

# Stabile Kohlenstoffisotope und Nährsalzgehalt des Südatlantiks im Spätquartär

Andreas Mackensen, Hannes Grobe, Hans-Wolfgang Hubberten  
Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI)

*Eine am Meeresboden lebende Foraminiferengattung speichert Informationen über Nährsalzgehalte und das Alter der entsprechenden Wassermassen. Diese Daten erlauben Aussagen über eiszeitliche Muster im Vergleich zu heutigen Zirkulationsmustern und geben Auskunft über deren Veränderungen.*

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches „Der Südatlantik im Spätquartär“ beteiligt sich das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) seit 1989 in Kooperation mit der Universität Bremen an der Rekonstruktion der spätquartären Entwicklung der Strömungs- und Produktionssysteme im Südatlantik. Ein besonderer Schwerpunkt des AWI liegt dabei auf der Tiefen- und Bodenwasserzirkulation.

Im Quartär wird das Klimageschehen der nördlichen Halbkugel wesentlich vom Wärmefluß und vom Salztransport in den Nordatlantik gesteuert. Der transäquatoriale Energietransport bestimmt, ob mächtige kontinentale Eiskappen aufgebaut werden oder zumindest, ob deren Bildung verhindert oder zeitlich verzögert wird. Wesentliche Informationen zum Strömungs- und Produktionssystem sowie zum Stoffhaushalt des Ozeans können aus der Verbreitung der Nährsalze (zum Beispiel Phosphat) abgeleitet werden.

Je älter eine Tiefen- und Bodenwassermasse ist, um so phosphatreicher ist sie. Der Gehalt des Meerwassers an gelöstem Phosphat ist in den tieferen Wasserstockwerken mit dem Gehalt des stabilen Kohlenstoffisotops  $^{13}\text{C}$  im gelösten anorganischen Kohlenstoff des Wassers korreliert. Der  $^{13}\text{C}$ -Gehalt des Tiefen- und Bodenwassers wiederum wird in den karbonatischen Gehäusen von am Meeresboden lebenden und fossil erhaltungsfähigen Einzellern (benthischen Foraminiferen) gespeichert. Aufgrund dieser Zusammenhänge kann durch die Bestimmung des  $^{13}\text{C}$ -Gehaltes von fossilen Foraminiferengehäusen der Phosphatgehalt und damit das Zirkulations- und Produktionssystem eines vergangenen Ozeans rekonstruiert werden.

Diese seit 1988 eingesetzte Methode ist zu einer wesentlichen Quelle für quantitative paläozeanographische Rekonstruktionen der globalen ozeanischen Zirkulation geworden (Curry et alii, 1988; Duplessy et alii, 1988). Mit zunehmender Datenmenge wurde aber auch deutlich, daß einige der solchermaßen hergeleiteten Rekonstruktionen in Konflikt geraten mit Ergebnissen aus der paläozeanographischen Modellierung oder aus anderen methodischen Ansätzen (Broecker, 1993).

Im folgenden soll gezeigt werden, wie aus der Analyse eines lokal begrenzten Probensatzes aus dem Grenzbereich zwischen Südatlantik und antarktischem Ringozean neue Eckpunkte für die Interpretation fossiler  $^{13}\text{C}$ -Gehalte aus benthischen Foraminiferen gewonnen wurden. Die Bedeutung dieser Daten für die globale Rekonstruktion der Tie-

fen- und Bodenwasserzirkulation während der spätquartären Klimazyklen wird diskutiert.

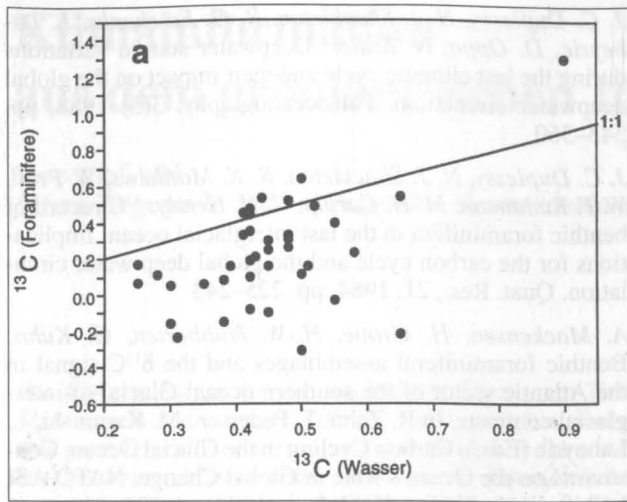
## Probenmaterial und Analyse

Mit dem Forschungsschiff „Polarstern“ des Alfred-Wegener-Instituts wurden ein ozeanographischer Schnitt und ein geologisches Profil zwischen Südafrika und dem antarktischen Kontinentalhang beprobt. Für die Messung des  $^{13}\text{C}$ -Gehaltes des gelösten anorganischen Kohlenstoffs wurden 250 Milliliter Wasser mit Quecksilberchlorid vergiftet, luftdicht versiegelt und bis zur weiteren Bearbeitung an Land gekühlt gelagert. Dort wurde dann das Kohlendioxid mit Phosphorsäure ausgetrieben, in Kühlfallen gereinigt und mit einem Massenspektrometer das Kohlenstoffisotopenverhältnis gemessen.

Das Oberflächensediment wurde mit Hilfe eines Sedimentgreifers untersucht, mit dem sich aus den obersten 30 Zentimetern des Meeresbodens kurze Sedimentkerne herausstechen und mit völlig ungestörter Sedimentoberfläche an Bord des Schiffes bringen lassen. Die Sedimentoberfläche wurde gesiebt, und aus der Korngrößenfraktion größer als 125 Mikrometer wurden benthische Foraminiferen einer bestimmten Gattung ausgelesen. In einer automatischen Präparationslinie wurde dann durch Zugabe von konzentrierter Phosphorsäure aus den karbonatischen Gehäusen ( $\text{CaCO}_3$ ) dieser Foraminiferen der Kohlenstoff als  $\text{CO}_2$  freigesetzt und der  $^{13}\text{C}$ -Gehalt im direkt angekoppelten Massenspektrometer bestimmt. Mit Hilfe der zeitgleichen Beprobung der Wassersäule und der auf dem Boden lebenden Foraminiferen war es erstmals möglich, den  $^{13}\text{C}$ -Gehalt des Wassers direkt mit dem der karbonatischen Gehäuse der Tiere unter verschiedenen ozeanischen Zirkulations- und Produktionsbedingungen zu vergleichen.

## Ergebnisse

Bisher liegen weltweit erfaßte Daten vor, die belegen, daß eine bestimmte benthische Foraminiferengattung das  $^{13}\text{C}$ -Signal des Wassers im isotopenchemischen Gleichgewicht, also im Verhältnis 1:1, in ihre karbonatischen Gehäuse einbaut (Duplessy et alii, 1984; McCorkle & Keigwin, 1994). Deshalb wurde diese Gattung ausgewählt, um Nährsalzgehalt und Alter vergangener Wassermassen aus dem  $^{13}\text{C}$ -Signal von fossilen Foraminiferen zu rekonstruieren. Trägt man nun die von uns im Südatlantik gemessenen  $^{13}\text{C}$ -Gehalte der benthischen Foraminiferen über den  $^{13}\text{C}$ -Gehalten der Bodenwassermasse an jeder einzelnen Station auf, so wird deutlich, daß die Mehrzahl der Meßwerte unter der Geraden zu liegen kommt, die das 1:1 Verhältnis beschreibt (Bild 1a). Genauer gesagt, auf 22 von 34 Stationen wird der  $^{13}\text{C}$ -Gehalt des im Wasser gelösten  $\text{CO}_2$  nicht korrekt von der Foraminifere aufgezeichnet. Die Umsetzung dieser Werte in eine paläozeanographische Rekonstruktion würde

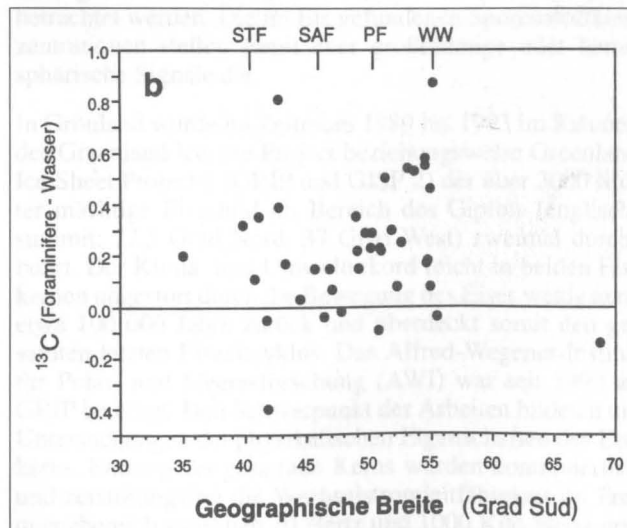


**Bild 1a:**  $^{13}\text{C}$ -Gehalte benthischer Foraminiferen, aufgetragen gegen die  $^{13}\text{C}$ -Gehalte der Bodenwassermasse.

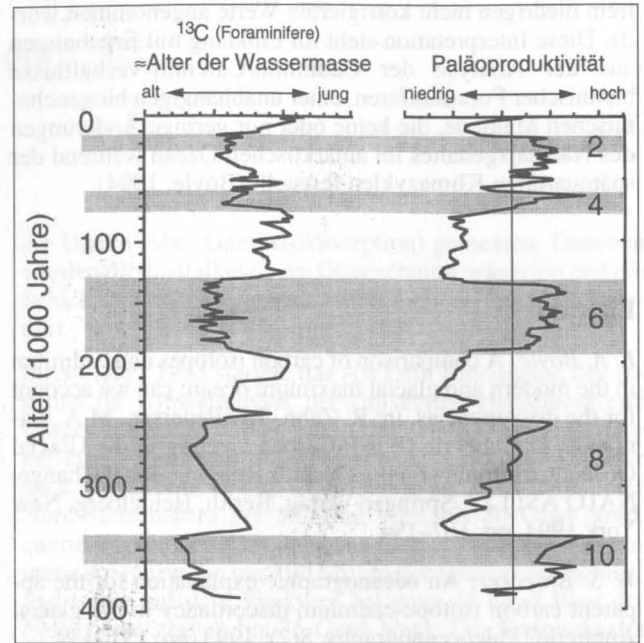
zwangsläufig zu einer Überschätzung der Nährsalzgehalte und damit auch zur Überschätzung des Alters der Wassermassen führen (Mackensen et alii, 1993).

Eine Erklärung für die um bis zu 0,4 Promille zu niedrigen Foraminiferenwerte ist aus dem Bild 1b zu entnehmen. Wenn die Abweichung vom Gleichgewicht über der geographischen Breite aufgetragen wird, erkennt man, daß die größten Abweichungen unterhalb bestimmter ozeanographischer Fronten auftreten. So ist deutlich eine Konzentration der hohen Abweichungen zwischen der subtropischen Front (STF) und der subantarktischen Front (SAF) sowie zwischen Polarfront (PF) und der südlichen Grenze des Weddellwirbels (WW) auszumachen. Es ist bekannt, daß an diese Fronten Hochproduktionsbedingungen geknüpft sind, die saisonal und kurzfristig zu einem hohen Fluß organischen Materials zum Meeresboden führen. Der Meeresboden wird so durch eine mehrere Millimeter dicke Lage aus schwach zersetzten Algen zugedeckt. Innerhalb dieser Lage wird das  $\delta^{13}\text{C}$ -Verhältnis des Wassers durch den bakteriellen Abbau der organischen Substanz im Vergleich zur überlagernden Bodenwassermasse stark erniedrigt. Der Gehäusebau der benthischen Foraminifere, angeregt durch

**Bild 1b:** Differenz der  $^{13}\text{C}$ -Gehalte zwischen benthischen Foraminiferen und der sie umgebenden Wassermasse, aufgetragen über der geographischen Breite. Die Lage der ozeanischen Fronten ist am oberen Rand angegeben (STF=subtropische Front, SAF=subantarktische Front, PF=Polarfront, WW=südliche Grenze des Weddellmeerwirbels).



die erhöhte Nahrungszufuhr, erfolgt dann in diesem Mikromilieu. Im Gehäuse der Foraminifere wird folglich das niedrige Isotopensignal aus der zersetzten Algenlage gespeichert und nicht das der eigentlichen Bodenwassermasse.



**Bild 2:**  $^{13}\text{C}$ -Gehalte von Foraminiferen und Paläoproduktivität aus einem Sedimentkern von 43 Grad südlicher Breite, aufgetragen gegen die Zeit bis 400 000 Jahre vor heute. Die glazialen Kaltzeiten 2, 4, 6, 8 und 10 sind grau hinterlegt.

Die Auswirkungen dieses „Hochproduktionseffektes“ auf globale paläozeanographische Rekonstruktionen soll anhand eines Sedimentkerns von 43 Grad Süd, knapp südlich der subtropischen Front deutlich gemacht werden (Mackensen et alii, 1994). Das Bild 2 zeigt die  $^{13}\text{C}$ -Gehalte, gemessen an benthischen Foraminiferen aus einem Sedimentkern, aufgetragen gegen die Zeit vor heute. Weiterhin ist über den Gehalt des Sediments an organischem Kohlenstoff nach einem Ansatz von Müller und Suess (1979) die Paläoproduktivität berechnet. Deutlich zeichnen sich die global bekannten zyklischen Fluktuationen der  $^{13}\text{C}$ -Gehalte ab. In glazialen Kaltzeiten werden die  $^{13}\text{C}$ -Werte niedriger, während die Paläoproduktivität erhöht ist.

Die  $^{13}\text{C}$ -Werte in den Kaltzeiten gehören zu den weltweit niedrigsten bekannten Werten, sie sind niedriger als im glazialen Pazifik. Dies scheint darauf hinzudeuten, daß im antarktischen Ringozean in den Kaltzeiten die nährsalzreichste und damit älteste Bodenwassermasse lag, im Gegensatz zur heutigen globalen Zirkulation, in der die ältesten Bodenwassermassen im Pazifik anzutreffen sind. Eine Tiefenwasserbildung im Nordpazifik wäre somit neben einer reduzierten Bildung von nordatlantischem Tiefenwasser wahrscheinlich.

Berücksichtigt man jedoch die geographische Position des Sedimentkerns unter einem ozeanographischen Frontensystem, das sich, wie an den extremen Produktivitätsänderungen abzulesen ist, während der Kaltzeiten nach Norden verlagert hat, so muß man um den von uns nachgewiesenen „Hochproduktionseffekt“ in den Kaltzeiten korrigieren. Dies hat zur Folge, daß die glaziale antarktische Bodenwassermasse nicht mehr älter als die tiefen Wassermassen im Pazifik gewesen sein muß.

Da die meisten der für die Rekonstruktion der zirkumantarktischen Zirkulation zur Verfügung stehenden Sediment-

kerne im Einflußbereich eines Hochproduktionsgürtels liegen oder in Glazialzeiten lagen, kommt dieser Korrektur eine wesentliche Bedeutung zu (Mackensen et alii, 1993). Heißt es doch, daß das glaziale Zirkulationsmuster nicht so radikal verändert gewesen sein muß, wie es aufgrund der extrem niedrigen nicht korrigierten Werte angenommen wurde. Diese Interpretation steht im Einklang mit Ergebnissen aus der Analyse der Cadmium/Calcium-Verhältnisse benthischer Foraminiferen, einer unabhängigen biogeochemischen Methode, die keine oder nur geringe Änderungen des Nährsalzgehaltes im antarktischen Ozean während der spätquartären Klimazyklen feststellt (Boyle, 1994).

## Literatur

*E. A. Boyle:* A comparison of carbon isotopes and cadmium in the modern and glacial maximum ocean: can we account for the discrepancies, in: R. Zahn, T.F. Pedersen, M.A. Kaminski, L. Labeyrie (Eds.): Carbon Cycling in the Glacial Ocean. Constraints on the Ocean's Role in Global Change, NATO ASI I 17. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1994, pp. 167–194

*W. S. Broecker:* An oceanographic explanation for the apparent carbon isotope-cadmium discordancy in the glacial Antarctic? *Paleoceanography*, 8(2), 1993, pp. 137–139

*W. B. Curry, J. C. Duplessy, L. D. Labeyrie, N. J. Shackleton:* Changes in the distribution of  $\delta^{13}\text{C}$  of deep water  $\Sigma\text{CO}_2$  between the last glaciation and the Holocene. *Paleoceanography*, 3(3), 1988, pp. 317–341

*J. C. Duplessy, N. J. Shackleton, R. G. Fairbanks, L. Labeyrie, D. Oppo, N. Kallel:* Deepwater source variations during the last climatic cycle and their impact on the global deepwater circulation. *Paleoceanography*, 3(3) 1988, pp. 343–360

*J. C. Duplessy, N. J. Shackleton, R. K. Matthews, W. Prell, W. F. Ruddiman, M. H. Caralp, C. H. Hendy:*  $^{13}\text{C}$  record of benthic foraminifera in the last interglacial ocean. Implications for the carbon cycle and the global deep water circulation. *Quat. Res.*, 21, 1984, pp. 225–243

*A. Mackensen, H. Grobe, H.-W. Hubberten, G. Kuhn:* Benthic foraminiferal assemblages and the  $\delta^{13}\text{C}$ -signal in the Atlantic sector of the southern ocean: Glacial-to-interglacial contrasts. In R. Zahn, T. Pedersen, M. Kaminski, L. Labeyrie (Eds.): Carbon Cycling in the Glacial Ocean. Constraints on the Ocean's Role in Global Change, NATO ASI I 17. Springer-Verlag, Heidelberg 1994, pp. 105–144

*A. Mackensen, H.-W. Hubberten, T. Bickert, G. Fischer, D. K. Fütterer:* The  $\delta^{13}\text{C}$  in foraminiferal tests of *Fontbotia wuellerstorfi* (Schwager) relative to the  $\delta^{13}\text{C}$  of dissolved inorganic carbon in southern ocean deep water. Implications for glacial ocean circulation models. *Paleoceanography*, 8(5), 1993, pp. 587–610

*D. C. McCorkle, L. D. Keigwin:* Depth profiles of  $\delta^{13}\text{C}$  in bottom water and core-top *C. wuellerstorfi* on the Ontong-Java Plateau and Emperor Seamounts. *Paleoceanography*, 9(2), 1994, pp. 197–208

*P. J. Müller, E. Suess:* Productivity, sedimentation rate, and sedimentary organic matter in the oceans. – 1. Organic carbon preservation. *Deep-Sea Res.*, 26, 1979, pp. 1347–1362