

# Paläozeanographie: Neue Aspekte erdgeschichtlicher Forschung

Hans R. Thierstein, Zürich

Die zentrale Frage der Ozeanographie ist die Meerwasserzirkulation. Die Paläozeanographie beschäftigt sich, als eines der jüngsten und gegenwärtig aktivsten Forschungsgebiete der Erdwissenschaften, mit der Entwicklungsgeschichte der Ozeane und ihrer Zirkulation. Als multidisziplinäres Forschungsgebiet hat die Paläozeanographie im vergangenen Jahrzehnt einen starken Aufschwung erlebt, vor allem als Folge besserer Kenntnisse in den ihr zugrunde liegenden Disziplinen Ozeanographie, marine Geologie und Mikropaläontologie. Ozeanographische Forschung hat gezeigt, wie dominierend die globale Meereszirkulation für kurzfristige Umweltveränderungen (Klima, Primärproduktion, Chemie der Atmosphäre) ist. Durch die intensive geologische Erforschung der Meeresböden in den letzten zwanzig Jahren ist erkannt worden, dass sich Form und Verteilung der Weltmeere über Jahrmillionen stark verändert haben. Daraus muss geschlossen werden, dass sich auch die globalen Umweltbedingungen drastisch verändert haben. Entwicklungen in der Mikropaläontologie erlauben, diese vergangenen Veränderungen in den Umweltbedingungen besser zu verstehen und ihre zeitliche Abfolge zu rekonstruieren.

## **Paleoceanography: Global change in the history of the earth**

The central question of oceanographic research is the circulation of the oceans. Paleoceanography, in turn, is concerned with the history of the oceans and past circulation changes. As a relatively new, multidisciplinary field it has grown very rapidly, mostly due to recent developments in oceanography, marine geology, and micropaleontology. Oceanographic research results have demonstrated the great influence that oceanic circulation exerts on global environmental changes in climate, primary productivity, and chemistry of the atmosphere. Intensive geological exploration of the ocean floors in the last two decades has revealed that distribution and shape of the world's oceans have been continuously changing over geological timescales. Recent developments in micropaleontology hold the promise of improving our understanding of the causes and timing of these global paleoenvironmental changes.

## **1 Eine junge Wissenschaft**

Erstaunlicherweise gehört die Paläozeanographie zu einer der jüngsten erdwissenschaftlichen Disziplinen. Dabei wird die Erforschung des Meeresgrundes schon seit über hundert Jahren intensiv betrieben. Insbesondere die Verlegung von Telegraphenkabeln zwischen den Kontinenten führte in der Mitte des letzten Jahrhunderts zu zahlreichen Mess- und Lotungskampagnen. Das geologische Interesse erwachte indessen erst, als man in den sechziger Jahren entdeckte, dass der Schlüssel zur Kontinentalverschiebungslehre in den mitelozeanischen Rücken liegt. Seither setzten verschiedene Forschungsunternehmen ein, unter denen das 1968 erstmals von der Scripps Institution of Oceanography der Universität von Kalifornien in San Diego gestartete Tiefsee-Bohrprogramm mit dem Forschungsschiff «Glomar Challenger» erwähnt sei. Das erste Buch, das sich ausschliesslich mit paläozeanographischer For-

schung beschäftigte, erschien 1974, und erst 1986 kam die erste Nummer einer neuen wissenschaftlichen Zeitschrift «Paleoceanography» heraus.

## 2 Die Zirkulation der heutigen und der vergangenen Ozeane

Das Interesse an diesem Thema ergibt sich aus der Bedeutung der heutigen Meereszirkulation in globalen Umweltprozessen und zunehmend auch mit Bezug auf unsere industriellen Aktivitäten. Zwei Drittel der Erdoberfläche sind durch Meerwasser bedeckt und absorbieren dadurch einen viel grösseren Anteil der einfallenden Sonnenenergie als die Kontinentalgebiete. Als integraler Teil des globalen Umweltsystems kontrollieren die Meere Wetter und Klima über Zeiträume von Tagen bis Jahrtausenden.

Temperaturabweichungen von nur wenigen Grad Celsius vom langjährigen Temperaturmittel im westlichen Zentral-Pazifik im Sommer 1982 führten zum Beispiel zum unter dem Namen El Niño bekanntgewordenen Ausbleiben des jährlichen Kaltwasserauftriebs an der Pazifikküste Südamerikas und damit zum Zusammenbruch der lokalen Küstenfischerei. Sie waren möglicherweise auch die Ursache für die Dürrekatastrophen in Zentralafrika einige Monate später. Da sich gegenwärtig etwa 6% der Weltbevölkerung von Pflanzen und Fischen aus den Meeren ernähren, wirkt sich eine Veränderung in der Primärproduktion schnell als regionale Hungerkatastrophe aus.

Grosse Vulkanausbrüche, wie zum Beispiel die des Krakatau im Jahre 1883 oder des Mount Agung 1963, haben eine Abkühlung der globalen Durchschnittstemperatur von  $1^{\circ}$ – $2^{\circ}$  Celsius für ein bis zwei Jahre zur Folge gehabt. Noch grössere vulkanische Eruptionen sind über längere Zeiträume zu erwarten. Sind sie potentielle Ursachen für drastische Klimaveränderungen? Nur durch das Studium von Aschenlagen in Tiefseesedimenten können die Dimensionen und die Häufigkeit von Vulkaneruptionen rekonstruiert werden.

Längerfristige Klimaveränderungen können durch geologische Prozesse verursacht und durch ozeanographische Prozesse verstärkt oder gedämpft werden. Gesteinsmagnetische Messungen zeigen an, dass sich die geographische Position der Kontinente über geologische Zeiträume verändert hat. Das Auftreten von grossräumigen Vergletscherungen auf den Kontinenten bewirkte eine Absenkung des globalen Meeresspiegels und eine Neuorientierung der wichtigsten Meeresströmungen. Beide Prozesse hatten eine Veränderung der Land/Wasser-Verteilung und damit wahrscheinlich auch des globalen Klimas zur Folge. Wie weit sich solche Klimaveränderungen graduell oder durch Rückkoppelungsmechanismen (positiver oder negativer Feedback) abrupt oder oszillatorisch ereignet haben, ist noch ungewiss.

Die Bedeutung der Meere und ihrer Vergangenheit liegt auch in der Tatsache begründet, dass fast zwei Drittel der grossen abbaubaren Erdöl- und Erdgasvorkommen in einer relativ kurzen geologischen Zeitspanne vor etwa 90–120 Millionen Jahren in den Weltmeeren abgelagert wurden. Ein besseres

Verständnis der Ursachen, die zu dieser einmaligen globalen geochemischen Anomalie führten, würde zweifellos zu einer erfolgreicherer Explorationsstrategie für neue Rohstoffvorkommen beitragen.

Die Geschichte der Meeresböden wird gegenwärtig auch intensiv untersucht im Hinblick auf ihre Sicherheit für die mögliche Endlagerung von giftigen und radioaktiven Zivilisationsabfällen.

Ziel paläozeanographischer Forschung ist es, ein besseres Verständnis zu gewinnen über die zum Teil bekannten, zum Teil vermuteten engen Zusammenhänge und Wechselbeziehungen zwischen den geologischen Prozessen der Plattentektonik, der Entwicklungsgeschichte der Lebewesen, den Veränderungen der Meereszirkulation, des Klimas, der globalen geochemischen Kreisläufe und der Zusammensetzung der Atmosphäre.

### **3 Der Entwicklungsstand der Paläozeanographie**

Technische Entwicklungen während und nach dem Zweiten Weltkrieg, vor allem durch die US Navy finanziert, erlaubten die Weltmeere systematisch zu erforschen. Stand zunächst einmal die genaue Erfassung der Form des Meeresbodens und der submarinen Bodenschätze bei diesen Unternehmen im Vordergrund, so wurden sehr bald auch Kredite und Einrichtungen für wissenschaftliche Grundlagenforschung freigemacht. Geophysikalische Methoden und die Erbohrung des Meeresbodens für wissenschaftliche Zwecke durch das Bohrschiff «Glomar Challenger» führten zwischen 1963 und 1968 zur Entdeckung und Bestätigung der Theorie der Plattentektonik. Diese postuliert, dass die Erdkugel von etwa 100 km dicken Lithosphärenplatten bedeckt ist, die entlang eines Netzwerkes von sogenannten Spreading-Rücken aus aufsteigendem Mantelmagma erstarren und in Tiefseegräben und unter Gebirgsketten wieder ins Erdinnere absinken und aufgeschmolzen werden. Sie besagt auch, dass sich Form und Verteilung der Meeresbecken auf der Erdoberfläche langsam, aber kontinuierlich verändern. Die Gesteinsablagerungen auf den Meeresböden, die erst seit etwa 20 Jahren systematisch beprobt werden, enthalten mannigfaltige, guterhaltene Zeugen der dynamischen Veränderungen der globalen Umweltbedingungen in den vergangenen 150 Millionen Jahren. Eine Analyse dieser Gesteinsablagerungen verspricht, zu einem besseren Verständnis zu führen über die Häufigkeit, Amplituden und Raten von vergangenen Umweltveränderungen, deren mögliche Ursachen und über deren Wechselbeziehungen zu geologischen Prozessen, die sich an der Erdoberfläche und im Erdinnern abspielen.

Falls diese Prozesse und Wechselwirkungen der wichtigsten globalen Umweltprozesse verstanden würden, könnten Vorhersagen gemacht werden über die zukünftige Entwicklung solcher globalen Systeme (z. B. des Klimas) oder über die Konsequenzen menschlichen Eingreifens in diese Abläufe (z. B. Verschmutzung von Atmosphäre und Meeren).

Spezifische aktuelle Fragestellungen und Methoden der Paläozeanographie sollen im folgenden an drei Beispielen kurz erläutert werden.

#### 4 Ursache von globalen Klimaschwankungen

Der Schweizer Geologe Louis Agassiz hielt an der Jahresversammlung der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft von 1837 in Neuchâtel einen bahnbrechenden Vortrag, in dem er behauptete, dass die Hochgebirgsgletscher in früheren, kälteren Epochen bis ins Mittelland vorgestossen seien. In den darauffolgenden Jahrzehnten häuften sich die wissenschaftlichen Anzeichen, dass die Erdgeschichte tatsächlich durch Eiszeiten und Perioden mit warmem Klima gekennzeichnet war. Unverstanden blieb allerdings bis vor kurzem, welches die zeitliche Abfolge oder die tatsächlichen Ursachen für die vergangenen globalen Klimaschwankungen waren. Ohne Verständnis der Mechanismen, welche zu diesen Klimaschwankungen führten, war es auch äusserst ungewiss, ob nicht in nächster Zukunft mit dramatischen globalen Abkühlungen oder Erwärmungen zu rechnen sei.

Das globale Klimasystem kann als Gleichgewichtssystem betrachtet werden, welches getrieben wird von der einfallenden Sonnenstrahlung (Abb.1).

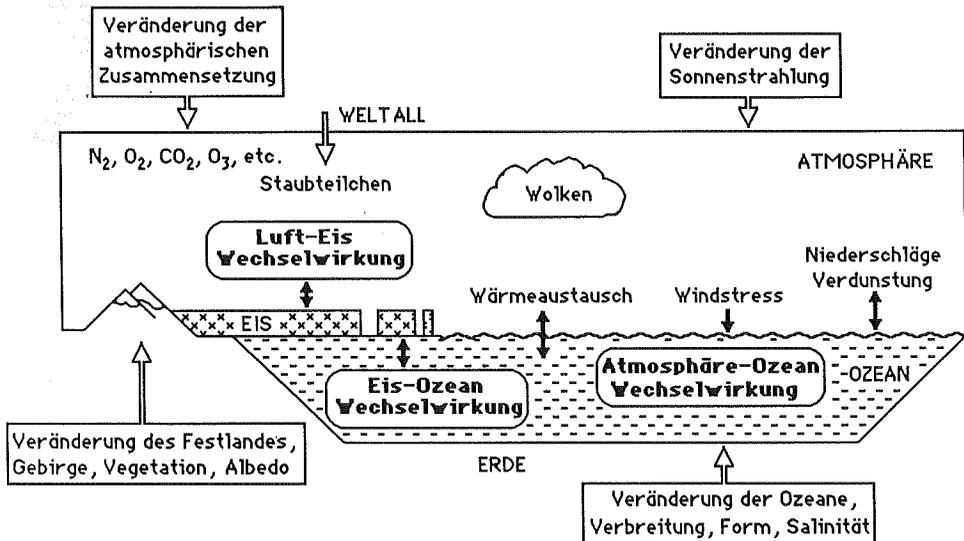


Abb. 1 Das globale Klimasystem als Gleichgewichtssystem. Die interne Wärmeenergieverteilung (Klima) ändert sich mit der Veränderung der Rahmenbedingungen (eckige Fenster) und hängt von verschiedenen Rückkopplungsmechanismen ab (gerundete Fenster).

Fig. 1 The global climate system is dependent of changes in its external parameters (square windows) and internal feedback mechanisms (rounded windows).

Ein Teil der einfallenden Sonnenenergie wird direkt im sichtbaren Bereich als Lichtenergie reflektiert (Abb.2). Weitere Teile werden von der Atmosphäre und der Erdoberfläche absorbiert oder in verschiedensten klimatischen und geomorphologischen Prozessen in kinetische Energie umgewandelt. Diese umgewandelte Energie treibt fast alle natürlichen Oberflächenprozesse wie zum Beispiel Wasserverdunstung, Winde, Meeresströmungen und Photosynthese. Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre modifizieren ihrerseits auf verschiedensten Zeitskalen dieses globale klimatische Gleichgewichtssystem (Abb. 1). Der grösste Teil dieser umgewan-

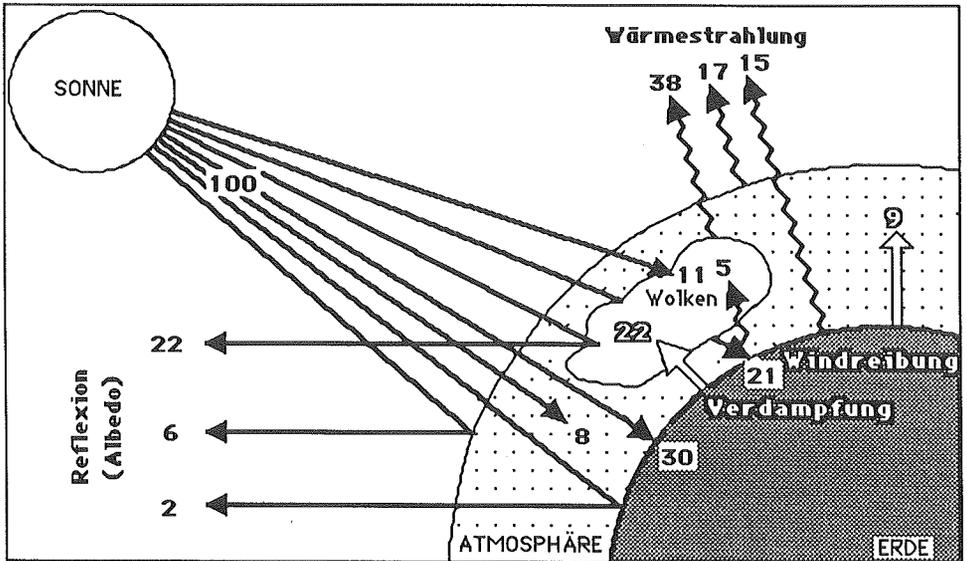


Abb. 2 Verteilung der Sonnenenergie ( $340 \text{ Watt/m}^2 = 100\%$ ) auf der Erde. Die im Verlaufe eines Jahres einfallende und die rückgestrahlte Gesamtenergie werden als gleich angenommen. Etwa 30% der einfallenden Energie werden direkt von der Atmosphäre, den Wolken und der Erdoberfläche als Licht reflektiert (Albedo), der Rest wird absorbiert, vor allem durch Verdampfung von Wasser, und umverteilt durch Winde und Meeresströmungen. Bei der Kondensation von Wasserdampf wird diese Energie wieder freigesetzt und erwärmt die Atmosphäre. Wärmeenergie wird von der Erdoberfläche und von der Atmosphäre als langwellige Infrarotstrahlung ins Weltall zurückgestrahlt (Wellenlinien). Die Reflektivität und damit auch die Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche hängen vor allem von der Häufigkeit und der Verteilung von Meeren, Festland, Wolken, Schnee, Wüste, Wald, Wasser ab (nach Newell, 1979).

Fig. 2 Disposition of solar radiation ( $340 \text{ Watt/m}^2 = 100\%$ ) on the earth. Incoming and outgoing radiation are assumed equal over the course of a year. About 30% of the incoming radiation is reflected as visible light by atmosphere, clouds and the surface of the earth (albedo), the remainder is transformed to heat, mostly through evaporation and condensation of water and is redistributed by winds and ocean currents. Infrared radiation from the earth's surface and the atmosphere is the mechanism by which energy that has been absorbed is lost from the earth-atmosphere system and returns to space (wavy lines). The reflectivity and thus the average surface temperature of the earth are dependent of the distribution of clouds, snow, desert, forest, waterbodies (after Newell, 1979).

delten Energie wird schliesslich als langwellige Wärmestrahlung ins Weltall zurückgestrahlt. Das Verhältnis zwischen reflektierter und absorbierter Sonnenstrahlung hängt weitgehend von der Erdoberflächenbeschaffenheit und deren Farbe ab. Absorption ist gross in Gebieten, die mit dunkelblauen Meeren und dunkelgrünen Wäldern bedeckt sind, und sie ist klein in felsigen, sandigen, schnee- und eisbedeckten Gebieten. Veränderungen im Anteil oder in der geographischen Verbreitung dieser Gebiete werden deshalb globale Klimaveränderungen nach sich ziehen. Eine populäre Hypothese versucht, das Auftreten des Eiszeitalters in der jüngsten Erdgeschichte als Folge der Plattentektonik zu erklären, durch welche Kontinente im Laufe von Jahrtausenden langsam von tiefen Breiten in polare Gebiete gebracht und dort mit permanentem Schnee und Eis bedeckt wurden. Dadurch wäre die globale Reflexion erhöht und die Wärmeabsorption erniedrigt worden, was zu einer weiteren Abkühlung geführt hätte.

In den letzten dreissig Jahren ist eine Methode entwickelt worden, die es erlaubt, aus den Veränderungen im Verhältnis der beiden häufigsten Sauerstoffisotopen ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) in Kalkschalen von marinen Mikrofossilien zu berechnen, wieviel Wasser sich zu einer bestimmten Zeit als Gletschereis auf den Kontinenten statt im Meer befand. Diese Isotopenverhältnisse sind das Resultat von Fraktionierungsprozessen während der Verdunstung und der Kondensation von Wasser. Diese Fraktionierungsprozesse führen dazu, dass Regenwasser, und damit auch Gletschereis, immer isotopisch leichter (negative  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte) ist als das Meerwasser, von dem es verdunstet. Während der Eiszeiten – letztmals vor nur 15 000 Jahren – waren etwa 3% des Wassers auf der Erde als isotopisch leichte Eismassen auf den Kontinenten abgelagert, das heisst dreimal soviel wie heute. Dies hatte eine messbare Veränderung von 1‰ in der sauerstoffisotopischen Zusammensetzung des in den Weltmeeren zurückgebliebenen Wassers zur Folge. Diese Veränderung ist in den Sauerstoffisotopenverhältnissen der Karbonatschalen von marinen Mikrofossilien festgehalten, da diese den Sauerstoff in isotopengeochemischem Gleichgewicht mit dem Sauerstoff des Meerwassers einlagern. Die zeitlichen Veränderungen der kontinentalen Eisakkumulationen und damit der globalen Klimaschwankungen können daher aus den Mikrofossilabfolgen in Tiefseekernen rekonstruiert werden (Abb. 3).

Wie paläozeanographische Forschung bestätigt hat, die im Rahmen des CLIMAP-Projektes durchgeführt wurde, an dem ich von 1973 bis 1975 mitarbeitete, liegt der Schlüssel zum Verständnis der Ursachen von globalen Klimaschwankungen, wie sie in den letzten zwei Millionen Jahren aufgetreten sind, in ihrer Periodizität. Eine der möglichen Erklärungen für das wiederholte Auftreten von verbreiteten kontinentalen Vergletscherungen und Zwischeniszeiten beruht auf den äusserst langsamen, aber astronomisch beobachtbaren Bewegungen der Erdrotationsachse im Weltall. Diese langsamen Bewegungen haben vor allem eine Veränderung der jahreszeitlichen Verteilung der einfallenden Sonnenenergie in verschiedenen Breiten zur Folge.

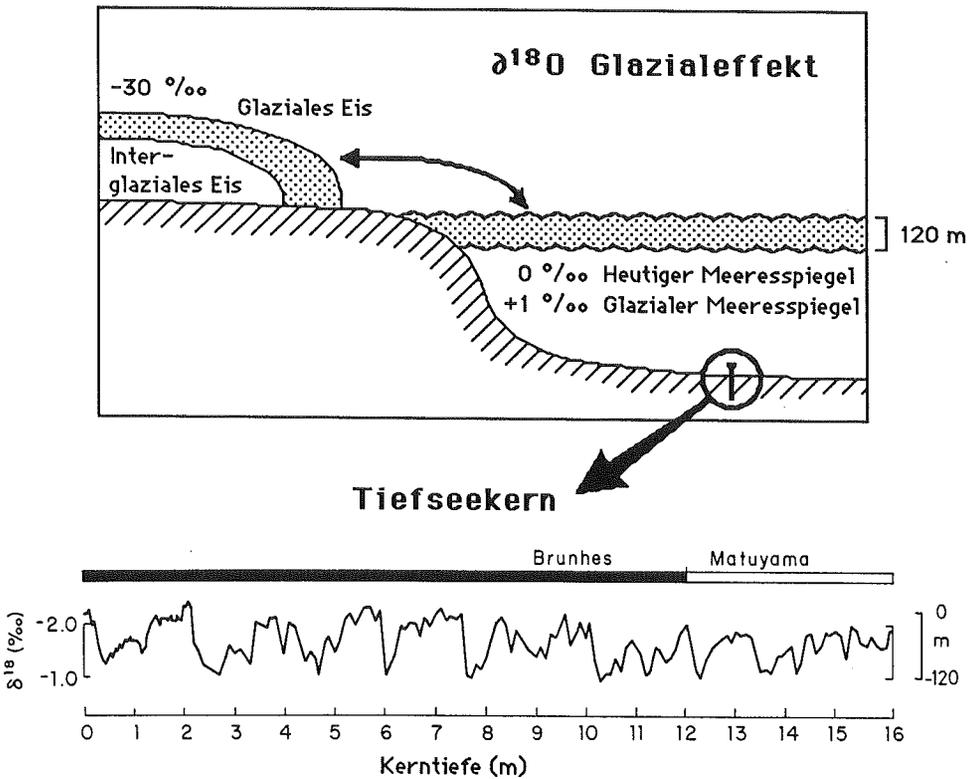


Abb. 3 Wegen der isotopischen Fraktionierung des Sauerstoffs in Wassermolekülen während der Evaporation und Kondensation sind die polaren Eiskappen isotopisch um 30‰ leichter als das Meerwasser. Gegenwärtig sind etwa 1% des auf der Erdoberfläche vorhandenen Wassers in den polaren Eiskappen eingefroren. Im letzten Glazial, das vor etwa 10000 Jahren endete, waren es 3%. Dies hatte zu einem um etwa 120 m tieferen Meeresspiegel und zu einer relativen Anreicherung des schwereren Sauerstoffisotops  $^{18}\text{O}$  (positiver  $\delta^{18}\text{O}$ -Wert) im zurückgebliebenen Meerwasser geführt. Diese glazial/interglazialen Veränderungen der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Meerwasser werden von den marinen Mikrofossilien in ihren Kalkschalen festgehalten. In einem Bohrkern vom Meeresboden kann die kontinentale Vergletscherungsgeschichte von den im Laufe der letzten Million Jahre abgelagerten Mikrofossilisshalen rekonstruiert werden. Die Datierung der Tiefseekerne erfolgt anhand der letzten Umkehrung des erdmagnetischen Feldes vor 700000 Jahren (Brunhes-Matuyama-Grenze).

Fig. 3 Glacial/interglacial changes of  $\delta^{18}\text{O}$  values measured in shells of calcareous microfossils in a deep-sea core. Glacial periods are characterized by lower sealevel and higher  $^{18}\text{O}$  concentrations in seawater, which leads to higher concentrations in shells.

Die periodischen Bewegungen der Erdrotationsachse setzen sich aus hauptsächlich drei Komponenten zusammen: 1. Veränderungen der Exzentrizität der Ekliptik, 2. Schwankungen in der Neigung der Erdrotationsachse relativ zur Ekliptik und 3. Rotation der Erdrotationsachse relativ zur Senkrechten der Ekliptik (Präzession). Die durch diese Bewegungen verursachten Ver-

änderungen der jahreszeitlichen Verteilung der Sonneneinstrahlung können berechnet werden und haben dominante Periodizitäten von 18 000 bis 123 000 Jahren. Die aus der Überlagerung der verschiedenen Frequenzen resultierende Variabilität der einfallenden Sonnenstrahlung in mittleren bis subpolaren nördlichen Breiten hat eine grosse Ähnlichkeit mit der globalen Akkumulationsgeschichte von kontinentalen Eismassen, wie sie in den Sauerstoffisotopenverhältnissen von marinen Mikrofossilschalen festgehalten ist (Abb. 4). Aus diesen Berechnungen geht hervor, dass das zwischeneiszeitliche Klimaoptimum vor etwa 6000 Jahren überschritten wurde und dass es mit einer gewissen Sicherheit im Laufe der nächsten 20 000 Jahre wieder zu einer vollen Eiszeit kommen wird.

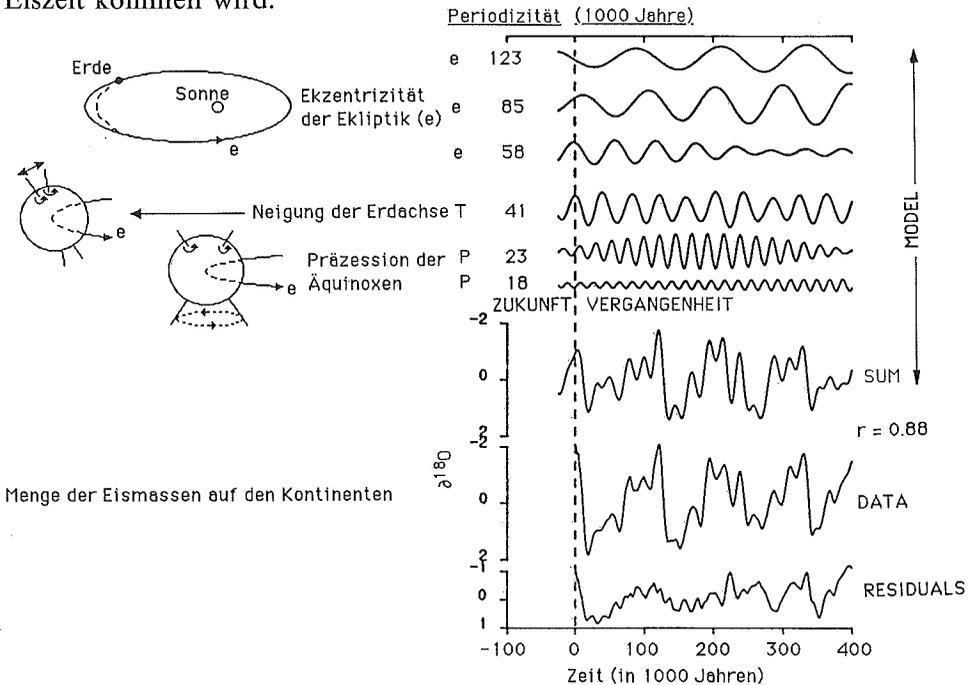


Abb. 4 Periodizität der jahreszeitlichen Verteilung der Sonnenenergie in hohen nördlichen Breiten, verursacht durch astronomisch berechnete orbitale Bewegungen der Erdrotationsachse. Modellierte Resultierende der Sonneneinstrahlungsintensität der verschiedenen Periodizitäten in  $\delta^{18}O$ -Werten ausgedrückt (SUM) zeigt grosse Ähnlichkeit mit der globalen Vereisungsgeschichte, wie sie durch die Sauerstoffisotopenverhältnisse in marinen Mikrofossilschalen (DATA) festgehalten wurde. Die Ähnlichkeit deutet darauf hin, dass die glazial/interglazialen Klimaschwankungen von orbitalen Bewegungen gesteuert werden. Die durch das Modell unerklärte natürliche Variation (RESIDUALS) ist Gegenstand weiterer Untersuchungen (nach Imbrie, 1985).

Fig. 4 Periodicity of seasonal distribution of solar energy in high northern latitudes, caused by orbital movements of the rotational axis of the earth. SUM: Modelled resultant of solar intensity caused by different periodicities. DATA: Oxygen isotope ratios in calcite shells of marine microfossils. Note similarity of both records, suggesting strong orbital control of climatic fluctuations during the ice age (after Imbrie, 1985).

Vorher werden wir und die kommenden Generationen jedoch mit grösster Wahrscheinlichkeit eine kürzere Periode erhöhter globaler Temperaturen erleben. Diese erwartete kurzfristige globale Erwärmung ist eine wahrscheinliche Folge der Zunahme des atmosphärischen Kohlendioxidgehaltes, die durch unseren wachsenden Verbrauch von fossilen Brennstoffen wie Kohle, Erdöl und Erdgas verursacht wird. Auch mit Bezug auf dieses Problem leisten paläozeanographische Forschungsprojekte einen namhaften Beitrag, wie das zweite Beispiel erläutern soll.

## **5 Einfluss der Ozeane auf Veränderung der Gaskonzentrationen in der Atmosphäre**

Die dominante Rolle der Ozeane im globalen Klimasystem ist im Zusammenhang mit der Erforschung von Klimaveränderungen in voller Tragweite erkannt worden. Insbesondere die Fähigkeit,  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre aufzunehmen, muss bei allen  $\text{CO}_2$ -Zirkulationsmodellen berücksichtigt werden. Für den Geologen ist die aus dem erhöhten  $\text{CO}_2$ -Gehalt resultierende höhere Aggressivität des Meerwassers, die zu vermehrter Kalklösung, insbesondere an Korallenriffen führt, von Bedeutung.

Gewisse Gase, wie Wasserdampf und Kohlendioxid, verzögern die Wärmeabstrahlung der Atmosphäre und führen dadurch zu erhöhten globalen Durchschnittstemperaturen. Messungen der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre zeigen, dass sich der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre in den letzten 100 Jahren um etwa einen Zehntel von 0,029 % auf 0,032 % erhöht hat. Diese Erhöhung entspricht etwa der Hälfte des Kohlendioxids, das durch das Verbrennen von fossilen Brennstoffen auf der ganzen Welt in die Atmosphäre gelangt sein muss. Die andere Hälfte hat sich entweder durch Austauschreaktionen an der Meeresoberfläche im Meerwasser gelöst oder ist durch erhöhten Pflanzenwuchs auf den Kontinenten aus der Atmosphäre assimiliert worden. Da die Weltmeere etwa 40mal mehr gelöstes Kohlenstoffgas enthalten als die Atmosphäre, liegt der Schluss nahe, dass die Meere den Gasgehalt der Atmosphäre durch Austauschreaktionen an der Meeresoberfläche kontrollieren.

Da alle Berechnungen und Voraussagen darauf hinausgehen, dass die industrielle Kohlendioxidproduktion in den nächsten Jahrzehnten bis Jahrhunderten weiterhin stark, möglicherweise exponentiell, anwachsen wird, ist es von grösster Wichtigkeit zu wissen, was mit dem produzierten Kohlendioxid geschehen wird. Falls wesentliche Anteile dieses Kohlendioxids in der Atmosphäre bleiben sollten, muss mit einer globalen Erwärmung um einige Grad Celsius in den nächsten Jahrzehnten gerechnet werden. Die Folgen einer solchen Erwärmung sind noch schwer abzuschätzen. Sie werden vermutlich zu einem weiteren Abschmelzen der polaren Eiskappen führen, was eine Erhöhung des Meeresspiegels um mindestens einige Meter zur Folge haben wür-

de. Eine weitere wahrscheinliche Folge wären wesentliche Verschiebungen der globalen Klimagürtel und damit der landwirtschaftlichen Anbauggebiete. Wegen diesen Unsicherheiten werden gegenwärtig Forschungsarbeiten, die zu einem besseren Verständnis des globalen Kohlenstoffkreislaufes führen könnten, in zahlreichen nationalen und internationalen Projekten stark gefördert.

Die paläozeanographische Forschung hat auch in der Frage der Zusammenhänge zwischen Klima und atmosphärischen Kohlendioxidkonzentrationen schon namhafte Beiträge geleistet. So konnte vor kurzem nachgewiesen werden, dass am Ende der letzten Eiszeit, vor etwa 12 000–14 000 Jahren, der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre nur etwa 0,02% betrug, also etwa um einen Fünftel tiefer war als vor der industriellen Verschmutzung, die Ende des letzten Jahrhunderts begann. Die chemischen Analysen und die Datierungen der glazialen Atmosphäre, welche an kleinen Luftblasen aus Eiskernen von Grönland vorgenommen wurden, sind eine Pionierleistung von Schweizer Wissenschaftlern. Diese Daten wurden von Forschern des Physikalischen Instituts der Universität Bern (Gruppe Prof. Hans Oeschger) und des Instituts für Mittelenergiephysik der ETH Zürich (Gruppe Prof. Willy Wöflfi) gemeinsam erarbeitet. Die Zunahme des atmosphärischen Kohlendioxidgehaltes über die letzten 15 000 Jahre ist in guter Übereinstimmung mit der Abschmelzungsgeschichte der polaren Eiskappen, welche aus den stabilen Sauerstoffisotopenverhältnissen von marinen Mikrofossilshalen rekonstruiert wurde (Abb. 5).

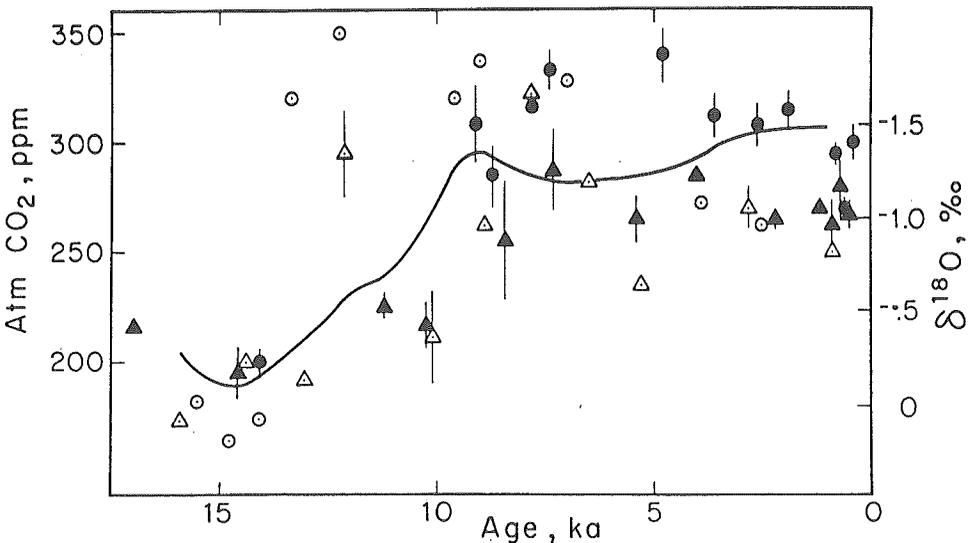


Abb. 5 Veränderungen der Kohlendioxidgehalte in Luftblasen aus Eisbohrkernen von Grönland (Kreise) und Antarktika (Dreiecke) im Laufe der letzten 15 000 Jahre. Ausgezogene Linie zeigt Veränderung der Sauerstoffisotopenverhältnisse ( $\delta^{18}\text{O}$ ) in marinen Mikrofossilshalen, welche das Abschmelzen der polaren Eiskappen und kontinentalen Eismassen festhält.

Fig. 5 Measured CO<sub>2</sub> contents of air trapped in ice from cores drilled in Greenland (circles) and Antarctica (triangles) over the last 15,000 years. Solid line represents average  $\delta^{18}\text{O}$  ratios in shells of marine microfossils over the same time interval (from Berger and Keir, 1985).

Klimatologen sind derzeit mit der Ausarbeitung globaler Klimamodelle beschäftigt, welche von einer zwei- beziehungsweise vierprozentigen jährlichen Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre ausgehen, die durch die entsprechende Zunahme des globalen Verbrauchs fossiler Brennstoffe (Erdöl, Erdgas, Kohle) verursacht wird (Abb. 6). Nur der Einsatz der grössten, heute zur Verfügung stehenden Computer erlaubt, solche integrierten Klimamodelle zu rechnen. Die Automatisierung der Datenverarbeitung durch digitale Analysemethoden verschafft heute die nötige Quantität an Daten, um ein derartiges Vorhaben überhaupt mit Aussicht auf plausible Resultate in Angriff zu nehmen.

Unsere eigenen Aktivitäten konzentrieren sich gegenwärtig auf die Erforschung von grösseren Anomalien im globalen Kohlenstoffkreislauf in der geologischen Vergangenheit und den damit im Zusammenhang stehenden paläoklimatischen Veränderungen.

## **6 Entwicklungsgeschichte von Organismengruppen**

Das dritte Beispiel aktueller paläozeanographischer Forschung bezieht sich auf einige grundlegende Fragen der Biologie und Paläontologie. Mehr als 120 Jahre nach der Veröffentlichung von Charles Darwins bahnbrechendem Buch über den Ursprung der Arten durch natürliche Selektion besteht immer noch ein Konflikt zwischen dieser Theorie, die durch Biologie und Genetik in ihren wesentlichen Zügen in diesem Jahrhundert bestätigt wurde, und vielen paläontologischen Befunden.

Nach der Theorie sollte der Selektionsdruck im Laufe der Zeit zu einer graduellen Veränderung in der genetischen Zusammensetzung und damit in der Form von Organismengruppen führen. Dies ist aber in 150 Jahren paläontologischer Forschung noch nicht mit überzeugenden Fossildaten belegt worden. Dieses Paradoxon kann heute nicht mehr, wie damals von Darwin selber vorgeschlagen, mit der Unvollständigkeit der Fossilbelege begründet werden. Entwicklungen in der Mikropaläontologie und von neuen geologischen Datierungsmethoden in den letzten zwei Jahrzehnten haben gezeigt, dass viele Sedimentabfolgen kontinuierlich abgelagert wurden und Tausende von Mikrofossilien enthalten. Trotzdem ist noch kaum eine kontinuierliche graduelle Formveränderung von einer Art in eine andere dokumentiert worden.

Die Evolutionslehre Charles Darwins muss durch solche mikropaläontologische Befunde modifiziert werden. So hat die Entdeckung von globalen geochemischen Anomalien zusammen mit dem einschneidenden Faunen- und Florenschnitt vor 65 Millionen Jahren neue Ideen entstehen lassen. Sowohl makropaläontologisch wie in Tiefseekernen mikropaläontologisch ergab sich an der Kreide/Tertiärwende ein abrupter Faunen- und Florenwechsel, den man sich nur durch eine globale Katastrophe erklären kann (Abb. 7). Das Auftreten von erhöhten Konzentrationen von Elementen, die vor allem in Me-

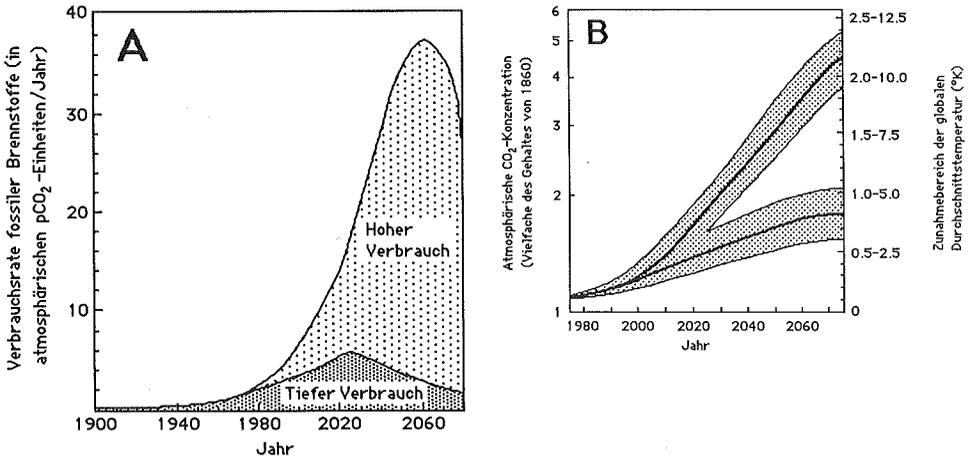


Abb. 6 A und B Auswirkungen der zu erwartenden Zunahme des Verbrauchs von fossilen Brennstoffen in den nächsten Jahrzehnten auf den atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalt und die resultierende mögliche Zunahme der durchschnittlichen Temperatur an der Erdoberfläche (nach Baes und al., 1977).

A. Zwei Extremszenarien für die Entwicklung des Verbrauchs von fossilen Brennstoffen in den nächsten Jahrzehnten. Das Szenario für hohen Verbrauch basiert auf einer jährlichen Zunahme von 4,3%, reduziert proportional zum bereits aufgebrauchten Anteil der gesamten Brennstoffvorräte. In diesem Falle würde mehr als die Hälfte der Gesamtvorräte in weniger als 100 Jahren als CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre abgelassen werden. Das Szenario für tiefen Verbrauch basiert auf einer jährlichen Zunahme von 2% bis zum Jahr 2025 und einer symmetrischen Abnahme darnach. In diesem Falle würde gesamthaft nur ein Viertel soviel CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre abgelassen werden wie im ersten Szenario.

B. Die erwartete Zunahme des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehaltes und die mögliche resultierende Zunahme der globalen Durchschnittstemperatur für die zwei Verbrauchsszenarien in Figur 6A. Solide Linien repräsentieren die erwartete Zunahme für die beiden Szenarien in Figur 6A unter der Annahme, dass die Hälfte des produzierten CO<sub>2</sub> im Meerwasser gelöst oder durch die terrestrische Biosphäre (Pflanzen, Humus) aufgenommen wird. Die grauen Zonen beziehen sich auf 40% respektive 60% Aufnahme in Meer und Biosphäre. Der Temperaturzunahmebereich bezieht sich auf die noch umstrittene Zunahme der globalen Durchschnittstemperatur von 1° bis 5° K für jede Verdoppelung des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehaltes.

Fig. 6 A and B Projected growth scenarios of future fossil fuel use und their effects on the increase of atmospheric CO<sub>2</sub> contents and possible increases in the average surface temperature of the Earth (after Baes et al., 1977).

A. Two limiting cases for the development of fossil fuel use. With the high-use case, assuming an annual growth rate of 4.3% reduced in proportion to the fraction of the ultimate fossil fuel supply that has been used, more than half of all fossil fuel carbon will be released in less than a century. With the low-use case, assuming a 2% growth rate till 2025 followed by a symmetrical decrease, only about a fourth as much fossil carbon will be released as in the high-use case.

B. The projected growth in the atmospheric CO<sub>2</sub> and the possible increase in the average temperature are shown for the two cases in Figure 6A. The solid curves represent the limiting scenarios with 50% of the fossil fuel flux balanced by ocean and/or land uptake of CO<sub>2</sub>. The outer bands represent the effect of 40% to 60% uptake. The range of the increase in average temperature corresponds to 1° to 5° K per doubling of the CO<sub>2</sub> concentration.

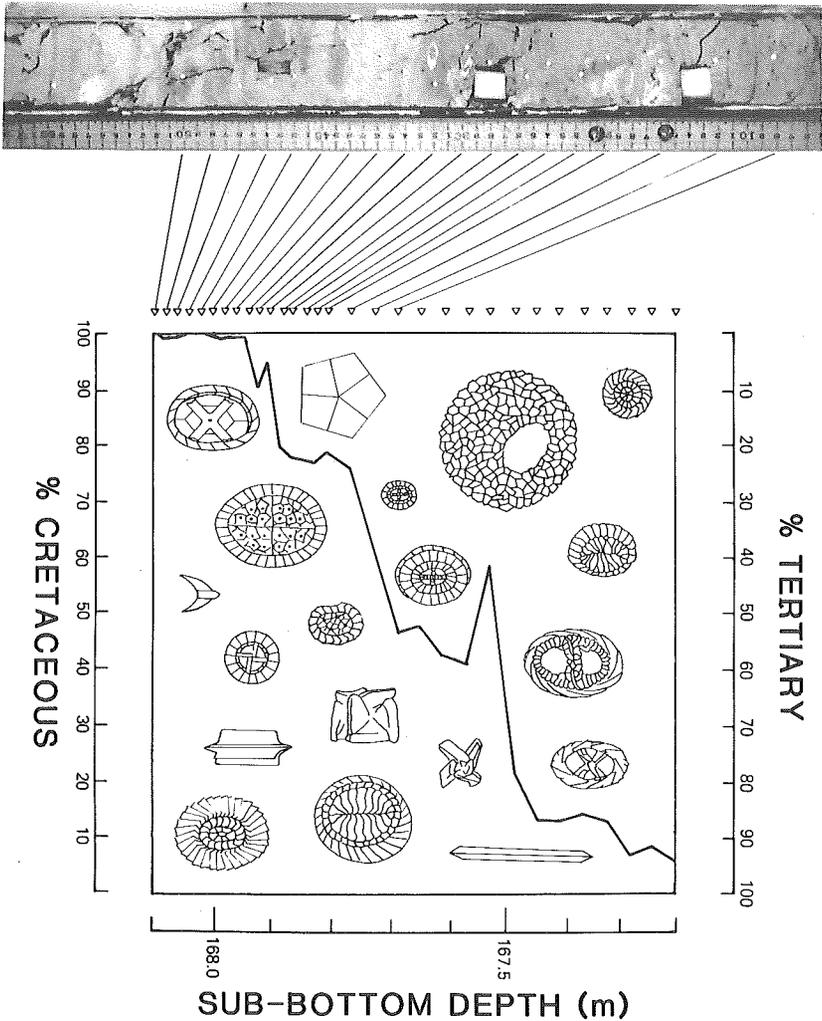


Abb. 7 Ersatz der diversifizierten Coccolithenvergesellschaftungen der Oberkreide (im unteren Teil der Figur) durch neue, tertiäre Arten (im oberen Teil der Figur) innerhalb von ca. 70 cm Sedimentmächtigkeit in einem Tiefseebohrkern aus dem nordwestlichen Atlantik. Der graduelle Übergang kann als plötzliches Aussterben innerhalb einer relativ kurzen Zeitperiode von höchstens einigen tausend Jahren modelliert werden, durch die Annahme, dass die ursprünglich zugeführten Sedimentpartikel durch grabende Tiefseeorganismen umgelagert und durchmischt worden sind (nach Thierstein und Okada, 1979).

Fig. 7 Replacement of diversified Upper Cretaceous calcareous nannofossil assemblage by newly evolving Tertiary species within less than 70 cm of sediment thickness in a deep-sea core from the western North Atlantic. The transition can be modelled as a sudden replacement within less than a few thousand years by assuming that the original sudden extinction was scrambled subsequently through bioturbation by benthic organisms (after Thierstein and Okada, 1979).

teoriten vorkommen, im gleichen Sedimenthorizont, hat zur Hypothese eines gigantischen Asteroid-Einschlages geführt. Das Bild von der kontinuierlichen und zielgerichteten Entwicklung neuer Arten im Laufe der Erdgeschichte ist einem Szenario gewichen, das die Evolution in Schüben und Sprüngen abrollen lässt und anstelle eines planmässigen Fortschrittsprinzips den Zufall als Agens einschaltet.

Bei der Bildung von neuen Arten scheinen die meisten gut dokumentierten paläontologischen Befunde auf ein Auftreten von zuerst seltenen und später häufiger werdenden Exemplaren mit einer deutlich neuen Morphologie hinzudeuten. Diese Daten lassen vermuten, dass Artenbildung relativ rasch in genetisch isolierten, möglicherweise kleinen Populationen auftritt und dass die Morphologie der neuen Art über Jahrmillionen bis zu deren meist plötzlichem Aussterben unverändert bleibt. Das plötzliche Auftreten und Aussterben sowie die weitverbreitete morphologische Stasis von fossilen Arten hat sich natürlich sehr vorteilhaft für die Geologie ausgewirkt, da dies erlaubt, eine recht präzise relative Altersbestimmung der Ablagerungen auf Grund des Fossilinhaltes vorzunehmen. Weil die geographische Verbreitung der meisten lebenden Organismenarten durch erkennbare physische Barrieren bestimmt ist, liegt der Schluss nahe, dass das Neuauftreten und vor allem das Aussterben solcher Arten von Umweltveränderungen verursacht wurde. Dieser Schluss ist dagegen in scharfem Kontrast zu dem seit 150 Jahren in den Erdwissenschaften vorherrschenden uniformitarianistischen Dogma.

Der ganze Fragenkomplex um die Dauer und den Modus fossiler Artenbildungen kann aus mehreren Gründen am besten an schalenbildenden Mikroorganismen untersucht werden. Marine Mikrofossilien sind normalerweise zu Tausenden in geeigneten Gesteinsproben vorhanden, was statistisch zuverlässige Messungen ihrer morphologischen Variabilität zulässt. Weite geographische Verbreitung von verfügbaren Proben (vor allem aus Tiefseebohrkernen) und gut datierbare Altersabfolgen erlauben es, geographische und stratigraphische Variabilität der Morphologien zu charakterisieren. Die zeitlichen und räumlichen Veränderungen der Umweltsbedingungen können mit zahlreichen paläozeanographischen Methoden analysiert werden, was einen Vergleich zwischen ökologischen und morphologisch-evolutiven Gradienten zulässt. Die Verfügbarkeit von elektronischer Bildverarbeitung und die Entwicklung geeigneter Computerprogramme erlauben es, die Morphologie von grossen Mengen von Mikrofossilien präzise und effizient zu quantifizieren.

Wir untersuchen gegenwärtig die geographische und stratigraphische Variabilität in der Morphologie der stammesgeschichtlich jüngsten planktonischen Foraminiferenart *Globorotalia truncatulinoides* (Abb. 8). Neuere Studien von rezenten Meeressedimenten haben gezeigt, dass diese Art ihre Form mit der Oberflächenwassertemperatur verändert. Eine ähnliche, aber weniger ausgeprägte, stratigraphische Formveränderung konnte auch im einzigen bisher untersuchten Bohrkern nachgewiesen werden (Abb. 9). In diesem Fall stellt sich die Frage, wieweit diese beobachteten Formveränderungen über die letz-

ten 700 000 Jahre umweltbedingt (z.B. durch pleistozäne Abkühlung) oder genetisch bedingt sind.

Vorläufige Resultate deuten an, dass die gesamte heute beobachtbare Forlmenvariabilität bereits in Populationen, die vor 2 Millionen Jahren kurz nach der Entstehung dieser Art abgelagert wurden, vorhanden war. Es scheinen sich vor allem die Häufigkeitsverteilung von zwei verschiedenen Morphotypen in den Populationen verändert zu haben. Dies wäre eine Bestätigung der Stasis von zwei verschiedenen Genotypen dieser Art und des Einflusses von veränderlichen Umweltbedingungen auf ihre relativen Häufigkeiten.

Mit solchen und ähnlichen Untersuchungen erwarten wir, in den nächsten Jahren wesentliche neue Erkenntnisse zu gewinnen über die Prozesse der fossilen Artenbildung und Veränderungen in Klima und Meereszirkulation.

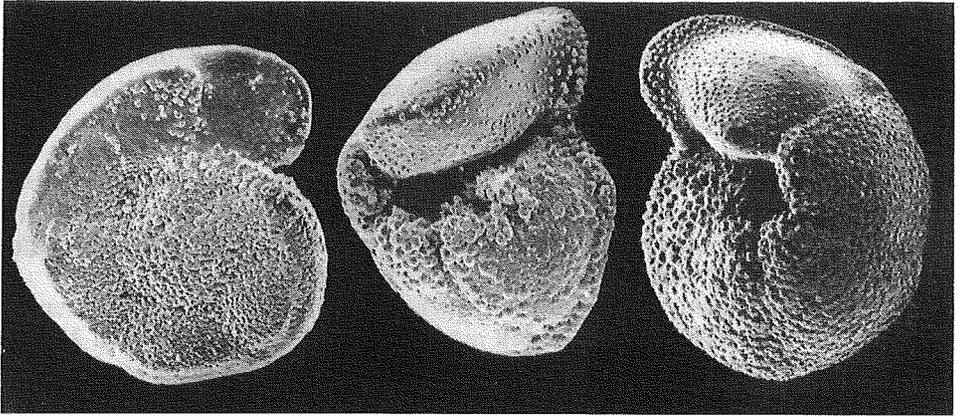


Abb. 8 Aufsicht (links), Seitenansicht (Mitte) und Unterseite (rechts) der rezenten planktonischen Foraminifere *Globorotalia truncatulinoides*. Durchmesser ca. 0,4 mm, Rasterelektronenmikroskopaufnahmen.

Fig. 8 SEM micrographs of the planktonic foraminifer *Globorotalia truncatulinoides* (diameter ca. 0.4 mm) in top (left), side (middle), and bottom view (right).

Abb. 9 Temperaturabhängige Veränderung der durchschnittlichen Morphologie der planktonischen Foraminifere *Globorotalia truncatulinoides* in rezenten Vergesellschaftungen (oben). Veränderung der durchschnittlichen Morphologie von *G. truncatulinoides* in Sedimentproben von einem Tiefseekern aus dem Südatlantik im Verlaufe der letzten 700 000 Jahre (nach Lohmann und Malmgren, 1983). Eigene neue Resultate zeigen, dass der Trend in rezenten Vergesellschaftungen durch eine Veränderung der Häufigkeiten von zwei verschiedenen Morphotypen handelt.

Fig. 9 Temperature dependence of average shape of *Globorotalia truncatulinoides* in recent sediment assemblages (upper graph). Change of average shape of fossil *G. truncatulinoides* over the last 700,000 years in a deep-sea core from the South Atlantic (after Lohmann and Malmgren, 1983). Our own results show that the trend in surface sediments results from changing relative abundances of two distinct morphotypes.

