

Meeresspiegelschwankungen und ihre geologische Überlieferung im Karbonatsystem

Abstract

The dependency between carbonate sediment production on a carbonate platform and its relation to sea-level changes is discussed here. The topography of the upper slope plays an important role in determining the way in which sedimentation continues during lowstands in sea level. The mineralogy and composition of sediments produced on the platform can clearly be related to those found in sediments deposited in the adjacent basin. Two examples from the Recent are described: (1) Sanganeb Atoll (Red Sea), and (2) Pedro Bank (Caribbean). The applicability of the "highstand shedding" principle is shown for ancient carbonate platforms.

1 Einführung

Die heutige Karbonatproduktion in den Flachwasserarealen von Karbonatplattformen ist weit höher als gegenwärtig *in situ* akkumuliert werden kann. Ein großer Teil des biogen gebildeten Karbonats wird daher kleinräumig durch kontinuierliche Prozesse (Tidenströmung, gravitativer Transport, density cascading) aus dem Produktionsmilieu entfernt. Der größere und von der Massenbilanz her gesehen bedeutendere Anteil wird hingegen durch episodisch auftretende Stürme in Form größerer Turbidite in das umgebende Becken transportiert und anschließend sedimentiert, wobei die Angreifbarkeit der Stürme während bestimmter Meeresspiegelstände ganz unterschiedlich sein kann.

Die Art und Weise mit der der Meeresspiegel in Beckensedimenten aufgezeichnet wird, ist in einer Vielzahl von Untersuchungen auf den Bahamas deutlich veranschaulicht worden (u. a. [1, 2]). Dieser Mechanismus dokumentiert sich in Änderungen und Art der Sedimentzufuhr während bestimmter Meeresspiegelintervalle. Hohe Aragonitgehalte sind charakteristisch für Zeiten von Hochstandsbedingungen.

Demgegenüber tritt eine erhöhte Kalziumzufuhr während Tiefständen auf. Ferner findet sich ein erhöhter Eintrag flachwasserbezogener, oft abiogener Komponenten und Fragmente von Organismen, die typisch für das Plattforminnere sind, während Zeiten des Hochstandes.

Ein zunehmender Eintrag riffbezogener, biogener Skelettelemente und geringer Mengen an Gesteinsbruchstücken (Lithoklasten) wird in Tiefstandsintervallen beobachtet. Diese Polaritäten sind auf Produktionsunterschiede der Karbonatplattformen während schwankender Meeresspiegelstände zurückzuführen, wobei die regionalen Unterschiede beträchtliche Abweichungen von diesem generellen Prinzip (auch „highstand shedding“ genannt; [1, 2]) zur Folge haben können. Eine entscheidende Rolle spielt dabei die zum jeweiligen Meeresspiegelstand vorhandene Ausdehnung der Flachwasserregion, in der Karbonat produziert werden kann. Bei Tiefständen sind diese flachmarinen Bereiche subaerisch exponiert, und daher reduziert sich die Fläche der Karbonatproduktion. Ausgedehntere submarine Terrassensysteme können zu bestimmten tieferen Meeresspiegelständen dies aber wettmachen.

An den Beispielen der Pedro Bank in der Karibik und dem Sanganeb Atoll im Roten Meer, die derzeit von einer Arbeitsgruppe in der Abteilung Paläo-Ozeanologie bearbeitet werden, soll gezeigt werden, wie die submarine Morphologie der Riff- und Plattformhänge, die durch *in situ* Tauchbootbeobachtungen erfasst wurde, zu einem erweiterten Verständnis des Karbonatexports in den umgebenden Ablagerungsraum des Periplattformbereiches beitragen kann. Diese Sedimente werden mit Hilfe von Kasten- und Schwerelotkernen in ihrer zeitlichen und räumlichen Abfolge untersucht.

2 Submarine Riffmorphologie der tiefen Vorriffhänge.

Der Einsatz bemannter Tauchboote hat unsere Kenntnis über die tiefere Vorriffmorphologie bis zu einer heutigen Wassertiefe von 350 m wesentlich verbessert. Verkarstungen in bestimmten bathymetrischen Bereichen oder auffällige Terrassenstufen sind Zeugen ehemaliger Meeresspiegelstände. Durch die gezielte Probenahme geeigneter kalkiger Organismen des ehemaligen Flachwassers, insbesondere scleractine Korallen, wurden neue Einblicke in den zeitlichen Gang des Meeresspiegels gewonnen. Untersuchungen im Roten Meer [3] und dem westlichen Indik zeigen eine sehr ähnliche Vorriffmorphologie in den verschiedenen Tiefenbereichen. Ebenso haben die Untersuchungen in der Karibik [4] von den unterschiedlichsten Lokalitäten immer wieder ein ähnliches morphologisches Muster erbracht.

Die Morphologie der tiefen Vorriffhänge ist durch einen sedimentären Keil geprägt, dessen Material unverfestigt ist und deren Sedimentation mit dem frühen Holozän einsetzt. Diese Lockersedimente überlagern einen zementierten Schuttbereich, dessen jüngste Zementationsereignisse mit 14 000 und 10 000 Jahre vor heute (= Jvh) datiert wurden (konventionelle ^{14}C und ^{14}C AMS Alter) [4]. Darüber folgt eine steile Wand (the wall), die in unterschiedlicher Bathymetrie zwischen 180 und 110 m Tiefe einsetzt und in der Karibik fast überall mit einem prägnanten Terrassenknick in 60 m \pm 10 m endet (Abbildung 1). Eine ähnliche Riffmorphologie ist aus dem Roten Meer [3] und von den Comoren im Indischen Ozean bekannt [5]. Dort liegt der Top der Steilwand bei \pm 90 m (Abbildung 2), in vielen Karbonatplattformprofilen ist bei \pm 60 m aber zusätzlich eine auffällige Terrassenstufe entwickelt. Datierungen von Flach-

wasserkorallen aus dieser Wand erbrachten für die Comoren ein Alter zwischen 42 ky und 30 ky U/Th, belegen also ein Riffwachstum während Isotopenstadium 3.

3 Kriterien zur Bestimmung von Meeresspiegelschwankungen aus Beckensedimenten

Komponenten

Das ständige Zu- und Nachwachsen der Rifforganismen im Wechselspiel mit Wellen- und Sturmerosion führt zur Ausbildung charakteristischer Kalkpartikel. Dies sind heutzutage Bruchstücke von Steinkorallen, spezifische Flachwasserforaminiferen und Kalkalgen (Rot- und Grünalgen). Daneben spielen die abiogenen Komponenten, wie Ooide, Peloide, Pellets und Grapestones, regional eine weitere wichtige Rolle. Dieses Spektrum ist ein wesentliches Charakteristikum für ein Periplattformsediment, das einen erhöhten Eintrag während Meeresspiegelhochständen erfahren hat.

Das Komponentenspektrum während Meeresspiegeltiefständen ist durch einen dominanten Eintrag von Riffkalkpartikeln geprägt. Da frühdiagenetische Prozesse eine sehr rasche Lithifizierung der Sedimente der Plattformoberfläche bewirken, ist der Eintrag aus dem Plattforminneren fast vollständig unterdrückt. Erhöhter terrigener Eintrag, zum Beispiel von Quarz, ist auf Grund der veränderten Erosionsbasis des Schelfes ebenso zu beobachten.

Korngrößen

Das Korngrößenspektrum ist stark durch den Komponenteneintrag geprägt und in erster Linie eine Funktion der Entfernung vom Liefergebiet. Aber auch in der zeitlichen Abfolge lassen sich die Änderungen als integrierten Bestandteil der Gesamtanalyse heranziehen. Für die Bestimmung des Biogenanteils sind die Fraktionen 125–250 µm und 250–500 µm wichtig und zeigen die auffälligsten Unterschiede.

Mineralogische und chemische Hinweisen

Der sich ändernde Komponentenbestand wird in der Mineralogie des eingetragenen Skelettmaterials deutlich und damit zusammenhängend in der Verteilung von Sr und Mg als charakteristische Elemente mariner Karbonate dokumentiert. Sr wird bevorzugt in

Aragonit eingebaut und ist daher ein Maß für Steinkorallen, verkalkte Hydrozoen und die Grünalge *Halimeda* (ist im Roten Meer unbedeutend). Mg hingegen wird von einigen Foraminiferen, vor allem aber von corallinen Rotalgen und Stachelhäutern (Echinodermen) in ihr Skelett eingebaut und mineralogisch im Hochmagnesium-Kalzit (HMC) gebunden.

Stabile Isotope

Die Analyse der stabilen Isotope, insbesondere die des Sauerstoffs, gemessen an der planktischen Foraminifere *Globigerinoides sacculifer* (Pedro Bank) bzw. *Globigerinoides ruber* (Rotes Meer) in Zusammenhang mit dem biostratigraphischen Gerüst

des *Globorotalia-menardii*-Komplexes, dient zur zeitlichen Einstufung der jeweiligen episodischen Schüttungsereignisse von der Plattform.

4 Karbonatexport an der Pedro-Bank

Die Pedro Bank ist eine Karbonatplattform, die zum nördlichen Nicaragua-Rücken gehört. Diese Hochzone gliedert sich heute in mehrere isolierte Bänke und Schelfareale, die durch Becken und schmale Passagen voneinander getrennt sind. Die Pedro Bank zeigt eine unterschiedliche bathymetrische Lage der Plattformoberkante zwischen Luv- und Leeseite. Im Süden reicht die Oberkante bis circa 25–30 m (Luvseite) heutiger Wassertiefe, im

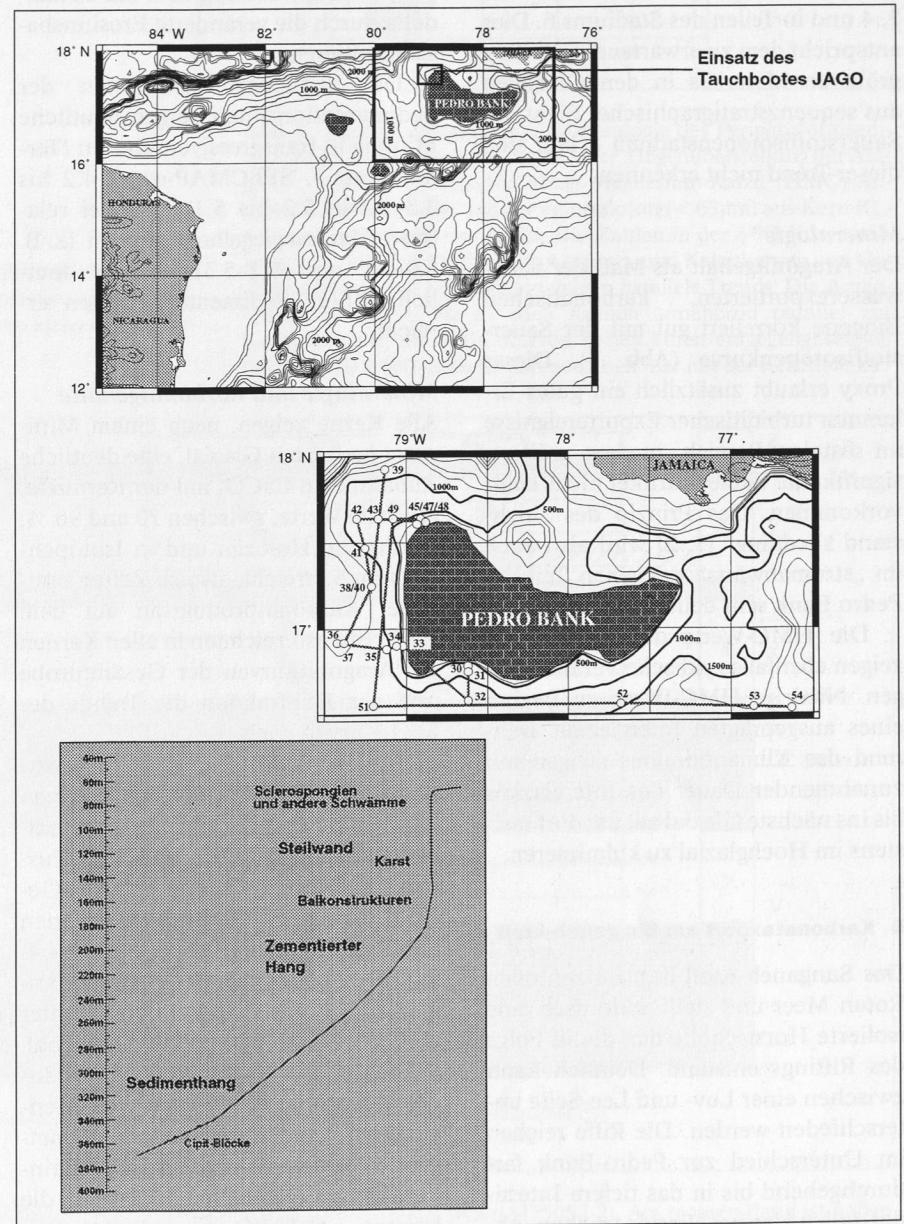


Abb. 1. Lage der Sedimentkerne und Tauchprofile im Arbeitsgebiet Pedro Bank, Karibik. Die tiefere Vorriffmorphologie ist bis zu einer Wassertiefe von 350 m erfasst. Das Profil ist nicht überhöht.

Norden jedoch nur bis zu 60 (40) m Tiefe (Leeseite). Damit liegt sie in einer kritischen Tiefe bezüglich der biogenen Flachwasserkarbonatproduktion. Das Untersuchungsmaterial entstammt dem Periplattformbereich vom SE bis zum NW der Bank, wo auch die Tauchbootuntersuchungen stattfanden (Abbildung 1).

Korngrößen

Der Anteil der Grobfraktion am Gesamtsediment zeigt tendenziell eine Koppelung an die global gesteuerten Meeresspiegel- und Klimaschwankungen. Hohe Anteile entsprechen glazialen Abschnitten, niedrigere Werte den Interglazialen. Auffallend sind die zunehmenden Anteile in den Fraktionen > 500 und > 1000 µm in den Glazialen 2, 4 und in Teilen des Stadiums 6. Dies entspricht dem zu erwartenden Eintrag größerer Materials in den Glazialen aus sequenzstratigraphischer Sicht. Im Sauerstoffisotopenstadium 8 läßt sich dieser Trend nicht erkennen.

Mineralogie

Der Aragonitgehalt als Maß der flachwasserexportierten, karbonatischen Biogene korreliert gut mit der Sauerstoffisotopenkurve (Abb. 3). Dieser Proxy erlaubt zusätzlich ein gutes Erkennen turbiditischer Exportereignisse im distalen Bereich, in dem größere, signifikante Skelettpartikel nicht mehr vorkommen. Das Prinzip des „high-stand shedding“ [1, 2] wird also auch im „stromabwärts“ gelegenen Teil der Pedro Bank sehr deutlich überliefert.

Die HMC-Werte der Feinfraktion zeigen ebenfalls zyklische Veränderungen. Niedrige HMC-Werte zu Beginn eines ausgeprägten Interglazials während des Klimaoptimums steigen mit zunehmender Dauer des Interglazials bis ins nächste Glazial an, um dort meistens im Hochglazial zu kulminieren.

5 Karbonatexport am Sanganeb-Atoll

Das Sanganeb-Atoll liegt im zentralen Roten Meer und stellt tektonisch eine isolierte Horstscholle dar, die in Folge des Rifting entstand. Deutlich kann zwischen einer Luv- und Lee-Seite unterschieden werden. Die Riffe reichen im Unterschied zur Pedro-Bank fast durchgehend bis in das tiefere Intertidal, fallen also bei Niptide trocken. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die Lage der Kernpositionen und Tauchbootprofile.

Isotopenstratigraphie

Als ältestes Material wurden Sedimente des Sauerstoffisotopenstadiums 5.3 angetroffen (Abbildung 4). Die maximalen Schwankungen der Sauerstoffisotopenwerte liegen zwischen + 2,5 ‰ im Glazial und - 1,5 ‰ im heutigen Interglazial (Holozän). Das entspricht einem maximalen Isotopenhub von 4 ‰. Diese extremen Schwankungen lassen sich durch hohe Salzkonzentrationen während glazialer Phasen im Roten Meer erklären [3, 6].

Korngrößen und Sedimentationsraten

Im Unterschied zur landferneren Pedro-Bank treten hier größere Korngrößen auch während abgesenktem Meeresspiegel auf, die aus dem erhöhten terrigenen Eintrag über das Sudandelta durch die veränderte Erosionsbasis resultieren.

Die zeitlichen Variationen der Sedimentationsraten zeigen deutliche Minima in transgressiven Phasen (Termination 1, SPECMAP-event 4.2 bis 3.3 sowie 5.2 bis 5.1) auf. Bei relativen Meeresspiegelhochständen (z. B. 5.0–5.1 und 5.2–5.3) werden deutlich höhere Sedimentationsraten erreicht.

Mineralogie und Karbonatgehalte

Alle Kerne zeigen, nach einem Minimum im letzten Glazial, eine deutliche Zunahme an CaCO₃ mit der Kerntiefe. Höchste Werte, zwischen 70 und 90 %, werden im Holozän und in Isotopenstadium 5 erreicht, also zu Zeiten optimaler Karbonatproduktion auf dem Atoll. Ebenso zeichnen in allen Kernen die Aragonitkurven der Gesamtprobe und der Feinfraktion die Trends der δ¹⁸O-Kurven nach.

Auffällig ist in allen Kernen der antizyklische Verlauf der HMC-Kurven von Feinfraktion und Gesamtsediment zu den Aragonit- und δ¹⁸O-Kurven (Abbildung 4). Hohe HMC-Gehalte treten in Tiefstandssituationen auf, besonders deutlich in Stadium 4. Die Glazial-Interglazial-Zyklen kommen in den HMC-Kurven dominanter zum Vorschein als im Aragonitsignal. Während des Meeresspiegeltiefstandes in Isotopenstadium 4 wurde offensichtlich die Flachwasserkarbonatproduktion durch aragonitische Steinkorallen unterbrochen, während die höhere Salinitäten tolerierenden corallinen Rotalgen weiterproduzieren.

6 Unterschiede zwischen Sanganeb-Atoll und Pedro-Bank

Die eine Meeresspiegeländerung anzeigenden Proxies verlaufen im Fallbeispiel der Pedro-Bank parallel zum globalen Muster. Die Ergebnisse vom Sanganeb Atoll zeigen jedoch davon abweichende Muster, die das Holozän und das Isotopenstadium 3 betreffen.

Die Änderung im Volumenanteil der exportierten Flachwasserkomponenten zeigen deutlich höhere Werte im Isotopenstadium 3 (Korallen erreichen hier über 10 Vol %), aber die geringsten Werte im Holozän. Das Sanganeb-Atoll ist im Zentrum seiner Lagune bis zu 35 m tief und kann daher einen großen Teil des gegenwärtig gebildeten Karbonats darin aufnehmen. Durch die fast allseitig hochgewachsenen Riffe wird das holozäne Lockersediment vor Sturmerosion fast vollständig geschützt. Auf der offenen Pedro-Bank werden die holozänen Sedimente schon bei Stürmen mittleren Energiepotentials abgetragen und verbleiben nicht am Ort ihrer Bildung.

Der gegenüber dem Holozän erhöhte Eintrag während Isotopenstadium 3 am Sanganeb-Atoll läßt sich aus den Befunden der tieferen Vorriffmorphologie erklären. Aus unseren Tauchboot-Untersuchungen wissen wir, dass auf etwa 90 m Wassertiefe auf beiden Seiten ausgeprägte Terrassen existieren (Abbildung 2). In Analogie zu den Comoren schließen wir, dass es sich um Riffbildungen des Isotopenstadium 3 handelt. Diese Riffe entwickelten keine ausgeprägten Lagunensysteme und das gesamte Karbonat wurde exportiert. Während der gleichen Zeit war aber die Pedro-Bank, die diese Terrassenstufe in der entsprechenden Bathymetrie nicht aufweist (Abbildung 1), bereits aufgetaucht und konnte damit keinen wesentlichen Flachwasserkomponentenanteil produzieren.

7 Bedeutung der Fallstudien für die Interpretation fossiler Karbonatsysteme

In fossilen Karbonatsystemen ist es erheblich schwieriger eine hochauflösende, zeitliche Trennung der abgelagerten Periplatformsedimente, ähnlich wie in oben erwähnten Beispielen, zu erkennen. Eine Möglichkeit bietet jedoch die detaillierte Analyse der Komponenten und Biota. An der unterjuras-

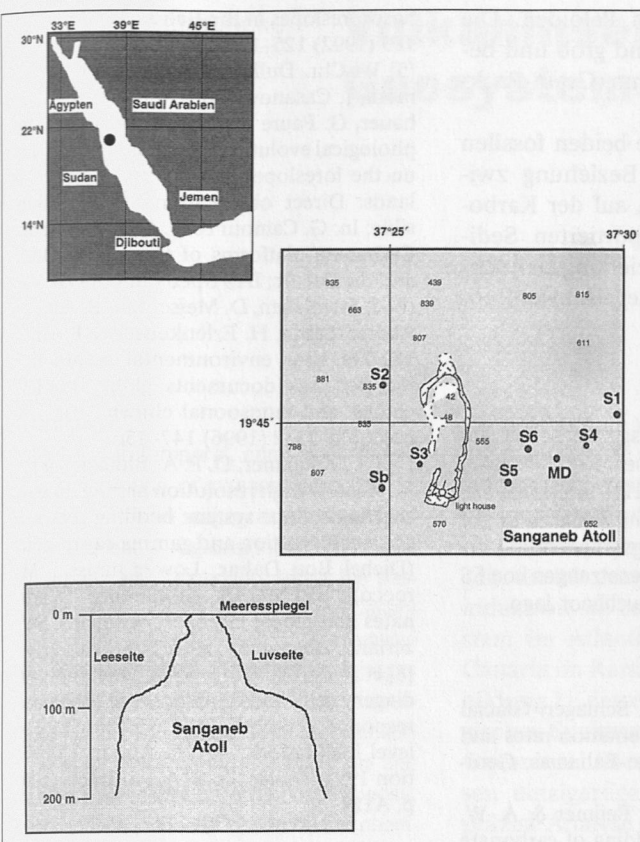


Abb. 2. Lage der Sedimentkerne und Tauchprofile im Arbeitsgebiet Sanganeb Atoll, Rotes Meer. Die Hangmorphologie zeigt deutlich die auf etwa 90 m Wassertiefe auf beiden Seiten ausgeprägte Terrasse.

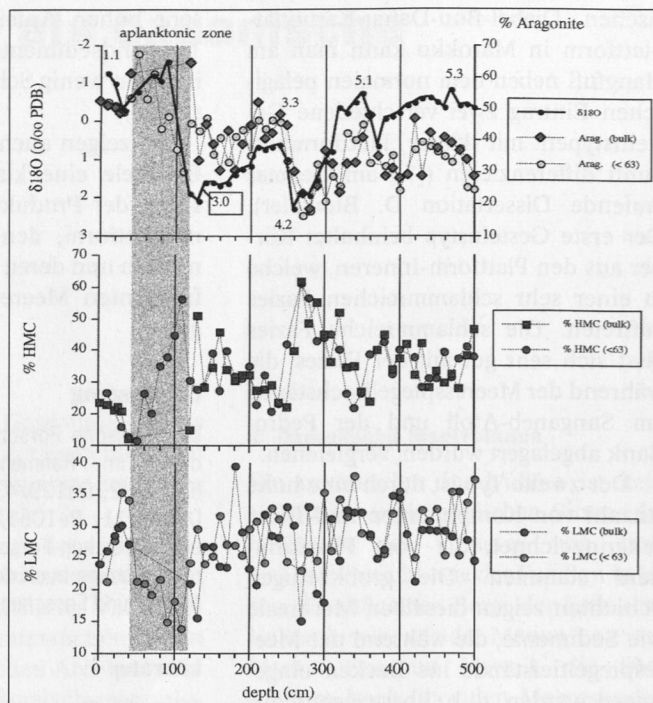


Abb. 4. Sauerstoffisotopie und Mineralogie des Periplattformsedimentes am Sanganeb-Atoll, Rotes Meer. Gegenüberstellung der Aragonit-, Niedrig- (LMC) und Hoch-Magnesium-Kalzit (HMC)-Anteile der Gesamtprobe und der Feinfraktion (< 63µm) aus Kern KL-S1 von der Luvseite des Atolls. Die Zahlen in der δ¹⁸O-Kurve entsprechen „SPECMAP-Ereignisse“. Aragonit- und Kalzitkurven von Gesamtsediment und Feinfraktion zeigen parallele Trends. Die Aragonitkurven laufen wie in allen Kernen annähernd parallel zur Isotopenkurve, die HMC-Kurven zeigen einen entgegengesetzten Verlauf. Die LMC-Gehalte nehmen auch hier mit der Kerntiefe zu.

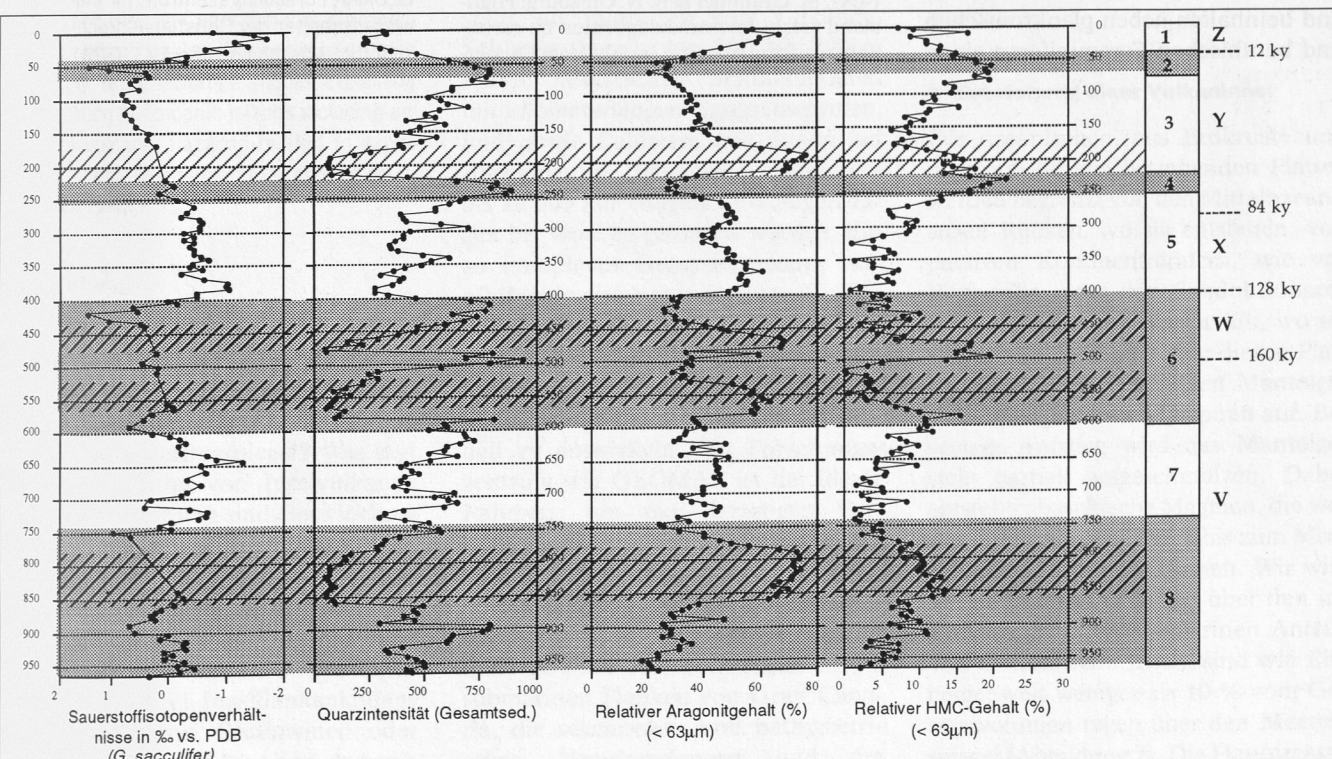


Abb. 3. Sauerstoffisotopie und Mineralogie des Periplattformsedimentes an der Pedro-Bank (Kern M35052-2). Am rechten Rand ist neben den Sauerstoffisotopenstadien der *Globorotalia-menardii*-Komplex dargestellt. Ein erhöhter Quarzgehalt ist in den Glazialen zu beobachten. Die Aragonitkurve korreliert positiv mit dem Sauerstoffisotopenverhältnis und zeigt einen deutlich höheren Eintrag von Flachwasser-material in Interglazialen. Hoch-Magnesium-Kalzit-Gehalte zeigen zyklische Eintragsignale: Niedrig zu Beginn der Interglaziale und bis zum Maximum im Hochglazial ansteigend.

sischen Djebel-Bou-Dahar-Karbonatplattform in Marokko kann man am Hangfuß neben dem normalen pelagischen Eintrag zwei verschiedene Gesteinstypen mit klarer Plattformherkunft differenzieren ([7]; am Geomar laufende Dissertation D. Blomeier). Der erste Gesteinstyp beinhaltet Körner aus den Plattform-Inneren, welche in einer sehr schlammreichen Fazies auftreten. Die schlammreiche Fazies lässt sich sehr gut mit der Fazies, die während der Meeresspiegelhochstände am Sanganeb-Atoll und der Pedro-Bank abgelagert wurden, vergleichen.

Der zweite Typ ist durch eine hohe Anzahl von Komponenten und Biota gekennzeichnet, die vom Plattformrand stammen. Die grobkörnigen Schichten zeigen dieselben Merkmale wie Sedimente, die während der Meeresspiegeltiefstände ins Becken eingetragen werden, d. h. überwiegend aus Riffmaterial bestehen.

Die pliozänen Ablagerungen auf dem westlichen Hang der Great Bahama Bank zeigen ebenso eine klare Trennung zwischen Hoch- und Tiefstand-Sedimenten anhand des Komponentenspektrums ([8]; am Geomar laufende Dissertation H. Westphal).

Die Hochstandsedimente sind sehr schlammreich (Wacke- bis Mudstones) und beinhalten neben planktonischen und benthischen Foraminiferen einen

sehr hohen Anteil an Peloiden. Die Tiefstandsedimente sind grob und beinhalten wenig Schlamm (Grain-Packstones).

So zeigen auch die beiden fossilen Beispiele eine klare Beziehung zwischen der Produktion auf der Karbonatplattform, den exportierten Sedimenten und deren Beziehung zu hochfrequenten Meeresspiegelschwankungen.

Danksagung

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft förderte im Rahmen mehrerer Projekte (Du129/2, Du129/4, Du129/6, Du129/10, Du129/11, Re1051/1 und Re1051/3) die umfangreichen Forschungsarbeiten. Die Autoren danken auch den Besatzungen von FS Meteor und Forschungstauchboot Jago.

Literatur

- [1] A. W. Droxler & W. Schlager: Glacial versus interglacial sedimentation rates and turbidite frequency in the Bahamas; *Geology* 13 (1985) 799–802.
- [2] W. Schlager, J. J. G. Reijmer & A. W. Droxler: Highstand shedding of carbonate platforms; *Journal of Sedimentary Research*, B 64/3 (1994) 270–281.
- [3] T. C. Brachert & W.-Chr. Dullo: Correlation of deep-sea sediments and forereef carbonates: an important clue for basin analysis; *Mar. Geol.* 92 (1990) 255–267.
- [4] G. M. Grammer & R. N. Ginsburg: Highstand versus lowstand deposition on carbonate platform margins: insight from Quater-

nary foreslopes in the Bahamas; *Mar. Geol.* 103 (1992) 125–136.

[5] W.-Chr. Dullo, D. Blomeier, G. F. Camoin, J. Casanova, M. Colonna, A. Eisenhauer, G. Faure & B. A. Thomassin: Morphological evolution and sedimentary facies on the foreslopes of Mayotte, Comoro Islands: Direct observations from submersible; In: G. Camoin & D. Bergerson (eds.): Carbonate platforms of the Indian Ocean and the Pacific; IAS Spec Publ (im Druck).

[6] C. Hemleben, D. Meischner, R. Zahn, A. Almogi-Labin, H. Erlenkeuser & B. Hiller: 380 000 Year environmental record from the Red Sea documents global sea level change and monsoonal climate; *Paleoceanography* 11/2 (1996) 147–156.

[7] J. J. G. Reijmer, D. P. A. Blomeier & J. A. M. Kenter: High resolution architecture of a carbonate slope system: bedding geometry, grain composition and gamma-ray response (Djebel Bou Dahar, Lower Jurassic, Morocco); SEPM/IAS Conference "Carbonates and global change", Wildhaus, Switzerland, Abstracts (1996) 117–118.

[8] H. Westphal & J. J. G. Reijmer: Input and diagenesis of a carbonate slope (Bahamas): response to morphology evolution and sea level fluctuations; AAPG Annual Convention 1997, Dallas, U. S. A, Abstracts (1997) p. A124.

Anschrift der Verfasser:

Prof. W.-Chr. Dullo, Dr. J. J. G. Reijmer, Dipl.-Geol. N. Andresen, Dipl.-Geol. P. Emmermann
GEOMAR Forschungszentrum für marine Geowissenschaften der Christian-Albrechts-Universität Kiel, Wischhofstraße 1–3, D-24148 Kiel.