

Die Klima- und Umweltgeschichte des Mittelmeeres

Von Rolf Wehausen, Birgit Warning und Hans-Jürgen Brumsack

Anhand der geochemischen Untersuchung von Sedimenten des Mittelmeeres gelingt es, frühere Klima- und Umweltbedingungen im Mittelmeerraum und auf dem nordafrikanischen Kontinent zu rekonstruieren. Unsere Arbeiten am Institut für Chemie und Biologie des Meeres (ICBM) zeigen, dass etwa alle 22.000 Jahre ein feuchteres Klima mit geringerem Staubeintrag aus der Sahara, aber erhöhtem Zustrom vom Nil vorherrschte. Große Mengen an Süßwasser und Nährstoffen führten dabei zu erheblichem Sauerstoffmangel im gesamten östlichen Mittelmeer. Das Wasser war zu diesen Zeiten auf natürliche Weise mit Schwefelwasserstoff vergiftet und am Meeresgrund bildeten sich Faulschlämme mit erstaunlich hohen Schwermetallgehalten.



Die JOIDES Resolution, Bohrschiff des Ocean Drilling Program (ODP).

The History of Mediterranean Climate and Environment

Our studies at the Institute of Chemistry and Biology of the Marine Environment (ICBM) have provided a geochemical reconstruction of earlier climatic and environmental conditions in the Mediterranean realm and on the north African continent. Our sediment reconstructions demonstrate that approximately every 22.000 years a more humid climate prevailed in the region concurrent with lower dust input from the Sahara and higher runoff from the Nile. High amounts of freshwater and nutrients led to widespread oxygen depletion in the deep water of the eastern Mediterranean. During these periods, the deep water was poisoned by hydrogen-sulphide production resulting in the formation of sapropels (mud rich in organic matter) with extremely high heavy metal content.

Wie in der Dendrochronologie, wo mit Hilfe spezieller Kernbohrer ein Überblick über Anzahl, Dicke und Beschaffenheit von Baumringen erhalten werden kann, werden durch Tiefseebohrungen Sedimente (Ablagerungen am Meeresboden) gewonnen, die Informationen über vergangene Epochen enthalten. Durch die Betrachtung von Baumringen können Aussagen über die klimatischen Bedingungen mehrerer Jahrhunderte gewonnen werden, Sedimente verschaffen dagegen einen Blick zurück in vergangene Jahrtausende. Wozu aber der Blick zurück in Zeiten, in denen die Verhältnisse auf der Erde so anders waren als heute und wo Homo Sapiens erst am Anfang seiner Entwicklung stand oder noch gar nicht existierte? Die derzeitige Klimadiskussion und die damit verbundene Frage nach dem Ausmaß menschlicher Einwirkung auf natürliche Umweltbedingungen erfordern genaue Kenntnisse über Klimaschwankungen der Vergangenheit und deren Steuerungsprozesse. Erst damit werden Voraussagen darüber möglich, ob und in welchem Ausmaß sich das komplexe System Erde durch menschliche Eingriffe verändert. Ein tiefgreifendes Verständnis natürlicher Schwankungen der Lebensbedingungen auf unserem Planeten kann nur durch die Beschäftigung mit der längeren

geologischen Vergangenheit gewonnen werden. In Abwandlung des geowissenschaftlichen Lehrsatzes "Die Gegenwart ist der Schlüssel zur Vergangenheit" kann man daher behaupten: "Die Vergangenheit ist der Schlüssel zur Zukunft".

Sedimente als Klimaarchive

In den Meeressedimenten finden wir im Idealfall biologische oder chemische Anzeiger für die klimatischen Verhältnisse der Vergangenheit in chronologisch geordneter Reihenfolge vor. Dies erlaubt uns, je nach Mächtigkeit (d.h. Zeitumfang) einer betrachteten Schicht längerfristige Klimaschwankungen und damit einhergehende Änderungen der Umweltbedingungen, wie sie z.B. von den Eiszeiten her bekannt sind, zu erkennen und deren Ursachen zu erforschen. Meeressedimente bestehen zum größten Teil aus anorganischem Material: winzigen Skelettresten planktonischer Organismen (z.B. Foraminiferen, Coccolithophoren, Diatomeen, Radiolarien) sowie feinkörnigem Verwitterungsmaterial der Kontinente. Die jeweilige Herkunft dieses Schlicks kann anhand der mineralogischen und chemischen Zusammensetzung entschlüsselt werden. Weiterhin können oftmals auch Hinweise auf sich ändernde Meeresströmungen sowie Eintragungsmengen tonigen Materials gewonnen

werden. Einen möglichen Transportweg vom Land in den Ozean bilden die Flüsse, die nicht nur gelöste Salze enthalten, sondern auch Partikel in suspendierter Form mitführen. Der zweite, häufig wenig beachtete Transportweg vom Land ins Meer führt über die Atmosphäre. Staubstürme der Sahara befördern z.B. jährlich mehrere hundert Millionen Tonnen mineralischer Partikel in die Weltmeere, die in die Tiefe absinken und am Meeresboden abgelagert werden.

Modellozean Mittelmeer

Beim Mittelmeer handelt es sich geologisch betrachtet um ein junges Randmeer, das sich vor etwa 20 Millionen Jahren durch die Kollision der afrikanischen mit der eurasischen Kontinentalplatte gebildet hat. Weil es nur über die Straße von Gibraltar mit dem Atlantik verbunden ist, lassen sich Stoffströme in das Mittelmeer hinein und aus dem Mittelmeer heraus relativ gut erfassen. Es eignet sich daher für ozeanographische Modellrechnungen besonders gut. Mit Wassertiefen von über 4000 m (zum Vergleich: Die Nordsee ist als "Schelfmeer" nur an wenigen Stellen tiefer als 200 m) besitzt das Mittelmeer ausgedehnte Tiefseebereiche mit den dafür typischen Sedimentationsbedingungen. Bedingt durch seine randliche Lage und die durch Schwellen untergliederte Beckenstruktur konnten je-

doch in der Vergangenheit immer wieder "Ausnahmestände" eintreten. Vor etwa fünfenehalb Millionen Jahren wurde der Wasserzufluss vom Atlantik durch Hebung des Gibraltar-Bogens abgeschnürt. Dabei ist das Mittelmeer in weiten Bereichen austrocknet und das Salz des verdunsteten Meerwassers wurde in mächtigen Schichten am Meeresboden abgelagert. Ebenso schnell wie es austrocknen konnte hat es sich jedoch auch wieder mit Wasser gefüllt, möglicherweise im Zuge eines globalen Meeresspiegelanstiegs. Die Salze (die man auch als Evaporite bezeichnet), die sich heute noch unterhalb von später abgelagerten Meeressedimenten befinden, lassen sich seismographisch oder durch Analyse der Sedimentporenwässer identifizieren.

Bis in die jüngere geologische Vergangenheit (das letzte Mal vor etwa 8000 Jahren) zeichnete sich das Mittelmeer mit einer auffallenden Regelmäßigkeit immer wieder durch "Überdüngung" (Eutrophierung) aus, die zu einer stark erhöhten Plankton-Produktivität führte. Dabei konnten sich dunkle Faulschlämme, sogenannte Sapropel, mit hohem Gehalten an organischem Material aus abgestorbenem Plankton am Meeresboden bilden.

Wodurch bilden sich Sapropel?

Trotz jahrzehntelanger Forschungstätigkeiten auf dem Gebiet der Mittelmeersapropel konnte deren genaue Entste-

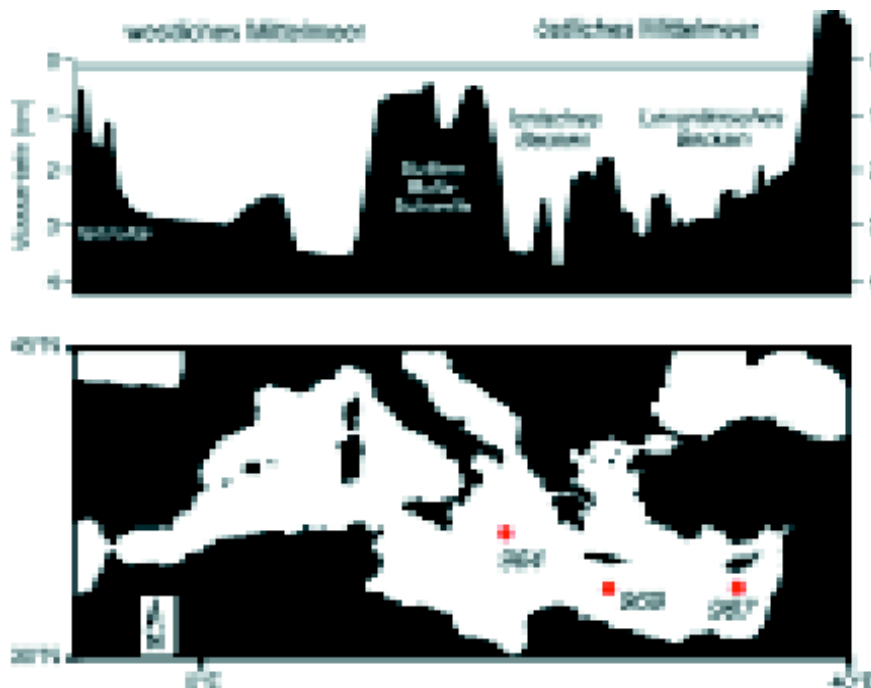
hungsgeschichte noch nicht endgültig geklärt werden. Voraussetzung für die Bildung von Sedimenten mit hohen Gehalten an organischen Planktonresten kann zum einen eine hohe biologische Produktivität oder der verstärkte Erhalt dieser leicht zersetzbaren Reste durch Sauerstoffabschluss sein. Diese Zusammenhänge kennen wir aus anderen Meeresgebieten, wie dem Golf von Kalifornien (Mexiko), dem Cariaco Graben (Venezuela) oder dem Schwarzen Meer. Für die Mittelmeersapropel, soweit der aktuelle Stand der Forschung, waren sowohl die Produktion als auch der Erhalt der Planktonreste unter Sauerstoffabwesenheit wichtig. Die Frage, welcher klimatisch-ozeanographische Mechanismus jedoch letztendlich für den Wechsel des Mittelmeeres von einem oligotrophen hin zu einem eutrophen System gesorgt hat, stand im Mittelpunkt unserer Arbeiten am Institut für Chemie und Biologie des Meeres (ICBM) der Universität Oldenburg.

Das Tiefseebohrprogramm

Vom internationalen Tiefseebohrprogramm ("Ocean Drilling Program"/ODP) wurden im Jahr 1995 mit dem Bohrschiff "Joides Resolution" zwei Ausfahrten im Mittelmeer durchgeführt. An der ersten, ins östliche Mittelmeer führenden Fahrt haben auch zwei Wissenschaftler des ICBM (Prof. Dr. J. Rullkötter und Prof. Dr. H.-J. Brumsack) teilgenommen. Durch die Bohrungen wurden Sedimente der letzten ca. 5 Millionen Jahre gewonnen. Dabei wurde zum Teil bis über 650 Meter tief in den Meeresboden hineingebohrt. Die Sedimentkerne, die z. T. bereits an Bord des Schiffes untersucht worden sind, befinden sich jetzt im ODP-Bohrkernlager in Bremen. Neben GeochemikerInnen arbeiten auch WissenschaftlerInnen verschiedener anderer Disziplinen, wie z.B. PaläontologInnen, GeophysikerInnen, SedimentologInnen und MineralogInnen an den selben Sedimenten. Interdisziplinäre Zusammenarbeit ist für den Erfolg des internationalen Gemeinschaftsprojekts ODP außerordentlich wichtig. So sind wir GeochemikerInnen z.B. auf die Ergebnisse der genauen zeitlichen Zuordnung der Proben (Stratigraphie) angewiesen, um eine vernünftige Interpretation unserer Daten vornehmen zu können.

Geochemische Zeitreihen

Um zeitliche Veränderungen der Sedimentation möglichst lückenlos erfassen zu können, haben wir den Sedimentkernen eine hohe Anzahl eng beieinander liegender Proben entnommen. So wurden von einem etwa 9 Meter langen Sedimentabschnitt alle drei bis vier Zentimeter jeweils einige Gramm Sediment entnommen; allein 270



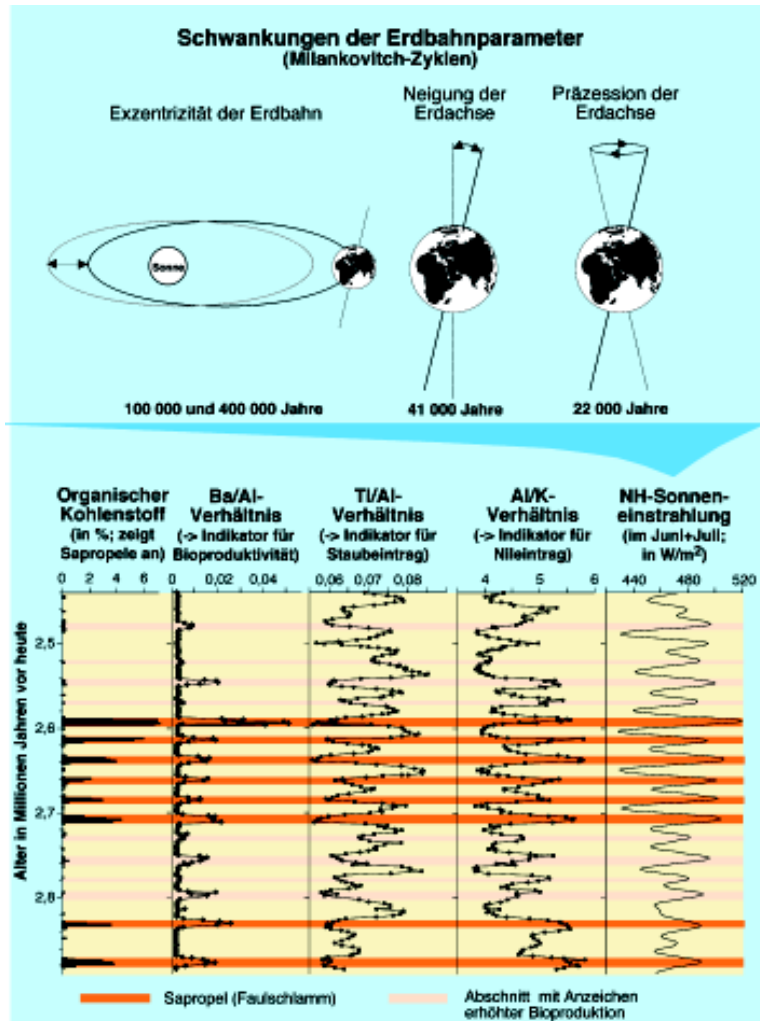
Das Querschnittsprofil des Mittelmeeres (oben) zeigt deutlich die durch Schwellen untergliederte Beckenstruktur. Vom Atlantik ist das Mittelmeer durch die Gibraltar-Schwelle getrennt. Die Sizilien-Malta-Schwelle teilt das Mittelmeer in einen westlichen und östlichen Teil. Auf der Übersichtskarte (unten) sind die drei von uns untersuchten Bohrlukationen rot gekennzeichnet: Lokation 964 im Ionischen Meer, 969 auf dem mediterranen Rücken, südlich von Kreta und 967 am Eratosthenes Seamount, südlich von Zypern.

Einzelproben aus diesem Kernabschnitt. Insgesamt wurden von uns fast zweitausend Proben bearbeitet.

Die nach der mühsamen Probenaufbereitung und der Elementanalyse sämtlicher Proben erfolgte grafische Auswertung der Daten liefert einen ausgezeichneten Überblick über die Veränderung der Sedimente mit der Zeit. So treten zum einen die schwarzen Sapropel deutlich hervor, die sich nicht nur durch hohe Gehalte organischen Kohlenstoffs, sondern auch durch ungewöhnlich hohe Anreicherungen von Eisensulfid und Schwermetallen auszeichnen. Zum anderen wird deutlich, dass offensichtlich zyklisch wiederkehrende Ereignisse für die Zusammensetzung der Sedimente eine entscheidende Rolle spielten. Bereits früher ist vermutet worden, dass die Veränderungen der Erdbahnparameter und die damit im Zusammenhang stehenden Klimaänderungen sich auf die Sedimentation auswirken. In Oldenburg ist es uns mit den vorliegenden Daten gelungen, bisherige Hypothesen zu bestätigen und zu verfeinern.

Besonders aufschlussreiche Daten haben wir über den Zeitraum zwischen ca. 2,4 bis 2,9 Millionen Jahren vor heute von der Bohrlotation 967, die sich südlich von Zypern befindet. Von dieser Region des Mittelmeeres ist bekannt, dass sie heute stark unter dem Einfluss der mineralischen Partikelfracht des Nils steht. Anhand der Element-Signaturen (z.B. Titan/Aluminium- und Aluminium/Kalium-Verhältnisse) wird deutlich, dass dies auch vor knapp drei Millionen Jahren der Fall war. Ebenso wird sichtbar, dass der Einfluss des Nils auf die Sedimentation im Mittelmeer regelmäßigen Schwankungen unterlag. Zeitgleich mit einem erhöhten Nilzustrom, der Schwebstoffe mit hohen Al/K-Verhältnissen liefert, traten Sapropel auf. Dabei können die erhöhten Barium/Aluminium-Verhältnisse als Indikator für eine gesteigerte biologische Produktion zu jenen Zeiten dienen. Zum Teil wird der vermehrte Nährstoffeintrag vom Nil dafür verantwortlich gewesen sein.

Für den diesen regelmäßigen Änderungen zugrunde liegenden Steuerungsmechanismus gibt es eine Hypothese, die von der französischen Geowissenschaftlerin Martine Rossignol-Strick entwickelt wurde. Danach fallen im äquatorialen Afrika die stärksten



Die Milankovitch-Zyklen (oben) sorgen in ihrem Zusammenspiel für Änderungen der Sonneneinstrahlungsverteilung auf der Erde. Sie spiegeln sich zum Beispiel in der Nordhemisphären-Sommer-Sonneneinstrahlungskurve wider. Geochemische Parameter (unten) dienen als Anzeiger für Variationen der Umweltbedingungen im Mittelmeer und auf den angrenzenden Kontinenten. Die Übereinstimmung mit der gezeigten Sonneneinstrahlungskurve zeigt, dass die Klimavariationen im Mittelmeerraum überwiegend durch die Milankovitch-Zyklen gesteuert werden.

Monsunregen, wenn der Sommer der nördlichen Hemisphäre mit der sonnennächsten Position (Perihel) der Erde zusammenfällt. Davon sind auch die Gebiete betroffen, aus denen der Nil einen Hauptteil seines Wassers bezieht, wie das Äthiopische Hochland. In der entgegengesetzten Situation (die Erde befindet sich während des Südhemisphären-Sommers im Perihel) ist der Monsun am schwächsten. Dies entspricht den Zeiten zwischen zwei Sapropelereignissen und kommt der heutigen Situation nahe. Ein solch regelmäßiger Klimawechsel folgt dem Rhythmus von 22.000 Jahren, der im Wesentlichen von der Kreiselbewegung (Präzession) der Erdachse verursacht wird.

Eine grüne Sahara?

Dadurch dass das Mittelmeer nach Süden und Südosten an Wüstengebiete angrenzt, wird ein nicht unerheblicher Teil der Sedimente von Material gebildet, das durch Staubstürme herangetragen wird. Wir konnten für die Sapropellagen, trotz der ange-

stiegenen Partikelfracht des Nils, einen generellen Rückgang der Sediment-Ablagerungsraten dokumentieren. Weil die für Wüstenstaub typischen Elemente wie Silizium, Titan und Zirkonium in den Sapropelen verarmt sind, ist es wahrscheinlich, dass der Eintrag an Wüstenstaub während dieser Zeiten stark vermindert war. Diese Tatsache lässt sich durch ein feuchteres Klima in der Sahararegion und einen dichteren Pflanzenbewuchs bis hin zu einer Steppenvegetation erklären. Anhaltspunkte für eine weniger aride Sahara ergeben sich aus den Befunden anderer Untersuchungen, zum Beispiel über das Vorkommen fossiler Grundwässer in der Sahara, Pollenanalysen, die auf bestimmte Pflanzengesellschaften hindeuten, und ausgetrocknete Seen, die zu Zeiten eines feuchteren Klimas existiert haben müssen. Ein erhöhter Flusswasser- und verminderter Staubeintrag in das Mittelmeer während der Sapropelbildung scheint mit den Messdaten übereinzustimmen. Wie erklärt man jedoch die extrem hohen Gehalte an organischem Material und Schwermetallen in den Sapropelen?

Zirkulation und Schwermetalle

Nach dem heutigen Zirkulationsmuster des Mittelmeeres, das als "antiästarin" bezeichnet wird, fließt das Wasser an der Oberfläche vom Atlantik bis in das Levantische Meer. Dort sinkt es aufgrund des durch Verdunstung gestiegenen Salzgehalts und der daraus resultierenden höheren Dichte ab und fließt in mittlerer Tiefe wieder Richtung Westen. Auf seinem Rückweg nimmt es einen Großteil der im absinkenden Wasser vorhandenen Nährstoffe mit, womit auch der im Durchschnitt nährstoffarme (oligotrophe) Charakter des Mittelmeeres zu erklären ist. Bereits früher sind Paläontologen anhand der Untersuchung von Mikrofossilien zu der Ansicht gelangt, dass das Oberflächenwasser des Mittelmeeres während der Sapropelbildung einen deutlich geringeren Salzgehalt gehabt

Element	Sapropel		Klärschlammverordnung	Grenzwert f. Boden
	Mittelwert	Maximalwert		
Arsen	52	260	k. A.	50
Cadmium	13	50	10	20
Chrom	114	450	900	800
Kobalt	64	400	k. A.	300
Kupfer	139	600	800	500
Nickel	236	970	200	500
Molybdän	111	730	k. A.	200
Zink	102	1600	2500	3000

Vergleich der Schwermetallgehalte von Mittelmeersapropelen (Maximalwerte) mit Grenzwerten der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) und der "Niederländischen Liste" für Böden; alle Werte in mg/kg Trockenmasse; k. A.: keine Angabe.

haben muss. Zunächst ist angenommen worden, dass die Tiefenwassererneuerung aufgrund der Übersichtung mit Süßwasser vollständig zum Erliegen kam und kein Sauerstoff mehr in die tiefen Bereiche des Mittelmeeres gelangt ist. Man spricht hierbei von Stagnation ("Stagnationsmodell"). Das organische Material wird in solch einem Fall nicht mehr vollständig abgebaut, sondern reichert sich im Sediment an. Später, als festgestellt wurde, dass die biologische Produktion zu Zeiten der Sapropelbildung erhöht gewesen sein muss, wurde die Hypothese von der Zirkulationsumkehr formuliert. So sollen sich die Strömungsrichtungen der ein- und ausströmenden Wassermassen gänzlich zu einem "ästarinen Zirkulationsmuster" umgekehrt haben. In einer solchen Situation würden die Nährstoffe, die aus den abgestorbenen Organismen freigesetzt werden, aus tieferen Wasserschichten immer wieder an die Oberfläche befördert, wo sie zu einer Steigerung der biologischen Produktion führten. In diesem Fall wäre die hohe Bioproduktion also für die Ablagerung großer Mengen organischen Materials verantwortlich zu machen. Mit welcher dieser beiden Möglichkeiten,

Stagnationsmodell oder Zirkulationsumkehr, sich die Sapropelbildung besser erklären lässt, steht noch zur Debatte. Die von uns gefundenen Elementsignaturen deuten eher auf die zuletzt genannte Möglichkeit hin. Während der besonders intensiven Sapropelereignisse hat, so ist zu vermuten, zumindest eine zeitweilige Umkehr der Zwischenwasserströmung südlich von Kreta stattgefunden. Berechnungen zur Herkunft der Spurenmetallgehalte der Sapropel beweisen zudem, dass kein langfristiger Zusammenbruch des Tiefenwasseraustauschs stattgefunden haben kann. Bei Stagnation versiegt auch der Nachschub der mit dem Meerwasser herangezogenen Schwermetalle. Einträge allein durch Staubtransport und Flusswasser würden jedoch nicht ausreichen, um die extrem hohen Spurenmetallgehalte der Sapropel hervorgerufen. Ein Vergleich mit den Schwermetallgehalten von Böden oder Klärschlämmen zeigt, dass die Sapropel ausschließlich durch natürliche Prozesse "stark belastet" sind. Das Metallinventar der Sapropel lässt sich nur damit erklären, dass eine Ausfällung von Sulfiden bereits in der Wassersäule geschah. Dies wiederum setzt eine "Vergiftung" des östlichen Mittelmeeres mit Schwefelwasserstoff voraus. Dies steht mit anderen geochemischen Untersuchungen im Einklang (siehe *Nature*, Vol. 397, Seite 146-149).

Weitere Fragen

Der Mechanismus der Sapropelbildung scheint gemäß neuerer Forschungen von den Eiszeitzyklen weitgehend unabhängig zu wirken. So wurden die Sapropel des östlichen Mittelmeeres nicht nur während der Warmzeiten, sondern auch der Kaltzeiten gebildet. Bei dem nachgewiesenen globalen Einfluss der Nordhemisphären-Vereisung wirft das neue Fragen auf. Warum haben zum Beispiel die Klimaverhältnisse im Gebiet des östlichen Mittelmeeres und Nordafrikas so geringfügig auf die globalen Änderungen reagiert?

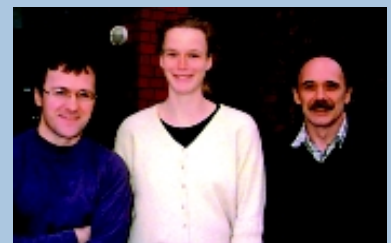
Die ungewöhnliche Stabilität des im östlichen Mittelmeer vorliegenden Klimasteuerungsmechanismus äußert sich auch darin, dass vor der oben beschriebenen Austrocknung des Mittelmeeres (5,5 Millionen Jahre vor heute) mit ähnlicher Regelmäßigkeit Sapropellagen auftraten. Eine Untersuchung von aus jener Zeit stammenden

Tiefseesedimenten könnte Aufschluss darüber geben, ob der ostafrikanische Monsun damals bereits die gleichen Variationen gezeigt hat. Dies würde bedeuten, dass er gänzlich unabhängig vom asiatischen Monsunsystem wirkt, das damals noch nicht ausgeprägt war.

Da die beschriebenen zyklischen Veränderungen des Klimas offensichtlich in Ostafrika, der "Wiege des Menschen", ihren Ursprung hatten, stellen sich auch für Evolutionsbiologen bzw. Paläoanthropologen neue Fragen. Hatten die Schwankungen des Monsuns einen Einfluss auf die Entwicklung der ersten Hominiden? Waren es gerade die periodischen Veränderungen des Klimas und der Vegetation, die unseren Vorfahren besondere Anpassungsfähigkeiten abverlangten und die Evolution des Menschen vorantrieben?

Es scheint, dass das Mittelmeer auch in Zukunft seine nahezu magische Anziehungskraft behalten wird, nicht nur für Erholungssuchende. Letzteren sei gesagt, dass es voraussichtlich noch mehrere tausend Jahre dauern wird, bis es wieder zur Sapropelbildung und damit zu einer "natürlichen Vergiftung" des Mittelmeeres kommt.

Die Autoren



Prof. Dr. Hans-Jürgen Brumsack (r.) studierte Chemie und Mineralogie in Münster und Göttingen. Nach der Promotion 1979 folgte ein Forschungsaufenthalt am Scripps Institution of Oceanography in La Jolla, USA. Bis zu seiner Habilitation in Göttingen 1988 war er wiss. Mitarbeiter in Göttingen und Mainz, danach bis zu seinem Ruf nach Oldenburg Hochschuldozent für Meeres-Geochemie in Göttingen. Seit 1992 leitet er die AG Mikrobiogeochemie am Institut für Chemie und Biologie des Meeres (ICBM). Seine Forschungsschwerpunkte sind die Umwelt- und Meeres-Geochemie unter besonderer Berücksichtigung von Spurenmetallen.

Dr. Rolf Wehausen (32, l.) und Dipl. Chem. Birgit Warning (29) studierten Chemie mit dem Schwerpunkt Geochemie in Oldenburg. Seitdem arbeiten sie in der AG Mikrobiogeochemie. Promotionsthema von Wehausen war die durch Erdbahnparameter gesteuerte Zyklizität der Mittelmeersedimente. Warning befasst sich mit den Sapropellagen des Mittelmeeres und anderen schwermetallreichen Sedimenten.