wärme aus den tropischen Bereichen zur Antarktis liefern konnte. Die Antarktis wurde thermisch isoliert und die vorhandenen Eisfelder entwickelten sich in der Folgezeit zu einem großen Eisschild, der die komplette Ostantarktis bedeckte. Die durch die große Eisfläche verstärkte Reflektion der Sonneneinstrahlung zurück

ins Weltall trug dann weiter zur Abkühlung der Atmosphäre bei.

Der nächste große Schritt in der fortschreitenden Abkühlung der Erde setzte vor rund 14 Mio. Jahren im mittleren Miozän ein. Auch diese Entwicklung und die daraus resultierende Vereisung der Westantarktis sind durch plattentektonische Veränderungen hervorgerufen worden, wie der Schließung der Tethys (das »Urmittelmeer«) und der Tiefwasserverbindung zwischen Australien und Indonesien. Seit diesem Zeitpunkt hat es zwar kleinere Fluktuationen in der Eisbedeckung der Antarktis gegeben, aber im Prinzip ist die gesamte Antarktis seitdem kontinuierlich mit einem dicken Eisschild bedeckt.

Auch im Norden wird im weitgehend vom Weltmeer abgeschlossenen Arktischen Ozean durch das Tertiär hindurch eine Abkühlung angenommen. Große Vergletscherungen der benachbarten Landregionen sind bis zum Miozän allerdings nicht bekannt. Dabei darf aber auch nicht vergessen werden, dass z.B. Spitzbergen zu Beginn des Tertiärs noch auf der Höhe des heutigen Nordnorwegens lag (ca. 63°N) und erst am Ende des Tertiärs durch plattentektonische Bewegungen seine heutige, polnahe Position zwischen 75° und 80° Nord erreicht hat.

## Die Vereisung der Nordhemisphäre

Im Zusammenhang mit der zweiten großen Abkühlung vor rund 14 Mio. Jahren im mittleren Miozän treten die ersten Hinweise auf größere Eisfelder auch auf der Nordhalbkugel auf. Dieser im Vergleich mit der Antarktis um ca. 20 Mio. Jahre verspätete Beginn der Vereisung hat auch hier seine Gründe in der plattentektonischen Situation. Während der Südpol seit Jahrmillionen auf einem leicht abzukühlenden Kontinent liegt, befindet sich der Nordpol mitten in einem Ozean, der unterhalb einer oberflächlichen Meereisschicht nie kälter als -2 °C werden kann. So konnten sich die nördlichen Eisschilde erst bilden, als die globale Abkühlung weit genug vorangeschritten war, um auch in weiter vom Pol entfernt gelegenen Landgebieten, wie Grönland oder Skandinavien, eine Gletscherbildung zuzulassen.

Vergletscherungen an Land kann man in Meeresedimenten anhand von so genannten »dropstones« nachweisen. Das sind Gesteinspartikel, die, selbst wenn sie nur Sandkorngröße haben, zu groß sind, um mit den Meeresströmungen in die tiefen Ozeanbecken transportiert zu werden. Ihr Auftreten in Tiefseesedimenten kann nur über einen weit reichenden Transport in Eisbergen erklärt werden. Da einzelne Gebirgsgletscher in

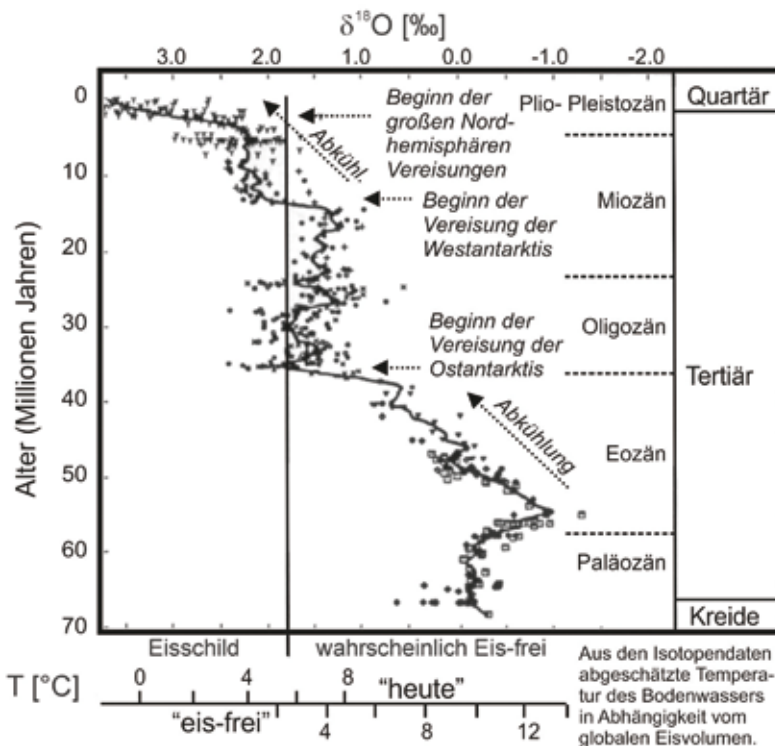


Abb. 4.9-1: Eine Zusammenstellung von Sauerstoffisotopendaten gemessen an benthischen Foraminiferen aus zahlreichen Sedimentkernen, die die wichtigsten Ereignisse in der känozoischen Klimageschichte illustriert (modifiziert nach MILLER et al. 1987).

der Regel nicht bis ans Meer reichen und somit auch keine Eisberge produzieren, ist das Auftreten solcher »dropstones« ein guter Indikator für die Existenz von großen Eisschilden.

Die ältesten »dropstones« wurden im Arktischen Ozean und im Europäischen Nordmeer, das zwischen Grönland und Norwegen gelegen ist, in rund 14 Mio. Jahren alten Sedimenten gefunden [THIEDE et al. 1998]. Von diesem Zeitpunkt an treten immer wieder »dropstones« in den Sedimenten aus dem Nordpolargebiet auf, wenn auch in der Folgezeit zuerst nur vereinzelt (Abb. 4.9-2). Vor rund 7 Mio. Jahren nahm die Zahl der »dropstones« in den Sedimenten deutlich zu, was mit einer Ausdehnung der Vereisungen auf Island, Grönland, Spitzbergen und in Skandinavien erklärt wird.

Der entscheidende Schritt hin zu den Vereisungen kontinentalen Ausmaßes, wie man sie aus der jüngeren Erdgeschichte aus Nordamerika und Nordeuropa kennt, fand aber erst vor rund 3 Mio. Jahren statt. Und wieder scheint die Plattentektonik dabei eine entscheidende Rolle gespielt zu haben. Zu dieser Zeit beendet die Entstehung der Landbrücke von Panama den ungehinderten Wassermassenaustausch zwischen dem Pazifik und dem Atlantik und im Nordatlantik konnte sich das heutige Strömungssystem etablieren. Ein wesentlicher Bestandteil dieses Systems ist der Nordatlantikstrom, der als Verlängerung des Golfstroms viel Wärmeenergie nach Nordeuropa bringt. Obwohl es dem ersten Anschein nach paradox klingt, besagt eine Theorie, dass gerade die Entwicklung dieser warmen Meeresströmung eine wichtige Voraussetzung für die Bildung der großen kontinentalen Eisschilde geschaffen hat. Erst dieses weit nach Norden reichende warme Wasser konnte durch Verdunstung die riesigen Mengen an Feuchtigkeit freisetzen, die sich dann an Land als Schnee niederschlugen und damit das Material für den Aufbau der großen Eismassen lieferten.

### Glazial/Interglazialzyklen im Quartär

Während die generelle Abkühlung der Erde im Tertiär in erster Linie auf einzelne plattentektonische Ereignisse zurückzuführen ist, zeichnet sich die Klimaentwicklung auf kürzeren Zeitskalen durch überlagerte zyklische Veränderungen aus. Diese Klimaschwankungen werden durch kleine, sich in einem bestimmten Rhythmus wiederholenden Veränderungen in den Erdbahnparametern ausgelöst. Vor allem durch Variationen in der Neigung der Erdachse und in der Umlaufbahn der Erde um die Sonne wird die saisonale Verteilung der Sonneneinstrahlung auf der Erde verändert. Über verschiedene Rückkopplungsmechanismen, die bis heute nur ansatzweise verstanden sind, resultieren diese für sich genommen sehr kleinen Schwan-

kungen der Erdbahnparameter in sich wiederholenden Klimazyklen, die nach ihrem Entdecker als Milankovitch-Zyklen bekannt sind.

Besonders ausgeprägt traten diese Zyklen im Quartär während der letzten 2,7 Mio. Jahre auf. Bis vor rund 900.000 Jahren dominierten dabei Zyklen mit einer Länge von 40.000 Jahren. Diesen Zyklen haben sich in der allerjüngsten Erdgeschichte dominante 100.000 Jahre

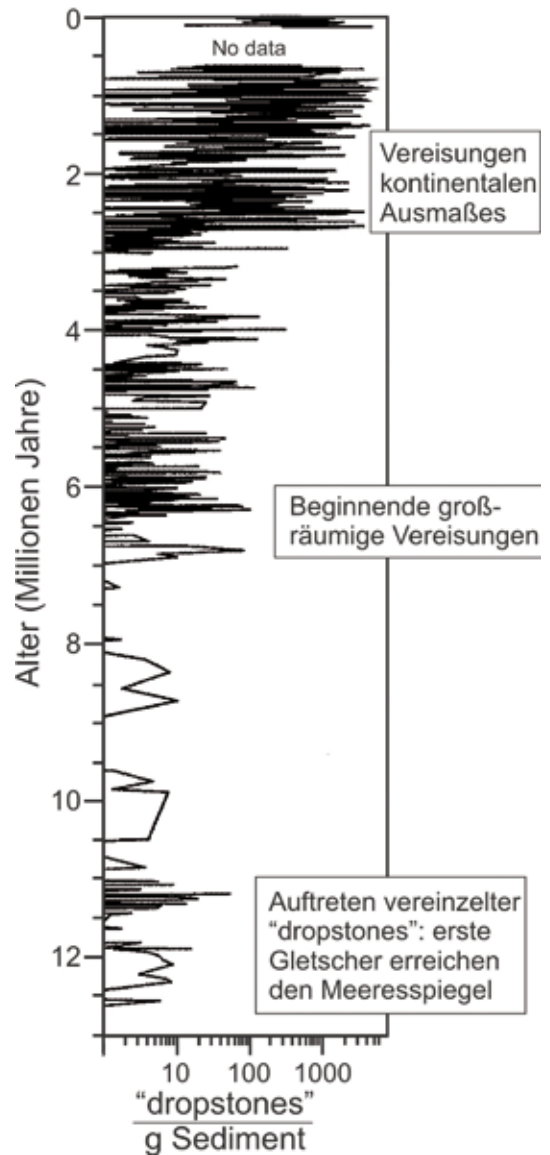


Abb. 4.9-2: Entwicklung der Nordhemisphärenvereisungen abgebildet im »dropstone«-Eintrag. Die Daten stammen aus den Ocean Drilling Program Bohrungen 642 und 644 auf dem Vøring Plateau vor der Küste Norwegens (modifiziert nach FRONVAL & JANSEN 1996).

Zyklen angeschlossen, die die großen Nordhemisphärenvereisungen mit sich gebracht haben. Aufgrund der längeren Zeitspanne zwischen Eiszeit und Warmzeit konnten sich während der letzten Jahrhunderttausende sehr viel größere Eisschilde bilden als zuvor, die z.B. von Skandinavien kommend wiederholt sogar bis weit in das norddeutsche Tiefland hinein vorstoßen konnten. Mit dem Aufbau der großen Eisschilde gingen auch drastische Veränderungen des Meeresspiegels einher. Die riesigen Wassermengen, die die glazialen Eisschilde aufbauten kamen ja ursprünglich als Wasserdampf aus dem Meer. Als Folge lag während der Eiszeiten der globale Meeresspiegel um bis zu 130 m unter dem heutigen Niveau.

Im Europäischen Nordmeer sind gerade die jüngsten und ausgeprägtesten Klimazyklen sehr gut in den Sedimenten überliefert. Am deutlichsten spiegeln sie sich im Wechselspiel markanter Sedimentkomponenten wider. In Zeiten, in denen auf den umliegenden Landgebieten große Vereisungen vorherrschten, findet man zahlreiche »dropstones« in den Sedimenten. Im Gegensatz dazu sind die Sedimente aus Warmzeiten durch hohe Anteile an Schalenresten planktischer Organismen – vor allem Wärme-liebender Arten – gekennzeichnet.

Letzteres lässt sich besonders gut anhand von planktischen Foraminiferen belegen, die in den oberflächennahen Wasserschichten leben. Die Verteilung verschiedener Arten dieser Organismen (jeweils zusammengefasst zu einer polaren, subpolaren, temperierten und subtropischen Gruppe) entlang eines Nord-Süd

Profils durch den Nordatlantik (43 °N bis 78 °N) zeichnet die Klimageschichte sehr deutlich nach (Abb. 4.9-3). So kann man anhand dieser Daten beispielsweise für die letzte Warmzeit, das Eem-Interglazial vor rund 125.000 Jahren, das Vordringen subtropischer Arten in den Nordatlantik und subpolaren Arten bis nach Spitzbergen nachvollziehen. Im Holozän, unser jetzigen Warmzeit, drangen diese Arten deutlich weniger weit nach Norden vor, was zeigt, dass es im Vergleich zum Eem heute kühler ist.

Auf ähnliche Weise kann man anhand dieser Daten auch die einzelnen Kaltphasen im Verlauf der letzten 225.000 Jahre vergleichen. Diese bilden sich am besten in der Verbreitung der polaren Arten ab, die z.B. während der letzten Eiszeit vor rund 20.000 Jahren sogar bis nach Portugal dominant waren. Fast ebenso weit nach Süden drangen die polaren Arten vor ca. 140.000 Jahren, am Ende der vorletzten Eiszeit, vor. Auffällig ist dabei, dass die niedrigsten Temperaturen häufig unmittelbar vor dem Wechsel zu einer Warmzeit auftraten.

Weit weniger dramatische Auswirkungen hatten diese Klimazyklen in der Antarktis und den umliegenden Meeresgebieten. Da die Antarktis selbst unter den heutigen Warmzeitbedingungen fast vollständig vereist ist, hat es dort unter Eiszeitbedingungen kaum Veränderungen in der Eisbedeckung geben können. Trotzdem konnte sich die Antarktis während der Eiszeiten weiter abkühlen. Das führte dann dazu, dass sich die antarktische Meereisdecke im Sommer nur so weit zurückzog, wie es ihrer heutigen Ausdehnung im Winter entspricht.

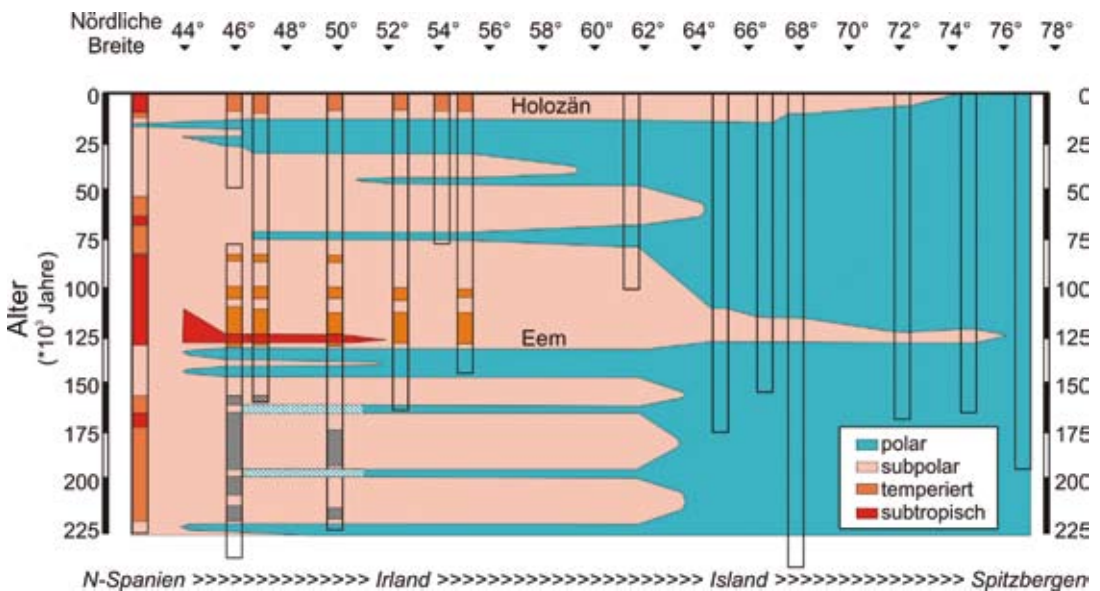
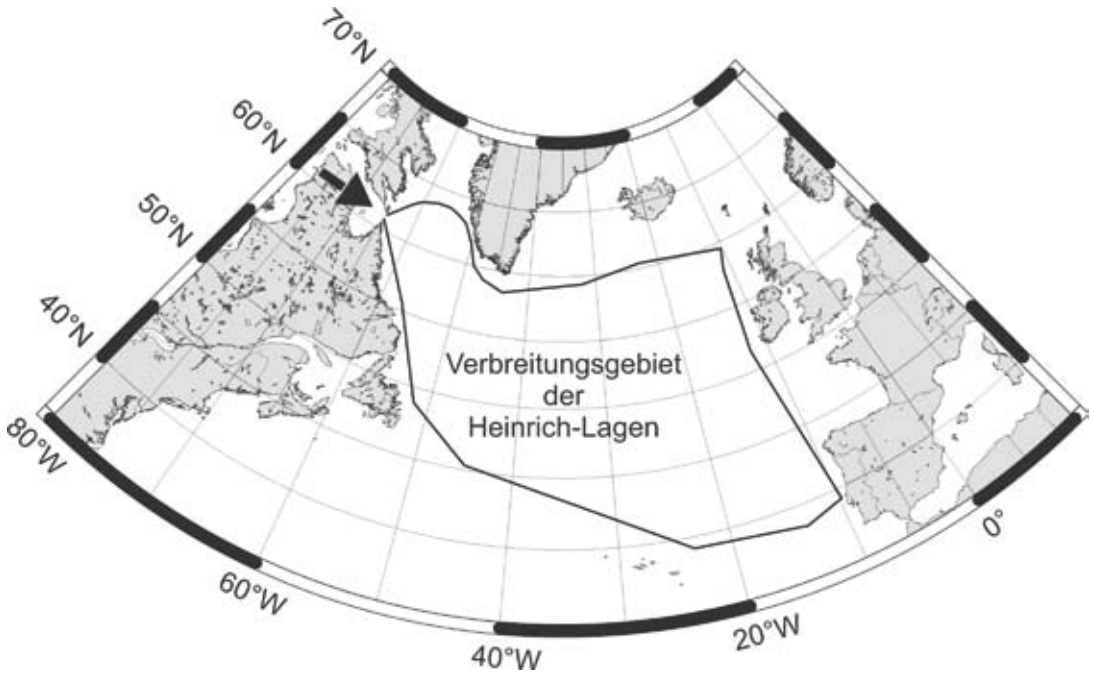


Abb. 4.9-3: Die Verteilung dominanter Gruppen planktischer Foraminiferen in verschiedenen Sedimentkernen auf einem Transekt von 43 °N bis 77 °N als Abbild der Klimageschichte der letzten 225.000 Jahre (modifiziert nach KELLOGG 1976).





**Abb. 4.9-4:** Verbreitung der Dolomitreichen Heinrich-Lagen im Nordatlantik (nach DOWDESWELL et al. 1995), die während der Heinrich-Ereignisse abgelagert wurden. Das Material stammt aus dem Gebiet der heutigen Hudson Bay, von wo es mit Armadas von Eisbergen über weite Teile des Nordatlantiks verteilt wurde.

### Heinrich Ereignisse

Neben diesen – im Rahmen der Milankovitch-Theorie zumindest teilweise vorhersagbaren – langfristigen Klimaschwankungen, gibt es gerade aus dem Nordatlantik zusätzlich Hinweise auf kurzfristige, abrupte Klimaänderungen. Vom Dreizack Seamount vor Portugal wurden 1988 mehrere Sedimentlagen beschrieben, die fast nur »dropstones« enthielten (HEINRICH 1988). In den folgenden Jahren fand man einen ganzen Gürtel mit solchen Lagen, der sich von Kanada aus über weite Teile des Nordatlantiks erstreckte (Abb. 4.9-4). Die insgesamt 6 Lagen aus den letzten 60.000 Jahren zeichnen sich durch sehr hohe Gehalte an dem Mineral Dolomit aus, anhand dessen man das Herkunftsgebiet der Eisberge, die diese »dropstones« transportiert hatten, auf die Hudson Bay in Kanada eingrenzen konnte.

Dieses Gebiet war damals vom Nordamerikanischen Eisschild bedeckt, der im Abstand von 5.000 bis 10.000 Jahren wiederholt plötzlich instabil wurde. Als mögliche Ursachen für diese Ereignisse werden einerseits glaziologische Effekte im Zusammenhang mit dem Aufbau eines großen kontinentalen Eisschildes und andererseits Einflüsse von Meeresspiegelschwankungen – bzw. eine Kombination von beiden – diskutiert. Als Folge dieser Instabilitäten floss sehr viel Eis aus dem Gebiet der Hudson Bay über die Hudson

Straße zum Nordatlantik, wo über einige Jahrhunderte riesige Mengen an Eisbergen entstanden. Beladen mit Dolomit und anderem Erosionsmaterial trieben diese Eisberge über den Nordatlantik, wo sie langsam abschmolzen und ihre Sedimentfracht freisetzten, die sich am Meeresboden in Form der »dropstones«-Lagen (Heinrich-Lagen) absetzte.

Die Sedimentdaten zeigen aber auch, dass diese Eisberge neben der Sedimentfracht enorme Mengen an Süßwasser in den Atlantik brachten. Nach dem Abschmelzen der Eisberge vermischte sich dieses Süßwasser mit dem Meerwasser und es entstand eine gegenüber dem normalen Meerwasser deutlich salzärmere Schicht an der Meeresoberfläche. Aufgrund ihrer geringeren Dichte verhinderte diese die Tiefenwasserbildung im Nordatlantik und es kam zu einem kurzzeitigen Versiegen des Golfstroms/Nordatlantikstroms, das zu einer deutlichen Abkühlung in Europa führte. Drastische klimatische Auswirkungen dieser Heinrich-Ereignisse sind inzwischen fast überall auf der Nordhemisphäre nachgewiesen worden und selbst auf der Südhemisphäre haben sie vereinzelt Spuren hinterlassen.

Anhand der Heinrich-Ereignisse wird deutlich, wie ein lokales Ereignis – in diesem Fall der plötzliche Zusammenbruch eines Teils des Nordamerikanischen Eisschildes – zuerst ein ganzes Ozeanbecken beein-

flussen kann und dann über weitere Rückkopplungseffekte zu einem fast hemisphärenweiten Klimasignal anschwellen kann. Inzwischen weiß man, vor allem aus zeitlich höher aufgelösten Eiskernen, dass diese Heinrich-Ereignisse am Ende einer Reihe von kürzeren Klimaschwankungen, den so genannten Dansgaard-Oeschger Zyklen (siehe Kap. 4.8 - FISCHER), stehen. Aus der Untersuchung von Tiefseesedimenten (und Eiskernen) kann man die Abfolge dieser Ereignisse inzwischen einigermaßen nachvollziehen. Da die dahinter stehenden Mechanismen aber noch nicht richtig verstanden sind, ist es für die nächsten Jahre eine der wichtigsten Aufgaben für die Paläoklimaforscher, die Dynamik gerade solcher abrupten Klimaveränderungen zu untersuchen.

### Ausblick

Aufgrund des durch menschliche Aktivitäten ausgelösten Anstiegs der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre wird unter dem Stichwort »Treibhauseffekt« für die Zukunft eine deutliche Erwärmung der Erde vorhergesagt. Erste Spuren der schon begonnenen Erwärmung lassen sich schon in zeitlich sehr hoch aufgelösten Sedimenten vor Spitzbergen erkennen, aus denen sich für die letzten Jahre höhere Wassertemperaturen ableiten lassen, als sie für die ganzen letzten 2000 Jahre dokumentiert sind (SPIELHAGEN et al. 2011). Die auf der Analyse von Meeressedimenten basierenden Rekonstruktionen früherer Klimazustände zeigen, dass es in der Erdgeschichte bereits Zeiten gegeben hat, in denen ein solches »Treibhausklima« geherrscht hat. Wofür es allerdings keine vergleichbaren Szenarien aus der vergangenen Klimageschichte gibt, ist die Geschwindigkeit des Wandels, die den natürlichen Ökosystemen kaum Zeit gibt, sich an die sich verändernden Umweltbedingungen anzupassen. Auf geologischen Zeitskalen betrachtet, das lehrt die Vergangenheit, wird sich die Natur aber auch diesem Wandel anpassen können. Ob allerdings der Mensch mit seinem Anspruch auf eine möglichst statische Umwelt in einem immer wärmeren »Treibhausklima« zurecht kommen wird, ist fraglich.

### Literatur

- DOWDESWELL, J.A., MASLIN, M.A., ANDREWS, J.T. & MCCAVE, I.N. (1995): Iceberg production, debris rafting, and the extent and thickness of Heinrich layers (H-1, H-2) in North Atlantic sediments. *Geology*, 23, 301-304.
- FRONVAL, T. & E. JANSEN (1996): Late Neogene paleoclimates and paleoceanography in the Iceland-Norwegian Sea: evidence from the Iceland and Voring Plateaus. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 151, 455-468.
- HEINRICH, H. (1988): Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quaternary Research*, 29, 143-152.
- KELLOGG, T. B. (1976): Late Quaternary climatic changes: Evidence from deep-sea cores of the Norwegian and Greenland Seas. *Geological Society of America Memoir*, 145, 77-110.
- MILLER, K. G., FAIRBANKS, R. G. & G. S. MOUNTAIN (1987): Tertiary oxygen isotope synthesis, sea level history, and continental margin erosion. *Paleoceanography*, 2, 1-19.
- SPIELHAGEN, R. F., WERNER, K., SØRENSEN, S. A., ZAMELCZYK, K., KANDIANO, E., BUDEUS, G., HUSUM, K., MARCHITTO, T. M. & M. HALD (2011): Enhanced Modern Heat Transfer to the Arctic by Warm Atlantic Water. *Science*, 331, 450-453.
- THIEDE, J., WINKLER, A., WOLF-WELLING, T., EL-DHOLM, O., MYHRE, A. M., BAUMANN, K.-H., HENRICH, R. & R. STEIN (1998): Late Cenozoic history of the Polar North Atlantic: results from ocean drilling. *Quaternary Science Reviews*, 17, 185-208.

### Kontakt:

Prof. Dr. Dierk Hebbeln  
 MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften,  
 Universität Bremen  
 dhebbeln@marum.de  
 Dr. Christoph Vogt  
 FB Geowissenschaften, Universität Bremen  
 cvogt@uni-bremen.de