

# GEOFOKUS



## Janz weit draußen: die Karbonate nicht-tropischer ozeanischer Inseln

Björn Berning<sup>1</sup>, Sérgio Ávila<sup>2</sup>, Max Wisshak<sup>3</sup> & Ricardo Ramalho<sup>4</sup>

Die Erforschung tropischer Riffbildner und rezenter wie fossiler Karbonatsedimente aus wärmeren marinen Gewässern erfreut sich einer langen Historie. So ist etwa dank Charles Darwin die Entstehung von Atollen seit über 170 Jahren bekannt. Nicht-tropische Karbonate, die sich in größeren Wassertiefen sowie in kühleren Gewässern der höheren Breiten oder von Auftriebsgebieten bilden, werden hingegen erst seit Ende des 20. Jahrhunderts systematisch untersucht. Eine Zusammenfassung über Forschungsergebnisse und offenen Fragen zum Thema Kaltwasserkarbonate präsentierte A. Freiwald in einem GEOFOKUS-Artikel in GMIT Nr. 18 (2004). Die meisten vorhergehenden Studien befassen sich mit Karbonaten, die auf Kontinentalschelfen abgelagert wurden und werden. Diese großflächigen Ablagerungsräume sind über lange Zeiträume stabil und bleiben selbst bei der Kollision der Kontinentalplatten meist erhalten, so dass deren erdgeschichtliches Archiv häufig viele hunderte Millionen von Jahren zurückreicht. Das entgegengesetzte Extrem ist die Karbonatproduktion auf nicht-tropischen ozeanischen Inseln, die fast ausschließlich vulkanischen Ursprungs sind. Mehrere Faktoren führen dazu, dass dort in Abwesenheit riffbildender Korallen relativ wenig Karbonat gebildet wird, welches außerdem nur geringe Chancen hat, fossil erhalten zu bleiben.

Zunächst sind solche Vulkane, geologisch betrachtet, meist klein und kurzlebig. Die Erosion durch Wellen ist aufgrund der exponierten Lage im offenen Ozean sehr stark, wobei die Erosionsresistenz der vulkanischen Gesteine und Sedimente relativ niedrig ist, da zum Beispiel bei phreatomagmatischen Eruptionen große Mengen an unverfestigten Pyroklastika gebildet werden. Wiederholte Vulkanausbrüche, abrasiver Sedimenttransport und gravitative Abbrüche der steilen Insellanken (Abb. 1) kompromittieren

eine langfristige Ansiedlung eines karbonatdominierten benthischen Ökosystems, während die hohe Wellenenergie des offenen Ozeans dafür sorgt, dass das bereits produzierte Karbonat von den schmalen Inselschelfen in die Tiefsee exportiert wird. Längerfristig betrachtet versinken vulkanische Inseln aufgrund thermischer Subsidenz der ozeanischen Platte mit zunehmender Distanz zum mittelozeanischen Rücken, werden zu Seebergen und tauchen schließlich in die aphotische Zone ab, bevor sie bei der Subduktion der ozeanischen Platte im Akkretionskeil verschwinden.

Mehrere Gründe rechtfertigen es, sich mit diesen schwankenden, kurzlebigen Karbonatsystemen zu beschäftigen: Die geologische Geschichte ozeanischer Inseln ist kurz; sie entstehen *de novo* bei Vulkanausbrüchen. Gründerpopulationen benthischer Organismen müssen zum Teil erhebliche Distanzen überwinden, um den neu geschaffenen Lebensraum zu besiedeln (wie etwa bei den Azoren). Untersuchungen der Artzusammensetzung rezenter und fossiler Ökosysteme ozeanischer Inseln lassen nicht nur Rückschlüsse auf das Verbreitungspotential verschiedener Organismen zu, sondern auch auf den Zeitpunkt der Besiedelung. Es ist auch möglich, die Herkunft der Arten zu rekonstruieren und damit die Richtung von (Paläo-)Oberflächenströmungen in den Ozeanen. Aufgrund der großen Anzahl von ozeanischen Inseln und ihren betagten Verwandten, den Seebergen, kann angenommen werden, dass sie trotz ihrer geringen Größe global betrachtet eine beträchtliche Menge an Karbonatsedimenten akkumulieren.

Die wenigen biogenen Kalke der Azoren und anderer ozeanischer Inseln haben auch kulturelle Bedeutung, da sie frühen Siedlern als Baumaterial dienten. Ozeanische Inseln und Seeberge sind aufgrund ihres Reichtums an Fischen Ziel von Hochsee-Fischereifloten, die mit Grundschlepp-

netzen das Benthos großflächig zerstören. Aufgrund der langen Regenerationszeit dieser Ökosysteme und des hohen Anteils an endemischen Arten sind diese Habitate besonders schützenswert. Auch die Vulkane ozeanischer Inseln warten noch mit einigen Überraschungen auf, wie wir noch sehen werden.

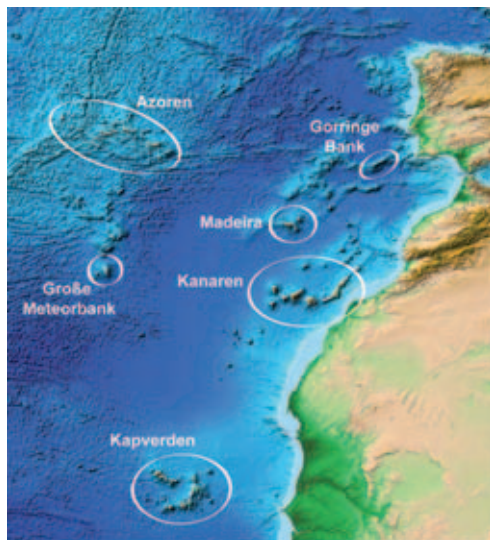
Bereits Charles Darwin machte während der *Beagle*-Expedition (1831–1836) Beobachtungen zu Ökosystemen ozeanischer Inseln. Der erste Landgang (Kapverden) und die letzten beiden Landgänge (erneut Kapverden und die Azoren) auf dieser Reise führten ihn auf einige der Inseln Makaronesiens (Azoren, Madeira, Kanaren und Kapverden, Abb. 2). Verschiedene internationale Forschungsgruppen und Projekte haben in den letzten 10 Jahren Darwins Arbeiten fortgesetzt, um die Naturgeschichte der einzelnen Archipele Makaronesiens und der umliegenden Seeberge (Große Meteorbank, Gorringer Bank, etc.) zu rekonstruieren. In dem vorliegenden kurzen Abriss werden einige dieser Arbeiten und laufende geologische, karbonatsedimentologische, biologische sowie geotouristische Projekte skizziert.

### Geologie ozeanischer Inseln und Seeberge

Ozeanische Inseln und Seeberge entstehen fern der Kontinentalschelfe an mittelozeanischen Rücken und durch Intraplattenvulkanismus (Hotspots). Einige wenige sind tektonischen Ursprungs, wie etwa die Gorringer Bank vor SW Portugal (Abb. 2). Mit zunehmendem Alter und Entfernung zum mittelozeanischen Rücken und/oder infolge von Subsidenz durch Auflast bei großen Vulkangebieten sinkt die Kruste mitsamt den Inseln und Seebergen in größere Wassertiefen ab, so dass die weitaus meisten dieser Gebilde unterhalb des Meeresspiegels zu finden sind. Während man Inseln noch gut zählen kann, lässt sich die Anzahl an Seebergen nur grob schätzen. Je nach Definition (z.B. Mindesthöhe vom Meeresboden) sind zwischen 100.000 und 2.000.000 Seeberge in den Ozeanen zu finden. Ein großer Teil davon ist noch nicht einmal kartiert, die weitaus meisten wurden nie wissenschaftlich beprobt. Nur wenige sind wissen-



**Abb. 1:** Typische steile Abbruchkante einer vulkanischen Insel (Südküste von Santa Maria, Azoren) (Foto: A. Kroh)



**Abb. 2:** Übersicht der Makaronesischen Inseln und Seeberge (Kartenmaterial von NOAA)



**Abb. 3: Die Übergänge von submarinen zu subaerischen Lavaströmen als Meeresspiegelindikatoren (Pliozän, Südostküste der Insel Santa Maria, Azoren) (Foto: R. Ramalho)**

schaftlich näher untersucht worden. Alle größeren Seeberge zusammen ergeben etwa die Fläche Europas, womit sie flächenmäßig weit hinter den Schelfgebieten liegen, jedoch nicht zu vernachlässigen sind.

Bezüglich der Akkumulation von Karbonat sind besonders die sogenannten Guyots von Bedeutung. Dies sind Inseln, deren Spitze durch Wellenbrandung zu einem Plateau erodiert wurde. Sinken sie unter die Wellenbasis ab, können sie großflächig Karbonatsedimente anhäufen und diese langfristig davor bewahren, unter die Aragonit- und Kalzit-Kompensationstiefe zu gelangen und dort gelöst zu werden. Die Große Meteorbank südlich der Azoren ist ein solcher Guyot, dessen gut 300 m unter dem Meeresspiegel liegendes Plateau eine Fläche von etwa 1.500 km<sup>2</sup> aufweist (Abb. 2).

Je älter eine vulkanische Insel, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Aufschlüsse

(sub)fossiler Karbonate oberhalb des Meeresspiegels anzutreffen sind. Besonders inaktive Vulkane sind verstärkt der Erosion ausgesetzt und meist durch Subsidenz geprägt, besonders wenn sie sich auf relativ junger ozeanischer Kruste befinden (Ramalho et al. 2013). Tatsächlich sind dennoch neogene Sedimente auf zumindest einer Insel in jedem Archipel Makaronesiens vorhanden. Als Beispiel sei hier die älteste Azoreninsel Santa Maria angeführt, die vor etwa 6 Millionen Jahren über den Meeresspiegel hinauswuchs. Obwohl die letzte vulkanische Eruption vor etwa 3 Millionen Jahren erfolgte, hat die Insel den bis dahin vorherrschenden Subsidenztrend vor ca. 3,5 Millionen Jahren umgekehrt und sich seitdem um fast 200 Meter gehoben (Ramalho et al. 2014). Dank der Anwesenheit von verschiedenen Meeresspiegelmarkern, wie etwa Brandungsplattformen und -hohlkehlen, oder dem Übergang von submarinen zu sub-



**Abb. 4:** Die moderne Art des Raftings: neben Rotalgen und inkrustierenden Foraminiferen befinden sich 16 Bryozoenarten auf dieser angespülten Getränkedose. (Foto: B. Berning)



aerischen Laven lässt sich die Hebungs- bzw. Subsidenzgeschichte der einzelnen Inseln zuverlässig rekonstruieren (Abb. 3). Natürlich sind diese Hinweise auch Darwin nicht entgangen, der eine Hebung der Kapverdeninsel Santiago postulierte, als er die dortigen pleistozänen Rotalgenbänke kartierte, die heutzutage etwa 20 Meter über dem Meeresspiegel liegen (Johnson et al. 2012).

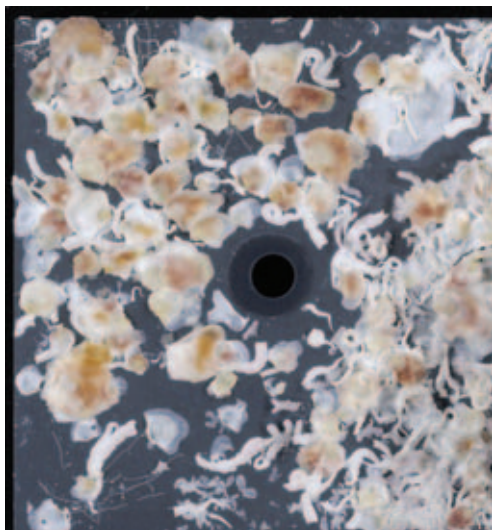
Die Tatsache, dass sich die vertikalen Bewegungen der einzelnen Inseln innerhalb eines Archipels erheblich unterscheiden und dass eine kompressionstektonische Hebung meist ausgeschlossen werden kann, lässt den Schluss zu, dass diese Vulkane nicht „von oben nach unten“ durch oberflächliche Eruptionen wachsen, sondern eher von „unten nach oben“ durch Intrusionen an der Basis des Vulkans. Die Insel wird somit deutlich und langfristig gehoben, ohne dass es oberflächlich zu vulkanischer Aktivität kommt. Die vertikale Komponente, die durch Aufdomung des Mantelplumes bei Hotspots wie den Kapverden hervorgerufen wird, ist im Vergleich dazu deutlich geringer, zumindest über geologisch relativ kurze Zeiträume betrachtet (Ramalho et al. 2010).

### **Biogeographie und Endemismus**

Anders als bei Inseln kontinentalen Ursprungs, auf denen und in deren Umgebung zur Zeit der Entstehung bereits Fauna und Flora existierten, sind neu entstandene vulkanische Inseln und Seeberge zunächst frei von Leben. Schon Darwin hat viel Mühe und Zeit investiert, um her-

auszufinden, wie Pflanzen und Tiere zu Wasser oder durch die Luft zu abgelegenen Inseln kommen. Santa Maria, die östlichste Insel des Azoren-Archipels, ist beispielsweise mehr als 800 km von der nächsten Insel (Madeira) und über 1.300 km vom nächstgelegenen Festland (Portugal) entfernt. Obwohl man annehmen könnte, dass es marine Organismen leichter haben sollten, solche Inseln zu besiedeln, legen neuere Untersuchungen über die Konnektivität zwischen Populationen benthischer Organismen nahe, dass diese häufig sehr viel isolierter voneinander existieren als bislang angenommen. Dies ist besonders ausgeprägt bei am Boden festgehefteten Tieren mit kurzlebigen Larvenstadium, wie etwa Schwämmen und Bryozoen, die solche Distanzen nicht per Larventransport bewältigen können. Wie also kommen solche Tierarten zu diesen Inseln?

Die Vielzahl an Arten mit kurzlebigen Larven, die etwa auf den Azoren zu finden sind, legt nahe, dass die Überbrückung solcher Distanzen hauptsächlich mittels Rafting vonstattenging, also dem Bewachsen von schwimmfähigen Substraten wie Holz und Algen, die dann durch Oberflächenströmungen zu den Inseln verdriftet wurden (Abb. 4). Natürlich existieren auch Organismen mit langlebigen planktonfressenden Larven auf den Inseln. Diese haben jedoch häufig das Problem, dass die Larven der nächsten Generation ins offene Meer driften und der Population der Inseln verloren gehen. Um die Inselpopulationen aufrecht zu erhalten, muss also ein ständiger Nachschub an Larven von der



**Abb. 5:** *Rezente Karbonatproduzenten (Austern, Serpuliden, Bryozoen) auf einer Besiedlungsplatte von 10 cm Kantenlänge (60 m Tiefe vor der Insel Faial, Azoren) (Foto: M. Wisshak)*



**Abb. 6:** *Das Spurenfossil Diopatrachus: die mit Muschelschalen ausgekleidete Wohnröhre eines Borstenwurms (Pliozän, Santa Maria, Azoren) (Foto: A. Uchman)*

Ursprungspopulation gewährleistet sein, was ab einer bestimmten Distanz nicht mehr (oder nur noch sporadisch) gegeben ist. Daher ist selbst in solchen Gruppen, die durch langlebige planktonfressende Larven charakterisiert sind (wie etwa viele Schneckenarten), das Larvenstadium vieler Arten auf den Azoren deutlich verkürzt. Diese Arten hatten also entweder schon vor der Ankunft auf den Inseln ein kurzes Larvenstadium entwickelt und wurden per Rafting dorthin verdriftet, oder sie kamen zunächst als planktonfressende Larve auf die Inseln und haben dort erst das Larvalstadium verkürzt (Ávila et al. 2012).

In dem natürlichen Labor der 1963 südlich von Island entstandenen Insel Surtsey erfolgte die Besiedlung der Insel je nach Organismengruppe innerhalb von wenigen Jahren bis Jahrzehnten. Allerdings liegt Surtsey lediglich einige Kilometer von Island entfernt. Bei so abgelegenen Inseln wie den Azoren wird die Besiedlung viel länger gedauert haben. Jedoch zeigen die unterpliozänen Vergesellschaftungen, die auf der im späten Miozän entstandenen Insel Santa Maria vorkommen, bereits eine voll entwickelte und diverse benthische Fauna (Ávila et al. im Druck). So ist etwa die Anzahl der pliozänen Bryozoenarten, welche hauptsächlich die Schalen von Austern inkrustieren, mit etwa 30 Taxa ähnlich hoch wie das Vorkommen auf experimentellen Besiedlungsplattformen (Abb. 5), die vor den Azoren ausgebracht wurden (Wisshak et al. 2015). Diese Artenzahl liegt in der Größenordnung von Vergesellschaftungen vom kontinentalen Schelf, die auf vergleichbarem Substrat siedeln.

Schwieriger zu erklären als die Verbreitung und Diversität der Hochsee-Flachwasserfaunen ist die Migration bathyaler Arten, denen die Möglichkeit fehlt, auf flotierenden Substraten wie Algen zu siedeln. Trotz diesen Handicaps existieren zum Beispiel auf der zentralatlantischen Großen Meteorbank, mit ihrem Gipfelplateau auf ca. 300 Metern Tiefe, mehr als 330 bodenlebende Tierarten, darunter viele Arten ohne planktonisches Larvalstadium. Zwar waren einige der flacheren Seeberge während der glazialen

Meeresspiegelniedrigstände Inseln und hätten so per Rafting neue Arten aufnehmen und als Trittsteine bei der Verbreitung dienen können. Allerdings kamen ans Bathyal angepasste Arten selbst während der Eiszeiten wohl nicht in der photischen Zone vor, um dies ausnutzen zu können. Momentan bleibt daher der Verbreitungsmechanismus dieser Gruppen im Dunkeln.

Einhergehend mit dem Verbreitungsmechanismus der einzelnen Arten und Organismengruppen, sowie der Ablegenheit der einzelnen Inseln und Seeberge ist die Anzahl der endemischen Taxa. Für viele Algen und einige Muscheln, Schnecken und Krebstiere, die sowohl auf dem ostamerikanischen als auch auf dem europäischen Schelf vorkommen und deren Nachkommenschaft lange Zeit im Plankton verbringt, dienen die zentralatlantischen Erhebungen als Trittsteine bei der Überbrückung der weiten Tiefseebecken. Folglich ist der Prozentsatz an endemischen Arten in diesen Gruppen selbst auf abgelegenen Inseln und Seebergen äußerst niedrig. In anderen Gruppen hingegen, wie den Schwämmen und Bryozoen, liegt der Anteil der Endemiten häufig bei 60–90 %. Aufgrund der überdurchschnittlich hohen Zahl an Arten, die nur auf den jeweiligen Inseln und Seebergen vorkommen, sind diese verstärkt durch menschliche Eingriffe wie die Boden-Schleppnetzfisherei gefährdet und besonders schützenswert.

Ebenso spannend wie die Prozesse der Artenmigration ist die Herkunft (Provenienz) der Organismen, besonders im Fall der Azoren mit ihrer zentralatlantischen Lage zwischen Nordamerika und Europa. Legt man das heutige Strömungsmuster im Atlantik zugrunde, könnte man vermuten, dass die Gründerpopulationen mit dem Golfstrom aus dem südlichen Nordostamerika kamen. In einigen Gruppen stammt ein kleiner Teil der Arten tatsächlich aus dieser Region. Die nächsten Verwandten der weitaus meisten fossilen wie rezenten Arten der Azoren sind jedoch im östlichen Atlantik und Mittelmeer zu finden. Bei vielen Mollusken ist zum Beispiel die Region mit der größten faunistischen Gemeinsamkeit das Mittelmeer, gefolgt vom ostatlan-

tischen Schelf und Madeira (Ávila et al. 2012). Dies deutet darauf hin, dass die geringere Distanz zu den ostatlantischen Inseln und zum kontinentalen Schelf für den Besiedlungserfolg eine Rolle spielte. Außerdem muss im Miozän/Pliozän die Oberflächenströmung im Nordatlantik anders verlaufen sein, bzw. war der Golfstrom deutlich weniger stark ausgeprägt, so dass Oberflächenwasser zumindest zeitweise aus dem Ostatlantik in Richtung Azoren fließen konnte. Die Intensivierung des Golfstromes wurde bekanntlich durch die Schließung des Isthmus von Panama während des Pliozäns ausgelöst. Aber auch während oder nach den pleistozänen Eiszeiten scheint ein Transport Richtung Westen möglich gewesen zu sein, da ein guter Teil der Warmwasserfauna des Pliozäns durch Arten aus kühleren Gefilden ersetzt wurde, deren nächste Verwandte ebenso aus dem Ostatlantik stammen (Ávila et al. 2008).

### Fossile und rezente Karbonatproduktion

Nachdem zunächst Darwin auf mehreren Inseln Makaronesiens die fossilen Sedimente kartierte, entdeckten ab Mitte des 19. Jahrhunderts auch einige deutsche Forscher die Inseln und deren Fossilien. Heinrich Georg Bronn, Georg Hartung (teils zusammen mit Charles Lyell), Wilhelm Johann Reiß und der Schweizer Karl Mayer-Eymar fassten als erste die geologischen und paläontologischen Funde zusammen. Heutzutage ist dank dieser und den vor kurzem wieder verstärkten paläontologischen Tätigkeiten auf den Inseln unser Wissen über die neogenen Kalke wahrscheinlich besser als das über die rezenten Karbonatsedimente. Zahlreiche neogene Sediment- und Faziestypen sowie Karbonat produzierende Taxa wurden in den letzten 10 Jahren von den Azoren, Madeira, Kanaren und den Kapverden beschrieben. Allein die östlichste Azoreninsel Santa Maria wartet mit einer Vielfalt an fossilführenden Sedimenten auf: neben miozän-pliozänen Rotalgenkalken, Muschelschillen sowie Vergesellschaftungen von Großforaminiferen und Pteropoden (planktonische Schnecken) finden sich auch pleistozäne Brandungshohlkehlen mit diversen Molluskenfaunen an



**Abb. 7: Mittelmiozäne Rhodolith-Bank auf der Insel Porto Santo (Madeira-Archipel)**  
(Foto: C. Marques da Silva)



**Abb. 8: Hauptsächlich aus Rotalgenfragmenten bestehende, pleistozäne Dünen auf der Insel Maio (Kapverden)**  
(Foto: M. Johnson)

verschiedenen Stellen rund um die Insel (Ávila et al. 2015). Spurenfossilien kommen dort ebenso zahl- wie artenreich und in bester Erhaltung vor (Abb. 6). Fossile Riffe (Madeira), spektakuläre Aufschlüsse von mächtigen Rhodolith-Bänken (Madeira; Abb. 7) und äolischen Kalksanden (Kanaren, Kapverden; Abb. 8) tragen zur Diversität der Insel-Karbonate bei.

Die Reinheit der Kalke variiert stark, meist ist jedoch ein hoher Anteil an fein- bis grobkörnigen vulkanischen Sedimenten vorhanden. Hauptkarbonatproduzenten sind, auf den Azoren wie anderswo, inkrustierende Kalkrotalgen und Mollusken, mit geringeren Anteilen von Echiniden, Balaniden, Bryozoen, Serpuliden und benthischen Foraminiferen. Der typische Karbonat-

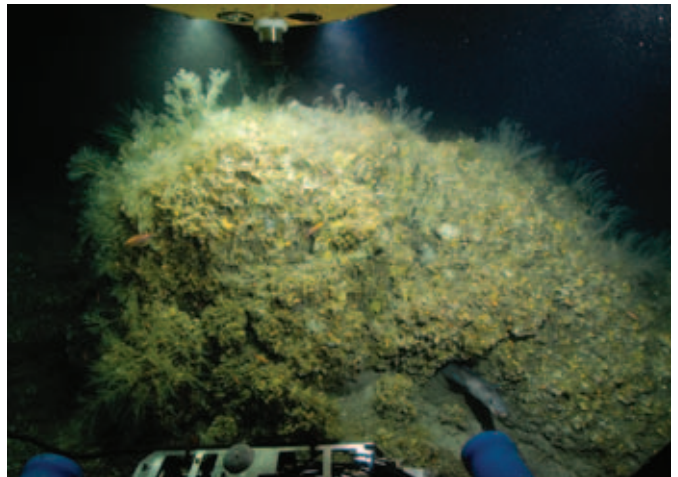
körper auf vulkanischen Inseln ist aufgrund der häufigen Eruptionen und Massenbewegungen nur wenige Meter mächtig. Auch die laterale Ausdehnung ist oft begrenzt, da die Sedimente häufig in kleinräumigen Depressionen abgelagert wurden, wobei sich auf größeren Plattformen auch ausgedehnte Schichtpakete bilden konnten, die über mehrere Kilometer Länge aufgeschlossen sind. Unter den subtropischen Umweltbedingungen Makaronesiens bildeten koralline Rotalgen in den meisten Fällen die Basis der Karbonatkörper. Zunächst wachsen die Rotalgen laminar auf der submarinen Lava, bevor zunehmend Rhodolithe, also im bewegten Wasser entstandene Rotalgenknollen, gebildet werden (Abb. 7). Erst bei anhaltender Transgression



**Abb. 9:** Rezenten Karbonatse-  
diment aus 150 m Tiefe vor der  
Insel Faial (Azoren), bestehend  
aus Bryozoen, Bivalven und der  
inkrustierenden Foraminifere  
Miliacina (Foto: M. Wisshak)



**Abb. 10:** Austernbioherm in  
150 m Tiefe auf der Insel Faial  
(Azoren) (Foto: M. Wisshak)



werden diese Pionierarten im Hangenden von einer diversen heterotrophen Fauna abgelöst. Wie die Sukzession und Karbonatproduktion von sessilem Benthos heutzutage auf den Azoren qualitativ und quantitativ vonstatten geht, wenn neues Substrat in eine bestehende Biozönose eingebracht wird, wurde vor kurzem in einem Besiedlungsexperiment untersucht (Wisshak et al. 2010, 2011, 2015). Mittels Besiedlungsplattformen, die über zwei Jahre vor der Insel Faial an mehreren Stationen vom Intertidal bis in 500 m Tiefe ausgesetzt wurden, konnten die Biodiversität der Karbonatproduzenten und -destru-

enten sowie die Menge an produziertem und bioerodiertem Karbonat ermittelt werden (Abb. 5). Obwohl sich die Arten zwischen den fossilen und den heutigen Vergesellschaftungen bis auf wenige Ausnahmen unterscheiden, sind die an der Karbonatproduktion beteiligten höheren Taxa in etwa dieselben. Bivalven, Serpuliden, Balaniden und Bryozoen sind für den größten Teil des produzierten Karbonats verantwortlich (Abb. 9). Bryozoen stellen auch auf den künstlichen Besiedlungsplattformen die artenreichste Gruppe. Die höchsten Raten der Karbonat(bio)-erosion von mehr als einem halben Kilogramm



**Abb. 11:** Das Ende einer Karbonatbank: historischer Kalkabbau auf Santa Maria (Azoren) (Foto: S. Ávila)

pro Quadratmeter und Jahr wurden im Brandungsbereich ermittelt, während die höchste Karbonatproduktion von rund einem Kilogramm pro Quadratmeter und Jahr in der tieferen euphotischen Zone in 60 bis 150 m Wassertiefe gemessen wurde. Über das gesamte untersuchte Tiefentranssekt hinweg wurde eine Karbonatproduktion von 277 kg pro Meter Küstenlinie und Jahr ermittelt, dem eine Bioerosionsrate von nur 55 kg gegenübersteht; netto liegt also eine stattliche Karbonatproduktion vor.

Besonders oberhalb der Sturmwellenbasis, die in einigen exponierten Bereichen der Azoren in über 100 m Tiefe liegt, verhindern Wellenenergie und abrasives vulkanisches Sediment auf ozeanischen Inseln eine Ansiedelung von aufrecht wachsenden Karbonatproduzenten. Folglich sind dreidimensionale und langlebige Bioherme nur in größeren Tiefen anzutreffen, wie etwa die von der Auster *Neopycnodonte cochlear* vor Faial gebildeten Riffe in 60 bis 200 m Tiefe (Abb. 10). Erst wenn die Insel durch Brandung erodiert ist und eine Plattform gebildet wurde, kann sich auf diesen Guyots relativ reines Karbonat ablagern, da der terrigene Eintrag fehlt. Biogenes Sediment aus Plankton und Benthos (Oktokorallen, azooxanthellate Hexakorallen, Mollusken, Bryozoen, Serpuliden, Echinodermaten) kann so über Jahrmillionen eine stattliche Mächtigkeit erreichen. So finden sich auf dem miozänen Pla-

teau der Großen Meteorbank karbonatische Sedimente von 450 bis 600 Metern Mächtigkeit. Von den Flanken der ältesten Seeberge im östlichsten Atlantik lassen sich mit ein wenig Glück auch mesozoische Sedimente per Dredge zutage fördern oder auf dem Top erbohren, deren Fossilinhalt sich mitunter bei der Bestimmung des Alters der Seeberge als nützlich erweist (Geldmacher et al. 2006).

### Kultur und Konservation

Die Karbonate der Azoren hatten seit der Besiedlung der Inseln durch den Menschen hohe praktische Bedeutung und waren ein begehrter Rohstoff. Selbst Vorkommen an den nur schwer zugänglichen Steilküsten wurden systematisch abgebaut, so dass heutzutage stellenweise nur noch Rudimente der ehemals ausgedehnten Kalkbänke existieren (Abb. 11). Der Kalk wurde für die Zementproduktion und als Außenfarbe für die Häuser der frühen Siedler benötigt und als Dünger genutzt.

Heute haben die Kalke für den Tourismus eine nicht zu vernachlässigende Relevanz. Die meisten Besucher der Makaronesischen Inseln sind an der Natur und Naturgeschichte der Inseln interessiert, so dass sich der Ausbau von Geotrails und Informationszentren lohnt. Auf Santa Maria sind kürzlich, in enger Kooperation mit lokalen Politikern, der Tourismusbranche und

unter Einbindung der Bevölkerung, solche Geotrails entstanden (Abb. 12), und auch per Bootstour können die teils mit spektakulären Fossilien aufwartenden Aufschlüsse an der schroffen Küste der Insel erkundet werden. Außerdem wurden mehrere allgemeinverständliche Bücher und Bildbände über die Geologie und Paläontologie der Insel veröffentlicht. Die wissenschaftliche Unterstützung der lokalen Museen und die Ausbildung der örtlichen Naturführer und -vermittler sind ein weiterer Aspekt dieses Projekts. Darwins Vermächtnis ist also nicht rein wissenschaftlich, sondern schlägt sich ebenso in einem hohen Geopotential nieder, welches durch die Inseln vermehrt touristisch erschlossen wird. Nachdem die Diversität und Fragilität der Tiefseefaunen zunehmend ins Licht der Öffentlichkeit gerückt wird, ist auch das Einrichten von Schutzgebieten unter Wasser inzwischen verstärkt worden. In einigen ausgewiesenen Gebieten der Azoren und an mehreren Seebergen ist bereits das Fischen mit Grundschleppnetzen untersagt. An vielen Stellen kommen diese Maßnahmen allerdings zu spät: vor kurzem aufgenommene Videos vom Top der Großen Meteorbank zeigen die großflächige und langfristige Zerstörung des Benthos durch die Grundschleppnetzfisherei.

## Ausblick

Besonders aufgrund der interdisziplinären Zusammenarbeit, die Vulkanologen mit Biologen und Paläontologen zusammenbrachte, hat die Erforschung der Naturgeschichte der Makaronesischen Inseln in den letzten Jahren einen deutlichen Schritt nach vorn gemacht. Anders als die Untersuchung der Seeberge, die aufgrund der technischen Anforderungen nur mit großem finanziellen wie logistischem Aufwand in internationalen (EU-)Projekten durchgeführt werden kann, ist die Erforschung der Inselgeologie meist auf den beharrlichen Einsatz einzelner Personen vor Ort zurückzuführen. Auf den Azoren ist dies, auch und besonders dank der langfristigen finanziellen und logistischen Unterstützung durch die Regierung der Azoren und des Bürgermeisters von Vila do Porto, in vorbildli-



**Abb. 12: Neu eingerichteter Geotrail auf Santa Maria (Azoren) (Foto: B. Berning)**

cher Weise gelungen, so dass die Arbeiten an den fossilen Karbonaten von Santa Maria bereits weit fortgeschritten sind. Aber auch auf den anderen Archipelen wird aktiv an dem Zusammenspiel zwischen vulkanischer Inselbildung und der Nutzung des neu entstandenen Lebensraumes durch marine Organismen geforscht.

Mit der noch ausstehenden taxonomischen Revision der verschiedenen Organismengruppen werden sich die marine Insel-Biogeographie und -Klimageschichte während des Neogens zukünftig detailliert rekonstruieren lassen. Aufgrund der weiten geographischen Verteilung der Inselgruppen und der höchst unterschiedlichen Entfernung zum kontinentalen Schelf lassen sich latitudinale wie longitudinale klimatologische und biogeographische Gradienten analysieren. Die Untersuchung der rezenten Sedimente und der Karbonat bildenden Organismen (welche Organismen unter welchen Bedingun-

gen wieviel Karbonat produzieren) hinkt der Erforschung der fossilen Äquivalente allerdings fast ein wenig hinterher. Auch die geographische Verbreitung der einzelnen Arten vieler Organismengruppen ist noch weit davon entfernt, verstanden zu sein. Besonders der Endemismus und die Konnektivität der Populationen zwischen Seebergen und Inseln sollte, vor allem mit Hilfe von genetischen Analysen, rasch das Ziel weiterer Untersuchungen sein, um die Ausweisung von Meeresschutzgebieten wissenschaftlich zu stützen und voranzutreiben. Selbst die eigentlich triviale Kartierung des Meeresbodens hat praktischen Nutzen, zum Beispiel um damit Unfälle wie diesen vermeiden zu helfen: Im Jahr 2005 kollidierte das Atom-U-Boot *USS San Francisco* bei einer Geschwindigkeit von ca. 35 Knoten (~65 km/h) im westlichen Pazifik mit einem nicht kartierten Seeberg ...

### Ausgewählte Literatur

- Ávila, S.P., Goud, J. & de Frias Martins, A.M. (2012): *Patterns of diversity of the Rissoidae (Mollusca: Gastropoda) in the Atlantic and the Mediterranean region*. - *Sci. World J.*, 2012, 164890.
- Ávila, S.P., Madeira, P., Mendes, N., Rebelo, A.C., Medeiros, A., Gomes, C., García-Talavera, F., da Silva, C.M., Cachão, M., Hillaire-Marcel, C. & de Frias Martins, A.M. (2008): *Mass extinctions in the Azores during the last glaciation: fact or myth?* - *J. Biogeogr.*, 35, 1123–1129.
- Ávila, S.P., Melo, C., Silva, L., Ramalho, R.S., Quartau, R., Hipólito, A., Cordeiro, R., Rebelo, A.C., Madeira, P., Rovere, A., Hearty, P.J., Henriques, D., da Silva, C.M., de Frias Martins, A.M. & Zazo, C. (2015): *A review of the MIS 5e highstand deposits from Santa Maria Island (Azores, NE Atlantic): palaeobiodiversity, palaeoecology and palaeobiogeography*. - *Quat. Sci. Rev.*, 114, 126–148.
- Ávila, S.P., Ramalho, R.S., Habermann, J., Quartau, R., Kroh, A., Berning, B., Johnson, M.E., Kirby, M.X., Zanon, V., Titschack, J., Goss, A., Rebelo, A.C., Melo, C., Madeira, P., Cordeiro, R., Meireles, R., Bagaço, L., Hipólito, A., Uchman, A., da Silva, C.M., Cachão, M. & Madeira, J. (online, im Druck): *Palaeoecology, taphonomy, and preservation of a lower Pliocene shell bed (coquina) from a volcanic oceanic island (Santa Maria Island, Azores, NE Atlantic Ocean)*. - *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*; doi: 10.1016/j.palaeo.2015.04.015.
- Geldmacher, J., Hoernle, K., Klügel, A., van den Bogaard, P., Wombacher, F. & Berning, B. (2006): *Origin and geochemical evolution of the Madeira-Tore Rise (eastern North Atlantic)*. - *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 111, B09206.
- Johnson, M.E., Baarli, B.G., Cachão, M., da Silva, C.M., Ledesma-Vázquez, J., Mayoral, E.J., Ramalho, R.S. & Santos, A. (2012): *Rhodoliths, uniformitarianism, and Darwin: Pleistocene and recent carbonate deposits in the Cape Verde and Canary archipelagos*. - *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 329, 83–100.
- Ramalho, R., Helffrich, G., Cosca, M., Vance, D., Hoffmann, D. & Schmidt, D. (2010): *Episodic swell growth inferred from variable uplift of the Cape Verde hotspot islands*. - *Nature Geosci.*, 3, 774–777.
- Ramalho, R., Helffrich, G., Madeira, J., Cosca, M., Quartau, R., Thomas, C., Hipólito, A. & Ávila, S.P. (2014): *The emergence and evolution of Santa Maria Island (Azores) – the conundrum of uplifting islands revisited*. - *AGU Fall Meeting 2014, Abstracts*, V11B-4697.
- Ramalho, R.S., Quartau, R., Trenhaile, A.S., Mitchell, N.C., Woodroffe, C.D. & Avila, S.P. (2013): *Coastal evolution on volcanic oceanic islands: A complex interplay between volcanism, erosion, sedimentation, sea-level change and biogenic production*. - *Earth-Sci. Rev.*, 127, 140–170.
- Wisshak, M., Berning, B., Jakobsen, J. & Freiwald, A. (2015): *Temperate carbonate production: biodiversity of calcareous epiliths from intertidal to bathyal depths (Azores)*. - *Mar. Biodiv.*, 45, 87–112.
- Wisshak, M., Form, A., Jakobsen, J. & Freiwald, A. (2010): *Temperate carbonate cycling and*



*water mass properties from intertidal to bathyal depths (Azores). – Biogeosciences, 7, 2379-2396.*

Wisshak, M., Tribollet, A., Golubic, S., Jakobsen, J. & Freiwald, A. (2011): *Temperate bioerosion: ichnodiversity and biodiversity from intertidal to bathyal depths (Azores). - Geobiology, 9, 492–520.*

<sup>1</sup> Oberösterreichisches Landesmuseum, Geowissenschaftliche Sammlungen, 4060 Leonding, Österreich

<sup>2</sup> Departamento de Biologia, Universidade dos Açores, 9501-801 Ponta Delgada, Portugal

<sup>3</sup> Senckenberg am Meer, Südstrand 40, 26382 Wilhelmshaven

<sup>4</sup> School of Earth Sciences, University of Bristol, Queens' Road, Bristol BS81RJ, UK