



Unterwasserbild eines modernen Korallenriffs in den Malediven (oben). Unterwasserbild eines modernen Korallenriffs in der Karibik (unten). Der indo-Pazifische und Atlantische Bereich sind durch vollständig unterschiedliche Korallenarten charakterisiert.



Das Gedächtnis der Meere

Korallenriffe speichern Klimadaten

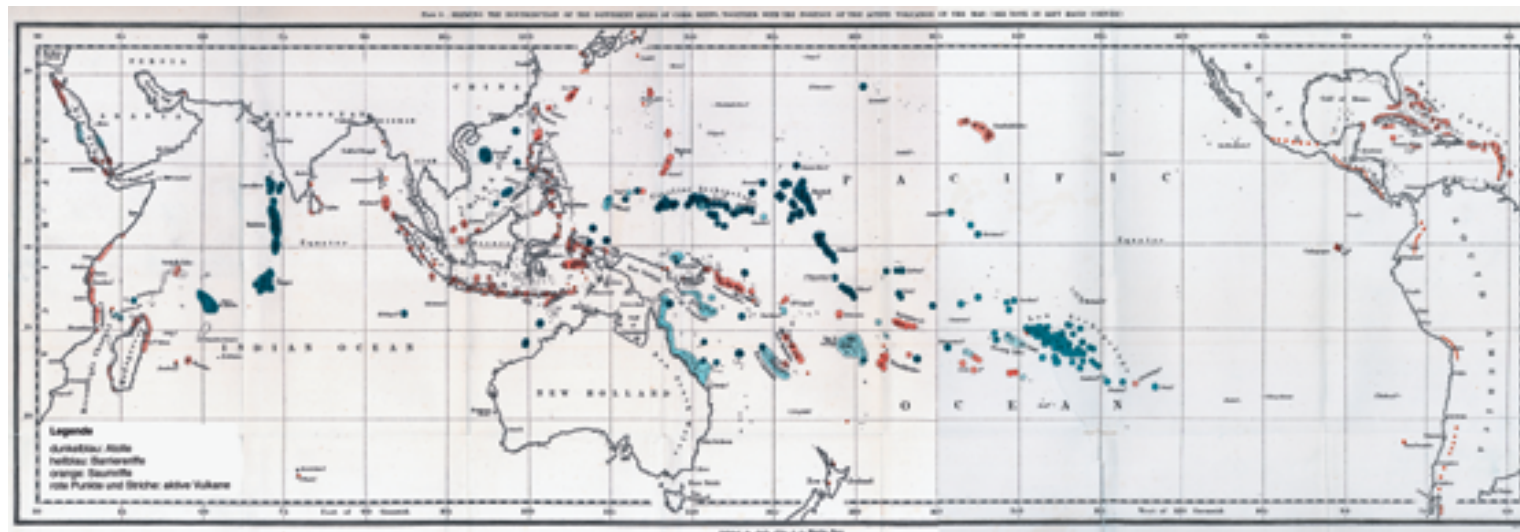
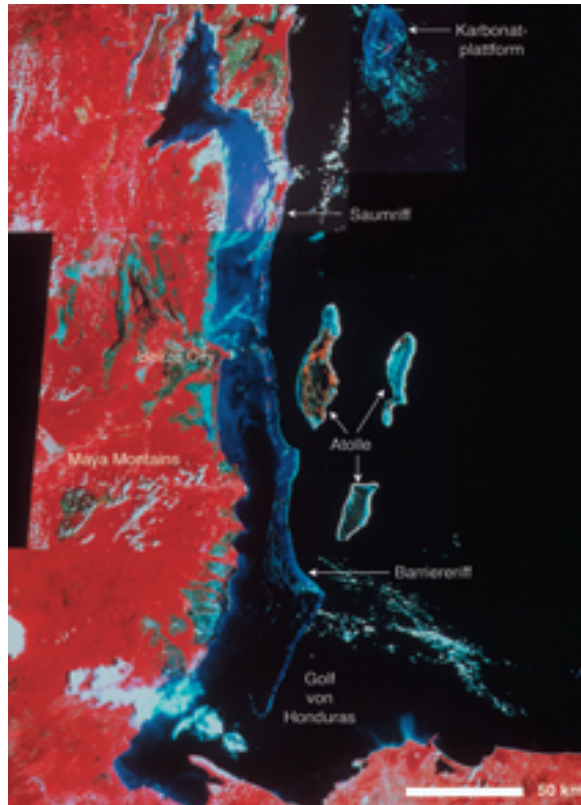
von Eberhard Gischler

Tropische Korallenriffe sind die artenreichsten Ökosysteme im Ozean. Die »tropischen Regenwälder der Meere« beherbergen zirka 800 Korallenarten und mehrere zehntausend Arten aus fast allen bekannten Tierstämmen^[1]. Korallenriffe bedecken weltweit eine Fläche von 600.000 Quadratkilometern, das sind 0,17 Prozent der Erdoberfläche^[2]. Sie treten als nahe der Küste gelegene Saumriffe, küstenfernere Barriereriffe, ringförmige Atolle und flache Karbonat-Plattformen auf **1** **2**. Der Begriff »Karbonat« weist darauf hin, dass Korallen als Riffbildner ein Skelett aus Kalk haben. Auch Kalkalgen und Weichtiere wie Muscheln und Schnecken sind durch die Bildung von Kalkskeletten und Kalkschalen am Riffaufbau beteiligt. Da tropische Korallenriffe nur in der Nähe der Meeresoberfläche wachsen, können Geowissenschaftler mit Hilfe fossiler Korallenfunde ermitteln, wie sich der Pegel des Meeresspiegels in vergangenen Jahrtausenden entwickelt hat. Auch andere wichtige Klimadaten wie Wassertemperatur, Sonneneinstrahlung und Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre sind in Korallenriffen »gespeichert«. Frankfurter Geowissenschaftler erschließen diese wichtigen Daten, die weit vor menschliche Messungen zurückreichen, durch systematische Bohrungen in Korallenriffen der Karibik, des Persischen Golfs und der Malediven.

Die größte gegenwärtige Riffstruktur ist das Great Barrier Reef an der Nordost-Küste von Australien mit über 2000 Kilometern Länge. Die Dicke (geologisch: Mächtigkeit) von Riffen kann mehrere Kilometer betragen, wie beispielsweise 1,5 Kilometer am Eniwetok Atoll im Pazifik oder über fünf Kilometer auf den Bahamas. Das Eniwetok Atoll begann vor 35 Millionen Jahren zu wachsen. Die Riffe der Bahamas existieren seit dem Erdzeitalter des Jura (vor zirka 180 Millionen Jahren), als der Atlantische Ozean begann, sich zu öffnen. Die geologische Geschichte von Riffen reicht noch weiter zurück. Die ältesten Riffe sind 3,5 Milliarden Jahre alt, wurden von Bakterien aufgebaut und stellen die ältesten Fossilien dar^[1]. Riffe sind von großer wirtschaftlicher Bedeutung für den Fischfang, den Tourismus und den Küstenschutz. Auch die Erdölindustrie hat großes Interesse an der Untersuchung von Riffen, denn fast 50 Prozent unserer Erdöl- und Erdgaslagerstätten sind in fossilen Riffgesteinen gespeichert.

Seit mehreren Jahrzehnten wird ein weltweiter Niedergang der modernen tropischen Korallenriffe beob-

2 Satellitenbild des größten Riffkomplexes im atlantischen Ozean vor der Küste von Belize (rot), Mittelamerika. Das 250 Kilometer lange Barriereriff geht im Norden in ein küstennahes Saumriff über. Weiter östlich liegen drei Atolle. Im Nordosten ist eine flache Karbonatplattform zu sehen.

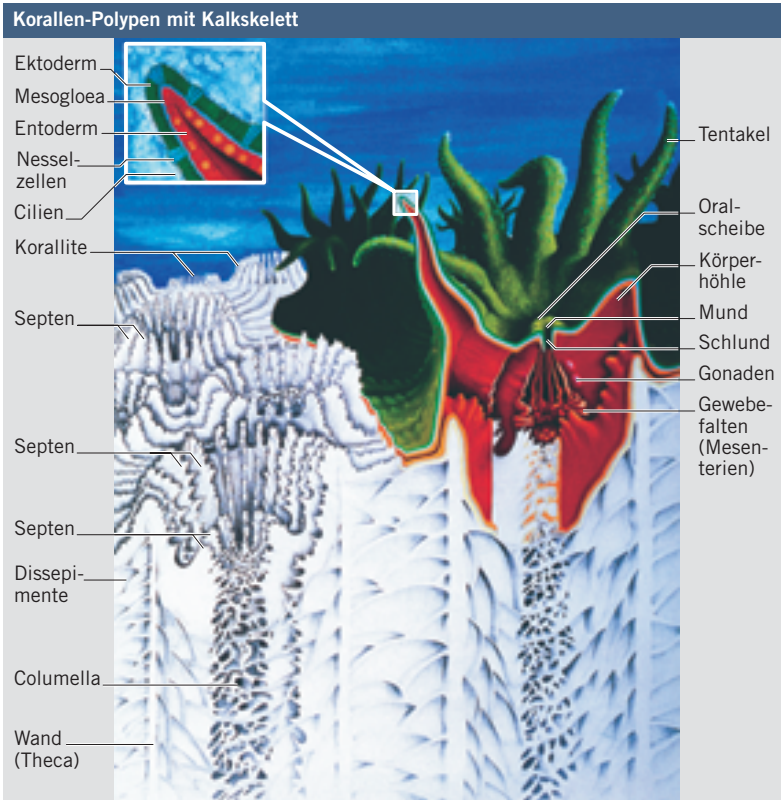


achtet^[2], wobei es häufig schwierig ist, zwischen natürlichen und von den Menschen verursachten Prozessen zu unterscheiden. Temperatur-Anstiege des Oberflächenwassers führten wiederholt zum Absterben von Korallen, wie zuletzt weltweit im Sommer 1998. Ob solche Erwärmungstrends direkt auf den Treibhauseffekt oder aber auf natürliche Schwankungen des Klimas zurückzuführen sind, kann nicht eindeutig beantwortet werden. Sicher ist hingegen, dass Menschen diesen wichtigen Lebensraum durch Überfischung, Einleitung von Abwässern und physikalische Zerstörung gefährden: Immer wieder laufen Boote im seichten Wasser der Riffgebiete auf. Die Bewohner vieler Riffinseln im Indischen und Pazifischen Ozean bauen aus Riffgestein ihre Häuser **3**. Sie schlagen Kanäle in das Riffgebiet und

1 Karte der globalen Verbreitung tropischer Korallenriffe nach Charles Darwin. Saumriffe sind orange, Barriereriffe hellblau und Atolle dunkelblau koloriert. Die räumliche Verteilung der Korallenriffe wird zum Großteil durch die warmen Meeresströmungen beziehungsweise die Wassertemperatur gesteuert. Ein weiterer wichtiger Faktor sind Nährstoffgehalte, die in den Auftriebsgebieten in den Ostteilen der Ozeane erhöht sind.

3 Hauswand auf den Malediven, die aus Korallen als Baustein gebaut wurde.



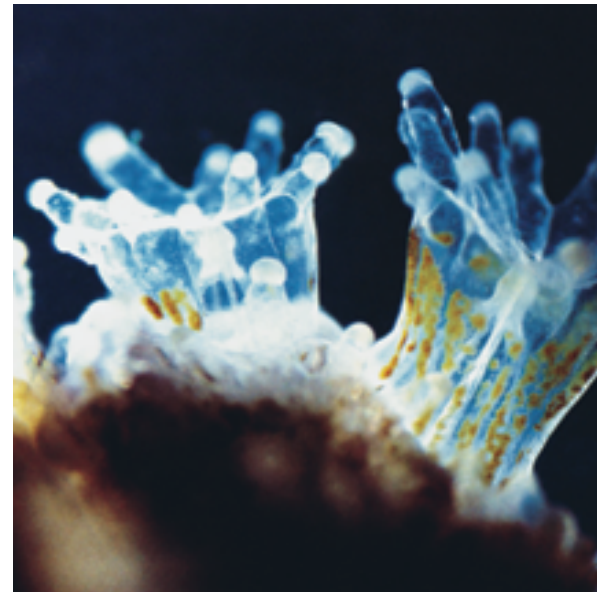


4 Das Kalkskelett der Korallen (weiß) wird von den Polypen gebildet.

Nesselzellen in den Tentakeln fangen die Polypen ihre Beute und verteidigen sich vor Fressfeinden. Riffbildende Steinkorallen sind zumeist koloniale Organismen, das heißt, viele tausend miteinander verbundene Polypen bilden eine Kolonie. Die Polypen scheiden auch das basale Kalkskelett ab, das sie mit einer nur wenige Millimeter dicken Gewebeschicht überziehen. Das Skelett wächst pro Jahr zwischen etwa einem Zentimeter bei massiven und bis zu 30 Zentimetern bei ästigen Korallen. Gleichzeitig erhöht sich die Anzahl der Polypen durch Teilung, wodurch sich die Gewebeschicht auf dem Kalkskelett vergrößert. Die meisten Riffkorallen werden auf diese Weise mehrere hundert Jahre alt. Polypen riffbildender Korallen gehen eine Symbiose mit einzelligen Algen ein, so genannte Zooxanthellen (aus der Gruppe der Dinoflagellaten), die im Gewebe der Korallen leben und Photosynthese betreiben 5. Sie verarbeiten Kohlendioxid (CO₂) und Wasser unter Lichteinfluss zu Zucker und Sauerstoff. Den Zooxanthellen verdanken die Riffkorallen auch ihre bunten Farben: Korallen ohne Zooxanthellen sehen weiß aus, da das weiße Kalkskelett durch das transparente Gewebe durchscheint. Die Symbiose zwischen Riffkoralle und Alge, das heißt Tier und Pflanze, ist für beide Partner



5 Aufsicht auf Steinkorallen-Polypen. Die Körperöffnung wird von Tentakeln umgeben.



6 Seitenansicht von Polypen mit Zooxanthellen (gelbe Punkte im transparenten Gewebe).

legen Häfen an oder schütten aus Korallenschutt Landebahnen für Flughäfen auf. Auch Taucher und Touristen tragen durch zu hohe Nutzung letztlich dazu bei, dass Flora und Fauna der Riffgebiete geschädigt werden.

Korallen und Riffbildung

Steinkorallen (*Scleractinia*) haben den größten Anteil an der Bildung moderner tropischer Korallenriffe. Korallen sind einfach gebaute Tiere 4. Die Einzeltiere heißen Polypen und haben einen Durchmesser zwischen einigen Millimetern bis Zentimetern. Die Polypen sind becherförmig, haben eine von Tentakeln gesäumte Körperöffnung und ernähren sich von Plankton 5. Mit

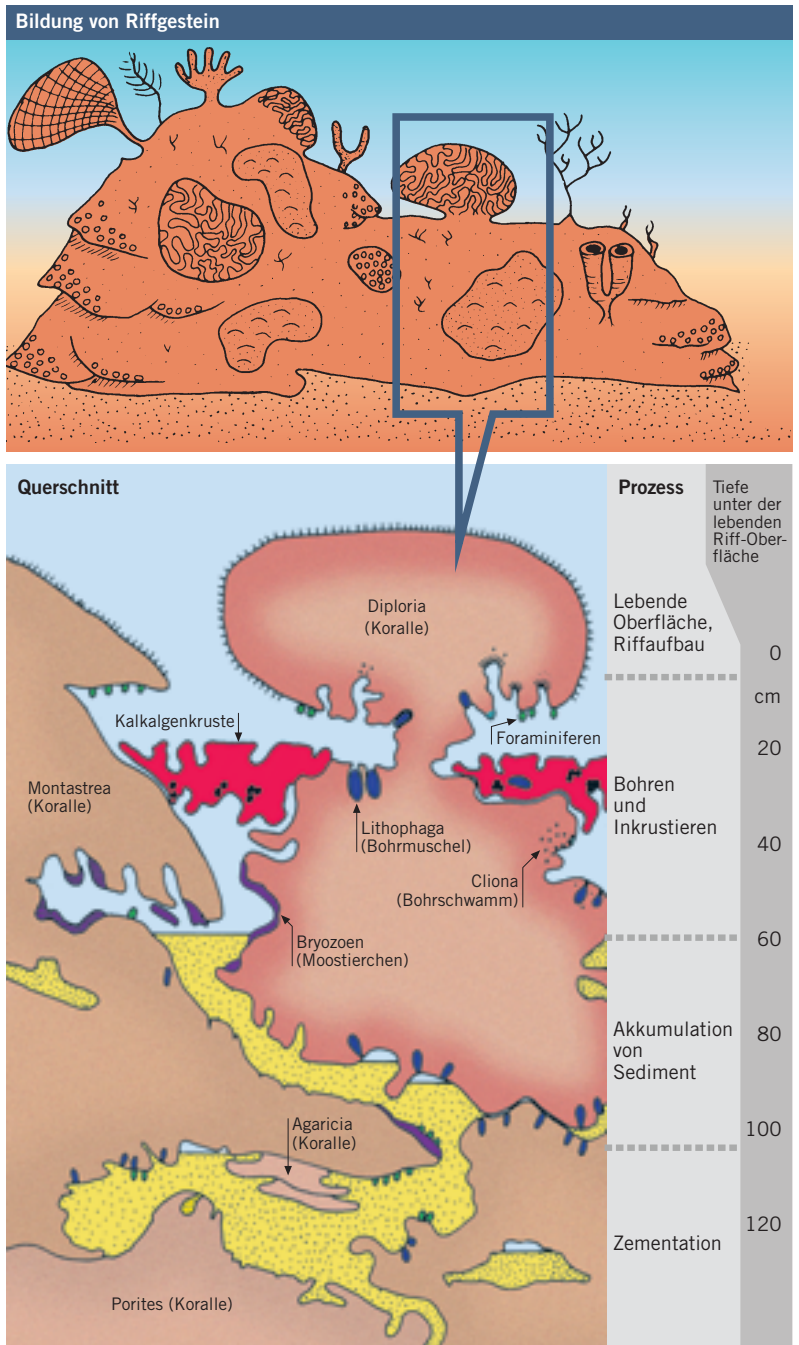
vorteilhaft, weil sie ihre Stoffwechselprodukte austauschen. Die Koralle verwertet den von der Alge ausgeschiedenen Zucker; umgekehrt profitieren die Algen von den Nährstoffen in den Ausscheidungen der Koralle. Durch die Photosynthese-Tätigkeit der Algen und den damit verbundenen Verbrauch von CO₂ wird weiterhin die Kalkfällung beziehungsweise die Skelettbildung der Korallen erleichtert. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass bei der Bildung jedes Moleküls Kalk (CaCO₃) ein Molekül Kohlendioxid (CO₂) freigesetzt wird. Indem die Zooxanthellen bei der Photosynthese CO₂ aufnehmen beziehungsweise dem System entziehen, verändern sie das chemische Gleichgewicht und treiben die Kalkbildung an. Optimale Lebensbedingun-

gen finden Riffkorallen bei Wassertemperaturen von 18 bis 30 °C, bei marinen Salzgehalten von 35 Promille, klarem Wasser und geringen Nährstoffgehalten. Bei Temperaturen über 30 °C stoßen die Korallen ihre Photosymbionten (Zooxanthellen) ab und sehen gebleicht aus. Wenn das Ausbleichen weit verbreitet ist, spricht man von »bleaching events«. Bleiben die Wassertemperaturen über mehrere Wochen über 30 °C, sterben die Riffkorallen ab. Die Tatsache, dass erhöhte Nährstoffgehalte für Riffkorallen abträglich sind, erscheint zunächst als Widerspruch. Es gibt dafür aber zwei Gründe: Erhöhte Nährstoffgehalte fördern die Bildung von Grünalgen, die im Riff-Ökosystem als Licht-Konkurrenten der Korallen zu sehen sind; hohe Gehalte an Nährstoffen wie Phosphat oder Nitrat führen zur chemischen Hemmung der Kalkausscheidung beziehungsweise der Skelettbildung.

Neben den Riff-aufbauenden Organismen wie Korallen und Kalkalgen existieren auch Riff-zerstörende Organismen. Zu diesen so genannten Destruenten gehören in den Kalk bohrende Schwämme, Muscheln, Würmer und Seeigel sowie Algen, Pilze und Bakterien. Die Tätigkeit dieser Organismen wird als Bioerosion bezeichnet. Ein weiterer Faktor der Riffzerstörung sind tropische Zyklone, die Korallen zerschlagen und dabei Sediment erzeugen. Das von den Organismen herausgebohrte Sediment und der bei Stürmen erzeugte Schutt sammeln sich in Hohlräumen des Riffs an. Schließlich wird das mit Sediment gefüllte Riffgerüst aus Korallen verfestigt beziehungsweise zementiert. Diese Prozesse des Riffaufbaus, der Riffzerstörung und Verfestigung sind komplex und stellen ein empfindliches Gleichgewicht dar [7].

Riffe als Pegel des Meeresspiegels

Aufgrund der Photosymbiose von Riffkorallen und Algen sind tropische Korallenriffe auf geringe Wassertiefen festgelegt, das heißt, sie kommen von der Wasseroberfläche, je nach Wasser-Transparenz, bis zirka 50 Meter Tiefe vor. Bestimmte Korallen, wie Formen der schnell wachsenden Gattung *Acropora*, kommen nur in flachstem Wasser nahe der Wasseroberfläche vor und sind dadurch ideale Anzeiger des Meeresspiegels. Um ehemalige Pegel des Meeres in die jüngere geologische Vergangenheit zurückzuverfolgen, müssen fossile Korallen und Korallenriffe untersucht werden. Im Falle von geologisch gehobenen Riffterrassen sind diese fossilen



[7] Unterhalb der Riffoberfläche bilden sich Algenkrusten, Korallenskelette werden von Organismen angebohrt und Sediment wird in Hohlräumen verfestigt.

Der Autor



Prof. Dr. Eberhard Gischler, 42, forscht und lehrt am Institut für Geowissenschaften der Johann Wolfgang Goethe-Universität. Nach dem Studium der Geologie und Paläontologie an der Universität Göttingen war er als PostDoc an den Universitäten Tübingen und Miami,

Florida (USA) tätig, bevor er als Assistent an die Universität Tübingen zurückkehrte. Er wechselte 1998 als Assistent von Prof. Dr. Wolfgang Oschmann in die Paläontologie nach Frankfurt und wurde nach seiner Habilitation zum Hochschuldozenten und kürzlich zum außerplanmäßigen Professor ernannt. Der Schwerpunkt seiner Arbeiten ist seit vielen Jahren die Erforschung moderner und fossiler Korallenriffe. Arbeitsgebiete liegen in der Karibik, insbesondere Belize und Florida, im Persischen Golf und in den Malediven.



8 Autor mit amerikanischen Kollegen beim Riffbohren mit Hilfe eines tragbaren pneumatischen Bohrers in Belize, Zentralamerika.

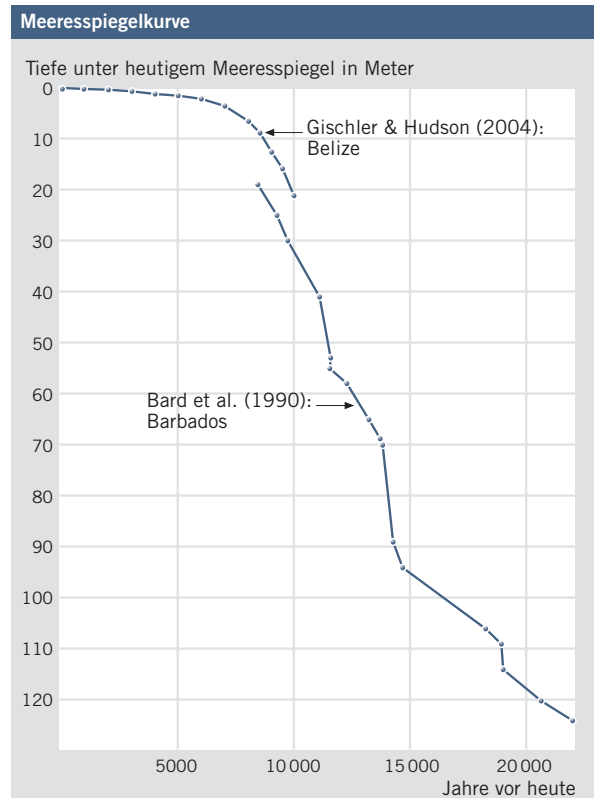
Riffe direkt an Land zugänglich. Berühmte geologische Aufschlüsse von solchen Terrassen liegen beispielsweise auf der karibischen Insel Barbados oder auf der Huon-Halbinsel an der Nordküste Neuguineas. Häufig müssen Geowissenschaftler jedoch in die Tiefe bohren, um fossile Korallenriffe zu beproben und durchgehende Abfolgen der letzten 10 000 bis 100 000 Jahre dokumentieren zu können 8 12.

Das Alter fossiler Korallen in den Bohrkernen kann mit Hilfe der Radiocarbon-Methode ermittelt werden. Aus dem Alter der Fossilien und ihrer Lage relativ zum heutigen Meeresspiegel ergibt sich ein Meeresspiegel-Datum. Mit Hilfe zahlreicher solcher Daten kann schließlich eine Meeresspiegelkurve konstruiert werden 9. Voraussetzung ist dabei, die geologische Rahmensituation der untersuchten Region zu kennen. Im Falle geologischer Hebung oder Absenkung des Untergrunds müssen die Meeresspiegeldaten um diese Veränderungen korrigiert werden. Die weltweit gesammelten Daten zeigen, dass der Meeresspiegel vor zirka 18 000 Jahren, während des Maximums der letzten Eiszeit, um 130 Meter tiefer lag als heute. Größere Mengen an Wasser als heute waren, besonders in der nördlichen Polkappe, als Eisschild gebunden. So reichte der Eisschild bis zum Nordrand der heutigen deutschen Mittelgebirge. Mit der allmählichen Erwärmung schmolz der nördliche Eis-

panzer ab, und der Meeresspiegel begann mit Raten von mehreren Metern pro 1000 Jahre zu steigen. Viele Korallenriffe folgten dem ansteigenden Meeresspiegel, indem sie nachwuchsen. Es gibt auch Beispiele für Korallenriffe, die aufgrund abträglicher Umweltbedingungen langsamer wuchsen, daher dem ansteigenden Meeresspiegel nicht folgen konnten und regelrecht »ertranken«. Wieder andere Riffe blieben zunächst hinter dem ansteigenden Meeresspiegel zurück, ohne abzusterben, und wuchsen, als das Wasser langsamer stieg, bis zum Meeresspiegel auf. Die Anstiegsrate des Meeresspiegels verlangsamte sich vor zirka 5000 Jahren. Im westlichen Atlantik und in großen Teilen des Indischen Ozeans näherte sich der Pegel allmählich dem heutigen Stand an. Im Südatlantik und in großen Teilen des Pazifiks kam es in einem Zeitraum von zirka 6000 bis 3000 Jahren vor unserer Zeit zu höheren Pegeln als heute, und der Meeresspiegel sank nachfolgend auf den heutigen Stand. Diese lokalen Unterschiede sind auf Ausgleichsbewegungen der Erdkruste zurückzuführen. Der unter der Erdkruste liegende, teilweise plastische Erdmantel wurde unter dem Eisschild eingedrückt, und außerhalb des Eisschilds nahm seine Dicke zu. Deshalb hob oder senkte sich die Erdkruste – je nach Abstand zum ehemaligen Eisschild – mit unterschiedlichen Raten.

Riffe als Speicher hochauflösender Klimadaten

Ähnlich wie in Bäumen an Land findet man in den Skeletten von Steinkorallen jahreszeitliche Lagen beziehungsweise »Jahresringe«^{13/}. Allerdings werden die Jahreslagen erst im Röntgenbild sichtbar. In den Sommermonaten wachsen Korallen langsamer als in den



9 Meeresspiegelkurve der letzten 21 000 Jahre. Oberer Teil nach Daten aus Belize; unterer Teil nach Daten aus Barbados.

EUROHYPO

Europas führende Spezialbank für
Immobilien und Staatsfinanzierung

**Hätte es uns damals schon gegeben,
hätten wir sie finanziert.**



Ehrgeizige Immobilienprojekte realisiert man nicht mit irgendeiner Bank. Als Spezialist für maßgeschneiderte Finanzierungslösungen bieten wir unseren Kunden in Deutschland und weltweit 21 Ländern mehr als nur Kapital. So werden aus Ihren großen Ideen wertstabile Investitionen.

| a passion for solutions.

**EURO
HYPO**



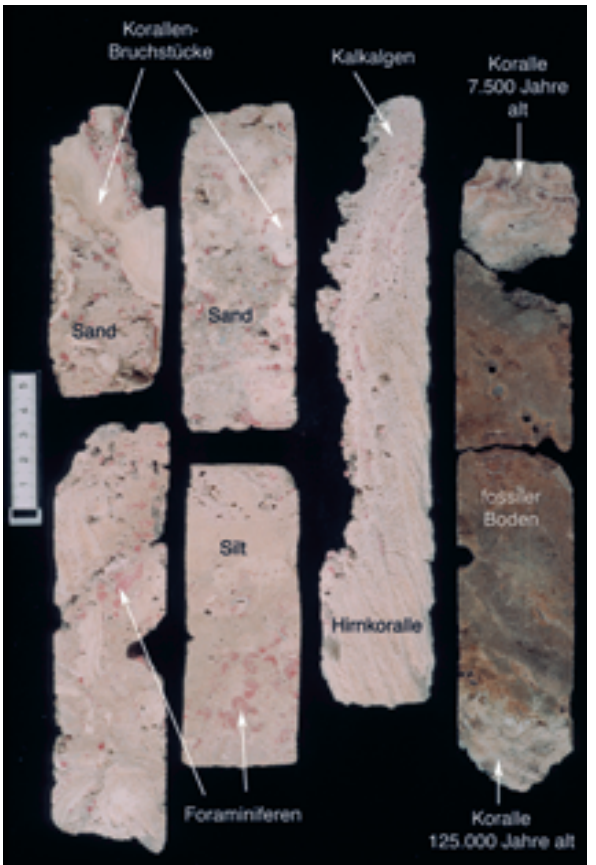
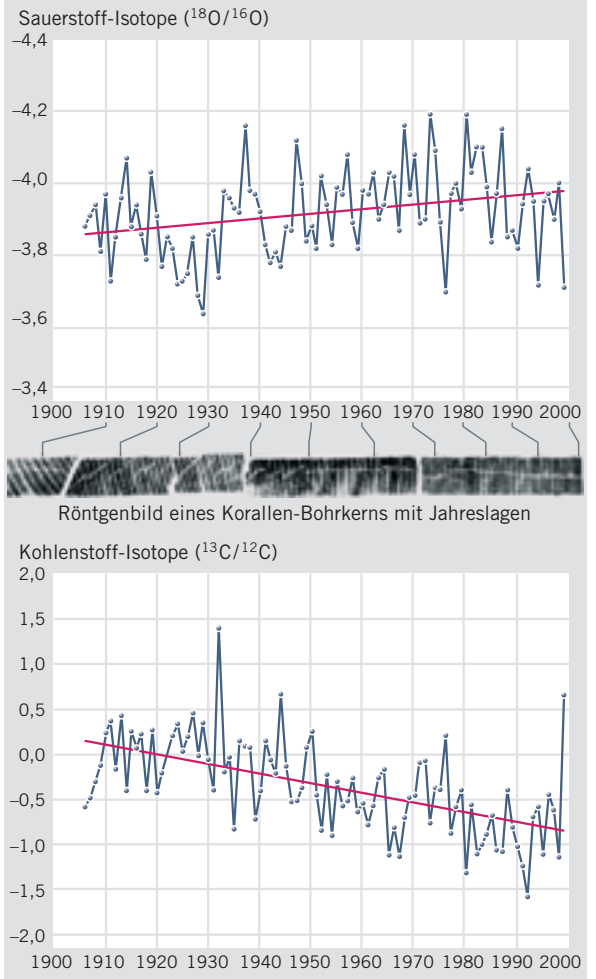
10 Eberhard Gischler bei der Entnahme eines Bohrkerns aus einer Steinkoralle vor der Küste von Kuwait, nördlicher Persischer Golf, mit Hilfe eines pneumatischen Bohrers, der von Pressluft aus einer Tauchflasche angetrieben wird.

11 Kurve (oben) der Sauerstoffisotopen-Verhältnisse im 20. Jahrhundert in Belize. Es ist ein genereller Erwärmungstrend um zirka 1 °C zu erkennen (0,2‰ entsprechen etwa 1 °C Temperatur). Mitte: Röntgenbild des analysierten Bohrkerns mit Jahreslagen. Helle Punkte: herausgebohrte Proben für die Analyse der Sauerstoff- und Kohlenstoffisotopie. Die Kurve (unten) der Kohlenstoffisotopie zeigt einen deutlich abfallenden Trend. Diese Abnahme ist Ausdruck des Eintrags des leichten ¹²C-Isotops in die Atmosphäre aufgrund der Verbrennung fossiler Brennstoffe durch den Menschen. Daten aus Belize. (Rot: linearer Trend. Blau: Jahresmittel.)

kälteren Zeiten des Jahres, wodurch das Skelett im Sommer dichter wird. Aus praktischen und Artenschutz-Gründen sammeln Geowissenschaftler nicht ganze Korallenkolonien, sondern entnehmen Bohrkern **10**. Durch Zurückzählen der Jahreslagen kann man im Röntgenbild eine genaue Chronologie erstellen **11**. Die Umweltbedingungen zur Zeit der Skelettbildung versucht man aus verschiedenen Parametern zu erschließen, die entlang des Bohrkerns gemessen werden. Dazu gehören zunächst die Wachstumsdicken, deren Variation jedoch häufig von einer Vielzahl von Umwelt-Parametern abhängig und daher nur schwer interpretierbar ist. Im Gegensatz dazu sind geochemische Parameter meist leichter bestimmten Umwelt-Parametern zuzuordnen. Dazu zählen die Verhältnisse der stabilen Isotope der Elemente Sauerstoff (O) und Kohlenstoff (C) im Korallenskelett aus Kalk (CaCO₃). Sauerstoff kommt zu 0,2 Prozent mit der Massenzahl 18 vor (¹⁸O), und zu 99,8 Prozent mit der Massenzahl 16 (¹⁶O). Die stabilen

12 Diese Bohrkern zeigen die Entstehungsgeschichte eines Korallenriffs. Sie lässt sich bis in die Zeit vor 125 000 Jahren zurückverfolgen.

Klimadaten aus Korallenskeletten



Isotope des Kohlenstoffs sind ^{13}C , welches mit 1,1 Prozent vorkommt, und ^{12}C , das zu 98,9 Prozent in der Natur vorliegt. Das Verhältnis der Isotope ^{18}O und ^{16}O im Korallenskelett erlaubt Rückschlüsse auf die Wassertemperatur und den Salzgehalt zur Zeit der Skelettbildung ^{11/}. Auskunft über die Sonneneinstrahlung beziehungsweise die Wolkenbedeckung gibt das Verhältnis der Isotope ^{13}C und ^{12}C im Korallenskelett. Mit Hilfe der Messungen der Kohlenstoff-Isotopie können Geowissenschaftler häufig auch den anthropogenen Eintrag von Kohlendioxid in die Atmosphäre nachweisen ^{12/}. Durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, das heißt Kohlenwasserstoffe wie Erdöl und Erdgas, wird beson-

ders das leichtere Kohlenstoff-Isotop ^{12}C in der Atmosphäre angereichert, zum Teil im Oberflächenwasser der Meere gelöst und schließlich in das Korallenskelett eingebaut.

Die Gewinnung von Klimadaten aus Korallenskeletten ist von großer Bedeutung für die Klimaforschung, weil die Menschen erst seit wenigen Jahrzehnten mit hochauflösenden Messinstrumenten Klimadaten wie zum Beispiel Temperatur oder CO_2 -Gehalte erheben. Die Analyse von Korallenskeletten kann diese Datensätze weiter in die Vergangenheit ausdehnen und hilft dadurch, die Klimaentwicklung sowohl in der Vergangenheit als auch für die Zukunft besser zu verstehen. ♦

Literatur

^{11/} Wood, R., 2000. Reef evolution. 414 S., University Press, Oxford.

^{12/} Birkeland, C., Hrsg., 1997. Life and death of coral reefs. 536 S., Chapman and Hall, New York.

^{13/} Hudson, J. H., Shinn, E. A., Halley, R. B. & Lidz, B., 1976. Sclerochronology: a tool for interpreting past environments. *Geology*, 4, S. 361–364.

^{14/} Veron, J. E. N., 1995. Corals in space in time. 321 S., University New South Wales Press, Sydney.

^{15/} Scoffin, T. P., 1992. Taphonomy of coral reefs: a review. *Coral Reefs*, 11, S. 57–77.

^{16/} Gischler, E. & Hudson, J. H., 2004. Holocene development of the Belize Barrier Reef. *Sedimentary Geology*, 164, S. 229–242.

^{17/} Bard, E., Hamelin, B. & Fairbanks, R. G., 1990. U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados: sea-level during the past 130,000 years. *Nature*, 346, S. 456–458.

^{18/} Gischler, E. & Oschmann, W., 2005. Historical climate variation in Belize (Central America) as recorded in Scleractinian coral skeletons. *Palaios*, 20, S. 159–174.

^{19/} Darwin, C. R., 1842. Structure and distribution of coral reefs. 214 S., Smith Elder, London.

Anzeige



UNIQUE
OPMI® Pentero®

UNIQUE
Die besten Grundeigenschaften

UNIQUE
Integrierte Digitale Visualisierung

UNIQUE
Intraoperative Diagnostik

UNIQUE
Integration in den Krankenhaus-Workflow

UNIQUE
Einfach einzigartig. Einzigartig einfach.

Einige Optionen sind noch in der Entwicklung und noch nicht erhältlich.

Besuchen Sie uns auf der 57. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Neurochirurgie vom 11. – 14. Mai 2006 in Essen, Congress Center Süd, Stand Nr. 09!

Carl Zeiss Surgical GmbH
E-Mail: surgical@zeiss.de
Produktinformationen: www.zeiss.de/neuro
Ansprechpartner: www.zeiss.de/kontakte

ZEISS

We make it visible.