

Marine Mikrofossilien

Indizien für früheren Klimawandel in den Ozeanen

Climate Change, der Klimawandel, ist derzeit in aller Munde. Um diesen wirklich verstehen zu können und ihm effektiv gegenzusteuern, ist es wichtig, die Klimaentwicklung früherer Zeiten nachzuzeichnen und, mehr noch, die dahinter stehenden Mechanismen zu verstehen. Manchmal geraten dabei Winzlinge, die auf den ersten Blick so gar nichts mit dem Thema zu tun haben, in unser Blickfeld. Eine Arbeitsgruppe des Museums für Naturkunde der Humboldt-Universität zu Berlin untersucht einzellige Protisten, um ihnen Informationen über das Klima des südlichen Atlantiks während der letzten 65 Millionen Jahre zu entlocken.

Unser heutiges Klima wird weltweit stark von den Ozeanen beeinflusst. Besonders im Kohlenstoffkreislauf spielen die Ozeane eine besondere Rolle. Sie sind darüber hinaus die Quelle für annähernd die Hälfte des Sauerstoffs auf unserem Planeten. Die damit verbundenen Prozesse versorgen in der Nahrungskette, über die Umwandlung von pflanzlichem Material in andere Lebensformen, auch die Menschheit mit einem wesentlichen Teil ihrer Nahrung, besonders die Bevölkerung vieler ärmerer Länder. Alle diese grundlegenden Vorgänge werden weitgehend vom ozeanischen Plankton kontrolliert – winzigen, meistens einzelligen Algen und anderen Einzellern (Protisten), die von ihnen leben und zusammen mit Bakterien und Viren zum größten Teil in den obersten paar hundert Metern Wassersäule unter der Oberfläche der Ozeane zu Hause sind. Viele dieser Formen bestehen aus nacktem Protoplasma und werden daher nicht als Fossilien überliefert. Andere aber besitzen harte, mineralisierte Gehäuse. Zu ihnen gehören einige Gruppen, die von größter Bedeutung für den chemischen Kreislauf der Ozeane sind. Stirbt deren lebende Substanz ab, so häufen sich ihre Gehäuse auf dem Meeresboden an. Sie bilden einen Tiefseeschlamm, der den basaltischen Meeresboden in Lagen von mehreren hundert Metern Dicke bedeckt. Diese mächtigen Schlammschichten stellen eine der reichsten, detailliertesten und vollständigsten Dokumentationen des Lebens vergangener Zeiten dar. Sie werden in verschiedener Weise von der Mikropaläontologie ausgewertet und sind für die geologische Datierung anderer Sedimente von zentraler Bedeutung. Hier hat sich ein umfangreiches Arbeitsgebiet namens Biostratigraphie entwickelt. Mikrofossilien erweisen sich jedoch auch als wertvoll, um Umweltbedingungen der Vergangenheit zu erschließen, sie gewissermaßen zu rekonstruieren. Beide Forschungszweige sind weithin Grundlage erdgeschichtlicher Forschung, besonders wenn es um die Untersuchung von Klimaveränderungen in der Vergangenheit geht. Als »angewandte« Mikropaläontologie werden ähnliche Fragen auch in der Industrie bearbeitet – die Mikropaläontologie hat viele Jahrzehnte lang eine wesentliche Rolle bei der Entwicklung der Ölförderung gespielt.

Das Museum für Naturkunde in Berlin besitzt nur eine hauptamtliche wissenschaftliche Stelle für Mikropaläontologie. Zwei andere Wissenschaftler des



Abb. 1

Drei der bis jetzt über 1000 beschriebenen Radiolarien-Arten des Känozoikums (letzte 65 Millionen Jahre): *Euchitonia* sp., eine Art aus dem oberen Bereich des Meeres; *Siphocampe arachnea*, eine marine Tiefwasser-Art; und *Calocyclus semipolita*, eine ausgestorbene Art der Polar-Gebiete.

Museums sind wenigstens teilweise mikropaläontologisch tätig (Prof. Dr. W. Kießling, Arbeitsgruppe Evolutionary Dynamics, und Priv. Doz. Dr. B. Mohr, Kustodin für Paläobotanik). Trotz dieses verhältnismäßig kleinen Teams ist das Museum auf mehreren Gebieten der Mikropaläontologie aktiv. Geforscht wird dabei vor allem über biologische Evolutionsmechanismen und die Rekonstruktion früherer Umweltbedingungen anhand von Radiolarien (Abb. 1), auf deren Taxonomie das Team am Museum seinen Schwerpunkt legt (De Wever et al. 2001; Lazarus 2005). Darüber hinaus bauen wir Referenzsammlungen auf und sind am Aufbau internationaler wissenschaftlicher mikropaläontologischer Datenbanken stark beteiligt – beides unentbehrlich als wissenschaftliche Grundlagen für die Forschung der nächsten Jahrhunderte. Herausragende Schätze am Berliner Museum sind in diesem Zusammenhang die Ehrenberg-Sammlung, die auf den Gründer der Mikropaläontologie und früheren Professor der Humboldt-Universität, Christian Gottfried Ehrenberg (1795–1876), zurückgeht und eine der

weltweit ältesten und historisch bedeutendsten Mikrofossilien Sammlungen darstellt, sowie die vom Museum geleitete globale *Micropaleontology Reference Center* Sammlungen von Tiefsee-Mikrofossilien (Lazarus 2006).

Um einen Eindruck davon zu vermitteln, welche mikropaläontologische Forschung am Museum für Naturkunde erfolgt, wollen wir im folgenden zeigen, wie Mikrofossilien eingesetzt werden können, frühere Umweltveränderungen zu dokumentieren und zu analysieren. Man macht sich dabei zu nutze, dass marine Planktonarten so präzise an spezifische ozeanische Gegebenheiten angepasst sind, dass ihre mikrofossilen Überreste in der Tiefsee vielfach als Indikatoren oder »Proxies« benutzt werden können. Sie sind Indikatoren, anhand derer man die Umweltbedingungen der Ozeane in der Vergangenheit rekonstruieren kann. Wie dies funktioniert, lässt sich exemplarisch an den beiden hier folgenden Forschungsprojekten veranschaulichen: an Untersuchungen zur Änderungen der Produktivität des Atlantischen Ozeans über einen geologisch verhältnismäßig kurzen Zeitraum (Tausende bis ein paar Millionen von Jahren) und an Studien über Veränderungen im Kreislauf des Südlichen Ozeans über einen längeren Zeitraum (einige zehn Millionen Jahre).

Rekonstruktion ozeanischer Produktivität über die letzten sechs Millionen Jahre

Wie weiter oben bereits erwähnt spielen die Ozeane eine Schlüsselrolle im Kreislauf des Kohlenstoffs. Die Aufnahme von gelöstem anorganischem Kohlenstoff durch die Ozeane steht im Gleichgewicht mit dem Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre und der Abgabe von Kohlenstoff an tiefere Wasserschichten und Sedimente. Die Ozeane haben auf diese Weise einen maßgeblichen Einfluss auf den gesamten Kohlenstoffkreislauf der Erde. Es ist wichtig, sich klarzumachen, dass dieser Mechanismus (bekannt als »Kohlenstoffpumpe«) das Klima über ganz verschieden lange Zeiträume gewandelt hat, einschließlich der kurzen Zeitspanne, die die anthropogene, d.h. vom Menschen ausgelöste Klimaveränderung umfasst. Die Menge des Kohlenstoffs, der in verschiedenen Lösungsformen im Wasser der Ozeane gespeichert ist, ist um ein Vielfaches höher als die Menge, von der man annimmt, dass sie in Form von Kohlendioxid die Schlüsselrolle bei der Auslösung des eiszeitlichen und zwischeneiszeitlichen Klimawechsels gespielt hat. Entscheidend ist, dass im Wasser gelöster Kohlenstoff im Gegensatz zu den langzeitlichen, verhältnismäßig stabilen Karbonaten der Tiefseesedimente sehr dynamisch ist. Wenn sich die »Chemie« der Ozeane ändert, können sich entscheidende Gleichgewichte über Perioden von nur ein paar Hunderten von Jahren verschieben. So können auch verhältnismäßig kleine

Änderungen des Kohlenstoffhaushalts der Ozeane über relativ geringe Zeiträume weitreichende Konsequenzen für das Klima der Erde haben.

Um die Produktivität der Ozeane (den »Motor« der Kohlenstoffpumpe) in vergangenen Zeiten quantifizieren zu können, ist es von größter Bedeutung, dass diejenigen Indikatoren bzw. Proxies, die man dafür heranzieht, auch wirklich verlässliche Informationen liefern. Ein grundsätzlich hervorragend geeigneter Proxy sollte der in den Sedimenten gespeicherte Kohlenstoff sein. Da dieser als Indikator für die Kohlenstoffabgabe aus den oberflächlichen Gewässern zu einer definierten Zeit gelten kann, ließe sich also theoretisch folgende Gleichung aufmachen: Je mehr organischer und anorganischer (Karbonat-)Kohlenstoff in den Sedimenten einer definierten Periode lagert, desto produktiver war der Ozean zu diesem Zeitpunkt. Diese einfache Rechnung krankt allerdings an mehreren Faktoren. Karbonat wird in vielen ozeanischen Sedimenten zum Teil oder sogar vollständig von »korrosivem« Grundwasser gelöst. Organischer Kohlenstoff ist unglücklicherweise auch über geologische Zeiträume sehr instabil. Er wird in den Sedimenten leicht von Bakterien aufgenommen oder auf andere Art und Weise abgebaut. Durch diese nachträgliche Senkung des Kohlenstoffgehalts in den Sedimenten reduziert sich der Aussagewert der ermittelten Werte als Dokumentation der ozeanischen Produktivität. Schlimmer noch: das Wasser in den Poren der Sedimente wird durch den Abbau von organischem Kohlenstoff sauer, löst viele der aus Karbonaten bestehenden Mikrofossilien auf und entfernt damit den im Karbonat gebundenen anorganischen Kohlenstoff. Diese »Erhaltungsprobleme« des primären Kohlenstoffsignals in den Sedimenten gilt besonders für Gebiete höherer Produktivität – in Auftriebszonen vor der Küste und entlang der Frontalsysteme des offenen Ozeans in höheren Breiten. Diese Zonen sind verantwortlich für den größten Teil des von den Ozeanen abgegebenen Kohlenstoffs (die meisten Bereiche der Ozeane sind nicht sehr produktiv und geben nur kleine Mengen von Kohlenstoff an Sedimente ab).

Wie kann man mit diesen Problemen umgehen? Die Paläoozeanographen setzen eine »Multiproxy«-Methode ein – sie benutzen so viele Indikatoren für Produktivitätswandel in der Vergangenheit wie möglich, in der Hoffnung, trotz der Probleme im Einzelfall ein stimmiges Gesamtbild zu erhalten. Ozeanische Sedimente unter Zonen mit hoher Produktivität enthalten eine große Vielfalt von sedimentologischen Komponenten – Karbonate von Coccolithophoren und Foraminiferen, biosilicisches Material (Diatomeen und Radiolarien) sowie organische Kohlenstoffverbindungen. Aus allen diesen Komponenten kann man Produktivitäts-Indika-

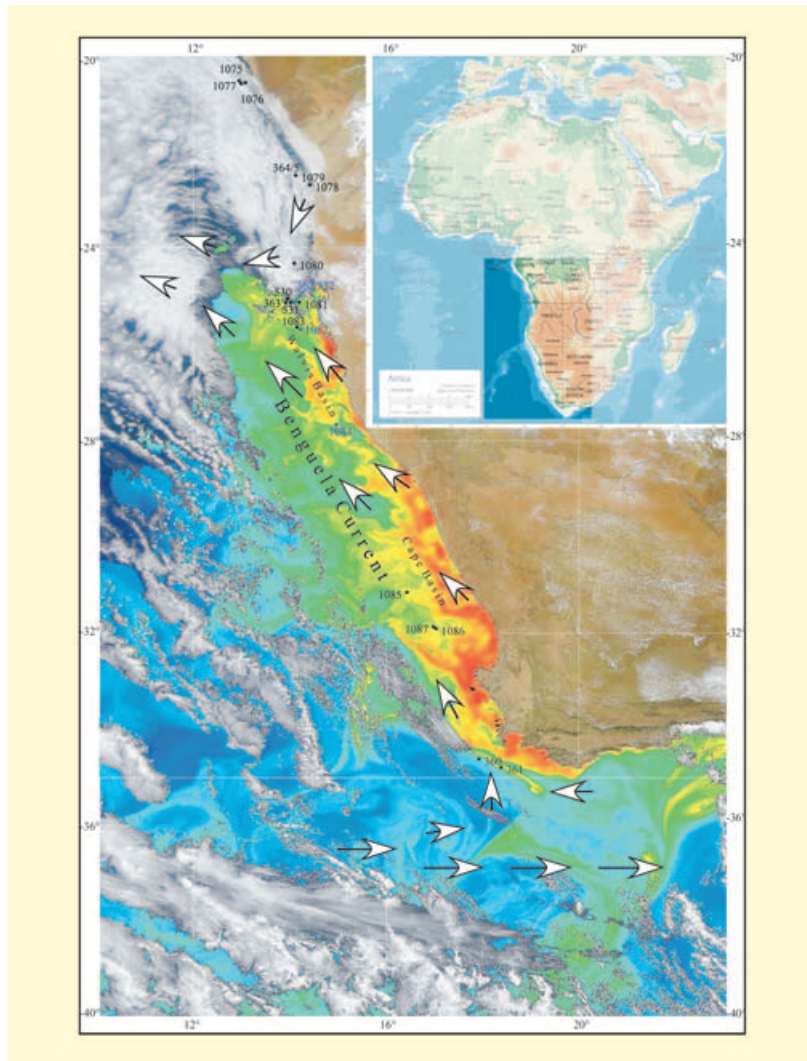


Abb. 2
 Benguela-Auftriebsgebiet mit Planktongehalt (Satellitenaufnahme). Warme Farben weisen auf höheren Planktongehalt hin; die weißen Pfeile geben die Hauptströmungen an. Blau gekennzeichnet sind die vom Autor untersuchten Tiefsee-Bohrkerne; andere Tiefsee-Bohrkerne sind schwarz markiert. (Quelle: NASA, seawifs.gsfc.nasa.gov)

toren entwickeln, obwohl die Analyse und die damit verbundene Rekonstruktion früherer Produktivität in den Ozeanen bis jetzt überwiegend qualitativ ist und anfällig für verschiedene Fehler bleibt.

Hier setzen wir mit der Entwicklung eines neuen paläoozeanographischen Proxy für Produktivität an, der dem Problem der Reduzierung der Kohlenstoffsignale aus dem Weg gehen soll. Grundlage dafür ist die Beobachtung von Richard Casey in den 1980igern an der Rice Universität in Texas, dass Radiolarien, im Gegensatz zu anderen Mikrofossilien liefernden Planktonorganismen, nicht nur in den sonnendurchfluteten oberen Bereichen der Ozeane leben, sondern teilweise auch in größeren Tiefen, somit in einer Zone, in der sie auf Nahrungszufuhr angewiesen sind, weil autotrophe Ernährung vor Ort durch Fotosynthese mangels Licht ausfällt. In Gebieten mit verhältnismäßig hoher

Kohlenstoffabgabe an die tieferen Wasserschichten und die Sedimente der Tiefsee sollten diese Tiefen-Radiolarien verhältnismäßig häufig vorkommen (im Vergleich zu Oberflächen-Radiolarien). Da die Radiolarien-Gehäuse zudem aus Opal bestehen, sollten sie, anders als karbonathaltige Gehäuse, nicht der Zersetzung unterliegen, selbst wenn die Sedimente wesentliche Mengen von zersetzungsanfälligem organischem Kohlenstoff enthielten. Dies würde somit eine unverfälschte Angabe zur Kohlenstoffabgabe aus dem oberflächennahen Bereich der Ozeane liefern.

In einem ersten Schritt haben wir Radiolarien-Faunen in Sedimenten untersucht, die wir durch Tiefseebohrungen im Bereich des großen subtropischen Benguela-Auftriebsbereichs erhalten haben. Diese verhältnismäßig kleine Region des Atlantischen Ozeans (Abb. 2; mit einer Ausdehnung von fast 2000 km immerhin beinahe so groß wie Europa) wird durch den Benguelastrom bestimmt, einer der größeren Meeresströmungen an der Ostgrenze des oberflächlichen Zirkulationssystems des Atlantiks. Durch Kombination von Wind und geophysikalischen Faktoren werden hier kältere Wassermassen aus der Tiefe an die Oberfläche gespült. Ihr hoher Nährstoffgehalt trägt zu gesteigerter Produktion des Oberflächenwassers bei. Diese erlaubt eine ausgedehnte Fischerei und versorgt viele afrikanische Länder mit Nahrung. Die Ergebnisse früherer wissenschaftlicher Untersuchungen der Sedimente unter diesem System deuten darauf hin, dass der Auftrieb hier bereits vor mindestens sechs Millionen Jahren begonnen und, trotz Schwankungen, immer steigende Produktivität gezeigt hat.

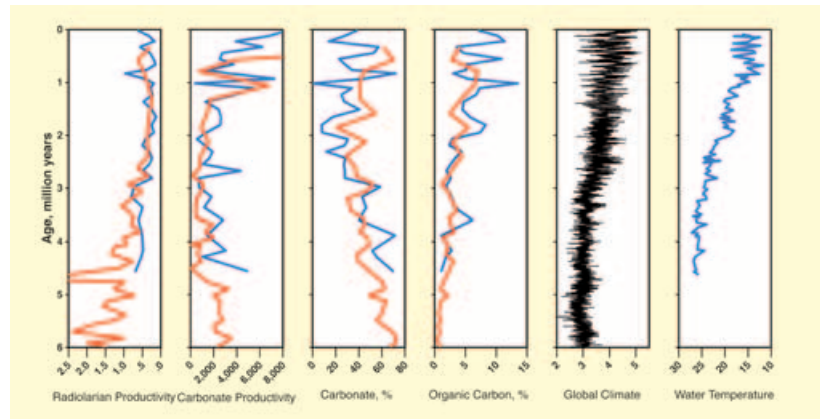
In unserem aktuellen, von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unterstützten Forschungsprojekt, erfassen wir nun in Zusammenarbeit mit einer internationalen Arbeitsgruppe von Geochemikern und Sedimentologen aus Deutschland, den USA und Japan die Charakteristika von Radiolarien-Faunen der letzten sechs Millionen Jahre, die aus Tiefseebohrungen unter dem Benguela-Auftriebssystem stammen. Wir zählen die relative Häufigkeit verschiedener Radiolarien-Arten. Da die Ökologie jeder einzelnen Art aus Veröffentlichungen über ihre heutige Verteilung in der Wassersäule des Ozeans bekannt ist, können wir das Mengenverhältnis von Oberflächen-Radiolarien zu Tiefseearten in jeder unserer Bohrproben berechnen. Dieses Mengenverhältnis scheint, der Voraussage von C. Casey entsprechend, sowohl den Trend zur Abkühlung des Oberflächenwassers aufgrund des Auftriebs (gemessen mit einem biomolekularen »Alkanon«-Proxy) als auch die steigende Anhäufung von organischem Kohlenstoff gut zu belegen (Abb. 3).

Die Radiolarien-Methode bewährt sich also tatsächlich signifikant besser als jene Indikatoren, die auf fossilen karbonathaltigen Fossilien basieren. Diese geben ein zum Teil falsches Signal (abnehmende Produktivität in der Periode zwischen 6 und 2 Millionen Jahren vor heute) und scheinen eher andere Prozesse wie etwa die sekundäre Lösung von Karbonat in den Sedimenten widerzuspiegeln. Es wird allerdings noch viel Arbeit nötig sein, um diese Anfangsergebnisse an anderen geografischen Orten zu bestätigen und diese bis jetzt qualitativen Ergebnisse mit den tatsächlichen Werten der Abgabeproduktivität im heutigen Ozean zu eichen. Aber unsere Arbeit zeigt, dass Radiolarien einen brauchbaren Weg zum Verständnis dafür aufzeigen, wie die Ozeane den Kohlenstoffzyklus über die letzten paar Millionen Jahre beeinflusst haben. In der Fortsetzung unserer Untersuchungen wird es nun darum gehen zu prüfen, ob sich mit der neuen Methode Veränderungen in der Produktivität über sehr viel kürzere Zeiträume verfolgen lassen, etwa jene aufgrund der glazialen-interglazialen Veränderungen in der letzten Periode der Eiszeit, dem Pleistozän.

Veränderungen im Kreislauf der Ozeane über längere Zeiträume

Für das Beispiel unserer Forschung zu deutlich längeren Zeiträumen wollen wir uns die gesamte Periode des Känozoikums (der letzten 65 Millionen Jahre also) ansehen, während der sich das Klima der Erde aus einem »Treibhaus«stadium – einem weltweit warmen Klima mit eisfreien Polargebieten im frühen Eozän – in das gegenwärtige »Kühlschrank«stadium mit starken Klimagradienten entlang der Breitengrade, ständigen polaren Eiskappen und wiederholten Eiszeiten gewandelt hat (seit dem Anfang des Oligozäns). Viele Faktoren könnten bei diesem Wandel eine Rolle gespielt haben, aber zwei werden als möglicherweise entscheidend betrachtet: Die Verlagerung von Kontinenten durch Plattentektonik hat zu einer Änderung des Kreislaufs der Ozeane geführt und die Konzentration des Kohlendioxids in der Atmosphäre hat sich verändert. Beide Faktoren könnten zusammenhängen. Ein veränderter Kreislauf in den Ozeanen könnte deren Produktivität ändern, die ihrerseits den Kohlenstoffhaushalt der Erde und die Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre geändert haben könnte.

Eines der bedeutendsten und umstrittensten Ereignisse in der Entwicklung des Klimas im Känozoikum war der Wandel am Ende des Eozäns (vor etwa 33 Millionen Jahren). Die Temperaturen fielen global um einige Grade (besonders in höheren Breiten), der Antarktische Eisschild entstand und der Kreislauf der Ozeane und die Temperaturen der Tiefsee änderten sich in



größerem Maßstab. Diese kalten Bedingungen dauerten mit einigen Schwankungen durch das folgende Oligozän an und haben sich bis heute erhalten. James Kennett schlug 1977 als erster eine Theorie zur Erklärung dieses dramatischen Wechsels vor, die jahrzehntelang allgemein akzeptiert wurde. Er bemerkte, dass im frühen Känozoikum Australien noch mit der Antarktis verbunden war, und nahm an, dass diese Konfiguration der Kontinente die Entstehung einer starken isolierenden zirkumpolaren Ozeanströmung rund um die Antarktis verhinderte und dass deshalb warmes Wasser aus gemäßigten Regionen in die südlichen Polarregion strömen konnte. Dieses warme Wasser sollte dazu beigetragen haben, die Bildung einer Eiskappe auf dem Antarktischen Kontinent zu unterbinden. Gegen Ende des Eozäns löste sich Australien dann von der Antarktis, und die neu entstandene Zirkumpolarströmung hätte das warme Wasser vom Kontinent abgehalten, mit der Folge, dass sich die Antarktis stark abkühlte und es zur Bildung des Eisschildes kam.

Obwohl diese Theorie intuitiv plausibel klingt, besonders durch die zeitliche Nähe von Trennung der Kontinente und Abkühlung des Klimas, wurden verschiedene Einwände gegen diese Theorie erhoben. Computersimulationen des eozänen Klimas haben wiederholt gezeigt, dass die isolierende Wirkung eines zirkumpolaren Strömungssystems nicht so stark ist wie postuliert: Auch wenn keine solche Strömung existiert, wird verhältnismäßig wenig Wärme von Ozeanströmungen zum Antarktischen Kontinent getragen. In letzter Zeit haben Tiefseebohrungen südlich von Australien – in dem Gebiet, in dem die Kontinente auseinander brachen – weitere Fragen aufgeworfen, was die zeitliche Beziehung zwischen dieser Trennung der beiden Kontinente und der Veränderung des globalen Klimas angeht. Alles in allem lassen diese Daten vermuten, dass die durch die Plattentektonik ermöglichte Kreisströmung um die Antarktis mindestens eine Million Jahre vor dem Klimawechsel

Abb. 3 Produktivität des Benguela-Auftriebsgebiets über den Zeitraum der letzten 6 Millionen Jahre, gemessen anhand der Radiolarien-Produktivität und der Karbonatproduktivität. Lediglich die Radiolarien-Produktivität lässt sich mit dem globalen Klima und der Wassertemperatur korrelieren. (Verändert nach Marlow et al. 2000 Science, Zachos et al. 2001 Science und Lazarus et al. 2006 Marine Micropaleontology).

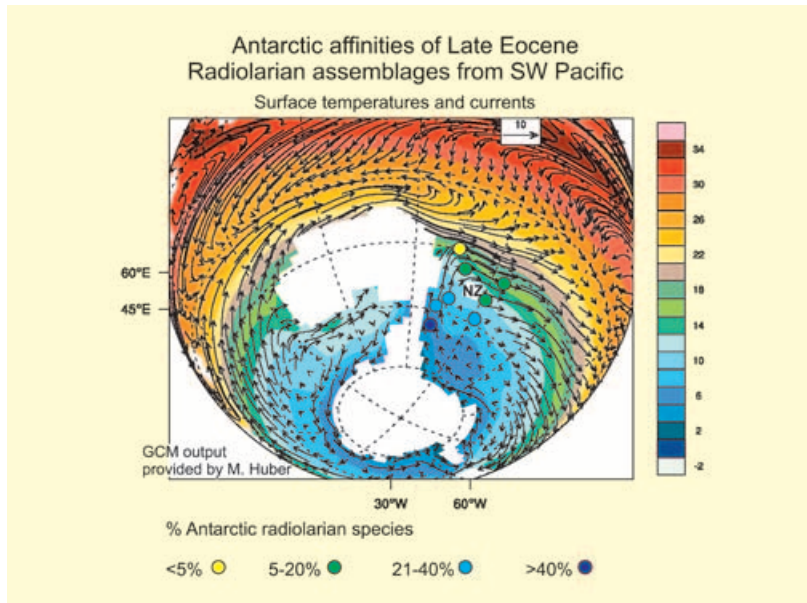
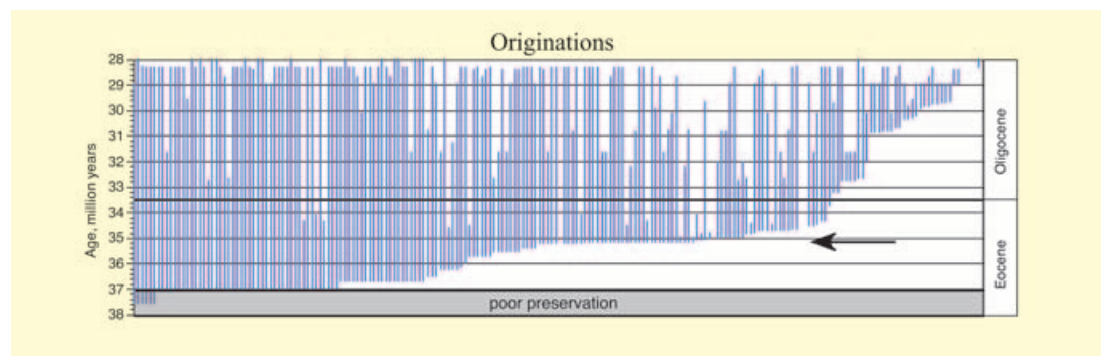


Abb. 4
Relative Häufigkeit antarktischer Endemiten sowie andere Kaltwasserarten in Radiolariengesellschaften in den antarktischen Regionen in der Nähe von Australien und Neuseeland im späten Eozän. Nach Lazarus et al. (im Druck) *Micropaleontology*; simulierte Meeresströmungen und Temperatur in Grad Celsius während des späten Eozäns nach M. Huber et al. (2004)

entstanden sein muss. Das ist eine viel zu lange Zeitspanne, um Kennetts Theorie plausibel erscheinen zu lassen. Die neuen Bohrungsergebnisse haben jedoch auch ihrerseits einige Schwächen. Fast alle Daten stammen gerade einmal von ein paar geografischen Orten, die verhältnismäßig nah am Australischen Kontinent liegen, aus verhältnismäßig flachem Wasser und von Sedimenten, die sich zeitlich nicht sehr detailliert untergliedern lassen. Es ist unklar, ob solche geografisch begrenzten Daten auf die Geschichte des gesamten Südlichen Ozeans extrapoliert werden können.

Um dieses Problem anzugehen, haben wir in Zusammenarbeit mit neuseeländischen Kollegen und teilweise unterstützt durch das im Berliner Museum für Naturkunde angesiedelte Graduiertenkolleg »Evolutive Transformationen und Faunenschnitte« eine deutlich umfangreichere Menge bereits veröffentlichter Ergebnisse aus der antarktischen Region mit unseren eigenen Daten über die geografische Zusammensetzung von

Abb. 5
Evolutive Änderungen innerhalb der antarktischen Radiolarien-Faunen. Jede senkrechte blaue Linie zeigt die Verbreitung einer Radiolarien-Art in den verschiedenen Sedimentschichten am Meeresboden des Südlichen Ozeans. Der Ursprung der typischen antarktischen Radiolarien-Faunen befindet sich im späten Eozän (vor ca. 35 Millionen Jahren). Nach Lazarus et al. (im Druck) *Micropaleontology*.



Radiolarien-Faunen dieser kritischen Zeitspanne zusammengeführt und analysiert (Lazarus et al. im Druck, *Micropaleontology*).

Wir haben die Zusammensetzung von Radiolarienfaunen dazu benutzt, die relative Zeitspanne der Veränderung des Ozeans in der Antarktis zu bestimmen. Diese Methode basiert auf der Beobachtung, dass marine Planktonarten hoch adaptiert an ihre Umgebung sind und deshalb die meisten Arten nur in bestimmten Regionen vorkommen, wo die Bedingungen für ihr Wachstum erfüllt sind. Dies trifft besonders auf die Radiolarien-Fauna des Südozeans zu, wo viele Arten entweder in der Region endemisch oder nur in kaltem, nährstoffreichem Auftriebwasser zu finden sind, meistens in Polargebieten. Das Vorkommen dieser charakteristischen Fauna kann also als Indikator für die Entwicklung einer besonderen südozeanischen Wassermasse gelten. Sie erfordert ihrerseits ein gut ausgebildetes System antarktischer Polarfronten, das wiederum von der zirkumpolaren Strömung geschaffen wird. Für unsere Untersuchung haben wir nicht nur Daten aus der Literatur zusammengetragen, sondern auch selbst viele Tiefseeproben durchgeprüft und ihre Faunen sorgfältig analysiert, um Vorkommen und Entwicklung geografisch charakteristischer Formen zu bestimmen. Unsere Ergebnisse (Abb. 4, 5) bestätigen die Analyse der Tiefseeborungen südlich von Australien: Die charakteristische, weitgehend endemische Radiolarien-Fauna war bereits im späten Eozän verbreitet; die Hauptmasse der Fauna hatte sich vor ungefähr 35 Millionen Jahren entwickelt, mehr als eine Million Jahre bevor die Antarktis vereiste und das globale Klima sich veränderte (Abb. 6).

Diese Ergebnisse bestätigen also diejenigen, die von dem erwähnten, geografisch begrenzten Material aus den Bohrungen südlich von Australien gewonnen wurden: Es gibt eine wesentliche (mehr als eine Million Jahre umfassende) Zeitdifferenz zwischen der Entstehung der Kreisströmung im Südlichen Ozean und der Vereisung der Antarktis. Kennetts Theorie zur Er-

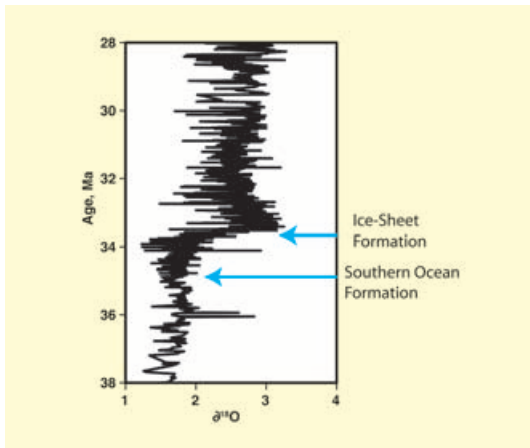


Abb. 6
Zeitlicher Unterschied zwischen der Bildung des Südlichen Ozeans vor ca. 35 Millionen Jahren (unterer Pfeil) und der Vereisung des Antarktischen Kontinents vor ca. 33,7 Millionen Jahren (oberer Pfeil). Der untere Pfeil beruht auf unseren Radiolarienstudien, der obere Pfeil aus der Analyse des Verhältnisses von leichtem und schwerem Sauerstoff-Isotop ($\delta^{18}\text{O}$) in den Sedimentkarbonaten des Südlichen Ozeans (nach Zachos et al. 2001 Science). Der »Knick« in der Sauerstoff-Isotopenkurve zum Zeitpunkt der Vereisung der Antarktis beruht auf dem Phänomen, dass mehr Wasser mit dem leichten Sauerstoff-Isotop verdunstet als Wasser mit dem schweren Sauerstoff-Isotop (weil es geringfügig leichter ist) und aufgrund der Bildung von Schnee und Eis auf dem Antarktischen Kontinent nicht wieder ins Meer zurückkam, sodass sich im Meereswasser (und in der Folge im Sediment) das Verhältnis der beiden Sauerstoff-Isotopen zugunsten des schweren Sauerstoff-Isotops verschob.

klärung der beherrschenden Wandlung des globalen Klimas im Känozoikum, oder wenigstens ihres Mechanismus, muss falsch sein. Dennoch legt die (geologisch gesprochen) zeitliche Nähe zwischen der Trennung von Australien und Antarktis einerseits und dem Klimawandel andererseits nahe, dass hier eine grundlegende Beziehung von Ursache und Wirkung vorliegt, auch wenn ihr spezieller Mechanismus noch unbekannt ist. Eine Möglichkeit wäre die Langzeitwirkung (in Millionen von Jahren) einer verstärkten Produktivität im Südozean, eingeleitet durch tektonischen Wandel, auf die Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre. Steigende Ablagerung von Kohlenstoff in marinen Sedimenten könnte, wenn sie lang genug dauert, in der Tat die globale Menge des Kohlenstoffs in Hydrosphäre und Atmosphäre vermindern, einschließlich des atmosphärischen Kohlendioxids. Das könnte genug Abkühlung erzeugen, um die Bildung von Eisdecken auszulösen. Und obwohl die Schätzung von Kohlendioxidkonzentrationen aus Perioden, die ein paar hunderttausend Jahre zurückliegen, schwierig sind, gibt es Daten,

die nahe legen, dass das Kohlendioxid in der Atmosphäre zwischen der warmen Treibhauswelt des Eozäns und der folgenden kalten Kühleiszeit des Oligozäns erheblich zurückging. Ob die gestiegene Produktivität des Südlichen Ozeans oder ein anderer Faktor dafür verantwortlich ist, ist nicht bekannt. Auch viele andere Fragen sind offen. Wenn z. B. die erhöhte Produktivität des Südozeans die Ursache für den Rückgang des atmosphärischen Kohlendioxids ist, wo kamen die zusätzlichen Nährstoffe her? In den Ozeanen wird erhöhte Produktivität im Oberflächenwasser durch den Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers erzeugt, das jedoch seinerseits die Nährstoffe letztlich über Flüsse und Windeintrag von der Erosion auf den Kontinenten und vom Abbau der Gesteine auf dem Meeresgrund durch das zirkulierende Seewasser bezieht. Wie auf den meisten Gebieten der Klimaforschung führen neue Erkenntnisse hinsichtlich einer Komponente des Systems zu neuen Fragen, die von anderen Forschungsdisziplinen anzugehen sind.

Literatur

Huber, M. / Brinkhuis, H. / Stickley, C.E. / Döös, K. / Sluijs, A. / Warnaar, J. / Schellenberg, S.A. / Williams, G.L. (2004): Eocene circulation of the Southern Ocean: was Antarctica kept warm by subtropical waters? *Paleoceanography*, 19: 12 (web).
 Lazarus, D. (2005): A brief review of radiolarian research. *Paläontol. Zeit.* 79(1):183–200.
 Lazarus, D. (2006): The Micropaleontological Reference Centers Network. *Scientific Drilling* 3:46–49. <http://iodp.tamu.edu/curation/mrc.html>.
 Lazarus, D. / Bitniok, B. / Diester-Haass, L. / Meyers, P. / Billups, K. (2006): Comparison of radiolarian and sedimentologic paleoproductivity proxies in the latest Miocene-Recent Benguela Upwelling System. *Marine Micropaleontology* 60:269–294.
 Lazarus, D.B. / C. Hollis / Apel, M. (im Druck): Patterns of opal and radiolarian change in the Antarctic mid Paleogene: clues to the origin of the Southern Ocean. *Micropaleontology*.
 Marlow, J.R. / Lange, C.B. / Wefer, G. / Rosell-Melé, A. (2000): Upwelling intensification as part of the Pliocene-Pleistocene climate transition. *Science*, 290: 2288–2291.
 De Wever, P. / Dumitricia, P. / Cault, J. P. / Nigrini, C. / Cardiroit, M. (2001): Radiolarians in the Sedimentary Record. Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam.
 Zachos, J. / Pegani, M. / Solan, L. / Thomas, E. / Billups, K. (2001): Trends, rhythms and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292: 686–693.

(Übersetzung aus dem Englischen: Dr. Peter Kunkel)



Dr. David Lazarus

Jg. 1954. Studium der Erdwissenschaften am Macalester College und der University of Minnesota. Minneapolis, MN, USA; B.Sc. in Geology & Geophysics der University of Minnesota 1977. Studium der Ozeanischen Wissenschaften und der Paläontologie an der Columbia University, dem Lamont-Doherty Geological Observatory und dem American Museum of Natural History, New York; Ph.D. 1983. 1984–87 Assistant Staff Scientist am Woods Hole Oceanographic Institution, Cape Cod, Mass., USA. 1987–95 Research Scientist am Geologischen Institut der ETH-Zürich. Seit 1996 Kustos für Mikropaläontologie am Museum für Naturkunde der Humboldt-Universität. Forschungsschwerpunkte: Evolutionsmuster und -mechanismen des marinen Känozoischen Planktons; Biostratigraphie und Paläozeanographie mariner Känozoischer Sedimente; Entwicklung und Anwendungen von DV-Technologien in der Mikropaläontologie; Radiolarien-Taxonomie.

Kontakt

Museum für Naturkunde der Humboldt-Universität zu Berlin
 Invalidenstr. 43
 D-10115 Berlin
 Tel.: +49 30 2093-8579
 Fax: +49 30 2093-8565
 E-Mail: david.lazarus@museum.hu-berlin.de