

RASTA



Abschlussbericht zum BMBF-Vorhaben

RASTA – Rasche Klimawechsel im
westlichen tropischen Atlantik
einschließlich
GOLDFLOS – Impact des Golfstromes
auf Sedimentationsmilieu und
Benthosgemeinschaften in der südlichen
Florida-Straße

im Rahmen der
FS SONNE-Ausfahrt SO164

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0164 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Abschlussbericht zum BMBF-Vorhaben
RASTA – Rasche Klimawechsel im westlichen tropischen Atlantik
einschließlich
GOLDFLOS – Impact des Golfstromes auf Sedimentationsmilieu und
Benthosgemeinschaften in der südlichen Florida-Straße
im Rahmen der
FS SONNE-Ausfahrt SO164

Expedition: 22.05.2002 bis 28.06.2002
Projektlaufzeit: 01.01.2002 bis 30.06.2004

Projektkoordinator: Prof. Dr. Wolf-Christian Dullo
IFM-GEOMAR
Leibniz Institut für Meereswissenschaften
Wischhofstr. 1-3
D-24148 Kiel
Tel.: 0431-600-2215
Fax: 0431-600-2925
Email: cdullo@ifm-geomar.de

Projektleiter Teilprojekt 01: Prof. Dr. Wolf-Christian Dullo
IFM-GEOMAR
Leibniz Institut für Meereswissenschaften
Wischhofstr. 1-3
D-24148 Kiel
Tel.: 0431-600-2215
Fax: 0431-600-2925
Email: cdullo@ifm-geomar.de

Projektleiter Teilprojekt 02: Prof. Dr. Gerold Wefer
DFG-Forschungszentrum Ozeanränder der Universität Bremen
Klagenfurter Straße
D-28359 Bremen
Tel.: 0421 218 - 3389
Fax: 0421 218 - 3116
E-Mail: gwefer@rcom-bremen.de

PD Dr. Dirk Nürnberg
IFM-GEOMAR
Leibniz Institut für Meereswissenschaften
Wischhofstr. 1-3
D-24148 Kiel
Tel.: 0431-600-2313
Fax: 0431-600-2926
Email: dnuernberg@ifm-geomar.de

Projektleiter GOLDFLOS: Prof. Dr. Wolfgang Kuhnt
Institut für Geowissenschaften an der
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Olshausenstr. 40
24118 Kiel
Tel.: 0431-880-2924
Fax: 0431-880-4376
Email: wk@gpi.uni-kiel.de

Unter Mitarbeit von:

Dr. Joachim Schönfeld
Vormals: Tethys Geoconsulting GmbH
Gegenwärtig: IFM-GEOMAR
Leibniz Institut für Meereswissenschaften
Wischhofstr. 1-3
D-24148 Kiel
Tel.: 0431-600-2315
Fax: 0431-600-2926
Email: jschoenfeld@ifm-geomar.de

Projektmitarbeiter:

Dr. Carsten Rühlemann (c.ruehlemann@bgr.de)
Dipl. geol. Marcus Regenberg (mregenber@ifm-geomar.de)

Kurzfassung

Die Karibik ist ein ideales Meeresgebiet, um das empfindliche Ozean/Klima-System und seine Reaktionen auf schnelle Klimaschwankungen (z.B. Dansgaard/Oeschger-Zyklen) während des letzten, frühen Glazials sowie daraus resultierende Umweltveränderungen in niederen Breiten zu untersuchen. Im RASTA-Projekt haben wir die in Wechselbeziehung zueinander stehenden globalen Klimaschwankungen, Meeresspiegelfluktuations, Änderungen der Meeresoberflächentemperaturen, der tieferen und intermediären Wassermassen sowie die Rückkopplungseffekte auf die marine Biota in einem räumlich eng begrenzten Randmeer untersucht. Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der paläozeanographischen Rekonstruktion des Quartärs, insbesondere der hochdynamischen Sauerstoffisotopenstadien 2 und 3, und auf dem Vergleich zur holozänen bis rezenten Situation. Zwei in Wechselbeziehung zueinander stehende Teilprojekte RASTA 01 und 02 sowie die sie begleitende Pilotstudie GOLDFLOSS trugen dazu bei, die wissenschaftlichen Ziele mit verschiedenen innovativen Ansätzen aus unterschiedlichen Perspektiven zu erreichen. Grundlage des Forschungsprojektes war die SO164-Expedition mit dem Forschungsschiff SONNE (RASTA) in die Karibik (22.05.-28.06.2002). Die ozeanographischen und marin-geologischen Untersuchungen umfassten hydroakustische Kartierungen, die Messung ozeanographischer Parameter, die Beprobung der Wassersäule und der Sedimente im Kolumbien Becken, im Venezuela Becken, in der Windward Passage und in der Florida-Straße. Der Einsatz des Forschungstauchbootes JAGO erlaubte zudem die Beprobung und detaillierte Kartierung der Riff- und Hangmorphologie im Bereich der Kleinen Antillen (Guadeloupe und Martinique). Die im Rahmen von RASTA und GOLDFLOSS erzielten Projektergebnisse verdeutlichen in einzigartiger Weise die Wechselwirkungen zwischen dem W-Atlantischen Warmpool und den Änderungen der thermohalinen Zirkulation im N-Atlantik.

Inhalt

<u>Kurzfassung</u>	<u>2</u>
<u>Inhalt</u>	<u>3</u>
<u>I. Einleitung</u>	<u>4</u>
<u>I.1 Aufgabenstellung</u>	<u>4</u>
<u>I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde</u>	<u>4</u>
<u>I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens</u>	<u>5</u>
<u>I.4 Wissenschaftlich-technischer Stand zu Beginn des Projektes</u>	<u>8</u>
<u>I.5 Zusammenarbeit mit Dritten</u>	<u>9</u>
<u>I.6 Literatur</u>	<u>10</u>
<u>II. Wissenschaftliche Ergebnisse</u>	<u>10</u>
<u>II.1 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse</u>	<u>28</u>
<u>II.2 Fortschritt im Stand der Wissenschaft während der Projektlaufzeit</u>	<u>28</u>
<u>II.3 Eingereichte und geplante Veröffentlichungen</u>	<u>29</u>
<u>II.4 Literatur</u>	<u>30</u>
<u>III. Erfolgskontrollbericht</u>	<u>34</u>
<u>III.1 Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen</u>	<u>34</u>
<u>III.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse</u>	<u>35</u>
<u>III.3 Fortschreibung des Verwertungsplanes</u>	<u>36</u>
<u>III.4 Ungelöste Fragestellungen</u>	<u>36</u>
<u>III.5 Einhaltung der Ausgabenplanung</u>	<u>37</u>
<u>III.6 Einhaltung der Zeitplanung</u>	<u>38</u>
 <u>Anhang</u>	
<u>Berichtsblätter</u>	
<u>Publikationen</u>	

I. Einleitung

I.1 Aufgabenstellung

Aufgrund ihrer Schlüsselposition für den Wärmetransport in den Nordatlantik besitzt die Karibik eine große Attraktivität für paläo-ozeanographische Fragestellungen. Viele der bisherigen Untersuchungen konzentrierten sich auf den Einfluss der tektonischen Entwicklung der mittelamerikanischen Landbrücke auf die atlantische Zirkulation und das globale Klimageschehen und belegen, dass die paläo-ozeanographische Dynamik der Karibik in den Sedimentarchiven hervorragend dokumentiert sind [Haug und Tiedemann, 1998; Hüls, 2000]. Die kurzfristigen ozeanographischen und klimatischen Variabilitäten der Karibik sind hingegen noch unvollständig untersucht und das Ursache-Wirkungsgefüge erst in den Anfängen verstanden [Rühlemann *et al.*, 1999]. Nur vereinzelt wurden Dansgaard-Oeschger-ähnliche Veränderungen im Einstrombereich der Karibik belegt [Hüls, 2000; McIntyre und Molino, 1996]. In welcher Beziehung diese zu den im Nordatlantik beschriebenen Heinrich-Ereignissen stehen, die durch Schmelzwassereinbrüche und Eisinstabilitäten auf der Nordhemisphäre zu kurzzeitigen Verringerungen bzw. zu einem gänzlichen Aufstoppen der thermohalinen Zirkulation führten, ist nur unzureichend geklärt.

Das Ozean/Klima-System sollte in der Karibik in mehrfacher Hinsicht exemplarisch untersucht werden. Innerhalb des RASTA-Projektes sollten die ursächlich in Beziehung stehenden Änderungen des globalen Klimas, des Meeresspiegelniveaus, der Meeresoberflächentemperaturen, der tieferen Hydrographie und damit einhergehend der sich verändernden marinen Mikrofaunenzusammensetzung in einem räumlich begrenzten Meeresgebiet während des letzten Glazial/Interglazial-Zyklus auf kurzen Zeitskalen beschrieben werden. Die Teilprojekte wurden eng aufeinander abgestimmt und trugen aus unterschiedlichen Perspektiven und mit breitgefächerten Methoden dazu bei, die ozeanographische Entwicklung der Karibik während der klimatisch stark variierenden Isotopenstadien 2 und 3 zu rekonstruieren.

Teilprojekt 01 verfolgte das Ziel, die mit Klimawechseln einhergehenden Änderungen des Meeresspiegels in der Karibik zu rekonstruieren. Direktbeobachtungen und *insitu* Probennahme an tieferen Riffen im proximalen Bereich und der anschließenden Becken im Periplattformbereich sollten dazu führen, die Entwicklung von Karstniveaus zu rekonstruieren, ertrunkene Riffe als Zeugen des postglazialen Meeresspiegelanstieges und ältere Riffniveaus aus dem Isotopenstadium 3 zu erfassen.

Teilprojekt 02 zielte darauf ab, zeitliche und räumliche Variationen der Oberflächenhydrographie im karibischen Raum während des späten Pleistozäns zu beschreiben. Hauptaugenmerk wurde dabei auf die Rekonstruktion der Paläo-Oberflächenwassertemperaturen (SST) und –salinitäten (SSS) mittels kombinierter ^{18}O und Mg/Ca Analysen in denselben Foraminiferenarten gelegt, da SST und SSS entscheidende Auswirkungen auf die ozeanische und atmosphärische Zirkulation haben. Ein Schwerpunkt der Projektarbeiten war die weitere Etablierung der Mg/Ca-Paläothermometrie [Nürnberg, 1995; Nürnberg *et al.*, 1996a,b; Nürnberg *et al.*, 2000, Nürnberg, 2000]. Dies umfasste Untersuchungen zur Calcitlösung und diagenetischen Veränderung des Mg/Ca-Signals, die Erstellung neuer, artspezifischer Mg/Ca-Temperatur-Kalibrierungen, sowie die Erstellung hochauflösender SST-Zeitserien.

Die Pilotstudie GOLDFLOSS

Das Untersuchungsziel der Pilotstudie GOLDFLOSS war die gegenwärtige Einwirkung des Florida-Stroms auf Benthosforaminiferen und das Sedimentationsmilieu in der südlichen Florida-Straße. Dabei sollen biotische und sedimentologische Proxies für die Intensität von Bodenströmungen, die im Einflussbereich des Mittelmeerausstroms vor Iberien entwickelt wurden, auf ihre überregionale Anwendbarkeit hin getestet werden. Ist der Einfluss des Strömungsregimes auf Foraminiferen-Gemeinschaften und Korngrößenverteilungen der Bodensedimente in der Florida-Straße erfassbar und lassen sich Änderungen in der Paläo-Strömungsintensität vom Glazial zum Holozän erkennen, so sollte das Strömungsprofil in der geologischen Vergangenheit rekonstruiert werden, um glaziale Durchfluss- und Wärmetransportraten abzuschätzen.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Alle technischen und logistischen Voraussetzungen zur erfolgreichen Durchführung des Vorhabens waren bei Projektbeginn am GEOMAR-Forschungszentrum (jetzt IFM-GEOMAR) und an der Univ. Bremen vorhanden. Die Antragsteller beschäftigen sich seit vielen Jahren mit der Rekonstruktion von Prozessen, die das Klima und die Ozeanographie in verschiedenen Schlüsselregionen des Weltozeans bestimmen. Für RASTA ist insbesondere das Know-How der Antragsteller und die bestehende Infrastruktur für die durchzuführenden geochemischen Analysen zu nennen. Im Rahmen von GOLDFLOS verfügen die Antragsteller über gute Kenntnisse zur Ökologie, Taxonomie und Paläobiologie von Benthosforaminiferen sowie zu den geologischen und biologischen Prozessen im Einflussbereich von Meeresstraßen. Eine besonders wichtige Voraussetzung zur Durchführung dieses Projektes war die intensive Zusammenarbeit mit den amerikanischen Kollegen Jean Lynch-Stieglitz vom Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, und Bill Curry von der Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts.

Für die technische Durchführung der Projekte RASTA und GOLDFLOS war vor allem die Beschaffung eines neuen Kolbenlotes und die Modifizierung des Grosskastengreifers vor der FS SONNE-Fahrt SO164 von großer

Bedeutung. Nur mit diesen Geräten konnte die Probennahme in der Karibik und in der Florida-Straße erfolgreich durchgeführt werden.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

RASTA

Der zeitliche Rahmenplan des Verbundvorhabens inkl. Auswertung wurde entsprechend den Darlegungen im Projektantrag durchgeführt. Die Expedition mit FS *SONNE* (Ausfahrt SO164, Abschnitte 1-3) fand vom 22. Mai – 28. Juni, 2002 statt. Danach schloß sich die eigentliche Auswertephase an, die zusammen mit der später einsetzenden Synthesephase bis zum Projektende im Mai 2004 stattfand.

Durchführung von Expeditionen

Während der Expedition mit FS *SONNE* konzentrierten sich die Arbeiten auf folgende Untersuchungsregionen (Abb. 1). Die Ergebnisse der Forschungsausfahrt sind als Fahrtbericht mit einer ausführlichen Daten-Dokumentation als GEOMAR-Report Band 109 publiziert [Nürnberg *et al.*, 2003]. Im Rahmen des Teilprojektes 01 konzentrierten sich die Arbeiten auf zeitliche und räumliche Veränderungen des Meeresspiegelniveaus und der Karbonatproduktion auf den heutigen Schelfgebieten von Guadeloupe und Martinique:

- Auf den südöstlichen Schelfgebieten von Guadeloupe wurden zunächst detaillierte hydroakustische Vermessungen durchgeführt, die einen prominenten Schelfknick bei 60-80 m Wassertiefe erkennen ließen. Sedimentkerne wurden an ausgewählten, sedimentgefüllten Channel-Strukturen entlang des Kontinentalhanges gewonnen. Zusätzlich zu den Kastengreiferprofilen auf den südöstlichen Schelfgebieten von Guadeloupe wurden entsprechende Probenserien auf der Banc Colombie, einer abgesunkenen Karbonatplattform, gewonnen. Die stark lithifizierte Sedimente erbrachten eine Vielzahl von Skeletten benthischer Organismen einschließlich großer Korallen. Tauchgänge mit dem Forschungstauchboot JAGO erbrachten Einblicke in das *insitu* Sedimentationsgeschehen.
- Tauchgänge auf den südlichen Schelfen von Guadeloupe südöstlich der Iles de Petite Terre zeigten den Schelfknick bei ca. 70-90 m Wassertiefe. Ein nahezu vertikales Kliff schließt sich darunter bis ca. 150 m Wassertiefe an. Die Taucharbeiten zeigten ausgeprägte Karsterscheinungen sowie die Präsenz von Sklerospongien bis in diese Wassertiefe.
- Die hydroakustischen Vermessungen wurden auf den nördlichen Schelfen von Martinique fortgeführt, um Lokationen für die Kastengreifer- und Kolbenlotbeprobungen zu erhalten. Der Geräteeinsatz erbrachte nur geringe Kernlängen aufgrund der starken Karbonatzementierung, jedoch wurde erstmalig eine abgesunkene Karbonatbank im Bereich der Kleinen Antillen beprobt. CTD-Einsätze ergänzten das Programm.

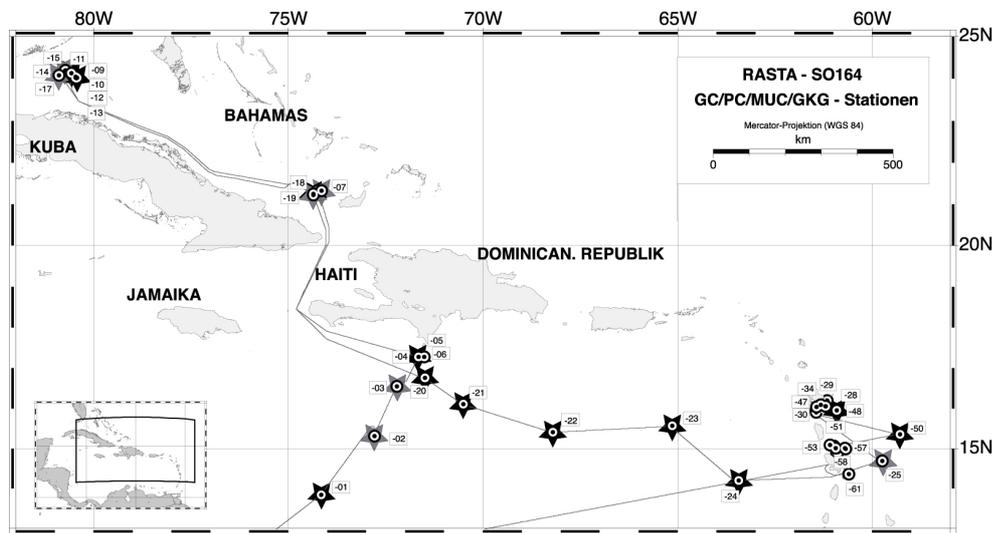


Abbildung 1. Fahrtroute der FS *SONNE* SO164 Expedition mit eingezeichneten Stationen. Schwarze Sterne markieren Stationen, an denen Sedimentoberflächenproben bearbeitet wurden. An mit grauen Sternen gekennzeichneten Stationen wurden neben den Sedimentoberflächen auch Sedimentkerne bearbeitet. Zusätzlich wurden Wasseranalysen an den CTD/Wasserkranzschöpfer-Stationen SO164-01-1, -07-2 und -08-2 durchgeführt.

Im Rahmen des Teilprojektes 02 erfolgte die

- Beprobung eines SW-NE-verlaufenden Tiefentranssektes vom Columbian Becken auf den Beata Rücken: Hier wurden Sediment-Oberflächenproben und Sedimentkerne aus ca. 300-4000 m Wassertiefe gewonnen. Dieses Profil diente dazu, räumliche Lücken zwischen bereits vorliegenden Sedimentkernen zu schließen. Die

Oberflächenproben dienen weiterhin dazu, bestehende Mg/Ca-Kalibrationen zu erweitern. Der große Wassertiefenbereich ermöglicht zudem verbesserte Abschätzungen zum Einfluss der Karbonatlösung im Bereich der Karibik. Gleichzeitig erstellte CTD/Rosetten- (und teilweise Fluorometer-) Profile erlauben die heutige, sommerliche Wassermassensignatur zu charakterisieren.

- Beprobung eines W-E-verlaufenden Tiefentranssektes vom Beata Rücken in das Venezuela Becken. Aus Wassertiefen von 1540-4500 m wurden Sediment-Oberflächenproben und Sedimentkerne gewonnen. An allen Stationen erfolgten CTD/Rosetten- (und teilweise Fluorometer-) Einsätze.
- Beprobung eines W-E-verlaufenden Tiefenprofils vom Antillenbogen in den tiefen Atlantik, das mit der Gewinnung von 5 bis zu 20 m langen Schwerelotkernen einen Wassertiefenbereich von 1000-4000 m abdeckte. Zusätzlich erfolgte die Beprobung mit Großkastengreifer sowie die Beprobung der Wassersäule mit CTD/Rosetten-Einsätzen.

Flankierend zu RASTA Teilprojekt 02 wurde ein DFG-Projekt durchgeführt, das die Arbeiten sinnvoll ergänzte. Es wurden zwei lange Sedimentkerne (ca. 48 m und 34 m) aus dem nördlichen Golf von Mexico (DeSoto Canyon) und ein ca. 32 m langer Sedimentkern aus der südlichen Florida-Straße im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten IMAGES Projektes (Nu60/8-1, Nürnberg, D. & Schönfeld, J.: "Short-term changes in seasurface temperature in the West Atlantic Warm Pool – Gulf of Mexico, IMAGES VII", 2002) gewonnen, die zeitlich hochauflösende Rekonstruktionen ermöglichen (http://gef.dfg.de/gepinter_doku_bin/doku-client.py?dok=215920&lang=de).

Fortführung der Untersuchungen an Sedimentmaterial und in der Wassersäule

Die Untersuchungen innerhalb von RASTA konzentrierten sich auf die gewonnenen Oberflächensedimentproben (0-1 cm) (Tab. 1), wurden aber ergänzt durch bereits vorliegendes Sedimentoberflächenprobenmaterial aus dem angrenzenden tropisch/subtropischen Atlantik (zur Verfügung gestellt von Dr. S. Mulitza, GeoB, Univ. Bremen). Aus den zum Teil AMS¹⁴C-datierten Oberflächensedimentproben aus Wassertiefen zwischen 1000 m und 4500 m wurden bis zu 10 planktonische Foraminiferenarten ausgelesen und kombinierte ¹⁸O und Mg/Ca-Analysen durchgeführt.

Die Wassersäule wurde mittels Wasserschöpfer beprobt. An drei ausgewählten CTD/Rosettenstationen (CTD SO164-01 Kolumbien Becken, SO164-07 Bahamas, SO164-08 Florida-Straße) wurden 67 ICP-OES-Elementanalysen mit der ICO-OES durchgeführt (Mg, Ca, Na, Sr, Ba).

Tabelle 1. Bearbeite Sedimentoberflächenproben und daran durchgeführte Analysen im Rahmen von RASTA

Probe	Breite [°N]	Länge [°W]	Wassertiefe [m]	Stabile Isotope in Kerntiefe	Spurenelemente in Kerntiefe	XRD in Kerntiefe	AMS ¹⁴ C-Alter Globigerinoides ruber w.
SO164-01-3	13.84° N	74.16° W	4026	0-1	0-1		
SO164-02-3	15.31° N	72.78° W	2977	0-1	0-1		1865 +/- 55 BP
SO164-03-3	16.54° N	72.21° W	2744	0-1	0-1		
SO164-04-2	17.27° N	71.65° W	1013	0-1	0-1		
SO164-07-3	21.32° N	74.15° W	2722	0-1	0-1		225 +/- 85 BP
SO164-18-1	21.23° N	74.35° W	1629	0-1	0-1		735 +/- 65 BP
SO164-19-3	21.25° N	74.35° W	1706	0-1	0-1		>1954 AD (Bomben ¹⁴ C)
SO164-20-2	16.76° N	71.49° W	3357	0-1	0-1		
SO164-21-3	16.10° N	70.50° W	3995	0-1	0-1		
SO164-22-2	15.40° N	68.20° W	4506	0-1	0-1		
SO164-23-3	15.57° N	65.14° W	4328	0-1	0-1		
SO164-24-3	14.20° N	63.42° W	1545	0-1	0-1		
SO164-25-3	14.69° N	59.74° W	2720	0-1	0-1		1450 +/- 70 BP
SO164-48-2	15.95° N	60.92° W	1286	0-1	0-1		
SO164-50-3	15.35° N	59.28° W	4002	0-1	0-1		
SO164-02-4	15.31° N	72.78° W	2985	3-148	3-148		
SO164-03-4	16.54° N	72.21° W	2745	2-131	2-131		
SO164-07-4	21.32° N	74.15° W	2722	3-963	3-963	3-1123	
SO164-19-2	21.25° N	74.35° W	1704	5-690	5-690	5-685	

Tabelle 2: Bearbeitete Sedimentkerne und daran durchgeführte Analysen im Rahmen von RASTA

Kern Nr.	>63 µm	XRD Gesamtsediment	Korngrößen	Zählungen <i>G. menardii</i>	Planktonisotopen	Mg/Ca	Benthos-isotopen
SO164-02-4	20	-	-	20	30	30	
SO164-03-4	36	-	-	-	36	13	13
SO164-07-4	344	224	239	-	149	141	
SO164-19-2	32,	136	134	129	137	290	

Insgesamt wurden vier Sedimentkerne aus Wassertiefen von 1700-3000 m bearbeitet (Abb. 1, Tab. 1, Tab. 2). Die Chronostratigraphie wurde mit Plankton- und Benthosisotopen etabliert und im jüngsten Teil mit AMS¹⁴C Datierungen abgesichert. ¹⁸O- und Mg/Ca-Proxy-Datenserien wurden für den Zeitraum der letzten ca. 280.000 Jahre erstellt.

Pilotstudie GOLDFLOSS

Durchführung von Expeditionen

Unsere Untersuchungen konzentrieren sich im Rahmen der SO164-Expedition auf den NW-Hang der Cay Sal Bank, die im direkten Einwirkungsbereich Florida Stroms liegt (Abb. 1). Hier wurde die Topographie und Verbreitung der jüngsten Sedimentfolgen mit Fächer- und Sedimentecholot erkundet und danach 9 Oberflächenproben mit dem Grosskastengreifer und 2 Sedimentkerne mit dem Kolbenlot genommen [Nürnberg et al., 2003]. Zusätzlich erhielten wir Multicorer-Oberflächenproben und Proben aus einem Sedimentkern von der R/V "Knorr" – Fahrt KNR166-1, die im Januar 2002 ebenfalls die Florida-Straße zum Ziel hatte. Die KNR166 - Oberflächenproben decken zwei Tiefenprofile vor den Dry Tortugas und der großen Bahamabank ab. Diese Profile liegen ausserhalb des Florida-Stroms und ergänzen damit unsere SO164-Probenserie von der Cay Sal Bank.

Fortführung der Untersuchungen an Sedimentmaterial

An den Oberflächenproben wurden lebende und tote Benthosforaminiferen-Gemeinschaften untersucht, die Korngrößenverteilung und die Komponentenzusammensetzung der Grobfraktion bestimmt (Tab. 3). Die Sedimentkerne wurden biostratigraphisch eingestuft. Die Chronostratigraphie wurde mit Plankton- und Benthosisotopen etabliert und im jüngsten Teil mit AMS¹⁴C Datierungen abgesichert.

Tabelle 3: Bis Projektende durchgeführte Analysen an Oberflächensediment-Proben aus der Florida-Straße im Rahmen von GOLDFLOS.

Probe Nr.	durchgeführte Analysen								
	Physical properties	>63 µm	C _{org} und CaCO ₃	Korngrößen	Grobfraktionsanalysen	Planktonisotopen	Mg/Ca	Benthosisotopen	Benthosforaminiferenzählungen
SO16409-2								X*	X
SO16410-1	X	X	X	X	X			X*	X
SO16411-1									X
SO16412-1	X	X	X	X	X				X
SO16413-1	X	X	X	X	X			X*	X
SO16414-1	X	X	X	X	X			X*	X
SO16415-1	X	X	X	X	X				X
SO16416-1	X	X	X	X	X	X	X	X*	X
SO16417-1	X	X	X	X	X	X	X		X
KNR166-2-3								X*	X
KNR166-2-5								X*	X
KNR166-2-11								X*	X
KNR166-2-13									X
KNR166-2-19									X
KNR166-2-22								X*	X
KNR166-2-24								X*	X
KNR166-2-28									X
KNR166-2-50								X*	X
KNR166-2-55									X
KNR166-2-62									X
KNR166-2-64									X
KNR166-2-66								X*	X
KNR166-2-72								X*	X
KNR166-2-84								X*	X
KNR166-2-89								X*	X
KNR166-2-92									X
KNR166-2-94								X*	X
KNR166-2-97								X*	X
KNR166-2-99									X
KNR166-2-103									X
KNR166-2-118								X*	X
KNR166-2-110								X*	X
KNR166-2-115									X
KNR166-2-123								X*	X

Hochauflösende Proxy-Datenserien wurden für den letzten Glazial-Interglazial Zyklus (stabile Isotope an Planktonforaminiferen, Korngrößenverteilungen), das letzte Glazial, Deglazial und das Holozän erstellt (Benthosforaminiferen- Vergesellschaftungen, Korngrößenverteilungen, Mg/Ca an Planktonforaminiferen und Benthosisotope; Tab. 4). Mit diesen Daten, anderen Sedimentkernen, Oberflächenproben und hydrographischen Daten aus der südlichen Karibik und dem angrenzenden, subtropischen Atlantik wurde eine Paläosalinitätsformel entwickelt.

Tabelle 4: Bearbeitete Sedimentkerne und daran durchgeführte Analysen im Rahmen von GOLDFLOS

Kern Nr.	Physical properties	>63 μm	C_{org} und CaCO_3	Korngrößen	Grobfraktionsanalysen	Planktonisotopen	Mg/Ca	Benthosisotopen	AMS ¹⁴ C Datierungen	Benthosforaminiferenzählungen
SO16415-2	1	20	-	20	20	7	-	-	-	-
SO16416-1	34	34	-	34	-	34	27	20	11	25
SO16417-2	119	344	114	125	-	344	47	55	9	63
KNR166-2-JPC31	-	32, 121*	-	32	-	-	-	52*	4*	-

*Gruppe Lynch-Stieglitz, Atlanta, U.S.A. Es sind nur Laboranalysen berücksichtigt, an Bord durchgeführte Kernbeschreibungen, Logging- und Colourscan-Messserien sind hier nicht aufgeführt.

Präsentation wissenschaftlicher Ergebnisse: Symposia, Arbeitstreffen, Konferenzbeiträge

Erste Ergebnisse von RASTA und GOLDFLOS wurden bereits auf dem SONNE-Statusseminar im März 2003 in Hamburg vorgestellt. Desweiteren wurden unsere Arbeiten auf dem Herbsttreffen der American Geophysical Union im Dezember 2003 und 2004 in San Francisco (USA), auf den Frühjahrstagungen der Micropalaeontological Society im April 2003 in Kiel, auf dem Calcareous Plankton Spring Meeting im Mai 2004 in Kopenhagen (Dänemark), sowie während der internationalen Tagung "Earth Sciences into the 3. millenium: Methods, materials, mechanisms" im September 2003 in Bochum präsentiert. Anlässlich der EGS-AGU-EUG Joint Assembly in Nizza (Frankreich) wurde im April 2003 ein Arbeitstreffen mit Jean Lynch-Stieglitz, Atlanta, und Benjamin Flower, St. Petersburg, U.S.A., abgehalten, auf dem der Arbeitsstand der Gruppen diskutiert, und die weitere Untersuchungsstrategie festgelegt wurde. Präsentationen erfolgten ebenfalls ein Jahr später während der EGU-Tagung (2004) in Nizza.

Als wichtiger Meilenstein erwies sich die 8th International Conference on Palaeoceanography im September 2004 in Biarritz (Frankreich), auf der RASTA-Ergebnisse zur Mg/Ca-Paläothermometrie im Rahmen von Vorträgen und Postern während eines Mg/Ca-Workshops vorgestellt wurden. Erstmals wurden zudem die vollständigen GOLDFLOS-Datensätze und eine konsistente, unter den Gruppen abgestimmte Interpretation der Ergebnisse mit insgesamt vier Postern und einem Übersichtsvortrag präsentiert.

I.4 Wissenschaftlich-technischer Stand zu Beginn des Projektes

RASTA

Die Karibik als Teil des W-Atlantischen Wärmewasserspeichers (hier: W-Atlantischer Warmpool) ist durch aussergewöhnlich hohe Oberflächentemperaturen gekennzeichnet. Sie sind verantwortlich für den tropischen Wärme- und Feuchtetransport in die Atmosphäre und deren Rückkopplungseffekte (atmosphärische Zirkulation, Wolkenbildung, Treibhauseffekt, temperaturgesteuerte CO_2 -Aufnahme) [Tomczak and Godfrey, 1994]. Der W-Atlantische Warmpool ist die Quellregion des Golf-Stromes, der als nordwärts fließender "Western Boundary Current" die Wärme- und Salinitätssignatur des W-Atlantischen Warmpools bis weit in den nördlichen N-Atlantik trägt. Die Dynamik und Variabilität des W-Atlantischen Warmpools ist in den Sedimenten der Karibik gut dokumentiert. Bisherige Arbeiten konzentrierten sich überwiegend auf den Einfluss der geologischen/plattentektonischen Entwicklung der mittelamerikanischen Landbrücke auf die atlantische Wassermassenzirkulation und das globale Klimageschehen [u.a. Haug und Tiedemann, 1998]. Die Entdeckung rascher Klimawechsel während der letzten Glazialzeiten in den grönländischen und antarktischen Eisarchiven [Bender et al., 1994; Blunier et al., 1998] und im N-Atlantik (u.a. Broecker und Denton, 1989; Bond et al., 1993), hat den paläozeanographischen Fokus auf die kurzskalige Veränderlichkeit des tropischen Atlantiks gelenkt [u.a. Curry und Oppo, 1997]. Die Steuerungsmechanismen dieser Dansgaard-Oeschger Zyklen sind weitgehend ungeklärt, doch gibt es verschiedene Erklärungsansätze [u.a. Cane und Molnar, 1999; Ganopolski et al., 1998; Ganopolski und Rahmstorf, 2001; van Krefeld et al., 2000]. Änderungen der thermohalinen Zirkulation im Atlantik werden als ein bedeutsamer Steuerungsprozess angesehen [z.B. Elliot et al., 2001]. Sowohl McIntyre and Molfino [1996] als auch Rühlemann et al. [1999] zeigten, dass die Wärmeabgabe vom W-Atlantischen Warmpool in entscheidender Weise die Temperaturentwicklung in hohen nördlichen Breiten des N-Atlantiks beeinflusste. Die treibende Rolle der Tropen für die Klimasteuerung wurde ebenfalls von Bard et al. [1997], Lea et al. [2000] und Visser et al. [2003] aufgrund beobachteter zeitlicher Versätze zwischen der ozeanischen Oberflächentemperatur (Alkenon- und Mg/Ca-Temperaturproxy-Rekonstruktionen) und den stabilen Sauerstoffisotopen planktischer Foraminiferen postuliert.

Die Dokumentation rascher Klimawechsel in der zentralen Karibik war zu Beginn des Projektes noch sehr unvollständig [u.a. Hüls, 2000]. Allerdings war das Potential der Karibik deutlich als räumlich eng begrenztes

Meeresgebiet die ursächlichen Beziehungen zwischen globalen Klimaveränderungen, Meeresspiegelniveau, der Meeresoberflächentemperatur und -salinität, der tieferen Hydrographie und den sich verändernden marinen Mikrofaunenzusammensetzungen aufzulösen. Neben den paläozeanographischen Untersuchungen wurde der Fortentwicklung der Mg/Ca-Paläothermometrie ein großer Raum eingeräumt, da zu Beginn des Projektes nur vereinzelte Mg/Ca-Daten aus dem karibischen Raum vorlagen [Hastings *et al.*, 1998].

GOLDFLOS

Der Golfstrom beeinflusst als "Warmwasserheizung Europas" in entscheidendem Maße das gegenwärtige Klimageschehen in Mittel- und Nordeuropa. In der nördlichen Florida-Straße ist der Florida- und Golfstrom im Rahmen des STACS-Programms detailliert untersucht worden [Molinari *et al.*, 1985]. Das Hauptergebnis dieser Studien war eine Ermittlung des Volumen- und Wärmetransports im Golfstrom und seiner kurz- und langfristigen Variabilität [Lamb, 1981; Molinari *et al.*, 1985a; Schott und Zantop, 1985; Larsen, 1992]. In der südlichen Florida-Straße ist die gegenwärtige Ozeanographie und das Strömungsprofil des Florida-Stroms nur durch ältere Arbeiten dokumentiert [Wüst, 1924; Richardson *et al.*, 1969].

Die junge Sedimentbedeckung ist in der nördlichen Florida-Straße lückenhaft und besteht aus dünnen, oft umgelagerten Foraminiferen- und Pteropodensanden über Festgesteinsausbissen [Mullins *et al.*, 1980; Gardner *et al.*, 1989; Messing *et al.*, 1990]. In der südlichen Florida-Straße variieren die Sedimente von Pteropodensanden im Osten bis zu pelagischen Karbonatschlämmen im Trogzentrum, wo sich auch sandreiche Karbonatbänke einschalten. Holozäne und glaziale Sedimentationsraten variieren zwischen 0,9 und 9 cm pro tausend Jahre [Brunner, 1986].

Zur Berechnung von Transportraten ist die Strömungsgeschwindigkeit ein wichtiger Basisparameter. Mit Standardverfahren können Strömungen nur an einzelnen Stationen und als zeitlich begrenzte Messreihen oder zwischen Dichteprofilen als momentane geostrophische Geschwindigkeit bestimmt werden. Ein neuer, indirekter Strömungsindikator auf der Basis von epibenthischen Foraminiferen zeigt die rezente Strömungseinwirkung am Meeresboden an, und er ist auch zur Rekonstruktion von Paläoströmungen an fossilen Ablagerungen anwendbar [Schönfeld, 1997, 1998, 2002; Schönfeld und Zahn, 1998]. Dieser Proxy ist bislang nur im Nordost-Atlantik kalibriert und angewendet worden. Darüber hinaus bietet die Granulometrie der Sedimente Hinweise auf die Intensität von Bodenströmungen. Hier wird vor allem auf den Mean Sortable Silt abgezielt, der mit zunehmender Geschwindigkeit gröber wird (McCave *et al.*, 1995).

I.5 Zusammenarbeit mit Dritten

Inländische Kooperationspartner außerhalb des Vorhabens:

Bijma, J., Prof. Dr. (Univ. Bremen; Proxy-Forschung)
 Eisenhauer, A., Prof. Dr. (IFM-GEOMAR, Kiel; Geochemie)
 Freiwald, A., Prof. Dr. (Univ. Erlangen; Sedimentologie, Makrofauna)
 Garbe-Schönberg, D., Dr. (Institut für Geowissenschaften Kiel; Geochemie)
 Grootes, P.M., Prof. Dr. (Leibniz Inst. für Altersbestimmung u. Isotopenforschung, Kiel AMS¹⁴C Datierungen)
 Haug, G., Prof. Dr. (GeoForschungsZentrum Potsdam; Klimageschichte der Karibik)
 Holbourn, A., Dr. (Institut für Geowissenschaften Kiel; Foraminiferen-Taxonomie und Ökologie)
 Lochte, K., Prof. Dr. (IFM-GEOMAR, Kiel; biologische Ozeanographie, Planktologie)
 Mills, M., Dr. (IFM-GEOMAR, Kiel; Ozeanographie)
 Mulitza, S., Dr. (FB5-Geowissenschaften der Universität Bremen; stabile Isotope, Planktonforaminiferen)
 Mutti, M., Prof. Dr. (Geologisches Institut der Universität Potsdam; Sedimentologie)
 Reijmer, J., PD Dr. (IFM-GEOMAR Kiel; Karbonatsedimentologie)
 Tiedemann, R., Dr. (IFM-GEOMAR Kiel; stabile Isotope, Paläozeanographie)
 Weinelt, M., PD Dr. (Institut für Geowissenschaften Kiel; Paläozeanographie, Isotopenstratigraphie)
 Westphal, H., Dr. (Univ. Erlangen; Karbonatsedimentologie)

Ausländische Kooperationspartner außerhalb des Vorhabens:

Camoin, G., Dr. (CEREGE, Aix en Provence, Frankreich)
 Curry, B., Dr. (Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts, U.S.A.)
 Flower, B., Prof. Dr. (University of South Florida, St. Petersburg, U.S.A.)
 Hippler, D., Dr. (Univ. Bern, Schweiz)
 LeGrande, A. (Columbia University, New York, U.S.A.)
 Lynch-Stieglitz, J., Prof. Dr. (Georgia Technical University, Atlanta, U.S.A.)
 Marchitto, T., Prof. Dr. (University of Colorado, Boulder, U.S.A.)
 Nägler, Th., Dr. (Univ. Bern, Schweiz)
 Ostermann, D., (Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts, U.S.A.)
 Schmidt, M., Dr. (University of California, Davis, U.S.A.)
 Schubert, C., Dr. (EAWAG Limnological Research Center, Kastanienbaum, Schweiz)
 Zahn, R., Prof. Dr. (Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats, Bellaterra, Spanien)

I.6 Literatur

Siehe Gesamtliteraturliste in Kapitel II.4.

II. Wissenschaftliche Ergebnisse

Untersuchungen zur Umverteilung der Wärme im tropischen Atlantik während kurzfristiger Änderungen der thermohalinen Zirkulation

(Abbildung 2)

Ein Ziel unserer Untersuchungen auf der atlantischen Seite des Antillenbogens war die hochauflösende Rekonstruktion der Wassertemperaturen im Zwischentiefenbereich während kurzfristiger Klimaeinbrüche im Nordatlantik. Die mit einer starken Reduzierung der thermohalinen Zirkulation einhergehenden Zwischenwassererwärmungen wurden bereits in mehreren Experimenten mit Zirkulationsmodellen beobachtet (Zusammenfassung von Stocker in *Science* 282, 61-62, 1998) und konnten von uns erstmalig auch in geologischen Befunden bestätigt werden [Rühlemann *et al.*, 2003, 2004]. Mit einem hybrid gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modell konnten wir zunächst zeigen, dass ein erhöhter Einstrom von Süßwasser in den Nordatlantik sowohl unter heutigen als auch unter glazialen Klimabedingungen zu einer starken Erwärmung des Thermoklinen- und Zwischenwasserbereichs um bis zu 4°C im tropisch-subtropischen Atlantik führt (Abb. 2 a und 2b, links). Die hochauflösende Untersuchung von zwei Sedimentkernen aus dem Bereich der südlichen Karibik (M35003-4) und dem Kontinentalhang vor Angola (ODP 1078C) ergab für das Heinrich-Ereignis H1 und die Jüngere Dryas (YD), zwei Perioden in denen die thermohaline Zirkulation des Atlantiks vermutlich aufgrund von Süßwasser-Eintrag in die hohen Breiten des Nordatlantiks stark reduziert war (Abb. 2b und 2c, rechts), deutliche, abrupte Erwärmungen des Zwischenwassers (Abb. 2d und 2e, rechts).

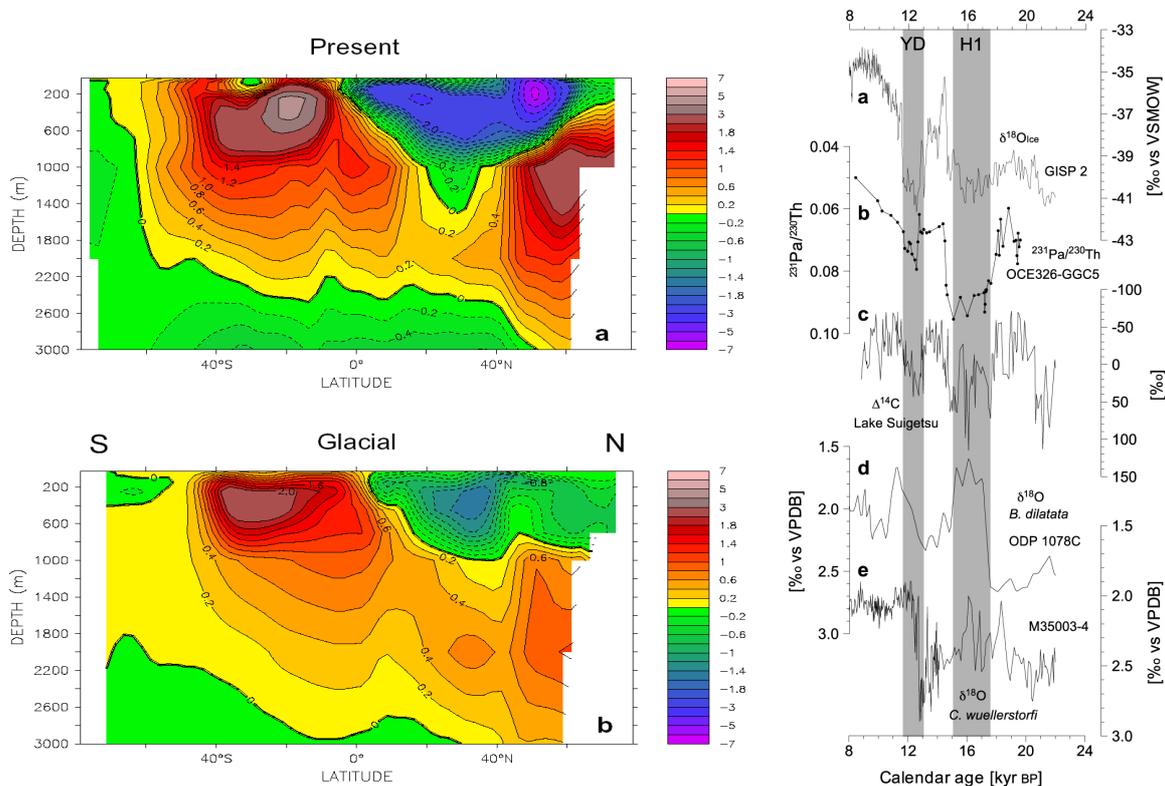


Abbildung 2. Links: Das Profil durch den Atlantik zeigt die zonal gemittelte Änderung der Temperatur nach einem Schmelzwassereintrag von 0.15 Sv über 500 Jahre in den Nordatlantik simuliert mit einem Atmosphäre-Ozean-Modell für (a) heutige und (b) glaziale Klimarandbedingungen. Das Intervall der Isolinien beträgt 0.2°C zwischen -2°C and +2°C und 1°C für größere Anomalien [Rühlemann *et al.*, 2004]. Rechts: Vergleich der Sauerstoffisotopen-Verhältnisse der (d) benthischen Foraminiferen *Bolivina dilatata* [Rühlemann *et al.*, 2004] und (e) *Cibicoides wuellerstorfi* [Hüls, 2000] der Sedimentkerne ODP 1078C (11°55' S, 13°24' E; 426 m Wassertiefe) und M35003-4 (12°05' N, 61°15' W; 1299 m Wassertiefe) mit den (a) Sauerstoffisotopen des GISP 2-Eiskerns [Stuiver und Grootes, 2000], (b) dem ²³¹Pa/²³⁰Th-Verhältnis des Kerns OCE 326-GGC5 aus dem Nordatlantik [McManus *et al.*, 2004] und (c) der atmosphärischen Radiokohlenstoff-Konzentration bestimmt aus Sedimenten des Suigetsu-Sees in Japan [Kitagawa *et al.*, 2000; nach Clark *et al.*, 2002]. Variationen im ²³¹Pa/²³⁰Th-Verhältnis und dem Δ¹⁴C werden durch Änderungen in der Rate der Tiefenwasserbildung im Nordatlantik hervorgerufen. Die grauen Balken bezeichnen die Perioden der Jüngeren Dryas (YD) und des Heinrich-Ereignisses H1 [Rühlemann *et al.*, 2004].

Zur Rekonstruktion der Zwischenwasser-Temperaturen haben wir die für den deglazialen Eiseffekt korrigierten Sauerstoffisotopen-Zusammensetzungen der benthischen Foraminiferen *Bolivina dilatata* und *Cibicides wuellerstorfi* verwendet. Die Änderungen des ^{18}O -Signals zu Beginn der YD und des H1 entsprechen Temperaturzunahmen von 1-4°C, in Übereinstimmung mit den Modellergebnissen. Die Rate der Temperaturzunahme liegt bei 0,7 bis 0,8°C pro Jahrhundert. Dieser Zusammenhang zwischen der Ventilationsrate des Tiefenwassers und der Temperatur des tropischen Zwischenwasserbereichs könnte auch für den Nachweis einer heutigen oder zukünftigen Änderungen der thermohalinen Zirkulation relevant sein. Ein vorrangiges Ziel verschiedener Klimaforschungs-Programme ist die Entwicklung geeigneter Überwachungsstrategien der Variabilität des Klimas und der thermohalinen Zirkulation. Wir schlagen deshalb vor, langfristige Temperatur-Messreihen des tropischen Zwischenwassers im Atlantik als einen integrativen Indikator der Ventilationsrate in ein Monitoring-System aufzunehmen.

Globale Kalibrierung der Alkenonmethode zur Temperaturrekonstruktion anhand von partikulärem Material des Oberflächenwassers

(Abbildung 3)

Die Temperatur des Wassers ist einer der wichtigsten Basisparameter, der in der Ozeanographie gemessen wird, da sie gemeinsam mit dem Salzgehalt die Dichte des Wassers bestimmt. Für die paläozeanographische Rekonstruktion der Oberflächenwasser-Temperaturen, die in besonderem Maß als Randbedingung für Modellexperimente von Bedeutung ist, steht eine Reihe von Proxyindikatoren zur Verfügung. Neben dem Mg/Ca-Verhältnis von planktonischen Foraminiferen ist die Alkenon-Paläothermometrie (U^{K}_{37} -Index) eine häufig eingesetzte Methode. Die bisher verwendete Kalibrierung des U^{K}_{37} -Index basiert auf Sedimentoberflächenproben, die anhand von Atlaswerten der Oberflächentemperaturen für die vergangenen ca. 50 Jahre geeicht wurden. Mögliche Fehlerquellen dieser Methode sind unter anderem lateraler Transport von Alkenon-tragenden Partikeln, unterschiedliche Zeiträume der miteinander verglichenen Atlas- und Alkenonwerte sowie saisonale Unterschiede in der Produktion von Algen. Deshalb ist es notwendig eine globale Kalibrierung der Alkenontemperatur-Methode mit partikulärem Material des Oberflächenwassers durchzuführen, weil so U^{K}_{37} Index und Produktionstemperatur der Alkenone direkt miteinander verglichen werden können.

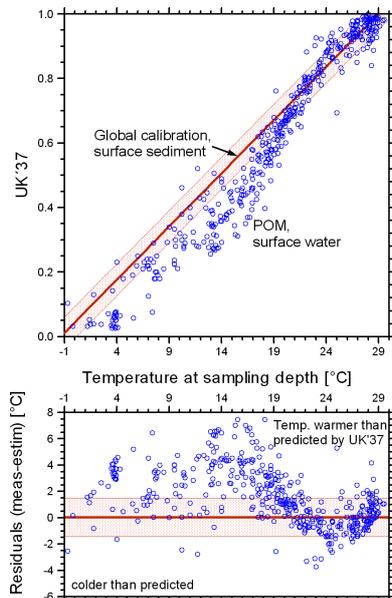


Abbildung 3. Oben: Beziehung zwischen U^{K}_{37} und Wassertemperatur in der Beprobungstiefe für gefilterte Proben des Oberflächenwassers (~5 m) aus dem Welt-ozean. Die fettgedruckte rote Linie zeigt die globale Kalibrierung anhand von Sedimentoberflächen nach Müller et al. [1998], die dünnen roten Linien entsprechen der 2σ Standardabweichung dieses Datensatzes. Unten: Residuen (gemessene abzüglich der mit Hilfe der Müller-Beziehung ermittelten Temperaturen) der Filterproben gegen die Temperatur in der Beprobungstiefe. Die globale "core top"-Kalibrierung von Müller et al. [1998] basiert auf 521 Daten von Lokationen zwischen 60°N und 60°S, der Datensatz aus dem Oberflächenwasser umfasst 450 Filterproben, die zwischen 77°N und 61°S entnommen wurden.

Für eine solche Kalibrierung, die den gesamten Temperaturbereich des Ozean von -1 bis 30°C abdecken muss, fehlten bislang jedoch Proben aus dem tropischen Ozean [Sicre et al., 2002]. Diese Lücke konnten wir mit einer Beprobung des westlichen tropischen Atlantiks schließen (Abb. 3). Eine neue globale Kalibrierung, in die auf der SO164-Expedition gewonnene Proben eingeflossen sind, zeigt nun, dass das aus Sedimentoberflächen stammende Alkenonsignal durch Abbauprozesse und vor allem durch saisonale Produktion in den hohen Breiten signifikant beeinflusst wird [Conte et al., 2004]. Anstatt einer linearen Beziehung, wie sie aus den Sedimentoberflächen abgeleitet wurde [Müller et al., 1998], ergibt sich aus der neuen Kalibrierung ein nicht-linearer Zusammenhang zwischen U^{K}_{37} und Temperatur. Die "core top"-Kalibrierung führt demnach in den gemäßigten bis subpolaren Breiten zu 2-3°C zu hohen Temperaturen.

Verbesserung der Mg/Ca-Paläothermometrie anhand von karibischen Sedimentoberflächenproben

(Abbildungen 4-13)

Die Bestimmung absoluter Paläotemperaturen aus verschiedenen Tiefenstockwerken des Ozeans ist grundlegend für die Rekonstruktion und Modellierung von Salinitäts- und Dichteverteilungen, der Stratifizierung in der Wassersäule, Strömungsmustern der thermohalinen Zirkulation und globaler Eisvolumina durch die Zeit. Mg/Ca-Verhältnisse in Gehäusen planktonischer Foraminiferen sind ein geeignetes und häufig eingesetztes Paläothermometer [Nürnberg, 2000], wobei die Randbedingungen der Proxy-Bildung weiterhin besser eingegrenzt werden müssen. Überzeugender Vorteil einer kombinierten Messung von Mg/Ca Verhältnissen und den stabilen Sauerstoffisotopen in der gleichen biogenen Phase ist, dass Habitat- und Vitaleffekte ausgeschlossen werden können [Nürnberg, 2000].

Der temperaturgesteuerte Einbau von Mg in den Gehäusecalcit planktonischer Foraminiferen ist weitgehend belegt, und es existieren derzeit verschiedene artspezifische Kalibrationen [Nürnberg et al., 1996a, b; Lea et al., 1999; Mashiotta et al., 1999; Lea et al., 2000; Nürnberg et al., 2000; Dekens et al., 2002; Rosenthal und Lohmann, 2002; Whitko et al., 2002; McKenna und Prell, 2004] und Multispezies-Kalibrationen [Elderfield and Ganssen, 2000; Anand et al., 2003], um Paläotemperaturen zu bestimmen. Die Genauigkeit der Paläotemperaturbestimmung wird mit 0.2-1.2° C angegeben [Nürnberg, 1995; Nürnberg et al., 1996a; Hastings et al., 1998; Elderfield und Ganssen, 2000; Nürnberg et al., 2000; Lea et al., 2000; Dekens et al., 2002; Anand et al., 2003]. Die strikte Mg/Ca versus Temperatur-Beziehung wird jedoch von physiologischen, physikalischen und geochemischen Prozessen zusätzlich beeinflusst, deren Bedeutung für die Mg/Ca-Paläothermometrie besser eingeschätzt werden muss.

Hierzu wurden die Mg/Ca-Verhältnisse und stabilen Sauerstoffisotopenverhältnisse in Gehäusen von 9 verschiedenen planktonischen Foraminiferenarten untersucht. Das Probenmaterial stammt von 15 Sedimentoberflächenproben (0-1 cm) aus der östlichen Karibik und dem angrenzenden W-Atlantik [Nürnberg et al., 2003] (Abb. 4). Die Sedimentoberflächenproben decken einen Wassertiefenbereich von 1000-4500 m ab und erweitern damit ältere, publizierte Datensätze (>2500 m) weit in die flachen Bereiche hinein. Der geringe laterale Temperaturgradient im Arbeitsgebiet (0.6°C an der Oberfläche, 1.0°C in 100 m, 2.6°C in 200 m Wassertiefe) ist vorteilhaft, um bei weitgehend gleicher Temperatur andere, oftmals störende Mg/Ca-steuernde Faktoren herauszuarbeiten.

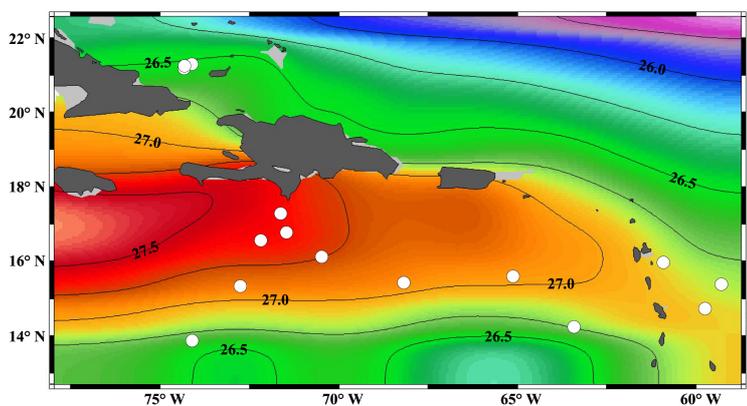


Abbildung 4. Temperaturverteilung (jährliches Mittel, 50 m Wassertiefe [WOA, 2001]) der östlichen Karibik und des angrenzenden W-Atlantiks. Die weißen Kreise markieren die bearbeiteten Oberflächenproben.

Neben den spinosen, in durchmischten, oberflächennahen Wassermassen lebenden Arten *Globigerinoides ruber* (getrennt nach roter (r.) und weißer (w.) Varietät) und *Globigerinoides sacculifer* (ausschließlich ohne die sackförmige Endkammer) wurden die nichtspinosen, in der Thermokline siedelnden Arten *Globorotalia menardii* und *Neogloboquadrina dutertrei*, und die unterhalb der Thermokline lebenden Arten *Globorotalia tumida* (Basis der photischen Zone), *Globorotalia truncatulinoides* (getrennt nach rechts- (d.) und linksgewundenen (s.) Individuen) und *Globorotalia crassaformis* gemessen (bei *Globorotalia scitula* nur ^{18}O). Die Foraminiferenexemplare wurden zur Vermeidung eines Größeneffektes bezüglich der Mg/Ca- und ^{18}O -Verhältnisse [Elderfield et al., 2002] aus der engen Fraktion 355-400 μm ausgelesen und nach dem Reinigungsverfahren von Barker et al. [2003] für die ICP OES-Analyse (Spectro Ciros CCD SOP, IfG Kiel) vorbereitet.

Mg/Ca Verhältnisse planktonischer Foraminiferen aus der Karibik im Vergleich zu stabilen Sauerstoffisotopen und Sr/Ca Verhältnissen

Die Mg/Ca-Verhältnisse der spinosen, flach lebenden Foraminiferenarten sind mit >5 mmol/mol am höchsten. Sie nehmen mit zunehmender Kalzifizierungstiefe der Foraminiferen in tieferen, kühleren Wassermassen sukzessive auf 2 mmol/mol ab und untermauern damit die Temperaturabhängigkeit des Mg-Einbaues (Abb. 5). Die Reihung der Foraminiferenarten entsprechend ihrer abnehmenden Mg/Ca-Verhältnisse mit zunehmender Wassertiefe entspricht ebenfalls der Lösungsanfälligkeit der Foraminiferen [Savin und Douglas, 1973; Bender et

al., 1975; Rosenthal und Boyle, 1993]. Die ^{18}O -Verhältnisse zeigen ebenfalls eine – mit Ausnahme von *G. menardii*– kontinuierliche Reihung zu schwereren ^{18}O -Verhältnissen mit zunehmender Kalzifizierungstiefe. Dagegen ist eine Veränderung der Sr/Ca-Werte mit zunehmender Kalzifizierungstiefe nicht zu beobachten. Die Sr/Ca-Verhältnisse bei flach-, intermediär- und tiefliebenden Arten variieren zwischen ~1.3-1.5 mmol/mol. Eine Beziehung zu den Sr-Konzentrationen karibischer Wassermassen (CTD-Stationen SO164-01-1, SO164-07-2, SO164-08-2) ist ebenfalls nicht zu belegen. Sie zeigen geringe Sr-Konzentrationen von ~91 $\mu\text{mol/l}$ in den oberen 50 m der Wassersäule und maximale Werte von ~94 $\mu\text{mol/l}$ in intermediären Tiefen von 150-250 m und damit eine typisch nicht-konservative, vermutlich durch Acantharien-Produktivität verursachte Sr-Verteilung [z.B. Brass und Turekian, 1972]. Die Möglichkeit, Änderungen im ozeanischen Sr-Budget über die Sr/Ca-Verhältnisse planktonischer Foraminiferen zu rekonstruieren, erscheint daher fraglich (siehe auch Elderfield et al. [2000]).

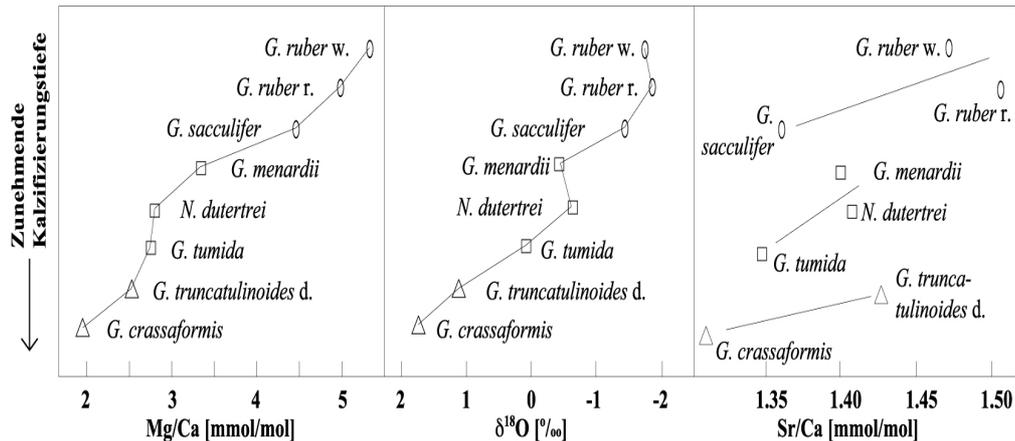


Abbildung 5. Gemittelte (lösungsunbeeinflusste) Mg/C-Verhältnisse (a), $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse (b) und Sr/Ca-Verhältnisse (c) planktonischer Foraminiferenarten aus den karibischen SO164 Oberflächensedimentproben aus Wassertiefen <2000 m.

Einfluss der Calcitlösung auf Mg/Ca-Verhältnisse in planktonischen Foraminiferen - Ein neues Korrekturverfahren zur Verbesserung der Mg/Ca-Paläothermometrie

Ein mit Hilfe der Oberflächensedimentproben erfasstes Problem ist die Veränderlichkeit von Mg/Ca-Verhältnissen in Foraminiferengehäusen mit zunehmender Calcitlösung. Die Mg/Ca-Verhältnisse aller untersuchten Foraminiferenarten bleiben in den obersten etwa 2000 m Wassertiefe trotz einer relativ großen Streubreite der Werte stabil (Abb. 6). Erst unterhalb dieses Stabilitätsbereichs ist eine Abnahme der Mg/Ca-Verhältnisse zu verzeichnen. Die Untergrenze des Stabilitätsbereichs ist artspezifisch unterschiedlich (s. u.). Unterhalb des Stabilitätsbereichs nehmen die Mg/Ca-Verhältnisse linear ab. Bei den flachenlebenden, spinosen Arten ist eine Mg/Ca-Abnahme um etwa 11-15 % zu verzeichnen (*G. ruber*, *G. sacculifer*). Bei den nichtspinosen, innerhalb der Thermokline lebenden Arten (*N. dutertrei*, *G. menardii*) liegt die Abnahme der Mg/Ca-Verhältnisse bereits bei 17-23 %, bei den unterhalb der Thermokline siedelnden Arten (*G. tumida*, *G. truncatulinoides*, *G. crassaformis*) 21-25 % (Tab. 5). Auffällig ist die einheitliche Abnahme bei den Arten der Gattung *Globorotalia*. Die ^{18}O -Werte der planktonischen Foraminiferenarten zeigen keine signifikante Veränderung mit zunehmender Wassertiefe. Sr/Ca-Verhältnisse zeigen eine Abnahme mit zunehmender Wassertiefe von maximal 4.5 % pro 1000 m ab einer Wassertiefe von ~2.500 m. Diese Abnahme ist etwas geringer als die Sr/Ca-Abnahme in benthischen Foraminiferen (*Cibicidoides wuellerstorfi*) [McCorkle et al., 1995].

Zur Korrektur des Calcitlösungseinflusses auf das Mg/Ca-Signal wurde zunächst davon ausgegangen, dass die Proben oberhalb 2000 m von Lösung unbeeinflusst sind. Für die tiefer liegenden, lösungsbeeinflussten Proben mit deutlich abnehmenden Mg/Ca-Verhältnissen gilt dann

$$\text{Mg/Ca}_{\text{gemessen}} + \text{Mg/Ca} = \text{Mg/Ca}_{\text{lösungskorrigiert}} \quad (1)$$

mit Mg/Ca als Differenz zwischen den originären, lösungsunbeeinflussten und den gemessenen Mg/Ca-Verhältnissen.

Wir nehmen weiterhin an, dass die Schnittpunkte der Mittelwertlinien, die sich aus den lösungsunbeeinflussten Proben (< ~2000 m Wassertiefe) errechnen, mit den Regressionsgeraden, die sich aus den Meßwerten > ~2000 m Wassertiefe ergeben, die Untergrenzen des Mg/Ca-Stabilitätsbereichs ergeben (Abb. 6). Um für Lösungseffekte zu korrigieren, wird mittels der bekannten Wassertiefen der Proben und den ermittelten Abnahmen von Mg/Ca (in %, siehe Tab. 5) der Mg/Ca-Anteil errechnet, der durch Lösung verloren wurde (Mg/Ca). Aus der Beziehung zwischen Mg/Ca und der Wassertiefe ergibt sich die lineare Regression

$$\text{Wassertiefe (m)} = a + b * \text{Mg/Ca} \quad (2)$$

mit a als Untergrenze des Mg/Ca-Stabilitätsbereichs in m (bzw. y-Achsenabschnitt) und b als Steigung (Tab. 5).

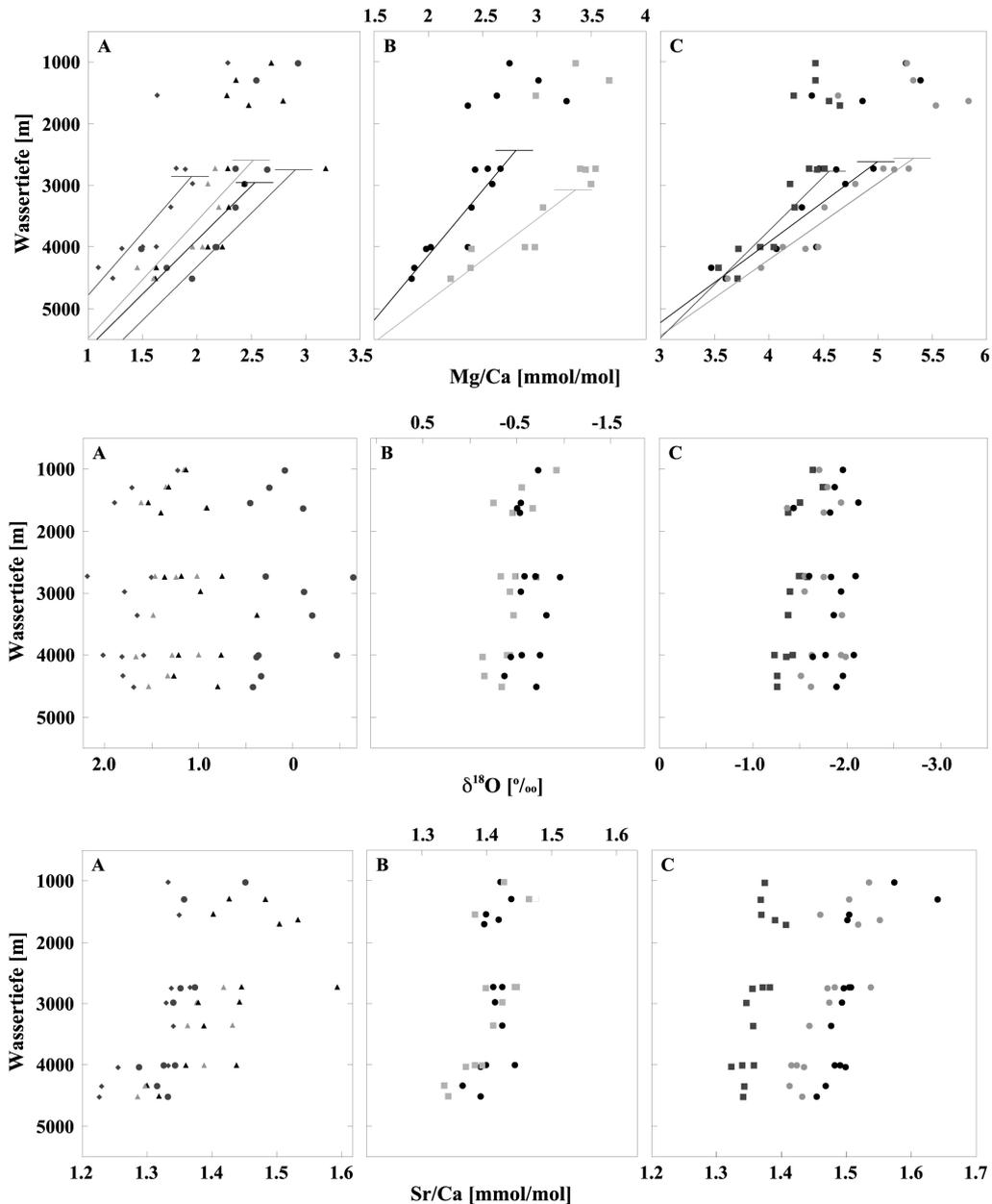


Abbildung 6. In planktonischen Foraminiferengehäusen gemessene Mg/Ca-, $\delta^{18}\text{O}$ - und Sr/Ca-Verhältnisse aus den karibischen RASTA-Oberflächenproben, die einen Wassertiefenbereich von ~1000-4500 m abdecken. A: Flachsiedelnde Foraminiferen *G. crassaformis* (dunkelgraue Rauten), *G. truncatulinoides sinistral* (hellgraue Dreiecke) und *dextral* (schwarze Dreiecke), *G. tumida* (dunkelgraue Kreise); B: Intermediäre Foraminiferenarten *G. menardii* (hellgraue Quadrate), *N. dutertrei* (schwarze Kreise); C: Tieflebende Foraminiferenarten *G. sacculifer* (dunkelgraue Quadrate), *G. ruber* rot (hellgraue Kreise) und weiß (schwarze Kreise). Mg/Ca-Verhältnisse der verschiedenen planktonischen Foraminiferenarten zeigen ab einem Wassertiefenbereich von etwa 2400-3000 m (waagerechte Linien) eine deutliche, teilweise artspezifische lineare Abnahme mit zunehmender Tiefe, die auf Calcitlösung zurückgeht. Oberhalb dieses Tiefenniveaus erscheint das Mg/Ca-Signal stabil. $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zeigen keine signifikante Veränderung mit zunehmender Wassertiefe. Sr/Ca-Verhältnisse zeigen eine Abnahme mit zunehmender Wassertiefe von maximal 4,5 % pro 1000 m ab einer Wassertiefe von ~2500 m.

Durch Einsetzen von Gleichung (1) in (2) ergibt sich die artspezifische Lösungskorrektur

$$\text{Mg/Ca}_{\text{lösungskorrigiert}} = \text{Mg/Ca}_{\text{gemessen}} + (\text{Wassertiefe [m]} - a) / b \quad (3).$$

Bei Anwendung der beschriebenen Lösungskorrektur, die nur bei Proben unterhalb der in Tab. 5 angegebenen artspezifischen Stabilitätsbereiche angewandt wird, reduziert sich die Variabilität der Mg/Ca-Verhältnisse bei den spinosen, in der durchmischten Zone lebenden Foraminiferen um bis zu 54 %, bei den Thermoklinenarten um bis zu 49 % und bei den unterhalb der Thermokline lebenden Arten um bis zu 35 % (Abb. 7, Tab. 5).

Tabelle 5. Auflistung der analysierten planktonischen Foraminiferenarten aus den karibischen Oberflächenproben sowie Anzahl der analysierten Proben. Der artspezifische Stabilitätsbereich a für Mg/Ca bezieht sich unter Angabe der Steigung b und des Korrelationskoeffizienten auf Gleichung (3). Angegeben ist die Abnahme der intraspezifischen Mg/Ca-Variationen durch die Anwendung von Gleichung (3) auf die gemessenen Mg/Ca.

Art / Anzahl der Proben	Mg/Ca-Abnahme pro 1.000 m [%]	Stabilitätsbereich a von 0 - ... [m]	Korrekturfaktor b [m]	R^2	Abnahme der Variation [%]
<i>G. ruber</i> p. / 14	15	2555	1774	0.98	46
<i>G. ruber</i> w. / 15	15	2465	1730	0.98	46
<i>G. sacculifer</i> / 15	11	2686	2541	0.99	54
<i>N. dutertrei</i> / 15	17	2272	3169	0.97	34
<i>G. menardii</i> / 13	23	2937	1942	0.90	49
<i>G. tumida</i> / 11	25	2726	2085	0.96	33
<i>G. truncatulinoides</i> d. / 13	24	2825	2479	0.95	35
<i>G. truncatulinoides</i> s. / 7	21	2796	3096	0.96	15
<i>G. crassaformis</i> / 12	25	2731	3237	0.93	34

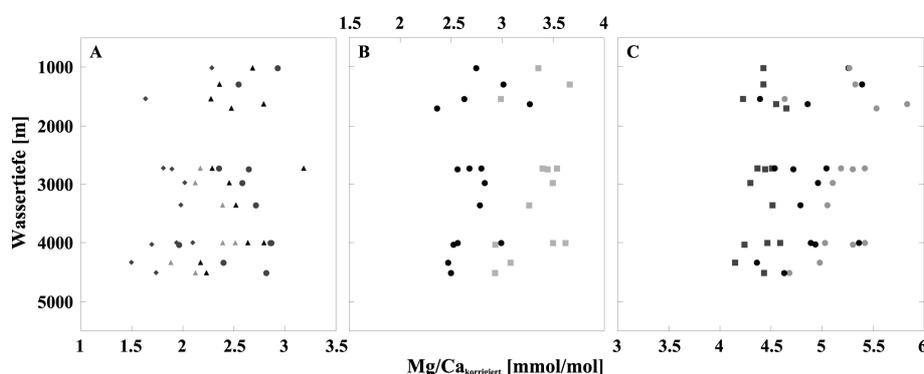


Abbildung 7. Lösungskorrigierte Mg/Ca-Verhältnisse zeigen im Vergleich zu den originären Daten (Abb. 6) die deutliche Abnahme der intraspezifischen Variabilität der Mg/Ca-Verhältnisse (Tab. 1). Legende wie Abb. 6.

Die kontinuierliche Abnahme der Mg/Ca-Verhältnisse mit zunehmender Wassertiefe wurde bereits vielfach beschrieben und quantifiziert. Dekens *et al.* [2002] berücksichtigten den Lösungseffekt und stellten artspezifisch korrigierte Mg/Ca vs. SST-Kalibrationen für *G. ruber* w., *G. sacculifer* und *N. dutertrei* auf. Rosenthal und Lohmann [2002] publizierten Korrekturverfahren für *G. ruber* und *G. sacculifer*, die auf der Größennormalisierung von Gehäusegewichten beruhen. Der Vorteil der von uns durchgeführten Untersuchung beruht auf der Tatsache, dass unsere Sedimentoberflächenproben einen bis dato nicht publizierten, großen Wassertiefenbereich von ca. 1000-4500 m in einem nahezu thermokonstanten Meeresgebiet abdecken. Diese lassen erkennen, dass das Mg/Ca-Signal in flachen Bereichen als stabiles Signal erhalten bleibt und dass selbst lösungsbeeinflusste Proben aus großen Wassertiefen mit einer einfachen Methode verlässlich korrigiert werden können.

Spätpleistozäne Mg/Ca-Anomalien - Hinweise auf ausgedehnte Diageneseerscheinungen in der Karibik

Ein durch Calcitlösung verursachtes, selektives Herauslösen von Mg aus dem Foraminiferencalcit wurde vielfach beschrieben und konnte auch im Rahmen von RASTA nachgewiesen werden. Nach Brown und Elderfield [1996] ist eine bevorzugte Lösung Mg-reicherer Gehäuseteile zu beobachten. Inwieweit diagenetische Veränderungen karbonatreicher Sedimente die Foraminiferen-Mg/Ca-Verhältnisse beeinflussen, ist wenig untersucht.

Die Mg/Ca-Analysen an zwei RASTA-Sedimentkernen aus dem Bereich der Bahamas (Windward Passage: SO164-07-4, Abb. 8; SO164-19-2, Abb. 9) zeigen in den älteren Kernabschnitten $> \sim 70.000$ Jahre außergewöhnlich hohe Werte (> 6.5 mmol/mol) in der untersuchten planktonischen Foraminiferenart *G. sacculifer*. Eine Umrechnung dieser hohen Mg/Ca-Verhältnisse in SST mit bestehenden Mg/Ca-Temperatur-Beziehungen führt zu Temperaturwerten $> 31^\circ\text{C}$ und erscheinen damit unrealistisch. Derartig hohe Mg/Ca-Anomalien wurden bereits in einem abgeschlossenen DFG-Projekt von D. Nürnberg (Nu60/7-1) in karibischen Sedimentkernen beobachtet, jedoch nicht interpretiert [Müller, 1999]. Die Zusammenstellung aller vorhandenen Daten (Abb. 8) zeigt, dass die extrem hohen Mg/Ca-Verhältnisse in *G. sacculifer* aus Sedimentkernen aus unterschiedlichsten Wassertiefen (1700-2700 m) unterschiedlichster Regionen (Columbia Becken, Venezuela Becken vor Puerto Rico, Windward Passage) relativ zeitgleich auftreten. Einhergehend mit den außergewöhnlich hohen Mg/Ca-Verhältnissen treten deutliche ^{18}O -Veränderungen zu höheren Werten und abgeschwächten Amplituden in *G.*

sacculifer auf (Abb. 8). Gerade die in den Sauerstoffisotopenstadien 5 und 7 erwarteten ^{18}O -Werte werde nicht erreicht und sind um etwa 40% bzw. 70% gegenüber den Werten des Sauerstoffisotopenstadiums 1 erhöht. Detailliertere Untersuchungen der Karbonatfraktion im Sedimentkern SO164-19-2 aus einer Wassertiefe von 1704 m zeigen den vermutlichen Zusammenhang zwischen den anomalen Mg/Ca-Verhältnissen und ^{18}O -Werten in den spätpleistozänen Gehäusen von *G. sacculifer* (Abb. 9).

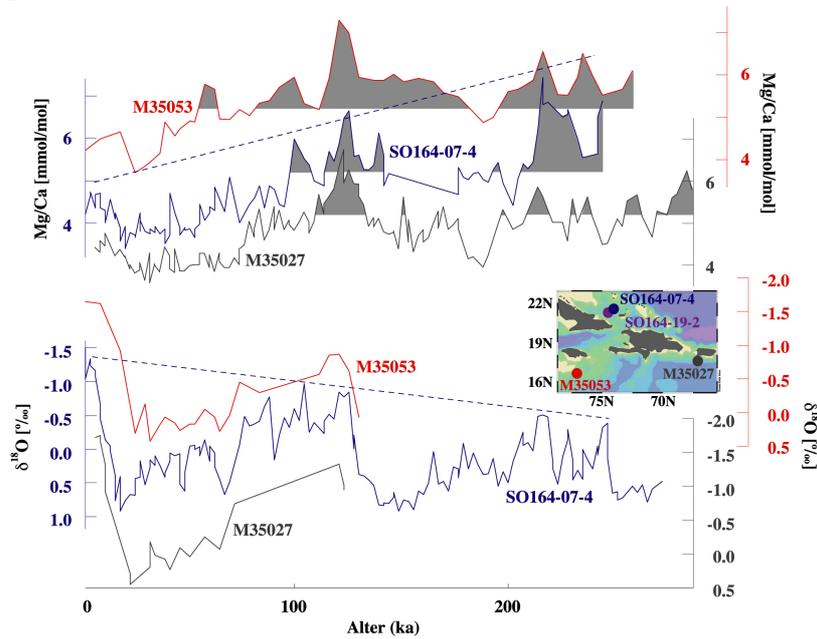
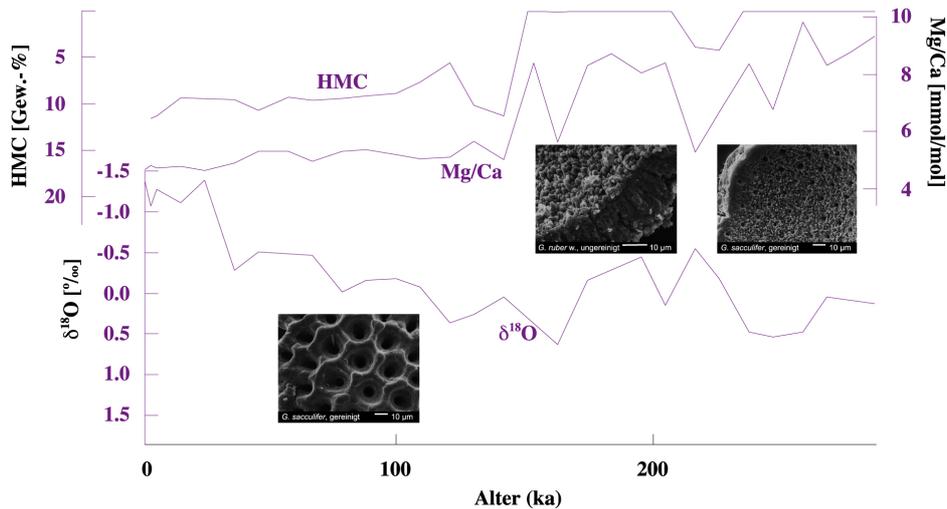


Abbildung 8. $\delta^{18}\text{O}$ -Werte und Mg/Ca-Verhältnisse in Gehäusen der planktonischen Foraminifere *G. sacculifer* aus karibischen Sedimentkernen (M35053: Columbia Becken, 1698 m Wassertiefe; M35027: Venezuela Becken, 1814 m Wassertiefe; SO164-07-4: Windward Passage, 2722 m Wassertiefe). Mg/Ca-Verhältnisse zeigen atypisch hohe Werte (grau unterlegte Bereiche entsprechen einer Temperatur von $>31^\circ\text{C}$). $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zeigen in diesen Kernabschnitten entgegen zu erwartender Verläufe deutlich zu hohe Werte bei gleichzeitiger Abschwächung der Amplituden. Die blau gestrichelten Geraden verdeutlichen die sukzessive Veränderung der interglazialen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zu höheren Werten bei gleichzeitiger Erhöhung der Mg/Ca-Verhältnisse.



Abbildung

9. Zeitliche

Veränderungen im $\delta^{18}\text{O}$ - und Mg/Ca-Verhältnis der planktonischen Foraminifere *G. sacculifer* aus Sedimentkern SO164-19-2 im Vergleich zu Veränderungen im Hochmagnesiumcalcitgehalt (HMC) des Gesamtsedimentes (invers aufgetragen). Mit der vollständigen Lösung von HMC aus dem Gesamtsediment nehmen die Foraminiferen-Mg/Ca-Verhältnisse hohe Werte von bis zu 10 mmol/mol an bei gleichzeitiger Erhöhung der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte und Dämpfung der Amplitude. Gleichzeitig werden flächendeckende calcitische Kristallaufwüchse an den Foraminiferengehäusen beobachtet (siehe REM-Bilder), die selbst nach intensiver Mg/Ca-Reinigungsprozedur verbleiben. Die Entstehung der Kristallaufwüchse steht vermutlich in Zusammenhang mit der HMC-Lösung, durch die Mg-reiches Porenwasser zur Ausfüllung des Kristallsaumes zu Verfügung steht.

Der Verlauf der Hochmagnesiumcalcit-Gehalte (HMC) im Gesamtsediment zeigt eine deutliche Abnahme im Kernabschnitt $> \sim 150.000$ Jahre und wird von einem dramatischen Anstieg der Foraminiferen-Mg/Ca-Verhältnisse reflektiert. Gleichzeitig treten auffällige Kristallaufwachungen auf den Gehäusewänden der planktonischen Foraminiferen auf (Abb. 9). Wir gehen davon aus, dass dieser Kristallsaum auf den originären Gehäusen postsedimentär gebildet wurde und relativ hohe Mg/Ca-Verhältnisse bei relativ hohen ^{18}O -Werten aufweist. Hochauflösende Kammerwandprofil-Messungen mittels Laser Ablation-ICP OES sollen hier zukünftig Gewissheit geben.

Veränderung der Kalzifizierungstiefen planktonischer Foraminiferen im W- und E-Atlantik

Die Ergebnisse zu Mg/Ca und ^{18}O -Messungen in planktonischen Foraminiferengehäusen aus den karibischen RASTA-Oberflächensedimentproben wurden ergänzt durch Messungen an Oberflächenproben aus dem gesamten tropisch/subtropischen Atlantik. Damit sollten zum einen artspezifische Mg/Ca-Temperatur-Kalibrierungen neu erstellt und verbessert werden. Zum anderen galt es zu testen, inwieweit sich eine Thermoklinenvertiefung auf die Foraminiferenhabitate auswirkt.

Die Tiefe der Thermokline nimmt vom östlichen tropischen Atlantik zur Karibik im Westen zu. Zusätzliche saisonale Veränderungen der Thermoklinentiefe sind die Folge der wechselnden Richtung und Stärke des tropischen Windfeldes und des ozeanischen Wärmetransportes. Sowohl Auftriebsprozesse im Osten, hervorgerufen durch östliche Passatwinde sowie divergente Strömungen entlang des Äquators bringen kühle, nährstoffreiche intermediäre Wassermassen an die Oberfläche. Dadurch wird im äquatorialen E-Atlantik eine flache Thermoklinenlage mit einem steilen vertikalen Temperaturgradienten hervorgerufen. Die westwärtigen Oberflächenströmungen stauen warme, tropische Oberflächenwässer westlich von 30°W auf und verursachen eine tiefe Thermoklinenlage mit einem abgeschwächten vertikalen Temperaturgradienten in den oberflächennahen Wassermassen (Abb. 10).

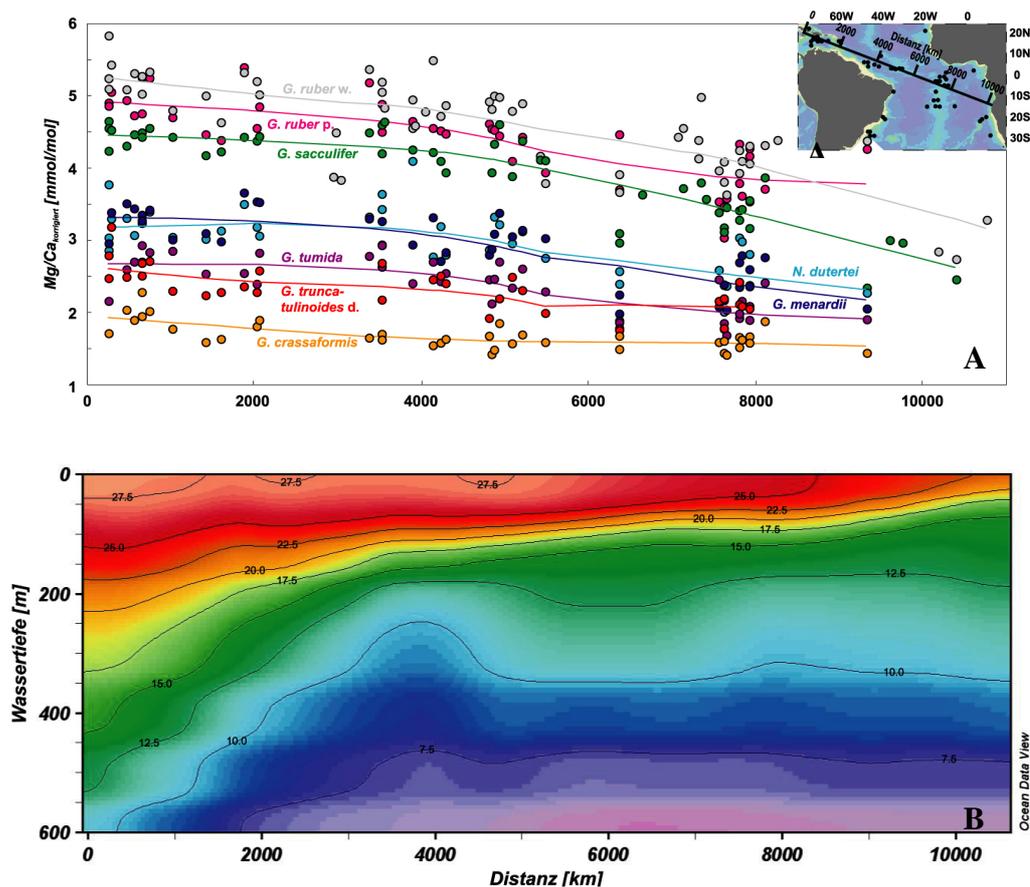


Abbildung 10. A: Mg/Ca-Verhältnisse verschiedener planktonischer Foraminiferenarten aus dem tropisch/subtropischen Atlantik und der Karibik zeigen deutlich höhere Mg/Ca-Verhältnisse im Westen. Die Positionen der untersuchten Oberflächenproben wurden orthogonal auf die Profilinie projiziert. B: Wassertemperaturen in $^\circ\text{C}$ (Jahresmittelwerte, WOA [2001]). Der zunehmend höheren Wassertemperaturen im Westen bei zunehmender Thermoklinentiefe entsprechen erwartungsgemäß die höheren Mg/Ca-Verhältnisse aller Foraminiferenarten.

Diese Veränderlichkeit der Oberflächenhydrographie und die vertikalen Temperatur- und Salinitätsgradienten im tropischen Atlantik sollten von planktonischen, in unterschiedlichen Wassertiefen siedelnden Foraminiferenarten anhand ihres Gehäusechemismus aufgezeichnet werden [Ravelo und Fairbanks, 1992]. Inwieweit die Foraminiferenhabitate bei sich verändernden ozeanographischen Bedingungen im Oberflächenstockwerk (z.B. bei wechselnder Thermoklintentiefe) stabil bleiben, ist derzeit nur unzulänglich geklärt.

Um die Kalzifizierungstiefen der untersuchten planktonischen Foraminiferen einzugrenzen, wurde zunächst der Ansatz verfolgt, die gemessenen ^{18}O -Werte mit zu erwartenden $^{18}\text{O}_{\text{calcit}}$ -Werten zu vergleichen. Die zu erwartenden $^{18}\text{O}_{\text{calcit}}$ -Werte wurden nach der Paläotemperaturgleichung von Shackleton [1974] berechnet, die $^{18}\text{O}_{\text{calcit}}$ als Funktion der Wassertemperatur und des ^{18}O des Meerwassers ($^{18}\text{O}_w$) beschreibt. $^{18}\text{O}_w$ wurde nach Wang et al. [1995] für den tropischen Atlantik und nach Steph et al. [eingereicht] für die Karibik aus den jährlich gemittelten Salinitäten [WOA, 2001] abgeleitet. Die in den planktonischen Foraminiferen gemessenen ^{18}O -Werte wurden entsprechend den berechneten $^{18}\text{O}_{\text{calcit}}$ -Werten den jeweiligen Wassertiefen zugeordnet und zeigen damit die mittleren Kalzifizierungstiefen der einzelnen planktonischen Foraminiferenarten an (Abb. 11).

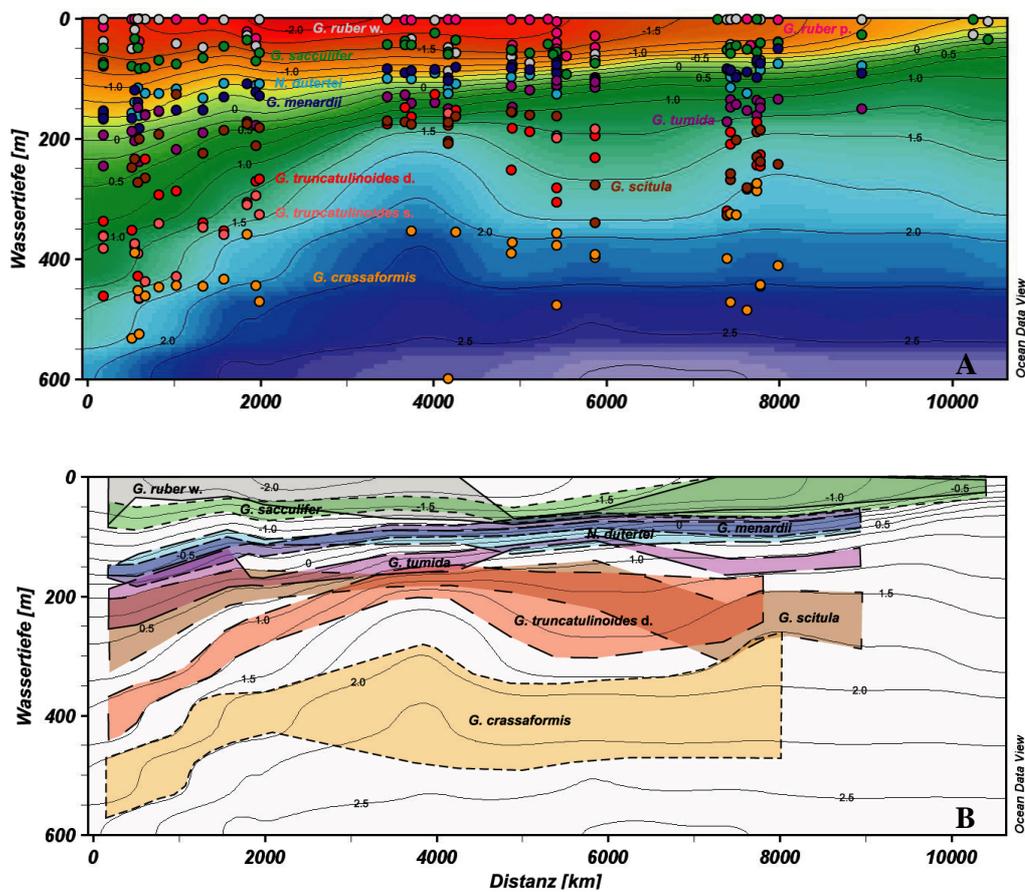


Abbildung 11. A: Theoretisch zu erwartende $\delta^{18}\text{O}_{\text{calcit}}$ -Werte (PDB) entlang des Oberflächenprofilen, errechnet nach der Paläotemperaturgleichung von Shackleton [1974]. Gemessene $\delta^{18}\text{O}$ -Werte verschiedener planktonischer Foraminiferenarten sind in den entsprechenden Wassertiefen als Punkte auf die zu erwartenden $\delta^{18}\text{O}_{\text{calcit}}$ -Werte aufgetragen. B: 2σ Vertrauensbereiche der gemittelten $\delta^{18}\text{O}$ -Messwerte der einzelnen Foraminiferenarten (farbige Felder) zeigen für alle Arten - außer für *G. ruber w.* - eine deutliche Vertiefung der Kalzifizierungstiefen im westlichen Profilabschnitt.

Die anhand der berechneten $^{18}\text{O}_{\text{calcit}}$ -Werte zugeordneten Lebenstiefen weisen darauf hin, dass alle untersuchten planktonischen Foraminiferenarten ihre Kalzifizierungstiefe entlang des Profilschnittes ändern. Sie verlagern sich von einer geringen Kalzifizierungstiefe bei flacher Thermoklintenlage im E-Atlantik hin zu größeren Kalzifizierungstiefen bei tiefer Thermokline im W-Atlantischen Warmpool. Diese Habitatänderung scheint bei tiefer lebenden Arten stärker ausgeprägt zu sein. Zu bedenken bleibt, dass für die Definition der Kalzifizierungstiefen ausschlaggebend ist, welche ^{18}O -Paläotemperaturgleichung angewendet wird.

Übereinstimmend bei allen zur Verfügung stehenden ^{18}O -Paläotemperaturgleichungen bleibt jedoch der Trend zu tieferen Habitaten im W-Atlantik und in der Karibik.

Die Kenntnis über artspezifische Änderungen der Kalzifizierungstiefen entlang des Profilschnittes ist hilfreich für die Verbesserung der Mg/Ca-Temperatur-Kalibrierungen. Den Mg/Ca-Werten der einzelnen Foraminiferenarten können jetzt Wassertemperaturen entsprechend ihrer rekonstruierten Kalzifizierungstiefe zugeordnet werden. Bei dem bisherigen Verfahren wurden die Mg/Ca-Werte mit Temperaturen aus einer konstanten Wassertiefe in Beziehung gesetzt. Dadurch ergibt sich eine deutliche Verbesserung der Mg/Ca-Temperatur-Kalibrierungen (Abb. 12). Für die flach lebenden Arten *G. sacculifer* und *G. ruber w.* ergeben sich aus unseren Messungen relativ ähnliche Mg/Ca-Temperatur-Kalibrationen, wobei *G. ruber w.* konsistent wärme Temperaturen widerspiegelt.

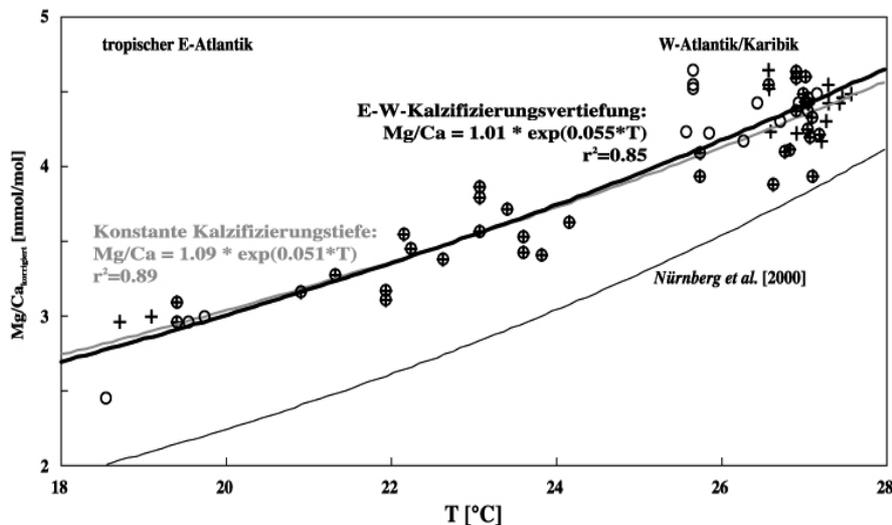


Abbildung 12. Mg/Ca-Temperatur-Kalibration für *G. sacculifer* anhand der hier untersuchten Oberflächenproben. Den Mg/Ca-Verhältnissen wurden zunächst Jahresmitteltemperaturen aus 50 m Wassertiefe [WOA, 2001] zugeordnet (Kreuz). Mit Hilfe der ermittelten, entlang des Profilschnittes variierenden Kalzifizierungstiefen wurden den lösungskorrigierten Mg/Ca-Verhältnissen der einzelnen Foraminiferenarten Temperaturen entsprechend ihrer Kalzifizierungstiefe zugeordnet (Kreise). Die resultierende Kalibrationskurve (schwarze Linie) verläuft etwas steiler als bisher und verdeutlicht den Effekt der sich von Osten nach Westen verändernder Kalzifizierungstiefen. Die neue Kalibrationskurve zeigt einen mit Nürnberg et al. [2000] (untere graue Linie) vergleichbaren Verlauf. Der quantitative Unterschiede (~ 0.5 - 0.7 mmol/mol Mg/Ca) zwischen den Kurvenverläufen ist auf unterschiedliche Analysetechniken zurückzuführen.

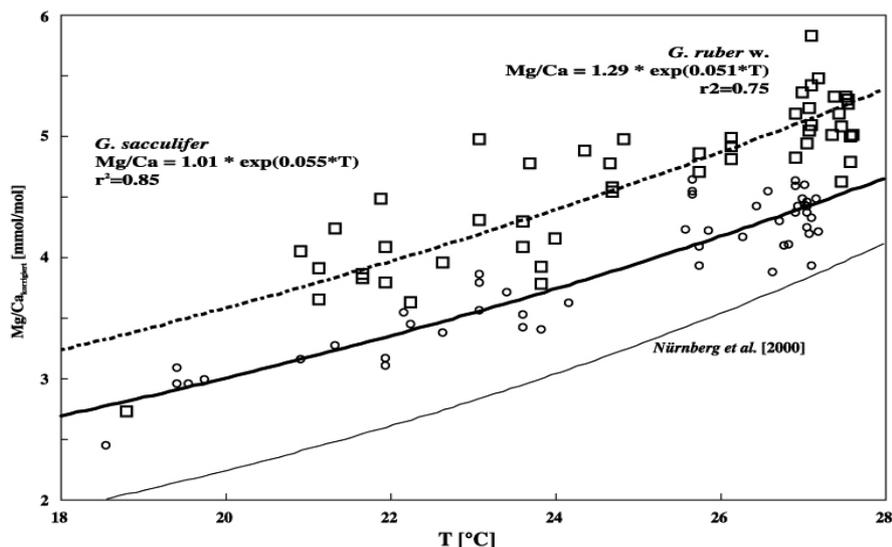


Abbildung 13. Mg/Ca-Temperatur-Kalibrationen für *G. sacculifer* und *G. ruber w.* anhand der hier untersuchten Oberflächenproben. Den lösungskorrigierten Mg/Ca-Verhältnissen von *G. ruber w.* (Quadrate) und *G. sacculifer* (Kreise) wurden Jahresmitteltemperaturen [WOA, 2001] aus den jeweiligen Kalzifizierungstiefen zugeordnet. Die resultierenden Regressionskurven verlaufen ähnlich der auf Foraminiferenhäutungen basierenden Kalibrationskurve von Nürnberg et al. [2000].

Kurzskalige Veränderungen der Oberflächenhydrographie im Golf von Mexiko in Abhängigkeit von der "Loop Current"-Dynamik

(Abbildung 14)

Die Dynamik des W-Atlantischer Warmpool beeinflusst nachhaltig die Ozeanographie und das Klima im N-Atlantik und in NW-Europa. Die kurzskalige Entwicklung dieses Warmpools und die Konsequenzen für die Klimavariabilität sind nur unzureichend dokumentiert. Der im Rahmen eines IMAGES-Projektes von D. Nürnberg (Nu 60/8-1) gewonnene Sedimentkern MD02-2575 vom DeSoto Canyon (Golf von Mexiko) erlaubt aufgrund seiner hohen Sedimentationsraten (-35cm/1000 Jahre) in hoher zeitlicher Auflösung die Dynamik der Oberflächenhydrographie der Golfregion im Wechselspiel mit der südlichen Karibik, der Nordhemisphäre, dem Mississippi-Ausstrom, dem "Loop Current" und der Innertropischen Konvergenzzone zu rekonstruieren. Damit ergänzen diese Ergebnisse in hervorragender Weise die Untersuchungen von RASTA.

Basierend auf einem vorläufigen Altersmodell zeigen die zeitlichen Änderungen der rekonstruierten Oberflächenwassertemperaturen (SST_{Mg/Ca}) und -salinitäten (SSS) (Abb. 14) deutliche Übereinstimmungen mit den Dansgaard-Oeschger Variationen des Grönländischen Eiskernes und belegen die kurzskalige Veränderlichkeit der glazialen Oberflächenhydrographie im Bereich des DeSoto Canyons. Diese Veränderungen stehen in Zusammenhang mit der Stärke des Loop Current, der das Bindeglied zwischen der zentralen Karibik und dem Golfstrom-System bildet [Poore et al., 2003; 2004] und dessen nordwärtige Ausdehnung von der Durchflussmenge durch die Yucatan und Florida-Straße abhängt [Ezer et al., 2003]. Ein Einfluss des Mississippi-Ausstromes auf die Oberflächenhydrographie, wie er in den weiter westlich gelegenen Sedimentkernen vom Orca Becken [Flower et al., 2004] und vom Louisiana Hang [Aharon, 2003] anhand planktonischer ¹⁸O Anomalien beobachtet wird, ist am DeSoto Canyon kaum präsent und spricht für einen - analog zur heutigen Situation - westlich abfließenden Mississippi-Ausstrom auch während der markanten Schmelzwasserereignisse am Ende des letzten Glazials [Müller-Karger, 1991]. Im Vergleich zum zentralkaribischen Columbian Becken [Schmidt et al., 2004] und zum Cariaco Becken [Peterson et al., 2000] gibt es deutliche Phasenunterschiede. Während interstadialer Phasen steigen SST und SSS im nördlichen Golf von Mexiko deutlich an und weisen auf einen stark ausgeprägten Loop Current und demnach auf einen starken Golfstrom und entsprechend hohe Bildungsrate Nordatlantischen Tiefenwassers (NADW) hin. Modellierungen erhöhter Durchflussraten in der Yucatan und Florida-Straße in Abhängigkeit von der erhöhten Bildung des NADW unterstützen diese Annahme [Johns et al., 2002].

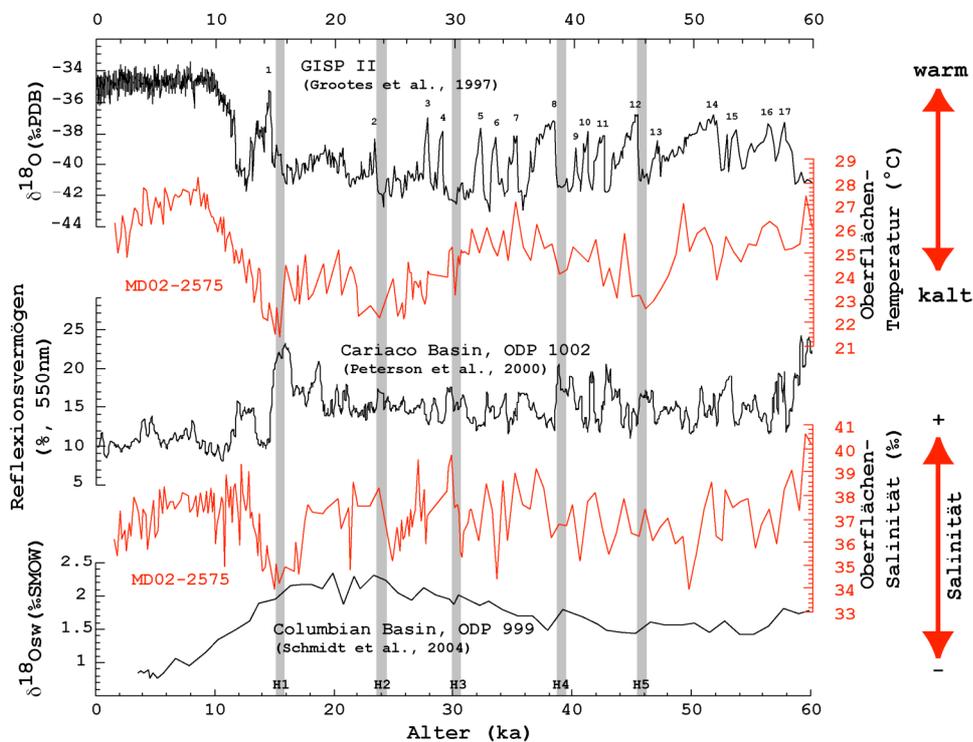


Abbildung 14. Rekonstruierte Oberflächenwassertemperaturen (SST) und -salinitäten (SSS) am DeSoto Canyon (Golf von Mexiko) während der letzten ca. 60.000 Jahre. Die SST und SSS-Records wurden verglichen mit der Grönland (GISP II) Klimakurve [Grootes et al., 1997], mit den Variationen des fluviatilen Eintrages in das Cariaco Becken [Peterson et al., 2000] sowie mit der Paläosalinität der zentralen Karibik [Schmidt et al., 2004].

Gleichzeitig nimmt die Flusszufuhr im Cariaco Basin (angezeigt durch hohe Ti-Gehalte und geringe Reflektivitätswerte) aufgrund der nordwärtigen Position der Innertropischen Konvergenzzone und entsprechend hohem Niederschlag im nördlichen Südamerika zu [Peterson et al., 2000] und lässt dort geringe SSS erwarten. Im Gegensatz dazu nehmen SST und SSS im Golf von Mexiko während der Stadiale ab und sprechen für eine deutliche Verminderung des Loop Current, der Intensität des Golfstrom Systems und letztendlich für eine Abschwächung der Nordatlantischen Tiefenwasserbildung. Die Abnahme der SSS könnte zusätzlich durch einen vermehrten Mississippi-Ausstrom bedingt sein, der in Zusammenhang mit geringen Evaporationsraten über Nordamerika steht [Kim et al., 2003]. Die südwärtige Verlagerung der Innertropischen Konvergenzzone bedingt gleichzeitig weniger Niederschlag in der südlichen Karibik [Schmidt et al., 2004] sowie im nördlichen Südamerika während der Stadiale. Dadurch ergibt sich eine geringe Flusszufuhr, geringe Ti-Gehalte (Cariaco Becken) [Peterson et al., 2000] und folglich eine Erhöhung der SSS in dieser Region. Aus diesen stadialen und interstadialen Szenarien ergibt sich für unseren Kern MD02-2575 eine Schlüsselstellung, die es erlaubt einerseits die stark ausgeprägten Gradienten innerhalb des Golf von Mexiko zu rekonstruieren, die sich durch die Dynamik des "Loop Current" sowie des Mississippi-Ausstromes ergibt. Andererseits zeigt dieser Kern sehr deutlich die Unterschiede zwischen dem südlichen und nördlichen Teil des W-Atlantischen Warmpool, die in erster Linie auf die unterschiedliche Position der Innertropischen Konvergenz zurückzuführen sind.

Pilotstudie GOLDFLOSS

Sedimentationsmilieu in der südlichen Florida-Straße

(Abbildung 16)

Die gegenwärtigen Sedimentationsbedingungen in der südlichen Florida-Straße (Abb. 15) sind durch den Eintrag an mittel- bis grobkörnigen, biotritischen Karbonatsanden von der Cay Sal Bank und seine Überprägung durch das Strömungsregime gekennzeichnet (Abb. 16). Bis in 660 m Tiefe sind Riffschutt-Grobsande auf anstehendem Festgestein fleckhaft verbreitet. Ab 800 m herrschen Fein- bis Mittelsande vor, die nördlich des Trogzentrums in spiculitisch-sandige Schlämme übergehen. Die Sedimentstrukturen zeigen eine Abnahme der Strömungsintensität mit der Tiefe, wobei die Untergrenze des aktuellen Sedimenttransportes zwischen 830 und 950 m Tiefe anzusetzen ist. Dieser Befund steht in Übereinstimmung mit hydrographischen Profilen, nach denen die Untergrenze des Florida-Stroms in ca. 850 m Wassertiefe liegt [Wüst, 1924; Richardson et al., 1969; Leaman et al., 1995].

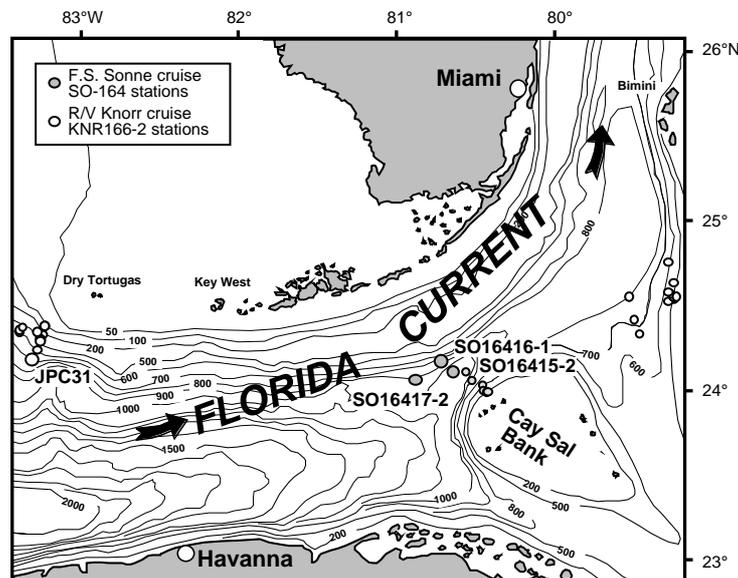


Abbildung 15. Bathymetrie und Lage der Oberflächenproben und Sedimenkerne in der südlichen Florida-Straße. Große Punkte und Stationsnummern: Sedimenkerne.

Hohe Sandgehalte und Mean Sortable Silt Werte am steilen Hang der Cay Sal Bank nehmen mit zunehmender Distanz vom Plattformrand ab [Lezius, 2003]. Sande aus dem Trogzentrum haben hohe Anteile an planktonischen Organismen, was auf einen schwächer werdenden Einfluss des Karbonatplattform-Liefergebiets bei gleichbleibender Strömungssortierung hinweist [Steinlöchner, 2003]. Geringe Sandgehalte am Fuß der Florida-Rampe und niedrigere Mean Sortable Silt Werte aus dem Trogzentrum und vom Florida-seitigen Hang weisen auf ein asymmetrisches Strömungsprofil hin. In Anlehnung an fluviatile Systeme bildet der Florida-Hang mit seinen Feinsedimenten den Gleithang, und der steile Plattformrand der Cay Sal Bank mit groben Sedimenten wird als Prallhang interpretiert [Seim et al., 1999; Lezius et al., 2004].

Der Sedimentkern SO16415-2 aus dem Trogzentrum zeigt einen deglazialen Karbonatbänke über glazialen, autochthonem Foraminiferensand mit azooxanthellen Korallen [Steinlöchner, 2003]. Die Kerne vom Florida-seitigen Hang erbrachten homogene, pelagische Karbonatschlämme, die bis mindestens 279.000 Jahre vor heute zurückreichen [Schönfeld et al., 2003]. Die Sedimentationsraten im Kern SO16417-2 variieren stark und sind während der Interglazial-Isotopenstadien 5 und 7 um das doppelte bis dreifache gegenüber den nachfolgenden Glazialen erhöht [Lezius, 2003]. Während der Warmzeiten sind die Sandgehalte in der Regel niedriger als in den Glazialen, wobei die Sandfraktion zum überwiegenden Teil aus Planktonforaminiferen und Pteropoden besteht. Die verstärkte Sedimentakkumulation während der Warmzeiten ist wahrscheinlich auf erhöhte Karbonatproduktion und Feinsediment-Eintrag von den umgebenden Plattformen zu Zeiten von Meeresspiegel-Hochständen zurückzuführen [Roth und Reijmer, 2004].

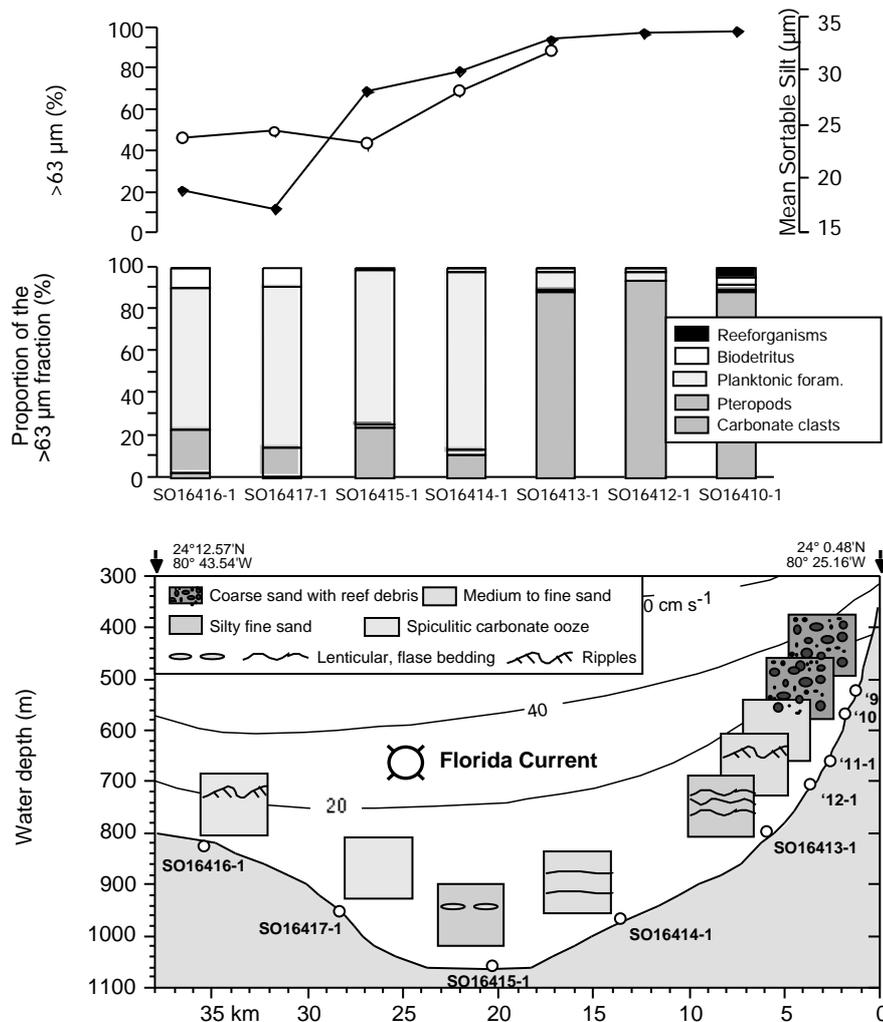


Abbildung 16. Mean Sortable Silt (Punkte), Sandgehalt (Rauten), Zusammensetzung der Sandfraktion und Sedimentstrukturen auf einem Transekt an der Nordflanke der Cay Sal Bank, Bahamas. Konturlinien: Mittlere Strömungsgeschwindigkeit in der Hauptstromrichtung in cm pro Sekunde [Richardson et al., 1969].

Benthosforaminiferen-Gemeinschaften als Anzeiger für Bodenströmungen

(Abbildung 17)

Epibenthische Foraminiferen zeigen in der südlichen Florida-Straße Besiedlungsmuster, die mit Intensitätsunterschieden der bodennahen Strömung in Beziehung gesetzt werden können (Abb. 17). Festgeheftete Arten stellen bis zu 84 % der Lebensfauna in Tiefen oberhalb 600 m und bei Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 30 cm s⁻¹. Ihr Anteil verringert sich auf 5 bis 16 % in größeren Tiefen und unter bodennahen Strömungen von weniger als 6 cm s⁻¹. Die Besatzdichte der Epibenthos-Foraminiferen geht mit der Tiefe und abnehmender Strömungsgeschwindigkeit von 1,8 auf im Mittel 0,5 Individuen pro 10 cm² Meeresboden zurück, wobei die Populationsdichte auf grossen, erhöhten Substraten bis zu vier mal höher als auf der umgebenden Sedimentoberfläche ist [Schönfeld, 2003]. Am Hang der Cay Sal Bank, wo der Florida-Strom direkt auf die Bodensedimente einwirkt, sind die Faunenanteile und absolute Häufigkeiten an epibenthischen

Foraminiferen am höchsten. Sie sind durchweg niedriger auf den Transekten vor den Dry Tortugas und an der grossen Bahamabank, die ausserhalb des Hauptstömungspfades liegen [Schönfeld *et al.*, 2004].

Die Epibenthosgemeinschaften umfassen 40 Arten, die nach unseren Lebendbeobachtungen in erhöht lebende, flach lebende und fakultativ angeheftete Arten eingeteilt werden können. Die erhöht lebende Fauna wird von *Discanomalina semipunctata*, *Planulina ariminensis*, *Textularia pseudogramen*, und *Aggerostramen rusticum* dominiert [Schönfeld *et al.*, 2003]. Bis auf letztere kommen diese Arten auch im Nordostatlantik auf erhöhten Substraten unter der Einwirkung von Bodenströmungen vor. Sie filtern Nahrungspartikel aus der bodennahen Strömung, sichern sich damit einen Wettbewerbsvorteil vor flach lebenden und endobenthischen Arten [Lutze and Thiel, 1989; Schönfeld, 1997; 2002], reproduzieren häufiger und steuern damit einen höheren Anteil der Fossilgemeinschaft bei [Schönfeld und Zahn, 2000; Diz und Frances, 2004]. Erhöht lebende Arten stellen oberhalb von 800 m Tiefe und bei stärkerer Strömung den größten Anteil an der Epifauna. Unterhalb von 800 m dominieren flach lebende, inkrustierende oder in Höhlungen siedelnde Epibenthos-Foraminiferen. Sie sind an geringere Strömungsgeschwindigkeiten angepasst. Selbst *Cibicidoides wuellerstorfi* bevorzugt hier eine flach-epibenthische bis endobenthische Lebensweise [Schönfeld, 2003].

Die generelle Verbreitung der Epibenthos-Foraminiferen in der südlichen Florida-Straße und der Faunenwechsel bei 800 m Tiefe korreliert mit der Ausdehnung und Intensität des Florida-Stroms. Besonders am Hang der Cay Sal Bank ist der Faunenwechsel in Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus hydrographischen Untersuchungen und der Interpretation der Sedimentstrukturen. Aufbauend auf diesen Befunden kann der Benthosforaminiferen-Bodenströmungs Proxy in der Florida-Straße zur Rekonstruktion der Dynamik des Florida-Stroms angewendet werden.

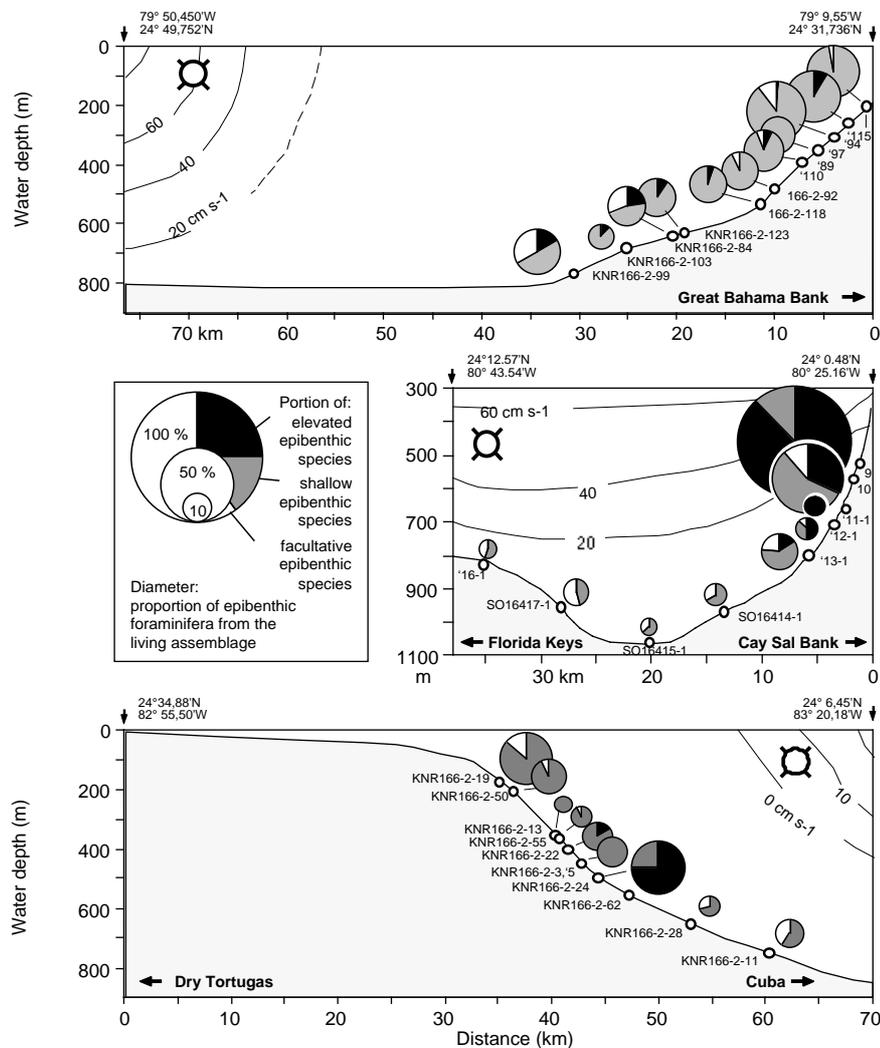


Abbildung 17. Lebende Epibenthosforaminiferen-Faunen aus der südlichen Florida Strasse. Wesentlich höhere Anteile haben epibenthische und erhöht lebende Arten auf dem Transekt nördlich der Cay Sal Bank, wo der Florida-Strom direkt auf den Hang auftrifft.

Geschichte des Florida-Stroms und seine Koppelung mit der Thermohalinen Zirkulation und Klimageschichte

(Abbildungen 18, 19)

Der Sedimentkern SO164-17-2 aus 950 m Tiefe unterhalb des heutigen Florida-Stroms zeigt prägnante glazial – interglaziale Wechsel in den Sedimentationsraten, der Sedimentzusammensetzung und den Foraminiferengemeinschaften (Abb. 18). Höhere Mean Sortable Silt Werte während kalter Klimaperioden und zu Zeiten niedrigen Meeresspiegelstandes weisen auf einen Anstieg der bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten hin [Lezius *et al.*, 2004]. Entsprechende Änderungen der Mean Sortable Silt Werte sind auch im Kern JPC31 aus 750 m Tiefe zu verzeichnen, der heute ausserhalb des Florida-Stroms liegt. Da der Volumentransport des glazialen Golfstroms geringer war [Lynch-Stieglitz *et al.*, 1999], und keine Änderungen in der Siltzusammensetzung oder dem Liefergebiet zu verzeichnen sind [Lezius, 2003], liegt die Ursache der Vergrößerung glazialer Sedimente wahrscheinlich in einer veränderten Geometrie und Dynamik des Florida-Stroms. Bei verengtem Querschnitt der Florida-Strasse während des glazialen Meeresspiegel-Tiefstandes könnte sich der Kernbereich des Florida-Stroms der veränderten Geometrie angepasst und sich in größere Tiefen ausgedehnt sowie eine größere Weite eingenommen haben. Der geringere Querschnitt könnte bei stärkeren glazialen Passatwinden aber auch zu einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten geführt und damit eine stärkere Sortierung der Suspensionsfracht bewirkt haben.

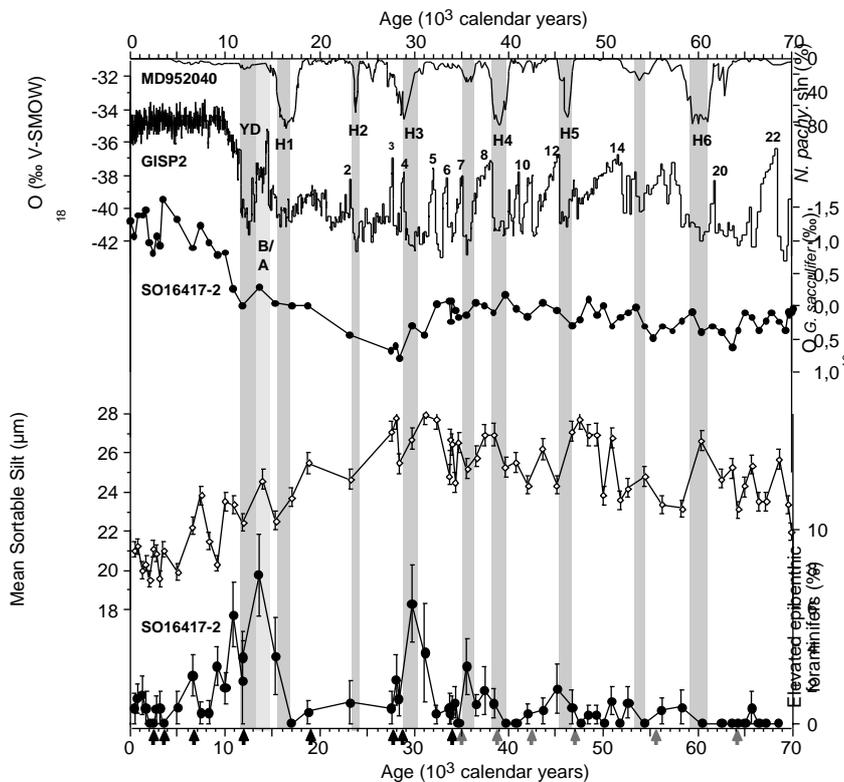


Abbildung 18. Planktonisotope, Mean Sortable Silt (10 bis 63 μm) und erhöht lebende Epibenthosforaminiferen ($>250 \mu\text{m}$) über die letzten 70.000 Jahre im Kern SO16417-2 aus der Florida-Straße. Die Sauerstoffisotopenkurve vom GISP2 Eiskern zeigt zum Vergleich die nordatlantische Klimavariabilität [Grootes und Stuiver, 1997]. Die Heinrich-Ereignisse und damit verbundene Kaltwasservorstöße in mittlere nördliche Breiten werden durch Häufigkeitsmaxima der subpolaren Planktonforaminifere *N. pachyderma* (sinistral) im Kern MD952040 vom nordportugiesischen Kontinentalhang dargestellt [d'Abreu *et al.*, 2003]. Fehlerintervalle: 2 % Standardfehler für Sortable Silt [Bianchi *et al.*, 1999], $\pm 1 \sigma$ Vertrauensintervall für die Foraminiferenzählungen [Van der Plas und Tobi, 1965]. Schwarze Pfeile: ^{14}C -Datierungen, graue Pfeile: Korrelation der Isotopenkurve mit ODP Site 1002 [Peterson *et al.*, 2000].

Erhöht lebende Epibenthosforaminiferen zeigen keine Korrelation mit der glazial - interglazialen Meeresspiegel-Entwicklung. Häufigkeitsmaxima, die erhöhte mittlere Strömungsgeschwindigkeiten anzeigen, treten in den Isotopenstadien 3 und 4 jeweils kurz nach den nordatlantischen Heinrich-Ereignissen auf. Zusammen mit prägnanten Epibenthos-Maxima während des Alleröd und im frühesten Holozän weist dieses Muster auf Strömungspulse des Florida-Stroms hin [Schönfeld *et al.*, 2004]. Sie stehen in enger zeitlicher Beziehung zum Wiederanfachen der thermohalinen Zirkulation im Nordatlantik nach kurzfristigen Perioden mit reduzierter Tiefwasserbildung [Zahn *et al.*, 1997, McManus *et al.*, 2004]. Mean Sortable Silt Maxima zu Beginn der Heinrich Ereignisse zeigen dagegen kurzzeitige Spitzengeschwindigkeiten in der bodennahen Strömung und

damit eine stärkere Saisonalität während des Überganges in diese kühlen und trockenen Klimaintervalle an [Peterson *et al.*, 2000; Haug *et al.*, 2001].

Im Kastengreifer-Kern SO16416-1, der bis 5700 Jahre zurückreicht, weist die Korrelation von Mean Sortable Silt und Benthosforaminiferen mit nur tausendjährigen Variationen der nordatlantischen Tiefwasserproduktion auf die enge Kopplung der Prozesse im Nordatlantik und in der Florida-Straße hin (Abb. 19). Ein detailliertes Altersmodell und hochauflösende Datensätze erwiesen die Synchronität von Mean Sortable Silt Minima mit niedrigerer Iceland-Scotland Overflow Water Intensität [Bianchi und McCave, 1999], stärkerer Treibeisbildung [Bond *et al.*, 1997] und damit einer kurzzeitig reduzierten Tiefwasserbildung im späten Holozän [Schönfeld *et al.*, 2004]. Die Sortable Silt Minima zeigen auch, dass die maximale Strömungsintensität an der Basis des Florida-Stroms nicht höher war als im tiefen Kern SO16417-2 oder im Kern JPC31 ausserhalb des Strömungspfades. Demgegenüber zeigte die mittlere Strömungsgeschwindigkeit nach Epibenthosforaminiferen nur insignifikante Veränderungen, jedoch lässt sich eine leichte Verstärkung während der römischen Warmzeit vor 1800 Jahren erkennen. Auch im Spätholozän scheinen sich also kühle Klimaintervalle vornehmlich in einer stärkeren Saisonalität niederzuschlagen.

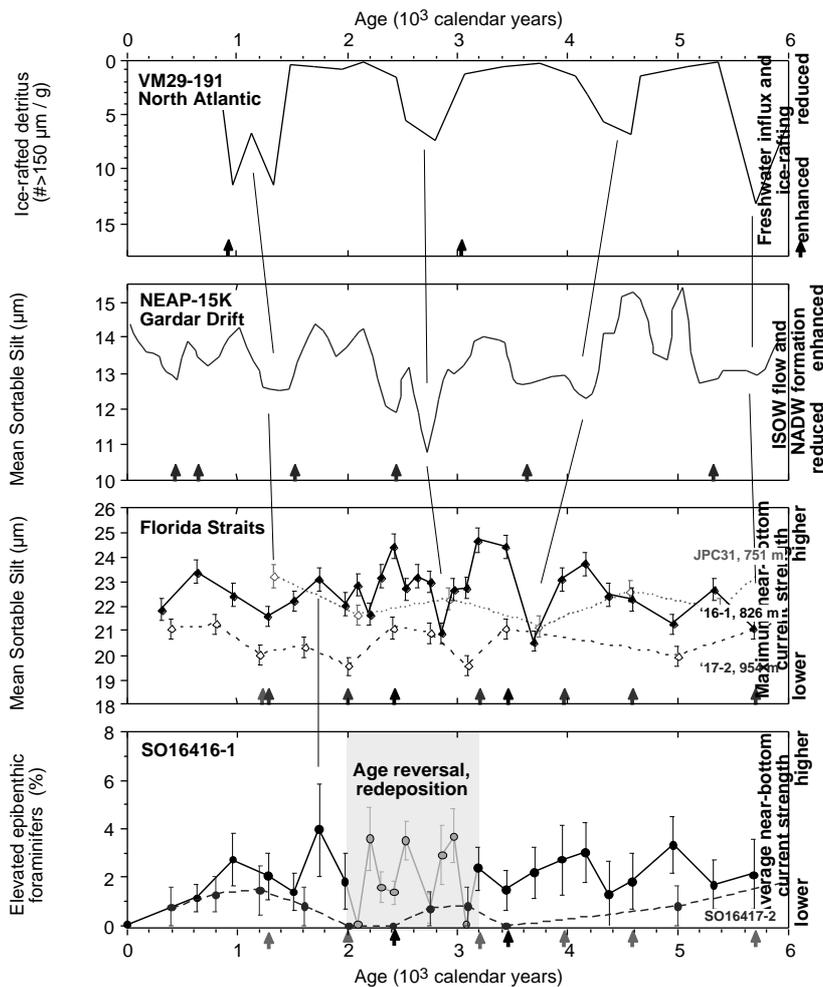


Abbildung 19. Mean Sortable Silt (10 bis 63 μm) und erhöht lebende Epibenthosforaminiferen (>250 μm) aus dem späten Holozän der Florida-Straße. Die Mean Sortable Silt Kurve des Sedimentkernes NEAP-15K südlich von Island zeigt die Stärke des Iceland-Scotland Overflows (ISOW) und damit die Intensität der nordatlantischen Tiefenwasser (NADW) Bildung [Bianchi und McCave, 1999]. Zeitintervalle mit verringerter NADW Produktion sind durch verstärkten Süswassereinfluss und damit durch verstärkte Treibeisbildung im Nordatlantik gekennzeichnet [Bond *et al.*, 1997]. Diese Perioden mit schwacher thermohaliner Konvektion spiegeln sich in Sortable Silt Minima im Kastengreifer-Kern SO164-16-1 von der Untergrenze des Florida-Stroms wieder. Die Minima zeigen, dass hier die maximale Strömungsintensität nicht mehr stärker als im tiefen Kern SO164-17-2 oder im Kern KNR166-2-JPC31 ausserhalb des Hauptströmungspfades war. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit wird durch das Epibenthos skaliert, und sie war nur undeutlichen, nicht signifikanten Variationen unterworfen. Eine leichte Intensivierung lässt sich allenfalls vor 1800 Jahren verzeichnen. Fehlerintervalle: 2 % Standardfehler für Sortable Silt [Bianchi *et al.*, 1999], $\pm 1 \sigma$ Vertrauensintervall für die Foraminiferenzählungen. Pfeile: ^{14}C -Datierungen.

Eine Rekonstruktion der Dynamik des holozänen Florida-Stroms wurde von der Gruppe Lynch-Stieglitz (Atlanta) vorgenommen. Der laterale Dichtegradient des Florida-Stroms wurde mit detaillierten benthischen Sauerstoffisotopen Zeitserien aus Kernen von Hochakkumulationsgebieten auf beiden Seiten der Florida-Straße berechnet [Lynch-Stieglitz *et al.*, 2004]. Die Dichtestruktur in der südlichen Florida-Straße zeigt keine systematischen Veränderungen im Zeitraum zwischen 2000 und 8000 Jahren vor heute. Demnach wäre das frühholozäne Klimaoptimum im Nordatlantik nicht, wie bisher postuliert, mit einer stärkeren thermohalinen Zirkulation verknüpft. Allerdings war der Mean Sortable Silt im frühen Holozän deutlich gröber, was eine Zunahme der barotropen Stömung möglich erscheinen lässt. Hochauflösende Datierungen und detaillierte Messungen über die letzten 1000 Jahre zeigen während der frühmittelalterlichen Warmzeit einen gegenüber der kleinen Eiszeit erhöhten Dichtekontrast über die Florida-Straße, was einen stärkeren Durchfluss während dieser warmen Klimaperiode widerspiegelt [Lund *et al.*, 2004]. Andere feinskalige, tausendjährige holozäne Klimazyklen lassen sich bei der gegenwärtigen Auflösung und Datierungsdichte der Probenserien noch nicht erfassen.

Die konstanten Durchflussraten im Holozän stehen aber im deutlichen Gegensatz zu den tiefgreifenden Änderungen während des Deglazials [Lynch-Stieglitz *et al.*, 1999]. So erreichte der Durchfluss im Alleröd nahezu holozäne Werte, wohingegen er während der jüngeren Dryas und des Hochglazials/Heinrich Ereignis H1 stark reduziert war [Levi *et al.*, 2004]. Die stärksten relativen Änderungen in der Durchflussrate sind dabei in 600 – 700 m Tiefe oberhalb der Basis des Florida-Stroms zu verzeichnen. Dies mag eine Erklärung bieten, warum der Kastengreifer-Kern SO164-16-1 an der Basis des Florida-Stroms in 850 m Tiefe im Spätholozän deutliche, tausendjährige Zyklen im Mean Sortable Silt zeigt, die sich aber in der Durchflussrate des gesamten Strömungsprofils nicht durchpausen.

Salinitätsgeschichte der Karibik während der letzten 35.000 Jahre

(Abbildungen 20, 21)

Die Salzfracht des Golfstroms ist massgeblich für die Effizienz der thermohalinen Zirkulation [Seidov und Haupt, 2003]. Um die Koppelung der Prozesse im Nordatlantik und in der Florida-Straße besser zu verstehen, muss neben der Durchflussrate und der Temperatur auch die Salinität betrachtet werden. Temperatur und Salinität des oberflächennahen Meerwassers steuern den Magnesiumgehalt und die Sauerstoffisotopenzusammensetzung im Calcit pelagischer Organismen [Wang *et al.*, 1995; Elderfield und Ganssen, 2000; Lea *et al.*, 2000; Nürnberg *et al.*, 2000]. Bei den Planktonforaminiferen dominiert *Globigerinoides ruber* die Lebensgemeinschaften im Oberflächenwasser der Karibik [Schmuker und Schiebel, 2002]. Im Süden zeigt diese Art hohe Besatzdichten in einer dünnen Deckschicht von nährstoffreichem und niedrighalinen Oberflächenwasser (~34,0), die im Herbst durch verstärkten Süßwassereinfluss des Orinokko entsteht. Die zweithäufigste Art *G. sacculifer* ist nicht an die starken saisonalen Salinitätsschwankungen und an trübes Wasser angepasst [Schmuker und Schiebel, 2002], und die chemische und isotopische Zusammensetzung ihrer Gehäuse spiegelt eher ganzjährige Bedingungen wieder.

Mg/Ca- und Sauerstoffisotopen-Messungen an *Globigerinoides sacculifer* und *G. ruber* aus 20 Oberflächenproben der Karibik wurden mit Oberflächenwasser-Salinitätsdaten und Meerwasser-Isotopenmesswerten von den Probenlokalationen verglichen (Abb. 20). Die Messwerte von *G. sacculifer* korrelierten mit dem Gleichgewichtscalcit, *G. ruber* zeigt einen abweichenden Trend. Bei *G. sacculifer* zeigten sich die besten Übereinstimmungen mit den Jahresmittel-Temperaturen bzw. Salinitäten aus Wassertiefen von 30 bis 50 m. Dieses Intervall entspricht der mittleren Lebensraumtiefe von *G. sacculifer*.

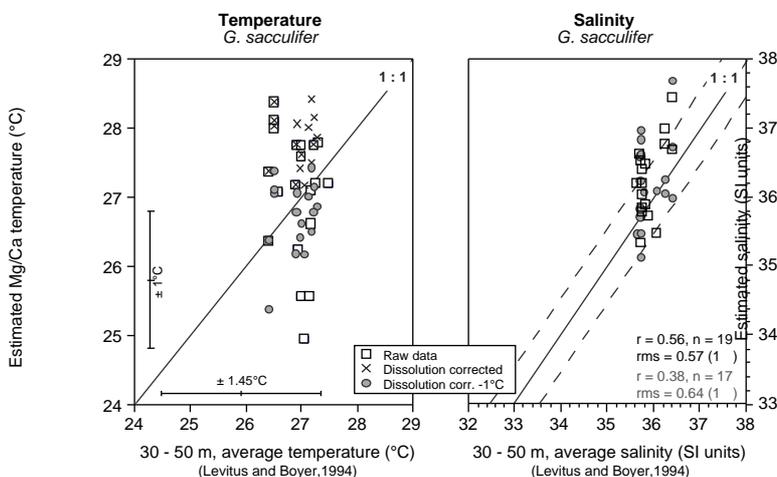


Abbildung 20. Kalibrierung der berechneten Temperaturen und Salinitäten aus den Mg/Ca Verhältnissen und Sauerstoffisotopen von *G. sacculifer*. Fehlerbalken: Jahreszeitliche Schwankungen der Temperatur und Residualvarianz der empirischen Mg/Ca-Temperatur-Kalibrierung. Die Salinität lässt sich nach der Residualvarianz auf ± 0.6 Einheiten genau berechnen, auch wenn die Kalibrierung in der heutigen Karibik nur einen Bereich von 3 Einheiten abdeckt.

Aus der gegenwärtigen karibischen ^{18}O -Oberflächenwasser/Salinitätsbeziehung [Steph *et al.*, eingereicht], der ^{18}O -Korrektur um 0,54 ‰ für den Sekundärcalcit der Foraminiferegehäuse [Duplessy, 1981; Lohmann, 1995] und der empirischen ^{18}O -Temperaturgleichung für *G. sacculifer* aus Planktonfängen [Mulitza *et al.*, 2003] wurde eine Paläo-Salinitätsformel entwickelt. Mit Hilfe dieser Formel lassen sich aus Mg/Ca-Temperaturen und den Sauerstoff-Isotopendaten die Oberflächenwasser-Salinitäten mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5$ Einheiten errechnen [Schönfeld, 2004]. Unsere bisherigen Datensätze und Paläosalinitäts-Rekonstruktionen basierend auf METEOR-Fahrt M35 Sedimentkernen wurden revidiert, ergänzt und durch die SO164-Kerne und neue Literaturdaten [Schmidt *et al.*, 2004] erweitert. Nunmehr liegen Paläo-Salinitätskurven für sechs Sedimentkerne aus dem westlichen tropischen Atlantik, der südlichen und zentralen Karibik und aus der Florida-Straße vor (Abb. 21). Die Oberflächenwasser-Salinitäten waren in der Karibik über den Eiseffekt hinaus im Isotopenstadium 3 im Mittel um eine Einheit, und im Isotopenstadium 2 um zwei Einheiten höher als im Holozän. Dieses Muster führen wir auf stärkere Passatwind-Intensitäten [Ruddiman, 1997; Bozzano *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2003] und eine damit verbundene höhere Verdunstung im Glazial zurück. Im tropischen Atlantik nahe der Orinokko-Mündung verblieb die Oberflächenwasser-Salinität auf ihrem gegenwärtig niedrigen Niveau. Hochauflösende Kerne zeigen im Deglazial ein ausgeprägtes Salinitäts-Doppelmaximum mit Spitzenwerten während des Heinrich-Ereignisses H1 und der jüngeren Dryas. Diese Maxima korrespondieren mit Trockenphasen in der südlichen Karibik, dem Orinokko- und Amazonasbecken [Haug *et al.*, 2001]. Eine zwischenzeitliche Rückkehr zu feuchteren Bedingungen mit verstärkter Flusszufuhr aus dem südamerikanischen Hinterland während des Bølling/Allerød [Rühlemann *et al.*, 1999; Peterson *et al.*, 2000] zeigt sich nur im Kern M35003-4 aus dem westlichen tropischen Atlantik. Ein Vergleich der karibischen Paläo-Salinitäten mit den Daten aus dem östlichen subtropischen Atlantik [Wang *et al.*, 1995] deutet darauf hin, dass die Salinität in der Karibik während kühler und trockener Klimaphasen stets um ein bis zwei Einheiten höher als im Ostatlantik war. Dieses warme, salzreiche Oberflächenwasser drang zu Beginn der nachfolgenden wärmeren Perioden in den nördlichen Atlantik vor und hat somit wesentlich zum Wiederanfachen der thermohalinen Zirkulation beigetragen.

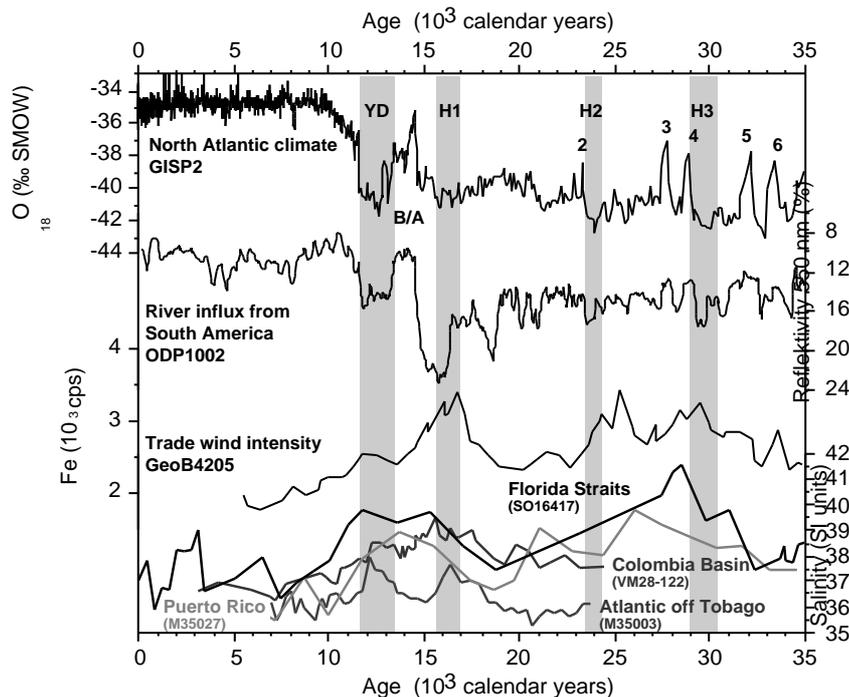


Abbildung 21. Paläosalinitäten in Kernen aus der Karibik und dem angrenzenden tropischen Atlantik über die letzten 35.000 Jahre im Vergleich zu Paläoproxies für das Nordatlantik-Klima [Grootes und Stuiver, 1997], das Niederschlagsaufkommen über Südamerika [Peterson *et al.*, 2000] und für die Passatwind-Intensität [Bozzano *et al.*, 2002]. Die Paläosalinitätskurven zeigen die sukzessive Aufkonzentrierung der Oberflächenwässer bei ihrem Lauf durch die Karibik, wobei die gute Korrelation der Kurven mit Passatwind-Instensität auf die Verdunstung als steuernden Einflussfaktor hinweist. Niederschläge und die Süßwasserschüttung vom südamerikanischen Kontinent wirken sich nur lokal im tropischen Atlantik vor der Orinokko-Mündung aus. Florida-Straße: SO164-17-2, Puerto Rico: M35027-1, Kolumbien Becken: VM28-122, Atlantik: M35003-4.

II.1 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

RASTA und Pilotstudie GOLDFLOSS

Die im Rahmen von RASTA und der Pilotstudie GOLDFLOSS erarbeiteten Ergebnisse haben zu einem wesentlich verbesserten Grundlagenverständnis der ozeanographischen und klimatischen Entwicklung in der Karibik und in der Florida-Straße geführt. Das zunehmende Verständnis der Bedeutung der meridionalen Zirkulation, der engen Kopplung zwischen der Zirkulation in der Karibik und der thermohalinen Konvektion im Nordatlantik und des Prozesses der karibischen Salinitäts-Konditionierung werden in numerische Klimamodelle Eingang finden. Dieses Verständnis basiert in hohem Maße auf der hier durchgeführten kombinierten Analyse von ^{18}O und Mg/Ca in denselben planktonischen Foraminiferengehäusen, die SST und SSS Rekonstruktionen mit hoher Genauigkeit zulassen. Voraussetzung für deren Interpretation waren zum einen grundlegende Studien zur Mg/Ca-Signalbildung und -veränderung, sowie die neuen Erkenntnisse zu regionalen Änderungen der Kalzifizierungstiefen planktonischer Foraminiferen. Diese Ergebnisse werden entscheidenden Einfluss auf jegliche, auf Foraminiferen beruhenden paläo-ozeanographischen Rekonstruktionen haben. Die Bedeutung von Mikrohabitatbeobachtungen für paläoökologische Interpretationen von benthischen Foraminiferengemeinschaften und die im Rahmen dieser Pilotstudie durchgeführte Oberflächensediment-Kalibrierung werden in Zukunft entscheidende Kriterien für die Auswahl von paläo-ozeanographischen Proxies sein.

II.2 Fortschritt im Stand der Wissenschaft während der Projektlaufzeit

RASTA

Trotz der Bedeutung des W-Atlantischen Warmpools für langfristige als auch kurzfristige klimatische Änderung im N-Atlantik [McIntyre und Molino, 1996; Rühlemann et al., 1999] sind die Steuerungsmechanismen und die zeitlichen Zusammenhänge für den Wärmeaustausch mit hohen nördlichen Breiten nur unzureichend verstanden. Im Laufe der Projektlaufzeit wurden verschiedene, überwiegend amerikanische Arbeiten publiziert, die sich mit diesen Fragestellungen befassen.

Die enge Kopplung zwischen tropischen Atlantik und dem N-Atlantik wird deutlich aus Untersuchungen von Lea et al. [2003] aus dem Cariaco Becken, die belegen, dass während der letzten glazialen Termination die Änderungen in den karibischen SST mit einer Unsicherheit von 30-90 Jahren mit den atmosphärischen Temperatur und Methan-Änderungen über Grönland synchron verliefen. Während der Jüngerer Dryas, während der die SST im Cariaco Becken um 3-4°C abfiel, könnte die schnelle südwärtsige Verlagerung der atmosphärischen Innertropischen Konvergenzzone für die Synchronität zwischen tropischen SST, atmosphärischem Methan und Temperatur-Änderungen in hohen nördlichen Breiten verantwortlich gewesen sein.

Insbesondere die oberflächennahe Salinitätsrekonstruktion von Schmidt et al. [2004] für den tropischen W-Atlantik verdeutlicht die Kopplung zwischen W-Atlantischen Warmpool und N-Atlantik. Die karibische Oberflächensalinität erhöhte sich während der kalten Sauerstoffisotopenstadien 2, 4 und 6, während sie niedriger während der warmen Stadien 3 und 5 war, und kovariiert mit der Stärke der N-Atlantischen Tiefenwasserbildung. Vor allem während der Bølling-Allerød-Wärmepériode erniedrigte sich die Oberflächensalinität abrupt und impliziert, dass die Advektion salzreicher, tropischer Wassermassen in den Nordatlantik die thermohaline Zirkulation verstärkte und eine Erwärmung der hohen nördlichen Breiten verursachte. Damit hat der tropische hydrologische Kreislauf direkten Einfluss auf rapide Klimawechsel.

Die SST und SSS-Rekonstruktionen von Flower et al. [2004] für das Orca Becken (Golf von Mexiko) bestätigen die Angaben von Schmidt et al. [2004]. Die oberflächennahe Erwärmung im Zeitraum von 17.2-15.5 ka während des N-atlantischen Heinrich-Ereignisses H1 war jedoch nicht in Phase mit der Änderung der grönländischen Lufttemperatur. Die Rekonstruktion der SSS belegt, dass sie während der letzten Deglaziation – insbesondere zwischen 16.1-15.6 ka und zwischen 15.2–13.0 ka mit einem Minimum bei 13.8 ka im Bølling-Allerød – aufgrund einer verstärkten Schmelzwasserzufuhr vom Laurentidischen Eisschild um 2-4 Einheiten erniedrigt waren. Die Ergebnisse von Flower et al. [2004] deuten darauf, dass die oberflächennahe Erwärmung im subtropischen Golf von Mexiko dem Zerfall des Laurentidischen Eisschildes und dem Bølling-Allerød um >2000 Jahre vorauslief. Damit wird deutlich, dass das tropische Klimasystem eine führende Rolle für den globalen Klimawechsel während der letzten Deglaziation spielte.

Während der Projektlaufzeit wurde die Methodik der Mg/Ca-Paläothermometrie, die in den letzten Jahren ein hohes internationales Interesse geweckt hat, beständig weiterentwickelt. Neben dem methodischen Abgleich [Rosenthal et al., 2004] wurde der Einfluss der Calcitlösung auf das Mg/Ca-Signal in Foraminiferen untersucht. Hier ist vor allem die Arbeiten von Rosenthal et al. [2002] und von Dekens et al. [2002] zu nennen, wobei letztere - für Atlantik und Pazifik getrennt - Korrekturformeln für den lösungsbedingten Mg-Verlust aufstellten. Anand et al. [2003] stellten Mg/Ca-Temperatur-Kalibrationen basierend auf planktonischen Foraminiferen aus Sedimentfallen auf und verwiesen auf die Bedeutung der Foraminiferenhabitate und deren Veränderlichkeit während des Lebenszyklus. Schmuker und Schiebel [2002] erfassten erstmalig die Verbreitung lebender planktonischer Foraminiferen in der Karibik anhand von Netzfängen, die als Grundlage zur Festlegung von Foraminiferen-Habitattiefen dienen kann und von außerordentlicher Bedeutung für die Paläo-Interpretation ist. Mulitza et al. [2004] verwiesen gleichzeitig auf die Diskrepanz zwischen der sauerstoffisotopischen

Zusammensetzung von lebenden, aus Netzfängen stammenden planktonischen Foraminiferen und den fossilen, aus Oberflächensedimenten stammenden Exemplaren.

Pilotstudie GOLDFLOSS

Die Untersuchungen unserer amerikanischen Kooperationspartner sind parallel und in enger Abstimmung mit unseren Arbeiten fortgeführt worden. Erste wissenschaftliche Ergebnisse sind hier schon publiziert worden, wobei sich der Fokus stärker auf den Golf von Mexiko konzentriert hat.

Detaillierte und hochauflösende Planktonisotopen-Zeitreihen aus Sedimentkernen von den Florida Keys zeigen hundert- bis tausendjährige Oszillationen im Spätholozän, die Temperaturschwankungen von 1 bis 1,5 °C oder Salinitätsschwankungen von 1 bis 2 Einheiten entsprechen. Sie sind kohärent und phasengleich mit Schwankungen in der atmosphärischen ¹⁴C-Produktion und somit insolationsgesteuert [Lund und Curry, 2004]. Windinduzierte Oberflächenströmungen auf der großen Bahamabank sind an nordatlantische atmosphärische Zirkulation gekoppelt [Roth und Reijmer, 2004]. Planktonische Sauerstoffisotopen und Mg/Ca-Daten aus dem Orca Basin, Golf von Mexiko, zeigen eine Erniedrigung der Oberflächenwasser-Salinitäten um 2 bis 4 Einheiten während zweier Schmelzwasser-Fluten vom laurentidischen Eisschild von denen die jüngere mit dem Schmelzwasserpuls IA vor 13.800 Jahren im Bølling-Allerød in Beziehung steht [Flower et al., 2004].

Im Hinblick auf die Salinitätsentwicklung haben die neuen, empirischen ¹⁸O-Temperatur Gleichungen von Mulitza et al. [2003] einen wichtigen Fortschritt gebracht. Multispezies-Ansätze der DFG-Forschergruppe 451 "Ozeanpassagen" an der Universität Kiel (R. Tiedemann und S. Steph) haben hier dazu beigetragen, die Habitatansprüche der verwendeten Planktonforaminiferen besser zu verstehen. Weiterhin hat die Arbeit von Schmidt et al. [2004] die Bedeutung der Salinitätsentwicklung in der Karibik für die Dynamik der thermohalinen Zirkulation erstmalig explizit dargestellt. Diese Arbeit war der Anlass, den Salinitätsaspekt in die Untersuchungen der Pilotstudie mitaufzunehmen.

II.3 Geplante und eingereichte Veröffentlichungen

Begutachtete Zeitschriftenbeiträge

Rühlemann, C., Mulitza, S., Lohmann, G., Paul, A., Prange, M. und Wefer G., 2003. Abrupt warming of the intermediate-depth Atlantic Ocean in response to thermohaline circulation slowdown during the last deglaciation, PAGES Newsletter, 2003 (1), Rates of Change: 17-19.

Rühlemann, C., Mulitza, S., Lohmann, G., Paul, A., Prange, M. und Wefer, G., 2004. Intermediate depth warming in the tropical Atlantic related to weakened thermohaline circulation: Combining paleoclimate data and modeling results for the last deglaciation, Paleoclimatology, 19, PA1025, doi:10.1029/2003PA000948.

Schönfeld, J., 2002. A new benthic foraminiferal proxy for near-bottom current velocities in the Gulf of Cadiz, northeastern Atlantic Ocean, Deep-Sea Research I, 49: 1853-1875.

Berichte

Nürnberg, D., Schönfeld, J., Dullo, W.-C. und Rühlemann, C., 2003. RASTA Rapid climate changes in the western tropical Atlantic - Assessment of the biogenous and sedimentary record. R/V SONNE cruise report SO164, GEOMAR Report 109, 151 pp.

Publikationen in Vorbereitung

Schönfeld, J. Recent benthic foraminiferal assemblages and their environmental relations from the southern Florida Straits.

Schönfeld, J. Caribbean surface water salinity monitored by *Globigerinoides sacculifer* and *Globigerinoides ruber* during the last 50,000 years.

Schönfeld, J., Dullo, W.-Chr., Kuhnt, W., Lezius, J., Lynch-Stieglitz, J., Nürnberg, D., Steinlöchner, J. Late Quaternary variability of the Florida Current revealed by sortable silt and benthic foraminiferal assemblages from the southern Florida Straits.

Regenberg, M., et al., Species-specific water depth levels determine Mg/Ca ratios in planktonic foraminifera: Evidence from Caribbean core-top sediments. G-Cubed.

Doktorarbeiten

Regenberg, M. in Vorbereitung. Reconstruction of modern upper ocean hydrography: Evaluation of paleothermometers and paleo-salinity-proxies in the Caribbean.

Diplomarbeiten

Lezius, J., 2003. Stratigraphie und Korngrößenverteilungen an spätpleistozänen Sedimenten aus der zentralen Floridastraße, Dipl. Arb., Univ. Stuttgart.

Steinlöchner, J., 2003, Struktur und Zusammensetzung von oberflächennahen Sedimenten aus dem Vorriff-Bereich der Cay Sal Bank und aus der zentralen Floridastraße, Dipl. Arb., Univ. Stuttgart.

Vorträge

Statusseminar 2003 "Meeresforschung mit FS Sonne", 12.-14. März 2003, Hamburg (Deutschland)

Schönfeld, J., Kuhnt, W., Nürnberg, D., LeGrande, A. Strömungsbeeinflusste Sedimente und Benthosforaminiferen in der südlichen Florida-Straße (Pilotstudie GOLDFLOS, Sonne-Fahrt SO164).

The Micropaleontological Society's Foraminifera Group Spring Meeting, 25. April 2003, Kiel

Schönfeld, J. Recent benthic foraminiferal assemblages from the southern Florida Straits (Bahamas).

1st General Assembly of the European Geosciences Union (EGU), 25.-30. April 2004, Nizza (Frankreich)

Regenberg, M., Nürnberg, D., Steph, S., Groeneveld, J., Tiedemann, R., Dullo, W.-Chr., Mulitza, S. und Drachenberg, S. Dissolution and salinity corrected foraminiferal Mg/Ca vs. SST calibrations for three planktonic species from Caribbean and (sub-)tropical Atlantic core-top sediments.

Calcareous Plankton Spring Meeting, 14. Mai 2004, Kopenhagen (Dänemark)

Schönfeld, J. The Caribbean Salt Kitchen monitored by Globigerinoides sacculifer and Globigerinoides ruber during the last 50,000 years.

8th International Conference on Paleoceanography, 9. September 2004, Biarritz (Frankreich)

Lynch-Stieglitz, J., Curry, W.B., Lund, D., Schönfeld, J., Levi, C., Lezius, J. Holocene history of density structure and transport through the Florida Straits.

Poster-Präsentationen

EGS/AGU/EUG Meeting, 7-11 April 2003, Nizza (Frankreich)

Groeneveld, J., Nürnberg, D., Steph, S. und Tiedemann, R. Effect of the closure of the Panamanian Gateway on Caribbean sea-surface temperature und salinity as indicated by foraminiferal Mg/Ca ratios.

Earth Sciences into the 3. millenium: Methods, materials, mechanisms, 22.-25. September 2003, Bochum (Deutschland)

Nürnberg, D., Regenberg, M., Groeneveld, J., Steph, S., Tiedemann, R. und Bijma, J. Constraining Mg/Ca in foraminiferal calcite as a proxy in paleoceanography.

AGU Fall Meeting, 8.-12. Dezember 2003, San Francisco (USA)

Regenberg, M., Nürnberg, D., Steph, S., Groeneveld, J., Tiedemann, R., Mulitza, S. und Dullo, W.-Chr. Paired Mg/Ca and ¹⁸O in planktonic foraminifers from Caribbean and (sub-)tropical South Atlantic core-top sediments – Assessing the dissolution effect.

8th International Conference on Paleoceanography, 5.-10. September 2004, Biarritz (Frankreich)

Groeneveld, J., Nürnberg, D., Steph, S., Tiedemann, R., Crudeli, D., Reichart, G.J. und Reuning, L. Increasing Mg/Ca SSTs in the Pliocene Caribbean: Initiation of the Western Atlantic Warm Pool, salinity influence or diagenetical overprint?

Levi, C., Lynch-Stieglitz, J. und Curry, W.B. Reconstruction of paleocean circulation in the Florida Strait from paired Mg/Ca and ¹⁸O measurements in benthic foraminifera.

Lezius, J., Kuhnt, W., Lynch-Stieglitz, J., Schönfeld, J. und Steinlöchner, J. Impact of the Florida Current on sedimentary environments in the southern Florida Straits.

Lund, D.C., Curry, W.B. und Lynch-Stieglitz, J. Vertical shear of the Florida Current over the past 1000 years.

Schönfeld, J., Dullo, W.-Chr., Kuhnt, W., Lezius, J., Lynch-Stieglitz, J., Nürnberg, D. und Steinlöchner, J. Late Quaternary variability of the Florida Current linked to North Atlantic thermohaline circulation.

Regenberg, M., Nürnberg, D., Steph, S., Groeneveld, S., Tiedemann, R. und Dullo, W.-Chr. Dissolution, salinity, and diagenetic effects on foraminiferal Mg/Ca from Caribbean and (sub-)tropical Atlantic core-tops and downcore-record.

AGU Fall Meeting, 13.-17. Dezember 2004, San Francisco (USA)

Regenberg, M., Steph, S., Tiedemann, R., Nürnberg, D. und Dullo, W.-Chr. Implications for Reconstructions of the Upper Ocean Stratification From Core-top Planktonic Foraminiferal Multispecies ¹⁸O and Mg/Ca.

Statusseminar "Meeresforschung mit FS Sonne", 9.-11. März 2005, Warnemünde

Regenberg, M., Nürnberg, D., Steph, S., Groeneveld, J., Tiedemann, R. und Dullo, W.-Chr. Der Einfluß der Calcitlösung auf Mg/Ca-Verhältnisse in planktischen Foraminiferen – Ein neues Korrekturverfahren zur Verbesserung der Mg/Ca-Paläothermometrie (Ergebnisse der SO164 Ausfahrt RASTA).

II.4 Literatur

Aharon, P., 2003. Meltwater events in the Gulf of Mexico revisited: Implications for rapid climate changes during the last deglaciation. *Paleoceanography*, 18(4): 1079-1093.

Anand, P., Elderfield, H. und Conte, M.H., 2003. Calibration of Mg/Ca thermometry in planktonic foraminifera from sediment trap time series. *Paleoceanography*, 18(2), doi:10.1029/2002PA000846.

Bard, E., Rostek, F., and Sonzogni, C., 1997. Interhemispheric synchrony of the last deglaciation inferred from alkenone palaeothermometry. *Nature*, 385: 707-710.

Barker, S., Greaves, M. und Elderfield, H., 2003. A study of cleaning procedures used for foraminiferal Mg/Ca paleothermometry. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(9), doi:10.1029/2003GC000559.

Bender, M. L., Lorenz, R.B. und Williams, D.F., 1975. Sodium, magnesium and strontium in the tests of planktonic foraminifera. *Micropaleontology*, 2(4): 448-459.

- Bender, M., Sowers, T., Dickson, M.L., Orchardo, J., Grootes, P., Mayewski, P.A., and Meese, D.A., 1994. Climate correlations between Greenland and Antarctica during the past 100,000 years. *Nature*, 372: 663-666.
- Bianchi, G.G., Hall, I.R., McCave, I.N. und Joseph, L., 1999. Measurement of the sortable silt as a current speed proxy using the Sedigraph 5100 and Coulter Multisizer IIe: precision and accuracy. *Sedimentology*, 46: 1001-1014.
- Bianchi, G.G. und McCave, I.N., 1999. Holocene periodicity in North Atlantic climate and deep-ocean flow south of Iceland. *Nature*, 397: 515-517.
- Blunier, T., Chappellaz, J., Schwander, J., Dällenbach, A., Stauffer, B., Stocker, T.F., Raynaud, D., Jouzel, J., Clausen, C.U. und Johnson S.J., 1998. Asynchrony of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial period. *Nature*, 391: 739-743.
- Bond, G., Broecker, W.S., Johnsen, S., McManus, J., Labeyrie, L., Jouzel, J. und Bonani, G., 1993. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, 365: 143-147.
- Bond, G., Showers, W., Chesby, M., Lotti, R., Almasi, P., deMenocal, P., Piore, P., Cullen, H., Hajdas, I. und Bonani, G., 1997. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 278: 1257-1266.
- Bozzano, G., Kuhlmann, H. und Alonso, B., 2002. Storminess control over African dust input to the Moroccan Atlantic margin (NW Africa) at the time of maxima boreal summer insolation: a record of the last 220 Kyr. *Palaeoecology, Palaeoclimatology, Palaeogeography*, 183: 155-168.
- Brass, G.W. und Turekian, K.K., 1972. Strontium distributions in seawater profiles from the GEOSECS I (Pacific) and GEOSECS II (Atlantic) test stations. *Earth and Planetary Science Letters*, 16: 117-121.
- Broecker, W.S., und Denton, G.H., 1989. The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 2465-2501.
- Brown, S.J. und H. Elderfield, 1996. Variations in Mg/Ca and Sr/Ca ratios of planktonic foraminifera caused by postdepositional dissolution: Evidence of shallow Mg-dependant dissolution, *Paleoceanography*, 11 (5): 543-551.
- Brunner, C.A., 1986. Deposition of a muddy sediment drift in the southern Straits of Florida during the late Quaternary. *Marine Geology*, 69: 235-249.
- Cane, M.A. und Molnar, P., 1999. Late Cenozoic closing of the Indonesian Seaway as the missing link between the Pacific and East African aridification.
- Clark, P. U., Pisias, N. G., Stocker, T. F. und Weaver, A. J., 2002. The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change, *Nature*, 415: 863-869.
- Conte, M H., Sicre, M.-A., Rühlemann, C., Weber, J.C., Schulz-Bull, D. und Blanz, T., 2004. Global calibration of the alkenone unsaturation index (UK'37) with surface waters production temperature and a comparison of the coretop integrated production temperatures recorded by UK'37 with overlying sea surface temperatures, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, (eingereicht. Ms.).
- Curry, W.B., und Oppo, D.W., 1997. Synchronous, high-frequency oscillations in tropical sea-surface temperatures and North Atlantic deep water production during the last glacial cycle. *Paleoceanography*, 12 (1): 1-14.
- D'Abreu, L., Shackleton, N. J., Schönfeld, J., Hall, M. und Chapman, M., 2003. Millennial-scale oceanic climate variability off the Western Iberian margin during the last two glacial periods. *Marine Geology*, 196: 1-20.
- Dekens, P.S., Lea, D.W., Pak, D.K. und Spero, H. J., 2002. Core top calibration of Mg/Ca in tropical foraminifera: Refining paleotemperature estimation, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(4), doi:10.1029/2001GC000200.
- Diz, P. und Francés G., 2004. Distribution of live benthic foraminifera in the Ria de Vigo (NW Iberian margin). Abstract, 4th International Congress "Environmental Micropalaeontology, Microbiology, and Meiobenthology", Isparta, Turkey, 13.-18. September 2004.
- Duplessy, J.C., 1981. Oxygen-18 enrichment of planktonic foraminifera due to gametogenic calcification below the euphotic zone. *Science* 213: 1247-1250
- Duplessy JC, Shackleton NJ, Fairbanks RG, Labeyrie L, Elderfield, H. und Ganssen, G., 2000. Past temperature and ¹⁸O of surface ocean waters inferred from foraminiferal Mg/Ca ratios. *Nature*, 405: 442-445.
- Elderfield, H. und Ganssen, G., 2000. Past temperature and ¹⁸O of surface ocean waters from foraminiferal Mg/Ca ratios. *Nature*, 405: 442-445.
- Elderfield, H., Cooper, M. und Ganssen, G., 2000. Sr/Ca in multiple species of planktonic foraminifera: Implications for reconstructions of seawater Sr/Ca. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 1, 1999GC000031.
- Elderfield, H., Vautravers, M. und Cooper, M., 2002: The relationship between shell size and Mg/Ca, Sr/Ca, d18O, and d13C of species of planktonic foraminifera. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(8), doi:10.1029/2001GC000194.
- Elliot, M., Labeyrie, L., Duplessy, J.-C., 2001. Changes in North Atlantic Deep-Water formation associated with the Dansgaard-Oeschger temperature oscillations (10-60a). *Quat. Sci. Rev.*
- Ezer, T., Oey, L., Lee, H. und Sturges, W., 2003. The variability of currents in the Yucatan Channel: Analysis of results from a numerical ocean model, *Journal of Geophysical Research*, 108(C1), 3012, doi:10.1029/2002JC001509.
- Flower, B. P., Hastings, D. W., Hill, H. W. und Quinn, T. M., 2004. Phasing of deglacial warming and Laurentide ice sheet meltwater in the Gulf of Mexico. *Geology*, 32: 597-600.
- Ganopolski, A., Rahmstorf, S., Petoukhov, V. und Claussen, M., 1998. Simulation of modern and glacial climates with a coupled global model of intermediate complexity. *Nature*, 391: 351-356.
- Ganopolski, A. und Rahmstorf, S., 2001. Rapid changes of glacial climate simulated in a coupled climate model. *Nature*, 409 (6817): 153-158.
- Gardner, W.D., Richardson, M.J. und Cacchione, D.A., 1989. Sedimentological effects of strong southward flow in the Straits of Florida. *Mar. Geol.*, 86: 155-180.
- Grootes, P.M. und Stuiver, M., 1997. Oxygen 18/16 variability in Greenland snow and ice with 10³ to 10⁵-year time resolution. *Journal of Geophysical Research*, 102: 26,455-26,470.
- Hastings, D.W., Russell, A.D. und Emerson, S.R., 1998. Foraminiferal magnesium in Globigerinoides sacculifer as a paleotemperature proxy. *Paleoceanography*, 13(2): 161-169.

- Haug, G.H. und Tiedemann, R., 1998. Effects of the formation of the Isthmus of Panama on Atlantic thermohaline circulation. *Nature*, 393: 673-6676.
- Haug, G.H., Hughen, K.A., Peterson, L.C., Sigman, D.M. und Röhl, U., 2001. Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene. *Science* 293: 1304-1308.
- Hüls, C.M., 2000. Millennial-scale SST variability as inferred from planktonic foraminiferal census counts in the western subtropical Atlantic. Ph.D. thesis, Christian-Albrechts-Univ., Kiel, Germany.
- Johns, W.E., Townsend, T.L., Fratantoni, D.M. und W. Douglas Wilson, W.D., 2002. On the Atlantic inflow to the Caribbean Sea. *Deep-Sea Research I*, 49: 211-243.
- Kim, S.-J., Flato, G. und Boer, G.J., 2003. A coupled climate model simulation of the Last Glacial Maximum, Part 2: approach to equilibrium. *Climate Dynamics* 20: 635-661.
- Kim, J.-H., Schneider, R.R., Mulitza, S. und Müller, P.J., 2003. Reconstruction of SE trade-wind intensity based on sea-surface temperature gradients in the Southeast Atlantic over the last 25 kyr. *Geophysical Research Letter*, 30(22), 2144, doi:10.1029/2003GL017557.
- Kitagawa, H., und van der Plicht, J., 2000. Atmospheric radiocarbon calibration beyond 11,900 cal. BP from Lake Suigetsu laminated sediments, *Radiocarbon*, 42: 369-380.
- Lamb, P.J., 1981. Estimate of annual variation of Atlantic Ocean heat transport. *Nature*, 290: 766-768.
- Larsen, J.C., 1992. Transport and heat flux of the Florida Current at 27°N derived from cross-stream voltages and profiling data: Theory and observations. *Philos. Trans. R. Soc. London, A*, 338: 169-236.
- Lea, D.W., Mashiotta, T.A. und Spero, H.J., 1999. Controls of the magnesium and strontium uptake in planktonic foraminifera determined by live culturing. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 63: 2369-2379.
- Lea, D.W., Pak, D.K., und Spero, H.J., 2000. Climate impact of late Quaternary equatorial Pacific sea surface temperature variations. *Science*, 289: 1719-1724.
- Leaman, K.D., Vertes, P.S., Atkinson, L.P., Lee, T.N., Hamilton, P. und Waddell, E., 1995. Transport, potential velocity, and current/temperature structure across Northwest Providence and Santaren Channels, and the Florida Current off Cay Sal Bank. *Journal of Geophysical Research*, 100: 8561-8569.
- Levi, C., Lynch-Stieglitz, J. und Curry, W.B., 2004. Reconstruction of paleocean circulation in the Florida Strait from paired Mg/Ca and ¹⁸O measurements in benthic foraminifera. Abstract, 8th International Conference on Paleoceanography, Biarritz, Frankreich.
- Lezius, J., Kuhnt, W., Lynch-Stieglitz, J., Schönfeld, J. und Steinlöchner, J., 2004. Impact of the Florida Current on sedimentary environments in the southern Florida Straits. Abstract, 8th International Conference on Paleoceanography, Biarritz, Frankreich.
- Lezius, J., 2003. Stratigraphie und Korngrößenverteilungen an spätpleistozänen Sedimenten aus der zentralen Floridastraße. 75 pp., Diplomarbeit, Universität Stuttgart.
- Lohmann, G.P., 1995. A model for variation in the chemistry of planktonic foraminifera due to secondary calcification and selective dissolution. *Paleoceanography*, 10: 445-457.
- Lund, D.C., Curry, W.B. und Lynch-Stieglitz, J., 2004. Vertical shear of the Florida Current over the past 1000 years. Abstract, 8th International Conference on Paleoceanography, Biarritz, Frankreich.
- Lund, D.C. und Curry, W.B., 2004. Late Holocene variability in Florida Current surface density: Patterns and possible causes. *Paleoceanography*, 19, PA4001, doi:10.1029/2004PA001008.
- Lutze, G.F. und Thiel, H., 1989. Epibenthic foraminifera from elevated microhabitats: *Cibicides wuellerstorfi* and *Planulina ariminensis*. *Journal of Foraminiferal Research*, 19: 153-158.
- Lynch-Stieglitz, J., Curry, W.B. und Slowey, N., 1999. A geostrophic transport estimate for the Florida Current from the oxygen isotope composition of benthic foraminifera. *Paleoceanography*, 14: 360-373.
- Lynch-Stieglitz, J., Curry, W.B., L und, D., Schönfeld, J., Levi, C. und Lezius, J., 2004. Holocene history of density structure and transport through the Florida Straits. Abstract, 8th International Conference on Paleoceanography, Biarritz, Frankreich.
- Mashiotta, T.A., Lea, D.W. und Spero, H.J., 1999. Glacial-interglacial changes in Subantarctic sea surface temperature and ¹⁸O-water using foraminiferal Mg. *Earth and Planetary Science Letters*, 170: 417-432.
- McCave, I.N., Manighetti, B. und Robinson, S.G., 1995. Sortable silt and fine sediment size/composition slicing: parameters for palaeocurrent speed and paleoceanography. *Paleoceanography*, 10: 593-610.
- McCorkle, D.C., Martin, P.A., Lea, D.W. und Klinkhammer, G.P., 1995. Evidence of a dissolution effect on benthic foraminiferal shell chemistry: ¹³C, Cd/Ca, Ba/Ca, and Sr/Ca results from the Ontong Java Plateau. *Paleoceanography*, 10(4): 699-714.
- McIntyre, A. und Molino, B., 1996. Forcing of Atlantic equatorial and subpolar millennial cycles by precession. *Science*, 274: 1867-1870.
- McKenna, V.S. und Prell, W.L., 2004. Calibration of the Mg/Ca of Globorotalia truncatulinoides (R) for the reconstruction of marine temperature gradients. *Paleoceanography*, 19, doi: 10.1029/2000PA000604.
- McManus, J.F., Francois, R., Gherardi, J.-M., Keigwin, L.D. und Brown-Leger, S., 2004. Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes. *Nature*, 428: 834-837.
- Messing, C.G., Neumann, A.C. und Lang, J.C., 1990. Biozonation of deep-water lithoherms and associated hardgrounds in the northeastern Straits of Florida. *Palaios*, 5: 15-33.
- Molinari, R. L., Maul, G.A., Chew, F., Wilson, W.D., Bushnell, M., Mayer, D., Leaman, K., Schott, F., Lee, T., Zantopp, R., Larsen, J.C. und Sanford, T.B., 1985. Subtropical Atlantic climate studies: Introduction. *Science*, 227: 292-295.
- Molinari, R. L., Wilson, W. D. und Leaman, K. D., 1985a. Volume and heat transports of the Florida Current: April 1982 through August 1983. *Science*, 227: 295-297.
- Müller, A., 1999. Mg/Ca- und Sr/Ca- Verhältnisse in biogenem Carbonat planktischer Foraminiferen und benthischer Ostracoden. Ph.D. thesis, Christian-Albrechts-Univ., Kiel, Germany.

- Müller, P.J., Kirst, G., Ruhland, G., von Storch, I. und Rosell-Mele, A., 1998. Calibration of the alkenone paleotemperature index U_{37}^K based on core-tops from the eastern South Atlantic and the global ocean (60°N-60°S), *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 1757-1772.
- Müller-Karger, F.E., Walsh, J.J., Evans, R.H. und Meyers, M.B., 1991. On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellites, *Journal of Geophysical Research*, 96(C7): 12645-12665.
- Mulitza, S., Boltovskoy, D., Donner, B., Meggers, H., Paul, A. und Wefer, G., 2003. Temperature: ^{18}O relationships of planktic foraminifera collected from surface waters, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 202, 143-152.
- Mulitza, S., Donner, B., Fischer, G., Paul, A., Pätzold, J., Rühlemann, C. Segl, M., 2004. The South Atlantic oxygen isotope record of planktic foraminifera. In: Wefer, G., Mulitza, S. und Ratmeyer, V. [Eds.] *The South Atlantic in the Late Quaternary: Reconstruction of Material Budgets and Current Systems*. Springer-Verlag, pp. 121-142.
- Mullins, H.T., Neumann, A.C., Wilber, R.J., Hine, A.C. und Chinburg, S.J., 1980. Carbonate sediments drifts in Northern Straits of Florida. *Bulletin American Association Petroleum Geologists*, 64: 1701-1717.
- Nürnberg, D., 1995. Magnesium in tests of *Neoglobobulimina papyrifera* from high northern and southern latitudes, *J. Foram. Res.*, 25(4): 350-368.
- Nürnberg, D., J. Bijma und C. Hemleben, 1996a. Assessing the reliability of magnesium in foraminiferal calcite as a proxy for water mass temperatures, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(5): 803-814.
- Nürnberg, D., J. Bijma und C. Hemleben, 1996b. Erratum to "Assessing the reliability of magnesium in foraminiferal calcite as a proxy for water mass temperatures", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(13): 2483-2484.
- Nürnberg, D., 2000. Taking the temperature of past ocean surfaces, *Science* 289: 1698-1699.
- Nürnberg, D., Müller, A. und Schneider, R.R., 2000. Paleo-sea surface temperature calculations in the equatorial east Atlantic from Mg/Ca ratios in planktic foraminifera: A comparison to sea surface temperature estimates from U_{37}^K , oxygen isotopes, and foraminiferal transfer function. *Paleoceanography*, 15: 124-134.
- Nürnberg, D., Schönfeld, J., Dullo, W.-C. und Rühlemann, C., 2003. RASTA Rapid climate changes in the western tropical Atlantic - Assessment of the biogenous and sedimentary record. R/V Sonne cruise report SO164, GEOMAR Report 109, 2003.
- Peterson, L.C., Haug, G., Hughen, K. und Röhl, U., 2000a. Rapid changes in the hydrologic cycle of the tropical Atlantic during the last glacial. *Science*, 290: 1947-1951.
- Peterson, L.C., Haug, G.H., Murray, R.W., Yarincik, K.M., King, J.W., Bralower, T.J., Kameo, K., Rutherford, S.D. und Pearce, R.B., 2000b. Late Quaternary stratigraphy and sedimentation at Site 1002, Cariaco Basin (Venezuela). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 165: 85-99.
- Poore, R.Z., Dowsett, H.J., Verardo, S. und Quinn, T.M., 2003. Millennial- to century-scale variability in Gulf of Mexico Holocene climate records. *Paleoceanography*, 18(2), 1048, doi: 10.1029/2002PA000868.
- Poore, R.Z., Verardo, S. und Quinn, T.M., 2004. Century-scale movement of the Atlantic Intertropical Convergence Zone linked to solar variability, *Geophysical Research Letters*, 34: 1-4.
- Prange, M., Lohmann, G. und Paul, A., 2003. Influence of vertical mixing on the thermohaline hysteresis: Analyses of an OGCM, *Journal of Physical Oceanography*, 33(8): 1707-1721.
- Ravelo, A.C. und Fairbanks, R.G., 1992. Oxygen isotopic composition of multiple species of planktonic foraminifera: Recorders of the modern photic zone temperature gradient. *Paleoceanography*, 7(6): 815-831.
- Regenberg, M., Steph, S., Tiedemann, R., Nürnberg, D. und Dullo, W.-Chr., 2004. Implications for Reconstructions of the Upper Ocean Stratification From Core-top Planktonic Foraminiferal Multispecies ^{18}O and Mg/Ca. Abstract, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA.
- Richardson, W.S., Schmitz, W.J. Jr. und Niiler, P.P., 1969. The velocity structure of the Florida Current from the Straits of Florida to Cape Fear. *Deep-Sea Research, Supplement to 16*: 225-231.
- Rosenthal, Y. und Boyle E. A., 1993. Factors controlling the fluoride content of planktonic foraminifera: An evaluation of its paleoceanographic applicability. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 335-346.
- Rosenthal, Y. und Lohmann, G.P., 2002: Accurate estimation of sea surface temperatures using dissolution-corrected calibrations for Mg/Ca paleothermometry. *Paleoceanography*, 17(3), 1044, doi:10.1029/2001PA000749.
- Rosenthal, Y., Perron-Cashman, S., Lear, C.H., Bard, E., Barker, S., Billups, K., Bryan, M., Delaney, M.L., deMenocal, P.B., Dwyer, G.S., Elderfield, H., German, C.R., Greaves, M., Lea, D.W., Marchitto Jr., T.M., Pak, D.K., Paradis, G.L., Russell, A.D., Schneider, R.R., Scheidrich, K., Stott, L., Tachikawa, K., Tappa, E., Thunell, R., Wara, M., Weldeab, S. und Wilson, P.A., 2004. Interlaboratory comparison study of Mg/Ca and Sr/Ca measurements in planktonic foraminifera for paleoceanographic research. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(4), Q04D09, doi:10.1029/2003GC000650.
- Roth, S. und Reijmer, J.J.G., 2004: Holocene Atlantic climate variations deduced from carbonate periplatform sediments (leeward margin, Great Bahama Bank). *Paleoceanography*, 19, PA1003, doi:10.1029/2003PA000885.
- Ruddiman, W.F., 1997. Tropical Atlantic terrigenous fluxes since 25,000 years BP. *Marine Geology*, 136: 189-207.
- Rühlemann, C., Mulitza, S., Müller, P.J., Wefer, G. und Zahn, R., 1999. Warming of the tropical Atlantic Ocean and slowdown of thermohaline circulation during the last deglaciation. *Nature*, 402: 511-514.
- Rühlemann, C., Mulitza, S., Lohmann, G., Paul, A., Prange, M. und Wefer G., 2003. Abrupt warming of the intermediate-depth Atlantic Ocean in response to thermohaline circulation slowdown during the last deglaciation. *PAGES Newsletter*, 2003 (1), Rates of Change: 17-19.
- Rühlemann, C., Mulitza, S., Lohmann, G., Paul, A., Prange, M. und Wefer, G., 2004. Intermediate depth warming in the tropical Atlantic related to weakened thermohaline circulation: Combining paleoclimate data and modeling results for the last deglaciation. *Paleoceanography*, 19, PA1025, doi:10.1029/2003PA000948.
- Savin, S.M. und Douglas, R.G., 1973. Stable Isotope and Magnesium Geochemistry of Recent Planktonic Foraminifera from the South Pacific. *Geological Society of America Bulletin*, 84: 2327-2342.
- Schmidt, M.W., Spero, H.J. und Lea, D.W., 2004. Links between salinity variation in the Caribbean and North Atlantic thermohaline circulation. *Nature*, 428: 160-163.

- Schmuker, B. und Schiebel, R., 2002. Planktic foraminifers and hydrography of the eastern and northern Caribbean Sea. *Marine Micropaleontology*, 46: 387–403.
- Schönfeld, J., 1997. The impact of the Mediterranean Outflow Water (MOW) on Benthic foraminiferal assemblages and surface sediments at the southern Portuguese continental margin. *Marine Micropaleontology*, 29: 211-236.
- Schönfeld, J., 1998. Recent benthic foraminiferal assemblages in deep high-energy environments from the Gulf of Cadiz (Spain). *Newsletter Micropaleontology*, 58: 16-17.
- Schönfeld, J., 2002. A new benthic foraminiferal proxy for near-bottom current velocities in the Gulf of Cadiz, northeastern Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research I*, 49: 1853-1875.
- Schönfeld, J., Kuhnt, W., Nürnberg, D. und LeGrande, A., 2003. Strömungsbeeinflusste Sedimente und Benthosforaminiferen in der südlichen Florida-Straße (Pilotstudie GOLDFLOS, Sonne-Fahrt SO164). Kurzfassung, Statusseminar 2003 "Meeresforschung mit FS Sonne", Hamburg.
- Schönfeld, J., Dullo, W.-Chr., Kuhnt, W., Lezius, J., Lynch-Stieglitz, J., Nürnberg, D. und Steinlöchner, J., 2004. Late Quaternary variability of the Florida Current linked to North Atlantic thermohaline circulation. Abstract, 8th International Conference on Paleoceanography, Biarritz, Frankreich.
- Schönfeld, J., und Zahn, R., 1998. Monitoring the late Pleistocene and Holocene Mediterranean outflow at the western Iberian margin with benthic foraminiferal communities and stable isotopes. Abstract, 6th International Conference on Paleoceanography, Lissabon, Portugal.
- Schönfeld, J. und Zahn, R., 2000. Late Glacial to Holocene history of the Mediterranean Outflow. Evidence from benthic foraminiferal assemblages and stable isotopes at the Portuguese Margin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 159: 85-111.
- Schönfeld, J., 2003. Recent benthic foraminiferal assemblages from the southern Florida Straits (Bahamas). Abstract, The Micropaleontological Society's Foraminifera Group Spring Meeting, Kiel.
- Schönfeld, J., 2004. The Caribbean Salt Kitchen monitored by *Globigerinoides sacculifer* and *Globigerinoides ruber* during the last 50,000 years. *Calcareous Plankton Spring Meeting*, Kopenhagen, Dänemark.
- Schott, F. und Zantopp, R., 1985. Florida Current: seasonal and interannual variability. *Science*, 227: 308-311.
- Seidov, D., Sarnthein, M., Stattegger, K., Prien, R. und Weinelt, M., 1996. North Atlantic ocean circulation during the last glacial maximum and subsequent meltwater event: A numerical model, *Journal of Geophysical Research*, 101(C7): 16305-16332.
- Seidov, D. und Haupt, B.J., 2003. On sensitivity of ocean circulation to sea surface salinity. *Global and Planetary Change*, 36: 99-116.
- Seim, H.E., Winkel, D.P., Gawarkiewicz, G. und Gregg, M.G., 1999. A Benthic Front in the Straits of Florida and Its Relationship to the Structure of the Florida Current. *Journal of Physical Oceanography*, 29: 3125-3132.
- Shackleton, N.J., 1974. Attainment of isotopic equilibrium between ocean water and the benthonic foraminifera genus *Uvigerina*: Isotopic changes in the ocean during the last glacial. In: *Les méthodes quantitatives d'étude des variations du climat au cours du Pléistocène*, Colloques Internationaux de Centre National de la Recherche Scientifique No. 219. CNRS, Paris, pp. 4-5.
- Sicre, M.-A., E. Bard, Ezat, U. und Rostek, F., 2002: Alkenone distributions in the North Atlantic and Nordic sea surface waters, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(2): 10.1029/2001GC000159.
- Steinlöchner, J., 2003. Struktur und Zusammensetzung von oberflächennahen Sedimenten aus dem Vorriff-Bereich der Cay Sal Bank und aus der zentralen Floridastraße. 56 pp., Diplomarbeit, Universität Stuttgart.
- Steph. S., Tiedemann, R., Groeneveld, J., Nürnberg, D., Reuning, L. und Haug, G., 2004. Changes in Caribbean surface hydrography during the Pliocene shoaling of the Central American Seaway. Eingereicht bei *Paleoceanography*.
- Stuiver, M. und Grootes, P. M., 2000. GISP2 oxygen isotope ratios, *Quaternary Research*, 53: 277-284.
- Tomczak, M. und Godfrey, J. S. , 1994. *Regional Oceanography: An Introduction*. Pergamon, New York, 1994.
- Van der Plas, L. und Tobi, A.C., 1965. A chart for judging the reliability of point counting results. *American Journal of Science*, 263: 87-90.
- Van Kreveland, S., Sarnthein, M., Erlenkeuser, H., Grootes, P., Jung, S., Nadeau, S.J., Pflaumann, U. und Voelker, A., 2000. Potential links between surging ice sheets, circulation changes, and the Dansgaard-Oeschger cycles in the Irminger Sea. *Paleoceanography*, 15: 425-442.
- Visser, K., Thunell, R. und Stott, L., 2003. Magnitude and timing of temperature change in the Indo-Pacific warm pool during Deglaciation. *Nature*, 421: 152–155.
- Wang, L., Sarnthein, M., Duplessy, J.-C., Erlenkeuser, H., Jung, S. und Pflaumann, U., 1995. Paleo sea surface salinities in the low-latitude Atlantic: the ¹⁸O record of *Globigerinoides ruber* (white). *Paleoceanography*, 10: 749-761.
- Whitko, A.N., Hastings, D.W. und Flower, B.P., 2002: Past sea surface temperatures in the tropical South China Sea based on a new foraminiferal Mg calibration. *MARSci*, MARSci.2002.01.020101.
- WOA, World Ocean Atlas, 2001. Objective Analyses, Data Statistics, and Figures, CD-ROM Documentation. National Oceanographic Data Center, <http://www.nodc.noaa.gov>.
- Wüst, G., 1924 . Florida- und Antillenstrom: Eine hydrodynamische Untersuchung. *Veröffentlichungen aus dem Institut für Meereskunde*, N.F., A, 12: 1-48.
- Zahn, R., Schönfeld, J., Kudrass, H.-R., Park, M.-H., Erlenkeuser, H. und Grootes, P., 1997. Thermohaline instability in the North Atlantic during meltwater events: Stable isotope and ice-rafted records from core SO75-26KL, Portuguese Margin. *Paleoceanography*, 12: 696-710.

III. Erfolgskontrollbericht

III.1 Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen

Unsere Arbeiten und Ergebnisse stehen in direktem Bezug zum nationalen Klimaprogramm der Bundesregierung und international zu den Programmen, in denen Prozesse der globalen Klimaveränderungen (z.B. International Geosphere Biosphere Project: PAGES, IMAGES; 5. Rahmenprogramm der EU; DFG-Geotechnologien: Das

System Erde, vom Prozessverständnis zum Erdmanagement, ESF-HOLIVAR) im Vordergrund stehen. In direktem Bezug und in Erweiterung des RASTA-Projektes erfolgten zwei weitere Initiativen unserer Arbeitsgruppe zur paläozeanographischen Entwicklung der Karibik:

Im Rahmen einer IMAGES-VII PAGE Kampagne mit FS Marion Dufresne wurden lange Sedimentkerne vom DeSoto Canyon (Golf von Mexiko) und aus der Florida-Straße gewonnen. Im Fokus dieses DFG-Projektes "Kurzfristige Temperaturänderungen im atlantischen Warmwasserpool - der Golf von Mexiko" (Nu60/8-1) stand die dynamische Entwicklung des W-Atlantischen Wärmepools während des Spätquartärs. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Variabilität der Oberflächenhydrographie während der Dansgaard-Oeschger-Zyklen und Heinrich-Ereignisse gelegt.

Im Rahmen der DFG-Forschergruppe "Ozeanpassagen" konzentrierten sich die Arbeiten der Antragsteller Dr. Ralf Tiedemann und Dr. Dirk Nürnberg auf die die Pliozäne Schließungsgeschichte des Isthmus von Panama und der Folgen für die Oberflächenhydrographie, Thermoklinenentwicklung, SST und SSS-Entwicklung im W-Atlantischen Warmpool. Die Untersuchungen zur Mg/Ca-Paläothermometrie und zur Foraminiferenkalzifizierungstiefe im Rahmen von RASTA waren dabei unabdingbare Voraussetzungen für die Interpretation der pliozänen Zeitserien.

III.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Eine ausführliche Beschreibung der Ergebnisse erfolgte in Kapitel II.2. Im folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse schlagwortartig aufgeführt:

RASTA

- Schaffung eines chronostratigraphischen Gerüsts zur Einstufung von Sedimentprofilen über die letzten 280.000 Jahre.
- Eine neue globale Kalibrierung der Alkenontemperatur-Methode, in die RASTA-Proben partikulären Materials aus dem Oberflächenwasser des westlichen tropischen Atlantiks eingeflossen sind, zeigt einen nicht-linearen Zusammenhang zwischen U_{37}^K und Temperatur. Dieser steht in Widerspruch zu der linearen, aus Sedimentoberflächen abgeleiteten U_{37}^K -Temperatur-Kalibration, die in den gemäßigten bis subpolaren Breiten um 2-3°C zu hohe Temperaturen produziert.
- Die Mg/Ca-Paläothermometrie zur Bestimmung von Paläo-Oberflächentemperaturen ist neben der Alkenontemperatur-Methode zur Zeit ein bedeutender Arbeitsansatz in der Paläozeanographie. Die Untersuchungen innerhalb von RASTA dienen zu einem großen Teil der Verbesserung dieser Methode.
- Mg/Ca-Verhältnisse in planktonischen Foraminiferengehäusen nehmen unterhalb artspezifischer Tiefenniveaus signifikant ab. Die lösungsbedingte Abnahme der Mg/Ca-Verhältnisse kann aber mittels eines hier vorgeschlagenen Verfahrens korrigiert werden. Sr/Ca-Werte zeigen lediglich geringe wassertiefenabhängige Veränderung.
- Vergleichende ^{18}O - und Mg/Ca-Analysen an verschiedensten planktonischen Foraminiferenarten aus Oberflächensedimentproben des gesamten tropisch/subtropischen Atlantik zeigen, dass sich die unterschiedlichen Habitate der Foraminiferen vom östlichen Atlantik zum westlichen Atlantik hin deutlich vertiefen - in Übereinstimmung mit einer sich nach Westen vertiefenden Thermoklinenlage.
- Die Ergebnisse zur tiefenabhängigen Mg/Ca-Lösung und zu Veränderungen der Foraminiferenhabitate im subtropisch/tropischen Atlantik wurden dazu genutzt, bestehende Mg/Ca-Temperatur-Kalibrierungen für *G. ruber* w. und *G. sacculifer* zu verbessern.
- Alle untersuchten Sedimentkerne aus der zentralen Karibik weisen in den Kernabschnitten älter als ~70.000 Jahre diagenetische Veränderungen auf. Die Lösung des Hochmagnesiumcalcites im Gesamtsediment führt vermutlich zu Kristallaufwachsungen auf den planktonischen Foraminiferengehäusen, die die Mg/Ca-Verhältnisse erhöhen. SST-Rekonstruktionen werden dadurch unmöglich.
- SST und SSS-Rekonstruktionen im Golf von Mexiko (DeSoto Canyon) verdeutlichen die kurzfristigen Veränderungen der Oberflächenhydrographie im letzten Glazial (Sauerstoffisotopenstadien 2 und 3), die mit den Dansgaard-Oeschger-Zyklen zu korrelieren sind. Die Zeitserien erlauben einerseits deutliche Gradienten innerhalb des Golf von Mexiko zu rekonstruieren, die sich durch die Dynamik des "Loop Current" sowie des Mississippi-Ausstromes ergeben. Andererseits können Unterschiede zwischen dem südlichen und nördlichen Teil des W-Atlantischen Warmpool aufgezeigt werden, die durch die unterschiedliche Position der Innertropischen Konvergenz verursacht wurden.
- Erstmals konnte an zwei Sedimentkernen aus dem Bereich der südlichen Karibik und vom Kontinentalhang vor Angola bestätigt werden, dass einhergehend mit einer Reduzierung der thermohalinen Zirkulation im Nordatlantik während kurzfristiger Klimateinbrüche (Heinrich-Ereignis H1 und die Jüngere Dryas) die Thermoklinen- und Zwischenwassermassen im tropisch-subtropischen Atlantik um bis zu 4°C wärmer wurden.

GOLDFLOS

- Die gegenwärtigen Sedimentationsbedingungen in der südlichen Florida-Straße sind durch den Eintrag von Karbonatsanden der Cay Sal Bank und seine Überprägung durch das Strömungsregime gekennzeichnet.
- Die Sedimentationsraten in Kernen aus der Florida-Straße variieren stark und sind während der Interglaziale um das doppelte bis dreifache gegenüber den nachfolgenden Glazialen erhöht.
- Besiedlungsmuster von epibenthischen Foraminiferen stehen in Beziehung mit der bodennahen Strömungsintensität in der südlichen Florida-Straße.
- Höhere Mean Sortable Silt Werte in Sedimentkernen aus der Florida-Straße zeigen stärkere Strömungsmaxima während kalter Klimaperioden und zu Zeiten niedrigen Meeresspiegelstandes an.
- Erhöht lebende Epibenthosforaminiferen waren jeweils kurz nach den nordatlantischen Heinrich-Ereignissen häufiger. Dieses Muster weist auf eine generell höhere Intensität des Florida-Stroms beim Wiederanfachen der thermohalinen Zirkulation im Nordatlantik hin.
- Im Kastengreifer-Kern SO16416-1 korrelieren Mean Sortable Silt und Epibenthosforaminiferen mit tausendjährigen Variationen der nordatlantischen Tiefwasserproduktion im Holozän. Sie erweisen damit die enge Kopplung der Prozesse im Nordatlantik und in der Florida-Straße. In der Gesamtbilanz waren die Transportraten im Holozän jedoch konstant.
- Aus der gegenwärtigen karibischen ^{18}O -Oberflächenwasser/Salinitätsbeziehung und der empirischen ^{18}O -Temperaturgleichung für *G. sacculifer* aus Planktonfängen wurde eine Paläo-Salinitätsformel entwickelt und auf Sedimentkerne angewendet.
- Die Oberflächenwasser-Salinitäten waren in der Karibik über den Eiseffekt hinaus im Isotopenstadium 3 im Mittel um eine Einheit, und im Isotopenstadium 2 um zwei Einheiten höher als im Holozän.
- Hochauflösende Kerne zeigen im Deglazial ein ausgeprägtes Salinitäts-Doppelmaximum mit Spitzenwerten während des Heinrich-Ereignisses H1 und der jüngeren Dryas. Diese Maxima korrespondieren mit Trockenphasen in der südlichen Karibik, dem Orinokko- und Amazonasbecken.
- Das warme, salzreiche Oberflächenwasser drang zu Beginn der nachfolgenden wärmeren Perioden in den nördlichen Atlantik vor und hat wesentlich zum Wiederanfachen der thermohalinen Zirkulation beigetragen.

III.3 Fortschreibung des Verwertungsplanes

Ein Schwerpunkt unserer Untersuchungen innerhalb von RASTA lag auf der paläozeanographischen Entwicklung innerhalb der Karibik auf kurzfristigen Zeitskalen während des Spätpleistozäns. Untersuchungen zur kurzfristigen Klimavariabilität sind von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Nur mit Hilfe geologischer Datenserien ist eine realistische Abschätzung des anthropogenen Einflusses auf das Weltklima vor dem Hintergrund der natürlichen Klimavariabilität möglich. Jede Klimaprognose ist daher auf wissenschaftlich fundierte Analysen der natürlichen Klimavariabilität in der geologischen Vergangenheit angewiesen. Dabei übernimmt die Paläoklimatologie eine wichtige Aufgabe im Bereich der gesellschaftlichen Daseinsvorsorge, da sie aufgrund ihres umfassenden Systemverständnisses nachhaltig greifende Konzepte und Lösungsansätze bietet. Eine exakte Klimavorhersage ist zudem die Basis für die langfristige Planung von Politik und Wirtschaft. Unter Berücksichtigung der zunehmenden globalen Vernetzung der Entscheidungen in Politik und Wirtschaft wird der Klimavorhersage im nächsten Jahrhundert eine zentrale Bedeutung zukommen. Die Rekonstruktionen zur Paläo-Umwelt und des Klimas werden indirekt (d.h. als Eingangsparameter in Klimamodelle) für folgende Bereiche bedeutsam: Energieversorgung, Rückversicherung, Ernährung, Tourismus, Küsten- und Landschaftsschutz und Verkehr und Transport.

Neben der multilateralen Zusammenarbeit mit Ländern, die auf dem Gebiet der Klimaforschung und Technik führend sind, förderte dieses Projekt vor allem aber auch die wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit mit unterschiedlichsten Anrainerstaaten in der Karibik. Insbesondere auf dem Gebiet der geowissenschaftlichen Meeresforschung erwarten wir hier neue wissenschaftlich-technische Anstöße.

III.4 Ungelöste Fragestellungen

Wir bewerten die Durchführung des RASTA-Projektes (inkl. GOLDFLOSS) und die gewonnenen Ergebnisse als überaus positiv. Dennoch haben unsere Ergebnisse zahlreiche Fragen aufgeworfen, die bislang nicht geklärt werden konnten. Ein überaus überraschendes Ergebnis unserer Oberflächensedimentuntersuchungen ist die regionale Veränderlichkeit der Kalzifizierungstiefen planktonischer Foraminiferen. Dieses Ergebnis wirft viele neue Fragen und Probleme hinsichtlich der paläozeanographischen Interpretationen auf.

Die Untersuchungen an den langen Sedimentkernen aus der zentralen Karibik zeigen starke diagenetische Überprägungen auf, die eine Interpretation der Mg/Ca und ^{18}O -Signale bisher verhindern. Hier müssen noch eingehende prozessorientierte Studien durchgeführt werden.

In den tropischen Meeren reagieren Korallenriffe sensitiv auf Veränderungen im Meeresspiegelniveau. Die während RASTA kartierten Plattform-Hänge am Südostrand von Guadeloupe besitzen ein übergeordnetes Muster, das von anderen Vorriff-Hängen der Tropen gut bekannt ist. Eine 75-90° steile Wand wird gefolgt von einem 30-40° steilen zementierten Hang und darunter von einem Weichsediment-Hang unterhalb von 240 m Wassertiefe. Der zementierte Hang zeigt dabei starke Bioerosion sowie Verkarstungen und weist ertrunkene

Korallen in Tiefen von 50-150 m Wassertiefe auf, die während glazialer Meeresspiegeltiefstände bei oligotrophen Bedingungen florierten. Der Wechsel zu eutrophischen Bedingungen könnte mit Auftriebsgeschehen in Zusammenhang stehen, ist jedoch noch ungeklärt. Die Beziehungen zwischen Verkarstungen und Meeresspiegeltiefständen bzw. ertrunkenen Riffen und Meeresspiegelhochständen ist offensichtlich, muss in unserem Falle jedoch noch quantifiziert werden.

Im Rahmen der GOLDFLOSS Pilotstudie konnte zwar belegt werden, dass es in der jüngsten Vergangenheit eine enge Kopplung zwischen dem Durchfluss in der Florida-Straße und der thermohalinen Zirkulation in Nordatlantik gegeben hat. Veränderungen im Strömungsprofil und der Intensität im Kernbereich des Florida-Stroms können aber nur approximiert werden, denn die Sedimentkerne stammen entweder aus zu großen Tiefen oder von Lokationen außerhalb des Hauptströmungspfades. Für ein Nachfolgeprojekt ist es daher dringend geboten, Sedimentkerne aus Tiefen von 300 bis 600 m am Florida-Hang zu nehmen, um den Probensatz zu vervollständigen.

Anhand der Oberflächenproben konnte gezeigt werden, dass der Benthosforaminiferen-Bodenströmungs-Proxy auch in der Florida-Straße anwendbar ist. Die hier betrachteten, epibenthischen Arten stellen aber nur einen geringen Anteil an fossilen Faunen in den Sedimentkernen. Es ist noch unklar, welchen Einfluss wechselnde Intensitäten der Bodenströmung auf die flachlebenden, endobenthischen Arten haben, und wie diese in Wechselwirkung mit Produktivitätsunterschieden, Ausbreitung und Intensität der Sauerstoffminimum-Zone und mit großräumigen Faunenfluktuationen stehen.

Mit Sedimentkernen aus dem karibischen Raum konnte ein schlüssiges Szenario der Oberflächenwasser-Salinitäten im Wechselspiel mit Klimaschwankungen entwickelt werden. Diese Daten erfassen aber nur die obersten 50 m der Wassersäule. Zu einer zuverlässigen Beschreibung des Wärme- und Salztransport im Golfstrom müssen auch die tieferen Wasserstockwerke erfasst werden. Hier werden in einem Folgeprojekt Multispezies-Untersuchungen an Planktonforaminiferen ansetzen [Regenberg *et al.*, 2004], mit denen Paläotemperatur- und Salinitätsprofile bis in 700 m Tiefe rekonstruiert werden können.

III.5 Einhaltung der Ausgabenplanung

RASTA: Die Finanzmittel wurden in vollem Umfang ausgegeben und entsprechend unseres Antrages wie folgt genutzt:

Personal

Im Berichtszeitraum waren die Projektstellen besetzt mit:

- *Dr. Carsten Rühlemann (BAT IIa)*

Herr Dr. Carsten Rühlema war vom 15.5.2002 bis 14.11.2004 als wissenschaftlicher Angestellter im RASTA-Teilprojekt 01 tätig. Seine Untersuchungen konzentrieren sich zum einen auf die hochauflösende Rekonstruktion der Wassertemperaturen im Zwischentiefenbereich auf der atlantischen Seite des Antillenbogens, zum anderen auf die Verbesserung bestehender Kalibrierungen der Alkenontemperatur-Methode mit partikulärem Material des Oberflächenwassers.

- *Dipl. geol. Marcus Regenberg*

Herr Marcus Regenberg war seit dem 02.09.2002 im RASTA-Teilprojekt 01 als Doktorand tätig. Die Finanzierung über RASTA lief am 31.05.2004 aus. Seine Doktorarbeit wird voraussichtlich im September 2005 beendet sein.

- *Studentische Hilfskräfte und Diplomanden*

Die bewilligten Mittel für studentische Hilfskräfte wurden in vollem Umfang genutzt. Die Studenten halfen bei folgenden Arbeitsschritten: Probennahme (gefriertrocknen, mörsern, einwiegen), Auslesen von Foraminiferen und vorbereitende Reinigungsschritte für die Mg/Ca-Analytik und Analytik stabiler Isotope, Probenaufbereitung für Röntgendiffraktometrie, LECO-Analytik, sowie bei der Bestimmung der Wassergehalte und der Dateneingabe am Computer. Darüber hinaus wurden zwei Diplomarbeiten (J. Lezius, J. Steinlöchner) zum Thema Stratigraphie und Sedimentologie spätpleistozäner Sedimenten aus der zentralen Floridastraße angefertigt.

Mieten

Die bewilligten Finanzmittel für Mieten deckten die Charterkosten für FS SONNE (RF Reedereigemeinschaft) sowie für das Tauchboot JAGO (Fa. AQUATEC).

Aufträge an Dritte

- *Wissenschaftliche Arbeiten und Labortechnischer Service*

Teile der wissenschaftlichen Arbeiten wurden über "Aufträge an Dritte" an die Firma Tethys Geoconsulting GmbH vergeben und von Herrn Dr. Joachim Schönfeld ausgeführt. Dies geschah auf Empfehlung des Projektträgers BEO (email vom 13.06.2001, Frau Tanner) im Rahmen des RASTA Teilprojektes 01 als Auftrag

von GEOMAR (jetzt IFM-GEOMAR) an die Tethys Geoconsulting GmbH. Die wissenschaftlichen Dienstleistungen durch Herrn Dr. Joachim Schönfeld erfolgten über einen Zeitraum von 9 Monaten und beinhalteten die Expeditionsteilnahme, die Bearbeitung der Benthosforaminiferenfaunen, die Erstellung von Sedimentkern-Altersmodellen, Korngrößenanalysen, sowie die Auswertung, Synthese und Publikation der Daten.

- *Containerhandling JAGO*

Die bewilligten Gelder für das Containerhandling des Tauchbootes JAGO wurden entsprechend eingesetzt und beinhalteten die Kosten für den Transport des Tauchbootes JAGO.

- *Geräteinsatz*

Entsprechend der Bewilligung wurden Mittel für die Gestellung eines Bordtechnikers über die Service-Firma KUM für den Zeitraum der SO164-Expedition genutzt. Der Techniker war für die Bedienung und Wartung der geologischen Probennehmergeräte zuständig. Für den Zeitraum der Expedition standen keine Techniker aus dem Personalbestand des GEOMAR (jetzt IFM-GEOMAR) zur Verfügung.

- *Analysen*

Entsprechend der Bewilligung wurden Sachmittel für wissenschaftliche Analysen eingesetzt (^{13}C und ^{18}O -Analysen, AMS ^{14}C -Altersdatierungen, RFA- und ICP-OES-Analysen). Zusätzlich wurden Schwerelote abgelängt und für die Schiffsexpedition vorbereitet.

Verbrauchsmaterial

Die Mittel wurden in vollem Umfang für projektbezogene Arbeiten verwendet (Laborverbrauchsmaterial, Probenpräparation, Probenarchivierung, Expeditionsausrüstung).

Transport

Die bewilligten Finanzmittel für Transporte deckten die Kosten für den Containertransport/Übergepäck vom Heimatinstitut zu FS SONNE und zurück.

Dienstreisen

Entsprechend der Bewilligung wurden die Mittel für den Transport der SO164 Expeditionsteilnehmer von und zu FS SONNE genutzt. Der Projektangestellte Marcus Regenbergl präsentierte zudem RASTA-Ergebnisse auf der AGU Tagung in San Francisco, USA (06-15.12.2003).

GOLDFLOSS: Die Finanzmittel wurden in vollem Umfang ausgegeben und entsprechend unseres Antrages wie folgt genutzt:

Personal

- *Studentische Hilfskräfte und Diplomanden*

Die bewilligten Mittel für studentische Hilfskräfte wurden in vollem Umfang genutzt. Die Studenten halfen bei der Expeditionsvorbereitung, nahmen an der SO164 Expedition teil, und unterstützen die Projektmitarbeiter bei folgenden Arbeitsschritten: Probenahme (schlammern, gefriertrocknen, mörsern, einwiegen), Auslesen von Foraminiferen, Probenaufbereitung für die Messung stabiler Isotope, LECO-Analytik, sowie bei der Bestimmung der Wassergehalte und der Dateneingabe am Computer.

Aufträge an Dritte

- *Analysen*

Entsprechend der Bewilligung wurden Sachmittel für wissenschaftliche Analysen eingesetzt (AMS ^{14}C -Altersdatierungen).

Verbrauchsmaterial

Die Mittel wurden in vollem Umfang für projektbezogene Arbeiten verwendet (Laborverbrauchsmaterial, Probenpräparation, Probenarchivierung, Expeditionsausrüstung).

Dienstreisen

Entsprechend der Bewilligung wurden die Mittel für den Transport von 3 SO164 Expeditionsteilnehmer von und zu FS SONNE genutzt.

III.6 Einhaltung der Zeitplanung

Unsere Arbeiten führten zu einer großen Ausbeute an wissenschaftlich bedeutsamen und teilweise spektakulären Ergebnissen. Es wurden 2 Diplomarbeiten abgeschlossen. Eine Dissertation wird in naher Zukunft fertig werden.

Eine weitere Diplomarbeit über die Golf von Mexiko-Arbeiten im Rahmen von IMAGES, die in Kürze eingereicht wird, trägt für RASTA bedeutsame Erkenntnisse zur Paläozeanographie des W-Atlantischen Warmpool bei.

Leider konnte die Anzahl der publizierten und eingereichten Arbeiten noch nicht der Vielzahl der Ergebnisse gerecht werden. Viele der Einzelergebnisse werden zur Zeit zusammengebracht, und wir denken, dass 2-3 Manuskripte bis Anfang nächsten Jahres publikationsreif vorliegen werden. Neu aufgeworfene Fragen während der Interpretation erfordern auch hier noch ergänzende Messungen zur Absicherung der Ergebnisse. Insgesamt wurde der Zeitplan aber eingehalten.