

# Das Südpolarmeer – ein Schlüsselgebiet für Klimaänderungen in vergangener Zeit

## Abstract

The Antarctic continent and the adjacent Southern Ocean represent one of the key areas controlling the Earth's climate system. Reconstructions of past climatic and oceanographic conditions show that changes in Southern Ocean surface water temperature and Antarctic sea ice distribution lead global climate variations related to the establishment of northern hemisphere continental ice sheets. Most likely, both environmental factors represent sensitive components of feedback mechanisms controlling rapid changes of Earth's climate.

## 1 Einleitung

Das Südpolarmeer nimmt eine zentrale Stellung im Zirkulationssystem des Weltozeans ein. Sein wichtigstes Strömungssystem, der Antarktische Zirkumpolarstrom (ACC), steht als einziges zonal verlaufendes Strömungssystem im Weltozean mit allen anderen Ozeanen in Verbindung und fungiert damit als Verteiler- und Mischstation für Boden-, Tiefen- und Oberflächenwassermassen.

Daneben ist das Südpolarmeer auch Bildungsgebiet von Tiefen- und Bodenwassermassen, die die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Weltozeans nachhaltig beeinflussen. Die ozeanischen Austauschprozesse, die für den Zustand des Erdklimas von entscheidender Bedeutung sind, lassen sich schematisch in einem globalen ozeanischen Zirkulationsschema darstellen, das unter dem Schlagwort „Ocean Conveyor Belt“ durch Broecker [1, 2] bekannt gemacht worden ist (Abbildung 1). Modus und Intensität dieses globalen Transportbandes steuern die Verteilung von Wärme und Salz im Weltozean und sind damit entscheidende Faktoren für das Klima unserer Erde.

Ein weiterer Umweltfaktor, der eine kritische Rolle im komplexen Steuerungssystem des Erdklimas spielt, ist

das antarktische Meereis. Seine Verbreitung unterliegt ausgeprägten jahreszeitlichen Schwankungen. Während im Süd-Winter etwa 20 Mio. km<sup>2</sup> des Südpolarmees von Meereis bedeckt sind, schrumpft seine Ausdehnung im Süd-Sommer auf etwa 4 Mio. km<sup>2</sup> zusammen (Abbildung 2). Wegen der Rückstrahlungseigenschaften (Albedo) des Meereises und seines Einflusses auf den Wärme- und Gasaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre sowie auf die atmosphärische und ozeanische Zirkulation stellt das Meereis einen bedeutenden Faktor im Klimasystem dar.

Als zentrales Bindeglied für den Austausch von Wärme, Salz und Nährstoffen im Weltozean, wegen seiner Bedeckung mit Meereis, aber auch als potentiell Steuerungsbereich für den CO<sub>2</sub>-Haushalt, ist das Südpolarmeer eines der Schlüsselgebiete für die

Steuerung des heutigen und vergangenen Erdklimas.

Ziel der meeresgeologischen Arbeiten ist es, durch Kombination von geochemischen und mikropaläontologischen Methoden die räumlich-zeitlichen Verbreitungsmuster südpolarer Wassermassen und Strömungssysteme sowie die Verbreitung des antarktischen Meereises im Wechsel der Warm- und Kaltzeiten während der letzten 300 000 Jahre zu rekonstruieren. Umweltsignale vergangener Zeiten sind in den Ablagerungen (Sedimente) des Südpolarmees gespeichert. Ihre Entschlüsselung soll dazu beitragen, noch unverstandene Wechselwirkungen und Verstärkungsmechanismen im Klimasystem der Erde verstehen zu lernen. Diese Prozesse können dazu führen, daß sich das Erdklima selbst in Zeiträumen von wenigen Menschengenerationen drastisch ändert.

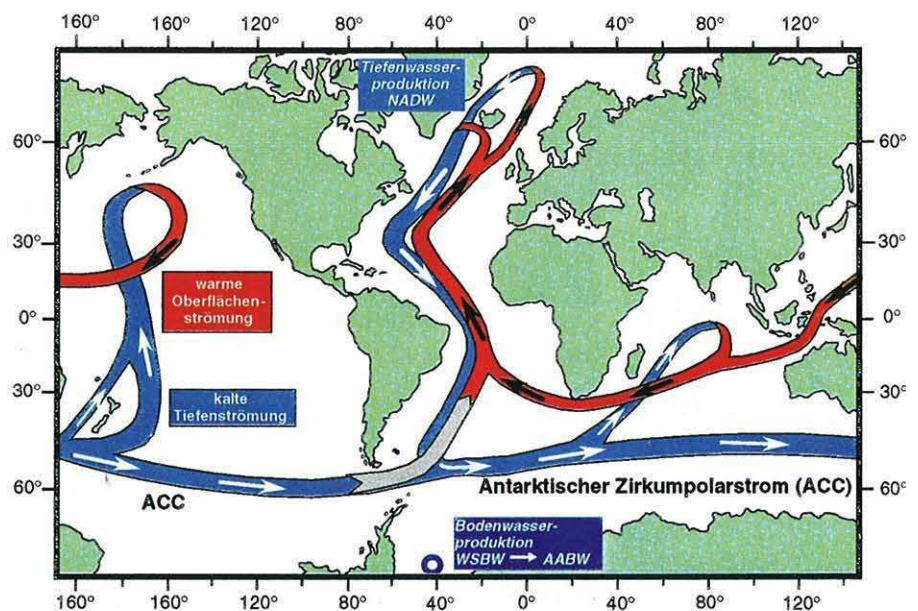
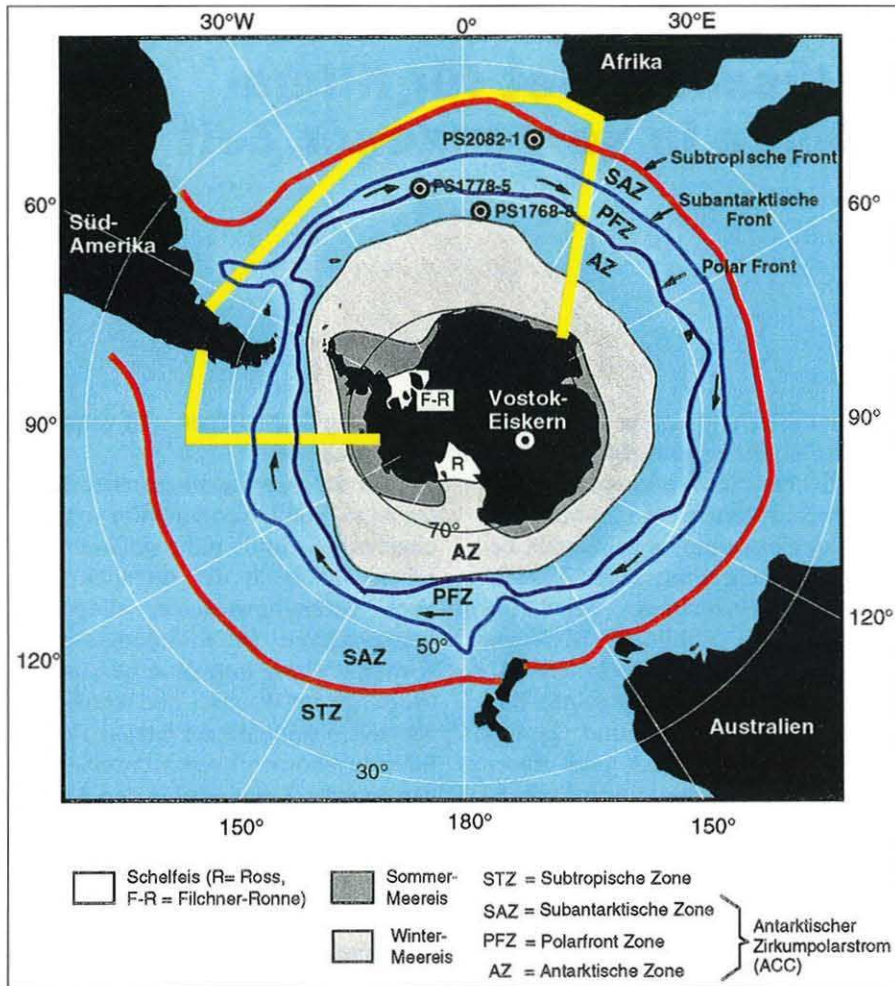


Abb. 1. Schematische Darstellung der globalen Zirkulationszelle nach Broecker [1, 2] mit dem Austausch von kälterem Tiefenwasser (blau) und wärmerem Oberflächenwasser (rot) im Weltozean („globales Transportband“). Der Antarktische Zirkumpolarstrom (ACC) stellt das zentrale Bindeglied dar. Die Zufuhr warmer Wassermassen in den Nordatlantik ist insbesondere für das Klima in Europa von entscheidender Bedeutung.



**Abb. 2.** Schematische Darstellung der Stromsysteme im Südpolarmeer sowie der Verbreitung des Meereises im Süd-Winter und Süd-Sommer. Die ozeanischen Frontensysteme unterteilen den Antarktischen Zirkumpolarstrom in Strombänder mit unterschiedlichen ozeanographischen Merkmalen. Probenahmegebiete während „Polarstern“-Expeditionen in gelbem Kasten. Markiert sind die Positionen des Vostok-Eiskerns und der ausgewählten Sedimentkernpositionen.



**Abb. 3.** Gerät zur Entnahme von Oberflächensedimentproben (Multicorer) nach Beprobung des Tiefseebodens (links). Ein 22-m-Kolbenlot zur Entnahme von Sedimentkernen vor seinem Einsatz (rechts).

Die Rekonstruktion bietet auch Gelegenheit, numerische Modelle, die die Zirkulation und den Stoffhaushalt im Ozean simulieren, zu überprüfen. Sie tragen damit dazu bei, Prognosen zukünftiger Klimabedingungen zu verbessern. Diese Arbeiten werden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 261 „Der Südatlantik im Spätquartär: Rekonstruktion von Stoffhaushalt und Stromsystemen“ am Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen in Zusammenarbeit mit dem Alfred-Wegener-Institut durchgeführt.

**2 Materialien und Werkzeuge**

Grundlage der meeresgeologischen Arbeiten ist die Bearbeitung von Sedimentkernen, die mit Stahlrohren aus dem Meeresboden herausgestanzt werden und einen gewissen Zeitraum der jüngeren Erdgeschichte dokumentieren, sowie Sedimentproben von der Meeresbodenoberfläche, die heutige Bedingungen widerspiegeln und als Vergleichsproben benötigt werden (Abbildung 3). Die Entnahme der Proben erfolgte unter zum Teil äußerst widrigen Wetter- und Eisbedingungen während verschiedener Expeditionen mit dem eisbrechenden Forschungsschiff „Polarstern“. So konnte mit der Zeit ein umfangreiches Probennetz aufgebaut werden, das den atlantischen Sektor des Südpolarmeeres und die angrenzenden Gebiete abdeckt (Abbildung 2).

Ein weiterer Schritt ist die Entwicklung eines Inventars von Methoden, mit denen sich die in den Sedimenten gespeicherten Klima- und Umweltsignale entschlüsseln und möglichst quantifizieren lassen. Dabei müssen verschiedene Ansätze verfolgt werden, da die Signale in Form von Mikrofossilvergesellschaftungen, als Zusammensetzung von Sauerstoff- und Kohlenstoffisotopen in Mikrofossilien, aber auch als Zusammensetzung und Korngrößenverteilung der Sedimentkomponenten gespeichert sind. Die Methodenentwicklung stützt sich auf Voruntersuchungen, die sich mit der geographischen Verbreitung lebender Mikroorganismen, ihrem Transport durch die Wassersäule und ihrer Überlieferung und Verbreitung in Sedimenten beschäftigen.

Aus der Zusammensetzung der im Sediment überlieferten kieseligen und kalkigen Skelett- und Gehäuseteile von Algen (Diatomeen) und Protozoen

(Radiolarien, Foraminiferen), die auch heute im Oberflächenwasser leben, lassen sich mit statistischen Methoden die Temperaturen des Oberflächenwassers in der Vergangenheit ableiten (Paläowassertemperaturen). Die dabei eingesetzten Rechenprogramme wurden am AWI so weiterentwickelt, daß eine schnelle und vielseitige Anwendung der Methoden möglich ist. Wegen ihrer weiten Verbreitung und guten Erhaltungsfähigkeit werden Mikrofossilien mit kieseliger Skelettsubstanz (Opal), wie Diatomeen und Radiolarien, in der antarktischen Kaltwasserzone und die kalkigen Foraminiferen in wärmeren Zonen als „Paläo-Thermometer“ verwendet.

Die Paläowassertemperaturen gehen in empirische Gleichungen ein, mit denen aus der Zusammensetzung der Sauerstoffisotope in Foraminiferen auch die Paläosalzgehalte des Oberflächenwassers abgeschätzt werden. Temperaturen und Salzgehalte sind grundlegende Daten für die Rekonstruktion der ozeanischen Austauschprozesse, die in enger Wechselwirkung zum globalen Klimageschehen stehen. Sie sind damit auch entscheidend für die Modellierung der Vorgänge im Ozean. Diese Daten werden auch für die Berechnung von Gleichungen benötigt, aus denen sich die Gehalte des Treibhausgases Kohlendioxid im Wasser ableiten und damit Austauschprozesse zwischen Ozean und Atmosphäre in der geologischen Vergangenheit rekonstruieren lassen.

Änderungen der Meereisausdehnung lassen sich aus dem Vorkommen bestimmter Diatomeen-Indikatorarten ableiten. Der Umfang der biologischen Produktivität in der Deckschicht des Ozeans, der Einfluß auf den Stoffkreislauf und den klimarelevanten Gasaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre hat, kann aus der Menge am Ozeanboden abgelagerter Substanz, die von Organismen produziert worden ist, wie biogenem Opal und organischem Kohlenstoff sowie aus der Artenverteilung der Mikrofossilien abgeschätzt werden.

### 3 „Paläo-Thermometer“-Messungen im Südpolarmeer

Voraussetzung für den Einsatz statistischer Methoden zur Rekonstruktion von Paläotemperaturen des Oberflächenwassers ist, daß die geographische Artenverteilung der Mikrofossilien in

Oberflächensedimenten mit den heutigen hydrographischen Eigenschaften des Oberflächenwassers zu korrelieren ist.

In Sedimenten des Südpolarmees lassen sich besonders gut kieselige Mikrofossilien wie die Diatomeen (Kieselalgen) und die Radiolarien als „Paläo-Thermometer“ nutzen. Sie werden auch heute in großen Mengen als Plankton im Südpolarmeer produziert. Dies führt dazu, daß im Südpolarmeer circa zwei Drittel des im Weltozean abgelagerten biogenen Opals in einem zirkumantarktischen Sedimentgürtel gespeichert wird. Die unterschiedlichen Artengemeinschaften der kieseligen Mikroorganismen, die in Oberflächensedimenten des Südpolarmees erhalten sind, lassen sich gut den hydrographischen Bedingungen, wie der Wassertemperatur in ihrem Lebensraum, zuordnen. Sie bilden damit verlässliche Referenzdatensätze, die insbesondere für die Rekonstruktion der Temperaturen des Oberflächenwassers benötigt werden.

Gestützt auf Referenzdatensätze wurden mit der Transferfunktion-Methode an Diatomeen- und Radiolarienvergesellschaftungen aus Sedimentkernen, die aus dem Bereich des ACC's stammen (Abbildung 2), die Wassertemperaturen vergangener Zeiten berechnet. Die Sedimentkerne dokumentieren den Zeitraum der letzten 150 000–250 000 Jahre und erfassen damit die noch heute andauernde Warmzeit, die vor circa 12 ka (ka = tausend Jahre) begann, und die „Eem“-Warmzeit mit dem klimatischen Optimum vor etwa 125 ka sowie zwei kaltzeitliche Zeitabschnitte, die ihre Maxima vor etwa 135 ka bzw. 20 ka hatten. Die gewählten Sedimentkerne stammen aus den verschiedenen Zonen des ACC's (Abbildung 2).

An diesen Positionen liegen die heutigen Oberflächenwassertemperaturen zwischen etwa 1 °C (Antarktische Zone) und 11 °C (Subantarktische Zone). Die Paläowassertemperaturen spiegeln den zyklischen Verlauf der Warm- und Kaltzeiten in zum Teil hoher zeitlicher Auflösung wider. Während der glazialen Maxima vor 135 ka und 20 ka lagen die Temperaturen an den Sedimentkernpositionen um bis zu circa 5 °C niedriger als heute.

Deutlich wärmere Temperaturen, die die heutigen Temperaturen des Oberflächenwassers um circa 3 °C übersteigen, wurden für die „Eem“-

Warmzeit berechnet. Diese Ergebnisse lassen sich gut mit den Änderungen der Paläotemperaturen der Atmosphäre vergleichen, die mit Hilfe von Isotopenmessungen an Eisproben rekonstruiert worden sind, die aus einer Bohrung in das antarktische Inlandeis an der russischen Forschungsstation Vostok stammen (Abbildung 2). Dies ist ein überzeugender Hinweis, daß die entwickelten „Paläo-Thermometer“ verlässliche Temperaturkurven erzeugen. Die Verlässlichkeit der Methode läßt sich auch daraus ableiten, daß sich die Ergebnisse aus unterschiedlichen Fossilgruppen, wie beispielsweise den Diatomeen und Radiolarien, gut vergleichen lassen.

Die zeitliche Entwicklung der Paläowassertemperaturen im Südpolarmeer kann mit der Entwicklung anderer Klimaparameter verglichen werden, wie

- der Sonneneinstrahlung (Insolation) [3],
- der Paläotemperatur der Atmosphäre über der Antarktis (Vostok Eiskern)[4],
- dem globalen Eisvolumen, das sich aus dem Verhältnis von Sauerstoff-Isotopen in kalkigen Foraminiferen ableiten läßt [5] und
- der Änderung des Modus des globalen ozeanischen Transportbandes, der durch einen Index beschrieben wird, der sich auf die Rekonstruktion der Produktion von Nordatlantischem Tiefenwasser (NADW) bezieht [6].

Damit können das zeitliche Zusammenspiel und die Wechselwirkungen klimarelevanter Parameter dokumentiert und die Mechanismen der Klimaentwicklung studiert werden (Abbildung 4). Mit Hilfe statistischer Verfahren wie der Kreuzspektralanalyse wurden diese Beziehungen genauer analysiert. Dabei zeigt sich, daß, initiiert durch Änderungen der Sonneneinstrahlung auf die Nordhemisphäre, die antarktischen Paläotemperaturen der Atmosphäre – gewonnen aus dem Vostok-Eiskern – und die Paläowassertemperaturen als erste Klimaänderungen anzeigen. Zeitlich versetzt folgen Änderungen des globalen Eisvolumens, die sich hauptsächlich auf das Volumen der Eisschilde auf der Nordhemisphäre beziehen und danach das Anspringen des globalen ozeanischen „Förderbandes“ mit verstärkter Tiefenwasserbildung im Nordatlantik (Abbildung 4).

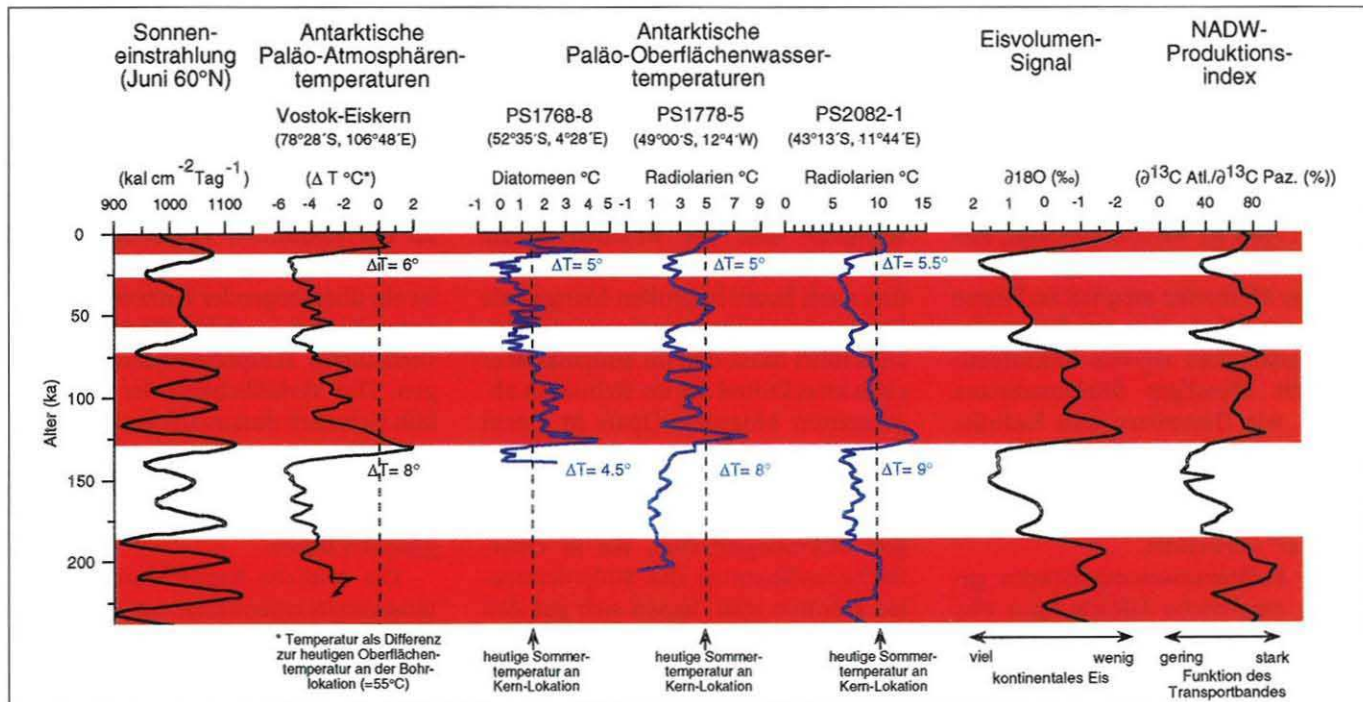


Abb. 4. Vergleich von Temperaturen des antarktischen Oberflächenwassers, berechnet aus Diatomeen- und Radiolarien-Transfer-Funktionen an den Sedimentkernen PS1768-8, PS1778-5 und PS2082-1 mit anderen Klimaparametern wie Sonneneinstrahlung auf die Nordhemisphäre (Insolation) [3], Änderung der Atmosphärentemperatur auf dem Antarktischen Inlandeis (Vostok-Eiskern) [4], Änderung des globalen Eisvolumens [5] und des Modus des globalen Transportbandes [6] im Zeitraum der letzten 250 000 Jahre (250 ka). Warmzeitliche Zeitintervalle sind rot unterlegt.

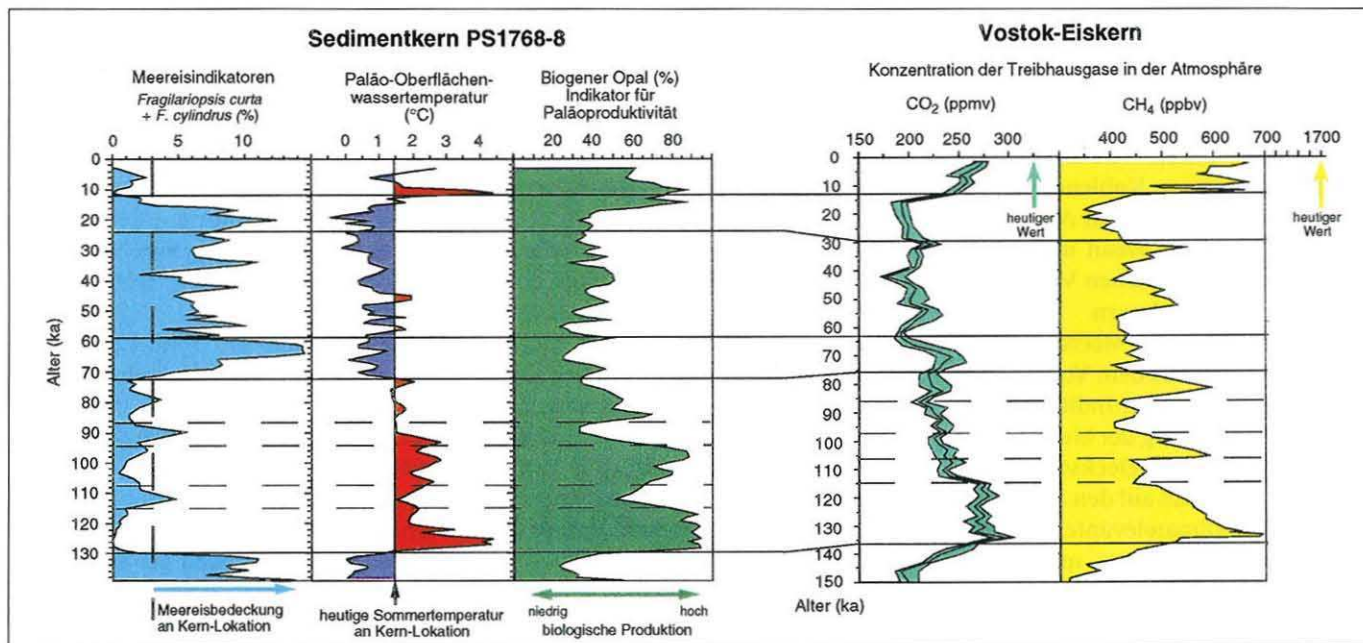


Abb. 5. Vergleich von Klimaparametern aus einem Sedimentkern (PS1768-8) und dem Vostok-Eiskern für den Zeitraum der letzten 135 000 Jahre (135 ka). Änderungen der Meereisverbreitung werden aus Häufigkeitsänderungen der Meereisindikatoren (Diatomeen), die Paläowassertemperaturen aus Berechnungen mit einer Diatomeen-Transfer-Funktion und die Änderungen der biologischen Produktion aus der Menge des biogenen Opals in den Sedimenten abgeleitet. Die Daten zu Treibhausgasen im Vostok-Eiskern stammen aus [9]. Unterschiede in der zeitlichen Zuordnung zwischen Sediment- und Eiskern sind durch den Einsatz unterschiedlicher Altersmodelle bedingt.

Der Verlauf der Paläotemperaturen des Südpolarmees lässt sich wie die Paläotemperaturen der Atmosphäre (Vostok-Eiskern) mit Änderungen der Sommerinsolation bei 60° N korrelieren. Dies lässt darauf schließen, daß Klimaänderungen in südlichen hohen

Breiten durch Änderungen der Atmosphäreneigenschaften hervorgerufen werden, die zumindest zum Teil durch Variationen der Sonneneinstrahlung auf die Nordhalbkugel initiiert werden. Somit spielen Änderungen der Atmosphäreneigenschaften und Wassertemperatur in

südlichen hohen Breiten innerhalb der Klimazyklen eine Vorreiterrolle, denen die Prozesse auf der Nordhalbkugel, bedingt durch den relativ langsamen Abschmelz- und Aufbauprozess der kontinentalen Eisschilde, um 2 000 bis 3 000 Jahre nacheilen. Damit ist zu ver-

muten, daß auch heute das Klima in südlichen hohen Breiten als sensibler Indikator für zukünftige Änderungen der Erdklimas angesehen werden kann. Welche weiteren Umweltparameter sind in dieses Wechselspiel verwickelt?

#### 4 Rekonstruktion der Meereisverbreitung

Das antarktische Meereis kann als ein empfindlicher und rasch reagierender Umweltanzeiger angesehen werden, dessen Verbreitungsänderungen eng an die Atmosphärentemperatur gekoppelt ist [7]. Damit sollte die Meereisausdehnung geologisch auch einen indirekten Anzeiger für natürliche Änderungen der Treibhausgase ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) in der Atmosphäre darstellen, da diese nach aktuellen Modellvorstellungen insbesondere die Temperaturen in hohen Breiten beeinflussen [8].

Gestützt auf kombinierte Untersuchungen an Meereisproben, Material aus Sinkstoff-Fallen sowie Oberflächensedimenten und Sedimentkernen, konnten Indikatoren für die Verbreitung des Meereises in geologischer Vergangenheit definiert werden. Dabei handelt es sich um die Gehäuseteile bestimmter Diatomeenarten (*Fragilariopsis curta*, *F. cylindrus*), die auch heute verbreitet und in hoher Anzahl im antarktischen Meereis und seinen Bildungsräumen vorkommen.

Die kieseligen Gehäuse der Diatomeen sinken zum Meeresboden ab und können als Meereisindikatoren in den Sedimenten überliefert werden. Diese Arten stellen im Verbreitungsgebiet des Wintermeereises 3–50 % der im Oberflächensediment überlieferten Diatomeenvergesellschaftungen. Ihre Häufigkeitsverteilung in Sedimentkernen zeigt deutliche Schwankungen im Wechsel der Warm- und Kaltzeiten. Die Häufigkeitsfluktuationen werden als Anzeiger für Änderungen der Wintermeereisausbreitung gewertet (Abbildung 5).

Ergebnisse aus dem atlantischen Sektor des Südpolarmeeres zeigen, daß die Ausdehnungsgrenze des Wintermeereises während früherer Kaltzeiten gegenüber heute etwa fünf bis sie-

ben Breitengrade nach Norden verschoben war, während sie zur Zeit der klimatischen Optima um 9 ka und 125 ka weiter südlich lag. Dies entspricht einer Zuwachsrate von etwa 50 % für das glaziale Wintermeereis und von etwa 500 % für das glaziale Sommermeereis gegenüber heute. Damit kam es während Glazialzeiten zu einer deutlichen Verringerung der saisonalen Meereisänderungen und zu einer signifikanten Erhöhung des ganzjährigen Albedoeffektes.

Die Änderungen der Meereisverbreitung wirken sich auch auf die biologische Primärproduktion aus. In Glazialzeiten war die Primärproduktion wegen Meereisbedeckung in Gebieten, die während Warmzeiten wie heute durch hohe Primärproduktion gekennzeichnet sind, deutlich reduziert (Abbildung 5). Die Meereisausdehnung ist eng an die Fluktuationen der Wassertemperatur gekoppelt und eilt ebenfalls der Änderungen des globalen Eisvolumens voraus. Eine enge Verknüpfung ergibt sich auch zwischen Meereisverbreitung und den Konzentrationen der Treibhausgase in der Erdatmosphäre, die im Vostok-Eiskern gemessen worden sind [9] (Abbildung 5).

Wie durch Modellsimulationen vorausgesagt, fallen Zeitabschnitte mit hohen natürlichen Konzentrationen an Treibhausgasen, die zu einer Erwärmung der Erdatmosphäre führen, mit Zeiten geringer Meereisausdehnung zusammen. Das Meereis kann damit als Verstärker von klimasteuernden Parametern wie der Insolation und der Änderungen der Treibhausgase angesehen werden und ist damit ein wichtiges und sensibel reagierendes Glied in klimasteuernden Rückkopplungsmechanismen.

#### 5 Ausblick

Die Ergebnisse der angerissenen meeresgeologischen Arbeiten werden zukünftig verstärkt in die Modellbetrachtungen des Erdklimas einfließen und damit zum Verständnis der komplexen klimasteuernden Prozesse beitragen. Es ist geplant, in den nächsten Jahren zeitlich sehr hochaufgelöste Abfolgen im

Südpolarmeer durch Tiefseebohrungen im Rahmen des internationalen „Ocean Drilling Program“ (ODP) zu gewinnen. Die Bohrkernsollen es ermöglichen, auch kurzzeitige Änderungen, wie sie in kontinentalen Eiskernen von Grönland und aus der Antarktis dokumentiert sind, detailliert zu erfassen. Diese Arbeiten werden weitere Erkenntnisse zu den Mechanismen und zur Variabilität natürlicher Klimaabläufe ergeben. Es ist zu hoffen, daß sich daraus der mögliche Einfluß des Menschen auf das Erdklima besser verstehen läßt.

#### Literatur

- [1] W. S. Broecker, D. M. Peteet & D. Rind: Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode for operation?; *Nature* 315 (1985) 21–26.
- [2] W.S. Broecker: Plötzliche Klimawechsel. *Spektrum der Wissenschaft*, (Januar 1996), 86–92.
- [3] A. Berger: Long term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes; *J. Atm. Sci.* 35 (1978) 2362–2367.
- [4] J. Jouzel, C. Lorius, J. R. Petit, C. Ritz, M. Stievenard, P. Yiou, N. I. Barkov, V. M. Kotlyakov & V. Lipenkov: The climatic record from Antarctic ice now extends back to 220 kyr BP. in: J. C. Duplessy und M. T. Spyridakis: Long-term climatic variations, NATO ASI Series, 122 (1994), 213–237.
- [5] G. Wefer: Die Rolle des Ozeans im irdischen Klimasystem; *Geowissenschaften* 13 (1995) 88–92.
- [6] M. E. Raymo, W. F. Ruddiman, N. J. Shackleton & D. W. Oppo: Evolution of Atlantic-Pacific  $\delta^{13}\text{C}$  gradients over the last 2,5 m.y; *Earth and Planet. Sci. Lett.* 97 (1990) 353–368.
- [7] P. Lemke, W.B. Owens & W.D. Hibler III: A coupled sea ice-mixed layer-pycnocline model for the Weddell Sea; *J. of Geophys. Res.* 95 (C6) (1990) 9513–9525.
- [8] M. I. Hoffert: Climatic Change and Ocean Bottom Water Formation: Are We Missing Something? in: M.E. Schlesinger (ed.) *Climate-Ocean Interaction* (1990), S. 295–317.
- [9] C. Lorius, J. Jouzel, D. Raynaud, J. Hansen, H. Letreut: The ice-core record: climate sensitivity and future greenhouse warming; *Nature* 347 (1990) 139–145.

#### Anschrift der Verfasser:

Dr. Rainer Gersonde, Dr. Andrea Abelmann, Dr. Uta Brathauer, Dr. Rainer Sieger und Dr. Ulrich Zielinski, Sektion Meeresgeologie, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Columbusstraße, D-27515 Bremerhaven.