

## 2.2 Das Marine Sediment als Gedächtnis des Klimas

CHRISTIAN MÄRZ, PHILIPP BÖNING & HANS-JÜRGEN BRUMSACK

*The marine sediments as long-term climate archive: The composition of marine sediments documents the environmental and climatic conditions that prevailed during their deposition. Thus, marine sediments are an excellent long-term archive of Earth's climate. In the following we will describe three recent examples of marine sediment investigations that significantly affected our insights into the development of the climate system and its most extreme states, both on a global scale and with emphasize on ocean regions most sensitive to climatic changes. During recurring phases in Earth's history, large lower parts of the oceans were oxygen-free (anoxic) over hundreds of thousands of years – these phases are referred to as Oceanic Anoxic Events (OAEs). They represent environmental archives of times when Earth's climate system was working profoundly different than today. A specific time interval affected by many OAEs was the Cretaceous period, around 135 to 85 million years before present, when wide-spread deposition of so-called »black shales« occurred. A specific region of high climatic relevance, the Arctic Ocean, was a »white spot« on the geological map of the Earth only a few years ago. Its climate archives extended only several hundred thousand years into the past. Thus, the reconstruction of its environmental and climatic development over the past 60 Million years from sediment cores that were only recovered in 2004 is all the more exciting. But traces of extreme climate variations are also found in sediments deposited during the last ice age, i.e. the last hundred thousand years. Understanding the global extent and impact of these so-called Dansgaard-Oeschger and Heinrich events, and unravelling their causal mechanism, is not only crucial to better understand the mode of operation of the climate system, but also its relation to modern climate changes.*

Die Zusammensetzung mariner Sedimente dokumentiert die Umwelt- und Klimabedingungen, die während ihrer Ablagerung vorherrscht haben. Damit stellen marine Sedimente hervorragende Langzeit-Archive des Weltklimas dar. Im Folgenden werden drei aktuelle Beispiele behandelt, in denen die Untersuchung mariner Sedimente unser Verständnis von der Entwicklung des Klimasystems und seiner Extremzustände maßgeblich beeinflusst hat, sowohl auf globaler Ebene als auch mit Bezug auf besonders Klima-sensitive Ozeanbereiche.

In der Erdgeschichte gab es wiederholt Phasen, während derer weite Teile der Meere über Hunderttausende von Jahren bis in große Wassertiefen sauerstofffrei (anoxisch) waren – sogenannte »Ozeanische Anoxische Ereignisse« (Oceanic Anoxic Events, OAEs). Sie stellen Umweltarchive aus Zeiten dar, als sich das gesamte Klimasystem der Erde grundlegend von dem heutigen unterschied. Ein Zeitraum, der von besonders vielen OAEs und der weiträumigen Ablagerung sogenannter »Schwarzschiefer« geprägt wurde, war die Kreidezeit vor etwa 135 bis 85 Mio. Jahren.

Ein Gebiet mit hoher klimatischer Relevanz, der Arktische Ozean, war bis vor wenigen Jahren im geologischen Sinne noch ein »weißer Fleck auf der Landkarte«. Die dortigen Klima-Aufzeichnungen reichten nur einige Hunderttausend Jahre zurück. Um so spannender ist die Rekonstruktion der arktischen Umwelt- und Klimabedingungen der letzten 60 Mio. Jahre anhand von Sedimentkernen, die dort im Jahre 2004 gewonnen wurden.

Spuren extremer Klimaschwankungen findet man aber auch in Sedimenten, die während der letzten Eiszeit, d.h. der letzten Hunderttausend Jahre, abgelagert wurden. Globales Ausmaß und Tragweite dieser sogenannten Dansgaard-Oeschger-Heinrich-Ereignisse zu verstehen, und die zugrunde liegenden Mechanismen

zu entschlüsseln, ist nicht nur für ein besseres Verständnis der Funktionsweise des Klimasystems wichtig, sondern auch für den aktuellen Klimawandel.

### Anoxische Todeszonen im heutigen Ozean und ihre mächtigen Vorfahren

Ein besorgniserregendes Phänomen – vor allem in den Küstenbereichen vieler Industrieländer – ist die zunehmende Ausbreitung sogenannter »anoxischer Todeszonen«. Ihren Namen erhalten diese meist im Bereich von Flussmündungen und geschützten Küstenzonen auftretenden Bereiche durch häufig auftretende massive Fischsterben (z.B. in der Ostsee, im Golf von Mexiko oder in der Adria). Der Grund hierfür liegt in der übermäßigen Düngung landwirtschaftlicher Nutzflächen mit Stickstoff und Phosphat, die über die Flüsse ins Meer eingetragen werden (DIAZ & ROSENBERG 2008).

Trotz der Ausdehnung solcher »anoxischer Todeszonen« im Küstenbereich sind unsere Weltmeere durch die sogenannte thermohaline Zirkulation gut durchmischt, so dass in den allermeisten Bereichen oxische Bedingungen vorherrschen. Diese sehr lebensfreundlichen Bedingungen haben allerdings nicht immer das Bild unserer Ozeane bestimmt. In der Kreidezeit – also vor ca. 100 Mio. Jahren – gab es eine Reihe von »Ozeanischen Anoxischen Ereignissen« (OAEs), die von dauerhaft anoxischen Wassermassen geprägt waren (JENKYN 2010). Die Meeressedimente, die unter solch lebensfeindlichen Bedingungen im Ozean abgesetzt wurden, stellen einen der Grundpfeiler unserer heutigen Zivilisation dar: Diese teilweise mächtigen und ausgedehnten kohlenstoffreichen Sedimente bilden unsere wichtigsten Erdöl- und Erdgas-Lagerstätten. Sie zeigen außerdem, dass das gesamte Klimasystem der Erde in der Kreidezeit deutlich anders funktionierte als heute.

Es gab damals keine polaren Eiskappen, es herrschte bis in hohe Breitengrade ein überwiegend feucht-warmes, subtropisches Klima, der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre war um ein Vielfaches höher als heute, und auch die Ozeane unterschieden sich deutlich von den heutigen. Insbesondere der Atlantik hatte während der Kreidezeit noch nicht seine moderne Ausdehnung, und war von den übrigen Weltmeeren weitgehend isoliert. Da die heutigen thermohalinen Zirkulationssysteme im damaligen Proto-Atlantik noch nicht existierten, war die vertikale Durchmischung der Wassermassen stark eingeschränkt. Die spezifische paläogeographische Situation sowie der erhöhte Eintrag von Nährstoffen wie Phosphat und Nitrat – vermutlich über Flüsse und über eine Verbindung zum Pazifik – führte zu einer weiträumigen »Überdüngung« des Atlantiks, die sich dort besonders stark äußerte, wo nährstoffreiches Wasser an die Meeresoberfläche gelangte. Die häufig auftretenden Algenblüten produzierten große Mengen an Biomasse. Wo diese zum Meeresboden sank, wurde sie durch mikrobielle Prozesse zersetzt. Bei der »Verdauung« dieser Algenmasse verbrauchten die Mikroben den im Wasser gelösten Sauerstoff, so dass sich allmählich völlig sauerstofffreie, anoxische Bedingungen im Bodenwasser bildeten. Diese waren für viele marine Lebewesen, wie zum Beispiel Fische, tödlich. Der negative Effekt übermäßiger Algenblüten wurde noch verstärkt, da sich durch Abbau der abgestorbenen Biomasse im Sediment Schwefelwasserstoff entwickelte, der auch für alle höheren Organismen toxisch ist. Unter diesen Umweltbedingungen bildeten sich charakteristische Ablagerungen (Schwarzschiefer), die sehr reich an organischem Kohlenstoff, Schwefel und vielen Spurenelementen (z.B. Molybdän, Cadmium, Zink, Vanadium, Uran), aber sehr arm an Mangan sind (BRUMSACK 2006). Dieses biogeochemische System erhielt sich über Hunderttausende von Jahren selbst am Leben, weil unter anoxischen Bedingungen das am Meeresboden abgelagerte Phosphat ins Meerwasser zurückgelangen konnte und so erneut die Bioproduktion ankurbelte. Die Sedimente allerdings verarmten dadurch stark an Phosphat.

Die unter diesen Bedingungen vor allem am Boden des Proto-Atlantik gebildeten mächtigen Schwarzschiefer-Ablagerungen dokumentieren, dass sich die Umweltbedingungen in der Kreidezeit deutlich von denen der heutigen Weltmeere unterschieden haben müssen. Schwarzschiefer bieten damit die Möglichkeit, die komplexen Zusammenhänge und die langfristige Entwicklung der marinen Umwelt besser zu verstehen. Die Untersuchung von OAEs erlaubt somit, Prognosen für bestimmte Bereiche unserer Meere zu erstellen, die sich aktuell zu ähnlichen Umweltbedingungen hin wandeln.

## **Die Sedimente der Arktis – Vom Treibhaus zum Kühlschrank**

Durch seine Unzugänglichkeit gehört der Arktische Ozean zu den bislang am wenigsten erforschten Gebieten der Erde, und seine geologische Entwicklung ist bis heute umstritten. Im Jahr 2004 allerdings gelang es einem internationalen Team von Wissenschaftlern mit drei Eisbrechern, auf dem Lomonosov-Rücken im Rahmen des Tiefsee-Bohrprogramms »Integrated Ocean Drilling Program« (IODP) zum ersten Mal marine Ablagerungen der letzten 60 Mio. Jahre zu erbohren (MORAN et al. 2006; *Abb. 2.2-1*). Bereits während der »Arctic Coring Expedition« (ACEX) wurde klar, dass das wechselhafte Klima des Eiszeitalters sich nur bis in etwa 200 Meter Sedimenttiefe rekonstruieren ließ. Unterhalb dieser Tiefe finden sich dunkelgraue bis schwarze, oft fein geschichtete Ablagerungen, die den Schwarzschiefern aus der Kreidezeit ähneln. Allerdings ist ihr Alter mit etwa 65 bis 40 Mio. Jahren deutlich jünger (*Abb. 2.2-1*, links). Erste Untersuchungen ergaben, dass sich diese Sedimente gebildet haben mussten, als der Arktische Ozean ein weitgehend eisfreier, subtropischer Ablagerungsraum war. Lange vor der Öffnung der Framstraße war er von den übrigen Weltmeeren weitgehend abgeschlossen. Unter diesen Bedingungen war die Bioproduktion im Oberflächenwasser viel höher als heute. Zudem bildete sich durch üppige Niederschläge auf dem Salzwasser des Arktischen Meeres eine Süßwasserschicht aus, auf der zu bestimmten Zeiten ein riesiger Teppich aus Süßwasserfarm trieb. Das abgestorbene organische Material sank durch die Wassersäule und wurde am Meeresboden durch Mikroorganismen zersetzt, die dazu permanent dem Meerwasser Sauerstoff entzogen. Damit waren noch vor 40 Mio. Jahren die Umweltbedingungen im Arktischen Ozean ähnlich wie im Atlantik der Kreidezeit. Durch die stabile Schichtung des Ozeans wurde der Sauerstoff in den Bodenwasserschichten nicht erneuert, und so konnte das sich absetzende organische Material weitgehend erhalten bleiben – daher die sehr dunkle Farbe der Ablagerungen. Die Entdeckung dieser Schwarzschiefer-ähnlichen Sedimente in der Arktis erlaubte allerdings nicht nur eine deutlich bessere Rekonstruktion der damaligen Klimabedingungen. Sie bestärkte auch frühere Vermutungen, dass sich unter den Wassermassen des Arktischen Ozeans bislang unerschlossene Öl- und Gas-Vorkommen verbergen könnten (STEIN 2007). Auch wenn die organische Substanz in den Sedimenten, die während der ACEX-Bohrfahrt gewonnen wurden, thermisch unreif ist und damit noch kein Erdöl oder Erdgas erzeugt hat, könnte die Situation in den Randbereichen der Arktis anders sein.

Damit wurde diese entlegene und unzugängliche Region ins Zentrum wirtschaftlicher und geopolitischer Überlegungen gerückt.

Obwohl die oberen 200 m der ACEX-Kerne völlig anders aussehen als die darunter liegenden Schwarzschiefer – von denen sie überdies durch eine etwa 26

Mio. Jahre lange Sedimentationslücke getrennt sind – enthalten sie Informationen über die jüngere arktische Klimaentwicklung (Abb. 2.2-1, rechts). Es finden sich deutliche Hinweise, dass die aktuellen Bedingungen im Arktischen Ozean – saisonale bis ganzjährige Eisbedeckung, eine geringe Bioproduktion und gut durch-

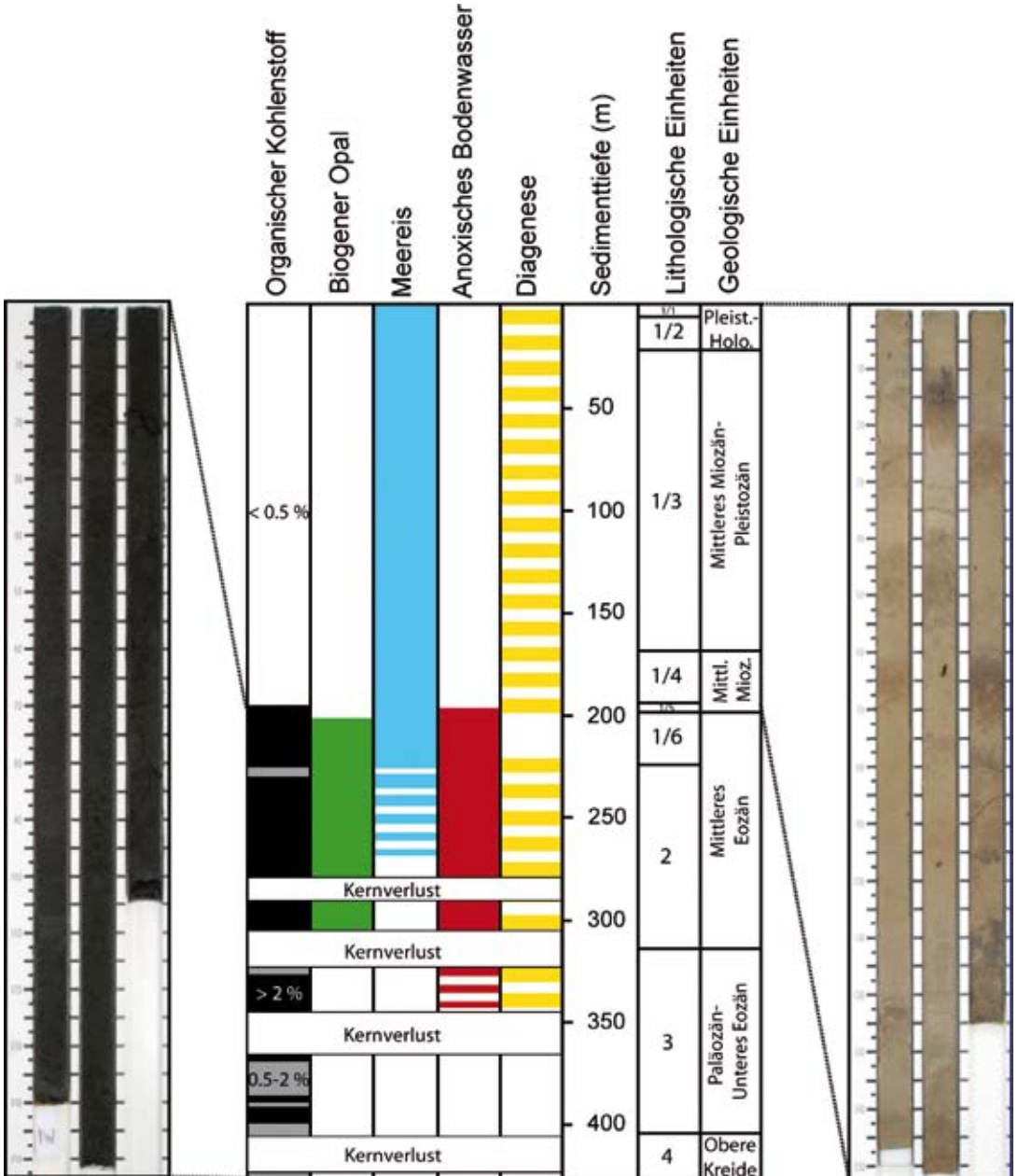
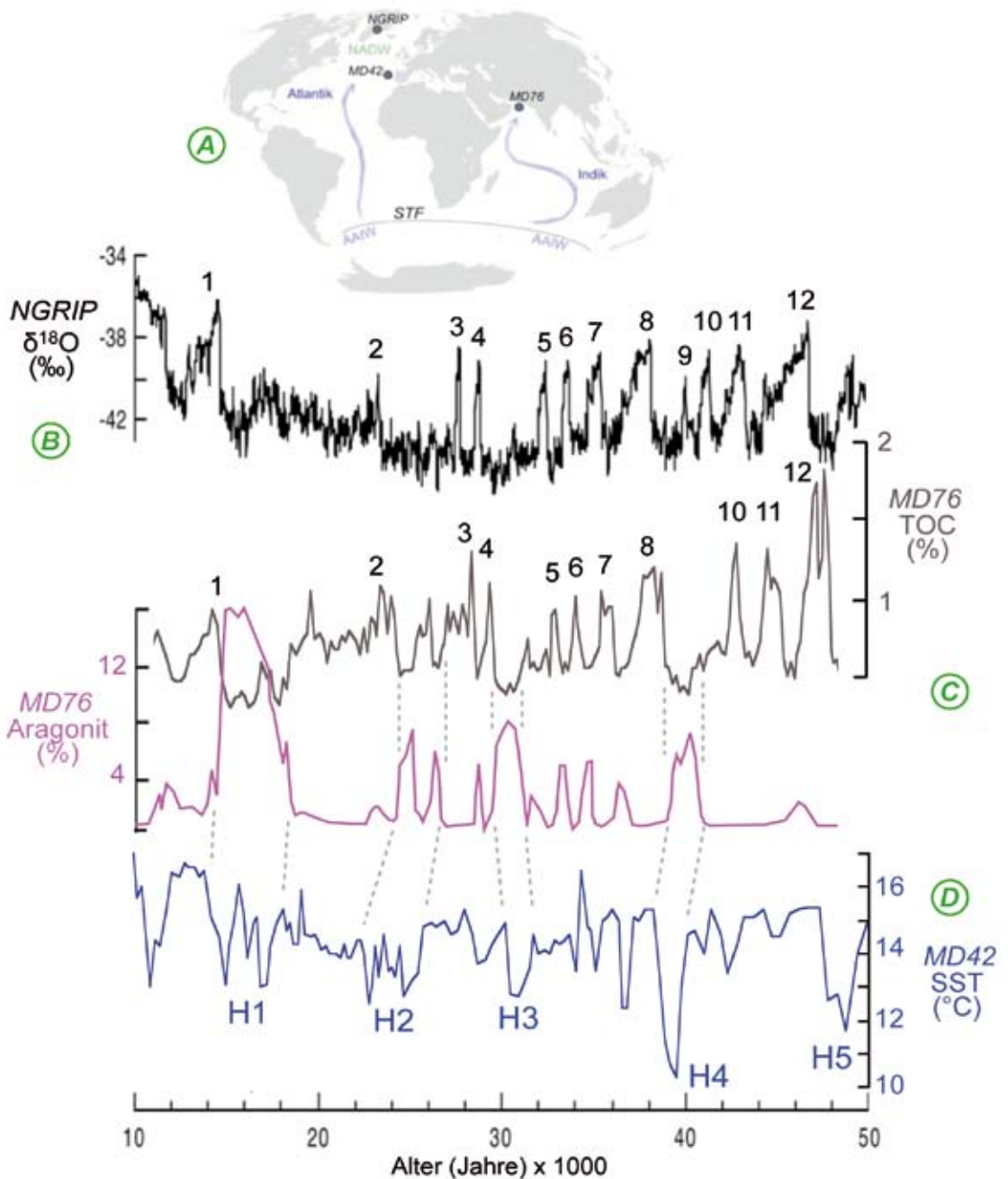


Abb. 2.2-1: Schematische Darstellung der aus der chemischen Zusammensetzung arktischer Sedimente rekonstruierten Umweltparameter. Organischer Kohlenstoff und biogener Opal wurden unter anoxischen Bedingungen von der Kreide bis ins Eozän abgelagert (Kernfotos links), während sich Hinweise auf Meereis vor allem in den Miozänen bis Holozänen Sedimenten finden lassen (Kernfotos rechts). Spuren frühdiagenetischer Überprägung der ursprünglichen Sedimentzusammensetzung durch mikrobielle Prozesse finden sich praktisch über die gesamte Kernlänge.



**Abb. 2.2-2:** Darstellung der Lokationen des Eisbohrkernes NGRIP (SVENSSON et al. 2008), der Sedimentkerne MD9520-42 vor Portugal (BARD 2002), MD0428-76 im Arabischen Meer (BÖNING & BARD 2009) sowie der Bildung von Nordatlantischem Tiefenwasser (NADW) und antarktischem Zwischenwasser (AAIW) nahe der Subtropischen Front (STF). Die Pfeile zeigen die Route von AAIW im Atlantik und Indik. B. Sauerstoffisotopenprofil vom NGRIP Eiskern. C. TOC- und Aragonitprofile von MD0428-76. D. Meeresoberflächentemperatur (SST) basierend auf Alkenongehalte von MD9520-42. Die Profile sind für den Zeitraum von 10.000 und 50.000 Jahren vor heute dargestellt und basieren auf ihren eigenen Altersmodellen. Zahlen = Dansgaard-Oeschger-Ereignisse an. H1 bis H5 = Heinrich-Ereignisse.

mischte oxische Wassermassen – über die letzten etwa 15 Mio. Jahre vorgeherrscht haben (MORAN et al. 2006). Die charakteristische farbliche Abgrenzung gelblich-grauer und brauner Lagen in diesen Ablagerungen spiegelt sich auch in der chemischen Zusammensetzung wider (MÄRZ et al. 2010). Die gelblich-grauen Intervalle sind von tonigem siliziklastischem Material dominiert, dessen Zusammensetzung relativ einheitlich ist. Diese Intervalle spiegeln die Hintergrund-Sedimentation wider, also vor allem das Absinken feiner Mineralpartikel. Diese Schichten wurden vor allem während Kaltzeiten im Arktischen Ozean unter offenbar stabilen Umweltbedingungen abgelagert, und dokumentieren Sedimenttransport durch Meereis und sehr salzhaltige Bodenströmungen, die bei der Bildung von Meereis entstehen. Die braunen Lagen hingegen haben eine deutlich andere chemische Zusammensetzung und sind stark angereichert an Manganoxiden sowie diversen Spuremetallen (Molybdän, Kobalt, Nickel und Kupfer).

Die Bildung dieser braunen Lagen wird kontrovers diskutiert. Starke Änderungen in der Durchlüftung des Bodenwassers könnten den Mangan-Gehalt der Sedimente beeinflusst haben, und somit würden Manganreiche Intervalle für oxische, Mangan-arme Intervalle für anoxische Bedingungen sprechen. Gegen diese Theorie spricht allerdings, dass anoxische Bedingungen entweder eine stabile Schichtung der Wassersäule oder sehr hohe Bioproduktion im Oberflächenwasser erfordern. Der Tiefenwasser-Austausch des Arktischen Ozeans mit dem Atlantik durch die Framstraße ist allerdings seit Millionen von Jahren aktiv, und niedrige Gehalte organischer Substanz in jüngeren Arktischen Sedimenten sprechen gegen eine hohe Bioproduktion.

Eine alternative Erklärung ist die Bildung Mangan-reicher Lagen durch komplexe biogeochemische Reaktionen im Sediment, die durch den Stoffwechsel spezialisierter Mikroben angetrieben werden (sogenannte frühdiagenetische Prozesse). Diese Theorie setzt die Mobilisierung von Mangan aus tieferen, anoxischen Sedimentschichten voraus, von wo es in gelöster Form durch den Porenraum diffundieren kann, bis es an einer geochemischen Grenzschicht erneut ausfällt und unter bestimmten Bedingungen angereichert wird. Chemische Analysen von Porenwasser haben belegt, dass diese diagenetischen Prozesse in arktischen Sedimenten tatsächlich ablaufen. Allerdings weisen alle Mangan-reichen Lagen Wühlspuren von am Meeresboden lebenden Organismen auf. Somit kann die Zusammensetzung dieser braunen Lagen durch diagenetische Prozesse beeinflusst werden, aber die primäre Mangan-Anreicherung muss unter spezifischen Umweltbedingungen am Meeresboden stattgefunden haben.

Es ist bekannt, dass die Flüsse Sibiriens hohe Man-

gan-Konzentrationen aufweisen. Daher könnte eine Verstärkung des Flusseintrages die erhöhten Mangan-Gehalte in den braunen Lagen erklären. Diese Hypothese ist wahrscheinlich, da ein Effekt der aktuellen Erwärmung der Arktis eine Verstärkung des Flusseintrags ist. In der Literatur wird die Bildung der braunen Lagen häufig mit wärmeren Klimabedingungen in Verbindung gebracht, also mit reduzierter Meereisbedeckung, aber verstärkter Bioproduktion und erhöhtem Flusseintrag. Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die Zusammensetzung dieser braunen arktischen Sedimentlagen durch eine Kombination aus verstärktem Flusseintrag während wärmerer Klimaphasen und diagenetischen Prozessen im Sediment kontrolliert wurde. Damit dokumentiert der obere Teil der ACEX-Kerne den wiederholten Wechsel von Kalt- und Warmzeiten in der zentralen Arktis.

### **Sedimente des Arabischen Meeres – Zeugen abrupter Änderungen im Klima-Ozean-System**

Im Verlauf der letzten Kaltzeit kam es über 20-mal zu drastischen Klimawechseln. Innerhalb von nur Jahren bis Jahrzehnten stieg in Grönland die Temperatur um mehrere Grad. Danach blieb es dann mehrere Jahrhunderte warm (sogenannte Dansgaard-Oeschger-Ereignisse, Abb. 2.2-2). Eine weitere Instabilität des Eiszeitklimas sind die Heinrich-Ereignisse, besonders kalte Perioden, die zur Folge hatten, dass sich riesige Eismassen im Nordatlantik ausbreiteten, was zu einer starken Abkühlung des Oberflächenwassers führte (Abb. 2.2-2). Die Klima-Ereignisse, deren Auswirkungen weltweit zu spüren waren, sind offensichtlich auf Änderungen der Meeresströmungen im Nordatlantik zurückzuführen (BARD 2002).

Das Arabische Meer ist eines der Schlüsselgebiete für die Rekonstruktion solcher vergangener abrupter Klimawechsel. Es liegt im Einflussgebiet des Südwest-Monsun, der nährstoffreiches Zwischenwasser aufreibt, was eine hohe Primärproduktion verursacht. Diese wiederum bedingt eine starke Sauerstoffzehrung durch Oxidation von absterbendem organischem Material in der Wassersäule und führt zur Ausbildung der mächtigsten Sauerstoffminimumzone (SMZ) der Welt.

Nun belegen zahlreiche Sedimentstudien aus dem Arabischen Meer einen Einklang mit den Dansgaard-Oeschger-Heinrich-Ereignissen aus dem Nordatlantik (z.B. SCHULZ et al. 1998; BÖNING & BARD 2009). Anhand der chemischen Zusammensetzung eines Kernes aus dem Arabischen Meer sollen hier diese Klimawechsel dargestellt werden, insbesondere unter Verwendung der Gehalte von organischem Kohlenstoff (TOC = total organic carbon, als Anzeiger für organisches Material)

und von Aragonit, einer metastabilen Form von Kalziumkarbonat (Abb. 2.2-2). Es wird deutlich, dass die Chemie der Sedimente sowohl Dansgaard-Oeschger-Ereignisse als auch Heinrich-Ereignisse deutlich widerspiegelt. Aragonit, der in Form von feinen  $\mu\text{m}$ -großen Nadeln in den Sedimenten vorliegt, reagiert empfindlich auf Schwankungen im pH-Wert. Eine Senkung des pH-Wertes wird durch die Oxidation organischen Materials hervorgerufen, bei der organische Säuren gebildet werden. Erreicht also viel organisches Material das Sediment, kommt es zur Aragonitlösung; wird wenig organisches Material abgelagert, bleibt Aragonit erhalten. So lassen sich die Kurven von TOC und Aragonit im untersuchten Sedimentkern gut erklären.

Nun könnte man argumentieren, dass verstärkte südwestliche Monsunwinde während dieser Dansgaard-Oeschger-Ereignisse vorgeherrscht haben. Ein starker Monsun würde den Auftrieb von nährstoffreichem Zwischenwasser intensivieren, wobei die Primärproduktion angekurbelt würde, was zu verstärkter Ablagerung organischen Materials und zu einer starken SMZ führen würde, so wie es heutzutage der Fall ist. Umgekehrt würde ein schwacher Monsun zu weniger Auftrieb, weniger Ablagerung organischen Materials, einer schwachen (oder fehlenden) SMZ und besserer Aragoniterhaltung führen. Eine mögliche Erklärung für diese raschen Wechsel in der chemischen Zusammensetzung der Sedimente wären also Änderungen im Nordatlantik-Monsun-Windsystem (SCHULZ et al. 1998). Aber eine andere Möglichkeit besteht darin, dass sich die Zusammensetzung der Wassermassen geändert hat, die das Arabische Meer belüften. Dazu muss man die ozeanographische Situation im Indischen Ozean betrachten (Abb. 2.2-2). Die wichtigste Ventilationsquelle des Arabischen Meeres ist das Antarktische Zwischenwasser (AAIW). Dieses AAIW bildet sich an der kalten Meeresoberfläche südlich der Subtropischen Front (STF), die die Antarktis wie ein Ring umgibt. Diese Wassermassen haben ein hohes Sauerstoff/Nährstoff-Verhältnis. Jedoch kehrt sich dieses Verhältnis auf dem langen Weg des AAIW ins Arabische Meer aufgrund der permanenten Sauerstoff-Zehrung um.

Nun kam es während der Heinrich-Ereignisse zu einem Aussetzen der Bildung von Nordatlantischem Tiefenwasser (NADW) (BARD 2002). Dies hatte zur Folge, dass sich AAIW bis weit in den Nordatlantik ausbreitete. Auch in Teilen des Südpazifiks konnte man eine verstärkte Bildung und Ausbreitung von AAIW nachweisen. Man kann also annehmen, dass sich AAIW auch verstärkt in den Indischen Ozean ausgebreitet hat. Dabei blieb jedoch das ursprüngliche hohe Sauerstoff/Nährstoff-Verhältnis erhalten, da (anders als heute) keine anderen tropischen Zwischenwassermassen die

Zufuhr von AAIW blockierten. Weniger Nährstoffe bedeuteten eine geringere Produktivität. Der dadurch noch vorhandene hohe Gehalt an Sauerstoff hätte zu einer raschen Oxidation organischen Materials geführt, bevor dieses das Sediment erreicht. Somit wären die geringeren TOC-Gehalte zu erklären, und auch Aragonit wäre erhalten geblieben (BÖNING & BARD 2009).

Die hier rekonstruierten Schwankungen in der Intensität der SMZ des Arabischen Meeres sind ein gutes Beispiel für die Wichtigkeit globaler Meeresströme bei der Fortpflanzung abrupter Klimaschwankungen in den verschiedenen Ozeanen. Wie genau der Südozean in die Abfolge abrupter Klimawechsel involviert war, ist auch wichtig für das Verständnis der Rolle der Ozeane beim aktuellen Klimawandel.

## Literatur

- BARD E. (2002) Climate shock – abrupt changes over millennial time scales. *Physics Today* 55, 32-38.
- BÖNING P. & BARD, E. (2009) Millennial/centennial-scale thermocline ventilation changes in the Indian Ocean as reflected by aragonite preservation and geochemical variations in Arabian Sea sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, 6771-6788.
- BRUMSACK H.-J. (2006) The trace metal content of recent organic carbon-rich sediments : Implications for Cretaceous black shale formation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 232, 344-361.
- DIAZ R.J. & ROSENBERG, R. (2008) Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science* 321, 926-929.
- JENKYN H.C. (2010) Geochemistry of Oceanic Anoxic Events. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 11, Q02004.
- MÄRZ C., SCHNETGER, B. & BRUMSACK, H.-J. (2010) Paleoenvironmental implications of Cenozoic sediments from the central Arctic Ocean (IODP Expedition 323) using inorganic geochemistry. *Paleoceanography* 25, PA3206.
- MORAN K., BACKMAN, J., BRINKHUIS, H., CLEMENS, S.C., CRONIN, T., DICKENS, G.R., EYNAUD, F., GATTACCECA, J., JAKOBSSON, M., JORDAN, R.W., KAMINSKI, M., KING, J., KOC, N., KRYLOV, A., MARTINEZ, N., MATTHIESSEN, J., MCINROY, D., MOORE, T.E., ONODERA, J., O'REGAN, M., PÄLIKE, H., REA, B., RIO, D., SAKAMOTO, T., SMITH, D.C., STEIN, R., ST JOHN, K., SUTO, I., SUZUKI, N., TAKAHASHI, K., WATANABE, M., YAMAMOTO, M., FARRELL, J., FRANK, M., KUBIK, P., JOKAT, W. & KRISTOFFERSEN, Y. (2006) The Cenozoic palaeoenvironment of the Arctic Ocean. *Nature* 441, 601-605.
- SCHULZ H., VON RAD, U. UND ERLKENKEUSER, H. (1998) Correlation between Arabian Sea and Greenland climate oscillations of the past 110,000 years. *Nature* 393, 54-57.
- STEIN R. (2007) Upper Cretaceous/Lower Tertiary black shales near the North Pole : Organic-carbon origin and source-rock potential. *Marine and Petroleum Geology* 24, 67-73.
- SVENSSON A., ANDERSEN K. K., BIGLER M., CLAUSEN H. B., DAHL-JENSEN D., DAVIES S. M., JOHNSEN S. J., MUSCHELER R., PARRENIN F., RASMUSSEN S. O., ROETHLISBERGER R., SEIERSTAD I., STEFFENSEN J. P. UND VINTHER B. M. (2008) A 60 000 year Greenland stratigraphic ice core chronology. *Climate of the Past* 4, 47-57.

Dr. Christian März,

Dr. Philipp Böning

Prof. Dr. Hans-Jürgen Brumsack

Universität Oldenburg

Institut für Chemie und Biologie des Meeres

Postfach 2503 - 26111 Oldenburg

brumsack@icbm.de