Schlussbericht DEKLIM-CorClim (01LD0031)

Zuwendungsempfänger:

1) Jürgen Pätzold, Gerold Wefer
   Fachbereich 5, Geowissenschaften, Universität Bremen;
2) Hans von Storch, Eduardo Zorita
   Institut für Gewässerphysik, GKSS Forschungszentrum Geesthacht

Förderkennzeichen: 01LD0031

Vorhabensbezeichnung: Korallenchronologien des subtropischen Nordatlantiks (CorClim) – Hochauflösende Proxyzeitreihen von Bermuda

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2002 – 31.12.2004,

verlängert bis 31.05.2005

I Kurze Darstellung von Aufgabenstellung und Rahmenbedingungen

I.1 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war die Rekonstruktion der Nordatlantischen Klimavariabilität über die letzten Jahrhunderte, wobei der Schwerpunkt auf der Rekonstruktion des Einflusses der Nordatlantischen Oszillation (NAO) lag. Hierzu sollten die Wachstumsparameter und die geochemische (v.a. Sr/Ca) und isotopische (v.a. $\delta^{18}O$) Zusammensetzung von Korallenskeletten von Bermuda verwendet werden, und zwar in monatlicher bis jährlicher zeitlicher Auflösung. Nach Gewinnung der Proxydaten (I) sollte zunächst der Bezug zu lokalen ozeanographischen und atmosphärischen Parametern untersucht werden (II), um im nächsten Schritt Rückschlüsse auf großräumige Klimamuster zu ziehen (III), was Vergleiche zwischen Proxydaten und Modellergebnissen einschließt. Auf dieser Grundlage sollten die Proxydaten selbst in Modellierungen einfließen (IV).

Geplant war, aus Korallenzeitreihen großräumige Klimamuster zu rekonstruieren, mit denen ein Klimamodelllauf angetrieben werden sollte. Da das dazu notwendige Verfahren (DATUN) noch in der Erprobungsphase war, wurden die Modellierungsziele modifiziert. Die Upscaling Modelle für SST- und SLP-Felder wurden benutzt, um aus schon vorhandenen Klimamodellläufen die Verbindung zwischen Korallenzeitreihen und Meeresoberflächenströmungen abzuleiten. Aufgrund der zu geringen Dichte von Beobachtungsdaten sind solche Untersuchungen nur mit Modelldaten möglich, die mit realistischem Antrieb durchgeführt werden. Solche Simulationen waren bei der GKSS bereits durchgeführt worden.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Für das Vorhaben stand in vorangegangenen Projekten (BMBF Paläoklima, KIHZ) gewonnenes Korallenmaterial zur Verfügung. Davon wurden die zwei größten und besterhaltenen Kolonien vom Nordosten der Bermuda-Riffplattform (Northeast Breakers, Abbildung 1) ausgewählt. Neben diesen rezenten Kolonien (Kolonie BDA 145, *Montastraea cavernosa*; Kolonie BDA 100, *Diploria strigosa*), wurden bereits vorhandene Daten einer Kolonie aus dem 16. Jahrhundert mit einbezogen (Kolonie BDA 18-5, *Diploria labyrinthiformis*). Neben den geochemischen Daten für BDA 18-5 lagen zu Projektbeginn die Wachstumsraten für BDA 145 bereits vor, während die übrigen Daten (der weitaus größere Anteil) innerhalb von CorClim erhoben wurden. Weitere vorhandene Daten von Bermuda-Korallen (Draschba et al., 2000; Cardinal et al., 2001; Cohen et al., 2004) wurden bei der Auswertung berücksichtigt. Im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem DEKLIM-Projekt Clitrans und dem DFG Forschungszentrum Ozeanränder wurde weiterhin Probenmaterial bearbeitet, das von den genannten Kooperationspartnern zur Verfügung gestellt wurde. Dabei handelt es sich um fünf rezente und Holozäne Korallenkolonien vom Roten Meer (*Porites* spp.).

An instrumentellen Klimadaten fanden sowohl globale Datensätze (HadISST, GISST; beide vom UK Meteorological Office), als auch lokale (mehrere Messstationen auf Bermuda selbst, sowie Hydrostation S, eine Station der Bermuda Biological Station ca. 30 km SE' von Bermuda) Verwendung. Weiterhin wurde der NAO-Index von Jones et al. (1997) benutzt.

Die Gewinnung von Proxydaten aus den Korallen fand vollständig bei den an CorClim beteiligten Institutionen statt, die dazu notwendigen Messgeräte waren vorhanden. Eine umfangreiche, jahrelange Expertise in der Bearbeitung und Auswertung derartigen Materials bestand ebenfalls (Pätzold et al., 1984; Felis et al., 1998; Kuhnert et al., 1999; Pätzold et al., 1999; Felis et al., 2000; Kuhnert et al., 2000; Kuhnert et al., 2002; Felis et al., 2003; Felis et al., 2004; Kuhnert et al., 2005).

Bei der GKSS lagen Erfahrungen bei der statistischen Auswertung von Proxydaten vor, auch bei der Detektion von Klimasignalen in Proxydaten aus globalen Datensätzen. Des Weiteren wurden an dem Institut sowohl Rekonstruktionen von Eiskernzeitreihen aus großräumigen Klimamustern (Crüger et al., 2004) als auch Rekonstruktionen von Klimamustern aus lokalen Proxydaten (Jones und Widmann, 2003) durchgeführt. Für die Untersuchungen mit Modelldaten lagen bei der GKSS die Daten von zwei unter realistischen Bedingungen durchgeführten Simulationen vor (ERIK-Lauf, von 1000 bis 1990 und COLUMBUS-Lauf von 1500 bis 1990).

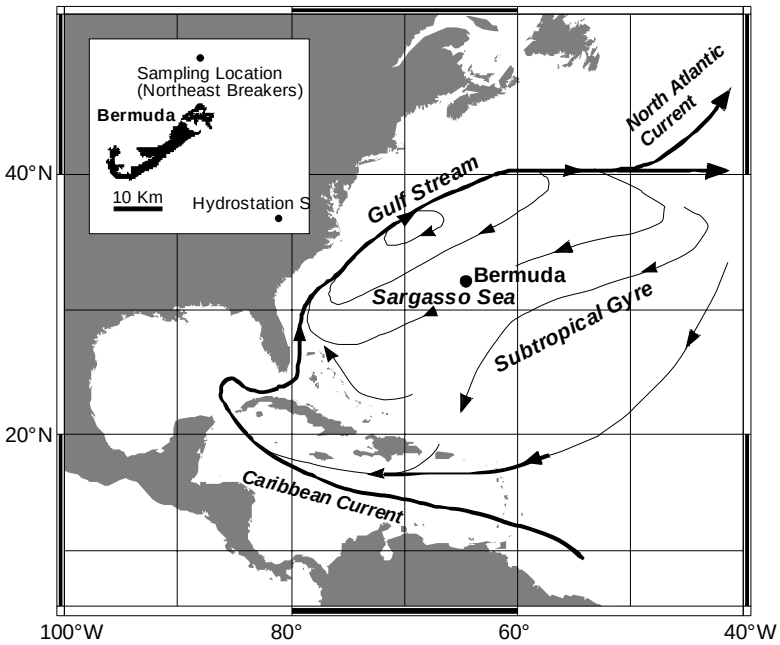


Abbildung 1. Schematische Darstellung der Oberflächenzirkulation im westlichen Nordatlantik. Die Detailkarte zeigt die Probenlokalität nördlich von Bermuda (Northeast Breakers) und die Position von Hydrostation S, einer regelmäßig von der Bermuda Biological Station besuchten und beprobten Schiffsposition.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Eines der Teilprojekte (Modellierung am GKSS) startete mit fünfmonatiger Verzögerung. Dadurch ergab sich ein zeitlicher Versatz gegenüber der ursprünglichen Planung. Diese Verzögerung begründete auch die kostenneutrale Verlängerung des Projekts um fünf Monate.

Für das Teilprojekt Paläodaten (Universität Bremen) sah die ursprüngliche Planung vor, geochemische und isotopische Analysen in den ersten zweieinhalb Jahren durchzuführen. Wachstumsparameter sollten über die ersten eineinhalb Jahre erfolgen. Im letzten Jahr sollte der Schwerpunkt auf einer Integration und Synthese der Ergebnisse liegen. Vergleiche mit anderen instrumentellen und Proxydaten, der Datenaustausch mit dem Teilprojekt Modellierung (GKSS Geesthacht) und die Publikation der Ergebnisse sollten über die gesamte Laufzeit des Projekts hinweg geschehen. Eine Abweichung von der ursprünglichen Planung ergab sich durch die Veränderung der Modellierungszielsetzung: In der Zeit, zu der die Simulation und Auswertung mit der DATUN-Technik durchgeführt werden sollte, fanden die Untersuchungen mit den Klimamodellläufen ERIK und COLUMBUS statt. Von anderen, geringfügigen Abweichungen abgesehen, entsprach der Ablauf des Vorhabens weitgehend dem der ursprünglichen Planung.

I.3.1 Erstes Antragsjahr (Kalenderjahr 2002)

Von den untersuchten Kolonien von Bermuda-Korallen wurden (soweit noch nicht vorhanden) Röntgenaufnahmen angefertigt und Chronologien der jährlichen Zuwachsraten sowie qualitative Abschätzungen der Skelettdichten erstellt. Der größte Teil der Mikrobeprobung für die späteren geochemischen und isotopischen Analysen wurde ebenfalls durchgeführt. Erste Messungen von $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$, Mg/Ca und Sr/Ca erfolgten mit dem Ziel, die geeignetsten Proxies zu ermitteln. Mg/Ca erwies sich als ungeeignet, die Messungen wurden daher nicht fortgesetzt. Durch Verbesserungen in der analytischen Methode gelang jedoch die Messung von U/Ca, das eine dem Sr/Ca ähnliche Charakteristik zeigte und daher ins Messprogramm aufgenommen wurde.

Des Weiteren wurde die Auswertung bereits vorhandener geochemischer Daten für eine Kolonie, die während des 16. Jahrhunderts wuchs, vervollständigt. Der Nachweis für den Einfluss der NAO konnte erbracht werden (Kuhnert et al., 2002).

Seitens der Modellierung wurden die verschiedenen zur Verfügung stehenden Proxies hinsichtlich großräumiger Korrelationsmuster untersucht. Dafür wurden Wasseroberflächen-temperaturen (SSTs), Bodendruckwerte (SLP) und Geopotentialwerte in 500 hPa verwendet. Erste Rekonstruktionen wurden durchgeführt: Als erster Schritt wurden die Sr/Ca-Werte der BDA100 Kolonie aus jährlichen SLP-Werten abgeleitet.

I.3.2 Zweites Antragsjahr (Kalenderjahr 2003)

Die Mikrobeprobung der Bermuda-Korallen wurde abgeschlossen und die geochemischen Messungen wurden weitgehend beendet. Aufgrund der Zusammenarbeit mit dem Projekt DEKLIM-Clitrans und dem DFG Forschungszentrum Ozeanränder (RCOM Bremen) wurden rezente und Holozäne Korallen vom Roten Meer zusätzlich ins Messprogramm aufgenommen und Sr/Ca und U/Ca daran bestimmt. Thematische Grundlage der Zusammenarbeit (siehe

auch I.5) bildete die Rekonstruktion des Einflusses der NAO auf die Temperatur-Saisonalität während des Holozäns und des Letzten Interglazials. Diese Rekonstruktion wurde durch eine Kombination von Proxies in Korallen und Modellierung erreicht. Des Weiteren wurden Eiskerndaten aus Grönland mit SLP-Feldern korreliert, um zu untersuchen, ob sie ähnliche Korrelationsmuster aufweisen wie die Bermuda-Korallen.

Erste Versuche zur Rekonstruktion von SST-Feldern wurden durchgeführt. Hierfür wurden zunächst jeweils einzelne Korallenzeitreihen verwendet. Schließlich wurde die Canonische Korrelations Analyse (CCA) getestet. Mit dieser statistischen Methode wurden SLP Felder gefunden, deren Zeitkoeffizienten mit denen der Korallen maximal korreliert sind.

I.3.3 Drittes Antragsjahr (Kalenderjahr 2004)

Sämtliche Messungen wurden abgeschlossen, die Chronologie für Sr/Ca reicht nun zurück bis 1868, diejenige für $\delta^{18}O$ bis 1825. Die Messungen im Rahmen der Kooperation mit DEKLIM-Clitrans und dem RCOM Bremen wurden ebenfalls vervollständigt und beendet. Der Schwerpunkt der Arbeit lag auf der Auswertung und Publikation (bzw. der Vorbereitung derselben) der Ergebnisse (Felis et al., 2004; Kuhnert et al., 2005). Ein wichtiges Ergebnis war die Klärung der Ursache für die Abhängigkeit von Sr/Ca von der NAO. Zwischenzeitlich deuteten Ergebnisse auf einen entscheidenden Einfluss von Änderungen in der chemischen Zusammensetzung der lokalen Wassermasse bei Bermuda hin. Die neuesten im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zeigen jedoch, dass Temperatursignale dominieren, wobei die vertikale Temperaturverteilung in der Wassersäule berücksichtigt werden muss.

Durch Optimierung der Kombination der beiden Wachstumskolonien konnte das Ergebnis der Rekonstruktion von SST-Feldern deutlich verbessert werden. Zusätzlich wurde ein Upscaling Modell für den SLP entwickelt. Das Muster dieses Modells entspricht weitgehend dem der Nordatlantischen Oszillation (NAO) bzw. der Arktischen Oszillation (AO). Mit dem Upscaling Modell ist es möglich, interannuelle Schwankungen der NAO/AO zu rekonstruieren.

Außerdem wurde begonnen, die Korallenzeitreihen mit Daten von Ozean-Atmosphäre-Klimamodellen zu koppeln. Dazu wurden die lokalen SSTs von Bermuda mit den Wachstumsraten einer der Kolonien (BDA 145) verglichen.

I.3.4 Viertes Jahr nach Projektverlängerung (01.01.-31.05.2005)

Die kostenneutrale Projektverlängerung erfolgte, um den verzögerten Projektbeginn eines Projektpartners (Modellierung, GKSS) auszugleichen. Innerhalb des Teilprojekts „Paläodaten“ (Universität Bremen) war die Datenerhebung bereits im Vorjahr abgeschlossen worden, weshalb sich die Arbeiten auf die gemeinsame Auswertung konzentrierten.

Bei der GKSS wurden die Untersuchungen mit Klimamodelldaten fortgesetzt. Das Schwergewicht lag nun auf der Untersuchung der Oberflächenströmung, die mit dem SLP-Muster des Upscaling Modells in Verbindung steht, das wiederum mit dem Korallenwachstum gekoppelt ist. Gleichzeitig wurde an Publikationen gearbeitet.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Nordatlantische bzw. Arktische Oszillation (NAO/AO) stellt eines der wichtigsten Klimaphänomene der Nordhemisphäre dar. Sie beeinflusst maßgeblich das Klima im nordatlantischen Raum (Hurrell, 1995) mit Fernwirkungen ins Mittelmeergebiet und den Nahen Osten (Felis et al., 2000; Hurrell et al., 2003). Rekonstruktionen der NAO-Variabilität beruhen oft auf historischen Aufzeichnungen, Eiskernen und Baumringchronologien (Appenzeller et al., 1998; Cook et al., 1998; Luterbacher et al., 1999; Luterbacher et al., 2002). Während terrestrische und kontinentnahe Archive verhältnismäßig gut untersucht sind, existieren nur wenige Studien aus dem marinen Bereich (Felis et al., 2000; Kuhnert et al., 2002; Schöne et al., 2003). Dabei ist die Wechselwirkung der NAO mit dem Ozean durchaus für das Klimageschehen bedeutsam, beispielsweise hängen Wassertemperaturen und Ozeanzirkulation vom Zustand der NAO ab (Kushnir, 1994; Hurrell et al., 2003; Visbeck et al., 2003). Das CorClim-Projekt trägt dazu bei, diese entscheidende Lücke zu schließen.

Skelette massiver Riffkorallen werden seit über einem Jahrzehnt zur Klimarekonstruktion verwendet. Der Vorteil dieses Archivs besteht in der hohen zeitlichen Auflösung. Abhängig vom gemessenen Parameter kann diese bis zu monatlich oder sogar wöchentlich sein. Die wichtigsten geochemischen Parameter stellen das Verhältnis der stabilen Sauerstoffisotope (ausgedrückt als $\delta^{18}O$) und der Strontium-Gehalt (ausgedrückt als Sr/Ca-Verhältnis) des Skeletts dar (siehe Gagan et al., 2000). Neben anderen Faktoren werden beide Parameter stark durch die Wassertemperatur beeinflusst. Seit kurzem gewinnt auch U/Ca zunehmend an Bedeutung als Temperaturproxy (Min et al., 1995; Shen und Dunbar, 1995; Wei et al., 2000; Hendy et al., 2002). Wachstumsraten werden von zahlreichen Größen beeinflusst, wobei bei Bermuda die Wassertemperatur dominiert (Pätzold et al., 1999). Im Rahmen dieses Vorhabens wurden alle genannten Parameter gemessen, wobei der Schwerpunkt auf Sr/Ca und den Wachstumsraten lag. Somit basiert unsere Klimarekonstruktion weitgehend auf etablierten Proxies.

Die Spurenelementgehalte in Korallenskeletten wurden ursprünglich überwiegend mittels Thermionen-Massenspektrometrie (TIMS) bestimmt; erst in den vergangenen Jahren traten Messmethoden mit Plasmaquelle (ICPMS, ICPAES) hinzu. Die in diesem Vorhaben verwendete ICPMS-Methode hat den Vorteil eines sonst nicht erreichbaren Probendurchsatzes bei gleichzeitig hoher Empfindlichkeit; sie entspricht dem neuesten Stand der Technik.

CorClim greift auch auf frühere Ergebnisse zurück, die mit Hilfe von Bermuda-Korallen gewonnen wurden. Ein großer Teil davon stammt aus den Projekten Paläoklima (BMBF) und MilEclim (EU), an denen Mitarbeiter der Paläo-Gruppe in CorClim (Universität Bremen) beteiligt waren. Diese vorhergehenden Arbeiten befassten sich unter anderem mit der Klimarekonstruktion mit Hilfe von Skelett-Wachstumsraten (Pätzold et al., 1999), Skelettdichten (Draschba et al., 2000) und Skelettchemie und isotopischer Zusammensetzung (Draschba et al., 2000; Cardinal et al., 2001).

Die Verwendung von Korallen zur Klimarekonstruktion beruht meist auf dem Aufstellen einfacher linearer Beziehungen mit lokalen Zeitreihen, z.B. SSTs oder mit Klimaindizes, wie

z.B. NAO und Niño3. Eine Validierung mit unabhängigen Daten war bisher nur selten erfolgt [Crowley et al., 1999; Quinn and Sampson, 2002; Lough, 2004]. Noch nie war eine direkte Kalibrierung von lokalen Korallendaten mit großräumigen ozeanischen oder atmosphärischen Feldern vorgenommen worden. Dies ist im Rahmen des Projektes geschehen, es wurden sowohl statistische Modelle zur Rekonstruktion von SST-, als auch von SLP-Feldern entwickelt. Darüber hinaus erfolgte noch eine Validierung dieser Modelle mit unabhängigen Daten. Damit wurde in diesem Projekt auf vorherige Arbeiten der GKSS aufgebaut, bei der lokale Eiskerndaten mit großräumigen atmosphärischen Feldern gekoppelt wurden.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine sowohl inhaltliche als auch technische Zusammenarbeit fand mit der Arbeitsgruppe von A. Mangini, Heidelberg (Projekt DEKLIM-Eem) statt. Die radiometrischen Datierungen für CorClim wurden von dieser Arbeitsgruppe durchgeführt. Zur Klärung der Frage, ob der Einfluss diagenetischer Veränderungen in Korallen bei der Ermittlung des U/Th-Alters korrigiert werden kann (Scholz et al., 2004), trug CorClim mit der Bereitstellung von Probenmaterial und der Analyse von Dünnschliffen bei. Eine enge Verzahnung bestand mit dem Projekt DEKLIM-Clitrans (G. Lohmann) und dem DFG Forschungszentrum Ozeanränder (RCOM Bremen) aufgrund sich gegenseitig ergänzender Themen (Rekonstruktion der NAO auf jeweils verschiedenen Zeitskalen). Im Rahmen dieser Zusammenarbeit wurden Korallen vom Roten Meer analysiert (Felis et al., 2004).

II Eingehende Darstellung der Ergebnisse und ihrer zukünftigen Verwertbarkeit

II.1 Ergebnisse

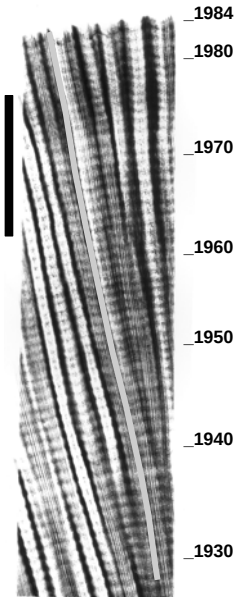
II.1.1 Universität Bremen

Der Hauptteil der Ergebnisse wurde – wie geplant – an Korallen von Bermuda erzielt. Diese werden in den folgenden Abschnitten dargestellt. Die Ergebnisse aus der Zusammenarbeit mit DEKLIM-Clitrans (Rotes Meer) werden gesondert in Abschnitt II.1.1.5 beschrieben.

II.1.1.1 Datengrundlage

Skelettdichte

Skelettdichten wurden am Probenmaterial qualitativ mit Hilfe von digitalen Graustufenprofilen an Radiographien erstellt (Abbildung 2, Abbildung 3). Entgegen früheren Arbeiten (Draschba et al., 2000) konnte keine Korrelation mit Temperatur oder NAO-Index festgestellt werden, deshalb werden die Dichtedaten im Folgenden nicht weiter diskutiert. Sie bilden allerdings eine der Grundlagen für die Ermittlung der Wachstumsraten. Weiterhin dienen sie der Validierung des Altermodells und zur Abgleichung von horizontalen Versätzen im Beprobungsprofil.



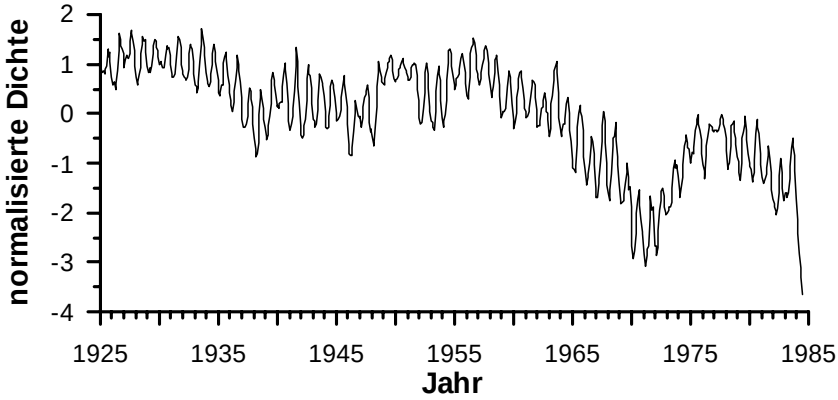


Abbildung 2 (links). Radiographie des jüngsten Abschnitts von Kolonie BDA 100. Länge des Balkens: 5 cm. Die graue Linie markiert das Beprobungsprofil.

Abbildung 3 (rechts). Qualitativ anhand der Radiographie bestimmte Dichte. Die saisonalen Zyklen sind deutlich erkennbar.

Wachstumsraten

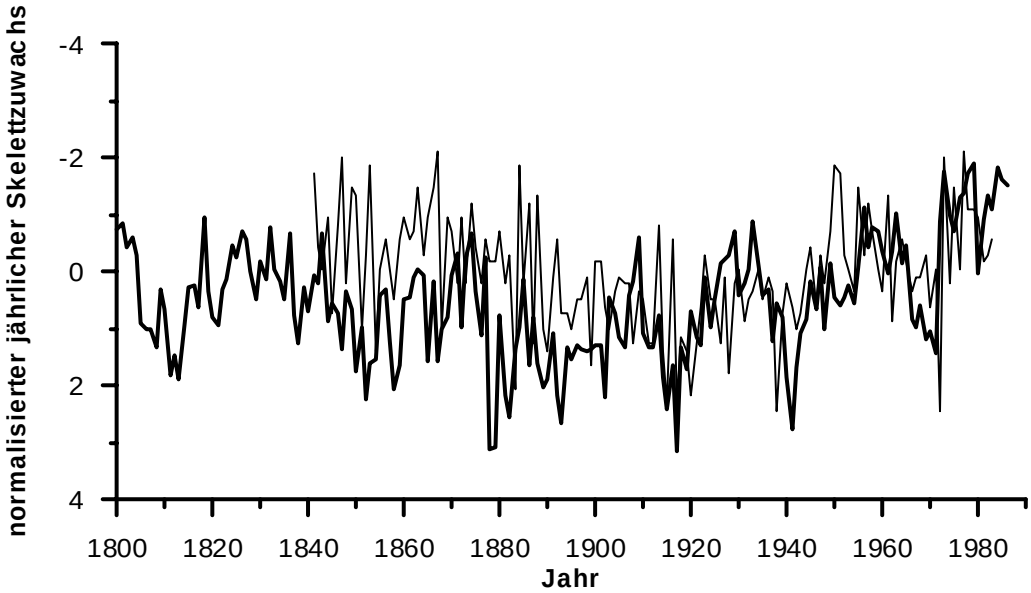


Abbildung 4. Normalisierte jährliche Wachstumsraten für BDA 145 (dicke Linie) und BDA 100 (dünne Linie). Beide Kolonien weisen ungefähr dieselbe mittlere Wachstumsrate auf (etwa 3,5 mm pro Jahr), die Variabilität ist jedoch für BDA 145 deutlich höher.

Wachstumsraten (Abbildung 4) wurden für Kolonie BDA 100 neu ermittelt; diejenigen für BDA 145 stammen aus früheren Vorhaben. Der Überlappungsbereich umfasst den Zeitraum 1840-1983. Wachstumsraten zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Wassertemperatur (siehe II.1.1.2).

Stabile Isotope, Neben- und Spurenelemente

Die isotopische und geochemische Zusammensetzung wurde sowohl für BDA 100, als auch für BDA 145 bestimmt. Allerdings erwiesen sich die Daten für BDA 145 als nicht interpretierbar, weil die zwischenjährliche Variabilität offensichtlich von Vitaleffekten dominiert wurde. Ähnliches gilt für die stabilen Isotope und U/Ca in BDA 100 (Abbildung 5). Hingegen zeigt Sr/Ca deutliche Temperatur- und NAO-Signale (siehe II.1.1.3). Die subrezente Kolonie BDA 18-5 weist keine Überprägung durch Vitaleffekte auf; hier lassen sich $\delta^{18}O$ und Sr/Ca als Temperaturproxies nutzen.

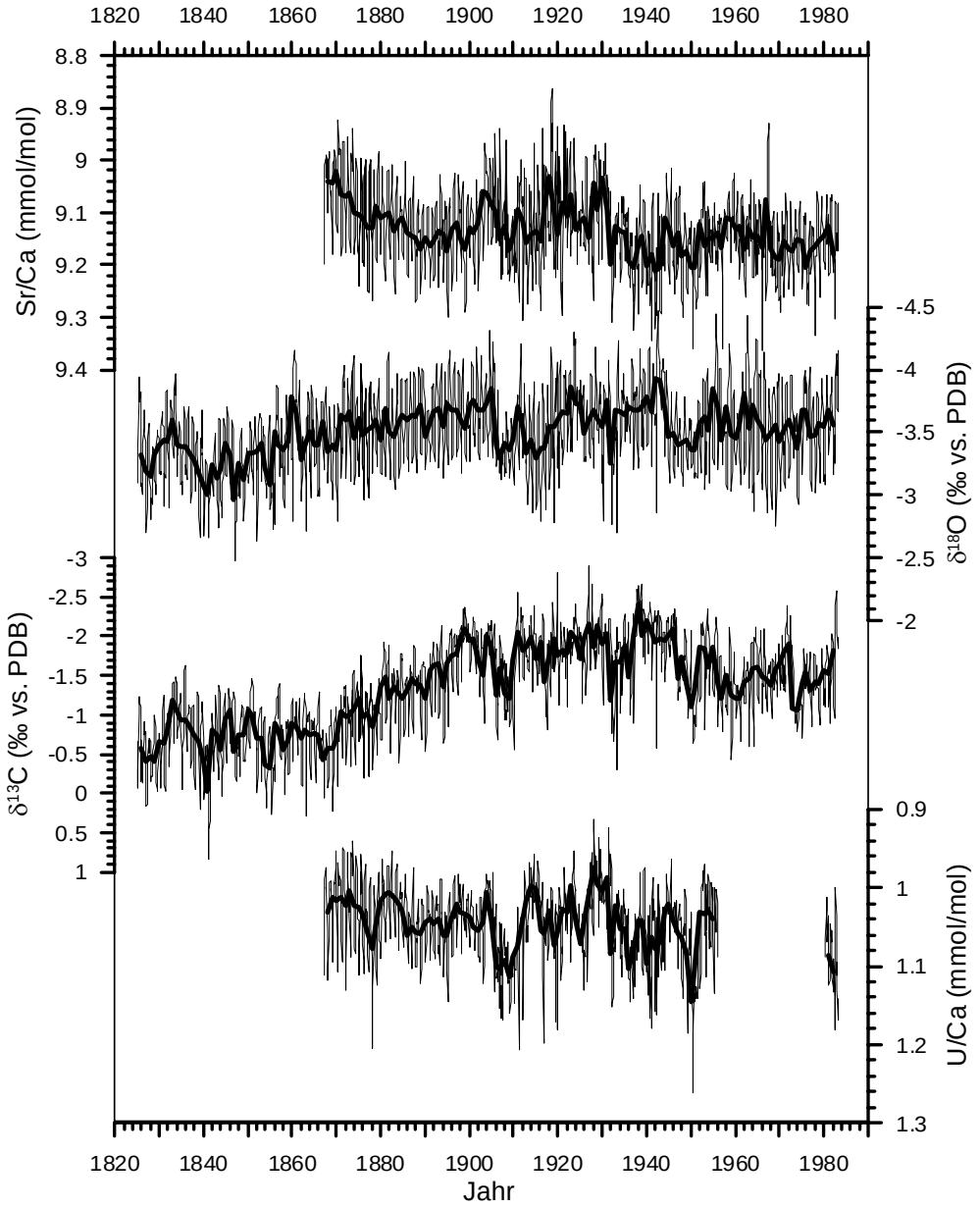


Abbildung 5. Geochemische Proxies von Korallenkolonie BDA100 (*Diploria strigosa*). Die Zeitreihen sind etwa monatlich aufgelöst (dünne Linien). Die dicken Linien repräsentieren Jahresmittel. Sr/Ca und U/Ca wurden auch für den Zeitraum vor 1868 gemessen, jedoch sind die Werte durch Diagenese überprägt und daher nicht dargestellt.

Neben den in I.4 beschriebenen Umweltparametern beeinflusst auch die Stoffwechselaktivität die geochemische und isotopische Zusammensetzung des Korallenskeletts. Dieser „Vitaleffekt“ ist normalerweise entlang der Hauptwachstumsachse konstant (Alibert und McCulloch, 1997). Änderungen entlang dieser Achse können z. B. auftreten, wenn die Umweltbedingungen für das Korallenwachstum wenig optimal sind. Dies trifft auf Bermuda aufgrund der geringen Wintertemperaturen zu; die Lokalität repräsentiert die nördliche Verbreitungsgrenze subtropischer Korallenriffe im Atlantik. Ist eine Variabilität im Vitaleffekt vorhanden, so wirkt dieser meist in gleicher Richtung auf Sr/Ca und $\delta^{18}O$ wie die Temperatur, weil in den meisten Fällen eine verstärkte Stoffwechselaktivität bei höheren Temperaturen zu beobachten ist (beides führt zu negativeren Werten in den genannten Proxies). Für die Bermuda-Korallen ist im interannuellen Bereich jedoch das Gegenteil der Fall. Die Stoffwechselaktivität (erkennbar am jährlichen Skelettzuwachs) ist bei hohen Temperaturen vermindert (verursacht durch Nahrungsmangel). Somit wirkt der Vitaleffekt dem Temperatureffekt entgegengesetzt auf Sr/Ca und $\delta^{18}O$ des Skeletts. Die Größenordnung des Vitaleffekts variiert zwischen den verschiedenen Kolonien und für die verschiedenen Proxies. Daraus erklärt sich auch die unterschiedliche Nutzung – so basiert die Klimarekonstruktion mit Kolonie BDA 100 zum großen Teil auf Sr/Ca, während für Kolonie BDA 18-5 vor allem $\delta^{18}O$ verwendet wurde.

II.1.1.2 Rekonstruktion der Variabilität der Wassertemperatur

Die Jahresmittel für $\delta^{18}O$ und Sr/Ca zeigen zunächst keine klare Beziehung zu den SSTs. Betrachtet man jedoch die einzelnen Quartale eines Jahres getrennt, so lässt sich für das vierte Quartal (Oktober-Dezember; Abbildung 6, Abbildung 7) eine deutliche Abhängigkeit zwischen Sr/Ca in Kolonie BDA 100 und der Wassertemperatur bei Hydrostation S erkennen (Abbildung 6). Die Korrelation über den Zeitraum kontinuierlicher Stationsdaten (1955-1978) beträgt -0.38 für die Temperaturen an der Wasseroberfläche und -0.70 für die Temperaturen in 50 m Wassertiefe. Die höhere Korrelation für die größere Wassertiefe ist bemerkenswert, weil die Korallenkolonie in nur 11 m Wassertiefe gesammelt wurde. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Probenlokalität – im Gegensatz zu Hydrostation S – im Windschatten Bermudas liegt. Es ist sehr wahrscheinlich, dass hier Inseleffekte eine Rolle spielen und zu einer Verflachung der Thermokline im Nordosten Bermudas führen.

Die beschriebene Korrelation mit der 50 m-Temperatur ist ausreichend, um das Signal im Oktober-Dezember- (OND) Sr/Ca zu erklären. Zwischenzeitlich wurde von uns angenommen, dass das Signal vor allem durch Änderungen in der Zusammensetzung der lokalen Wassermasse gesteuert wird. Dies ist offensichtlich nicht der Fall, allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass OND Sr/Ca durch Variationen im Sr/Ca des Meerwassers modifiziert wird.

Während Sr/Ca die Rekonstruktion der Wassertemperatur für den Spätherbst bis Frühwinter ermöglicht, repräsentieren die Wachstumsraten Jahresmitteltemperaturen, wobei vor allem die multidekadische Variabilität wiedergegeben wird. Interessanterweise ist die

Übereinstimmung mit den regionalen SSTs (gemittelt über eine Fläche von 1°x1°) höher als mit den lokalen Stationsdaten. Über den gesamten Zeitraum verfügbarer intrumenteller Messungen (seit 1871; HadISST-Daten) betragen die Korrelationen zwischen Wachstumsraten und Jahresmitteltemperaturen -0.55 für BDA 145 und -0.33 für BDA 100.

II.1.1.3 Rekonstruktion der NAO-Variabilität für das vergangene Jahrhundert

Die NAO beeinflusst maßgeblich die Wassertemperaturen im Nordatlantik. Für Bermuda beträgt beispielsweise die Korrelation r=0.51 zwischen NAO-Index und Oberflächen-Wassertemperatur für den Winter (Mittel über Dezember-Februar für den Zeitraum 1950-1980). Temperaturproxies in Bermuda-Korallen sollten daher Informationen über die NAO-Variabilität beinhalten.

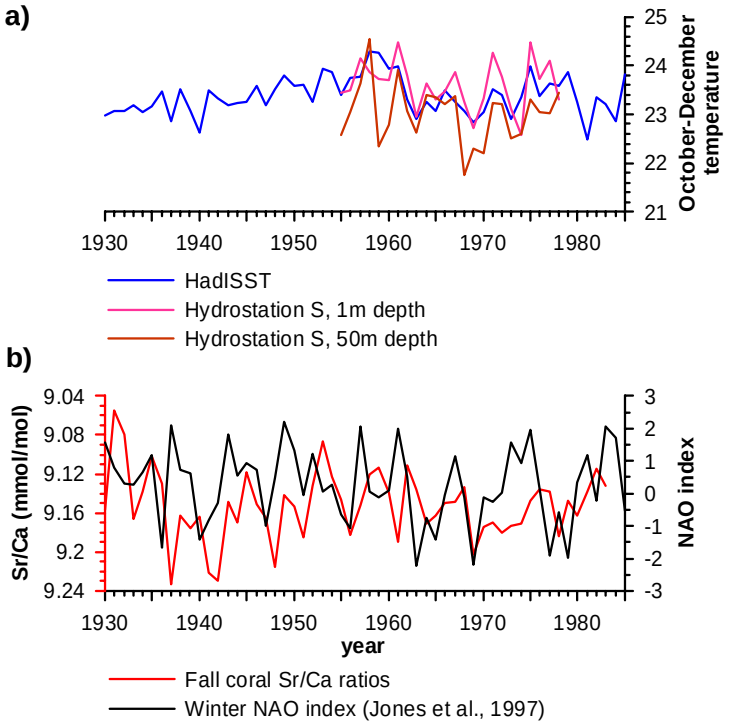


Abbildung 6. a) Vergleich zwischen regionalen Oberflächenwassertemperaturen und Stationsmessungen für Oktober-Dezember (OND) bei Bermuda. HadISST sind über den Bereich 64°W-65°W, 32°N-33°N gemittelt (dieses Gebiet umfasst auch Bermuda). **b)** OND Sr/Ca für Kolonie BDA 100 und Winter-NAO-Index. Die Korrelation zwischen beiden Parametern beträgt -0.50. Sr/Ca korreliert ebenfalls mit der Wassertemperatur, wobei die Korreltion mit den Temperaturen in 50 m Tiefe am größten ist (r=-0.70). Aus Kuhnert et al. (2005).

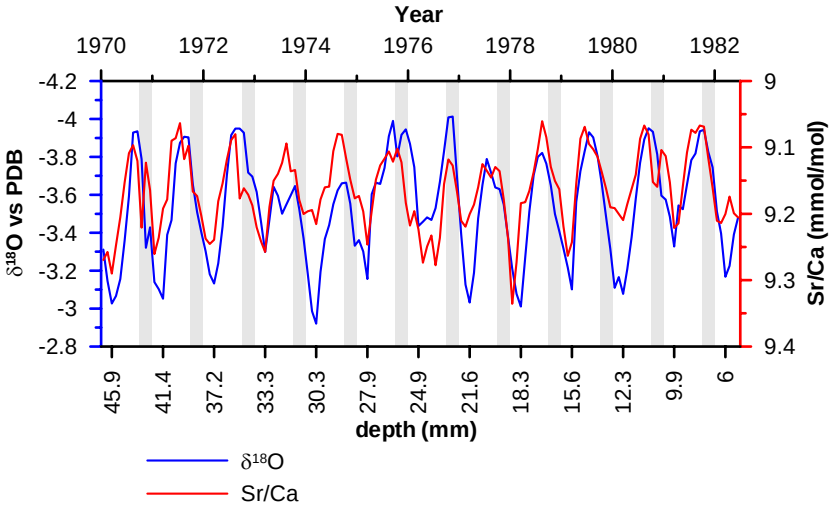


Abbildung 7. Vergrößerte Darstellung der Daten für den jüngsten Abschnitt von Kolonie BDA 100. Die grauen Balken markieren das jeweils vierte Kalenderquartal (Oktober-Dezember, OND) nach dem internen Altersmodell der Chronologie (im $\delta^{18}O$ wird der jeweils schwerste Wert im jährlichen Zyklus dem Monat März zugewiesen, der im Schnitt die niedrigsten Wassertemperaturen aufweist). Die OND-Werte für Sr/Ca werden für die Rekonstruktion der NAO-Variabilität verwendet. Aus Kuhnert et al. (2005).

OND Sr/Ca zeigt eine signifikante Korrelation mit dem Winter-NAO-Index (r=-0.50; Abbildung 6) für den Zeitraum 1928-1982. Das heißt, das atmosphärische Signal wird mit etwa 9-monatiger Verzögerung von der Koralle aufgezeichnet. Wie Spektralanalysen zeigen, beeinflusst die NAO das Sr/Ca hauptsächlich auf subdekadischer (7-8 Jahre) und multidekadischer (27-28 Jahre) Zeitskala. Der Einfluss der NAO wird weiterhin in der Feldkorrelation zwischen Sr/Ca und Bodenluftdruck sichtbar (siehe Ergebnisse des Kooperationspartners am GKSS).

Die gute Übereinstimmung zwischen Sr/Ca und NAOI gilt für den gesamten untersuchten Zeitraum (1868-1982), mit Ausnahme der ersten beiden Dekaden des 20. Jahrhunderts. Für diesen Zeitraum ist auch die Korrelation zwischen NAO-Index und SSTs sehr gering (ca. 0.2). Da die NAO mittelbar über die Änderung der Wassertemperatur das Sr/Ca der Koralle steuert, lässt sich letzteres nur dann als NAO-Proxy verwenden, solange eine Koppelung der Wassertemperaturen an die NAO besteht. Dies ist zwar meistens, aber nicht immer der Fall (z.B. Walter und Graf, 2002).

II.1.1.4 Temperatur-Variabilität während der Kleinen Eiszeit

Korallenmaterial aus der Kleinen Eiszeit zeigt im $\delta^{18}O$ eine SST-Variabilität an, die der heutigen stark ähnelt. Dies gilt sowohl für die Variation der Jahresmitteltemperatur (0.4-0.5 °C), als auch für das Frequenzspektrum (Abbildung 8). Hervorzuheben ist eine signifikante Periode von 7-8 Jahren, die charakteristisch für den Einfluss der NAO ist.

Verglichen mit dem Korallenmaterial aus dem vergangenen Jahrhundert zeigt die Chronologie aus der Kleinen Eiszeit eine im Durchschnitt höhere saisonale Amplitude, die zwischenjährlich wesentlich weniger schwankt.

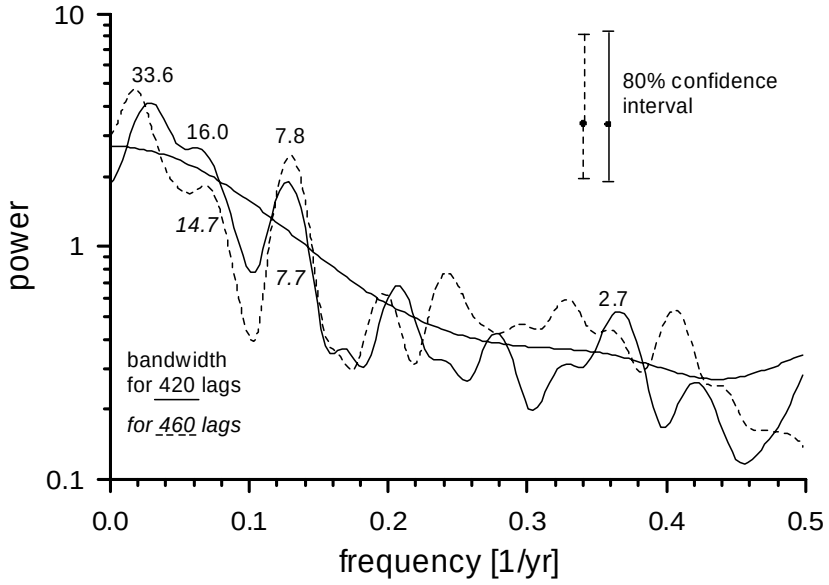


Abbildung 8. Frequenzspektrum monatlicher Anomalien. Durchgezogene Linie: Spektrum von $\delta^{18}O$ (Kolonie BDA 18-5) für den Zeitraum 1520-1603. Der Untergrund wurde als niedrig aufgelöstes Spektrum berechnet. Gestrichelte Linie: Spektrum instrumenteller SSTs (GISST2.2, 1903-1994). Die Zahlen stehen für Perioden in Jahren, wobei sich kursive Zahlen auf die SSTs beziehen. Aus Kuhnert et al. (2002).

II.1.1.5 Einfluss der NAO auf die Temperatursaisonalität während des Holozäns und des Letzten Interglazials

Dieser Teil der Untersuchung entstand in Zusammenarbeit mit dem DFG Forschungszentrum Ozeanränder und dem DEKLIM-Projekt Clitrans. Innerhalb von CorClim wurde die Spurenelement-Analytik durchgeführt.

Das Klima im Nahen Osten wird, trotz der Entfernung dieser Region zum Atlantik, von der NAO beeinflusst (Felis et al., 2000). Im Rahmen der vorgestellten Arbeit wurde versucht, diesen Einfluss mit Proxies aus Korallen sowie Modellierungen für das Letzte Interglazial und das Holozän zu rekonstruieren. Dazu wurden drei rezente Korallen beprobt sowie jeweils eine Kolonie aus dem Holozän (2.9 ka v.h.) und dem Letzten Interglazial (122 ka v.h.). Der augenfälligste Unterschied der Interglazial-Koralle gegenüber den jüngeren Exemplaren ist die deutlich erhöhte Saisonalität im $\delta^{18}O$ und Sr/Ca. Beide Proxies zeigen für das Interglazial einen mittleren Unterschied von 8.4 °C (Abbildung 9) zwischen Sommermaximum- und Winterminimumtemperatur an (bezogen auf Zweimonatsmittel). Die saisonale Amplitude für das Holozän ist deutlich geringer (5.2 °C) und vergleichbar mit der heutigen (4.5-5.6 °C für die Proxies; 5.4 °C für Stationsmessungen nahe der Probenlokalität). Die grundsätzliche Übereinstimmung zwischen $\delta^{18}O$ und Sr/Ca zeigt, dass die Saisonalität im $\delta^{18}O$ des Meerwassers während des Holozäns und Letzten Interglazials ähnlich gering war wie heute. Es gibt also keine Hinweise auf nennenswerte Änderungen im saisonalen Verlauf von Niederschlag und Evaporation.

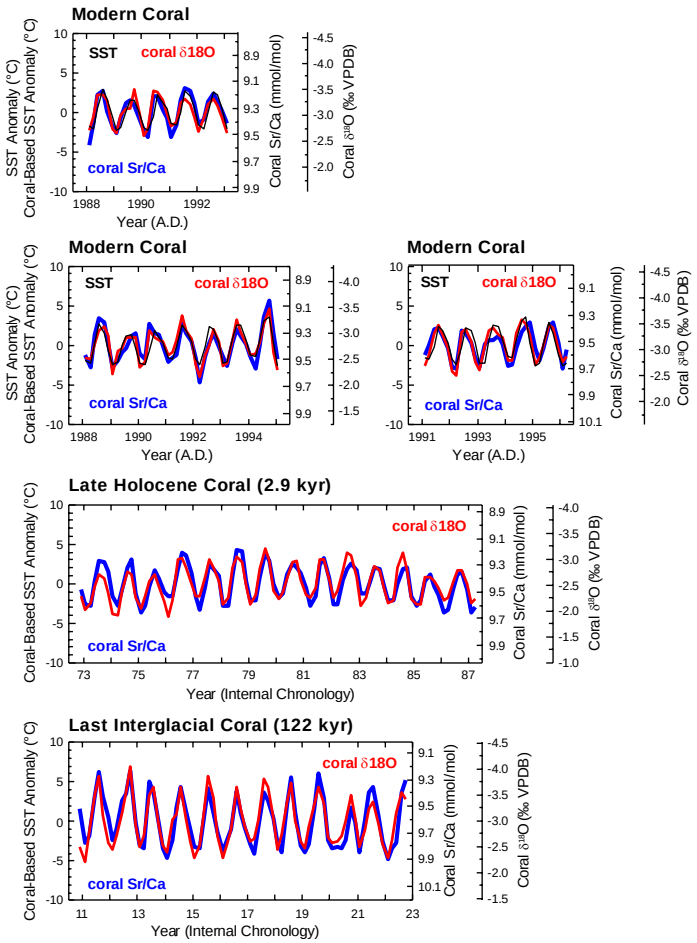


Abbildung 9. Sr/Ca (blau) und $\delta^{18}O$ (rot) aus rezenten, holozänen und interglazialen Korallen vom Roten Meer. Für die rezenten Proben ist zusätzlich die instrumentelle Temperatur zum Vergleich dargestellt (schwarz; Stationsmessungen aus Genin et al., 1995). Die zeitliche Auflösung der Proxydaten ist zweimonatlich. Die Skalierung von Sr/Ca und $\delta^{18}O$ ist identisch bezogen auf das Temperatursignal. Im Gegensatz zu den jüngeren Chronologien weisen die Zeitreihen aus dem Letzten Interglazial eine deutlich erhöhte Saisonalität auf (8.4 °C gegenüber 4.5 bis 5.6 °C). Aus Felis et al. (2004), modifiziert.

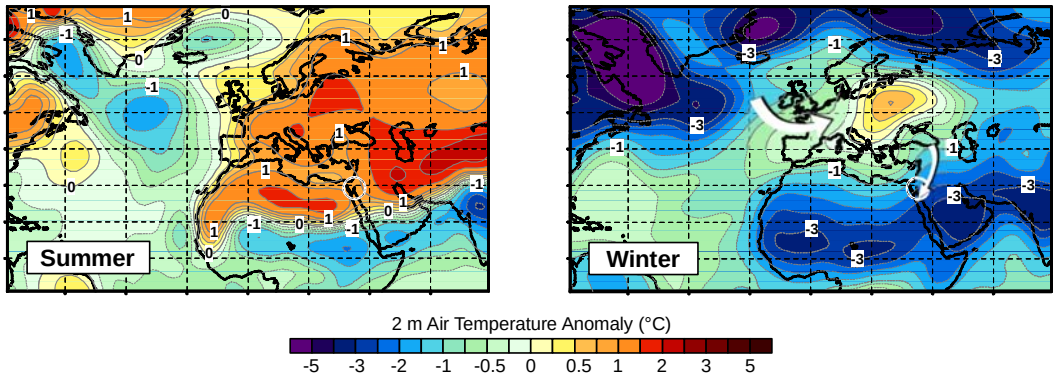


Abbildung 10. Mit dem Modell ECHO-G modellierte Lufttemperatur in 2 m Höhe während des Letzten Interglazials (124 ka B.P.). Darstellung als Anomalie gegenüber heute für den Sommer (links) und den Winter (rechts). Änderungen in der Windrichtung werden schematisch durch Pfeile dargestellt. Das dargestellte Muster mit kühleren Wintern im Nahen Osten und wärmeren Wintern in Osteuropa wird teilweise durch eine verstärkte NAO verursacht. Die Probenlokalität (Golf von Aqaba, nördliches Rotes Meer) wird durch den Kreis markiert. Aus Felis et al. (2004).

Prinzipiell wäre eine erhöhte Temperatursaisonalität für das Letzte Interglazial zu erwarten, weil die Saisonalität der Insolation aufgrund geänderter Orbitalparameter erhöht war. Modellierungen (mit dem Modell ECHO-G; Abbildung 10) zeigen jedoch, dass nur die wärmeren Sommer allein durch Insolationsänderungen erklärbar sind. Niedrigere Wintertemperaturen hingegen werden maßgeblich durch eine Verschiebung des mittleren Zustands der NAO hin zu positiveren Phasen verursacht.

II.1.2 GKSS Geesthacht

II.1.2.1 Daten

Für die Untersuchungen wurden folgende Daten verwendet:

1. Jährliche Wachstumsraten von zwei Korallen aus Bermuda, *Diploria strigosa* (BDA 100) und *Montastrea cavernosa* (BDA 145) von 1841 bis 1983 (Abbildung 11, Abbildung 12).
2. Es wurden jährliche SST-Anomalien berechnet aus den monatlichen Werten der MOHSST5 Daten des U.K. Meteorological Office, die ab 1856 vorliegen (Parker, et al., 1994; Kaplan et al., 1998). Zur Überprüfung der Ergebnisse wurden zusätzlich die COADS SSTs (Woodruff et al., 1987) verwendet, die jedoch nur ab 1900 zur Verfügung stehen.
3. Für den Bodendruck wurden die Daten von NCAR verwendet, gemittelt von Dezember bis Februar (Trenberth and Paolino, 1980). Es wurden auch Rechnungen mit Jahresmittelwerten durchgeführt, für die jedoch schwächere Signale und schlechtere Rekonstruktionen erzielt wurden.
4. Die AOGCM-Daten wurden gewonnen mit dem ECHAM4/HOPE-G Modell mit einem rekonstruierten, natürlichen solaren und vulkanischen Antrieb und anthropogenen Treibhausgasen von 1000 bis 1990 (von Storch et al., 2004).

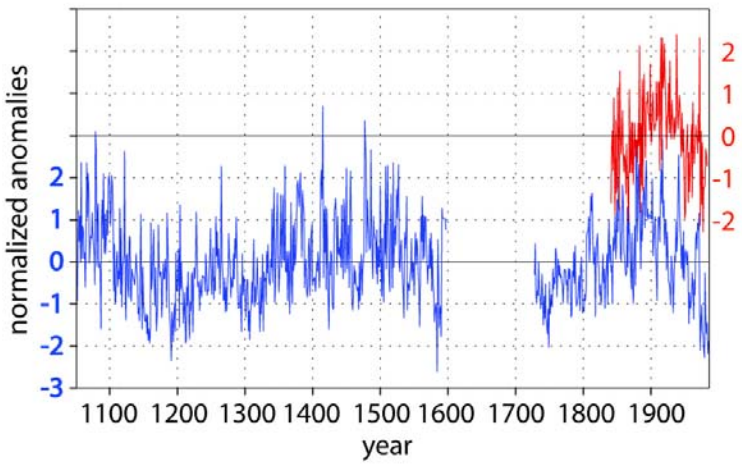


Abbildung 11. Normierte Anomalien der Wachstumsraten der in dieser Arbeit verwendeten Korallen BDA 100 (rot) und BDA 145 (blau), gesamte Länge der Chronologien.

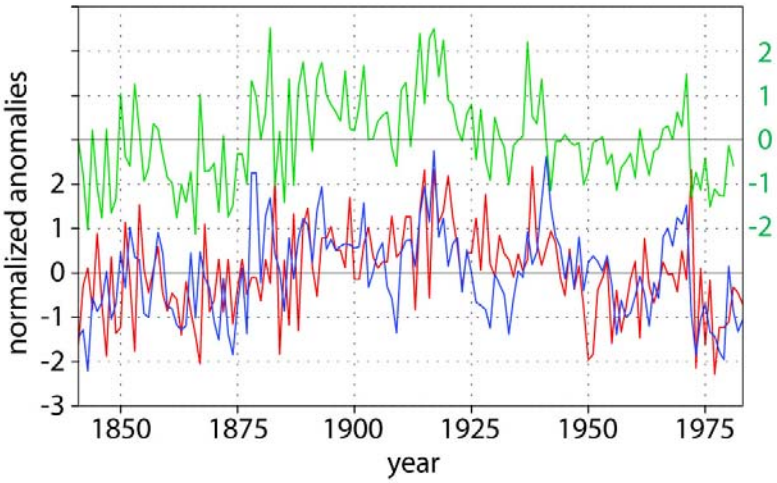


Abbildung 12. Normierte Anomalien der Wachstumsraten für die Überlappungsperiode der beiden Korallen BDA 100 (rot), BDA 145 (blau) und PC1 (grün).

II.1.2.2 Upscaling Modelle

Die Upscaling Modelle basieren auf räumlichen Regressionsmustern zwischen den Korallenzeitreihen und den lokalen SSTs bzw. SLP. Die Zeitkoeffizienten der Muster werden in Beziehung gesetzt werden zu den Korallenzeitreihen. Die Verifizierung dieser statistischen Modelle erfolgte mit einer Kreuzvalidierung (von Storch und Zwiers, 1999).

Upscaling Modell für die SST

Das beste Ergebnis, d.h. die beste Übereinstimmung zwischen Korallen- und SST-Zeitserie, konnte unter Verwendung einer aus beiden Korallen kombinierten Zeitreihe erzielt werden.

Dazu wurden aus den beiden Korallen-Chronologien Empirische Orthogonalfunktionen (EOF) berechnet, deren 1. EOF 71% der Variabilität der Korallen-Zeitreihen erklärt. Die Loadings betragen für beide Korallen-Zeitreihen 0.84 (Abbildung 12). Das Upscaling Modell beruht auf einer linearen Regression zwischen PC1 der Korallen und den Zeitkoeffizienten des SST-Regressionsmusters. Die Zeitreihen wurden mit einem gewichteten, gleitenden Mittel über fünf Jahre geglättet.

Das Regressionsmuster des Upscaling Modells deckt ein Gebiet ab, das vom Golf von Mexiko über die Sargasso See bis 40° W reicht. Die Nord-Süd Ausdehnung erstreckt sich von Neufundland bis zur Karibik. Diese Grenzen bezeichnen auch das Gebiet, in dem die SSTs von den Korallen repräsentiert werden. Abbildung 13a zeigt den Ausschnitt und das Muster der SST, das von der PC1 der Korallen repräsentiert wird. Das Muster ist gekennzeichnet durch einen starken Gradienten mit hohen negativen SST-Anomalien nördlich von Bermuda und Werten um null im Süden und Nordosten des Gebietes. Eine Kreuzvalidierung des Upscaling Modells ergibt, dass knapp 30% der Varianz des SST-Feld-Zeitkoeffizienten von den Korallen beschrieben wird (Abbildung 13b).

Upscaling Modelle basierend auf den einzelnen Korallen-Zeitreihen lieferten ähnliche Grenzen mit nur leicht veränderten Regressionsmustern, jedoch wird ein geringerer Anteil der Varianz der SST-Zeitserien von den Korallen beschrieben. D.h. beide Korallen repräsentieren ähnliche SST-Muster in gleichen Gebieten. Die Verwendung der PC1 als Prädiktor der beiden Wachstums-Zeitreihen führt jedoch zu einer verbesserten Rekonstruktion der Amplitude des SST-Musters.

a) b)

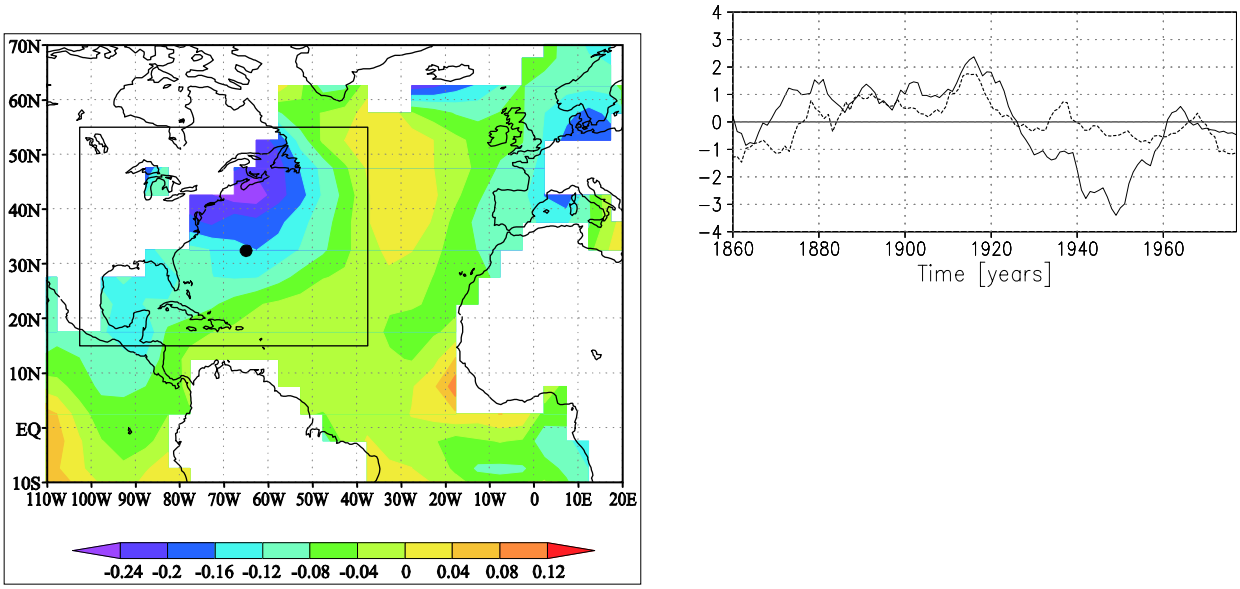


Abbildung 13. Upscaling-Modell für SST-Feld:

a) Ausschnitt und Muster des SST-Feldes, das von den Korallen repräsentiert wird (gekennzeichnet durch das Rechteck), (der Punkt repräsentiert Bermuda) [K]. **b)** Zum Muster des SST-Feldes gehörende Zeitserie (durchgezogen), PC1 der Korallen-Wachstumsraten (gepunktet), validierte Kurven: erklärte Varianz: 29.5%.

Upscaling Modell für den nord-hemisphärischen Bodendruck

Das Upscaling Modell für den Bodendruck basiert auf den Wachstumsraten einer einzelnen Koralle, und zwar von BDA 100. Das Bodendruck-Signal für BDA 145 ist ähnlich, aber schwächer ausgeprägt, d.h. auch die Korrelationen mit lokalen SLP-Werten sind für BDA 145 geringer als für BDA 100. Infolgedessen ist auch das Signal der PC1 nicht so deutlich. Das führt dazu, dass das beste Validierungsergebnis für BDA 100 erzielt wird. Das Regressionsmuster deckt fast die gesamte Nordhalbkugel ab. Es ähnelt dem Bodendruckmuster der Arktischen Oszillation (AO). Die Korrelation von BDA 100 mit dem Index der Arktischen Oszillation ist dementsprechend mit -0.43 relativ hoch und statistisch signifikant, für BDA 145 und PC1 deutlich kleiner. Die BDA 100-Zeitreihe erklärt 21% der Varianz des Regressionsmusters (Abbildung 14a). Dieses Ergebnis kann jedoch nur dann erzielt werden, wenn der lineare Trend der beiden Zeitreihen entfernt wird. Das bedeutet, dass

nur die interannuelle Variabilität des Bodendruckfeldes beschrieben werden kann, jedoch nicht langjährige Schwankungen oder Trends.

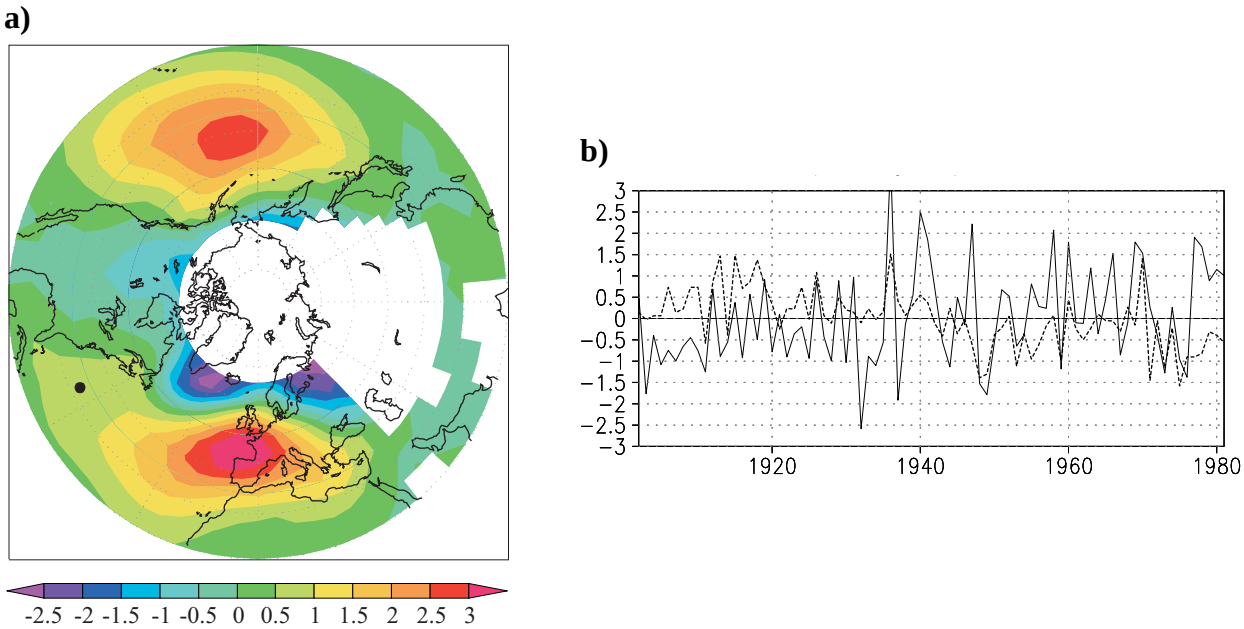


Abbildung 14. Upscaling-Modell für SLP-Feld.

a) Muster des SLP-Feldes, das von den Korallen repräsentiert wird; (skaliert mit -1) [K yr / mm], (mit weiß sind Gebiete mit Datenlücken gekennzeichnet). **b)** Zum Muster des SLP-Feldes gehörende Zeitserie (durchgezogen), BDA 100 Wachstumsraten (gepunktet), validierte Kurven: erklärte Varianz: 21 % (nach Entfernung des linearen Trends).

II.1.2.3 Untersuchungen mit Klimamodelldaten

Ist die Unterbrechung in der BDA 145-Chronologie möglicherweise ein Klimasignal?

Zwischen 1597 und 1728 weist eine der Chronologien (BDA 145) eine Unterbrechung auf (die Zeitpunkte beruhen auf U/Th-Datierungen, sowie zusätzlich auf der Skelettchronologie für das jüngere Datum). Die ursprüngliche Kolonie starb ab und wurde 1729 von einer Kolonie der gleichen Art überwachsen. Das Absterben dieser Koralle 1597+/-15 stimmt mit dem Beginn einer nordhemisphärischen Kälteperiode, des Maunder Minimums, überein. Da die mittleren Winter-Minimum-Temperaturen in Bermuda ca. 19°C betragen, was nur minimal über der Überlebensgrenze der Korallen von 18°C liegt, könnte das Absterben durch eine Verschlechterung der Lebensbedingungen aufgrund niedriger Wassertemperaturen verursacht worden sein. Um zu überprüfen, ob diese Möglichkeit besteht, wurden die Winter-SSTs bei Bermuda einer Klimasimulation untersucht. Es zeigte sich, dass zu der Zeit, als die Koralle starb, die niedrigsten Temperaturen der gesamten Simulation herrschten (Abbildung 15). Diese Abkühlung hätte zwar nicht notwendigerweise ein Absterben des Riffs, jedoch eine erhöhte Korallen-Mortalität zur Folge gehabt. Nach einer ungefähr 100 Jahre dauernden Phase mit niedrigen Temperaturen steigt die SST kontinuierlich an, so dass die günstiger gewordenen Umweltbedingungen ein verstärktes Korallenwachstum ermöglichten.

Um die These zu stützen, dass eine erhöhte Mortalität der Korallen auch ein Klimasignal sein kann, müssen noch weitere AOGCM-Läufe und Korallen untersucht werden.

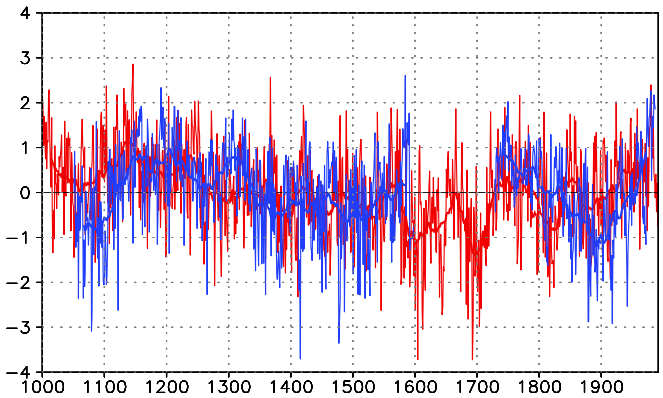


Abbildung 15. Jährliches Korallenwachstum (BDA 145) (blau) (skaliert mit -1) und Winter-SST bei Bermuda aus AOGCM-Lauf (rot), Anomalien der normierten Zeitreihen.

Untersuchung der Oberflächenströmungen eines AOGCM-Laufs in Abhängigkeit vom Korallenwachstum

Sowohl die Korrelationsberechnungen als auch die Upscaling Modelle weisen darauf hin, dass die Korallen auf das hemisphärische SLP-Signal mit einer Verzögerung von ungefähr einem Jahr reagieren, während SSTs und Korallen zeitlich synchron variieren. D.h. offenbar übt die Atmosphäre einen Einfluss auf die Nord-Atlantische Zirkulation aus, der sich in Bermuda erst mit Verzögerung auswirkt (Curry and McCartney, 2001).

Um die verzögerte Reaktion der Ozean-Zirkulation auf das SLP-Regressionsmuster des Upscaling Modells zu untersuchen, wurden Daten eines AOGCM-Laufs verwendet, der einen vollständigen, physikalisch konsistenten Datensatz liefert. Es wurde ein Composite Zirkulationsmuster berechnet, das über das SLP-Regressionsmuster (s. Abbildung 14a) mit dem Korallenwachstum von BDA 100 gekoppelt ist (Abbildung 16). Dieses Muster zeigt, dass ein vermehrtes Wachstum der Koralle auftritt, wenn sich der Golfstrom im Bereich der US-Küste abschwächt bzw. nach Süden verlagert. Unmittelbar nördlich von Bermuda kommt es zu einer Verstärkung der Nordostströmung, im Süden dagegen zu einer intensiveren Westströmung. Ein erhöhtes Korallenwachstum ist dem AOGCM-Lauf zu Folge also gekoppelt mit einer verstärkten Zirkulation um Bermuda und Golfstromschwankungen. Das bedeutet also, dass Bermuda-Korallen auch Golfstrom-Schwankungen aufzeichnen.

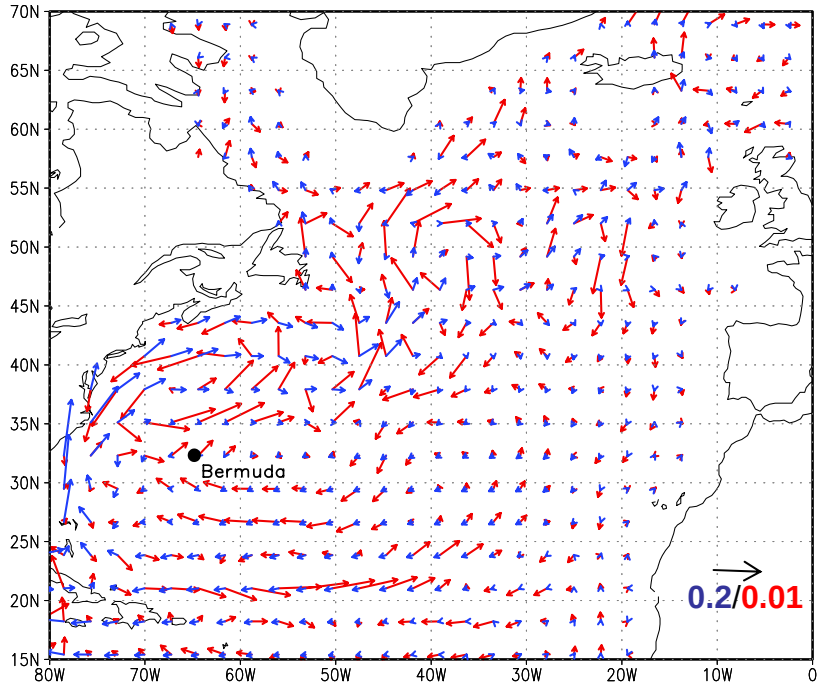


Abbildung 16. Rot: Composite Geschwindigkeitsmuster (100 m Tiefe) bezogen auf das 1.5-fache der Standardabweichung der Projektion des SLP-Regressionsmusters (Abbildung 14) auf den SLP der AOGCM-Simulation. Das abgebildete Composite-Muster ist mit positiven Wachstumsanomalien der Koralle (BDA 100) gekoppelt. Blau: Mittleres Geschwindigkeitsfeld. (Beachte die unterschiedlichen Maßstäbe der Pfeile).

II.2 Voraussichtlicher Nutzen

Der voraussichtliche Nutzen entspricht im Wesentlichen den Angaben zur Fortschreibung des Verwertungsplans (siehe Zwischenbericht 2004).

Im Rahmen des Projekts wurden gezielt lokale Proxyzeitreihen mit großräumigen Klima-Modellierungen verknüpft. Dadurch wurde die Grundlage geschaffen, um zukünftig mit einer verhältnismäßig geringen Anzahl von Messdaten und –punkten die langfristige Vorhersagbarkeit des Klimas und die kurzfristige Vorhersagbarkeit des Wetters im Nordatlantischen Raum zu verbessern. Durch die Verwendung der rekonstruierten Klimamuster in Klimamodellen werden globale Rekonstruktionen für die gesamte Atmosphäre gewonnen und (Paläo-) Prozessstudien ermöglicht. Eine Koppelung mit Proxy-Daten aus anderen Teilen der Welt lässt eine zunehmend höhere Verlässlichkeit der Klimarekonstruktionen auch für lange Zeitskalen erwarten.

Die Proxydaten sind in der PANGAEA-Datenbank archiviert und somit öffentlich zugänglich.

In diesem Projekt wurde eine statistisch abgesicherte Kalibrierung der Korallen-Daten mit den Koeffizienten von SST- und SLP-Feldern durchgeführt. Damit wurde auch die Frage geklärt, wie groß die räumliche Repräsentanz der Korallen hinsichtlich der Klima-Parameter ist. Zudem hat die Validierung der statistischen Modelle gezeigt, dass eine Rekonstruktion basierend auf Proxy-Daten nur bedingt eine Abschätzung multidekadischer Schwankungen

bzw. langzeitlicher Trends ermöglicht, auch wenn eine Korrelation zwischen Proxy- und Klimazeitreihe statistisch signifikant ist.

Die Verbindung zwischen beobachteten Korallen und simulierten Modellläufen ist ein Schritt zum besseren Verständnis des Korallenwachstums, das nur indirekt mit der SST gekoppelt ist. Die Versorgung mit Nährstoffen, die das Korallenwachstum direkt beeinflusst, ist von den Ozeanströmungen abhängig. Die mit dem Korallenwachstum gekoppelten Oberflächenströmungen konnten mit Hilfe des Klimamodelllaufs bestimmt werden. Dabei zeigte sich, dass eine Verbindung besteht zwischen dem Korallenwachstum in Bermuda und der Lage des Golfstroms. D.h., Bermuda-Korallen stellen auch ein Archiv für den Golfstrom dar. In zukünftigen Arbeiten können daher Bermuda-Korallen für die Rekonstruktion der Ozeandynamik verwendet werden.

II.3 Berücksichtigung neuer Ergebnisse

Während der Laufzeit des Vorhabens wurde von Cohen et al. (2004) eine kurze (die letzten 35 Jahre umfassende) Korallenchronologie von Bermuda vorgestellt. Diese Daten zeigen einen Bezug zur NAO, allerdings besteht, im Gegensatz zu den in CorClim erzeugten Daten, kein nennenswerter zeitlicher Versatz zwischen dem atmosphärischen Signal und dem Zeitpunkt der Aufzeichnung im Korallenskelett. Diese Diskrepanz gab den entscheidenden Hinweis, stärker auf lokale Besonderheiten einzugehen. Im genannten Fall ließen sich die Unterschiede durch die jeweils luv- und leeseitigen Lagen der Probenlokalitäten und die daraus resultierenden Unterschiede in der vertikalen Struktur und Durchmischung der Wassersäule erklären (Kuhnert et al., 2005).

II.4 Veröffentlichung der Ergebnisse

II.4.1 Aus dem Vorhaben heraus entstandene Publikationen

Crüger T., von Storch H. (2002) Creation of "Artificial Ice Core" accumulation from large-scale GCM data: description of the Downscaling Method and application to one North Greenland ice core. Clim. Res., 20, 141-15.

Crüger T., Fischer H., von Storch H. (2004) What do accumulation records of single ice cores in Greenland represent?, J. Geophys. Res., 109. D21110, doi:10.1029/2004JD005014.

Crüger T., Kuhnert H., Pätzold J., Zorita E. (2005) Upscaling models for SST and SLP fields based on Bermuda corals and implications for climate reconstructions. J. Geophys. Res. (eingereicht).

Felis T., Lohmann G., Kuhnert H., Lorenz S.J., Scholz D., Pätzold J., Al-Rousan S.A., Al-Moghrabi S.M. (2004) Increased seasonality in Middle East temperatures during the last interglacial period. Nature 429, 164-168.

Kuhnert H., Crüger T., Pätzold J. (2005) NAO signature in a Bermuda coral Sr/Ca record. Geochem., Geophys., Geosys. 6, doi: 10.1029/2004GC000786.

Kuhnert H., Pätzold J., Schnetger B., and Wefer G. (2002) Sea-surface temperature variability in the 16th century at Bermuda inferred from coral records. Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol. 179, 159-171.

Rimbu N., Lohmann G., Felis T., Pätzold J. (2003) Shift in ENSO teleconnections recorded by a Northern Red Sea coral. J. Climate, 16, 1414-1422.

von Storch H., Zorita E., Jones J.M., Dimitriev Y., Gonzalez-Rouco, F., Tett, S.F.B. (2004) Reconstructing past climate from noisy data. Science 306, 679-682.

II.4.2 Tagungsbeiträge und sonstige Veröffentlichungen

Crüger T., Kuhnert H. (2002) Korallenchronologien des subtropischen Nordatlantiks (CorClim). DEKLIM Paläoklima-Treffen, Bremen, 18.-19. November 2002, Poster und Vortrag.

Crüger T., Kuhnert H., Pätzold J. (2002) Korallenchronologien aus Bermuda als Proxy für das Nordatlantische Klima. Internes Seminar des Instituts für Küstenforschung, Weißenhäuser Strand, 11.-14. November 2002, Vortrag.

Crüger T., Kuhnert H., Pätzold J. (2003) Bermuda Corals as Proxies for the Sargasso Sea SST and the North Atlantic Climate. International Conference on Earth System Modelling, Hamburg, 15.-19. September 2003, Vortrag.

Crüger T., Kuhnert H., Pätzold J. (2003) Korallen aus Bermuda als Proxies für die SST der Sargasso See und den Nord-Atlantischen Bodendruck. 6. Deutsche Klimatagung, Potsdam, 22.-25. September 2003, Terra Nostra 2003/6, 104-106, Vortrag.

Crüger T., Kuhnert H., Pätzold J. (2003) Rekonstruktion Nordatlantischer Klimamuster aus Korallen von Bermuda. DEKLIM Statusseminar, Bad Münstereifel, 6.-8. Oktober 2003, Poster.

Crüger T., Kuhnert H., Pätzold J., v. Storch H., Zorita E., Wefer G. (2003) Coral climate history of the subtropical North Atlantic (CorClim) – High resolution proxy records from Bermuda. DEKLIM Statusseminar, Bad Münstereifel, 6.-8. Oktober 2003, 13-19.

Crüger T., Kuhnert H., Pätzold J., Zorita E., v. Storch, H. (2004) Hemispheric sea level pressure patterns recorded in corals from Bermuda. EGU 1st general assembly, Nizza, 25.-30. April 2004, Poster.

Crüger T., von Storch H. (2003) Single Ice Cores from Greenland: What do Accumulation Records Represent ? International Conference on Earth System Modelling, Hamburg, 15.-19. September 2003, Poster.

Crüger T., Kuhnert H., Pätzold J., Zorita E., v. Storch, H. (2005) Upscaling Models for SST and SLP Patterns Based on Bermuda Corals. DEKLIM PAGES Conference, Mainz, 7. -10 März 2005.

Crüger T., H. Fischer, H. von Storch (2005) Ice accumulation in Greenland mainly determined by atmospheric circulation. EGU General Assembly 2005, Wien, 24.-29. April 2005, Poster.

Crüger T., H. Kuhnert, J. Pätzold, E. Zorita, H. v. Storch (2005) Bermuda-Korallen: Rekonstruktion großräumiger Muster der Wasser-Oberflächen-Temperatur und des Bodendrucks, DEKLIM Abschlusssymposium, Leipzig, 10.-12. Mai 2005, Poster.

Felis T., Kuhnert H., Pätzold J., Pfeiffer M., Zinke J. (2002) Practical session on corals. Helmert Summerschool, Potsdam, 12.-18. September 2002, Vorträge und praktische Übungen.

Kuhnert H., Crüger T., Pätzold J. (2003) Bermuda coral records of North Atlantic climate variability. EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nizza, 6.-11. April 2003, Poster.

Kuhnert H., Crüger T., Pätzold J. (2004) NAO signature in a Bermuda coral Sr/Ca record. 8th International Conference on Paleoceanography, Biarritz, 5.-10. September 2004, Poster.

Kuhnert H., Crüger T., Pätzold J. (2004) Bermuda-Korallen: Rekonstruktion von SLP (NAO) und SST und Relation zu Oberflächenströmungen eines OAGCM-Laufs. DEKLIM Paläoklima-Treffen, Bremerhaven, Oktober 2004, Poster und Vortrag.

Kuhnert H., Crüger T., Pätzold J. (2005) NAO variability in a Bermuda coral Sr/Ca record. DEKLIM-Pages Conference, Mainz, 7.-10. März 2005, Poster.

Kuhnert H., Pätzold J. (2003) Klimasignale in Korallen von Bermuda. DEKLIM Statusseminar, Bad Münstereifel, 6.-8. Oktober 2003, Poster.

Kuhnert H., Pätzold J., Crüger T. (2003) Bermuda coral records of North Atlantic climate variability. 6. Deutsche Klimatagung, Potsdam, 22.-25. September 2003, Terra Nostra 2003/6, 267-269, Poster.

Kuhnert H., Pätzold J., Wefer G. (2002) Little Ice Age climate variability reconstructed from Bermuda coral records. GEO 2002, Würzburg, 1.-5. Oktober 2002, 210, Poster.

Kuhnert H., Pätzold J., Zorita E., Felis T., Gonzalez-Rouco F., von Storch H., Wefer G. (2002) Korallenchronologien des subtropischen Nordatlantiks (CorClim) - Hochauflösende Proxyzeitreihen von Bermuda. DEKLIM Kickoff-Treffen, Bad Honnef, 25.-26. Februar 2002, 30, Poster und Vortrag.

Pätzold J., Crüger T., Kuhnert H. (2003) Coral records of North Atlantic Subtropical Gyre variability. Annually-Banded Records in the Quaternary, Bangor, 7.-9. Januar 2003, 42, Poster.

Pätzold J., Kuhnert H., Crüger T., v. Storch H., Zorita E. (2004) Coral climate history of the subtropical North Atlantic (Corclim). PAGES News 12, 31.

II.5 In I. und II. zitierte Literatur

Alibert C., McCulloch M. T. (1997) Strontium/calcium ratios in modern *Porites* corals from the Great Barrier Reef as a proxy for sea surface temperature: Calibration of the thermometer and monitoring of ENSO. Paleoceanography 12, 345-363.

Appenzeller C., Stocker T. F., Anklin M. (1998) North Atlantic Oscillation dynamics recorded in Greenland Ice Cores. Science 282, 446-449.

Cohen A. L., Smith S. R., McCartney M. S., van Etten J. (2004) How brain corals record climate: an integration of skeletal structure, growth and chemistry of *Diploria labyrinthiformis* from Bermuda. Mar. Ecol. Prog. Ser. 271, 147-158.

Cook E. R., D'Arrigo R. D., Briffa K. R. (1998) A reconstruction of the North Atlantic Oscillation using tree-ring chronologies from North America and Europe. Holocene 8, 9-17.

Crowley T. J., Quinn T. M., and Hyde W. T. (1999) Validation of coral temperature calibrations. Paleoceanography 14, 605-615.

Crüger T., Fischer H., von Storch H. (2004) What do accumulation records of single ice cores in Greenland represent?, J. Geophys. Res., 109. D21110, doi:10.1029/2004JD005014.

Curry R. G. and McCartney M. S. (2001) Ocean gyre circulation changes associated with the North Atlantic Oscillation. J. Phys. Oceanogr. 31, 3374-3400.

Draschba S., Pätzold J., Wefer G. (2000) North Atlantic climate variability since AD 1350 recorded in $\delta^{18}O$ and skeletal density of Bermuda corals. Int. J. Earth Sci. 88, 733-741.

Felis T., Pätzold J., Loya Y., and Wefer G. (1998) Vertical water mass mixing and plankton blooms recorded in skeletal carbon isotopes of a Red Sea coral. J. Geophys. Res. 103C, 30731-30739.

Felis T., Pätzold J., Loya Y., Fine M., Nawar A. H., Wefer G. (2000) A coral oxygen isotope record from the northern Red Sea documenting NAO, ENSO, and North Pacific teleconnections on Middle East climate variability since the year 1750. Paleoceanography 15, 679-694.

Felis T., Pätzold J., Loya Y. (2003) Mean oxygen-isotope signatures in *Porites* spp. corals: inter-colony variability and correction for extension-rate effects. Coral Reefs 22, 328-336.

Felis T., Lohmann G., Kuhnert H., Lorenz S. J., Scholz D., Pätzold J., Al-Rousan S. A., Al-Moghrabi S. (2004) Increased seasonality in Middle East temperatures during the last interglacial period. Nature 429, 164-168.

Gagan M. K., Ayliffe L. K., Beck J. W., Cole J. E., Druffel E. R. M., Dunbar R. B., Schrag D. P. (2000) New views of tropical paleoclimates from corals. Quat. Sci. Rev. 19, 45-64.

Genin A., Lazar B., Brenner S. (1995) Vertical mixing and coral death in the Red Sea following the eruption of Mount Pinatubo. Nature 377, 507-510.

Hendy E. J., Gagan M. K., Alibert C. A., McCulloch M. T., Lough J. M., Isdale P. J. (2002) Abrupt decrease in tropical Pacific sea surface salinity at end of Little Ice Age. Science 295, 1511-1514.

Hurrell J. W. (1995) Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. Science 269, 676-679.

Hurrell J. W., Kushnir Y., Ottersen G., Visbeck M. (2003) An overview of the North Atlantic Oscillation. In The North Atlantic Oscillation, Vol. 134 (ed. J. W. Hurrell, Y. Kushnir, G. Ottersen, M. Visbeck), pp. 1-36. AGU monograph series.

Jones P. D., Jónsson T., Wheeler D. (1997) Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland. Int. J. Climatol. 17, 1433-1450.

Jones, J.M., Widmann M. (2003) Instrument- and tree-ring-based estimates of the Antarctic Oscillation, J. Clim., 16, 3511-3524.

Kaplan A., Cane M. A., Kushnir Y., Clement A. C., Blumenthal M. B., and Rajagopalan B. (1998) Analyses of global sea surface temperature 1856-1991. J. Geophys. Res. 103C, 18567-18589.

Kuhnert H., Pätzold J., Hatcher B. G., Wyrwoll K.-H., Eisenhauer A., Collins L. B., Zhu Z. R., Wefer G. (1999) A 200-year coral stable oxygen isotope record from a high-latitude reef off Western Australia. Coral Reefs 18, 1-12.

Kuhnert H., Pätzold J., Wyrwoll K.-H., Wefer G. (2000) Monitoring climate variability over the past 116 years in coral oxygen isotopes from Ningaloo Reef, Western Australia. Int. J. Earth Sci. 88, 725-732.

Kuhnert H., Pätzold J., Schnetger B., Wefer G. (2002) Sea-surface temperature variability in the 16th century at Bermuda inferred from coral records. Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol. 179, 159-171.

Kuhnert H., Crüger T., Pätzold J. (2005) NAO signature in a Bermuda coral Sr/Ca record. Geochem., Geophys., Geosyst. 6, Q04004, doi: 10.1029/2004GC000786.

Kushnir Y. (1994) Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions. J. Climate 7, 141-157.

Lough J. (2004) A strategy to improve the contribution of coral data to high-resolution paleoclimatology. Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol. 204, 115-143.

Luterbacher J., Schmutz C., Gyalistras D., Xoplaki E., Wanner H. (1999) Reconstruction of monthly NAO and EU indices back to AD 1675. Geophys. Res. Lett. 26, 2745-2748.

Luterbacher J., Xoplaki E., Dietrich D., Jones P. D., Davies T. D., Portis D., Gonzalez-Rouco J. F., von Storch H., Gyalistras D., Casty C., Wanner H. (2002) Extending North Atlantic Oscillation reconstructions back to 1500. Atmos. Sci. Lett. 2, 114-124.

Min G. R., Edwards R. L., Taylor F. W., Recy J., Gallup C. D., Beck J. W. (1995) Annual cycles of U/Ca in coral skeletons and U/Ca thermometry. Geochim. Cosmochim. Acta 59, 2025-2042.

Pätzold J., Bickert T., Flemming B., Grobe H., Wefer G. (1999) Holozänes Klima des Nordatlantiks rekonstruiert aus massiven Korallen von Bermuda. Natur und Museum 129, 165-177.

Pätzold J. (1984) Growth rhythms recorded in stable isotopes and density bands in the reef coral Porites lobata (Cebu, Philippines). Coral Reefs 3, 87-90.

Parker D.E., Jones P.D., Folland C.K.., Bevan A. (1994) Interdecadal changes of surface temperature since the late nineteenth century. J. Geophys. Res., 99, 14373-14399.

Quinn, T.M., Sampson D.E. (2002) A multiproxy approach to reconstructing sea surface conditions using coral skeleton geochemistry. Paleoceanography, 17, 1062, doi:10.1029/2000PA000528.

Scholz D., Mangini A., Felis, T. (2004) U-series dating of diagenetically altered fossil reef corals. Earth Planet. Sci. Lett., 218, 163-178.

Schöne B. R., Oschmann W., Rössler J., Castro A. D. F., Houk S. D., Kröncke I., Dreyer W., Janssen R., Rumohr H., Dunca E. (2003) North Atlantic Oscillation dynamics recorded in shells of a long-lived bivalve mollusk. Geology 31, 1037-1040.

Shen G. T., Dunbar R. B. (1995) Environmental controls on uranium in reef corals. Geochim. Cosmochim. Acta 59, 2009-2024.

Trenberth K.E., Paolino D.A. (1980) The northern hemisphere sea-level pressure data set: Trends, errors and discontinuities. Mon. Weather Rev. 108, 855-872.Visbeck M., Chassignet E. P., Curry R. G., Delworth T., Dickson R., Krahmann G. (2003) The ocean's response to North Atlantic Oscillation variability. In The North Atlantic Oscillation, Vol. 134 (ed. J. W. Hurrell, Y. Kushnir, G. Ottersen, M. Visbeck), pp. 113-145. AGU monograph series.

von Storch H., Zwiers F.W. (1999) Statistical Analysis in Climate Research, Cambridge University Press, ISBN 0521 45071 3, 494 pp.

von Storch, H., Zorita E., Jones J.M., Dmitriev Y., Tett S.F.B. (2004) Reconstructing past climate from noisy data. Science, 306, 679-682.

Walter K., Graf H.-F. (2002) On the changing nature of the regional connection between the North Atlantic Oscillation and sea surface temperature. J. Geophys. Res., 107D, 4338, doi: 10.1029/2001JD000850.

Wei G., Sun M., Li X., Nie B. (2000) Mg/Ca, Sr/Ca and U/Ca ratios of a porites coral from Sanya Bay, Hainan Island, South China Sea and their relationships to sea surface temperature. Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol. 162, 59-74.

Widmann M., Jones J. M., von Storch H. (2004) Reconstruction of large-scale atmospheric circulation and data assimilation in paleoclimatology. PAGES News, 12, 12-13.

Woodruff S.D., Slutz R.J., Jenne R.L., Steurer P.M. (1987) A Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set. Bull. Am. Met. Soc., 68, 1239-1250.